

# АНАЛІЗ ВПЛИВУ НЕРІВНОМІРНОСТІ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

**С. П. Денисюк**

Доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри\*

E-mail: spdens@ukr.net

**Т. М. Базюк**

Аспірант

E-mail: klimbuck@ukr.net

\*Кафедра електропостачання

Інститут енергозбереження та

енергоменеджменту

Національний технічний університет

України «Київський політехнічний інститут»

вул. Борщагівська, 115/3,

м. Київ, Україна, 03056

*В статті проведено порівняльний аналіз рівномірного та нерівномірного (імпульсного) споживання електроенергії. Визначено недолік, яким володіє традиційний коефіцієнт потужності. Виведено значення нового коефіцієнта потужності, який враховує нерівномірність графіка споживання. Проаналізовано та систематизовано критерії оптимального відбору потужності*

*Ключові слова: нерівномірність споживання, критерії відбору потужності, розосереджена генерація, оптимізація*

*В статье проведен сравнительный анализ равномерного и неравномерного (импульсного) потребления электроэнергии. Определен недостаток, которым владеет традиционный коэффициент мощности. Выведено значение нового коэффициента мощности, который учитывает неравномерность графика потребления. Проанализированы и систематизированы критерии оптимального отбора мощности*

*Ключевые слова: неравномерность потребления, критерии отбора мощности, рассредоточенная генерация, оптимизация*

## 1. Вступ

Реструктуризація електроенергетики для інтеграції відновлюваних джерел енергії представляє нові можливості для електроенергетичних систем. Нестійкі джерела енергії, до яких відносяться відновлювальні джерела енергії, особливо вимагають стратегії зменшення наслідків нестійкої роботи, щоб підтримувати постійну потужність в електричній мережі [1 – 4].

Відомо, що втрати потужності мають мінімальне значення в симетричних режимах при незмінному в часі навантаженні. Несиметрія і нерівномірність навантаження в часі призводять до збільшення втрат. Окрім симетричного режиму незмінного навантаження можливий режим незмінного в часі несиметричного навантаження; змінного в часі симетричного навантаження; несиметричний режим змінного навантаження. Зрівнюючи втрати в цих режимах з втратами в базовому режимі, можна оцінити вплив на них різних факторів. Для такої оцінки необхідно отримати закономірність зміни в часі всіх симетричних складових струмів і еквівалентувати їх такими значеннями, які за вибраний інтервал часу дасть ті ж значення втрат енергії, що і змінні в часі [5].

## 2. Аналіз впливу нерівномірності споживання електроенергії в системі з постійним значенням коефіцієнта потужності

У теперішній час успішно вирішуються проблеми побудови систем обліку електроенергії за рахунок використання сучасних методик та алгоритмів вимірювання параметрів електроенергії. Сучасна інформацій-

но-вимірювальна техніка дозволяє інструментальну похибку інформаційних систем зменшити до наперед заданої величини. Однак у багатьох практичних випадках необхідно визначити і відобразити таку величину, яка б адекватно характеризувала картину енергоспоживання (кількісно та якісно) [1, 5 – 8]. Поряд із вимірюванням активної та реактивної енергії, останнім часом почали вимірювати й повну енергію [1, 6]. Це дозволяє отримати додаткові характеристики системи.

Сьогодні вимірювання здійснюються з допомогою індукційних та електронних лічильників кіловат-годин. Облік електроенергії в основному базується на методиках, в яких використовується поняття активної, реактивної та повної потужності (енергія являється інтегралом по часу від потужності) [7]. На сьогоднішній день більшість навантажень – нелінійні (силові електронні прилади типу джерела безперерійного живлення, частотно-регульований привід, керовані випрямлячі, навантаження, регульовані тиристорами, флуоресцентне освітлення з електронним баластом). Вони генерують вищі гармоніки, що викликають спотворення кривих напруги і струму, змінюють характеристики енергії і потребують збільшення потужності системи на величину, яка спричинила ці спотворення. В сучасних умовах традиційні методики обліку електроенергії недостовірно оцінюють процеси, які відбуваються в електричній мережі.

Вимірювальні прилади зазвичай калібрують при чисто синусоїдальній напрузі. Як наслідок, у них збільшується похибка при наявності вищих гармонік. Величина та напрям поширення гармонік напруги та струму є важливим фактором, оскільки знак похибки визначається напрямком гармонік. Похибки вимірювань, викликані вищими гармоніками, сильно

залежать від типу вимірювальної апаратури. Звичайні індукційні лічильники відображають завищені значення на декілька відсотків при наявності у споживача джерела спотворення. Такі споживачі виявляються автоматично оштрафовані за внесення спотворень в мережу, тому в їх власних інтересах встановити відповідне обладнання для усунення цих спотворень. Однак іноді штрафують й тих, хто не винен.

Системи вимірювання, які були прийняті для синусоїдальних систем, не можуть бути використані для несинусоїдальних режимів роботи мережі. Потрібні нові підходи вимірювання електроенергії, оцінки енергетичних процесів. Алгоритми повинні враховувати несинусоїдальність та несиметричність сигналів системи як на протязі періоду часу, так і нерівномірності протягом одного періоду, який може складатися з кількох годин чи діб [9, 10].

### 3. Вплив нерівномірності споживання

Характер споживаної активної  $A_p$  і реактивної енергії  $A_Q$  протягом періоду часу  $T$ , який розглядається, може бути різним.

На рис. 1, а показано рівномірне споживання в однофазній мережі при  $\cos\phi=0,8$ . Активна  $A_p$  і реактивна  $A_Q$  енергія на інтервалі розрахунку  $T$  має вигляд  $A_p=PT; A_Q=QT$ .

Якщо споживання енергії відбувається при постійному значенні струму  $I$ , а опір лінії рівний  $2R_L$ , то втрати енергії на даному періоді складуть  $\Delta A_{P(I)}=2R_L I^2 T$ .

На рис. 1, б показано характер нерівномірного споживання активної і реактивної потужності при тих же значеннях  $A_p$  та  $A_Q$  на тому ж інтервалі часу  $T$ , при тому ж  $\cos\phi=0,8$ , але імпульсами спотвореністю 0,5. Споживання відбувається при значеннях струму навантаження  $2I$  на протязі сумарного часу  $T/2$ .

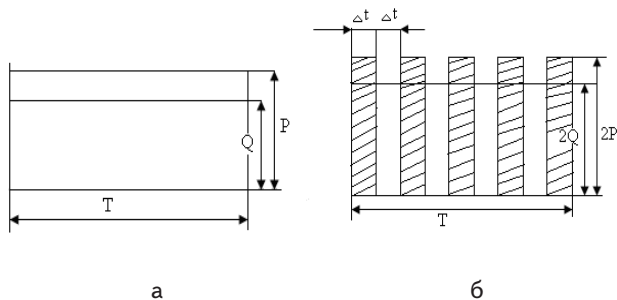


Рис. 1. Змінний графік навантаження: а - рівномірне споживання; б - нерівномірне споживання

Втрати енергії в опорах ліній складуть  $\Delta A_{P(0,5)} = 2R_L (2I)^2 \frac{1}{2} T = 4R_L I^2 T = 2\Delta A_{P(I)}$ , тобто будуть вдвічі більшими, хоча  $\cos\phi=0,8$  у всіх випадках має однакове значення.

Наведений приклад підтверджує, що традиційний коефіцієнт потужності не враховує нерівномірності споживання.

Поточне значення  $\cos\phi=0,8$  залежить від активної і реактивної потужностей  $\tan\phi=Q/P$ ,  $\cos\phi=P/s=$

$=p/(P^2+Q^2)^{-1/2}$ , які можуть безперервно змінюватися в залежності від режиму роботи споживача.

Розрахунок за електроенергію між енергопостачальною організацією і навантаженням споживача відбувається за показниками лічильників активної та реактивної енергії за визначений інтервал часу  $T$ :

$$A_p = \int_0^T P dt; A_Q = \int_0^T Q dt.$$

В залежності від середнього значення  $\cos\phi_T$ , який визначається за наступним виразом:

$$\tan\phi_T = A_Q / A_p; \cos\phi_T = (1 + \tan^2\phi_T)^{-1/2} = \frac{A_p}{\sqrt{A_p^2 + A_Q^2}}, \quad (1)$$

може назначитися тарифна надбавка, яка відобразатиме застосування штрафних санкцій до споживачів за зниження пропускної спроможності мережі і збільшення втрат в ній. Поточне значення втрат активної потужності при інших однакових умовах обернено пропорційне квадрату коефіцієнта потужності  $\Delta P \sim 1/\cos^2\phi$ .

Середнє за деякий період відліку значення коефіцієнта потужності  $\cos\phi_T$  визначається тільки активною  $A_p$  і реактивною  $A_Q$  енергією за цей період і не залежить від ступеня нерівномірності споживання.

Однією з величин оцінки характеру споживання електроенергії є втрати потужності, які виникають в електричній мережі при її передачі до споживача. Однією з мір такої оцінки є відношення найменш можливого значення втрат потужності, яке пропорційне сумі

квадратів діючих значень струмів  $\Delta P_{\min} \sim \sum I^2 = 3I^2$ , які

мають місце в електричній мережі в режимі оптимального споживання при чисто активному навантаженні  $P=3UI'$  до фактичного значення втрат потужності, яке пропорційне сумі квадратів діючих значень всіх струмів:

$$\Delta P \sim \sum I^2 = I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + nI_N^2.$$

Ці струми у тій же системі викликають споживання тої ж активної потужності  $P$ , яке супроводжується в загальному випадку передачею до споживача реактивної потужності  $Q$ , потужності пульсацій  $S_b$ , прихованої потужності  $S_o$  і потужності спотворення  $D$ .

Під оптимальним розуміють таке споживання, при якому:

$$Q = 0, \cos\phi = 1, S_b = 0, S_o = 0, \epsilon_b = 0, \epsilon_o = 0, D = 0, K_u = 0.$$

Поточне значення коефіцієнта потужності в новому розумінні виразимо співвідношенням:

$$\lambda = \sqrt{\left(\frac{\Delta P_{\min}}{\Delta P}\right)} = \sqrt{\left(\frac{\sum I^2}{\sum I^2}\right)},$$

яке (якщо представити, що система напруг симетрична, урівноважена і синусоїдальна) може бути записано у вигляді:

$$\lambda = \frac{\sqrt{3I^2}}{\sum I^2} = \frac{P}{S_D} = \frac{\sqrt{3U^2 \cdot 3I^2}}{3U^2 (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + nI_N^2)},$$

$$\lambda = \frac{P}{\sqrt{S_a^2 + S_b^2 + (3n+1)S_o^2 + D^2}},$$

$$\lambda = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + S_b^2 + (3n+1)S_o^2 + D^2}},$$

$$\lambda = \frac{P}{S_a} \sqrt{\frac{1 - K_u^2}{1 + \epsilon_b^2 + (3n+1)\epsilon_o^2}}, \quad (2)$$

$$\lambda = \cos \varphi \sqrt{\frac{1 - K_u^2}{1 + \epsilon_b^2 + (3n+1)\epsilon_o^2}}. \quad (3)$$

При прийнятому припущенні про симетричність, урівноваженість і синусоїдальність системи напруг коефіцієнт у формулі (2) відповідає фазовому зсуву між основною гармонікою напруги і еквівалентною основною гармонікою струму, тобто фазовому зсуву, який був би в неспотвореній системі.

$$\frac{P}{S_a} = \cos \varphi_1 = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \cos \varphi.$$

Очевидно, що  $q = \sqrt{\frac{1 - K_u^2}{1 + \epsilon_b^2 + (3n+1)\epsilon_o^2}}$ .

Можна зробити висновок, що у виразах (2) і (3) відображено результуючий вплив спотворення системи струмів, викликаного несиметрією споживання  $\epsilon_b$ , його неурівноваженістю  $\epsilon_o$  і наявністю вищих гармонік в системі струмів  $K_u$ . Таке визначення дійсного коефіцієнта потужності досить зручне, оскільки в ньому беруть участь всі неактивні складові повної потужності.

Дійсний коефіцієнт потужності  $\lambda$  характеризує будь-який режим споживання електричної енергії, в той час як  $\cos \varphi$  лише в окремому випадку симетричних синусоїдальних струмів навантаження. Із виразу (3) видно, що  $\cos \varphi$  входить співмножником у співвідношення для визначення  $\lambda$ .

Середнє за деякий інтервал часу  $T$  значення коефіцієнта потужності  $\lambda_T$  визначимо через втрати енергії на тому ж інтервалі часу  $T$ . Значення  $\lambda_T$  можна представити як відношення двох величин:

- найменш можливих втрат енергії:

$$\Delta A'(I^2) = 3 \int_0^T I^2 dt, \text{ які мали б місце в опорах ліній}$$

електричної мережі при рівномірному графіку споживання електричної енергії  $A_p = PT$ , тому:

$$P = 3UI', \quad (4)$$

- фактичні втрати енергії, які викликані всіма стру-

мами:  $\Delta A(I^2) = \int_0^T (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + nI_N^2) dt$ , що виникають в

тих же опорах системи при нерівномірному споживанні тої ж активної енергії  $A_p$ , яке супроводжується в загальному випадку передачею реактивної потужності  $Q$ , потужності пульсацій  $S_b$ , прихованої потужності  $S_o$  і потужності спотворення  $D$ .

Під оптимальним режимом споживання слід розуміти споживання при постійній активній потужності  $P$ , і

$$\cos \varphi = 1 (Q = 0), \quad \epsilon_b = 0 (S_b = 0),$$

$$\epsilon_o = 0 (S_o = 0), \quad K_u = 0 (D = 0).$$

Таким чином, значення  $\lambda_T$ , яке враховує несприятливі впливи нерівномірності споживання, може бути представлено виразом:

$$\lambda_T = [\Delta A'(I^2) / \Delta A(I^2)]^{1/2}. \quad (5)$$

Мінімальне значення втрат  $\Delta A'(I^2)$  отримаємо з виразу (4) для постійної потужності  $P$ , використовуючи значення струму, вираженого через напругу мережі  $U$  і активну енергію  $A_p$  в оптимальному режимі в інтервалі відліку  $T$ :

$$I' = \frac{P}{3U} = \frac{1}{3UT} A_p,$$

$$\Delta A^{\Delta}(I^2) = 3 \int_0^T I'^2 \delta \tau = \frac{A_p^2}{3T^2} \int_0^T \frac{1}{Y^2} \delta \tau. \quad (6)$$

За допомогою суми інтегралів всіх фазних напруг:

$$A(U^2) = 3 \int_0^T U^2 dt.$$

Тоді вираз (6) матиме вигляд:

$$\Delta A'(I^2) = A_p^2 / A(U^2). \quad (7)$$

Якщо підставити вираз (7) у формулу (5), то отримаємо:

$$\lambda_T = \frac{A_p}{\sqrt{A(U^2)}} \frac{1}{\sqrt{A(I^2)}}. \quad (8)$$

Цей вираз справедливий для довільної напруги мережі. Тому величина  $\lambda_T$ , яка визначається за формулою (8), є показником, що залежить тільки від споживача.

Співставимо вирази для середнього значення коефіцієнта  $\cos \varphi$  співвідношення (1) та середнього значення діючого коефіцієнта потужності  $\lambda_T$  співвідношення (8).

Для одних і тих же характеристик споживання та активної енергії виконується співвідношення:

$$\lambda_T = \cos \varphi_T \frac{\sqrt{A_p^2 + A_Q^2}}{\sqrt{A(U^2)} \sqrt{A(I^2)}}.$$

Покажемо, що  $\lambda_T$  дійсно враховує нерівномірності графіка споживання.

Визначимо на кінці деякого інтервалу часу  $T$ , з допомогою  $\lambda_T$ , два способи споживання однієї і тієї ж активної та реактивної енергії  $A_p$  і  $iA_Q$  в трифазній трипровідній системі, симетричній ( $\epsilon_0=0$ ), синусоїдальній ( $K_u=0$ ) і з постійним значенням коефіцієнта потужності  $\cos\varphi=\text{const}$ .

Якщо споживання протягом всього періоду відліку  $T$  рівномірне (рис. 2, а), тобто

$$U_A = U_B = U_C = U; I_A = I_B = I_C = I; \Phi_A = \Phi_B = \Phi_C = \Phi,$$

то  $\lambda_T$  може бути представлено таким чином:

$$\lambda_T = \frac{A_p}{\sqrt{A(U^2)}\sqrt{A(I^2)}} = \frac{3UI\cos\varphi}{\sqrt{3U^2T}\sqrt{3I^2T}} = \cos\varphi,$$

тобто не відрізняється від значення традиційного  $\cos\varphi$ .

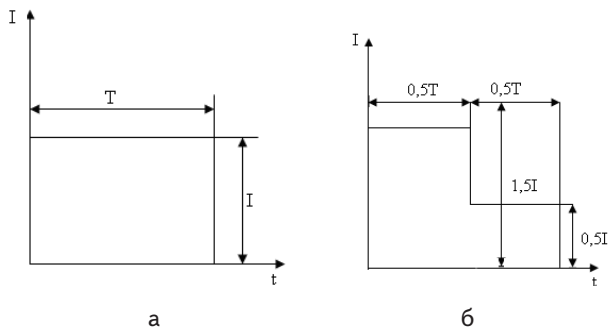


Рис. 2. Графік споживання: а - рівномірне споживання; б - нерівномірне споживання

Якщо споживання електричної енергії протягом інтервалу часу  $T$  було нерівномірним (рис. 2, б), то для першої половини цього інтервалу маємо:

$$U_A = U_B = U_C = U; I_{A1} = I_{B1} = I_{C1} = 1,5I; \Phi_A = \Phi_B = \Phi_C = \Phi,$$

для другої половини інтервалу:

$$U_A = U_B = U_C = U; I_{A2} = I_{B2} = I_{C2} = 0,5I; \Phi_A = \Phi_B = \Phi_C = \Phi.$$

Тоді,

$$\lambda_T = \frac{A_p}{\sqrt{A(U^2)}\sqrt{A(I^2)}} = \frac{3UI\cos\varphi(1,5+0,5)\cdot 0,5T}{\sqrt{3U^2T}\sqrt{3I^2(1,5^2+0,5^2)\cdot 0,5T}} = 0,89\cos\varphi,$$

тобто на 11% менше, ніж значення для рівномірного споживання.

Таким чином, традиційний коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_T$  відповідає тільки рівномірному характеру споживання електричної енергії в неспотвореній системі і представляє собою окремий випадок коефіцієнта  $\lambda_T$ .

Розглянемо випадок, коли графік споживання має вигляд, зображений на рис. 3.

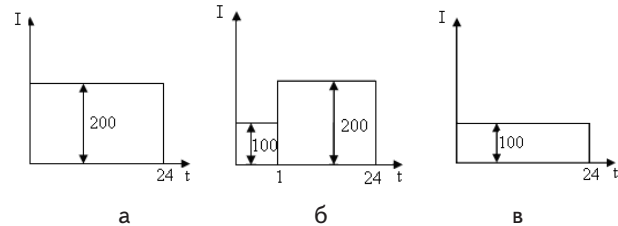


Рис. 3. Графіки споживання електроенергії протягом періоду  $t$ : а, в - рівномірне споживання; б - нерівномірне споживання

При цьому припустимо, що  $\lambda_T = K_{HC} \cos\varphi$ , де  $K_{HC}$  – коефіцієнт, який відображає нерівномірність споживання.

Графіки споживання є нерівномірними. Проаналізуємо різні варіанти споживання електроенергії протягом доби, змінюючи рівні споживання. На даному рис. 3 маємо два граничних випадки, коли у випадку (рис. 3, а) і (рис. 3, в), відповідно, значення діючого струму дорівнює 200 і 100, тобто споживання має рівномірний характер. Для  $j$ -го варіанту, коли  $0 < j < 24$ , за перші  $j$  годин діюче значення струму 100, а протягом інших годин ( $24-j$ ), що залишилися, діюче значення струму рівне 200.

Сімейство графічних залежностей  $K_{HC}(t)$ , яке показує залежність сигналу від нерівномірності споживання, зображено на рис. 4.

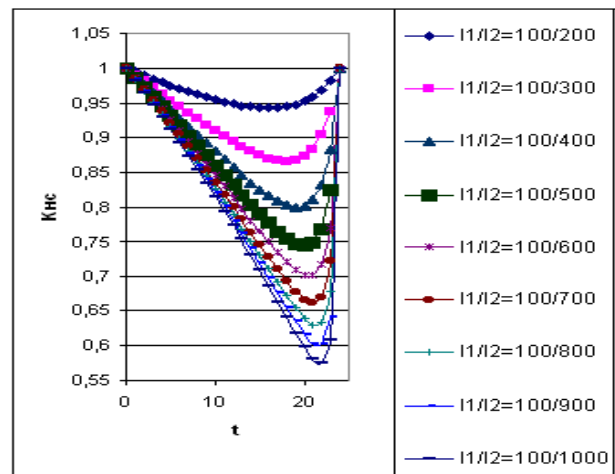


Рис. 4. Залежність  $K_{HC}$  від нерівномірності споживання протягом періоду 24 години

#### 4. Висновки

Із розвитком електроенергетики та широкого застосування засобів силової електроніки, характер споживання поступово змінюється. Він стає несиметричним, невірноваженим та включає вищі гармоніки напруги та струму. Споживання активної енергії супроводжується передачею не тільки реактивної потужності, але й неактивних складових повної потужності (потужності пульсацій, потужності спотворення), які збільшують

втрати в системах електропостачання з розосередженою генерацією та внутрішньому опорі генератора системи і знижують пропускну здатність електричної мережі.

Традиційний спосіб врахування при вимірюванні споживання електроенергії тільки коефіцієнта потужності  $\cos\phi$  не дозволяє виявити споживачів, відповідальних за зниження якості електроенергії, яке призводить до погіршення пропускну здатності мережі та збільшенню втрат, а також визначити розмір додаткових втрат активної енергії при зниженні якості споживання.

Традиційний спосіб оцінки споживання електроенергії не змушує споживачів та електропостачальні організації до прийняття заходів, які забезпечують повноцінне покращення якості електроенергії. Можна припустити, що якщо й надалі потужність пульсацій, потужність спотворення та нерівномірність споживання будуть залишатись неконтрольованими, то втрати при передачі однієї і тої самої активної енергії будуть зростати, а пропускну спроможність мережі буде погіршуватись.

#### Література

1. Агунов, М.В. Новый подход к измерению электрической мощности [Текст] / М.В. Агунов, А.В. Агунов, Н.М. Вербова // Пром. энергетика. — 2004. — № 2. — С. 30–33.
2. Базюк, Т.М. Використання активного споживача з точки зору оптимізації графіків навантаження [Текст] / Т.М. Базюк, І.В. Золотоверха // Збірник доповідей V міжнародної конференції «Енергетика. Екологія. Людина», 23-24 травня 2013 року.
3. Денисюк, С.П. Оцінка ефективності сумісної роботи розосереджених джерел генерації електроенергії, включаючи відновлювальні, в електроенергетичних системах [Текст] / С.П. Денисюк, Т.М. Базюк, Д.Г. Дерев'янку // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. — 2013. — № 3(80).
4. Денисюк, С.П. Аналіз впливу джерел розосередженої генерації на електромережу та особливості побудови віртуальних електростанцій [Текст] / С.П. Денисюк, Т.М. Базюк // Електрифікація транспорту. — 2012. — №4. — С. 23–29.
5. Тонкаль, В.Е. Баланс энергии установившихся режимов цепей несинусоидального тока и напряжения [Текст] // В.Е. Тонкаль, В.Я. Жуйков, С.П. Денисюк и др. // Докл. АН УССР. Сер. А. — 1987. — № 7. — С. 71–74.
6. Бородин, Д. В. Средства измерительной техники для измерения показателей качества электрической энергии [Текст] / Д. В. Бородин // Электроэнергетика. — 2008. — №1. — С. 30–35.
7. Бохмат, И.С. Снижение коммерческих потерь в электрических системах [Текст] / И.С. Бохмат, В.Э. Воронницкий, Е.П. Татаринев // Электрические станции. — 1998. — № 9.
8. Вагин, Г.Я. Влияние высших гармоник тока и напряжения на погрешность электросчетчиков [Текст] / Г.Я. Вагин, В.Б. Иванов, С.А. Смирнов // Пром. энергетика. — 1976. — №4.
9. Вариводов, В.Н. Интеллектуальные электроэнергетические системы [Текст] / В.Н. Вариводов, Ю.А. Коваленко // Электричество. — 2011. — № 9. — С. 4–9.
10. Денисюк, С.П. Оптимізація режимів електропостачання в локальних системах з розосередженою генерацією [Текст] / С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'янку, П.С. Колесник // Пр.Ин-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. Спец. випуск. Ч. 2. — К.:ІЕД НАНУ, 2011. — С. 30-36.