

У статті запропоновано методику оцінювання ефективності передачі електричної енергії крізь сучасні СІП-лінії електропередавання розподільних електричних мереж в умовах різкозмінного, нелінійного та несиметричного режиму роботи споживачів електричної енергії. Застосування розробленої методики дозволяє оцінити рівень додаткових втрат електричної енергії з метою зменшення цих втрат та підвищення енергоефективності передачі електричної енергії крізь мережу

Ключові слова: енергоефективність, енергозбереження, втрати електричної енергії, несиметричні та нелінійні режими електроспоживання, гармоніки

В статье предложена методика оценивания эффективности передачи электрической энергии по современным СИП-линиям электропередач в распределительных электрических сетях в условиях резкопеременного, нелинейного и несимметричного режима работы потребителей электрической энергии. Применение разработанной методики позволяет оценить уровень дополнительных потерь электрической энергии с целью уменьшения этих потерь и повышения энергоэффективности передачи электрической энергии в сети

Ключевые слова: энергоэффективность, энергосбережение, потери электрической энергии, несимметричные и нелинейные режимы электропотребления, гармоника

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СІП-ЛІНІЯХ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

В. І. Романовський
Кандидат технічних наук, доцент*
E-mail: vrmsumy@ukr.net

М. В. Качан
Аспірант*

E-mail: ftf-adamant@yandex.ru
*Кафедра електроенергетики
Сумський державний університет
вул. Римського-Корсакова, 2,
м. Суми, Україна, 40007

1. Вступ

Проблема енергозбереження в сучасних умовах є дуже важливою. Оскільки основним джерелом енергії має електрична енергія, яка живить промислових та побутових споживачів за допомогою розподільних електричних мереж, енерговтрати в таких мережах значною мірою визначають загальну енергоефективність живлення споживачів електричної енергії. Більшість заходів щодо підвищення енергоефективності передачі електричної енергії в розподільних електричних мережах значно підвищують показники енергозбереження в цілому [1].

Характерною особливістю сучасних розподільних мереж є те, що значна частина обладнання споживачів має у своєму складі випрямлячі, інвертори, перетворювачі частоти, агрегати безперебійного живлення та інше навантаження, вольт-амперні характеристики якого нелінійні. Наявність таких споживачів призводить до їх негативного впливу на загальну мережу змінного струму, що полягає в генерації вищих гармонійних складових струму і напруги [2].

Наявність вищих гармонійних складових струму і напруги в свою чергу підвищує вірогідність виникнення резонансних явищ у розподільній мережі, порушує роботу спеціальної обчислювальної техніки, пристроїв релейного захисту та автоматики, викликає прискорене старіння ізоляції електрообладнання, знижуючи тим самим надійність електропостачання

споживачів та підвищуючи втрати електричної енергії [3].

Таким чином, актуальною є проблема розробки теорії та методів розрахунку енергоефективності постачання електричної енергії в сучасних електричних мережах з урахуванням несиметричного, нелінійного та швидкозмінного характеру споживання електричної енергії сучасними споживачами.

2. Аналіз літературних джерел та постановка задачі

Проблема негативного впливу нелінійних навантажень на енергоефективність передавання електричної енергії у електричних мережах загальновідома, розглядалася великою кількістю науковців як в Україні, так і у всьому світі, зокрема у роботах Н. Akagi, В. Г. Кузнецова, Ю. Н. Вепріка, Ю. С. Железко.

З фізичної точки зору, при передаванні електричної енергії в електричній мережі відбуваються процеси енергообміну, які характеризуються не загальноприйнятими інтегральними, а миттєвими значеннями напруг, струмів та потужностей [4]. Визначення миттєвих напруг і струмів в системі не допускають різних тлумачень. Більш складним є визначення активних та реактивних потужностей, але їх розрахунок є дуже важливим для оцінювання саме енергоефективності передавання електричної енергії крізь мережу, оскільки з точки зору фізики, ефективність передавання

електричної енергії визначається відношенням втрат потужності до сумарної активної потужності, яку отримали споживачі електричної енергії:

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{P}, \quad (1)$$

де η – енергоефективність передавання електричної енергії; ΔP – втрати електричної енергії; P – активна потужність.

На жаль, у сучасних розподільних мережах України фактичні втрати електричної енергії при її передаванні у розподільних мережах складають 15–20 % при нормативному значенні 5 % [5], тому зменшення цього показника та, відповідно, підвищення фактичної енергоефективності хоча б до нормативного значення є дуже важливою та актуальною науковою і практичною задачею [6].

З точки зору фізики, миттєва активна потужність – це швидкість обміну енергією між споживачем та мережею. Позитивний знак миттєвої активної потужності відповідає напрямку потоку енергії від мережі до споживача, від’ємний знак миттєвої активної потужності відповідає напрямку потоку енергії від споживача до мережі. При цьому середня активна потужність за деякий інтервал часу визначається як інтеграл миттєвої активної потужності. Але не зважаючи на знак миттєвої активної потужності (позитивний чи негативний), у всіх випадках енергообміну (від мережі до споживача чи навпаки), цей процес супроводжується втратами електричної енергії.

При визначенні миттєвої реактивної потужності основною складністю є те, що “реактивна потужність”, як фізична величина, не існує. “Реактивні потужності” – це лише деякі математичні величини, що використовуються для розрахунків. Самих визначень реактивної потужності може бути багато. Більш того, при деяких визначеннях, наприклад, при визначенні Н. Akagi [7], розмірність поняття “реактивна потужність” взагалі не збігається з розмірністю потужності. З огляду на це, з позицій сучасних теорій потужності, некоректним є визначення середньої реактивної потужності в лінійних ланцюгах з синусоїдальними напругами при змішаному або реактивному навантаженні у вигляді інтегралу від миттєвої реактивної потужності.

Крім того, переважна більшість сучасних електроприймачів, що підключаються до розподільних мереж низької напруги, є однофазними і мають випадкові графіки навантажень [8]. Тому в будь-який момент часу в мережі спостерігається несиметрія навантажень по фазах і відповідна несиметрія струмів. При цьому виникає як несиметрія струмів, яка обумовлена нерівномірним підключенням електроприймачів по фазах (невипадкова несиметрія), так і несиметрія, яка викликана випадковими обставинами (імовірнісна несиметрія) [5].

У трифазній системі із симетричними напругами мережі несиметрія навантаження призводить до пульсацій миттєвих значень активних і реактивних потужностей, а також до виникнення реактивної потужності в колі із чисто активним навантаженням і миттєвої активної потужності в колі із чисто реактивним навантаженням. Ці процеси, безумовно, призводять до підвищення втрат електричної енергії та, відповідно, до зменшення енергоефективності електропостачання споживачів [9].

Однак, незважаючи на те, що фактично в сучасних розподільних електричних мережах немає сталих значень струмів, напруг та активних потужностей, а реактивна потужність взагалі є абстракцією, саме поняття інтегральних активної та реактивної потужностей покладені в основу існуючих методів розрахунку енергоефективності, наприклад, дуже широко застосовується такий показник, як коефіцієнт потужності [10]. Вважається, що для того, щоб процес передавання електричної енергії крізь розподільну мережу був максимально енергоефективним, коефіцієнт потужності повинен становити 0,95 або вище, навантаження на мережу повинно бути симетричним та рівномірним у часі. Вказаний метод оснований на інтегральних показниках потужності, не враховує несиметричний, нелінійний, пульсуючий характер миттєвих потужностей у сучасних розподільних мережах, тому, як наслідок, розрахунок втрат в мережі за вказаним методом дає результати дуже далекі від фактичного рівня втрат електричної енергії у мережі.

Проаналізувавши існуючі методики оцінки енергоефективності електропостачання споживачів у розподільних мережах, можна зробити висновок, що ці методики мають суттєві недоліки, а загалом теорія оцінювання енергоефективності постачання електричної енергії поки розроблена недостатньо. У літературі з цих питань розглядаються лише окремі сторони проблем. Причому найчастіше вони стосуються лише безпосередньо режимів роботи споживачів, складу та характеристик їх обладнання. Тим часом впровадження заходів, що підвищують надійність та якість електропостачання, впливають на якість електроенергії та економічність передачі електроенергії крізь електричні мережі.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є розробка методів оцінювання енергоефективності передачі електричної енергії крізь існуючі сучасні лінії електропередавання в розподільних електричних мережах з урахуванням впливу різко змінного, несиметричного та суттєво нелінійного характеру споживання електричної енергії обладнанням споживачів.

Задля вирішення поставленої мети необхідно встановити зв'язок між втратами електричної енергії в лініях електропередавання та режимом роботи споживачів електричної енергії. Оцінювання додаткових втрат електричної енергії, яке пов'язано з різко змінним, несиметричним та нелінійним характером споживання електричної енергії обладнанням споживачів повинно ґрунтуватися на параметрах електричної енергії, які можуть бути легко виміряні існуючим вимірювальним обладнанням.

4. Методика оцінювання втрат електричної енергії в лініях електропередавання

Сучасна електрична розподільна мережа зазвичай має номінальну напругу 0,4 кВ та живиться від підстанції 10/0,4 кВ, як це показано на рис. 1.

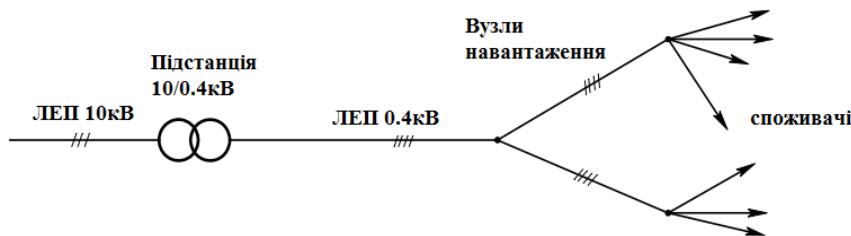


Рис. 1. Схема розподільної мережі

Сучасні лінії електропередавання (ЛЕП) виконуються або підземними кабельними лініями, або повітряними лініями з неізолюваними дротами, або повітряними лініями з самонесучим ізолюваним проводом (СІП). У будь-якому випадку, при передачі електричної енергії крізь ЛЕП, в ній виникають втрати потужності, наявність яких безпосередньо погіршує енергоефективність електропостачання споживачів електричної енергії.

Існуючі методики розрахунку втрат потужності в ЛЕП 0,4 кВ передбачають, що струми та напруги в мережі є синусоїдальними, а навантаження по кожній фазі є симетричним. Насправді, у сучасних умовах це не відповідає дійсності. Наприклад, на рис. 2 показані добові графіки зміни коефіцієнтів спотворення синусоїдальності K_I у реальній розподільній мережі 0,4 кВ. Коливання коефіцієнту спотворення синусоїдальності K_I впродовж доби складають 15–45 %, а середнє значення дорівнює 30 %, тобто можна вважати, що майже 10–15 % потужності в мережі споживається нелінійно, що саме й призводить до появи вищих гармонійних складових у струмі, який протікає крізь розподільну мережу.

Втрати напруги в ЛЕП 0,4кВ при симетричному навантаженні і незмінному струмі можна розрахувати за наступною формулою:

$$\Delta U = I(r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi)L, \quad (2)$$

де ΔU – втрати напруги в ЛЕП, В; I – сила струму у кожній фазі; L – довжина ЛЕП, км; r_0 – погонний активний опір лінії, Ом/км; x_0 – погонний індуктивний опір лінії, Ом/км; φ – кут зсуву між векторами струму та напруги, що визначається за допомогою коефіцієнта потужності $\cos \varphi$.

Відповідно, втрата активної потужності в такій ЛЕП визначається формулою (3):

$$\Delta P = \Delta U \cdot I = I^2 (r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi)L. \quad (3)$$

Індуктивний опір x_0 , залежить від взаємного розташування дротів ЛЕП, яке показано на рис. 3.

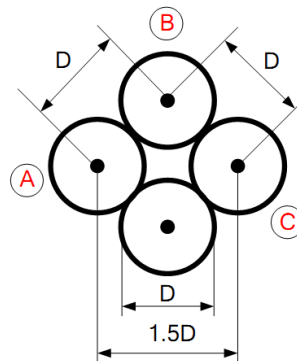


Рис. 3. Переріз СІП-4

Нескладні оцінки параметрів повітряних ліній, що виконані неізолюваним дротом та повітряних ліній, що виконані сучасним самонесучим ізолюваним проводом СІП показують, що повітряні лінії з ізолюваними дротами за своїми характеристиками істотно кращі звичайних ліній електропередачі і дійсно цілком порівнянні з кабельними лініями. Нехтуючи ефектом близькості, параметри повітряної лінії з ізолюваними дротами можна оцінити за відомою методикою визначення індуктивного опору трифазної повітряної лінії:

$$x_0 = \omega \left(4,6 \lg \frac{D}{R} + 0,5\mu \right) \cdot 10^{-4}, \quad (4)$$

де ω – кутова частота струму; D – відстань між фазами ЛЕП (для повітряних ліній СІП-4 відстань між дротами можна вважати рівною діаметру одного дроту, тобто $D=2R$); R – радіус дроту, яка без урахування товщини ізоляції (що складає для СІП-4 перерізом 16–120 мм² приблизно 1,0–1,7 мм) залежить від F – площі перерізу провідника, мм².

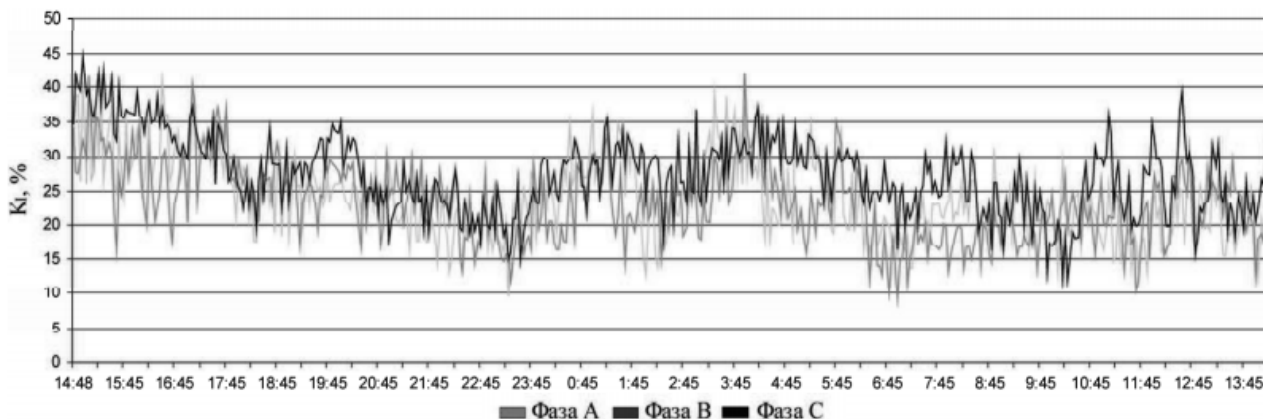


Рис. 2. Добові графіки зміни коефіцієнтів спотворення синусоїдальності струму в ЛЕП 0,4 кВ

Таким чином, для найбільш поширених повітряних ліній розподільних мереж перерізом 35 – 120 мм², виконаних дротом СІП-4, індуктивний опір x_0 практично не залежить від перерізу дроту (тобто від потужності повітряної лінії електропередач розподільної мережі) та складає:

$$x_0 \approx 0.144 \lg 2 + 0.016 = 0.06 \text{ Ом / км.} \quad (5)$$

Порівнявши індуктивний опір повітряної лінії СІП x_0 з його активним опором r_0 , який згідно довідкових даних залежить від перерізу дроту та для перерізу 35–120 мм² складає відповідно 0.9–0.25 Ом/км, можна зробити висновок, що індуктивним опором повітряної лінії СІП можна знехтувати. Окрім того, можна знехтувати власною ємністю дроту кожної фази, оскільки зазвичай дріт СІП розташовується високо над землею, а опори повітряної лінії зазвичай неметалеві.

Тому диференціальні рівняння для струмів та напруг у лінії електропередавання (6) та їх спрощена форма запису (7) для повітряної лінії СІП будуть мати більш спрощений вигляд, ніж для традиційної повітряної лінії, що дозволяє спростити розрахунки:

$$\begin{cases} r_i = -\frac{\partial u}{\partial l}, \\ 3C_M \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial i}{\partial l}, \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Delta u = r_i, \\ \Delta i = 3C_M \frac{\partial u}{\partial t}, \end{cases} \quad (7)$$

де C_M – ємність між будь-якими двома проводами фаз ЛЕП.

В цих рівняннях відсутня індуктивна складова, тому падіння миттєвої напруги Δu залежить лише від активного опору лінії r та сили струму i в ній. Падіння миттєвого струму Δi в повітряній лінії СІП наявне, оскільки залежить від взаємної ємності C_M між дротами. Падіння миттєвого струму залежить від швидкості зміни миттєвої напруги в кожній фазі, що дуже важливо у випадку різко змінного навантаження споживачів, наявності високого ступеня несинусоїдності напруги.

Взаємна ємність між будь-якими двома проводами фаз повітряної лінії СІП розраховується за формулою (8) та складає 0,20–0,25 мкФ/км для перерізу 35–120 мм²:

$$C_M = \frac{2\pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot L}{\ln \left(\frac{(R+2d)^2}{R^2} \right)}, \quad (8)$$

де R – радіус дроту без урахування ізоляції; d – товщина ізоляції (1,0–1,7 мм); L – довжина лінії електропередавання.

Миттєві втрати активної потужності для ЛЕП визначаються з урахуванням втрат на активному опорі при передачі основного потоку потужності споживачу та додаткових втрат за рахунок протікання додаткового струму Δi (9):

$$\Delta p = \Delta p_{\text{основні}} + \Delta p_{\text{додаткові}} = 3i^2 r + 3\Delta i^2 r. \quad (9)$$

Таким чином, додаткові втрати потужності, пов'язані з протіканням додаткового струму Δi залежать від взаємної ємності C_M між дротами ЛЕП та швидкості зміни миттєвої напруги в кожній фазі.

Задля оцінювання додаткових втрат потужності в лінії електропередавання, які залежать від швидкості зміни миттєвої напруги в кожній фазі пропонується використати наявний зв'язок між коефіцієнтом спотворення синусоїдальності K_I , який свідчить про режим споживання електричної енергії (до того ж цей коефіцієнт може бути легко виміряний за допомогою спеціальних приладів – аналізаторів якості електричної енергії, наприклад фірми Fluke) та швидкістю зміни миттєвої напруги. Швидкість зміни миттєвої напруги визначається насамперед наявністю вищих гармонійних складових напруг у кожній фазі, що визначається для кожної окремої гармонійної складової за допомогою формули (10):

$$\frac{\partial u_n}{\partial t} = u'(t) = A_n (\sin(n\omega t))' = A_n n\omega \cos(n\omega t), \quad (10)$$

де A_n – амплітуда n -ї гармонійної складової; n – порядковий номер гармонійної складової; ω – кругова частота мережі.

Таким чином, максимальне значення швидкості зміни напруги визначається, насамперед, амплітудою A_n та порядковим номером n гармонійної складової, тобто значеннями, які обов'язково наявні у результатах вимірювання показників якості електричної енергії (11):

$$\max \left(\frac{\partial u_n}{\partial t} \right) = A_n n\omega. \quad (11)$$

Таким чином, вимірявши за допомогою аналізатора якості електричної енергії амплітуду кожної гармонійної складової напруги у електричній мережі, можна оцінити додаткові втрати електричної енергії, які виникають в лініях електропередавання за рахунок наявності несинусоїдального характеру споживання електричної енергії споживачами електричної мережі (12):

$$\Delta p_{\text{додаткові}} = 3(3C_M A_n n\omega)^2 = 27(C_M A_n n\omega)^2. \quad (12)$$

Застосувавши формулу (12) до електричної мережі, добові графіки зміни коефіцієнтів спотворення синусоїдальності струму в який наведено на рис. 2, прийнявши взаємну ємність $C_M=0,20$ мкФ (для середньої довжини розподільної лінії електропередавання в Україні – 0,7 км), можна оцінити додаткові втрати електричної енергії, що показано на рис. 4. Загальні додаткові втрати електричної енергії, обумовлені несинусоїдним характером споживання електричної енергії споживачами, складають біля 7%.

Таким чином, додаткові втрати електричної енергії в лініях електропередавання, що обумовлені несинусоїдним характером споживання електричної енергії споживачами, мають доволі суттєву частку в усіх фактичних втратах електричної енергії, що спостерігаються в розподільних мережах України. Зменшення несинусоїдності споживання електричної енергії може суттєво зменшити втрати електричної енергії та відповідно підвищити енергое-

фективність передавання електричної енергії крізь розподільні мережі.

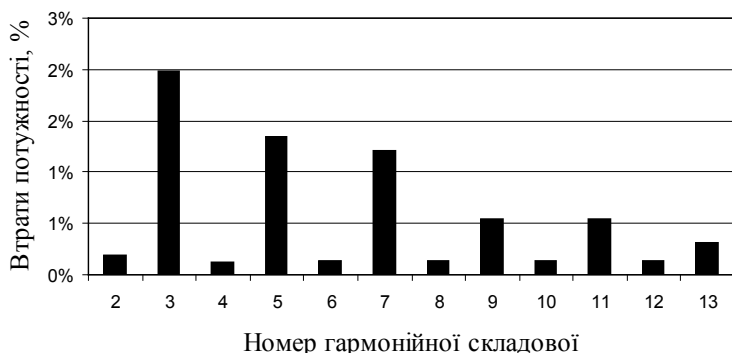


Рис. 4. Залежність втрат електричної енергії в лінії електропередавання від номера гармонійної складової струму

5. Висновки

Розглянуто фактори, які впливають на енергоефективність електропостачання в розподільних електричних мережах та існуючі методи її оцінювання. Жоден з існуючих методів, у тому числі методи оцінювання енергоефективності електропостачання, які базуються на визначенні інтегральних показників електричної енергії (інтегральна активна, реактивна та повна

потужності), не відповідають задачам знаходження причин погіршення енергоефективності електропостачання та мають суттєві недоліки, оскільки не відповідають сучасному характеру споживання електричної енергії обладнанням споживачів, яке характеризується різко змінними, несиметричними та суттєво нелінійними характеристиками.

Показано, що для повітряних ліній електропередавання розподільних електричних мереж, у яких використовуються самонесучі ізолювані проводи (СІП), найбільший вплив на енергоефективність передавання електричної енергії та якість електропостачання у них має падіння миттєвого струму у лінії, яке залежить від швидкості зміни миттєвої напруги в кожній фазі.

Запропоновано методику оцінювання додаткових втрат електричної енергії в лініях електропередавання, що обумовлені різко змінним, несиметричним та нелінійним характером споживання електричної енергії обладнанням споживачів. Показано, що такі додаткові втрати загалом можуть складати до 10 %, що збігається з різницею між фактичними та нормативними втратами електричної енергії в існуючих розподільних мережах України та дозволяє зрозуміти причини невідповідності фактичних втрат електричної енергії в розподільних мережах їх нормативним показникам.

Література

1. Кузнецов, В. Г. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях [Текст] / В. Г. Кузнецов, А. С. Григорьев, В. Б. Данилюк. – К. : Наукова думка, 1992. – 240 с.
2. Кузнецов, В. Г. Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения [Текст] / В. Г. Кузнецов, Э. Г. Куренный, А. П. Лютый. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 250 с.
3. Солдаткина, Л. А. Электрические сети и системы [Текст] / Л. А. Солдаткина. – М. : Энергия, 1998. – 216 с.
4. Перхач, В. С. Розрахунок струмів короткого замикання та неповнофазних режимів електроенергетичних систем у фазних координатах методом контурних струмів [Текст] / В. С. Перхач, М. С. Сегеда, Ю. О. Варецький // Технічна електродинаміка. – 1993. – № 4. – С. 67–68.
5. Железко, Ю. С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях [Текст] / Ю. С. Железко. – М.: НУ ЭНАС, 2002. – 280 с.
6. Овчинников, А. Потери электроэнергии в распределительных сетях 0,38–6 (10) кВ [Текст] / А. Овчинников // Новости ЭлектроТехники. – 2003. – № 1 – С. 15–17.
7. Akagi, H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning [Text] / H. Akagi, E. Watanabe, M. Aredes. – Wiley-IEEE Press. – 2007. – 379 p. doi:10.1002/0470118938
8. Веприк, Ю. Н. Методы моделирования режимов работы электрических систем с несимметрией и тенденции их развития [Текст] / Ю. Н. Веприк // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2010. – № 1. – С. 48–61.
9. Грицай, М. А. Мероприятия по повышению эффективности работы электрической сети [Текст] / М. А. Грицай // Региональные проблемы энергетики. – 2011. – № 3 (17). – С. 23–26.
10. Цицорин, А. Н. О потерях электрической энергии в линиях электропередач 0,4-10 кВ [Текст] / А. Н. Цицорин // Электрические станции. – 2011. – № 3 – С. 48–51.