

УДК 621.31

## ОЦІНКА НЕРІВНОМІРНОСТІ СПОЖИВАННЯ ТА ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

**С.П. Денисюк**, докт. техн. наук, **В.П. Опришко**, асп.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського",  
вул. Борщагівська, 115, Київ, 03056, Україна  
e-mail: opryshko@hotmail.com

*Досліджено доцільність оцінки неоптимальності електроспоживання. Отримано аналітичні формули для оцінки оптимальності електроспоживання на інтервалах часу. Представлено спосіб кількісної оцінки різниці поточного рівня електроспоживання відносно оптимального з врахуванням контрольованого рівня неоптимального споживання. Розроблено показники оптимальності регулювання режимів електропостачання та системи акумуляції електроенергії. Наведено графіки залежності зміни показників потужності Фризе для двох та чотирьох інтервалів. Бібл. 18, рис.12.*

**Ключові слова:** Smart Grid, електропостачання, енергоефективність, потужність Фризе, система акумуляції електроенергії.

**Вступ.** Сучасні локальні електроенергетичні системи мають відповідати положенням концепції Smart Grid, що передбачає високий рівень автоматизації контролю виробництва, передачі та споживання електроенергії, швидке реагування на зміну різних параметрів енергосистеми і здійснювати електропостачання з максимальною надійністю та економічною ефективністю [15, 16]. Поняття якості електропостачання включає в себе показники його надійності, якості електричної енергії та енергоефективності. Показниками якості електропостачання є: безперебійність електропостачання, відхилення частоти, відхилення напруги, коливання напруги, несинусоїдальність напруги та струму, завади, несиметрія напруги, провал напруги, імпульсна напруга та інші [7].

Існуюча проблема нерівномірності добових графіків генерації та споживання електричної енергії негативно впливає на стан електроенергетичних систем і потребує нових рішень. Загалом графіки генерації та споживання є сумою графіків окремих генераторів та споживачів електричної енергії, кожен з яких окремо впливає на зміну показників якості електропостачання [2, 12]. Наслідками нерівномірності є зростання втрат та витрат споживачів і генераторів. У контексті витрат споживачів, по-перше, варто виділити втрати, пов'язані з перериванням електроспоживання, при якому підприємство не може нормально функціонувати, отже, і не отримувати можливий прибуток. Втрати значно збільшуються у випадку псування цінної сировини чи виходу з ладу технологічного обладнання. По-друге, втрати споживача можуть бути спричинені появою неякісної продукції, що є результатом низької якості технологічних операцій, які є наслідком відхилення показників якості електричної енергії. Також варто зазначити, що довгострокова робота споживачів від мережі з низькою якістю електроенергії призводить до прискореного старіння обладнання, що в результаті позначається на втратах [11]. Необхідно зазначити, що сукупність показників якості електроенергії забезпечує рівень електромагнітної сумісності для більшості видів електроприймачів, які працюють від однієї мережі. Це найбільш важливо при експлуатації високотехнологічного обладнання на основі електронних систем управління.

За показниками попиту на електроенергію споживачів класифікують за такими критеріями: за вкладом у загальний попит на електроспоживання об'єкта, за інтенсивністю електричних навантажень, типом функцій, за ступенем впливу на графіки роботи суміжних виробничих об'єктів та рівнем можливих відхилень режимів роботи об'єкта від планових параметрів [14].

Ефективне розподілення і споживання електричної енергії в системі електропостачання може бути досягнуте за рахунок ефективного споживання та інтелектуального контролю за розподіленням активної потужності без порушення технологічного процесу і дотримання

допустимих відхилень напруги та струму. Система електропостачання має розглядатись як єдиний комплекс, при цьому оптимізація режимів у системі здійснюється не лише з врахуванням втрат потужності на передачу, але й з врахуванням зміни потужності споживання при відхиленні напруги [13].

**Показники оптимального споживання електроенергії.** Одним з можливих показників є середньозважене відхилення спожитої потужності ( $\Delta$ ), яке розраховується для споживачів з інтервальним обліком і плануванням за формулою (\*). Оцінка середньої величини відхилення базується на даних планового та фактичного споживання, за їх відсутності – на фактичних даних споживання за минулі два роки на підприємстві [9]:

$$\Delta = \frac{\sum_{t=T} \frac{abs(N_{\text{факт}}^t - N_{\text{план}}^t)}{N_{\text{факт}}^t}}{t}, \quad (*)$$

де  $N_{\text{факт}}^t$  – фактичне споживання потужності в часі  $t$  (кВт);  $N_{\text{план}}^t$  – планове споживання потужності;  $T$  – сумарне число годин, що співвідноситься з робочими днями року.

Процес виробництва, передавання та розподілення електроенергії не можливий без супутніх втрат, які також необхідно віднести до витрат. Рівень втрат здебільшого залежить від роботи електричної мережі, ефективність управління якої характеризується показниками енергоефективності [3].

Для вирішення існуючої проблеми, неоптимальності споживання та генерації електроенергії [5] необхідно оцінити вплив нерівномірності споживання та запропонувати оцінку у фінансовому та енергетичному плані. Як приклад існуючої оцінки, можна використати значення дійсного коефіцієнта потужності  $\lambda_T$  як відношення мінімально можливих втрат потужності до їх фактичного значення [6]:  $\lambda_T = \sqrt{\Delta P_{\text{мін}} / \Delta P}$ .

Проблему оптимального електроспоживання можна вирішувати шляхом порівняння режимів при різних варіантах комбінацій систем керування електроспоживанням та попитом на електроенергію. Незважаючи на світові тренди, питання керування попитом на електроенергію в Україні залишається відкритим [9, 14, 15].

У загальному випадку сформулюємо цільову функцію для організації процесу вирішення математичного виразу цілі оптимального керування системою, формалізованою у вигляді функціоналу якості керування:

$$F(X) \rightarrow \text{opt}; \quad F(X) = (F_{\text{ген}}(X); F_{\text{пер}}(X); F_{\text{спож}}(X)); \\ X \in \Omega; \quad X = (X_1; X_2; \dots; X_n); \quad \Omega = \{X : a_i \leq X_i \leq b_i, i = 1 \dots n\},$$

де  $F(X)$  – цільова функція;  $X$  – вектор оптимізованих параметрів;  $a_i, b_i$  – межі зміни оптимізованих параметрів.

Для окремого випадку цільову функцію оптимізаційної задачі можна записати у вигляді  $F_{\text{ген}} = (\Delta U_{\text{ген}}, \Delta I_{\text{ген}}, \Delta f_{\text{ген}}, \Delta \varphi_{\text{ген}}, \Delta P_{\text{ген}}, g_{\text{ген}})$ ;  $F_{\text{перед перетв}} = (\Delta U_{\text{пер}}, \Delta I_{\text{пер}}, \Delta f_{\text{пер}}, \Delta \varphi_{\text{пер}}, \Delta P_{\text{пер}}, g_{\text{пер}})$ ;

$F_{\text{спож}} = (\Delta U_{\text{спож}}, \Delta I_{\text{спож}}, \Delta f_{\text{спож}}, \Delta \varphi_{\text{спож}}, \Delta P_{\text{спож}}, g_{\text{спож}})$ , де  $\Delta U$  – відхилення напруги;  $\Delta I$  – відхилення струму;  $\Delta f$  – зміна частоти;  $\Delta \varphi$  – зміна коефіцієнта потужності;  $\Delta P$  – втрати потужності;  $g$  – інші фактори, що виникають у результаті нерівномірності протікання процесів та які необхідно врахувати.

Загальна цільова функція – векторна, в окремих випадках при її розгляданні необхідна скаляризація, тобто, знаючи початкові умови та обмеження, визначити такий режим роботи, який максимізує або мінімізує єдиний заданий критеріальний показник [10].

**Аналіз можливості застосування показника потужності Фризе.** При оцінці поточного рівня електроспоживання як додаткові оптимізаційні фактори доцільно розробити показники на основі потужності Фризе [8]:

$$Q_{\text{ф}}^2 = S^2 - P^2. \quad (1)$$

Якщо розглядати споживання електричної енергії, що протягом інтервалу часу  $T$  було рівномірним  $U_a = U_b = U_c = U$ ;  $I_{A1} = I_{B1} = I_{C1} = I$ ;  $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi$  (рис. 1а), то вираз (1) може бути представлено як  $Q_\phi = UI \sin \varphi$ , що відповідає загальній формулі реактивної потужності, тобто  $Q_\phi = Q_1$  [1].

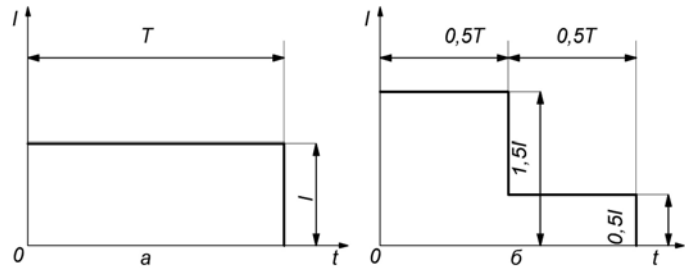


Рис. 1

У випадку нерівномірного споживання електричної енергії (рис. 1 б), коли, наприклад, на першій половині інтервалу мало місце споживання  $U_a = U_b = U_c = U$ ;  $I_{A1} = I_{B1} = I_{C1} = 1,5I$ ;  $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi$ , а на другій половині інтервалу –  $U_a = U_b = U_c = U$ ;  $I_{A1} = I_{B1} = I_{C1} = 0,5I$ ;  $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi$ , то для цього випадку запишемо вираз  $Q_\phi^2 = \frac{1}{8}U^2I^2 + \frac{7}{16}U^2I^2 \sin^2 \varphi$ .

Очевидно, що значення показника для реактивної потужності Фризе на двох інтервалах не відповідає класичному значенню реактивної потужності.

У загальному вигляді доцільно використовувати модифікації потужності Фризе  $Q_\phi$ . Зокрема, при наявності у складі активної потужності  $P$ , потужності  $P_1$  (за першою гармонікою) та  $\Delta P$  (активна потужність) за вищими гармоніками можна визначити потужність Фризе з вирішенням впливу на оптимальність передачі активної потужності за першою гармонікою (основною)  $P$  та передачу активної потужності на вищих гармоніках  $\Delta P$ . Можливі декілька варіантів розвитку розрахунку: для двох, чотирьох та протягом інтервалу технологічного процесу [4].

Виражаючи значення для напруги та струму  $I_2$  та  $U_2$ , варто виділяти такі можливі варіанти врахування спотворень: варіант 1 – наявність коефіцієнтів відхилення струму  $\Delta_i$ ; варіант 2 – наявність відхилення струму  $\Delta_i$  та напруги  $\Delta_u$ ; варіант – 3 наявність коефіцієнта спотворення кривої напруги  $k_{nu}$ ; варіант 4 – наявність коефіцієнтів спотворення кривої напруги струму  $k_{nu}$  та  $k_{ni}$ ; варіант 5 – наявність  $\Delta_i$ ;  $\Delta_u$ ;  $k_{nu}$ ;  $k_{ni}$ ; відносне значення часу для кожного варіанта визначається як відношення  $t/T = \delta$ .

Розглянемо випадок на рис. 2, коли на деякому інтервалі споживання змінилися напруга та струм у розмірі  $\Delta U$  та  $\Delta I$  відповідно.

При пропорційному зростанні напруги та струму, тобто за умови  $\Delta U = \Delta I = \Delta$  значення для квадрата активної потужності набуває вигляду

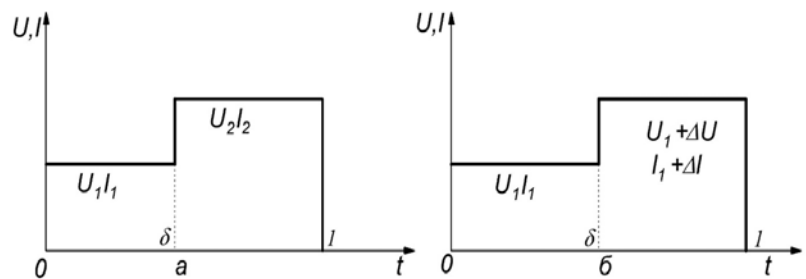


Рис. 2

$$P^2 = (U_1 I_1 \delta + U_1 I_1 \Delta^2 (1 - \delta))^2 = U_1^2 I_1^2 \delta^2 + 2U_1^2 I_1^2 \Delta^2 (1 - \delta) \delta + U_1^2 I_1^2 \Delta^4 (1 - \delta);$$

$$P^2 = U_1^2 I_1^2 (\delta^2 + 2\Delta^2 (1 - \delta) \delta + \Delta^4 (1 - \delta)) = U_1^2 I_1^2 (\delta + \Delta^2 (1 - \delta))^2. \quad (2)$$

Значення квадрата повної потужності  $S^2$  набуває вигляду

$$S^2 = [U_1^2 \delta + U_1^2 \Delta^2 (1 - \delta)] [I_1^2 \delta + I_1^2 \Delta^2 (1 - \delta)] = U_1^2 I_1^2 (\delta^2 + 2\Delta^2 \delta (1 - \delta) + \Delta^4 (1 - \delta)^2);$$

$$S^2 = U_1^2 I_1^2 (\delta + \Delta^2 (1 - \delta))^2. \quad (3)$$

При пропорційному зростанні напруги та струму процес є оптимальним. Це пов'язано з тим, що на інтервалі споживання  $R = \text{const}$ , тому, підставивши отримані значення активної

потужності  $P$  (2) та повної потужності  $S$  (3) у (1), отримуємо  $Q_{\Phi} = 0$ . Розглянемо варіант непропорційної зміни напруги та струму (рис. 2).

Активна потужність  $P$  може бути виражена як

$$P = U_1 I_1 \delta + (U_1 + \Delta U)(I_1 + \Delta I)(1 - \delta);$$

$$P = U_1 I_1 + (\Delta U I_1 + \Delta I U_1 + \Delta U \Delta I)(1 - \delta) = U_1 I_1 + a. \quad (4)$$

Відповідно повна потужність може бути виражена як

$$S^2 = (U_1^2 \delta + (U_1 + \Delta U)^2 (1 - \delta)) (I_1^2 \delta + (I_1 + \Delta I)^2 (1 - \delta));$$

$$S^2 = (U_1^2 + (2U_1 \Delta U + \Delta U^2)(1 - \delta)) (I_1^2 + (2I_1 \Delta I + \Delta I^2)(1 - \delta)) = (U_1^2 + b)(I_1^2 + c). \quad (5)$$

Підставивши значення повної  $S$  (5) та активної  $P$  (4) потужностей у (8), отримуємо

$$Q_{\Phi}^2 = (U_1^2 + b)(I_1^2 + c) - (U_1 I_1 + a)^2 = U_1^2 c + I_1^2 b + bc - 2U_1 I_1 a - a^2. \quad (6)$$

Варто виділити два основні варіанти розрахунку: 1)  $\Delta U = 0, \Delta I \neq 0$ ; 2)  $\Delta I = 0, \Delta U \neq 0$ .

За умови відсутності відхилення напруги за варіантом розрахунку 1 вираз (6) можна переписати з врахуванням  $b=0, a=\Delta I U_1(1-\delta), c=(2I_1 \Delta I + \Delta I^2)(1-\delta)$  у вигляді

$$Q_{\Phi, \Delta I}^2 = U_1^2 c - 2U_1 I_1 a - a^2 = U_1^2 c + I_1^2 b + bc - 2U_1 I_1 a - a^2 =$$

$$= U_1^2 (2U_1 \Delta I + \Delta I^2)(1 - \delta) - 2U_1 I_1 \Delta I U_1 (1 - \delta) - (\Delta I U_1 (1 - \delta))^2;$$

$$Q_{\Phi, \Delta I}^2 = U_1^2 \Delta I^2 \delta (1 - \delta).$$

За умови відсутності відхилення струму  $\Delta I=0, \Delta U \neq 0$  за варіантом розрахунку 2 формулу можна виразити як

$$Q_{\Phi, \Delta U}^2 = I_1^2 \Delta U^2 \delta (1 - \delta).$$

Отримані графіки на рис. 3 ілюструють зміну величини потужності Фризе відносно зміни тривалості кожного інтервалу.

**Аналіз неоптимальності електроспоживання для двох інтервалів часу.** Розглядаючи два інтервали на рис. 4, відношення для реактивної потужності Фризе запишемо як відношення значень струму  $I_2$  та напруги  $U_2$  до їх умовно оптимальних значень  $I_2, U_2$  на першому інтервалі  $t_1$ :

$$Q_{\Phi} = \frac{U_1^2 T_1 + U_2^2 T_2}{T_T} \cdot \frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2}{T_T} - \left( \frac{U_1 I_1 t_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 t_2 \cos \varphi_2}{T_T} \right)^2 - \left( \frac{U_1 I_1 t_1 \sin \varphi_1}{T_T} \right)^2;$$

$$Q_{\Phi} = U_2^2 I_2^2 \delta_2^2 \sin^2 \varphi_2 + \delta_1 \delta_2 (U_1^2 I_2^2 + U_2^2 I_1^2) - 2U_1 U_2 I_1 I_2 \delta_1 \delta_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_2.$$

Прийнявши значення

$$U_1^2 = U_{1c}^2 (1 + k_{nu}^2) \quad I_1^2 = I_{1c}^2 (1 + k_{ni}^2) \quad U_2^2 = U_{2c}^2 (1 + \Delta_u)^2 (1 + k_{nu}^2) \quad I_2^2 = I_{2c}^2 (1 + \Delta_i)^2 (1 + k_{ni}^2)$$

та поділивши на  $U_{1c}^2 I_{1c}^2$ , отримуємо модифікований показник реактивної потужності, який буде відображати вплив неоптимальності:

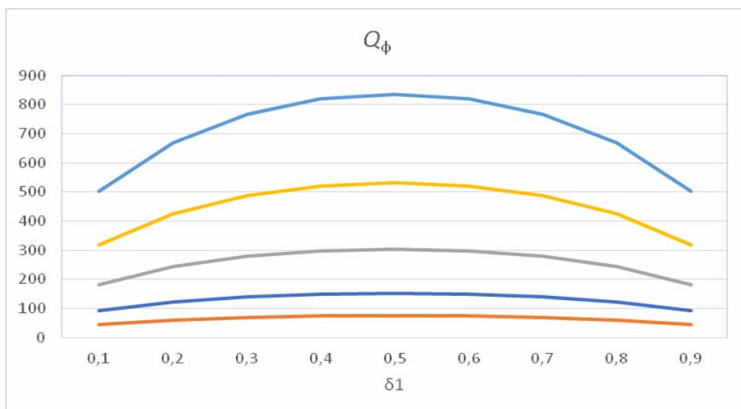


Рис. 3

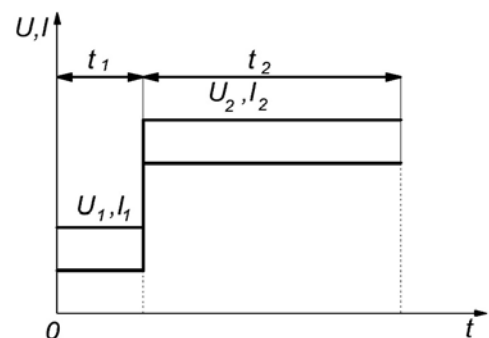


Рис. 4

$$Q_{\Phi U_1^2 I_1^2} = (1 + \Delta_u)^2 (1 + k_{nu}^2) \cdot (1 + k_{ni}^2) (1 + \Delta_i)^2 \delta_2^2 \sin^2 \varphi_2 + \\ + 2\delta_1 \delta_2 (1 + k_{um}^2) (1 + k_{ni}^2) (1 + \Delta_u) (1 + \Delta_i) (1 - \cos \varphi_1 \cos \varphi_2).$$

**Аналіз неоптимальності електроспоживання при  $t_i \neq t_u$ .** На рис. 5 зображено випадок, коли інтервали споживання струму та напруги не співпадають у часі.

Оптимальне значення напруги  $U_0$  виражається як

$$U_0 = \frac{U_1 t_u + U_2 (T - t_u)}{T} = U_1 \delta_u + U_2 (1 - \delta_u), \quad (7)$$

оптимальне значення струму –  $I_0 = \frac{I_1 t_i + I_2 (T - t_i)}{T} = I_1 \delta_i + I_2 (1 - \delta_i)$ .

Підставивши значення у формулу потужності, отримаємо

$$P_0 = U_0 I_0 = (U_1 \delta_u + U_2 (1 - \delta_u)) \cdot (I_1 \delta_i + I_2 (1 - \delta_i)); \quad (8)$$

Виразимо значення напруги  $U$  та струму  $I$ :

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} (U_1^2 t_u + U_2^2 (T - t_u))} = \sqrt{U_1^2 \delta_u + U_2^2 (1 - \delta_u)}; \quad (9)$$

$$U^2 = U_1^2 \delta_u + U_2^2 (1 - \delta_u); \quad I^2 = I_1^2 \delta_i + I_2^2 (1 - \delta_i).$$

Значення напруги та струму на другому інтервалі виразимо через деякі коефіцієнти спотворення  $k_u, k_i$ :  $U_2 = k_u U_1$ ;  $I_2 = k_i I_1$ . Запишемо значення для неактивної потужності Фризе

$$Q_{\Phi}^2 = U^2 I^2 - P^2. \quad (10)$$

Підставимо значення (7)...(9) у (10), у результаті отримаємо

$$Q_{\Phi}^2 = [U_1^2 \delta_u + U_2^2 (1 - \delta_u)] [I_1^2 \delta_i + I_2^2 (1 - \delta_i)] - [(U_1 \delta_u + U_2 (1 - \delta_u)) (I_1 \delta_i + I_2 (1 - \delta_i))]^2 = \\ = U_1^2 I_1^2 [\delta_u + k_u^2 (1 - \delta_u)] [\delta_i + k_i^2 (1 - \delta_i)] - U_1^2 I_1^2 [(\delta_u + k_u (1 - \delta_u)) (\delta_i + k_i (1 - \delta_i))]^2; \\ Q_{\Phi}^2 = U_1^2 I_1^2 (\delta_u + k_u^2 (1 - \delta_u)) \cdot (\delta_i + k_i^2 (1 - \delta_i)) - ((\delta_u + k_u (1 - \delta_u)) \cdot (\delta_i + k_i (1 - \delta_i))).$$

Для аналізу впливу відхилень струму та напруги варто розглянути варіант розрахунку, спираючись на значення напруги та струму на першому інтервалі, припускаючи, що значення напруги та струму на першому інтервалі (рис. 5) є оптимальними або близькими до оптимальних:

$$P = U_1 I_1 \left[ \left( \delta_1 + \sum_{j=2}^n \delta_j k_{j,i} k_{j,u} \right) \right]; \quad S^2 = U_1^2 \left( \delta_{u,1} + \sum_{j=2}^n \delta_j k_{j,i}^2 \right) \cdot I_1^2 \left( \delta_1 + \sum_{j=2}^n \delta_j k_{j,u}^2 \right); \\ Q_{\Phi}^2 = -U_1^2 I_1^2 \left[ \left( \delta_1 + \sum_{j=2}^n \delta_j k_{i,j} k_{u,j} \right) + \left( \delta_1 + \sum_{j=2}^n \delta_j k_{i,j}^2 \right) \cdot \left( \delta_1 + \sum_{j=2}^n \delta_j k_{u,j}^2 \right) \right].$$

За умови оптимальності  $k_{i,1} = k_{u,1} = 1$  можна записати вираз для потужності Фризе  $Q_{\Phi}$  у вигляді

$$Q_{\Phi}^2 = U_1^2 I_1^2 \left[ \left( \delta_1 + \sum_{j=1}^n \delta_j k_{i,j}^2 \right) \cdot \left( \delta_1 + \sum_{j=1}^n \delta_j k_{u,j}^2 \right) - \left( \delta_1 + \sum_{j=1}^n \delta_j k_{i,j} k_{u,j} \right)^2 \right].$$

При фіксованих значеннях  $\delta$  графіки зміни значень потужності Фризе  $Q_{\Phi}$  набуватимуть вигляду, зображеного на рис. 6.

З графіків видно, що найменших своїх значень потужність Фризе  $Q_{\Phi}$  набуває при найменших значеннях  $k_{u,j}, k_{i,j}$ , що відповідає умовам з найменшими відхиленнями напруги та струму  $U_2, I_2$  відносно напруги та струму на першому інтервалі  $U_1, I_1$ .

При різних значеннях  $\delta$  (рис. 7), варто зафіксувати значення для коефіцієнтів відхилення напруги і змінювати лише значення коефіцієнтів струму  $k_i$ , графік змінює свою форму, лише спираючись на значення  $\delta_1$ .

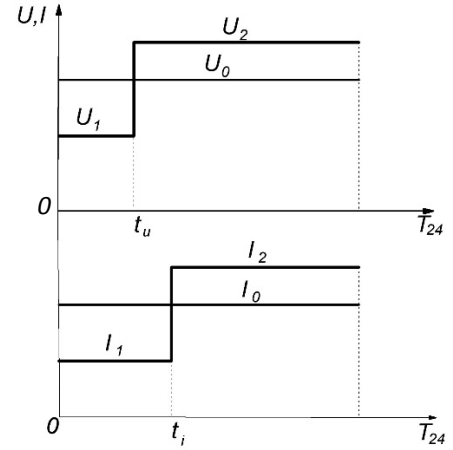


Рис. 5

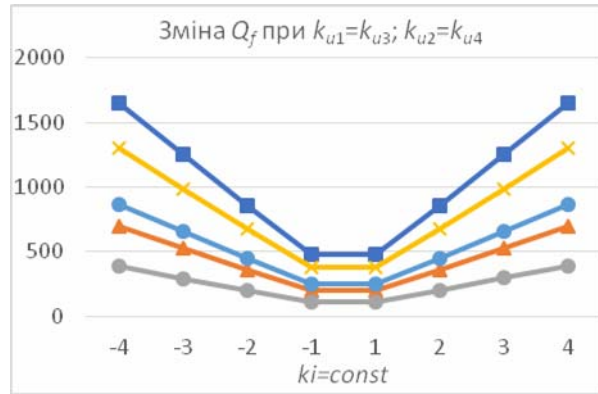
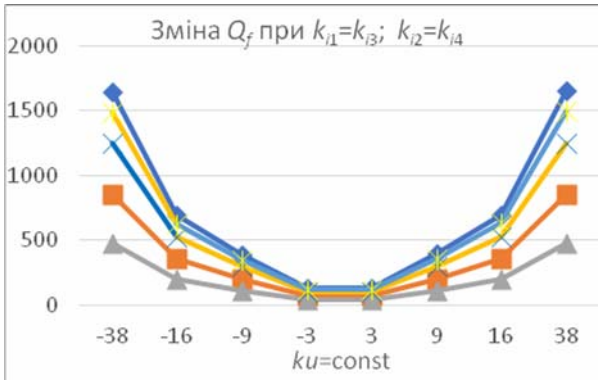


Рис. 6

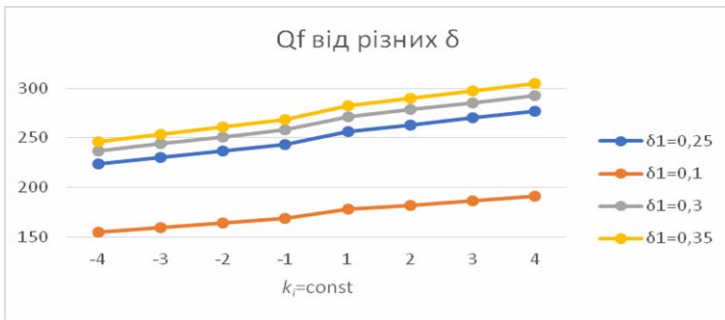


Рис. 7

Найменші значення потужності Фризе досягаються при мінімальній тривалості першого інтервалу, тобто при мінімізації  $\delta_1$ .

Такий варіант розрахунку важливий для визначення міри нерівномірності у відношенні до переданої активної потужності в мережу або навантаження. При  $k_{ij}=k_{ji}=1$  значення для потужності Фризе  $Q_{\Phi}=0$  через відсутність неоптимальності споживання.

**Аналіз неоптимальності електроспоживання протягом інтервалу доби.** Розглядаючи електроенергетичні процеси протягом доби, співвідношення можна апроксимувати чотирма складовими, що відображають усереднені рівні напруги та струми у вечірній та ранішній максимуми та нічний і денний мінімуми (рис. 8).

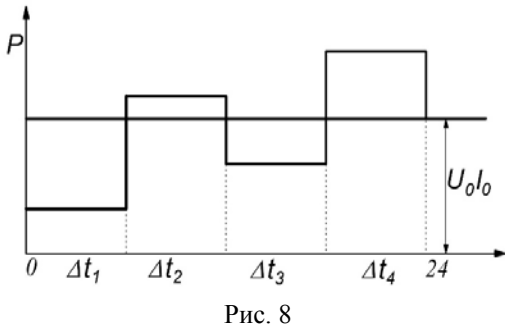


Рис. 8

Розглядаючи такий випадок для доби, вираз для реактивної потужності Фризе при розбитті на чотири часових інтервали  $\Delta t_i$  та теоретичному припущенні повністю активного споживання  $\cos\phi = 1$ , знаючи величину оптимального рівня напруг і струмів для інтервалів, можна записати значення для напруг та струмів як відхилення від оптимального рівня на величину  $\Delta U$  та  $\Delta I$ . Відповідно отримуємо наступні рівняння:  $U_i=U_0+\Delta U_i$  та  $I_i=I_0+\Delta I_i$ ,  $i = 1, \dots, 4$ ;

$$S^2 = \left[ (U_0 - \Delta U_1)^2 \delta_1 + (U_0 + \Delta U_2)^2 \delta_2 + (U_0 - \Delta U_3)^2 \delta_3 + (U_0 + \Delta U_4)^2 \delta_4 \right] \times$$

$$\times \left[ (I_0 - \Delta I_1)^2 \delta_1 + (U_0 + \Delta I_2)^2 \delta_2 + (U_0 - \Delta I_3)^2 \delta_3 + (U_0 + \Delta I_4)^2 \delta_4 \right];$$

$$S^2 = \left( U_0^2 + \sum_{j=1}^4 \Delta U_j^2 \delta_j \right) \left( I_0^2 + \sum_{j=1}^4 \Delta I_j^2 \delta_j \right). \tag{11}$$

Підставивши значення квадрата повної потужності  $S^2$  в (10), отримаємо

$$Q_{\Phi,24}^2 = \left( U_0^2 + \sum_{j=1}^4 \Delta U_j^2 \delta_j \right) \left( I_0^2 + \sum_{j=1}^4 \Delta I_j^2 \delta_j \right) - U_0^2 I_0^2;$$

$$Q_{\Phi,24}^2 = U_0^2 \sum_{j=1}^4 \Delta I_j^2 \delta_j + I_0^2 \sum_{j=1}^4 \Delta U_j^2 \delta_j + \left( \sum_{j=1}^4 \Delta I_j^2 \delta_j \right) \left( \sum_{j=1}^4 \Delta U_j^2 \delta_j \right).$$

З отриманого на рис. 9 графіка видно, що при зміні рівнів відхилення на кожному інтервалі  $\delta$ , найкращим варіантом є одночасна зміна рівнів напруги та струму за інтервалами. Так, для

кривої 1 регулювалось спочатку відхилення напруги  $\Delta U_j$ , а з третього інтервалу – відхилення струму  $\Delta I_j$ , на відміну від кривої 3, де регулювання відхилень напруги та струму здійснювалось одразу.

Розширити показники оптимальності у перетині системи можливо у випадку оцінки оптимальності функціонування системи накопичення електроенергії, які з розвитком відновлюваних джерел енергії набирають все більшої популярності [17, 18].

Системи генерації, які використовують відновлювані джерела енергії, мають нерівномірний характер генерації, тому для більшості з них доцільним є використання систем акумулювання електроенергії (САЕ), які призначені для забезпечення сталого надійного електропостачання незалежно від природних умов і часу доби.

Спрощена система електропостачання з застосуванням САЕ представлена на рис. 10, де Г – генератор; Н – навантаження; САЕ – система акумулювання електроенергії.

При інтеграції САЕ можливі три варіанти функціонування локальної системи електропостачання:

- 1) безпосереднє живлення споживача від мережі  

$$p_G(t) = p_H(t); \Delta t_{1,j}, j = 1, \dots, n_1;$$
- 2) живлення споживача та системи акумуляції від мережі  

$$p_G(t) = p_H(t) + p_{САЕ,Н}(t); \Delta t_{2,j}, j = 1, \dots, n_1;$$
- 3) живлення споживача від мережі та/або системи акумуляції  

$$p_H(t) = p_G(t) + p_{САЕ,Г}(t); \Delta t_{3,j}, j = 1, \dots, n_3,$$

де  $p_G(t)$  – потужність генератора;  $p_H(t)$  – потужність навантаження;  $p_{САЕ,Н}(t)$  – потужність САЕ в режимі споживання;  $p_{САЕ,Г}(t)$  – потужність САЕ в режимі генерації;  $\Delta t_{i,j}$  – часовий інтервал.

Система акумулювання електроенергії на етапі заряджання має властивості активного споживача, натомість на етапі розряджання її режим роботи може бути представлений як генератор.

Для оцінки оптимальності процесу роботи цієї системи запропоновано використати модифікований показник потужності Фризе на періоді  $\tau$ ,  $Q_{Ф, \tau}$  [2]. На рис. 11, як приклад, показано графік зміни струму генератора  $I_{ген}$  та навантаження  $I_H$  в системі електропостачання з САЕ, де використані позначення:  $I_{баз}$  – базовий рівень струму споживача,  $I_1, I_2, I_3$  – струми споживача на інтервалах часу  $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$  відповідно.

Припустивши, що

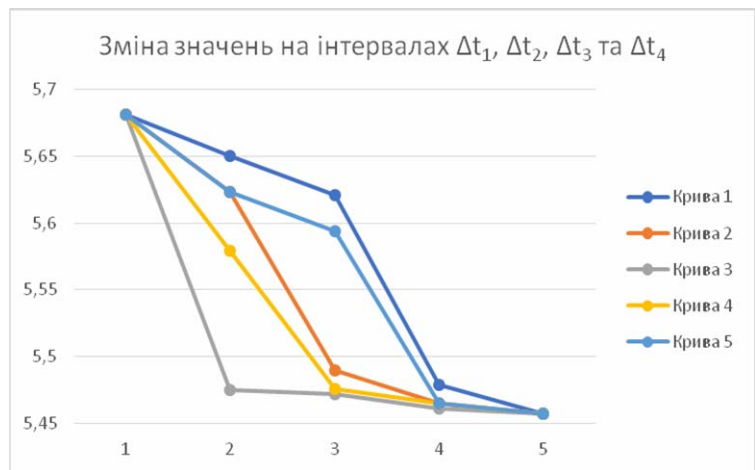


Рис. 9

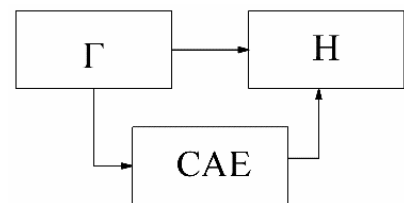


Рис. 10

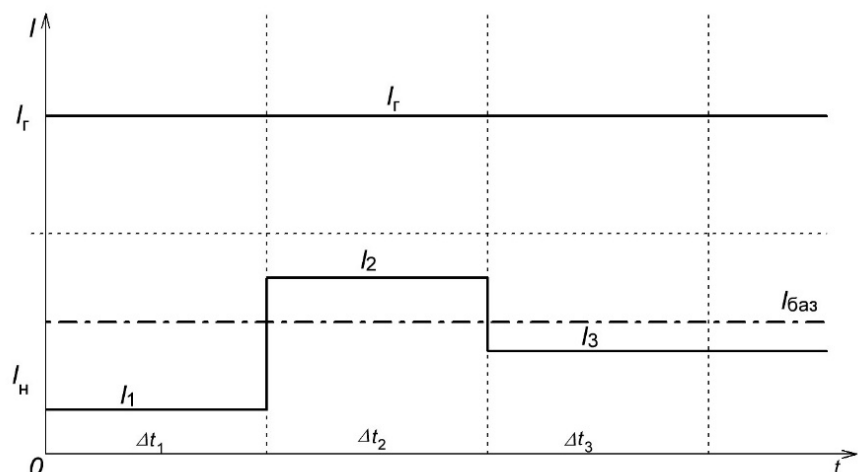


Рис. 11

напруга в системі незмінна,  $U = \text{const}$ , згенерований та спожитий струм має співпадати:

$$I_r \cdot T = (I_r - I_{a1})\Delta t_1 + (I_r + I_{a2})\Delta t_2 + I_r \Delta t_3,$$

де  $I_r$  – струм генератора;  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$  – струм, що споживається та генерується САЕ

$$I_r \cdot T = I_r (\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3) - (I_{a1}\Delta t_1 + I_{a2}\Delta t_2).$$

Тоді активна потужність визначається зі співвідношення

$$P = U[(I_r - I_{a1})\Delta t_1 + (I_r + I_{a2})\Delta t_2 + I_r \Delta t_3].$$

Підставивши значення активної потужності  $P$  в (1), отримаємо

$$Q_{\Phi}^2 = U^2 \left[ (I_r - I_{a1})^2 \delta_1 + (I_r + I_{a2})^2 \delta_2 + I_r^2 \delta_3 - I_r^2 \right].$$

Після спрощення  $\Delta t_i/T = \delta_i$ ;  $\delta_3 = 1 - \delta_1 - \delta_2$  для режиму  $P_r = P_H$  отримаємо

$$k_{Q,A} = -2I_r I_{a1} \delta_1 + I_{a1}^2 \delta_1 + 2I_r I_{a2} \delta_2 + I_{a2}^2 \delta_2; \quad k_{Q,A} = I_{a1}^2 \delta_1 + I_{a2}^2 \delta_2.$$

Отриманий показник залежить лише від параметрів струму САЕ та характеризує безпосередній вплив САЕ на оптимальність функціонування системи електропостачання. На рис. 12 представлена зміна показника потужності Фризе відносно тривалості  $\delta_1$  та зміни струму  $I_{a2}$ .

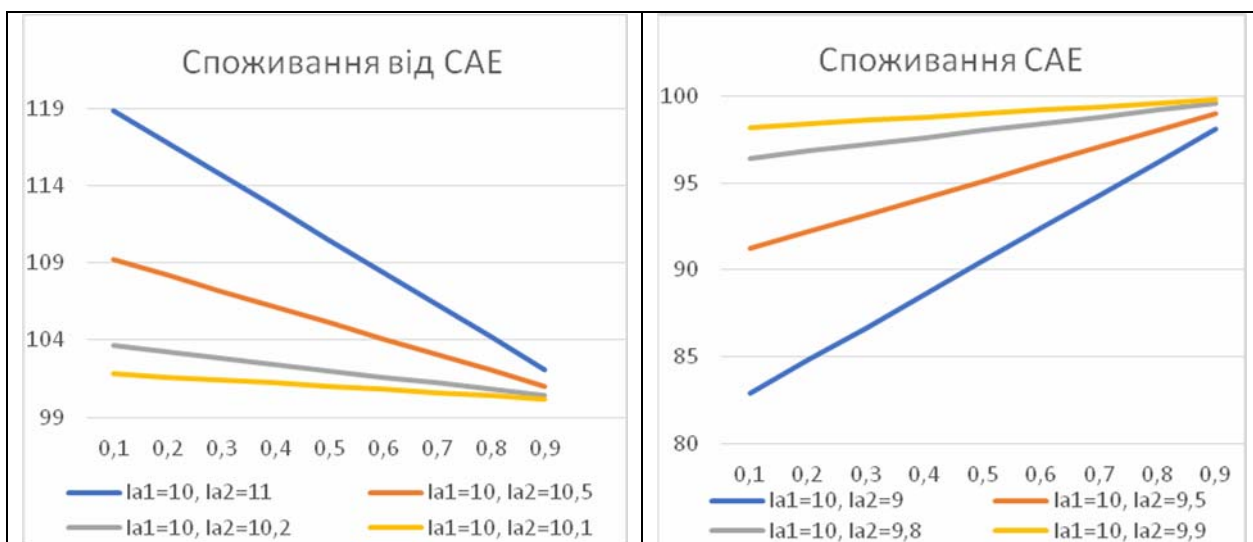


Рис. 12

Аналіз показав, що найменших значень показник набуває при найменшій різниці між значеннями струму акумулятора на першому та другому інтервалах.

**Висновки.** Потужність Фризе  $Q_{\Phi}$  є квадратичною нев'язкою між повною та активною потужностями, що дає змогу порівняти реальний режим роботи локальної електроенергетичної системи з оптимальним режимом, при якому  $Q_{\Phi} = 0$ .

Розрахунок може поширюватись на довільний інтервал часу з врахуванням існуючих пульсацій та відхилень напруги і струму, що дає змогу визначити загальний рівень неоптимальності електроспоживання.

Отримані загальні вирази для розрахунку на інтервалі доби, апроксимованого на чотири інтервали добового графіка електроспоживання, коли значення напруги та струму є усередненими. Розглянуті процеси зміни величини потужності Фризе  $Q_{\Phi}$  можуть бути реалізовані при створенні системи акумулявання електричної енергії.

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высш. шк., 1984. – 638 с.
2. Верейчук Ю.А., Замулко А.І. Дослідження графіків електричних навантажень груп споживачів електричної енергії // Вісн. Вінницького політехн. ін-ту. – 2014. – № 2. – С. 82–85.
3. Денисюк С.П., Василенко В.І. Енергетичні, економічні та екологічні показники енергоефективності // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2016. – С. 33–44.
4. Денисюк С.П., Дерев'янюк Д.Г., Колесник П.С. Оптимізація режимів електропостачання в локальних системах з розосередженою генерацією // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. – Спец. вип. Ч. 2. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. – С. 30–36.



5. Денисюк С.П., Опришко В.П. Дослідження програм з керування попиту на електроенергію та аналіз ефективності їх використання // Technology Audit & Production Reserves. – 2016. – Т. 3 (29). – С. 69–73.
6. Дрехслер Р. Изменение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.
7. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях, 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
8. Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Энергетичні процеси в електричних колах з ключовими елементами. – К.: Текст, 2010. – 264 с.
9. Каратеев П.Ю. Оценка эффективности использования и распределения электрической энергии в системе электроснабжения промышленного предприятия // Известия ТулГУ. Техн. науки. – 2013. – № 12. Ч. 2. – С. 103–106.
10. Кремер Н.Ш., Путко Б.А., Тришин И.М., Фридман М.Н. Исследование операций в экономике: учеб. пособие для вузов / Под ред. Н.Ш. Кремера. – М.: ЮНИТИ, 2006. – 407 с.
11. Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Муравлев А.И. Качество электроснабжения промышленных потребителей. – Томск, 2014. – 89 с.
12. Маляренко В.А., Колотило І.Д., Нечмоглод І.С. Нерівномірність графіка навантаження енергосистеми і способи його вирівнювання // Энергозбереження. Энергетика. Энергоаудит. – 2001. – № 5 (87). – С. 19–22.
13. Мятшикин Г.В., Бирюк В.В., Прохорова А.С. Определение энергоэффективности системы электроснабжения промышленного предприятия через оценку режимов потребления электрической энергии // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – С. 181–183.
14. Соловьева И.А., Дзюба А.П. Управление энергозатратами по показателям спроса на электропотребление производственных объектов с постоянным характером электрических нагрузок // Вестник ПНИПУ. Социально-экономические науки. – 2017. – № 1. – С. 317–330.
15. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 52–67.
16. Kabalci Y. A survey on smart metering and smart grid communication // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 57. – P. 302–318.
17. Veremichuk Y., Prytyskach I., Yarmoliuk O., Opryshko V. Energy Hub Function Optimization Models During Ukrainian Energy Resources Market Liberalization // Scientific Journal of Riga Technical University Power and Electrical Engineering. – 2017. – № 34. – P. 49–52.
18. Zhang H.L., Van Gerven T., Baeyens J., Degrevel J. Photovoltaics: reviewing the European feed-in-tariffs and changing PV efficiencies and costs // Sci World J. – 2014. – P. 1–10.

УДК 621.31

**С.П. Денисюк**, докт. техн. наук, **В.П. Опришко**, асп.

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт им. И. Сикорского”, ул. Борщаговская, 115, Киев, 03056, Украина

#### **Оценка неравномерности потребления и генерации электрической энергии в локальных электроэнергетических системах**

*Исследована целесообразность оценки неоптимальности электропотребления. Получены аналитические формулы для оценки оптимальности электропотребления на интервалах времени. Представлен способ количественной оценки разницы текущего уровня электропотребления относительно оптимального с учетом контролируемого уровня неоптимального потребления. Разработаны показатели оптимальности регулирования режимов электроснабжения и системы аккумуляции электроэнергии. Приведены графики зависимости изменения показателей мощности Фризе для двух и четырех интервалов. Библ. 18, рис. 12.*

**Ключевые слова:** Smart Grid, электроснабжение, энергоэффективность, мощность Фризе, система аккумуляции электроэнергии.

**S. Denysiuk, V. Opryshko**

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Borschagivska str., 115, Kyiv, 03056, Ukraine

#### **Evaluation of electric power in local electric power engineering systems consumption and generation unevenness**

*Researched expediency of electric power consumption non-optimality estimation. The analytical formulas for optimum power consumption estimating at intervals of time are obtained. Presented method of quantitative estimation of current level of electric consumption and optimal level difference, taking into account the controlled level of non-optimal consumption. The regulation parameters of power supply regimes optimization and electricity accumulation system are developed. The dependence graphs of Frieze power indices change for two and four intervals presented. References 18, figures 12.*

**Key words:** Smart Grid, power supply, energy efficiency, Frieze power, electricity accumulation system.

Надійшла 03.10.2017

Received 03.10.2017