

ВИКОРИСТАННЯ ДИНАМІЧНИХ ТА НЕЧІТКИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ АНАЛІЗІ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

В.Г. Кузнецов, чл.-кор. НАН України, **Ю.І. Тугай**, докт. техн. наук, **О.Г. Шполянський**, канд. техн. наук, **І.Ю. Тугай**, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна,
e-mail: tugay@ied.org.ua

Наведено результати досліджень, що мали на меті забезпечити поліпшення якості електроенергії та електромагнітну сумісність у системах електропостачання з джерелами спотворень. Для вирішення задачі підвищення адекватності та точності моделювання запропоновано нові математичні моделі процесів у системах електропостачання, що враховують невизначеність вхідної інформації та динаміку зміни параметрів системи і режиму. Показано можливість формування узагальненого показника якості електроенергії в нечіткій формі. Динамічні моделі спираються на відтворення теплових процесів в елементах електричної мережі та споживачів. Нечіткі моделі представляють показники якості електроенергії у вигляді відповідних нечітких чисел та інтервалів. Проілюстровано використання динамічних моделей для оцінки аномального режиму за критеріями втрат, температури нагрівання та скорочення терміну служби за наявності спотворень якості електроенергії. Розроблено цифрові моделі для оцінки електромагнітної сумісності однофазних кабельних ліній. Запропоновано методику формування нечітких моделей для окремих показників якості електричної енергії. Бібл. 5, рис. 5, табл. 2.

Ключові слова: система електропостачання, якість електричної енергії, показники якості електричної енергії, моделювання усталених режимів, динамічні моделі, нечіткі моделі.

Електроенергетика, як і кожна галузь економіки взагалі, орієнтована на споживача (у широкому розумінні цього слова). Системи електропостачання (СЕР) функціонують у певних межах безпечного відхилення параметрів усталеного режиму від базових значень. Ці межі визначають гарантоване встановлення нормального режиму, що буде задовольняти вимогам до надійного живлення споживачів електричною енергією відповідної якості. Для оцінки можливості негативних наслідків виникнення аномального режиму необхідно постійно виконувати аналіз відхилення критеріїв, що визначають режимну безпеку. Одним з головних серед них є якість електричної енергії (ЯЕ).

Задачі контролю й аналізу ЯЕ можна розділити на дві групи. До першої групи варто віднести контроль ЯЕ, метою якого є визначення відповідності значень обмірюваних показників ЯЕ (ПЯЕ) вимогам стандарту, договору та технічних умов на приєднання. Такий контроль проводять, як правило, на границях балансової належності між енергопостачальною організацією й споживачем або в інших заздалегідь обраних точках контролю.

До другої групи доцільно віднести виміри, спрямовані на забезпечення виконання досліджень електромагнітних процесів, пов'язаних з режимами роботи різних електроустановок та їхнім впливом на ЯЕ. Ці виміри носять не тільки дослідницький характер, але мають і практичне значення, оскільки аналіз ЯЕ – багатогранна задача, основна мета якої визначити вплив джерел спотворення на ЯЕ в СЕС і розробити заходи, спрямовані на нормалізацію режиму. Необхідно виходити з того, що електропостачання базується на трьох самостійних, але нерозривних процесах – виробництво, передача й споживання енергії. Жоден з цих процесів не може бути реалізований без двох інших. Природно, що значення будь-якого з ПЯЕ становить інтерес на всіх етапах перетворення електроенергії. Питання відповідності ПЯЕ встановленим нормам практично в рівному ступені торкаються інтересів як виробника, так і споживача електроенергії. Відповісти на це питання можливо, зокрема, шляхом моделювання нормальних та аномальних (з джерелами спотворень) режимів.

У дослідженнях, які виконувались у відділі оптимізації систем електропостачання Інституту електродинаміки НАНУ, набули подальшого розвитку математичні моделі та методи

аналізу і нормалізації усталених режимів в умовах спотворення ЯЕ. Слід пам'ятати, що хоча покращення ЯЕ становить одну з основних вимог до СЕП, але завищення цієї вимоги призводить до необґрунтованого зростання капіталовкладень, а зниження – до збитків від додаткових втрат електроенергії, зменшення терміну служби обладнання електричних мереж та споживачів, погіршення якості продукції. Тому підвищення адекватності математичних моделей фізичним процесам в елементах систем електропостачання, яке забезпечує зростання достовірності результатів моделювання, є важливою та актуальною науковою задачею.

Директивні та нормативні документи в електроенергетиці встановлюють певні межі відхилення параметрів режиму від номінальних значень. Вважається, що при дотриманні цих норм буде забезпечена електромагнітна сумісність (ЕМС) технічних засобів, які функціонують в СЕП. У загальному сенсі ЕМС визначається як здатність технічних засобів функціонувати з заданою якістю в заданих електромагнітних умовах і не утворювати неприпустимих електромагнітних завад іншим технічним засобам. По відношенню до СЕП ЕМС є здатність електроприймачів (ЕП) нормально функціонувати і не утворювати в ній електромагнітних завад, неприпустимих для інших електроспоживачів.

У роботі [3] було сформульовано принцип моделювання об'єктів, відповідно до якого оцінку ЕМС потрібно проводити не за характеристиками завади $x(t)$, а за характеристиками реакції $y(t)$ об'єкта на заваду. Реакцією об'єкта на заваду можуть бути зменшення продуктивності, збільшення споживання і втрат електроенергії, підвищення температури і скорочення терміну експлуатації. Відповідно до цього критеріями ЕМС повинні виступати саме ці характеристики. Додаткові втрати електроенергії призводять до підвищення температури ЕП. Після закінчення перехідного процесу нагрівання рівняння теплового балансу набуде вигляду

$$\vartheta_c = c_{\vartheta\Delta P}\Delta P, \quad (1)$$

де ΔP – втрати потужності; ϑ – перевищення температури ЕП відносно температури оточуючого середовища (температура перегріву); $c_{\vartheta\Delta P}$ – масштабний коефіцієнт.

Рівняння (1) є статичною моделлю ЕМС за тепловим ефектом. Динамічна модель перевищення температури набуде вигляду

$$\vartheta = c_{\vartheta\Delta P}\Delta P\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) - \vartheta_1 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2)$$

де ϑ_1 – початкове перевищення температури ЕП; τ – постійна часу нагрівання та охолодження.

Якщо початкова температура ЕП дорівнює температурі оточуючого середовища, рівняння (2) спрощується:

$$\vartheta = c_{\vartheta\Delta P}\Delta P\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right). \quad (3)$$

Якщо постійна часу $\tau = 0$, то це означає, що ЕП безінерційний, і формула визначення його температури (3) перетворюється на (1).

У процесі нагрівання механічні та електричні властивості ізоляції можуть погіршуватися, що призведе до скорочення терміну її служби. В електротехніці для оцінки стійкості ізоляції у процесі тривалої експлуатації користуються поняттям температурний індекс.

Температурний індекс – це температура в градусах Цельсія, встановлена відповідно до залежності середнього ресурсу проводу від температури і відповідає середньому ресурсу, що становить 20 000 год. Методика визначення температурного індексу емальованих проводів описана в ГОСТ 10519–76. У ній зазначені умови проведення випробувань і обробки отриманих результатів. При статистичній обробці отриманих експериментальних даних приймається допущення, що старіння ізоляції проводів підпорядковується закону Ареніуса:

$$\lg L = a + b \frac{1}{273 + \Theta}, \quad (4)$$

де L – ресурс при заданій температурі випробувань, год; a, b – коефіцієнти лінійної регресії; Θ – температура випробувань, °С. Відповідно до методики проведення випробувань за температурним індексом провідника і даними зі стандарту можна визначити коефіцієнти лінійної регресії a і b рівняння (4). У табл. 1 температура для 20 000 год отримана за виразом (4) за відповідними значеннями коефіцієнтів a і b .

Таблиця 1

Клас нагрівостійкості		A	E	B	F	H	C	
Температурний індекс за ГОСТ 10519-76, °С		105	120	130	155	180	200	220
Діапазон температур, °С		100-114	115-124	125-149	150-174	175-194	195-214	215-234
Температура [°С] при заданому ресурсі [год],	200	180,00	190,00	200,00	220,00	250,00	270,00	290,00
	5000	125,00	140,00	150,00	175,00	200,00	210,00	230,00
	20000*	105,22	121,65	131,58	158,05	181,30	201,19	221,10
Коефіцієнти регресії для	a	-7,815	-9,246	-9,526	-11,616	-10,923	-11,483	-12,042
	b	4582,5	5346,3	5594,0	6861,2	6916,4	7484,5	8075,0

Таким чином, маючи коефіцієнти регресії для емальованих проводів, можемо визначити термін служби ЕП за його температурою:

$$L = 10^{\frac{a+b}{273+\Theta}} \quad (5)$$

Кратність скорочення терміну служби ізоляції γ визначається відношенням терміну служби при температурі, що дорівнює температурному індексу L_{in} і поточній температурі проводу L_g :

$$\gamma = \frac{L_{in}}{L_g} \quad (6)$$

Графіки кратності скорочення терміну служби ізоляції (у логарифмічному масштабі) температурних індексів 105, 130 і 150 представлені на рис. 1.

Кабельні лінії є одним з основних елементів систем електропостачання. Вони сполучають споживачів з центрами живлення, формують електричну мережу середньої напруги та у все більших обсягах застосовуються в мережах високої напруги. Одним з головних параметрів кабельної лінії є його пропускна здатність. Розрахунок пропускної здатності КЛ виконують при їх проектуванні. Пропускна здатність КЛ обумовлена нагріванням від втрат активної потужності при протіканні по ньому струму навантаження.

За властивостями теплотехнічних матеріалів одножильного кабелю АВВГ-660 були розраховані параметри теплової моделі для перетинів 25, 35, 50 і 70 мм². Для порівняння статичної та динамічної моделей було проведено моделювання процесу нагрівання кабелю довжиною 100 м під час протікання номінального струму. При номінальному струмі температура жили кабелю не повинна перевищувати довшотривалу припустиму. Для кабелю типу АВВГ-660 це 70 °С при температурі оточуючого середовища 25 °С. Тобто перевищення температури жили над температурою повітря складе 45 °С. Результати моделювання наведені в табл. 2.

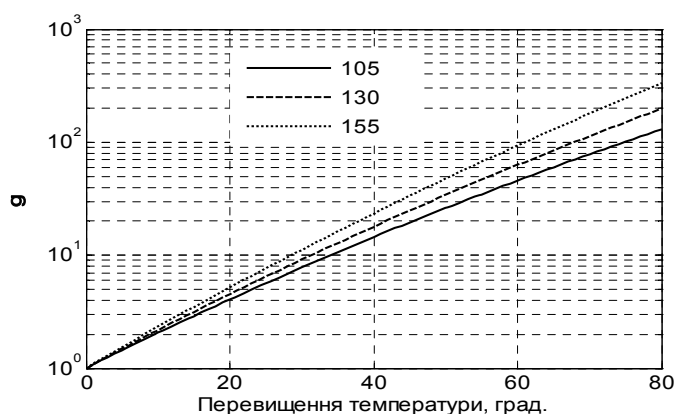


Рис. 1

Таблиця 2

Перетин, мм ²	Усталене перевищення температури, °С	Похибка моделювання, %	Постійна часу τ , с
25	46,015	1,45	77,589
35	46,741	2,49	100,379
50	47,89	4,13	116,395
70	43,647	1,93	199,198

Температури перегріву за статичною та динамічною моделями для кабелю АВВГ-660/25 збігаються приблизно через 250 с, що становить близько $3,22 \tau_{25}$. Таким чином, можна стверджувати, що статичні та динамічні теплові моделі є адекватними.

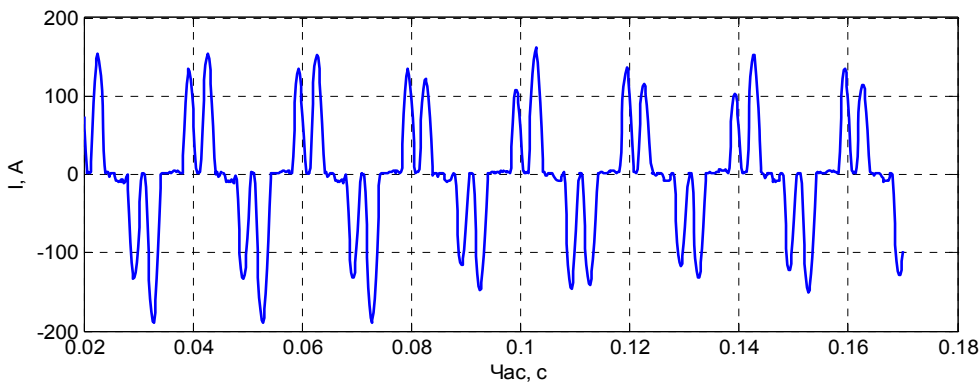


Рис. 2

Порівняння статичної та динамічної моделей під дією несинусоїдальності виконувалося для струму, графік якого зображений на рис. 2. Амплітуда струму масштабувалась таким чином, щоб його діюче значення в початковій ча-

стині було близьким до припустимого. Максимальне значення перевищення температури жили кабелю в статичній моделі склало 45,6 °С. Для динамічної моделі максимальне перевищення становило 38,08 °С. Різниця температури між статичною та динамічною моделями в процесі нагрівання жили кабелю при протіканні номінального струму 105 А за час від 0 до 0,18 с змінюється від 7,615 до 7,518 °С. Тобто при протіканні номінального струму за дев'ять періодів температура жили в динамічній моделі нагріється на 0,1 °С. Якщо в момент часу 0,02 с різниця температур при номінальному струмі склала 7,6 °С, то при несинусоїдному – 7,42 °С. На момент часу 0,14 с діюче значення струму склало приблизно 77 А, температура за статичною моделлю – 24,73 °С, а за динамічною – 21,0 °С. Таким чином, зниження температури за статичною моделлю склало 20,87 °С, а динамічною – 18,08 °С.

При протіканні цього ж несинусоїдного струму через кабель перетином 70 мм² максимальна температура перегріву жили кабелю для статичної моделі склала 17,51 °С, а для динамічної – 15,19 °С. Різниця між цими температурами для кабелів перетином 25 і 70 мм² складає для статичної моделі 28,09 °С, а для динамічної – 20,57 °С. Це підтверджує необхідність оцінки ЕМС не за заводою, а за реакцією ЕП на заводу.

Взагалі слід зазначити, що поняття "якісна електроенергія", по суті, містить лінгвістичну невизначеність. Використання методів контролю першої групи, тобто за допомогою нормування ПЯЕ, розкриває цю невизначеність шляхом завдання на числовій осі множини значень ПЯЕ, які відповідають поняттю "якісна електроенергія". Цей спосіб розкриття невизначеності характерний для детермінованого підходу. У результаті його застосування, з одного боку, завдання оцінки ЯЕ спрощується до бінарного логічного висновку, з іншого – ускладнюються умови визначення й оцінки ПЯЕ, а спрощення, пов'язані з детермінізацією, породжують проблеми похибок, точності та адекватності. При такому підході можна зробити висновок про відповідність ПЯЕ встановленим нормам або невідповідності, але не представляється можливим визначити, у якому ступені отримані ПЯЕ відповідають зазначеним нормам. Це суттєво знижує інформативність оцінки ЯЕ, не дає змоги повною мірою відстежити динаміку зміни ПЯЕ й попередити їхнє подальше погіршення.

Зазначених недоліків можна уникнути, застосувавши нечіткий підхід при оцінці ПЯЕ [5]. Оскільки нечіткий підхід є більш загальним у порівнянні з детермінованим, він дасть

змогу не тільки контролювати виконання вимог нормативних документів, але й використовувати їх під час нормалізації режиму [2]. Розглянемо використання цього підходу для конкретних ПЯЕ.

Відхилення напруги характеризується показником усталеного відхилення напруги, для якого встановлені нормально та гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги. З точки зору теорії нечітких множин така норма може бути представлена нечітким інтервалом з функцією належності (рис. 3):

$$\mu_{\delta U_{y-n}} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{U - 0,9U_n}{0,05U_n}, \frac{1,1U_n - U}{0,05U_n} \right\} \right\}. \quad (7)$$

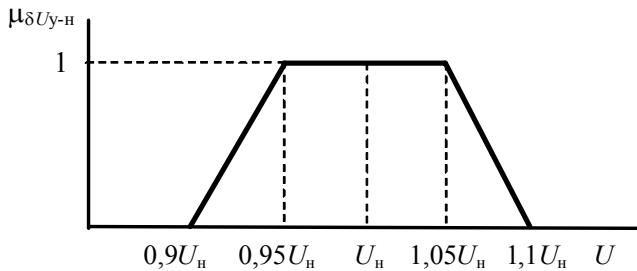


Рис. 3

Вимірювання усталеного відхилення напруги δU_y здійснюють відповідно до рекомендацій, наведених в [1]. У результаті за період часу (24 год) утворюється множина значень ΔU_y розмірності N_{Δ} . Представимо цю множину у вигляді нечіткого числа із трикутною функцією належності:

$$\mu_{\Delta U_y} = \max \left\{ 0, \min \left\{ \frac{\delta U_y - \delta U_{ymin}}{\delta U_{ym} - \delta U_{ymin}}, \frac{\delta U_{ymax} - \delta U_y}{\delta U_{ymax} - \delta U_{ym}} \right\} \right\}, \quad (8)$$

де

$$\delta U_{ymax} = \max_{\Delta U_y} \{ \delta U_{yj} \}; \quad \delta U_{ymin} = \min_{\Delta U_y} \{ \delta U_{yj} \}; \quad \delta U_{ym} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{\Delta}} \mu_{\delta U_{yj}} \delta U_{yj}}{\sum_{j=1}^{N_{\Delta}} \mu_{\delta U_{yj}}}, \quad (9)$$

де $\mu_{\delta U_{yj}}$ — функція належності (ступінь довіри) δU_{yj} множини ΔU_y .

Значення $\mu_{\delta U_{yj}}$ може бути визначено неформально, що небажано, оскільки суб'єктивізм може спотворити реальну картину. Більш об'єктивно такі параметри можна одержати, наприклад, з використанням апарата математичної статистики. Скажімо діапазон

$\{ \delta U_{ymin}, \delta U_{ymax} \}$ розбити на інтервали, визначити частоту влучення δU_{yj} у відповідні інтервали. Значення цих частот, віднесені до максимального значення частоти, можна взяти в якості $\mu_{\delta U_{yj}}$.

Несинусоїдальність напруги характеризується такими показниками:

— коефіцієнтом викривлення синусоїдальності кривої напруги (рис. 4):

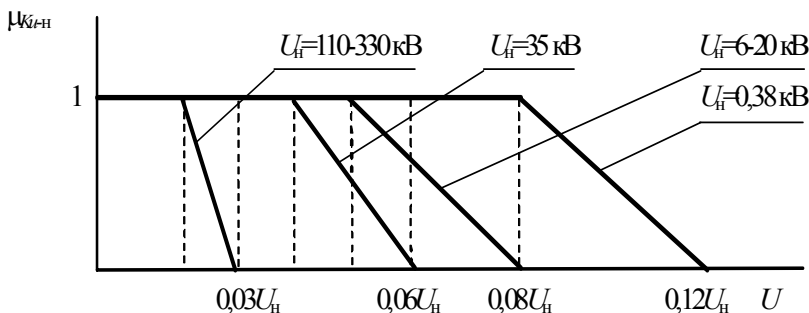


Рис. 4

$$\mu_{K_{U-n}} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{K_{Un} - K_U}{K_{Un} - K_{Un}} \right\} \right\}, \quad (10)$$

де значення K_{Un} , $K_{Uд}$ – гранично допустимі та допустимі значення коефіцієнта викривлення синусоїдальності, що залежать від номінальної напруги та наведені в [1];

– коефіцієнтом n -ї гармонічної складової напруги, вираз для розрахунків функції належності якого аналогічний (8), значення $K_{Uд}$ наведені в [1], а $K_{Un} = 1,5 K_{Uд}$.

Вимірювання коефіцієнта n -ї гармонічної складової напруги $K_{(n)i}$ здійснюють для міжфазних (фазних) напруг згідно з методикою, аналогічною розрахункам δU . Обчислюють значення коефіцієнта n -ї гармонічної складової напруги $K_{U(n)}$ у відсотках як результат усереднення N спостережень $K_{U(n)i}$ на інтервалі часу T_{vs} , рівному 3 с. Число спостережень N має бути не менше 9 [1]. Вимірювання проводяться протягом 24 год. Отримана множина, аналогічна (8), апроксимується нечіткою множиною ΔK_U з функцією належності:

$$\mu_{\Delta K_U} = \max \left\{ 0, \min \left\{ \frac{K_U - K_{U\min}}{K_{Um} - K_{U\min}}, \frac{K_{U\max} - K_U}{K_{U\max} - K_{Um}} \right\} \right\}, \quad (11)$$

де

$$K_{U\max} = \max_{\Delta K_U} \{K_{Uj}\}; \quad K_{U\min} = \min_{\Delta K_U} \{K_{Uj}\}; \quad K_{Um} = \frac{\sum_{j=1}^{N_A} \mu_{K_{Uj}} K_{Uj}}{\sum_{j=1}^{N_A} \mu_{K_{Uj}}}, \quad (12)$$

де $\mu_{K_{Uj}}$ – функція належності (ступінь довіри) K_{Uj} множини ΔK_U .

Несиметрія напруги характеризується наступними показниками:

– коефіцієнтом несиметрії напруги за зворотною послідовністю;

– коефіцієнтом несиметрії напруги за нульовою послідовністю:

$$\mu_{K_{2U-n}} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{4 - K_{2U}}{2} \right\} \right\}, \quad \mu_{K_{0U-n}} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{4 - K_{0U}}{2} \right\} \right\}. \quad (13)$$

Вимірювання коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовностями K_{2U} , K_{0U} для міжфазних напруг здійснюють згідно з методикою, наведеною в [1].

Обчислимо значення коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю K_{2U} у відсотках як результат усереднення N спостережень K_{2Uj} на інтервалі часу T_{vs} , що становить 3 с. Вимірювання проводяться протягом доби. Отримана множина, аналогічна (8), апроксимується нечіткою множиною ΔK_{2U} з функцією належності:

$$\mu_{\Delta K_{2U}} = \max \left\{ 0, \min \left\{ \frac{K_{2U} - K_{2U\min}}{K_{2Um} - K_{2U\min}}, \frac{K_{2U\max} - K_{2U}}{K_{2U\max} - K_{2Um}} \right\} \right\}, \quad (14)$$

де

$$K_{2U\max} = \max_{\Delta K_{2U}} \{K_{2Uj}\}; \quad K_{2U\min} = \min_{\Delta K_{2U}} \{K_{2Uj}\}; \quad K_{2Um} = \frac{\sum_{j=1}^{N_A} \mu_{K_{2Uj}} K_{2Uj}}{\sum_{j=1}^{N_A} \mu_{K_{2Uj}}}, \quad (15)$$

де $\mu_{K_{2Uj}}$ – функція належності (ступінь довіри) K_{2Uj} множини ΔK_{2U} .

Аналогічні вирази можна отримати і для K_{0U} .

Ступінь відповідності нечітких значень ПЯЕ нечітким нормам ПЯЕ можна оцінити за їх перетином (рис. 5):

$$S = S_{НЯЕ} \cap S_{ПЯЕ}. \quad (16)$$

На рис. 5 індекси гн, н, м, в, гв – відповідно: гранично низьке, низьке, модальне значення, високе, гранично високе.

Перетин нечітких чисел у загальному випадку має функцію належності, відмінну від трикутної (рис. 5), і висоту $h \neq 1$.

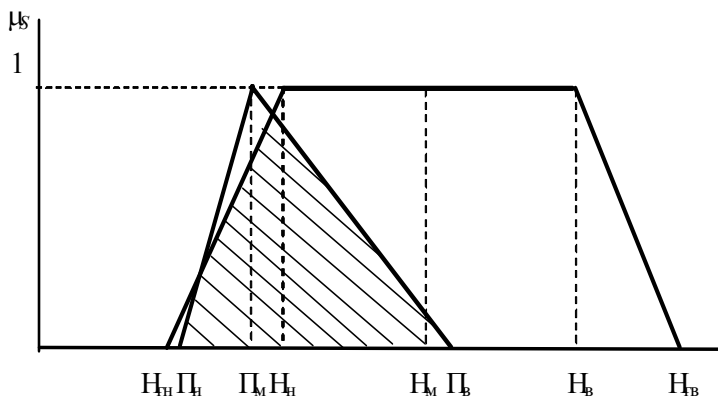


Рис. 5

Чисельно перетин нечітких чисел можна оцінити за площею фігури, що утворена функцією належності перетину. Тоді функція належності відповідності нечіткого ПЯЕ нечітким нормам ПЯЕ може бути представлена у вигляді

$$\mu_{\text{ЯЕ}} = S / S_{\text{ПЯЕ}}. \quad (17)$$

Перетин нечіткого інтервалу з синглетоном можна оцінити не за площею перетину фігур під функціями належності, а за формулою

$$\mu_{\text{ЯЕ}} = \min(\mu_{\text{НЯЕ}}, \mu_{\text{ПЯЕ}}). \quad (18)$$

Таким чином, маючи залежності для розрахунків функцій належності нечітких норм ПЯЕ і розраховані з використанням вимірювань функції належності ПЯЕ (8)...(15), використовуючи вирази (17), (18), одержимо набір значень функцій належності відповідності нечітких ПЯЕ нечітким нормам ПЯЕ для кожного показника якості електроенергії.

Оскільки операції над нечіткими множинами однозначно проектується на операції з їх функціями належності, то сформувавши узагальнений показник, що відбиває нечітке поняття «якості електроенергії», можна досить просто.

Наприклад, з використанням логічної операції перетину узагальнений показник якості [3] може бути представлений у такому виді:

$$\text{ЯЕ} = \bigcap_{i=1}^{N_{\text{ПЯЕ}}} \text{ПЯЕ}_i; \quad \mu_{\text{ЯЕ}} = \min_i(\mu_{\text{ЯЕ}i}),$$

де $N_{\text{ПЯЕ}}$ – число розглянутих показників якості. Тоді $\mu_{\text{ЯЕ}}$ можна вважати узагальненим показником, що оцінює якість електроенергії числом з діапазону $[0, 1]$.

У цілому при виконанні досліджень отримано такі результати:

- запропоновано статичні та динамічні моделі ЕП для оцінки ЕМС за критеріями втрат, температури нагріву та скорочення терміну служби за наявності спотворень ЯЕ, що дає змогу обґрунтовано впроваджувати заходи по забезпеченню ЕМС, нормалізації ПЯЕ, підвищенню ефективності роботи електрообладнання;
- розроблено цифрові моделі для оцінки ЕМС однофазних кабельних ліній та проведено моделювання режимів систем електропостачання з джерелами спотворення, що підтверджують необхідність врахування теплової інерції ЕП при оцінці ЕМС;
- запропоновано при моделюванні режимів СЕП з джерелами спотворень враховувати невизначеність інформації при оцінці ЕМС і нормуванні ПЯЕ, що дає можливість не тільки перевіряти виконання нормативних значень ПЯЕ, але й виконувати їх оптимізацію;
- розроблено концепцію використання в нечіткій моделі множини – перетину сегментів повноти і достовірності, яка дозволила формування узагальненого показника якості електроенергії в нечіткій формі.

1. *Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97.* – М.: Госстандарт РФ, 1997. – 33 с.
2. *Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И., Тимчук С.А., Черемисин Н.М.* Методика оценки качества электроэнергии в нечеткой форме // *Вісн. Харк. нац. техн. ун-ту с.г. ім. Петра Василенка.* – 2013. – Вип. 141. – С. 41–44.
3. *Кузнецов В.Г., Шполянський О.Г.* Анализ изменения электропотребления и потерь асинхронного двигателя при несинусоидальном напряжении // *Электрика.* – 2006. – № 4. – С. 25–29.
4. *Кузнецов В.Г., Шполянський О.Г., Яремчук Н.А.* Узагальнений показник якості енергії в електричних мережах і системах // *Техн. електродинаміка.* – 2011. – № 3. – С. 46–52.

5. Mauris G., Lassere V., Foulloy L. A fuzzy approach for the expression of uncertainty in measurement // Measurement. – 2001. – Vol. 29, No. 3. – P. 165–177.

УДК 621.311.001.57

В.Г. Кузнецов, чл.-корр. НАН Украины, **Ю.И. Тугай**, докт. техн. наук, **О.Г. Шполянский**, канд. техн. наук, **И.Ю. Тугай**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03680, Украина

Использование динамических и нечетких математических моделей при анализе качества электрической энергии

Рассмотрены результаты исследований, цель которых усовершенствовать решение задач улучшения качества электроэнергии и электромагнитной совместимости в современных системах электроснабжения с источниками искажений. Это позволит повысить эффективность решений, принимаемых как в процессе проектирования, так и эксплуатации. С целью обеспечения адекватности и точности моделирования предложены новые математические модели процессов в системах электроснабжения, которые учитывают динамику изменения параметров системы и режима, а также неопределенность входной информации. Динамические модели основываются на воспроизведении тепловых процессов в элементах электрической сети и потребителей. В частности, при этом учитывается эффект старения изоляции для силовых кабелей. Проиллюстрировано использование динамических моделей для оценки аномального режима по критериям потерь, температуры нагрева и сокращения срока службы при наличии искажений качества электроэнергии. Разработаны цифровые модели для оценки электромагнитной совместимости однофазных кабельных линий. Нечеткие модели представляют показатели качества электроэнергии в виде соответствующих нечетких чисел и интервалов. Предложена методика формирования нечетких моделей для отдельных показателей качества электрической энергии. По сравнению с детерминированной методикой, которая предназначена для фиксации наличия некачественной электроэнергии и определения мероприятий по нормализации качества электроэнергии по факту, разработанная методология позволяет отслеживать изменение качества электроэнергии даже если основные показатели не выходят за пределы допустимых значений, проводить анализ динамики изменения показателей качества электрической энергии и определять упреждающие мероприятия по их нормализации. Показана возможность формирования обобщенного показателя качества электроэнергии в нечеткой форме. Библ. 5, рис. 5, табл. 2.

Ключевые слова: система электроснабжения, качество электрической энергии, показатели качества электрической энергии, моделирование установившихся режимов, динамические модели, нечеткие модели.

V.G. Kuznetsov, Y.I. Tugai, O.G. Shpolianskyi, I.Y. Tugai

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Using dynamic and fuzzy mathematical models in analysis of power quality

The results of studies that were intended for the improving of power quality and electromagnetic compatibility in modern power supply systems with the sources of distortion are presented. Poor power quality can result in lost productivity, lost and corrupt data, damaged equipment and early failure of equipment. Power quality examines the voltage quality by defining power quality events and every standard is similar in that voltage events are defined in terms of their magnitude and their duration in time. Thus, incomplete quality information comes from instantaneous measurements. Also the dynamic models must be used for computer simulation. The dynamic models are based on the thermal processes in the elements of electrical networks and consumers. In particular, the heating and the cooling must be taking into account. For example the proposed model was used for the purpose of study the effect of aging insulation in power cables as result of heating. The developed fuzzy models represent the power quality as the complex of fuzzy numbers and intervals. The forming of particular fuzzy models for the power quality factor is shown. Compared with the deterministic models, which are used to control of the power quality in fact, the developed methodology, allows tracking changes in the power quality, even if the underlying data are not out of range. Therefore, an analysis of the dynamics of change of electric energy quality and the definition of proactive measures for their normalization are possible. The approach to formation of power quality generalized factor in fuzzy form is proposed. References 5, figure 5, tables 2.

Key words: power supply system, quality of electrical energy, power quality indices, steady state modeling, dynamic models, fuzzy models.

Надійшла 13.05.2014

Received 13.05.2014