

В.Г. Аввакумов, Л.Б. Терешкевич, Т.М. Червінська  
Омський державний університет шляхів сполучення  
Вінницький національний технічний університет

## ПРО ПОКАЗНИКИ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ БСК НА НЕСИМЕТРІЮ РЕЖИМУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

© Аввакумов В.Г., Терешкевич Л.Б., Червінська Т.М., 2010

Досліджені особливості зміни показників, якими прийнято оцінювати несиметрію режиму, у разі ввімкнення БСК симетричного виконання до вузла мережі з несиметричною напругою.

**Ключові слова:** несиметрія напруги, втрати активної потужності, батарея статичних конденсаторів.

**Particularities of the factors change which is accepted to estimate unsymmetry mode if static condensers battery are connected to node with asymmetric voltage are investigated.**

**Keywords:** asymmetry of the voltage, watt losses, battery of static condensers.

### Постановка задачі

Для оцінювання як існуючого стану якості електроенергії, так і ефективності використання технічних засобів насамперед використовується система показників, яка визначена ГОСТ 13109-97 [1]. Несиметрія напруги за стандартом нормується двома показниками: коефіцієнтом несиметрії напруги по зворотній послідовності –  $k_{2U}$  та нульовій –  $k_{0U}$ , під якими розуміється відношення напруги зворотної послідовності –  $U_2$  та нульової –  $U_0$  до напруги прямої послідовності –  $U_1$ . Для  $k_{2U}$  та  $k_{0U}$ , як і для інших показників, визначені допустимі значення, які встановлені з технічних міркувань.

Як наближені величини, ГОСТ 13109-97 дозволяє визначати:

$$k_{2U} = \frac{U_2}{U_H};$$

$$k_{0U} = \frac{U_0}{U_H},$$

де  $U_H$  – номінальна напруга мережі.

Іноді для обґрунтування технічних рішень використовують такі параметри режиму, як напруги зворотної та нульової послідовностей. У задачах проектування їх обмежують значеннями, яким відповідають нормовані  $k_{2U}$  та  $k_{0U}$  або більш жорсткими вимогами технології. За критерій ефективності можна приймати додаткові втрати активної потужності, зумовлені несиметрією режиму –  $\Delta P$  [2].

Природно, що реалізація будь-яких технічних рішень, які зменшують (або збільшують) збитки від несиметрії електричного режиму повинна позначатись відповідно на зміні значення показника, що використовується для оцінювання.

У розподільних мережах широко використовують батареї статичних конденсаторів (БСК) різного виконання – симетричні, тобто з однаковими параметрами на фазу, так і несиметричні, зокрема неповнофазні.

Можна припустити, що у вузлах з несиметричною напругою вони не тільки відчуватимуть вплив цієї напруги, але і самі впливатимуть на якість електроенергії.

Мета роботи встановити характер зміни показників, якими прийнято оцінювати несиметрію режиму електричної мережі, при під'єднанні БСК симетричного виконання до несиметричної напруги.

### Фізична сутність впливу БСК на несиметрію режиму

Для зниження активних втрат в електричних мережах використовуються керовані БСК симетричного виконання (потужності плеч кожної секції, що відповідають номінальним напругам, однакові). Ввімкнення такої БСК в умовах несиметрії напруги приводить до зростання напруги  $U_2$  у вузлі її під'єднання (при схемі з'єднання трикутником, далі схема 1) та напруг  $U_2$  і  $U_0$  (при схемі з'єднання зіркою з нулем, далі схема 2). За певних умов таке негативне явище повинно оцінюватись і контролюватись під час розрахунку вектора керування (параметрів керуючого впливу) [3].

Міжфазні (схема 1) та фазні (схема 2) потужності БСК при під'єднанні її до несиметричної напруги набувають різних значень. Додавка напруги, що створюється при цьому, також несиметрична і може бути розкладена на симетричні складові:

$$\Delta \mathcal{U}_1 = \frac{1}{3} \cdot \frac{\mathcal{U}_1^{\text{до}}}{U_{\text{нф}}^2} \cdot Z_1 \cdot \Delta Q_{\text{н}}; \quad (1)$$

$$\Delta \mathcal{U}_2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{\mathcal{U}_2^{\text{до}}}{U_{\text{нф}}^2} \cdot Z_2 \cdot \Delta Q_{\text{н}}; \quad (2)$$

$$\Delta \mathcal{U}_0 = \frac{1}{3} \cdot \frac{\mathcal{U}_0^{\text{до}}}{U_{\text{нф}}^2} \cdot Z_0 \cdot \Delta Q_{\text{н}}, \quad (3)$$

де  $\Delta \mathcal{U}_1$ ,  $\Delta \mathcal{U}_2$ ,  $\Delta \mathcal{U}_0$  – симетричні складові прямої, зворотної та нульової послідовності вектора добавки напруги, що має місце в результаті ввімкнення БСК;  $\mathcal{U}_1^{\text{до}}$ ,  $\mathcal{U}_2^{\text{до}}$ ,  $\mathcal{U}_0^{\text{до}}$  – вектор напруги прямої, зворотної та нульової послідовностей у вузлі під'єднання БСК (до реалізації керуючого рішення);  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_0$  – опори живильної мережі струмам прямої, зворотної та нульової послідовності;  $U_{\text{нф}}$  – номінальна фазна напруга у вузлі під'єднання БСК;  $\Delta Q_{\text{н}}$  – номінальна потужність БСК, що вмикається.

Відповідно напруги  $\mathcal{U}_1^{\text{після}}$ ,  $\mathcal{U}_2^{\text{після}}$ ,  $\mathcal{U}_0^{\text{після}}$ , що будуть мати місце після ввімкнення БСК, отримаємо так:

$$\mathcal{U}_1^{\text{після}} = \mathcal{U}_1^{\text{до}} + \Delta \mathcal{U}_1; \quad (4)$$

$$\mathcal{U}_2^{\text{після}} = \mathcal{U}_2^{\text{до}} + \Delta \mathcal{U}_2; \quad (5)$$

$$\mathcal{U}_0^{\text{після}} = \mathcal{U}_0^{\text{до}} + \Delta \mathcal{U}_0. \quad (6)$$

Розглянемо як змінюються показники, якими прийнято оцінювати несиметрію режиму, при ввімкненні БСК симетричного виконання до вузла мережі з несиметричною напругою.

### Зміна збитків від несиметрії режиму

Збитки від несиметрії мають низку складових [4]. Навіть для конкретного виробництва можна зробити лише наближену їх оцінку. Для виявлення характеру зміни збитків при ввімкненні БСК до уваги візьмемо лише збитки (їх відносне значення) від додаткових втрат активної потужності та скорочення терміну служби ізоляції для деякої реальної мережі з ізолюваною нейтраллю:

$$Z_* = \frac{Z^{\text{після}}}{Z^{\text{до}}}; \quad (7)$$

де  $Z^{\text{після}}$  – збитки після ввімкнення БСК;  $Z^{\text{до}}$  – збитки до ввімкнення БСК.

Отримані результати зображені в таблиці на графіках рис. 7–9 залежністю 1.

### Вплив БСК на значення додаткових втрат активної потужності та на напругу зворотної та нульової послідовностей

Дослідження додаткових втрат активної потужності проведено для схеми, зображеної на рис. 1, а отримані результати зображені на графіках залежністю 2, де

$$\Delta P_* = \frac{\Delta P_2^{\text{після}} + \Delta P_0^{\text{після}}}{\Delta P_2^{\text{до}} + \Delta P_0^{\text{до}}}; \quad (8)$$

$\Delta P_2^{\text{після}}$ ,  $\Delta P_0^{\text{після}}$  – додаткові втрати активної потужності, зумовлені струмами зворотної та нульової послідовностей, після ввімкнення додаткових секцій БСК;  $\Delta P_2^{\text{до}}$ ,  $\Delta P_0^{\text{до}}$  – вихідні значення додаткових втрат активної потужності, зумовлені струмами зворотної та нульової послідовностей, до ввімкнення додаткових секцій БСК.

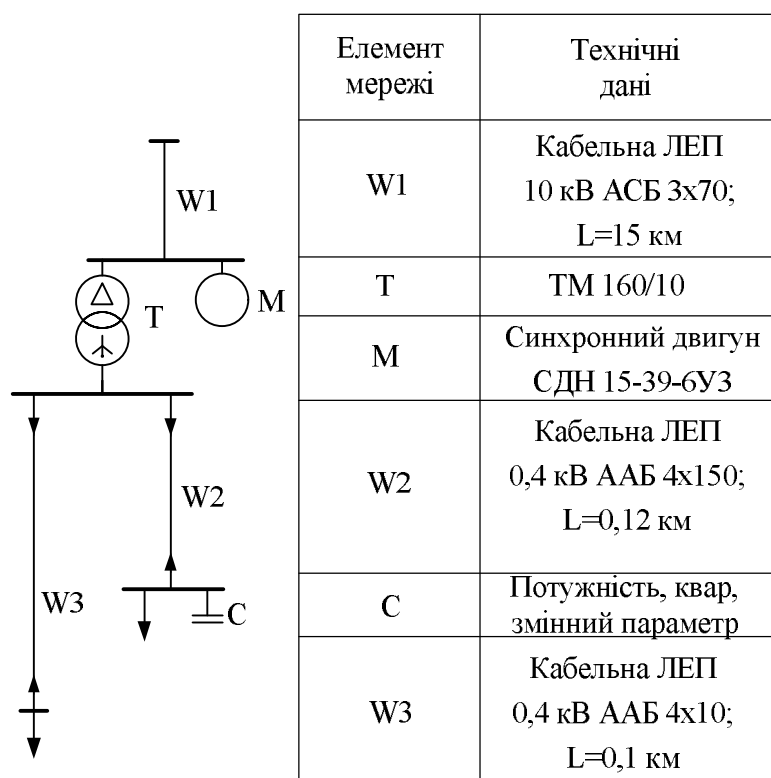


Рис. 1. Схема ділянки електричної мережі, яку досліджували

Для схеми, рис. 1, досліджена залежність напруги зворотної та нульової послідовностей від потужності БСК, яка працює в умовах несиметрії напруги. Результати дослідження зображені на графіках рис. 7–9 залежностями 3 –  $U_{2*}$  та 4 –  $U_{0*}$ , де

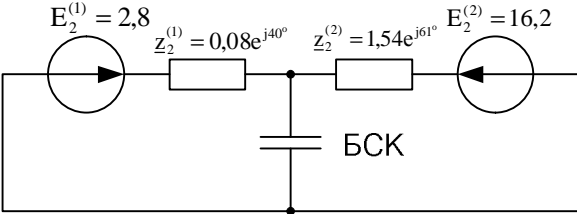
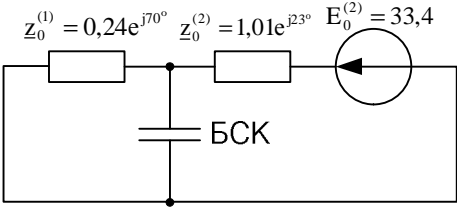
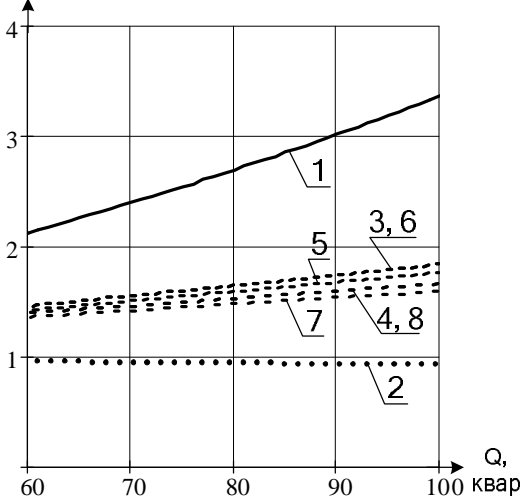
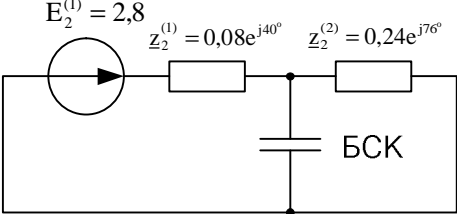
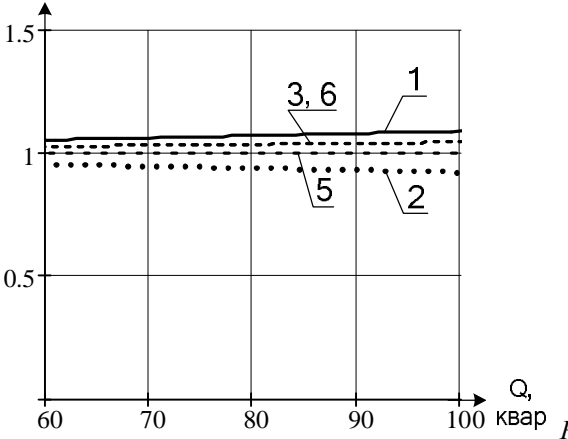
$$U_{2*} = \frac{U_2^{\text{після}}}{U_2^{\text{до}}}; \quad (9)$$

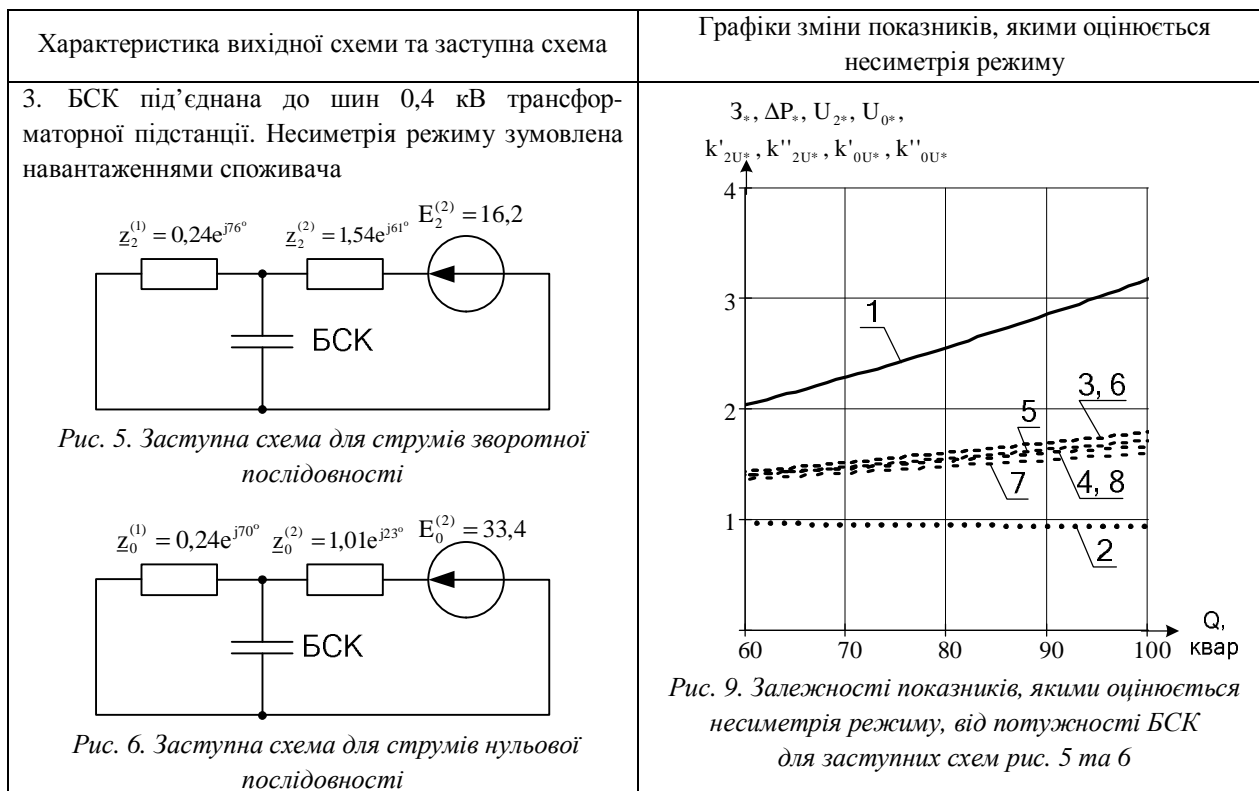
$U_2^{\text{після}}$  – напруга зворотної послідовності у вузлі під'єднання БСК після її ввімкнення;  $U_2^{\text{до}}$  – вихідне значення напруги зворотної послідовності у вузлі під'єднання БСК до її ввімкнення;

$$U_{0*} = \frac{U_0^{\text{після}}}{U_0^{\text{до}}}; \quad (10)$$

$U_0^{\text{після}}$  – напруга нульової послідовності у вузлі під'єднання БСК після її ввімкнення;  $U_0^{\text{до}}$  – вихідне значення напруги нульової послідовності у вузлі під'єднання БСК до її ввімкнення.

## Аналіз характеру показників несиметрії електричного режиму

Характеристика вихідної схеми та заступна схема	Графіки зміни показників, якими оцінюється несиметрія режиму
<p>1. БСК під'єднується до шин 0,4 кВ трансформаторної підстанції. Несиметрія режиму зумовлена несиметричними навантаженнями як в мережах живлення так і в мережах споживача.</p>  <p>Рис. 2. Заступна схема для струмів зворотної послідовності:</p> <p><math>E_2^{(1)}</math>, <math>E_2^{(2)}</math> – еквівалентні ЕРС зворотної послідовності в мережах живлення та в розподільних мережах, В; <math>Z_2^{(1)}</math>, <math>Z_2^{(2)}</math> – опори живильної та розподільних мереж струмам зворотної послідовності, Ом</p>  <p>Рис. 3. Заступна схема для струмів нульової послідовності:</p> <p><math>E_0^{(2)}</math> – еквівалентна ЕРС нульової послідовності в розподільних мережах, В; <math>Z_0^{(1)}</math>, <math>Z_0^{(2)}</math> – опори живильної та розподільних мереж струмам нульової послідовності, Ом</p>	<p><math>3_*, \Delta P_*, U_{2*}, U_{0*}, k'_{2U*}, k''_{2U*}, k'_{0U*}, k''_{0U*}</math></p>  <p>Рис. 7. Залежності показників, якими оцінюється несиметрія режиму, від потужності БСК для заступних схем рис. 2 та 3:</p> <p>1 – залежність <math>3_*(Q)</math>;  2 – залежність <math>\Delta P_*(Q)</math>;  3 – залежність <math>U_{2*}(Q)</math>;  4 – залежність <math>U_{0*}(Q)</math>;  5 – залежність <math>k'_{2U*}(Q)</math>;  6 – залежність <math>k''_{2U*}(Q)</math>;  7 – залежність <math>k'_{0U*}(Q)</math>;  8 – залежність <math>k''_{0U*}(Q)</math>.</p>
<p>2. БСК під'єднана до шин 10 кВ трансформаторної підстанції. Несиметрія режиму зумовлена ЕРС зворотної послідовності в мережах живлення</p>  <p>Рис. 4. Заступна схема для струмів зворотної послідовності</p>	<p><math>3_*, \Delta P_*, U_{2*}, k'_{2U*}, k''_{2U*}</math></p>  <p>ис. 8. Залежності показників, якими оцінюється несиметрія режиму, від потужності БСК для заступної схеми рис. 4</p>



Із розгляду рис. 7–9 випливає, що показники несиметрії режиму залежать від потужності БСК.

### Зміна коефіцієнтів несиметрії напруги у разі ввімкнення БСК

Розглянемо зміну  $k_{2U}$  та  $k_{0U}$  для випадків, коли вони визначені як відношення відповідних напруг до напруги  $U_1$  (далі вони позначені  $k'_{2U}$ ;  $k'_{0U}$ ), так і до напруги  $U_H$  (далі –  $k''_{2U}$ ;  $k''_{0U}$ ). Якщо прийняти, що  $z_1 = z_2$ , то, взявши до уваги (1); (2) та (4); (5), для випадку заступної схеми рис. 4 отримаємо

$$k'_{2U*} = \frac{k'_{2U}^{\text{після}}}{k'_{2U}^{\text{до}}} = 1, \quad (11)$$

$k'_{2U}^{\text{після}}$ ;  $k'_{2U}^{\text{до}}$  – коефіцієнти несиметрії напруги по зворотній послідовності після та до ввімкнення БСК.

Фізично це пояснюється тим, що при ввімкненні БСК одночасно із додавкою напруги зворотної послідовності має місце додавка напруги прямої послідовності, відносні значення яких однакові. Отже, якщо технічне рішення змінює (зміна із однаковими знаком та значенням) напругу зворотної та прямої послідовностей (як у випадку ввімкнення БСК в заступній схемі рис. 4), то показник  $k'_{2U}$  не можна використати для кількісного оцінювання впливу на режим зворотної послідовності. Деяке спотворення відбувається під час оцінювання впливу за показником  $k'_{2U}$  і в заступних схемах рис. 2 та рис. 5.

Оцінка впливу на режим нульової послідовності, що має місце при ввімкненні БСК, за допомогою  $k'_{0U}$  буде спотвореною також, але оскільки  $z_0 \neq z_1$ , то завжди  $k'_{0U}^{\text{після}} \neq k'_{0U}^{\text{до}}$ :

$$k'_{0U*} = \frac{k'_{0U}^{\text{після}}}{k'_{0U}^{\text{до}}}; \quad (12)$$

$$k''_{0U*} = \frac{k'_{0U}{}^{\text{після}}}{k'_{0U}{}^{\text{до}}}; \quad (13)$$

$k'_{0U}{}^{\text{після}}; k'_{0U}{}^{\text{до}}; k'_{0U}{}^{\text{після}}; k'_{0U}{}^{\text{до}}$  – значення  $k'_{0U}$  та  $k'_{0U}$  після та до ввімкнення БСК.

Відзначимо, що у цьому випадку, на значення показника  $k'_{0U}$  впливає зміна напруги  $U_1$ , яка не характеризує режим нульової послідовності. Тому  $k'_{0U}$  як і  $k'_{2U}$  неадекватно оцінюють ступінь зміни несиметрії режиму і використовувати їх для оцінювання результатів реалізації технічного рішення можна лише із врахуванням цієї обставини.

Графіки зміни показників  $k'_{2U*}$ ,  $k''_{2U*}$ ,  $k'_{0U*}$ ,  $k''_{0U*}$  зображені на рис. 7–9 відповідно прямими 5, 6, 7, 8, де

$$k''_{2U*} = \frac{k'_{2U}{}^{\text{після}}}{k'_{2U}{}^{\text{до}}}, \quad (14)$$

$k'_{2U}{}^{\text{після}}; k'_{2U}{}^{\text{до}}$  – коефіцієнти несиметрії напруги  $k'_{2U}$  після та до ввімкнення БСК.

### Аналіз результатів

Коли БСК під'єднані у вузлах віддалених від несиметричних навантажень, показник  $\Delta P_*$  не відображає негативні впливи на електричні режими. Із зростанням несиметрії напруги втрати  $\Delta P_*$  зменшуються (рис. 7–9). Ця обставину можна враховувати під час оцінювання зменшення загальних втрат потужності при ввімкненні БСК, але це доцільно лише коли несиметрія режиму залишається в допустимих межах.

На практиці можуть складатися електричні режими, коли враховуючи технічні або технологічні вимоги, необхідно обмежувати зростання несиметрії при ввімкненні БСК симетричного виконання. Забезпечити ці вимоги можна, якщо користуватися такими показниками, що оцінюють несиметрію режиму, як  $U_2$  і  $U_0$  або  $k'_{2U}$  та  $k'_{0U}$  (якщо секція БСК вмикається за схемою 2) чи  $U_2$  або  $k''_{2U}$  (якщо за схемою 1). Зазначені показники загалом відображають тенденції зміни збитків від несиметрії режиму.

### Висновки

1. Для оцінювання впливу БСК симетричного виконання на напруги зворотної та нульової послідовності електричної мережі можуть бути використані такі показники: коефіцієнти несиметрії напруги по зворотній та нульовій послідовності, абсолютні величини напруг зворотної та нульової послідовності.

2. Коефіцієнти несиметрії напруг мають визначатись як відношення відповідних напруг до напруги номінальної. Зміна числових значень цих показників при ввімкненні БСК зумовлена винятково параметрами, що характеризують несиметрію режиму ( $U_2$ ,  $U_0$ ).

3. Методика, яка наведена в статті, може бути використана і під час аналізу впливу несиметричних БСК на режим мережі.

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Взамен ГОСТ 13109-87; Введ. 01.01.00. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 31 с. 2. Аввакумов В.Г. Технично-економическая оценка качества электроэнергии в промышленности / В.Г. Аввакумов, Г.Л. Багиев, Д.М. Воскобойников. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1977. – 132 с. 3. Терешкевич Л.Б. Керування реактивною потужністю в умовах несиметрії напруги мережі / Л.Б. Терешкевич, Т.М. Червінська // Промелектро. – 2008. – № 5. – С. 16–20. 4. Жежеленко И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, М.Л. Рабинович, В.М. Божко. – К.: Техніка, 1981. – 160 с.