

# ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.316

С.П. Денисюк, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-6299-3680  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Т.М. Базюк, канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-4594-0613

## ОЦІНКА ДОДАТКОВИХ ВТРАТ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕГУЛЮВАННЯ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Наведено особливості оцінки сумарних втрат енергії в електричних мережах та оцінки характеру споживання електроенергії в локальних системах електропостачання (ЛСЕ). Здійснено аналіз структури додаткових втрат електроенергії в ЛСЕ при наявності вищих гармонік струму та напруги, для представлення інтегральних характеристик і показників оцінки взаємного впливу елементів систем розглянуто узагальнений розклад миттєвих функцій струму  $i(t)$ , напруги  $u(t)$  та потужності  $p(t)$  на складові. Запропоновані показники оцінки виконання критерію мінімуму втрат електроенергії в ЛСЕ дозволяють оцінити рівні спотворення енергетичних процесів при розгляді як обмінних процесів, так і при аналізі додаткових втрат електроенергії. Розглянуто точність вимірювання інтегральних характеристик енергообміну в залежності від наявних рівнів спотворень сигналів напруги та струму. Показано, що з метою врахування впливу вищих гармонік напруги та струму на повну споживану потужність необхідно визначити зміну потужності Фризе  $Q_F$ , як показника оцінки додаткових втрат електроенергії при наявності несинусоїдальних струмів та напруги в перетинах ЛСЕ, зокрема, при різних співвідношеннях між значенням струму та напруги першої і вищих гармонік. Розглянута оцінка ефективності регулювання електроспоживання з використанням потужності Фризе  $Q_F$  на довільному інтервалі часу, а також відповідного розкладу струму на активну та реактивну складові. Проаналізовано особливості підвищення ефективності регулювання електроспоживання в ЛСЕ при циклічній зміні параметрів генератора та навантаження.

**Ключові слова:** локальна система електропостачання, додаткові втрати електроенергії, регулювання електроспоживання, вищі гармоніки струму та напруги, потужність Фризе, реактивний струм, циклічній зміні параметрів генератора та навантаження.

### Вступ

Одним з основних інтегральних показників енергоефективності щодо використання енергії, яка надходить на підприємство, є графік електричного навантаження [1 – 4]. Нерівномірний добовий графік споживання електроенергії знижує енергоефективність виробництва, передачі та споживання електроенергії [5 – 9]. Додатковою проблемою постає зростання втрат електроенергії у мережах систем електропостачання, зокрема, й у локальних системах електропостачання (ЛСЕ), обумовлених нерівномірністю графіка навантаження. Це впливає на термін служби електричних мереж, особливо кабельних ліній. Регулювання електроспоживання істотно впливає не лише на процеси генерації електроенергії, а й на процеси її передачі.

За відсутності в електроенергетичній системі збалансованої структури генеруючих потужностей головною можливістю вирівнювання графіків може стати режимна взаємодія електроенергетичної системи зі споживачами на основі адміністративних або економічних заходів [10]. Слід врахувати, що графіки навантаження у більшості випадків являють собою нерівномірну лінію, що складається з багатьох відрізків, з піками в ранкові (8–11) та вечірні (18–22) години.

Нерівномірність графіка навантаження стає фактором зростання кінцевих цін і тарифів на електроенергію, оскільки:

- необхідно вишукувати інвестиції і кошти на утримання додаткової генеруючої потужності, а також потужності мереж і трансформаторних підстанцій, що у підсумку оплачує споживач;

- багато генераторів електроенергії змушені набирати і знижувати навантаження кілька разів

© С.П. Денисюк, Т.М. Базюк, 2020

протягом доби, що збільшує питомі витрати палива, знижує експлуатаційний ресурс і в результаті також впливає на зростання ціни;

– піки споживання, особливо вечірнього, у низьковольтних мережах призводять до зростання ризику аварій і відключень, погіршення показників якості електроенергії, зростання втрат електроенергії в лініях.

Вирівнювання графіка навантаження є важливим завданням щодо зниження середніх цін на електричну енергію та підвищення надійності енергопостачання. Застосовуються такі методи вирівнювання графіків навантаження:

- 1) створення оптимальної структури генеруючих потужностей електроенергетичної системи;
- 2) використання перетоків з сусідніми електроенергетичними системами;
- 3) залучення споживачів до вирівнювання графіків навантаження електроенергетичної системи за рахунок адміністративних (обмежуючих) і економічних (стимулюючих) заходів.

Поширення двоставкового тарифу, тарифу, диференційованого по зонах доби, і погодинних цін, як і деякі інші заходи, стимулюють споживача знижувати пікове споживання електроенергії або переносити його на інші години і дні тижня.

Режими характеризуються низкою показників, зокрема:

- коефіцієнтом навантаження (заповнення добового графіка), який визначається як відношення середньодобового навантаження до максимального (пікового);
- річним (добовим, місячним) числом годин використання максимуму навантаження (максимальної потужності) споживачем; розраховується як відношення величини електроспоживання за даний період до максимального навантаження за цей період;
- коефіцієнтом одночасності навантаження (або коефіцієнтом попиту), що дорівнює відношенню суміщеного максимального навантаження підприємства до суми навантажень його окремих електроприймачів.

### 1. Оцінка сумарних втрат енергії в електричних мережах

Розрахункову величину сумарних втрат енергії в електричних мережах споживачів, зокрема, доцільно визначати на основі отриманих залежностей коефіцієнта нагрівання від коефіцієнта форми графіка навантаження, що дозволяє проводити аналіз перевищення втрат на нагрівання провідників залежно від форми графіка навантаження [11]. При рівномірній передачі однакової кількості енергії по одній і тій самої лінії, при однакової напрузі, але за різний час, має місце співвідношення  $I_1 T_1 = I_2 T_2$  ( $I_1, I_2$  – струми у провіднику за час  $T_1$  та  $T_2$  відповідно). Покладемо, що  $W_1$  та  $W_2$  – втрати енергії на нагрівання у провідниках у випадку передачі енергії за інтервал часу  $T_1$  та  $T_2$  відповідно;  $R$  – опір провідника. Тоді відношення втрат енергії на інтервалах часу  $T_1$  та  $T_2$  можемо представити співвідношенням

$$W_2 / W_1 = T_1 / T_2. \quad (1)$$

З виразу (1) видно, що у найпростішому випадку вирівнювання графіка навантаження споживана на нагрівання провідників потужність характеризується відношенням часу живлення навантаження. Для розрахунку скорочення втрат можна застосувати вираз, який для визначення як коефіцієнта нагрівання провідників  $K_{\text{нп}}$ . Коефіцієнт  $K_{\text{нп}}$  для розглянутого випадку визначається співвідношенням

$$K_{\text{нп}} = 1 - (T_1 / T_2). \quad (2)$$

На практиці рівномірні графіки навантаження зустрічаються вкрай рідко. Зазвичай використовують графіки навантаження з інтервалом усереднення ( $T_{\text{ср}}$  – час осереднення), що також вимагає визначення  $K_{\text{нп}}$  як усередненого показника.

Важливе місце в розрахунках змінних втрат електроенергії відіграє правильний вибір співвідношення розрахункових значень реактивної та активної потужності в мережі [12]. Зокрема, для синусоїдальних ЛСЕ при оцінці рівня втрат електроенергії може бути запропонований показник коефіцієнт реактивної потужності  $\text{tg}\varphi$ . Якщо через елемент електричної мережі, що має активний опір  $R$ , передається потужність  $S = P + jQ$  на напрузі  $U$ , то втрати активної потужності у цьому елементі визначаються за виразом

$$\Delta P = (P^2 + Q^2) \cdot R / U^2 = P^2 \cdot (1 + \text{tg}^2\varphi) \cdot R / U^2. \quad (3)$$

Згідно співвідношення (3) впливає, що при фіксованому значенні  $P$  зростання величини  $\text{tg}\varphi$  зі значення  $\text{tg}\varphi_1$  до значення  $\text{tg}\varphi_2$  призведе до зростання втрат активної потужності в  $(1 + \text{tg}^2\varphi_2) / (1 + \text{tg}^2\varphi_1)$  рази. Так, зростання значення коефіцієнта реактивної потужності з  $\text{tg}\varphi_1 = 0,4$  до  $\text{tg}\varphi_2 = 0,7$  призведе до зростання розрахункового значення втрат електроенергії в 1,28 рази.

При вирішенні завдання апроксимації графіків навантаження так само, як і при вирішенні будь-якої

задачі, пов'язаної з процесом апроксимації складної функціональної залежності, необхідно йти на компроміс між точністю і складністю моделі [13, 14]. Визначення коефіцієнтів апроксимації тісно пов'язане з необхідною точністю, яка, в свою чергу, визначається критеріями наближення. Зазвичай застосовують критерії рівномірного, середньоквадратичного чи інтерполяційного (точкового) наближень. Наприклад, якщо число заданих точок перевищує число визначених коефіцієнтів апроксимації, то з метою апроксимації графіків навантажень можна використовувати метод найменших квадратів, при якому середньоквадратична помилка мінімальна [13].

## 2. Оцінка характеру споживання електроенергії в ЛСЕ

Однією з мір оцінки характеру споживання електроенергії в ЛСЕ є відношення найменш можливого значення втрат потужності, яке пропорційне сумі квадратів діючих значень струмів  $\Delta P_{min} \sim \Sigma I'^2 = 3I'^2$ , 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 [8, 10]:  $\Delta P \sim \Sigma I^2 = I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + nI_N^2$ .

Ці струми у тій само системі викликають споживання тієї ж активної потужності  $P$ , яке супроводжується у загальному випадку передачею до споживача реактивної потужності  $Q$ , потужності пульсацій  $S_b$ , прихованої потужності  $S_o$  і потужності спотворення  $D$  [7, 9].

Поточне значення коефіцієнта потужності може бути розраховане як

$$\lambda = \sqrt{\frac{\Delta P_{min}}{\Delta P}} = \sqrt{\frac{\Sigma I'^2}{\Sigma I^2}}. \quad (4)$$

Вираз (4) для несиметричної, неурівноваженої та несинусоїдальної системи напруги може бути записаний у вигляді:

$$\lambda = \sqrt{\frac{3I'^2}{\Sigma I^2}} = \frac{P}{S_D} = \sqrt{\frac{3U^2 \cdot 3I'^2}{3U^2(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + nI_N^2)}}; \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{P}{S_a} \sqrt{\frac{1 - K_u^2}{1 + \varepsilon_b^2 + (3n + 1)\varepsilon_o^2}}, \text{ або } \lambda = \cos\varphi \sqrt{\frac{1 - K_u^2}{1 + \varepsilon_b^2 + (3n + 1)\varepsilon_o^2}}.$$

На підставі співвідношення (5) можемо зробити висновок щодо результуючого впливу спотворення системи струмів, викликаного несиметрією споживання  $\varepsilon_b$ , його неурівноваженістю  $\varepsilon_o$  та наявністю вищих гармонік в системі струмів  $K_u$ . Таке визначення дійсного коефіцієнта потужності  $\lambda$  досить зручне, оскільки в співвідношення (5) включено всі неактивні складові повної потужності.

У випадку симетричної, урівноваженої та синусоїдальної системи напруг коефіцієнт  $\lambda$  у формулі (5) відповідає фазовому зсуву між основною гармонікою напруги і еквівалентною основною гармонікою струму, тобто фазовому зсуву

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

## 3. Аналіз структури додаткових втрат електроенергії в ЛСЕ

Аналіз структури додаткових втрат електроенергії в ЛСЕ при наявності вищих гармонік струму передбачає наступне [9, 15].

Для заданих  $P$  та  $U$  мінімальному значенню діючого струму генератора відповідає миттєвий струм  $i_A(t) = Pu(t)/U^2$ , де  $i_A(t)$  – активна складова струму  $i(t)$ . Для квадрата діючого значення струму  $I^2$  справедливим є співвідношення

$$I^2 = \left( \int_0^T i^2(t) dt \right) / T = \left( \int_0^T [i_A(t) + i_P(t)]^2 dt \right) / T = I_A^2 + I_P^2. \quad (6)$$

Оскільки  $I_A = P/U$ , має місце вираз  $Q_\Phi = UI_P$ , де  $I_A$  та  $I_P$  – діючі значення активної та реактивної складової струму  $i(t)$ .

Причини появи додаткових втрат електроенергії в ЛСЕ чи конкретному її елементі можна систематизувати за напрямками:

- спотворення якості електроенергії, що генерується генераторами;
- впливу режимів роботи інших систем чи елементів (наявність електромагнітних завад, порушення електромагнітної сумісності);
- зміни технологічних процесів (зміни режимів чи параметрів технологічних процесів, зокрема, зміни структури та параметрів навантажень).

Надалі представимо миттєвий струм  $i(t)$  сумою активної (індекс «А») та реактивної (індекс «Р») складових:  $i(t) = i_A(t) + i_P(t)$ ;  $i_A(t) = i_{A,1}(t) + i_{A,\infty}(t)$ ;  $i_P(t) = i_{P,1}(t) + i_{P,\infty}(t)$  (де індекс «1» – визначає першу гармоніку;  $\infty$ ) – вищі гармоніки).

При виділенні активної потужності за першою гармонікою  $P_1$  із повної потужності  $S$  маємо рівність:

$$S^2 = P_1^2 + Q_{\Delta}^2. \quad (7)$$

З урахуванням співвідношення  $P^2 = P_1^2 + 2P_1P_{\infty} + P_{\infty}^2$  вираз (7) приведемо до вигляду

$$S^2 = P_1^2 + 2P_1P_{\infty} + P_{\infty}^2 + Q_{\Phi}^2. \quad (8)$$

Величина  $Q_{\Delta}^2$  згідно (7), (8) набуває вигляду

$$Q_{\Delta}^2 = Q_{\Phi}^2 + 2P_1P_{\infty} + P_{\infty}^2 = Q_{\Phi}^2 + Q_{\Delta\Phi}^2,$$

де  $Q_{\Delta\Phi}^2 = 2P_1P_{\infty} + P_{\infty}^2$ . Звідки можемо записати:

$$S^2 = P_1^2 + Q_{\Phi}^2 + Q_{\Delta\Phi}^2. \quad (9)$$

Введемо величину  $\Delta P_{\infty}$  – показник рівня спотворення активної потужності по першій гармоніці за рахунок споживання активної потужності на вищих гармоніках  $\Delta P_{\infty} = P_{\infty}/P_1$ . Тоді співвідношення для  $Q_{\Delta\Phi}/P_1$  має вигляд  $(Q_{\Delta\Phi}/P_1)^2 = \Delta P_{\infty}(2 + \Delta P_{\infty})$ , а при виконанні нерівності  $2P_1P_{\infty} \gg P_{\infty}^2$  для величини  $Q_{\Delta\Phi}$  можемо записати наближену рівність  $Q_{\Delta\Phi}^2 \cong 2P_1P_{\infty}$ .

Аналіз співвідношення (9) показує, що складова  $Q_{\Delta\Phi}$  відображає додаткові втрати енергії, зумовлені споживанням активної енергії на виділених вищих гармоніках, однак її величина залежить від рівня споживання активної потужності на першій гармоніці.

Щодо адекватної точності вимірювання інтегральних характеристик енергообміну з урахуванням спотворень сигналів. Співвідношення між напругами  $u_1(t)$ ,  $u_{\infty}(t)$ , і струмами  $i_{A,1}(t)$ ,  $i_{A,\infty}(t)$ ,  $i_{P,1}(t)$  та  $i_{P,\infty}(t)$  визначають особливості оцінки точності вимірювання складових електроенергії в ЛСЕ.

Для представлення інтегральних характеристик і показників оцінки взаємного впливу елементів систем розглянемо узагальнений розклад миттєвих функцій  $i(t)$ ,  $u(t)$ ,  $p(t)$  на складові. Для цього спочатку здійснимо формальну процедуру розкладання функції  $i(t)$  в системі ортогональних функцій  $\{\varphi_i(t), i = 1, \dots, n_{\Phi}\}$  [9, 15, 16].

Оскільки при використанні функцій  $i(t)$ ,  $u(t)$  в перетині кола електромагнітні процеси розглядаються у двовимірній площині, виберемо ортогональну систему у вигляді  $\{\varphi_i(t), i = 1, \dots, n_{\Phi}\}$  при  $n_{\Phi} = 2$ ;  $\varphi_1(t) \equiv u(t)$ ;  $\varphi_2(t) \equiv u_{\perp}(t)$ , де

$$\int_0^T u(t) u_{\perp}(t) dt = 0. \quad (10)$$

По відношенню до ортогональної системи  $\{u(t), u_{\perp}(t)\}$  струм  $i(t)$  розкладемо на дві ортогональні складові  $i_{\parallel}(t)$  та  $i_{\perp}(t)$  ( $i(t) = i_{\parallel}(t) + i_{\perp}(t)$ ), які за визначенням дорівнюють відповідно активній та реактивній складовим струму:

$$i_{\parallel}(t) \equiv i_A(t); i_{\perp}(t) \equiv i_P(t); i(t) = i_A(t) + i_P(t). \quad (11)$$

Врахувавши, що  $i_{\perp}(t) = i(t) - i_A(t)$ ;  $i_A(t) = u(t)/R_{\parallel}$ , де  $R_{\parallel} = U^2/P$ , згідно з (10) та (11) запишемо

$$u_{\perp}(t) = R_{\perp} i_P(t) = R_{\perp} (i(t) - Pu(t)/U^2). \quad (12)$$

Оскільки потужність Фризе  $Q_{\Phi}$  розглядається як квадратична нев'язка між величинами  $S$  та  $P$ , то величину  $R_{\perp}$  із (12) задамо співвідношенням  $R_{\perp} = U^2/Q_{\Phi}$ . Величина  $R_{\perp}$  має розмірність опору та як і опір  $R_{\parallel}$ ,

відображає властивості частини ЛСЕ відносно виділеного перетину і характеризує відхилення існуючих процесів від оптимальних з точки зору виконання критерію мінімуму втрат електроенергії. Мають місце співвідношення

$$R_{\perp} = R_{\parallel} P / Q_{\Phi}; R_{\perp} / R_{\parallel} = P / Q_{\Phi}; S = U^2 (R_{\perp}^2 + R_{\parallel}^2)^{1/2} / R_{\perp} R_{\parallel}; \quad (13)$$

$$R_{\text{ЕКВ}} = U / I = R_{\perp} R_{\parallel} / (R_{\perp}^2 + R_{\parallel}^2)^{1/2}.$$

Величину  $R_{\perp} / R_{\parallel} = P / Q_{\Phi}$  згідно (13) можна розглядати як показник відносного рівня спотворень сигналів при розгляді критерію мінімуму втрат електроенергії. Якщо ввести провідності  $G_{\parallel} = 1 / R_{\parallel}$ ,  $G_{\perp} = 1 / R_{\perp}$ , то співвідношення (13) можна записати таким чином:

$$G_{\perp} = G_{\parallel} Q_{\Phi} / P; G_{\perp} / G_{\parallel} = Q_{\Phi} / P; S = U^2 (G_{\perp}^2 + G_{\parallel}^2)^{1/2}; R_{\text{ЕКВ}} = 1 / (G_{\perp}^2 + G_{\parallel}^2)^{1/2}.$$

Часто оцінка рівнів спотворення енергетичних процесів у ЛСЕ розглядається для ustalених режимів відносно критерію мінімуму втрат [7, 9, 16]. Цей критерій відображає забезпечення точної пропорційності напруги та струму

$$u(t) / i(t) = U^2 / P = R_{\parallel} = \text{const}, \quad (14)$$

що відповідає співпаданню форм  $u(t)$  та  $i(t)$  і призводить до мінімуму втрат електроенергії при її передачі від генератора до навантаження. Для критерію (14) виконуються рівності  $P = S$ , де  $S$  – повна потужність, та  $Q_{\Phi} = 0$ . Наведений вираз (14) має місце в системах, коли діючі значення струму мінімальні ( $I = I_{\min}$ ). Безпосередньо кількісну оцінку рівнів спотворення енергетичних процесів у перетині ЛСЕ доцільно здійснювати згідно з наступними показниками:

$$\Delta_{B1} = \int_0^T (u(t) / i(t) - R_{\parallel}) dt / (T R_{\parallel}). \quad (15)$$

Показник  $\Delta_{B1}$  відображає рівень наближення до виконання критерію мінімуму втрат. Міру оцінки рівнів спотворення енергетичних процесів на основі показника  $\Delta_{B1}$  можна задати ступенем їх наближення до нуля. При цьому співвідношення між “спотворюючим” та “оптимальним” сигналом на елементі охарактеризуємо наступними коефіцієнтами:

$$\begin{aligned} K_{E1} &= R_{\parallel} / R_{\perp} = Q_{\Phi} / P; K_{E2}(t) = i_p(t) / i_A(t); \\ K_{E2,\Sigma} &= \int_0^T K_{E2}(t) dt; \\ K_{E3}(t) &= |i_p(t)| / |i_A(t)|; \\ K_{E3,\Sigma} &= \int_0^T K_{E3}(t) dt; K_{E4} = I_P / I_A, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{де } I_P = \left( \int_0^T i_p^2(t) dt / T \right)^{1/2}; I_A = \left( \int_0^T i_A^2(t) dt / T \right)^{1/2}.$$

Наведені в (15) – (16) показники для критерію мінімуму втрат дозволяють оцінити рівні спотворення енергетичних процесів як при виділенні обмінних процесів, так і при аналізі додаткових втрат електроенергії.

Співвідношення між  $u_1(t)$ ,  $u_{\infty}(t)$  ( $u(t) = u_1(t) + u_{\infty}(t)$ ),  $i_{A,1}(t)$ ,  $i_{A,\infty}(t)$ ,  $i_{p,1}(t)$  та  $i_{p,\infty}(t)$  визначають особливості оцінки точності вимірювання складових електроенергії в ЛСЕ [17, 18]. Так, у випадку вимірювання активної потужності за наявності вищих гармонічних складових  $u(t)$  та  $i(t)$  проблема оцінки рівнів споживання активної потужності  $P$  на першій ( $P_1$ ) та вищих гармоніках ( $P_{\infty}$ ) не призводить до труднощів. Потрібно лише правильно визначити гармонічний спектр сигналів  $u(t)$  та  $i(t)$  і здійснити звичайне додавання величин споживання активної потужності  $P_i$  на  $i$ -й гармоніці,  $i = 1, 2, \dots, n$ , де  $n$  – кількість гармонік. При оцінці додаткових втрат електроенергії  $W_{\text{дод}}$ , обумовлених споживанням реактивної потужності (фактично реактивного струму  $i_p(t)$ ) в системах з несинусоїдальними  $u(t)$  та  $i(t)$ , потрібно у процесі вимірювання використати такі визначення реактивної потужності, які б адекватно (з допустимою похибкою) дали оцінку реактивного струму  $i_p(t)$  [8, 9].

Сумарна реактивна потужність мережі ЛСЕ відрізняється від звичайної суми реактивних потужностей всіх гармонік, які, при незначній модифікації, можна визначити за допомогою звичайних лічильників

реактивної потужності [18]. Відомі визначення реактивної потужності представимо через виділення діючих значень реактивного струму:  $I_p$  – сумарного;  $I_{p,i}$  – реактивного струму  $i$ -ї,  $i = 1, \dots, n$ , гармонік.

Коротко розглянемо адекватність точності вимірювання інтегральних характеристик енергообміну до рівнів спотворень сигналів напруги та струму. Співвідношення між напругами  $u_1(t)$ ,  $u_\infty(t)$ , і струмами  $i_{A,1}(t)$ ,  $i_{A,\infty}(t)$ ,  $i_{p,1}(t)$  та  $i_{p,\infty}(t)$  визначають особливості оцінки точності вимірювання складових електроенергії в ЛСЕ. Адекватність оцінки неоптимальності при вимірюванні можемо характеризувати величиною відповідної складової реактивного струму. При цьому реактивній вимірюваній потужності  $Q_i$  поставимо у відповідність еквівалентний реактивний струм  $i_{p,i}(t)$ , де  $Q_i = UI_{p,i}$  [15]. Здійснивши квадратичну декомпозицію потужності  $Q_\Phi$  на складові  $Q_i$  та  $Q_D$  ( $Q_\Phi^2 = Q_i^2 + Q_D^2$ ), для діючих значень струму запишемо співвідношення  $I_D^2 = I_p^2 - I_{p,i}^2$ , де величину  $I_D$  визначимо як показник адекватності визначення рівня неоптимальності процесів. Аналогічним чином як такий показник можна розглядати й величину

$$\Delta_Q = (Q_\Phi^2 - Q_i^2) / Q_\Phi^2. \quad (17)$$

Співвідношення (17) представляє рівень відображення додаткових втрат електроенергії у випадку використання при вимірюванні окремих визначень реактивних потужностей (зокрема,  $Q_i$ ) по відношенню до реального рівня додаткових втрат електроенергії, визначених згідно з потужністю Фризе  $Q_\Phi$ . Отже, мають місце такі рівності [18]:

$$Q_\Phi^2 = Q_i^2 + D_i^2; \quad Q_\Phi^2 = Q_B^2 + D_B^2; \quad (18)$$

$$Q_\Phi^2 = Q_D^2 + D_D^2; \quad Q_\Phi^2 = Q_I^2 + D_I^2,$$

де  $D_i$ ,  $D_B$ ,  $D_D$ ,  $D_I$  – один із різновидів потужності спотворення [9, 18].

Розглянемо наведені реактивні потужності (18) як еквівалентні величини додаткових втрат  $W_{\text{дод}}$  електроенергії, зважаючи, що наприклад:  $W_{\text{дод}, Q_\Phi} = I_p^2 R_{\text{ЕКВ}} T = (Q_\Phi/U)^2 R_{\text{ЕКВ}} T$  – додаткові втрати при протіканні струму  $I_p$  через еквівалентний опір (наприклад, лінії електропередачі)  $R_{\text{ЕКВ}}$  за час  $T$ . Для цього кожний з реактивних потужностей  $Q_B$ ,  $Q_D$ ,  $Q_i$ ,  $Q_{\text{ЕКВ}}$  поставимо у відповідність еквівалентний струм  $I_{p,B}$ ,  $I_{p,D}$ ,  $I_{p,i}$ ,  $I_{p,\text{ЕКВ}}$ :

$$I_{p,1} = Q_i/U; \quad I_{p,B} = Q_B/U; \quad I_{p,D} = Q_D/U; \quad (19)$$

$$I_{p,I} = Q_I/U; \quad I_{p,\text{ЕКВ}} = Q_{\text{ЕКВ}}/U.$$

Для оцінки процесів на основі співвідношень (19) можна побудувати квадратичні співвідношення:

$$\Delta_i = (Q_i/Q_\Phi)^2; \quad \Delta_B = (Q_B/Q_\Phi)^2; \quad (20)$$

$$\Delta_D = (Q_D/Q_\Phi)^2; \quad \Delta_I = (Q_I/Q_\Phi)^2; \quad \Delta_{\text{ЕКВ}} = (Q_{\text{ЕКВ}}/Q_\Phi)^2.$$

Характеристики згідно (20) показують рівень відображення додаткових втрат електроенергії у випадку використання при вимірюванні окремих, наведених вище, визначень реактивних потужностей по відношенню до реального рівня додаткових втрат електроенергії, який визначається при вимірюванні потужності Фризе  $Q_\Phi$  [9, 18].

Аналіз співвідношень (19), (20) дає змогу зробити висновки, що можна виділити окремі області (три та більше), де мають використовуватися різні поправочні коефіцієнти для уточнення додаткових втрат електроенергії в ЛСЕ. При цьому оцінку втрат доцільно здійснювати на основі окремих визначень реактивних потужностей, що є складовими потужності Фризе. З іншого боку, величини  $Q_\Phi$ ,  $Q_B$ ,  $Q_D$ ,  $Q_i$ ,  $Q_{\text{ЕКВ}}$  можна пронормувати за величиною  $Q_i$ , що дасть можливість оцінити рівень впливу спотворюючих факторів по відношенню до синусоїдального режиму.

Можемо виділити основні складові процедури вирівнювання графіків навантаження.

Крок 1. Проведення аналізу системи з перетворювачами електроенергії, дослідження параметрів роботи системи та визначення проблемних моментів у роботі системи.

Крок 2. Аналіз перетворюючих пристроїв та їх роботи у системі, параметрів перетворення та дослідження графіків навантаження системи.

Крок 3. Аналіз способів регулювання навантаження та вирівнювання графіків навантаження. До цього кроку також входить обчислення та підбір оптимальних елементів для акумулюючої установки, яка буде вирівнювати графіки навантаження.

Крок 5. Оцінка економічної вигоди від вирівнювання графіків навантаження. Використання тарифів

на електроенергію, диференційованих за періодами часу, є досить значущим фактором, який спонукає кінцевого споживача до вирівнювання навантаження.

#### 4. Вплив вищих гармонік на споживану потужність

З метою врахування впливу вищих гармонік на повну споживану потужність необхідно визначити особливості зміни  $Q_\Phi$ , як показника додаткових втрат електроенергії при несинусоїдальних струмах та напругах, при різних співвідношеннях між значенням струму та напруги першої і вищих гармонік.

Струм та напруга із врахуванням вищих гармонік описуються такими формулами:

$$\begin{aligned} U^2 &= U_1^2 + U_\infty^2, \\ I^2 &= I_1^2 + I_\infty^2, \end{aligned} \quad (21)$$

де  $U_1$  – напруга першої гармоніки;  $U_\infty$  – напруга вищих гармонік;  $I_1$  – струм першої гармоніки;  $I_\infty$  – струм вищих гармонік.

Підставивши наведені вище формули в (21) для визначення струму та напруги, отримаємо:

$$S^2 = (U_1^2 + U_\infty^2) \cdot (I_1^2 + I_\infty^2) = (U_1^2 \cdot I_1^2 + U_1^2 \cdot I_\infty^2 + U_\infty^2 \cdot I_1^2 + U_\infty^2 \cdot I_\infty^2). \quad (22)$$

Реактивна потужність за Фризе визначається за формулою:

$$Q_\Phi^2 = S^2 - P^2. \quad (23)$$

Активну потужність можна представити у вигляді  $P = P_1 + P_\infty$ . Підставивши цю формулу та формулу (22) в (23) отримаємо:

$$\begin{aligned} Q_\Phi^2 &= S^2 - P^2 = S^2 - (P_1 + P_\infty)^2 = S^2 - P_1^2 - 2P_1P_\infty - P_\infty^2; \\ Q_\Phi^2 &= (U_1^2 \cdot I_1^2 + U_1^2 \cdot I_\infty^2 + U_\infty^2 \cdot I_1^2 + U_\infty^2 \cdot I_\infty^2) - P_1^2 - 2P_1P_\infty - P_\infty^2. \end{aligned}$$

Розкривши дужки і розділивши праву та ліву частини рівняння (23) на  $U_1^2 \cdot I_1^2$  та, провівши спрощення, отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{Q_\Phi^2}{U_1^2 \cdot I_1^2} &= \frac{(U_1^2 \cdot I_1^2 + U_1^2 \cdot I_\infty^2 + U_\infty^2 \cdot I_1^2 + U_\infty^2 \cdot I_\infty^2) - P_1^2 - 2P_1P_\infty - P_\infty^2}{U_1^2 \cdot I_1^2}; \\ \frac{Q_\Phi^2}{U_1^2 \cdot I_1^2} &= 1 + \frac{I_\infty^2}{I_1^2} + \frac{U_\infty^2}{U_1^2} + \frac{U_\infty^2 \cdot I_\infty^2}{U_1^2 \cdot I_1^2} - \frac{P_1^2}{U_1^2 \cdot I_1^2} - \frac{2P_1P_\infty}{U_1^2 \cdot I_1^2} - \frac{P_\infty^2}{U_1^2 \cdot I_1^2}. \end{aligned} \quad (24)$$

де  $\frac{P_1^2}{U_1^2 \cdot I_1^2} \approx 1$ ;  $\frac{P_\infty^2}{U_1^2 \cdot I_1^2} \approx 0$ ;  $\delta_p = \frac{P_\infty}{U_1 \cdot I_1}$ ;  $\frac{I_\infty^2}{I_1^2} = K_{\Pi i}$  – коефіцієнт пульсації струму;  $\frac{U_\infty^2}{U_1^2} = K_{\Pi u}$  – коефіцієнт пульсації напруги.

Формулу (37) можна записати в такому вигляді:

$$\begin{aligned} Q_\Phi &= \sqrt{S_1^2 \cdot (K_{\Pi i}^2 + K_{\Pi u}^2 - 2 \cdot K_{\Pi u} \cdot K_{\Pi i})} = \\ &= U_1^2 \cdot I_1^2 \cdot \sqrt{\left(\frac{I_\infty^2}{I_1^2} + \frac{U_\infty^2}{U_1^2} - \frac{2P_\infty}{U_1 \cdot I_1}\right)}, \end{aligned} \quad (25)$$

де  $\delta_p = K_{\Pi u} \cdot K_{\Pi i} = \frac{P_\infty}{U_1 \cdot I_1}$ ,

Для більш наглядного аналізу залежності (38) розглянемо приклад системи, в якій присутні тільки перша та третя гармоніки. Тоді залежність (38) можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} P_\infty &= P_3 = U_3 \cdot I_3 \cdot \cos \varphi, \text{ де } \cos \varphi \in [1; 0]; \\ Q_\Phi &= U_1 \cdot I_1 \cdot \sqrt{\left(\frac{I_3^2}{I_1^2} + \frac{U_3^2}{U_1^2} - \frac{2U_3 \cdot I_3 \cdot \cos \varphi}{U_1 \cdot I_1}\right)}. \end{aligned}$$

Із рис. 1 – 4 видно, що існує таке співвідношення коефіцієнтів пульсації струму та напруги, при якому наближене значення реактивної потужності Фризе  $Q_\Phi$  набуває нульового значення при відповідних значеннях кута  $\varphi$ .

Також для довільного значення коефіцієнта пульсації за струмом можна визначити значення коефіцієнта пульсації за напругою, і навпаки, при якому зміна значення  $Q_\Phi$  відносно кута  $\varphi$  буде залишатися мінімальною, або не змінюватиметься взагалі у випадку, коли один із коефіцієнтів пульсації (за напругою чи струмом) дорівнюватиме нулю.

Отримані залежності на рис. 1 – 4 вказують на те, що існує таке співвідношення коефіцієнтів пульсації струму та напруги, при яких значення  $Q_\Phi$  може набувати значення 0 або ж знаходитися в межах допустимих значень при більш широкому діапазоні співвідношення коефіцієнтів пульсації.

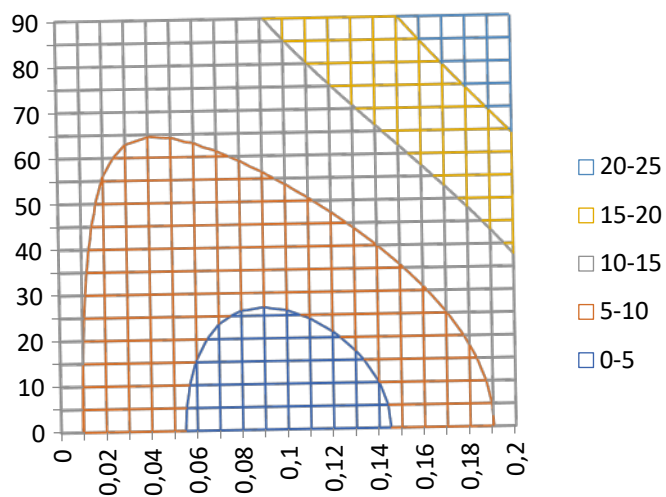


Рисунок 1 – Залежність  $Q_{\phi}(\phi)$  при зміні  $K_{\Pi i}$  від 0 до 20%, де  $\phi \in [0; 90]$   $K_{\Pi i} = 0,1$

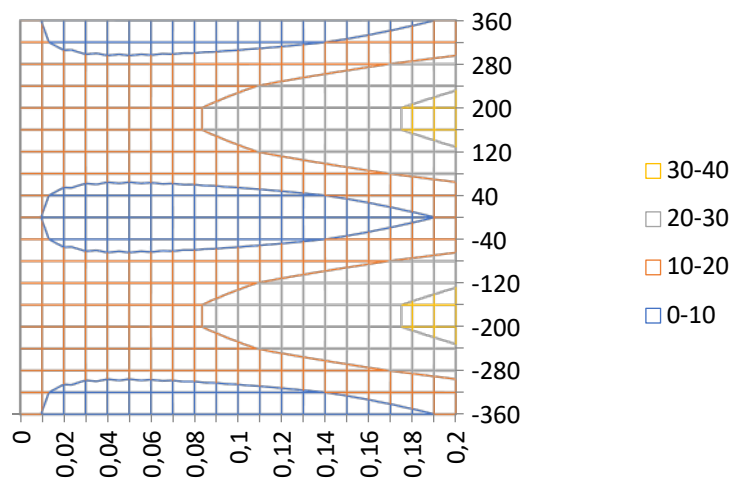


Рисунок 2 – Залежність  $Q_{\phi}(\phi)$  при зміні  $K_{\Pi i}$  від 0 до 20%, де  $\phi \in [-360; 360]$   $K_{\Pi i} = 0,1$

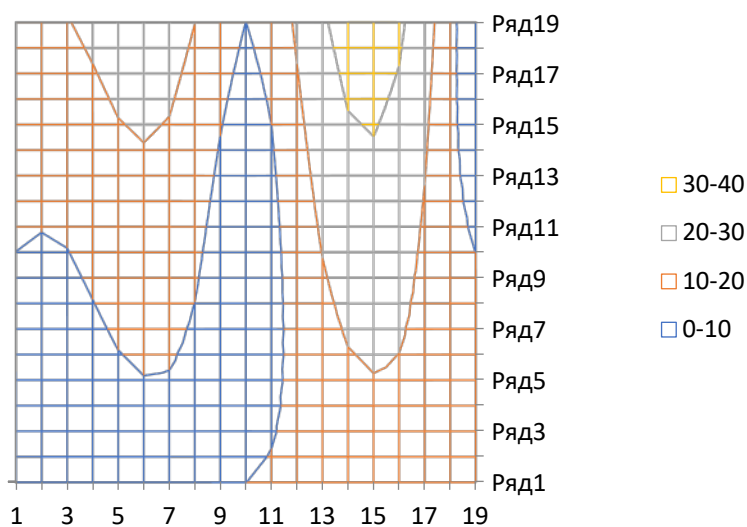
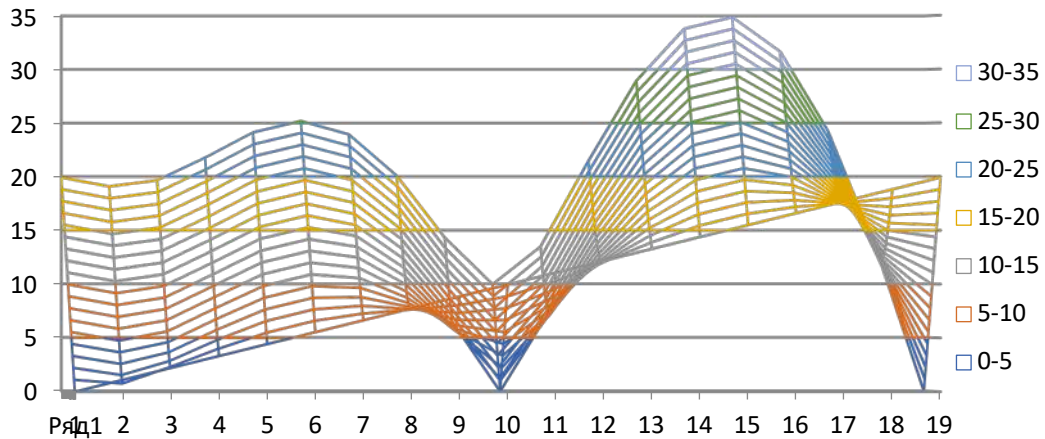


Рисунок 3 – Залежність  $Q_{\phi}(\phi)$  при зміні  $K_{\Pi i}$  від 0 до 20%, де  $\phi \in [0; 90]$   $K_{\Pi i} = 0,1$

Рисунок 4 – Залежність  $Q_{\phi}(\phi)$  при зміні  $K_{\Pi u}$  та  $K_{\Pi i}$  від 0 до 20%, де  $\phi \in [-360; 360]$ 

Регулювання коефіцієнтів пульсації струму та напруги з метою дотримання значення  $Q_{\phi}$  на допустимому рівні може бути використане для мінімізації втрат електроенергії, оптимізації роботи та регулювання режимів роботи ЛСЕ.

##### 5. Оцінка ефективності регулювання електроспоживання в ЛСЕ

Важливим завданням регулювання споживання електроенергії в ЛСЕ є усунення реактивних режимів роботи електричних систем [10]. Струм навантаження для довільного інтервалу часу  $[0.. \tau]$  можна представити як суму активного  $i_{A\tau}(t)$  та реактивного  $i_{p\tau}(t)$  струму, де:

$$i_{A\tau}(t) = \left( \int_0^{\tau} u(t)i(t)dt \right) u(t) / \int_0^{\tau} u^2(t)dt; \quad (26)$$

$$i_{p\tau}(t) = i_{\tau}(t) - \left( \int_0^{\tau} u(t)i(t)dt \right) u(t) / \int_0^{\tau} u^2(t)dt. \quad (27)$$

Міру відхилення величини струму  $\int_0^{\tau} i^2(t)dt$  від його мінімально можливого значення  $\int_0^{\tau} i_{A\tau}^2(t)dt$  згідно (26), (27) для заданої величин активної енергії, яка передається в навантаження на інтервалі часу  $[0.. \tau]$ , характеризується реактивною потужністю  $Q_{\phi\tau}$  [15, 16].

Величина  $Q_{\phi\tau}$  може також розглядатися як критерій оцінки ефективності регулювання споживання електроенергії в ЛСЕ.

Компенсація реактивної потужності  $Q_{\phi\tau}$  призводить та зменшення витрат електроенергії, а також її покращення:

$$P = (1/\tau) \int_0^{\tau} u(t)i(t)dt; \quad (28)$$

$$S = (1/\tau^2) \int_0^{\tau} u^2(t)dt \int_0^{\tau} i^2(t)dt; \quad (29)$$

$$Q_{\phi\tau} = \sqrt{\left( (1/\tau^2) \int_0^{\tau} u^2(t)dt \int_0^{\tau} i^2(t)dt - \left( (1/\tau) \int_0^{\tau} u(t)i(t)dt \right)^2 \right)} = \sqrt{(1/\tau^2) \int_0^{\tau} u^2(t)dt \int_0^{\tau} i_{p\tau}^2(t)dt}. \quad (30)$$

Розклад активної та реактивної складових струму на інтервалі  $\tau$  дає змогу визначити параметри пристрою, компенсуючого реактивну потужність:

$$i_{K\tau}(t) = -i_{p\tau}(t); \quad (31)$$

$$p_{K\tau}(t) = u(t) \cdot i_{K\tau}(t). \quad (32)$$

Регулювання відбувається таким чином, що на інтервалах часу, коли струм навантаження  $i_{\tau}(t) < i_{A\tau}(t)$  ( $i_{p\tau}(t) < 0$ ), компенсатор реактивної енергії накопичує енергію та передає її в навантаження на інтервалах часу, коли виконується наступна умова:  $i_{\tau}(t) > i_{A\tau}(t)$  ( $i_{p\tau}(t) > 0$ ).

Згідно співвідношень (26) – (32) проаналізуємо ЛСЕ з навантаженнями, що змінюється в часі за деяким законом

Як приклад, для системи з напругою та навантаженням, зображеними на рис. 5 та 9, розрахуємо

активний  $i_{At}(t)$  та реактивний  $i_{Pr}(t)$  струми на інтервалі  $[0..4T]$ , використовуючи формули (26), (27) та (31). Для цього окремо розрахуємо активний  $i_{At}(t)$  та реактивний  $i_{Pr}(t)$  струми на інтервалах  $[0 \dots T]$ ,  $[T \dots 3T]$  та  $[3T \dots 4T]$ :

Для системи з навантаженнями  $R(t)$ , зображеними на рис. 6, та кривою напруги, наведеною на рис. 5, розрахуємо активний  $i_{At}(t)$  та реактивний  $i_{Pr}(t)$  струми на інтервалі  $[0 \dots 4T]$ , що матиме вигляд:

$$i_{At}(t) = \left( \int_0^{4T} (U_M \cdot \sin(\omega \cdot t)) \left( U_M \cdot \frac{\sin(\omega \cdot t)}{R(t)} dt \right) \frac{(U_M \cdot \sin(\omega \cdot t))}{\int_0^{4T} U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt} \right); \quad (33)$$

$$i_{Pr}(t) = i(t) - \left( \int_0^{4T} \frac{U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{R(t)} dt \right) \frac{(U_M \cdot \sin(\omega \cdot t))}{\int_0^{4T} U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt} =$$

$$= \frac{U_M \cdot \sin(\omega \cdot t)}{R(t)} = - \left[ \int_0^T \frac{U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{R_1} dt + \int_T^{3T} \frac{U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{R_2} dt + \int_{3T}^{4T} \frac{U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{R_3} dt \right] \times$$

$$\times U_M \cdot \sin(\omega \cdot t) / \left[ \int_0^T U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt + \int_T^{3T} U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt + \int_{3T}^{4T} U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt \right]. \quad (34)$$

Оскільки,  $i_{K\tau}(t) = -i_{Pr}(t)$ , струм компенсації буде дорівнювати

$$i_{K\tau}(t) = - \left[ i(t) - \left( \int_0^{4T} \frac{U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{R(t)} dt \right) \frac{(U_M \cdot \sin(\omega \cdot t))}{\int_0^{4T} U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt} \right] \quad (35)$$

Нехай зміна величин  $R_1(t)$ ,  $R_2(t)$  та  $R_3(t)$  на інтервалах інтервалах  $[0 \dots T]$ ,  $[T \dots 3T]$  та  $[3T \dots 4T]$  відбувається згідно залежностей, наведених на рис. 6. Підставивши у формули (33) – (35) значення опорів  $R_1(t)$ ,  $R_2(t)$  та  $R_3(t)$ , зображених на рис. 6, частоту  $f = 50$  Гц та амплітудне значення напруги  $U_M$ , визначимо та побудуємо графіки миттєвих струмів (рис. 7).

Знаючи значення активного, реактивного та компенсуючого струмів, можна знайти та побудувати графіки миттєвих потужностей (рис. 8).

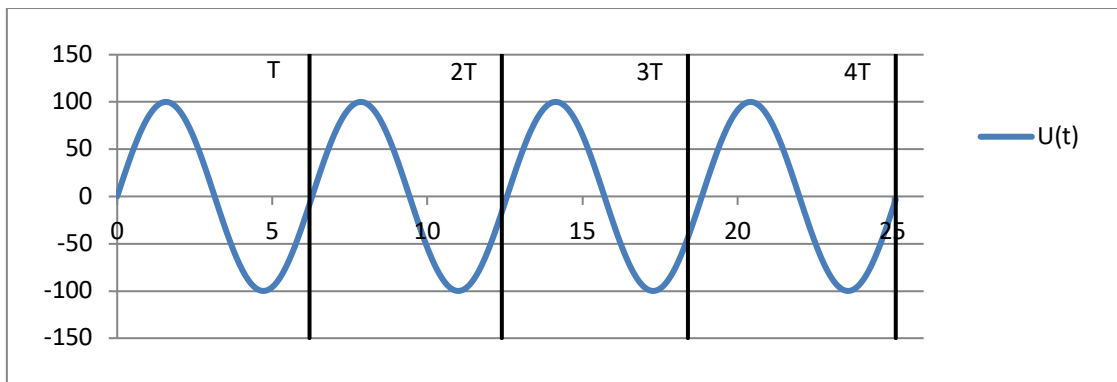


Рисунок 5 – Крива напруги

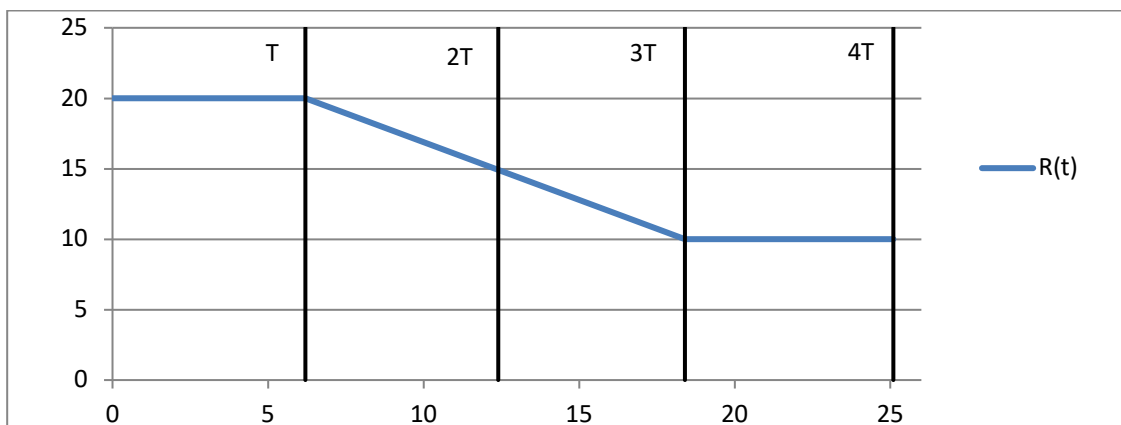


Рисунок 6 – Форми навантажень на періоді  $[0 \dots 4T]$

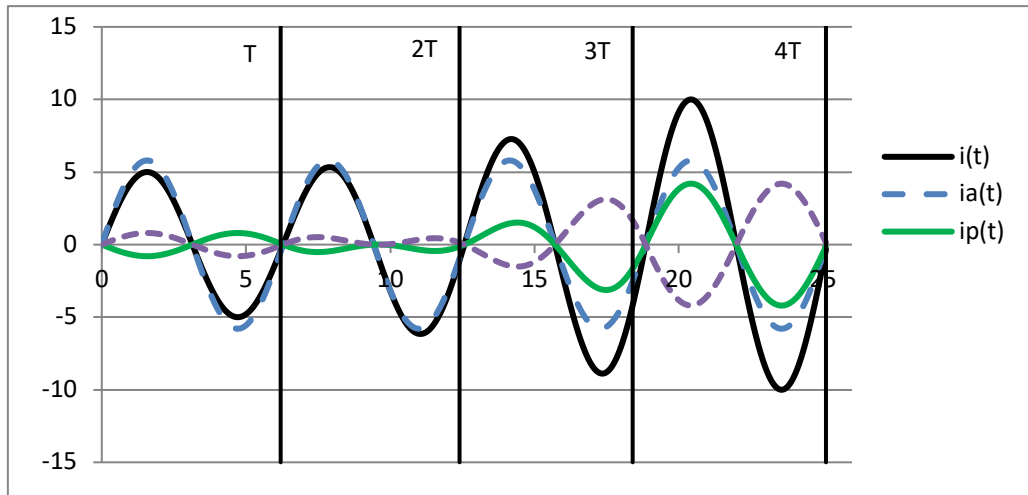


Рисунок 7 – Графіки струмів при навантаженні  $R(t)$

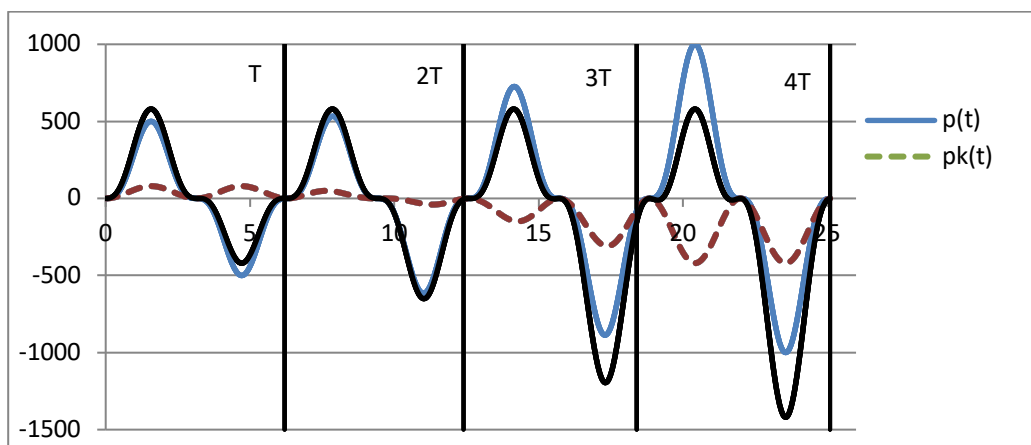


Рисунок 8 – Графіки миттєвих потужностей при навантаженні  $R(t)$

Визначені для різних навантажень параметри пристрою, компенсуючого реактивну потужність, дають змогу в загальному вигляді оцінити наведений спосіб регулювання (компенсації) реактивної потужності, створеної за рахунок роботи перетворювальних пристроїв, та отримати відомості про саму роботу пристрою на заданому проміжку часу.

Для системи з напругою та навантаженням, показаним на рис. 5 та 9, розрахуємо активний  $i_{Ar}(t)$  та реактивний  $i_{pr}(t)$  струми на інтервалі  $[0..4T]$ , використовуючи формули (26), (27) та (31). Для цього окремо розрахуємо активний  $i_{Ar}(t)$  та реактивний  $i_{pr}(t)$  струми на інтервалах  $[0..2T]$  та  $[2T..4T]$ :

$$i_{Ar}(t) = \left( \int_0^{2T} (U_M \cdot \sin(\omega \cdot t)) \left( U_M \cdot \frac{\sin(\omega \cdot t)}{R(t)} \right) dt \right) \frac{(U_M \cdot \sin(\omega \cdot t))}{\int_0^{2T} U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt} =$$

$$= \left[ \int_0^T \frac{U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{R1} dt + \int_T^{2T} \frac{U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{R2} dt \right] \times$$

$$\times U_M \cdot \sin(\omega \cdot t) / \left[ \int_0^T U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt + \int_T^{2T} U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt \right]; \quad (36)$$

$$i_{pr}(t) = i_r(t) - \left( \int_0^{2T} \frac{U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{R(t)} dt \right) \frac{(U_M \cdot \sin(\omega \cdot t))}{\int_0^{2T} U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt} =$$

$$= \frac{U_M \cdot \sin(\omega \cdot t)}{R(t)} - \left[ \int_0^T \frac{U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{R1} dt + \int_T^{2T+t1} \frac{U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{R2} dt \right] \times$$

$$\times U_M \cdot \sin(\omega \cdot t) / \left[ \int_0^T U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt + \int_T^{2T} U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt \right]. \quad (37)$$

Оскільки,  $i_{kr}(t) = -i_{pr}(t)$ , то струм компенсації

$$i_{K\tau}(t) = - \left[ i_{\tau}(t) - \left( \int_0^{2T} \frac{U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{R(t)} dt \right) \frac{(U_M \cdot \sin(\omega \cdot t))}{\int_0^{2T} U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt} \right]. \quad (38)$$

Підставивши у формули (36) – (38) значення опорів  $R_1(t)$  та  $R_2(t)$ , наведених на рис. 10, частоту  $f = 50$  Гц та амплітудне значення напруги  $U_M$  визначимо та побудуємо графіки струмів (рис. 11). Аналогічно розраховуються струми компенсації при інших значеннях напруги  $U_M$  та навантаження. Знаючи величину активного, реактивного та компенсуючого струмів, можна знайти та побудувати графіки миттєвих потужностей (рис. 12).

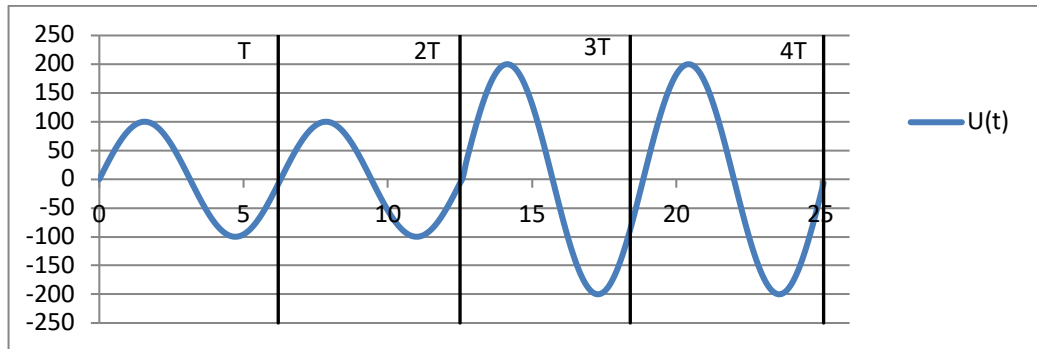
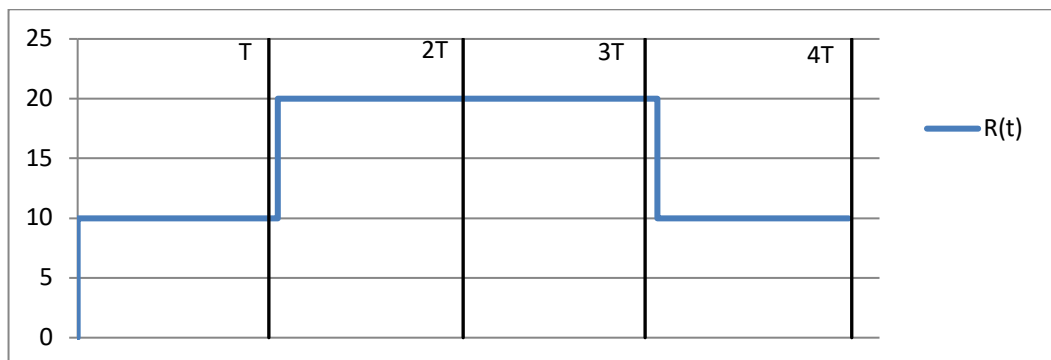


Рисунок 9 – Крива напруги



$R_1 = \text{const}$ , при  $t \in [0 \dots T] \cup [3T \dots 4T]$ ;  $R_2 = 2R_1$ , при  $t \in [T \dots 2T] \cup [2T \dots 3T]$

Рисунок 10 – Форми навантажень на періоді  $[0 \dots 4T]$

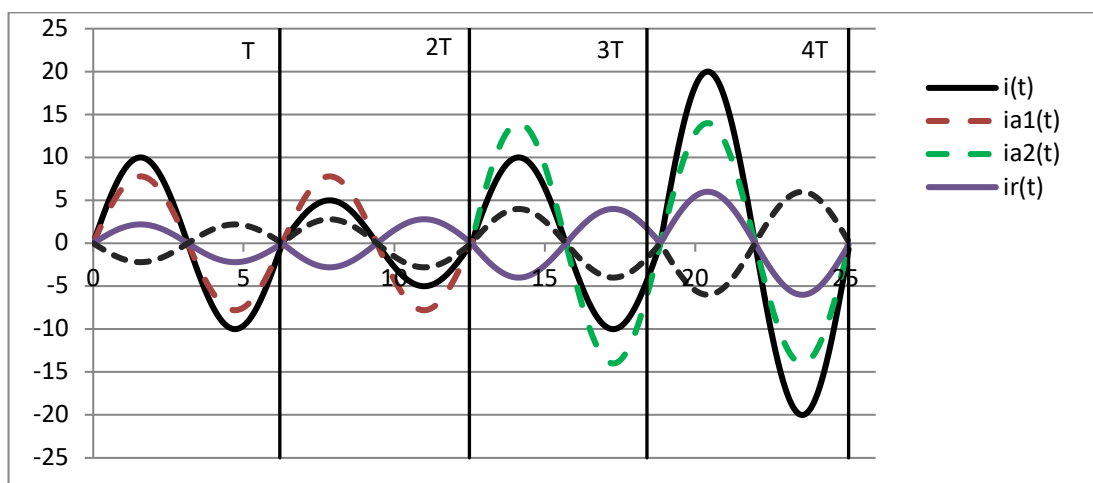
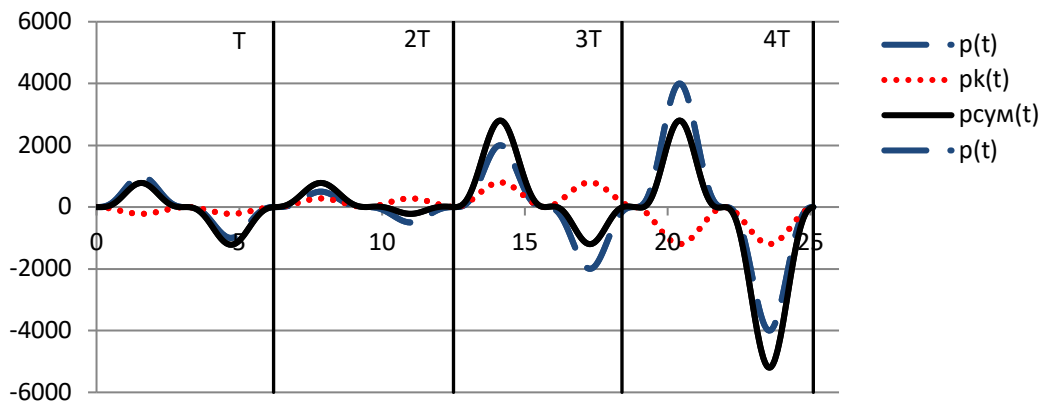


Рисунок 11 – Графіки струмів при навантаженні  $R(t)$

Рисунок 12 – Графіки миттєвих потужностей при навантаженні  $R(t)$ 

Наведені на рис. 8 та 12 залежності показують складний характер регулювання електроспоживання в ЛСЕ на основі виділення реактивної складової струму  $i_p(t)$ . Звичайно, як ефективні виконавчі механізми регулювання доцільно застосовувати силові активні фільтри чи гібридні компенсатори, до складу яких також мають входити компенсатори вищих гармонік струму (напруги).

### Висновки

1. Розглянуто особливості оцінки сумарних втрат електроенергії в електричних мережах та особливості оцінки характеру споживання електроенергії в ЛСЕ. При цьому здійснено аналіз структури додаткових втрат електроенергії у виділених системах при наявності вищих гармонік струму та напруги. Для представлення інтегральних характеристик і показників оцінки взаємного впливу елементів ЛСЕ запропоновано узагальнений розклад миттєвих функцій струму  $i(t)$ , напруги  $u(t)$  та потужності  $p(t)$  на активну та реактивну складові.

2. Запропоновано показники оцінки рівнів виконання критерію мінімуму втрат електроенергії в ЛСЕ, що дозволило оцінити рівні спотворення енергетичних процесів як при розгляді обмінних процесів, так і при аналізі додаткових втрат електроенергії в таких системах електроживлення. Проаналізовано особливості оцінки точності вимірювання інтегральних характеристик енергообміну в ЛСЕ в залежності від наявних рівнів спотворень сигналів напруги та струму.

3. Показано, що з метою врахування впливу вищих гармонік напруги та струму на повну споживану потужність необхідно визначити зміну потужності Фризе  $Q_F$ , як показника оцінки додаткових втрат електроенергії при спотворенні струмів та напруги в перетинах ЛСЕ, зокрема, при різних співвідношеннях між значенням струму та напруги на першій та вищих гармоніках.

4. Представлено оцінку ефективності регулювання електроспоживання в ЛСЕ з аналізом потужності Фризе  $Q_F$  на довільному інтервалі часу та відповідного розкладу модульованого струму на активну та реактивну складові, а також проаналізовано особливості підвищення ефективності регулювання електроспоживання в ЛСЕ при циклічній зміні параметрів генератора та навантаження.

### Список використаної літератури

1. Шклярский Я.Э., Пирог С. Влияние графика нагрузки на потери в электрической сети предприятия // Электромеханика и машиностроение. – 2016. – № 6. – С. 858–863.
2. Figueiredo V., Rodrigues F., Vale Z., Gouveia J.B. An electric energy consumer characterization framework based on data mining techniques // IEEE Transactions on Power Systems. – 2005. – № 2. Vol. 20. – P. 596–602.
3. Greening L.A. Demand response resources: Who is responsible for implementation in a deregulated market? // Energy. – 2010. – № 4. Vol. 35. – P. 1518–1525.
4. Torriti J., Hassan M.G., Leach M. Demand response experience in Europe: Policies, programmes and implementation // Energy. – 2010. – № 4. Vol. 35. – P. 1575–1583.
5. Денисюк С.П., Базюк Т.М. Оптимальний відбір потужності в системах електропостачання // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – № 2. – С. 50–57.
6. Денисюк С.П., Опришко В.П. Аналіз можливостей оптимізації добового графіку споживання електричної енергії // Вісник КНУТД. – 2019. – №6 (128). – С. 20–28.
7. Дрехслер Р. Изменение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.
8. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат. – 2000. – 252 с.

9. Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Энергетичні процеси в електричних колах з ключовими елементами. – К.: ТЕКСТ, 2010. – 264 с.
10. Ковалев А.А., Шаюхов Т.Т. Выравнивание графиков нагрузки. – [https://elar.rsvpu.ru/bitstream/123456789/12895/1/eee\\_2013\\_10.pdf](https://elar.rsvpu.ru/bitstream/123456789/12895/1/eee_2013_10.pdf)
11. Брагин А.А. Алгоритм формирования графиков электрических нагрузок предприятия с применением аккумуляторных батарей в качестве потребителей-регуляторов мощности. – Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Специальность 05.09.03 –Электротехнические комплексы и системы. – Санкт-Петербург, 2013. – 20 с.
12. Фролов В.Я., Коротков А.В. Графики активной и реактивной нагрузки бытовых потребителей // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 5. – С. 1–3.
13. Попов В.П. Основы теории цепей. – М.: Высшая школа, 1998.
14. Радиотехнические цепи и сигналы. Задачи и задания / под ред. Я.Н. Яковлева. – М.: ИНФРА-М; Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003.
15. Денисюк С.П., Аналіз та оптимізація енергопроцесів у розосереджених електроенергетичних системах // Техн. електродинаміка. – 2016. – № 4. – С. 62–64.
16. Денисюк С.П., Базюк Т.М. Аналіз впливу нерівномірності споживання електроенергії // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2013. – № 8(64). – С. 9–13.
17. Денисюк С.П. Технологічні орієнтири реалізації концепції Smart Grid в електроенергетичних системах // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – № 1. – С. 7–21.
18. Денисюк С.П., Кравцов В.О. Оцінка точності вимірювання складових електроенергії в системах з перетворювачами електроенергії // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – Ч.1, 2008. – С. 61 – 66.

#### REFERENCES

1. Shlarskiy Ya., Pirog S. Influence of the load graph on the consumption in the electrical network of the enterprise // Electromechanics and mechanical engineering. – 2016. – № 6. – P. 858–863.
2. Figueiredo V., Rodrigues F., Vale Z., Gouveia J.B. An electric energy consumer characterization framework based on data mining techniques // IEEE Transactions on Power Systems. – 2005. – № 2. Vol. 20. – P. 596–602.
3. Greening L.A. Demand response resources: Who is responsible for implementation in a deregulated market? // Energy. – 2010. – № 4. Vol. 35. – P. 1518–1525.
4. Torriti J., Hassan M.G., Leach M. Demand response experience in Europe: Policies, programmes and implementation // Energy. – 2010. – № 4. Vol. 35. – P. 1575–1583.
5. Denysiuk S., Bazyuk T. Optimal power selection in power supply systems // Energy: economics, technologies, ecology. – 2013. – № 2. – P. 50–57.
6. Denysiuk S., Opryshko V. Analysis of possibilities of optimization of daily schedule of electric energy consumption // Bulletin of KNUTD. – 2019. – №6 (128). – P. 20–28.
7. Drehsler R. Change and assessment of electricity quality under asymmetric and nonlinear loading. – М.: Energoatomizdat, 1985. – 112 p.
8. Zhezhelenko I., Saenko Yu. Electricity quality indicators and their control at industrial enterprises. – М.: Energoatomizdat, 2000. – 252 p.
9. Zhuikov V., Denysiuk S. Energy processes in electric circuits with key elements. – К.: ТЕКСТ, 2010. – 264 p.
10. Kovalev A., Shauychov T. Aligning load curves. – [https://elar.rsvpu.ru/bitstream/123456789/12895/1/eee\\_2013\\_10.pdf](https://elar.rsvpu.ru/bitstream/123456789/12895/1/eee_2013_10.pdf)
11. Bragin A. Algorithm for the formation of graphs of electrical loads of the enterprise using storage batteries as consumers-power regulators. – Abstract of the dissertation for the degree of Cand. tech. sciences. – Specialty 09.05.03 – Electrotechnical complexes and systems. - St. Petersburg, 2013. – 20 p.
12. Frolov V., Korotkov A. Residential and reactive load graphs for residential consumers // ISPU Bulletin. – 2011. – Issue. 5. – P. 1–3.
13. Popov V. Fundamentals of circuit theory. – М.: Vushaya chkola, 1998.
14. Radio circuits and signals. Tasks and assignments / ed. J. Jakovlev. – М.: INFRA-M; Novosibirsk: NGTU, 2003.
15. Denysiuk S. Analysis and optimization of energy processes in dispersed power systems // Techn. electrodynamics. – 2016. – № 4. – P. 62–64.
16. Denysiuk S., Bazyuk T. Analysis of the impact of uneven electricity consumption // Eastern European Journal of Advanced Technologies. – 2013. – № 8(64). – P. 9–13.
17. Denysiuk S. Technological guidelines for the implementation of the Smart Grid concept in power systems // Energy: economics, technology, ecology. – 2014. – № 1. – P. 7–21.

18. Denysiuk S., Kravtsov V. Estimation of accuracy of measurement of components of the electric power in systems with converters of the electric power // Techn. electrodynamics. Theme. issue "Problems of modern electrical engineering". – Part 1, 2008. – P. 61 – 66.

**S. Denysiuk**, Dr. Sc. Sciences, Prof., **ORCID** 0000-0002-6299-3680  
**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**  
**T. Bazyuk**, Ph.D. tech. Science, **ORCID** 0000-0003-4594-0613

## **EVALUATION OF ADDITIONAL LOSSES AND EFFICIENCY ELECTRICITY CONSUMPTION REGULATION IN LOCAL POWER SUPPLY SYSTEMS**

*Peculiarities of estimation of total energy losses in electric networks and estimation of nature of electricity consumption in local power supply systems (LES) are given. The structure of additional electricity losses in LES in the presence of higher harmonics of current and voltage is carried out, the generalized schedule of instantaneous functions of current  $i(t)$ , voltage  $u(t)$ , and power  $p(t)$  on components. The offered indicators of an estimation of the performance of criterion of a minimum of losses of the electric power in LES allow to estimate levels of distortion of power processes at consideration both exchange processes, and at the analysis of additional losses of the electric power. The accuracy of measuring the integrated characteristics of energy exchange depending on the available levels of distortion of voltage and current signals is considered. It is shown that in order to take into account the influence of higher harmonics on the total power consumption, it is necessary to determine the change of Frize  $Q_F$  power as an indicator of additional electricity losses in the presence of non-sinusoidal currents and voltages in at different ratios between the value of current and voltage of the first and higher harmonics. The evaluation of the efficiency of power consumption regulation using the Frize  $Q_F$  power at an arbitrary time interval, as well as the corresponding current distribution into active and reactive components are considered. The peculiarities of increasing the efficiency of power consumption regulation in LES at the cyclic change of generator parameters and load are analysed.*

**Keywords:** local power supply system, additional power losses, power consumption regulation, higher harmonics of current and voltage, Frieze power, reactive current, cyclic change of generator parameters and load.

Надійшла 12.10.2020

Received 12.10.2020