

ЗАДАЧІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ПОТУЖНОГО ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ І ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ОЕС УКРАЇНИ

Отримано результати науково-дослідної роботи за 2009 рік з аналізу ЕМС потужного електроенергетичного обладнання та електричних мереж ОЕС України. Здійснено оцінку структури додаткових втрат електроенергії, отримано нові співвідношення для визначення складових додаткових втрат електроенергії, які визначаються впливом різних факторів, обумовлених дією циклічної зміни параметрів елементів та режимів роботи системи, розглянуто особливості аналізу точності вимірювання інформаційно-вимірювальними системами додаткових втрат електроенергії, оцінено внесок споживача в рівні напруги та струму вищих гармонік у вузлах електричної мережі, вплив споживача на якість електроенергії в мережі.

Получены результаты научно-исследовательской работы за 2009 год по анализу ЭМС мощного электроэнергетического оборудования и электрических сетей ОЭС Украины. Выполнена оценка структуры дополнительных потерь электроэнергии, получены новые соотношения для определения составляющих дополнительных потерь электроэнергии, которые определяются влиянием различных факторов, обусловленных действием циклического изменения параметров элементов и режимов работы системы, рассмотрены особенности анализа точности измерения информационно-измерительными системами дополнительных потерь, оценен вклад потребителя в уровни напряжения и тока высших гармоник в узлах электрической сети, влияние потребителя на качество электроэнергии в сети.

Вступ. Однією з важливих складових забезпечення паралельної роботи ОЕС України з енергетичними системами європейських країн є відповідність показників якості електричної енергії (ПЯЕ) в українських електричних мережах сучасним європейським стандартам. Досягнення необхідних європейських рівнів електромагнітної сумісності (ЕМС) основного енергогенеруючого та енергоспоживаючого обладнання, показників якості електричної енергії в Україні вимагає прискіпливої уваги до здійснення комплексу нормативно-методичних та організаційно-технологічних заходів щодо забезпечення електромагнітної сумісності, вимог до якості параметрів електроенергії на всіх рівнях ієрархії ОЕС України.

Аналізу електромагнітної сумісності в системах енергопостачання з різними типами спотворюючих елементів (СЕП) приділяється увага у низці провідних науково-дослідних центрів Європи та Північної Америки, Росії, Японії, інших розвинених країн [5, 11, 13].

У ринкових умовах питання щодо оцінки ЕМС та обмеження генерації завад в електричній мережі вирішуються за умови пошуку компромісу інтересів між виробниками обладнання, котре є джерелами завад, виробниками обладнання, яке є критичним до впливу спотворюючих факторів, експлуатуючої організації та енергопостачаючої організації. При цьому прийняття рішення шукається у правовому полі з врахуванням інтересів усіх сторін можливого конфлікту [4, 5, 11]. В умовах дефіциту генерованої потужності, зношеності електроенергетичного та електротехнічного обладнання, широкого поширення нелінійних, нестаціонарних перетворювальних навантажень, різноманітних типів перетворювачів електричної енергії в системах електроживлення загострюється проблема електромагнітної сумісності. Джерелами електромагнітних завад стають не тільки навантаження (споживачі), але й самі постачальники (генератори) електроенергії.

Аналіз рівнів ЕМС потребує розгляду електромагнітної обстановки та характеристик різних типів електромагнітних завад, їх впливу на електроприймачі, а також оцінки дольової участі кожного спотворюючого джерела в загальній результуючій величині впливу спотворюючих джерел [3–6, 11]. При цьому стан ЕМС може розглядатися в конкретний момент часу, на періоді, на інтервалі технологічного процесу тощо.

Розробка методів, алгоритмів та технічних засобів регулювання електроспоживання в СЕП, аналізу ЕМС, оцінки взаємного впливу має базуватися на врахуванні особливостей

технологічних процесів енергозабезпечення, які відбуваються на рівні локальних розподілених мереж, на використанні моделей керування зазначеними процесами та використанні інформації, одержуваної від інформаційно-керуючих систем розподілених мереж, для реалізації ефективного ієрархічного керування процесами енергозабезпечення в розподілених локальних електричних системах.

Досягнення ЕМС елементів системи визначається вимогами, які ставляться до окремих елементів СЕП: задана якість напруги $u(t)$ та струму $i(t)$ (в більш загальному випадку виконання вимог до технологічного процесу); задана якість вхідної напруги; відсутність (заданий рівень) впливу електромагнітних процесів генераторів на процеси в навантаженні; відсутність (заданий рівень) взаємного впливу однотипних елементів системи один на одного; відсутність (заданий рівень) впливу на оточуюче середовище [2, 5, 11].

Дослідження показали, що розвиток проблематики електромагнітної сумісності в СЕП доцільно представляти такою сукупністю ієрархічних рівнів:

- ЕМС приладів (зв'язок, радіо- та телекомунікації);
- ЕМС пристроїв (електронних, електротехнічних);
- ЕМС обладнання (електротехнічних, електроенергетичних);
- ЕМС систем (інформаційних, електричних, електроенергетичних).

При аналізі ЕМС в СЕП в комплексі мають розглядатися питання якості електроенергії, підвищення енергоефективності, стійкості та надійності, керованості та спостережуваності, можливості оперативного та прогнозного керування [2, 5]. Аналіз рівнів ЕМС потребує розгляду електромагнітної обстановки та характеристик різних типів електромагнітних завад, їх впливу на електроприймачі, а також оцінки дольової участі кожного спотворюючого джерела в загальній результуючій величині впливу спотворюючих джерел. При цьому стан ЕМС може розглядатися в конкретний момент часу, на періоді, на інтервалі технологічного процесу тощо. Самі моделі оцінки ЕМС системи дають змогу враховувати різні типи перешкод; наявність резонансів, кидків струмів та напруги; існування зворотних потоків енергії; перетоки енергії між елементами СЕП, між фазами з більш завантаженою до менш завантаженою; зміни та спотворення сигналів. При формуванні моделей ступінь (рівень) ЕМС у виділеному (контрольованому) перетині СЕП запропоновано низку показників (характеристик), які базуються: 1) на розкладі миттєвих значень струму та/чи напруги на активну і реактивну складові; 2) на використанні обмінної потужності $Q_{Об}$.

1. Аналіз структури додаткових втрат електроенергії. Проаналізуємо структуру та складові втрат електроенергії, оцінки кількісних та якісних співвідношень цих втрат [2, 8, 9]. Для виділеного перетину СЕП втрати електроенергії при передачі енергії від генератора до навантаження та перетворенні її на періоді T пропорційні квадрату діючого значення струму $i(t)$ у перетині. Вони складаються з суми необхідних втрат $W_H = R_{ЕКВ} I_A^2 T = R_{ЕКВ} P^2 T / U^2$, які обумовлені протіканням активної складової струму $i_A(t)$, та додаткових втрат $W_D = R_{ЕКВ} I_p^2 T = R_{ЕКВ} Q_\Phi^2 T / U^2$, які обумовлені протіканням реактивної складової струму $i_p(t)$ (величина $R_{ЕКВ}$ моделює сумарний активний опір генератора та ліній електроживлення), де $i(t) = i_A(t) + i_p(t)$.

Причини виникнення додаткових втрат електроенергії в системі чи конкретному елементі системи (наприклад, в перетворювачах електроенергії – ПЕЕ) можна систематизувати за напрямками:

- спотворення якості електроенергії, що генерується генераторами, – множина факторів появи додаткових втрат $\{A\}$;
- впливу режимів роботи інших систем чи ПЕЕ (наявність електромагнітних завад, порушення електромагнітної сумісності) – множина факторів $\{B\}$;
- зміни технологічних процесів (зміни режимів чи параметрів технологічних процесів, зокрема, зміни структури та параметрів навантажень) – множина факторів $\{C\}$.

Нехай потужності множин $\{A\}$, $\{B\}$ та $\{C\}$ визначаються величинами $n_{\Phi,A}$, $n_{\Phi,B}$ та $n_{\Phi,C}$. Тоді на появу додаткових втрат електроенергії впливає $n_\Phi = n_{\Phi,A} + n_{\Phi,B} + n_{\Phi,C}$ факторів із множини $\{\Phi\} = \{A\} \cup \{B\} \cup \{C\}$. Покладемо, що для кожного з n_Φ вибраної множини факторів появи додаткових втрат електроенергії $\{\Phi\}$ можна виділити зміни α_j [$\Delta x_1^j, \dots, \Delta x_i^j, \dots$,

Δx_{ns}^j], $j = 1, \dots, n_\Phi$, спектра сигналу $x(t)$ (n_s – кількість ортогональних складових сигналу $x(t)$, що враховуються при розгляді втрат; Δx_i^j – зміна i -ї ортогональної складової сигналу $x(t)$ від впливу j -го фактора).

До факторів множини $\{B\}$ відносяться енергетичні показники та характеристики електромагнітної сумісності елементів та систем, зміна режимів експлуатації (наприклад, температурних), зміна структури елементів системи чи структури самої системи. Фактори множини $\{C\}$ відображають характеристики різних сторін протікання технологічних (енерготехнологічних) процесів [2].

За характеристиками $\alpha[\Delta x_1^j, \dots, \Delta x_i^j, \dots, \Delta x_{ns}^j]$ досить просто визначити відповідну складову додаткових втрат електроенергії. Для цього згідно з характеристиками зміни $\alpha_j[\Delta x_1^j, \dots, \Delta x_i^j, \dots, \Delta x_{ns}^j]$, $j = 1, \dots, n_\Phi$, розділяються діючі значення струму $i_p(t)$ таким чином:

$$I_p^2 = \sum_{j=1}^{n_\Phi} I_{j,p}^2 \quad (1)$$

З урахуванням виразу (1) квадрат потужності Фризе Q_Φ при $u(t) = U_m \sin \omega t$ розбивається на ряд адитивних складових:

$$Q_\Phi^2 = \sum_{j=1}^{n_\Phi} U^2 I_{j,p}^2 = \sum_{j=1}^{n_\Phi} Q_{\Phi,j}^2, \quad (2)$$

де $Q_{\Phi,j}$ – складова додаткових втрат від впливу j -го, $j = 1, \dots, n_\Phi$, фактора.

У загальному випадку у відповідності з (2) при

$$u(t) = \sum_{j_1=1}^{n_\Phi} u_{(j_1)}(t) = \sum_{j_1=1}^{n_\Phi} U_{m(j_1)} \sin(\omega t + \phi_{j_1})$$

для n_Φ вибраних факторів має місце співвідношення

$$Q_\Phi^2 = \sum_{j_1, j_2=1}^{n_\Phi} U_{j_1}^2 I_{j_2,p}^2 = \sum_{j_1, j_2=1}^{n_\Phi} Q_{\Phi, j_1, j_2}^2, \quad (3)$$

де Q_{Φ, j_1, j_2} – складова додаткових втрат, яка визначається впливом j_1 -го фактора з множини $\{\Phi\}$ на напругу $u(t)$ та j_2 -го фактора на струм $i(t)$.

Проаналізуємо структуру додаткових втрат електроенергії з точки зору гармонічного спектра напруги $u(t)$ та реактивного $i_p(t)$ і активного $i_A(t)$ струму. Нехай гармонічний спектр діючих значень гармонік напруги $u(t)$ та реактивного струму $i_p(t)$ включає N_U гармонік напруги та N_I гармонік струму: $U = \{U_1, \dots, U_{N_U}\}$; $I_p = \{I_{p,1}, \dots, I_{p,N_I}\}$. Введемо матриці $[Q_\Phi]_{N_U, N_I}$ та $[R]_{N_U, N_I}$, елементи яких (відповідно q_{j_1, j_2} та r_{j_1, j_2}) визначаються зі співвідношень $q_{j_1, j_2} = U_{j_1} I_{j_2, p}$; $r_{j_1, j_2} = U_{j_1} / I_{j_2, p}$; $j_1 = 1, \dots, N_U$; $j_2 = 1, \dots, N_I$.

Елементи q_{j_1, j_2} матриці $[Q_\Phi]_{N_U, N_I}$ характеризують рівні додаткових втрат, які обумовлені взаємодією довільної j_1 -ї гармоніки напруги та j_2 -ї гармоніки реактивного струму. У свою чергу, матриця $[R]_{N_U, N_I}$ дає змогу визначити додаткові втрати зі співвідношення $[Q_\Phi]_{N_U, N_I} = [R]_{N_U, N_I} [I_p^2]$, де j -й елемент $i_{p,j}$ ($j = 1, \dots, N_I$) вектора $[I_p^2]$ визначається зі співвідношення $i_{p,j} = I_{p,j}^2$.

Якщо ввести матрицю $[Q_{\Phi 2}]_{N_U, N_I}$, для елементів q_{2, j_1, j_2} ($j_1 = 1, \dots, N_U$; $j_2 = 1, \dots, N_I$) якої виконується співвідношення $q_{2, j_1, j_2} = q_{j_1, j_2}^2 = U_{j_1}^2 I_{j_2, p}^2$, то реактивна потужність Фризе Q_Φ визначиться зі співвідношення

$$Q_\Phi = \sum_{j_1=1}^{N_U} \sum_{j_2=1}^{N_I} q_{2, j_1, j_2}.$$

Матриця $[Q_{\Phi 2}]_{N_U, N_I}$ дає змогу детально оцінити вплив різних типів збурень (дії одного чи одночасно кількох факторів із множин $\{A\}$, $\{B\}$ та $\{C\}$). Покладемо, що $[Q_{\Phi 2, 1}]_{N_U, N_I}$ та $[Q_{\Phi 2, 2}]_{N_U, N_I}$ відповідно матриці складових потужностей Q_Φ до збурень та після дії конкретних (одного чи кількох з множини $\{\Phi_1\}$) збурень. Додаткові втрати електроенергії, обумовлені конкретним типом збурень (потужність $Q_{\Phi, \Delta}$), визначаються з такого виразу:

$$Q_{\Phi, \Delta} = \sum_{j_1} \sum_{j_2} q_{2j_1, j_2}; \quad j_1 \in \{N_U^*\}; \quad j_2 \in \{N_I^*\}. \quad (4)$$

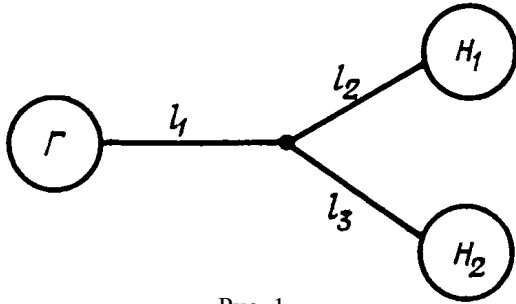


Рис. 1

Складові виразу (4) дають можливість оцінити вплив j -го, $j = 1, \dots, n_{\Phi}$, збурення як кількісно (величина складової втрат електроенергії), так і якісно (складові $\{N_U^*\}$ та $\{N_I^*\}$).

Проаналізуємо складові додаткових втрат електроенергії в системі, яка містить 1 генератор та 2 навантаження (див. рис. 1). Для оцінки впливу елементів системи на появу додаткових втрат електроенергії (за рахунок зміни реактивного струму $i_p(t)$ в лінії) введемо поняття питомих додаткових втрат електроенергії в лінії $P_{\text{норм}, H, P}$ за період основної гармоніки T відповідно для 1-го H_1 та 2-го на-

вантаження H_2 і генератора G .

Зазначені питомі додаткові втрати електроенергії в лінії електропередачі визначимо з таких співвідношень:

$$P_{\text{норм}, H_1, P} = \int_0^T (I_{1,1} \sin(\omega t) + K_p I_{1,1} \sin(3\omega t + \varphi_{1,3}))^2 dt;$$

$$P_{\text{норм}, H_2, P} = \int_0^T (I_{2,1} \sin(\omega t + \varphi_{2,1}) + K_p I_{2,1} \sin(3\omega t + \varphi_{2,3}))^2 dt;$$

$$P_{\text{норм}, G, P} = \int_0^T \left[(I_{1,1} \sin(\omega t) + K_p I_{1,1} \sin(3\omega t + \varphi_{1,3})) + (I_{2,1} \sin(\omega t + \varphi_{2,1}) + K_p I_{2,1} \sin(3\omega t + \varphi_{2,3})) \right]^2 dt.$$

Співставлення додаткових втрат електроенергії в лініях системи, зображеної на рис. 1, можна здійснити за допомогою коефіцієнтів Δ_1 та Δ_2 :

$$\Delta_1 = \frac{P_{\text{норм}, H_1, P}}{P_{\text{норм}, G, P}}; \quad \Delta_2 = \frac{P_{\text{норм}, H_2, P}}{P_{\text{норм}, G, P}}.$$

Вихідні дані для аналізу такі: $I_{1,1} = 1$; $I_{2,1} = 1,5$; $\omega = 2\pi f$; $f = 50$; $\varphi = \pi/6; \pi/3$; $\varphi_{1,3} = 0; \pi/4$; $\varphi_{2,3} = \pi/4; 0$; $I_{1,3} = K_p I_{1,1}$; $I_{2,3} = K_p I_{2,1}$; $K_p = 0; 2$.

Залежність на рис. 2 ілюструє зміну додаткових втрат при зміні кутів фази $\varphi_{2,1}$ від 0 до $\pi/2$; кут $\varphi_{2,3}$ набуває значення 0; $\pi/6$; $\pi/3$. На графіку рис. 2, при $\varphi_{2,3} = \pi/6$ для малих значень K_p від 0 до 1, при зростанні $\varphi_{2,1}$ спостерігається ріст значення Δ_1 . У випадку зростання значення K_p (від 1 до 2) при збільшенні $\varphi_{2,1}$, значення Δ_1 зменшується і набуває значення на рівні 0,17~0,19.

2. Аналіз точності вимірювання додаткових втрат електроенергії. Дослідимо вплив характеристик несинусоїдальності напруги та струму мережі на показники інформаційно-вимірювальних систем [6, 7]. Представимо струм $i(t)$ та напругу $u(t)$ сумою активної (індекс А) та реактивної (індекс Р) складових: $i(t) = i_A(t) + i_P(t)$; $i_A(t) = i_{A,1}(t) + i_{A,\infty}(t)$; $i_P(t) = i_{P,1}(t) + i_{P,\infty}(t)$; $u(t) = u_1(t) + u_{\infty}(t)$.

Співвідношення між $u_1(t)$, $u_{\infty}(t)$, $i_{A,1}(t)$, $i_{A,\infty}(t)$, $i_{P,1}(t)$ та $i_{P,\infty}(t)$ визначають особливості оцінки точності вимірювання складових електроенергії в СЕП. У випадку вимірювання активної потужності при наявності вищих гармонічних складових $u(t)$ та $i(t)$ проблема оцінки рівнів споживання активної потужності P на 1-й (P_1) та вищих гармоніках (P_{∞}) 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

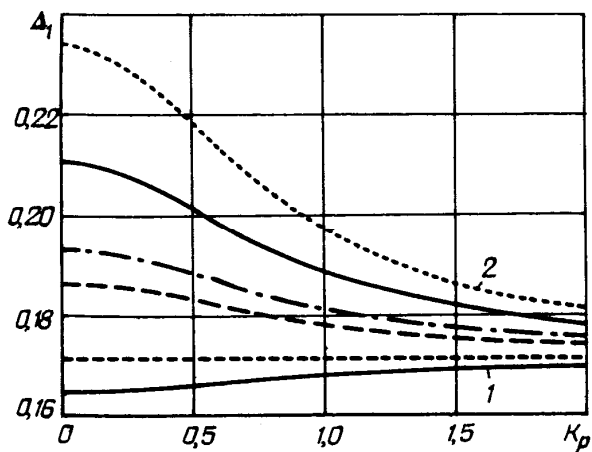


Рис. 2

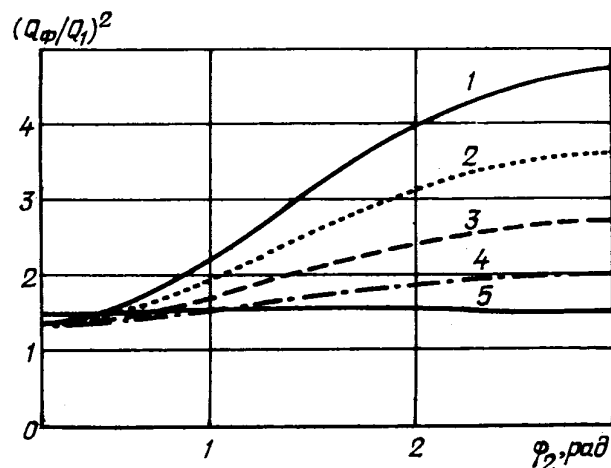


Рис. 3

гармонік [6, 10, 12]. 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 в процесі вимірювання використати такі визначення реактивної потужності, які б адекватно (з допустимою похибкою) давали оцінку реактивного струму $i_p(t)$.

Сумарна реактивна потужність мережі відрізняється від звичайної суми реактивних потужностей всіх гармонік. 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.

Оцінка додаткових втрат електроенергії найбільш повно здійснюється із застосуванням потужності Фризе Q_ϕ та її квадратичних складових, які відображають вплив різних факторів неякісності електроенергії для одно- та багатозафазних кіл, довільного інтервалу часу, при модуляції сигналів напруги та струму [6, 7].

Мають місце такі рівності:

$$Q_\phi^2 = Q_1^2 + D_1^2; \quad Q_\phi^2 = Q_B^2 + D_B^2; \quad Q_\phi^2 = Q_D^2 + D_D^2; \quad Q_\phi^2 = Q_I^2 + D_I^2, \quad (5)$$

де D_1, D_B, D_D, D_I – один із різновидів потужності спотворення.

Розглянемо наведені реактивні потужності як еквівалентні величини додаткових втрат $W_{\text{ДОД}}$ електроенергії. Для цього кожній з реактивних потужностей $Q_B, Q_D, Q_I, Q_{\text{ЕКВ}}$ поставимо у відповідність еквівалентний струм $I_{p,B}, I_{p,D}, I_{p,I}, I_{p,\text{ЕКВ}}$:

$$I_{p,1} = Q_1/U; \quad I_{p,B} = Q_B/U; \quad I_{p,D} = Q_D/U; \quad I_{p,I} = Q_I/U; \quad I_{p,\text{ЕКВ}} = Q_{\text{ЕКВ}}/U. \quad (6)$$

Побудуємо квадратичні співвідношення:

$$\Delta_1 = (Q_1/Q_\phi)^2; \quad \Delta_B = (Q_B/Q_\phi)^2; \quad \Delta_D = (Q_D/Q_\phi)^2; \quad \Delta_I = (Q_I/Q_\phi)^2; \quad \Delta_{\text{ЕКВ}} = (Q_{\text{ЕКВ}}/Q_\phi)^2. \quad (7)$$

Співвідношення (7) 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_ϕ .

Представляє інтерес проаналізувати графіки зміни $\Delta_1, \Delta_B, \Delta_D, \Delta_I, \Delta_{\text{ЕКВ}}$ згідно з виразами (5)...(7) для довільного гармонічного спектра напруги $u(t)$ та струму $i(t)$ і визначити області зміни параметрів сигналу, при яких похибки вимірювання втрат електроенергії знаходяться в наперед заданих межах. З іншого боку, величини $Q_\phi, Q_B, Q_D, Q_I, Q_{\text{ЕКВ}}$ можна про нормувати за величиною Q_1 , що дасть можливість оцінити рівень впливу спотворюючих факторів по відношенню до синусоїдального режиму. Проаналізуємо графіки зміни співвідношення $(Q_\phi/Q_1)^2$ при наявності в спектрі сигналів $u(t)$ та $i(t)$ першої та третьої гармонік. На рис. 3 наведено залежності Δ_1 та Δ_B при зміні кутів ϕ_1 та ϕ_3 між першими та третіми гармоніками $u(t)$ та $i(t)$ від зміни коефіцієнта $K_p = (U_3 I_3) / (U_1 I_1) = 0,5$.

Побудовано сімейство графіків при різних значеннях кута φ_1 ($\pi/6 \dots \pi/2$), зокрема, для графіка 1 $\varphi_1 = \pi/6$; графіка 2 $\varphi_1 = \pi/5$; для графіка 3 $\varphi_1 = \pi/4$; для графіка 4 $\varphi_1 = \pi/3$; для графіка 5 $\varphi_1 = \pi/2$. Відбувається зростання амплітуди сімейства графіків φ_3 ($\pi/6 \dots \pi/3$) на всьому періоді φ_1 . Функція при $\varphi_1 = \pi/6$ має найбільше значення, а при $\varphi_1 = \pi/2$ – найменше. Функція при $\varphi_1 = \pi/2$ найбільш повільно спадає зі збільшенням φ_3 .

Проведений аналіз показує, що різниця між показниками лічильника та дійсним значенням вимірюваної потужності суттєво залежить від відношення амплітуд та фаз усіх гармонік, починаючи з першої. При цьому чим більша реактивна потужність основної гармоніки, тим менша похибка вимірювання лічильника, та навпаки. Найбільша похибка виникає при відсутності споживання реактивної потужності першої гармоніки. У випадку переходу споживача з режиму споживання реактивної потужності вищих гармонік у режим їх генерації, похибка лічильника різко зростає, це відбувається при збільшенні кута між струмом та напругою вищих гармонік.

3. Аналіз електромагнітної сумісності елементів системи. Оскільки потужність Фризе Q_Φ розглядається як квадратична нев'язка між величинами S та P , то для їх характеристики величину R_\perp по аналогії з $R_\parallel = U^2/P$ задамо співвідношенням $R_\perp = U^2/Q_\Phi$. Величина R_\perp має розмірність опору та, як і опір R_\parallel , відображає властивості частини системи відносно виділеного перетину і характеризує відхилення процесів від оптимальних з точки зору виконання критерію мінімуму втрат електроенергії. Мають місце співвідношення $R_\perp = R_\parallel P/Q_\Phi$; $R_\perp/R_\parallel = P/Q_\Phi$; $S = U^2(R_\perp^2 + R_\parallel^2)^{1/2}/R_\perp R_\parallel$; $R_{\text{ЕКВ}} = U/I = R_\perp R_\parallel / (R_\perp^2 + R_\parallel^2)^{1/2}$.

Величину $R_\perp/R_\parallel = P/Q_\Phi$ можна розглядати як показник відносного рівня спотворень сигналів при розгляді критерію мінімуму втрат електроенергії.

Кількісну оцінку рівнів спотворення енергетичних процесів у перетині системи доцільно здійснювати за такими показниками:

$$\Delta_{B1} = \int_0^T (u(t)/i(t) - R_\parallel) dt / (TR_\parallel); \quad (8)$$

$$\Delta_{B2} = Q_{\text{ОБ}}/P; \quad \Delta_{B3} = Q/Q_{\text{ОБ}} - \pi, \quad (9)$$

де $Q_{\text{ОБ}}$ – обмінна потужність [2].

Показники Δ_{B1} та Δ_{B2} відображають відповідно критерії мінімуму втрат та усереднення зворотних потоків енергії. Показник Δ_{B3} є інтегральною характеристикою наближення енергетичного процесу до синусоїдального. Міру оцінки рівнів спотворення енергетичних процесів на основі показників Δ_{B1} , Δ_{B2} , Δ_{B3} можна задати ступенем їх наближення до нуля.

Співвідношення між “спотворюючим” та “оптимальним” сигналом на елементі характеризуються наступними коефіцієнтами [6–8]:

$$K_{E1} = R_\parallel / R_\perp = Q_\Phi / P; \quad K_{E2}(t) = i_p(t) / i_a(t); \quad K_{E2,\Sigma} = \int_0^T K_{E2}(t) dt; \quad (10)$$

$$K_{E3}(t) = |i_p(t)| / |i_a(t)|; \quad K_{E3,\Sigma} = \int_0^T K_{E3}(t) dt; \quad K_{E4} = I_p / I_a, \quad (11)$$

$$\text{де } I_p = \left(\int_0^T i_p^2(t) dt / T \right)^{1/2}; \quad I_a = \left(\int_0^T i_a^2(t) dt / T \right)^{1/2}.$$

Показники (13)...(16) дають змогу оцінити рівні спотворення енергетичних процесів при виділенні як обмінних процесів, так і при аналізі додаткових втрат електроенергії. При аналізі взаємного впливу важливо враховувати парціальний вплив сигналу на елементі чи в перетині системи, вплив зміни параметрів елементів системи, у тому числі діючих генераторів, взаємний вплив елементів системи.

Оцінка впливу зміни параметрів елементів системи практично зводиться до використання функцій чутливості та аналізу стійкості в малому [2, 5–7].

Для моделей СЕП при $n_\Gamma > 1$ та $n_H > 2$ вплив зміни параметрів та сигналів кількох генераторів і навантажень на виділений елемент можна оцінити за такими формулами на основі функцій чутливості:

$$\Delta\gamma = \sum_{i=1}^{n_{nc}} \Delta q_i \partial\gamma / \partial q_i = \sum_{i=1}^{n_{nc}} A_i \Delta q_i; \quad (12)$$

$$\Delta\gamma/\gamma = \sum_{i=1}^{n_{nc}} S_{qi}^y \delta q_i, \quad (13)$$

де $\Delta\gamma$ – зміни сигналу γ на виділеному елементі системи; Δq_i – зміни виділеного i -го параметра чи сигналу генераторів та навантажень системи; n_{nc} – кількість виділених елементів та сигналів; A_i – коефіцієнти впливу; $\delta q_i = \Delta q_i/q_i$ – відносна зміна i -го параметра чи сигналу; $S_{qi}^y = (\partial\gamma/\partial q_i)(\gamma)$ – функція чутливості.

Розрахунок впливу елементів системи у загальному випадку можливий з використанням коефіцієнтів передачі K_{j_1, j_2} сигналу від j_1 -го до j_2 -го елемента. Аргументами таких коефіцієнтів передачі можуть бути частота, параметри самих елементів, час, тривалість окремих енергетично незмінних станів [4–7]. На початковій стадії оцінки вплив окремих елементів системи на вибраний елемент розглядається як сума окремих складових:

$$x_{j_2} = \sum_{j_1=1}^{n_E} K_{j_1, j_2} x_{j_1}; \quad \Delta x_{j_2} = \sum_{j_1=1}^{n_E} K_{\Delta j_1, j_2} \Delta x_{j_1}. \quad (14)$$

При невідповідності показників якості електроенергії нормативним вимогам ГОСТ 13109-97 виникає складна комерційно та технологічно обгрунтована задача пошуку джерел спотворень (тобто винної сторони). Знайти його можна лише шляхом визначення внеску споживача (ДВС) у спотворення якості електроенергії.

Важливо розробити єдиний метод, котрий би давав змогу при оцінці ДВС у точці загального підключення (ТЗП) забезпечити автоматизацію вимірювання та використовував енергетичні характеристики і показники, які адекватно описують процеси в системі, без процедури ідентифікації параметрів моделі [1, 5, 12, 14]. Виділення різних сторін протікання енергетичних процесів у системах з нелінійними нестационарними елементами дозволяє при оцінці ДВС використати як розроблені моделі та алгоритми оцінки ЕМС на основі аналізу обмінних процесів, так і особливості декомпозиції реактивної потужності Фризе Q_Φ . При цьому враховується, що взаємовплив елементів у загальному випадку здійснюється через нелінійні та нестационарні функціональні перетворення, а не тільки через виділення частотно залежних опорів $Z(n\omega)$ та провідностей $Y(n\omega)$. При оцінці ДВС сумістимо переваги представлення і розрахунку процесів енергообміну на основі обмінної потужності Q_{OB} та оцінки неактивних складових потужності Фризе Q_Φ за рахунок розкладу реактивного струму $i_P(t)$ на складові.

Будемо вважати, що передача активної потужності P виконується згідно з накладеними вимогами. У протилежному випадку для оцінки впливу неоптимальності передачі активної потужності P ($P = P_1 + P_\infty$) може бути використано коефіцієнт $k_P = P_\infty / P_1$, де P_∞ та P_1 – величини активної потужності, що надходить у навантаження на вищих та першій гармоніках.

Без порушення узагальнення розглянемо систему на рис. 1, де напруга $u(t)$ генератора Γ та струми $i(t)$ навантажень H_1 та H_2 містять вищі гармонічні складові: $u(t) = u_1(t) + u_\infty(t)$; $i(t) = i_1(t) + i_\infty(t)$. Здійснимо оцінку обмінних процесів по реактивному струму $i_P(t)$ з використанням обмінної потужності Q_{OB} . Для оцінки ДВС обмінні процеси у вузлі для заданої діючої напруги генератора $u(t)$ розділимо за першою (індекс 1), однією j -ю вищою (індекс j), підмножиною $\{H\}$ вищих (індекс H), всіма вищими (індекс ∞) та всіма (індекс Σ) гармоніками згідно з наступними виразами:

$$Q_{OB}^{(1)} = 1/T \int_0^{t^+} u(t) I_{m(1)} \sin(\omega t - \psi_1^i) dt; \quad (15)$$

$$Q_{OB}^{(j)} = 1/T \int_0^{t^+} u(t) (I_{m(j)} \sin(j\omega t - \psi_j^i)) dt. \quad (16)$$

$$Q_{OB}^{(H)} = 1/T \int_0^{t^+} u(t) \left(\sum_{k \in \{H\}} I_{m(k)} \sin(k\omega t - \psi_k^i) \right) dt. \quad (17)$$

$$Q_{\text{об}}^{(\infty)} = 1/T \int_0^{t^+} u(t) \left(\sum_{k=2}^{N_{\Gamma}} I_{m(k)} \sin(k\omega t - \psi_k^i) \right) dt. \quad (18)$$

$$Q_{\text{об}}^{(\Sigma)} = 1/T \int_0^{t^+} u(t) \left(\sum_{k=1}^{N_{\Gamma}} I_{m(k)} \sin(k\omega t - \psi_k^i) \right) dt. \quad (19)$$

Аналіз ДВС на основі обмінних процесів дає можливість [2, 4]:

- аналізу обмінних процесів при наявності в системі різнойменних гармонік;
- аналізу обмінних процесів, коли окремі фрагменти системи (макромоделі) можуть бути представлені джерелами напруги і струму (ідеальними та / чи реальними);
- аналізу обмінних процесів на вищих гармонічних складових напруги та струму для систем постійного струму;
- відмовитись від ідентифікації параметрів моделей, зокрема, величин $Z(n\omega)$ та $Y(n\omega)$ на кожній із частот, кратній основній (не потрібно здійснювати переформатування (зміну) параметрів моделей, коли її елементи змінюються з плином часу).

Для оцінки ДВС на погіршення якості електроенергії в ТЗП запропоновані два підходи. Перший базується на використанні алгоритму оцінки взаємного впливу елементів з виділенням внеску елемента у спотворення електроенергії у вибраному вузлі та аналізу величини впливу спотворюючих факторів на електромагнітні процеси в елементі системи. Вплив елементів системи оцінюється поза залежністю від попередніх режимів роботи як системи в цілому, так і конкретних його елементів, а кількісні показники взаємного впливу визначаються сумою впливів для кожного з виділених факторів неякості електроенергії з врахуванням критерію мінімуму втрат електроенергії. Загальний вплив у вузлі обумовлюється сумою впливів всіх елементів, що підключені до вузла.

Виділення внеску j -го елемента у спотворення електроенергії у вузлі системи передбачає формування інтегральної моделі оцінки взаємного впливу і розщеплення моделі системи на дві ортогональні складові, які відображають відповідно протікання активного та реактивного струмів. Далі здійснюється розрахунок обмінних потужностей у розщепленій моделі на основі реактивної складової струму згідно зі співвідношеннями (15)...(19) та визначається дольовий внесок для j -го елемента:

$$\Delta Q_{\text{в},j} = Q_{\text{об},j} / Q_{\text{обс}}, \quad (20)$$

де $Q_{\text{об},j}$ – обмінна потужність через перетин приєднання j -го елемента до системи; $n_{\text{ЕУ}}$ – кількість елементів системи, підключених до виділеного вузла;

$$Q_{\text{обс}} = \sum_{j=1}^{n_{\text{ЕУ}}} Q_{\text{об},j}; \quad \sum_{j=1}^{n_{\text{ЕУ}}} \Delta Q_{\text{в},j} = 1. \quad (21)$$

Алгоритм оцінки взаємного впливу характеризується такою послідовністю кроків:

- 1) проведення аналізу електромагнітних процесів;
- 2) формування інтегральної моделі оцінки взаємного впливу;
- 3) розщеплення моделі системи на дві ортогональні складові;
- 4) розрахунок обмінних процесів (визначення величин $Q_{\text{об1}}$ та $Q_{\text{об2}}$) у розщепленій моделі на основі реактивної складової струму, наприклад, згідно зі співвідношеннями (15)...(19);
- 5) оцінка впливу j -го елемента схеми із співвідношень (20), (21).

Другий підхід передбачає оцінку зміни величин обмінних потужностей як функцій від окремих змінюваних параметрів, наприклад, згідно з коефіцієнтом впливу (чутливістю) S_j^i зміни обмінної потужності $Q_{\text{об},i}$ i -го елемента від зміни параметра P_j j -го елемента системи: $k_{Q,P} = S_j^i = \Delta Q_{\text{об},i} / \Delta P_j$ (співвідношення (12)...(14)).

При оцінці впливу режимів роботи навантаження H_2 на навантаження H_1 у випадку зміни їх гармонічних спектрів струму на входах (зміни спектрів $\{\Delta S_{H_2}\}$ та $\{\Delta S_{H_1}\}$), що призводить до зміни обмінних потужностей у вузлі відповідно на $\Delta Q_{\text{об},S_2}$ та $\Delta Q_{\text{об},S_1}$, доцільно використати коефіцієнт впливу $k_{Q,S} = \Delta Q_{\text{об},S_1} / \Delta Q_{\text{об},S_2}$. При цьому множини зміни спектрів $\{\Delta S_{H_1}\}$ та $\{\Delta S_{H_2}\}$ включають як однойменні, так і різнойменні гармоніки сигналів.

Для аналізу впливу режимів роботи навантаження H_2 на навантаження H_1 протягом інтервалу часу $\Delta t = t_2 - t_1$ коефіцієнт впливу $k_{Q,t}$ визначається згідно зі співвідношенням $k_{Q,t} = (Q_{\text{об},H_1(t_2)} - Q_{\text{об},H_1(t_1)}) / (Q_{\text{об},H_2(t_2)} - Q_{\text{об},H_2(t_1)})$, де $Q_{\text{об},H_1(t_1)}$ та $Q_{\text{об},H_1(t_2)}$ – значення обмінних потужностей навантаження H_1 у моменти часу t_1 та t_2 ; $Q_{\text{об},H_2(t_1)}$ та $Q_{\text{об},H_2(t_2)}$ – значення обмінних потужностей навантаження H_2 у моменти часу t_1 та t_2 .

Аналіз впливу факторів неякості електроенергії у виділеному вузлі на j -й елемент може здійснюватися для вихідної моделі системи та оцінюватися за алгоритмом, аналогічним наведеному. Для цього доцільно використовувати коефіцієнти впливу, базуючись на співвідношеннях (13)...(16).

Як приклад розглянемо оцінку ДВС для системи на рис. 1. Приєднанням генератора G та навантажень H_1 і H_2 до ТЗП поставимо у відповідність перетини $A-A$, $B-B$ та $C-C$. Нехай напруга генератора $u(t) = U_{m(1)} \sin(\omega t)$; струми навантажень H_1 та H_2 відповідно дорівнюють $i(t)_B = I_{1Bm} \sin(\omega t + \varphi_{1B})$ та $i(t)_C = I_{1Cm} \sin(\omega t + \varphi_{1C}) + K_{1,H_2} I_{1Cm} \sin(3\omega t + \varphi_{3C})$. У цьому випадку струм генератора $i_A(t) = i_C(t) + i_B(t)$. Для аналізу обмінних процесів визначимо реактивний струм навантаження H_2 : $i_p(t) = I_{m(1)} \sin(\psi_1^i) \cos(\omega t) + I_{m(3)} \sin(3\omega t + \psi_3^i)$.

Графіки на рис. 4 a – $в$ показують залежність коефіцієнтів взаємного впливу Δ_A , Δ_B , Δ_C (згідно зі співвідношенням (23)) від зміни коефіцієнта пульсації K_{Π} третьої гармоніки струму на навантаженні H_2 за умови, що $U_1 = 1B$; $I_{1Bm} = 1A$; I_{1Cm} змінюється від 1,1 до 1,5 з кроком в 0,1 A; $\varphi_{1C} = 30^\circ$; $\varphi_{3C} = 0^\circ$; $\varphi_{1B} = 30^\circ$.

Для виділеної схеми на рис. 5 наведено залежності $Q_{\text{об}}^{(3)} / Q_{\text{об}}^{(1)}$ та $Q_{\text{об}}^{(2)} / Q_{\text{об}}^{(1)}$ при зміні кута φ_3 для $K_p = 0,25$. Вихідні дані при

розрахунку $U_1 = 100$; $I_1 = 10$. Наведені графіки ілюструють процес взаємокомпенсації обмінних процесів на першій та третій гармоніках. Аналіз графіків, наведених на рис. 4 та 5, показує складний характер впливу навантаження H_2 на величину ДВС у функції коефіцієнта пульсації K_{Π} , а також можливість появи екстремумів залежно від співвідношень амплітуди та фази третьої гармоніки струму навантаження H_2 .

Практична реалізація наведених теоретичних положень потребує аналізу питань стандартизації щодо забезпечення електромагнітної сумісності в електроенергетичних мережах та електроенергетичного і електротехнічного обладнання в Україні, зокрема, використання положень ГОСТ 13109-97 з врахуванням вимог Європейського Співтовариства. Систематизація нормативно-правового забезпечення західних країн, Росії та України показала необхідність формування комплексної системи стандартів та нормування у сфері ЕМС та якості електроенергії, вдосконаленої системи енергетичних характеристик та показників оцінки енер-

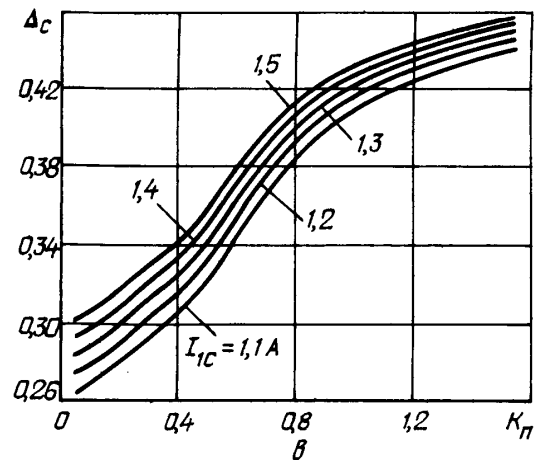
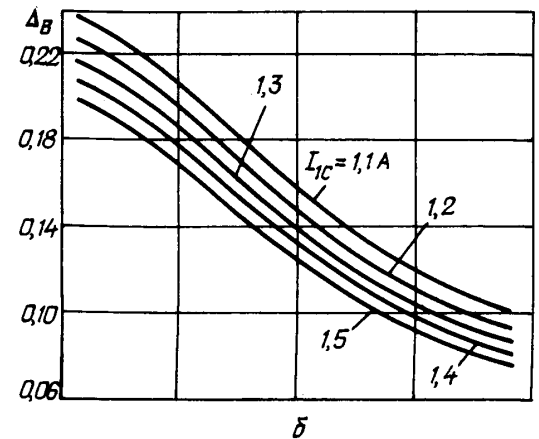
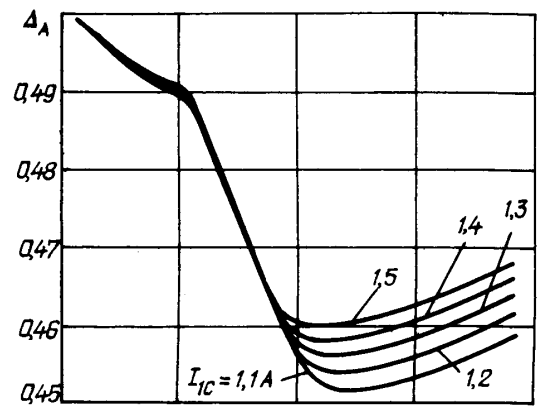


Рис. 4

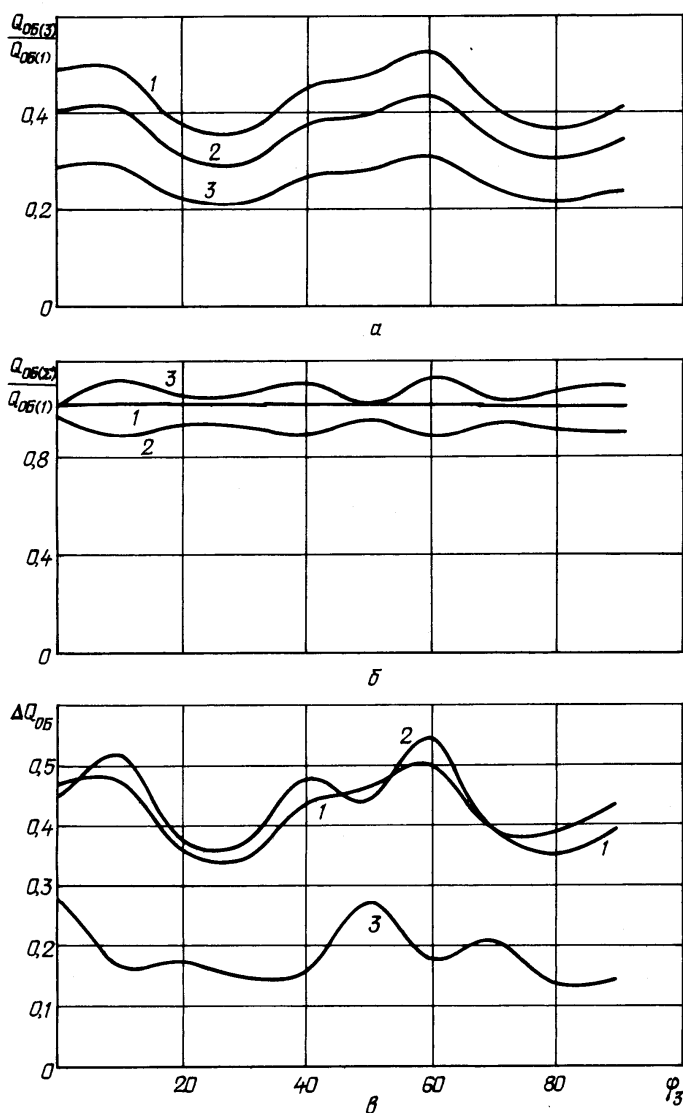


Рис. 5

гоефективності та стану ЕМС в системах різного функціонального призначення. Показано необхідність приведення норм ГОСТ 13109-97 до вимог міжнародних стандартів.

Для забезпечення ефективних змін у сфері підвищення якості електричної енергії, забезпечення ЕМС потрібно:

- внести зміни до Закону «Про електроенергетику» щодо відповідальності сторін (електропередавальна організація – споживач) за погіршення ПЯЕ;

- розробити та прийняти Закон України «Про електромагнітну сумісність» електроустановок та електричних приладів, які виробляються в Україні чи ввозяться на територію нашої країни;

- внести зміни до Правил користування електричною енергією із визначення процедури розгляду звернень щодо якості електричної енергії;

- внести зміни до Правил приєднання електроустановок до електричних мереж щодо підтримання якості та ЕМС електроустановок, які приєднуються до загальної мережі;

- розробити методичку економічної відповідальності за погіршення якості електричної енергії;

- розробити технічні норми з електромагнітної сумісності до електричного обладнання, що проектується, конструюється, виробляється чи ввозиться в Україну.

Висновки. У результаті виконаних комплексних досліджень:

- здійснено комплексний аналіз структури додаткових втрат електроенергії, зокрема, аналіз причин появи додаткових втрат електроенергії, складових додаткових втрат електроенергії, а також точності вимірювання додаткових втрат електроенергії;

- отримано нові співвідношення для визначення в системах з різними типами перетворювальних навантажень складових додаткових втрат електроенергії, які визначаються впливом різних факторів, обумовлених дією циклічної зміни параметрів елементів та режимів роботи системи, а також узагальнені співвідношення для розрахунку складових додаткових втрат електроенергії, що відображають реальні фізичні процеси перетворення енергії в інші види та конкретні особливості структур СЕП;

- розглянуто особливості аналізу точності вимірювання інформаційно-вимірювальними системами додаткових втрат електроенергії. Запропоновано співвідношення оцінки рівнів відображення додаткових втрат електроенергії при використанні окремих визначень реактивної потужності по відношенню до реального рівня додаткових втрат електроенергії;

- оцінено внесок споживача в рівні напруги вищих гармонік у вузлах електричної мережі, вплив споживача на якість електроенергії в мережі та технічні умови на його приєднання, умови приєднання споживачів до електричних мереж з урахуванням показників якості

електроенергії, розроблено відповідні алгоритми оцінки взаємного впливу елементів системи.

Розроблені теоретичні положення, відповідні алгоритми реалізовані у програмних комплексах, які вже частково впроваджені у промислову експлуатацію у складі програмного забезпечення автоматизованих систем диспетчерського управління.

1. *Геворкян В.М., Трошин П.В.* Сравнение методов оценки фактического вклада субъектов электрических сетей в ухудшение качества электрической энергии // Пром. энергетика. – 2008. – № 7. – С. 46–50.
2. *Денисюк С.П.* Аналіз взаємного впливу елементів системи електроживлення з перетворювачами // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2007. – № 2 (17). – С. 13–17.
3. *Денисюк С.П., Кравцов В.О.* Оцінка точності вимірювання складових електроенергії в системах з перетворювачами електроенергії // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – Ч.1. – С. 61–66.
4. *Денисюк С.П., Рибіна О.Б.* Аналіз взаємного впливу елементів системи та оцінка рівнів електромагнітної сумісності в електричних мережах // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – № 20. – С. 9–10.
5. *Денисюк С.П., Рибіна О.Б.* Пріоритети в забезпеченні електромагнітної сумісності в електричних мережах України // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2007. – Ч.1. – С. 84–87.
6. *Денисюк С.П., Рибіна О.Б., Куранда Р.В., Зозуля А.М.* Аналіз взаємного впливу елементів системи електроживлення з перетворювачами // Техн. електродинаміка. Темат. вип. «Силова електроніка та енергоефективність». – 2008. – Ч. 2. – С. 70–75.
7. *Денисюк С.П., Рибіна О.Б., Куранда Р.В., Радши І.П.* Оцінка взаємного впливу елементів системи при підключенні нелінійного навантаження // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – Вип. 21. – С. 32–37.
8. *Денисюк С.П., Сафроненко Є.В., Дерев'янюк Д.Г.* Аналіз якості енергетичних процесів в системах електроживлення з нелінійними нестационарними елементами // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2009. – Вип. 24. – С. 7–10.
9. *Денисюк С.П., Тименко М. В., Радши І.П.* Аналіз складових додаткових втрат електроенергії в колах з несинусоїдальними струмами та напругами // Пр. Ін-ту електродинаміки: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2004. – № 1(7). – С. 109–117.
10. *Железко Ю.С.* Оценка потерь электроэнергии, обусловленных инструментальными погрешностями измерений // Электрические станции. – 2001. – № 8.
11. *Кириленко О.В., Денисюк С.П., Рибіна О.Б.* Особливості забезпечення електромагнітної сумісності в електричних мережах України // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2007. – № 1 (16), Ч. 1. – С. 27–30.
12. *Ладанов А.С., Зацепин Е.П., Захаров К.Д.* Влияние качества электроэнергии на показания счетчиков // Пром. энергетика. – 2004. – № 5. – С. 40–43.
13. *Стогній Б.С., Кириленко О.В., Буткевич О.Ф., Денисюк С.П.* Інформатизація електроенергетичних систем та електричних об'єктів // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2007. – № 1 (16), Ч. 1. – С. 9–15.
14. *Тигунцев С.Г., Луцкий И.И.* Определение и учет вклада потребителя в качество электрической энергии // Пром. энергетика. – 2003. – № 7. – С. 40–45.