

А.П. Лютий, інженер (ВАТ “Дніпроспецсталь”, Запоріжжя)

Оцінка електромагнітної сумісності при випадковій несиметрії напруг в електричних мережах

Розглянуто задачу оцінки допустимості несиметрії напруг, яка змінюється випадково. Враховано інерційність електрообладнання до впливу несиметрії. Знайдено імовірнісний розподіл температур перегріву електрообладнання. Дано оцінку теплового зносу від випадкової несиметрії.

Рассмотрена задача оценки допустимости изменяющейся случайным образом несимметрии напряжений. Учтена инерционность электрооборудования к воздействиям несимметрии. Найдено вероятностное распределение температур перегрева электрооборудования. Дана оценка теплового износа от случайной несимметрии.

Постановка задачі. Норми на несиметрію напруги [1, 2] фактично відносяться до якогось одного стандартного електроприймача. Їх застосування цілком виправдано у взаємовідносинах поставників і споживачів електроенергії. Якщо ж оцінюється електромагнітна сумісність (ЕМС) для конкретного підприємства, то потрібно враховувати характеристики його електрообладнання. Тому доцільно розглядати задачі оцінки ЕМС двох типів: задача першого типу полягає в перевірці рівня несиметрії щодо норм стандартів, а другого типу – в оцінці діянь несиметрії на всі електроприймачі.

В [1] відсутні методи розрахунку показників ЕМС за характеристиками випадкового процесу зміни симетричних складових. В [3, 4] такі методи запропоновано для випадків, коли діапазони зміни несиметрії малі, а тому можлива лінеаризація моделей ЕМС. Метою статті є знаходження показників ЕМС для загального випадку¹. Для короткості розглядається зворотна послідовність, але усі результати очевидним чином поширюються на нульову послідовність.

Вихідні дані для діючих підприємств знаходяться експериментально у вигляді характеристик несиметрії напруги, а в проектуванні потрібно мати характеристики послідовностей струмів електроприймачів, по яких методами теорії імовірностей розраховуються характеристики несиметрії від групи електроприймачів.

Вихідні імовірнісні розподіли. Вихідними даними для розрахунків є середнє значення K_{2c} і кореляційна функція (КФ) $B_2(\tau)$ поточних величин K_{2U} коефіцієнтів несиметрії напруги в %. Стандарт σ_2 коефіцієнтів несиметрії дорівнює $\sqrt{B_2(0)}$. Імовірнісний розподіл коефіцієнтів звичайно вважається нормальним, бо несиметрія створюється сумою зворотних послідовностей струмів групи електроприймачів. Цей закон не має меж по осі абсцис, але це не є перепорою щодо його використання при дослідженні суцільно додатних випадкових величин, бо розрахункові значення беруться кінцевими:

$$K_{2\min} = K_{2c} - \beta\sigma_2, \quad K_{2\max} = K_{2c} + \beta\sigma_2, \quad (1)$$

де β – статистичний коефіцієнт, який визначається по межовій імовірності E_x (табл. 1 в [3]). Якщо $K_{2\min}$ більше нуля, тобто $K_{2c} > \beta\sigma_2$, то фізичний зміст не порушується. Коли ж ця нерівність не виконується, то потрібно приймати зрізаний нормальний розподіл, який визначено у межах (K_{2M} , K_{2m}) зміни коефіцієнту несиметрії.

Звичайно вихідну КФ апроксимують одним з виразів:

$$B_2(\tau) = \sigma_2^2 \exp(-\alpha|\tau|), \quad (2)$$

$$B_2(\tau) = \sigma_2^2 \exp(-\alpha|\tau|) \cos \omega_0 \tau, \quad (3)$$

¹ Автор дякує член-кор. НАНУ Кузнецова В.Г. за постановку задачі.

де α і ω_0 – параметри.

Задача першого типу. В [1] нормуються трисекундні ефективні значення коефіцієнта несиметрії. Вони розраховуються шляхом кумулятивного перетворення

$$K_{2\theta}(t) = \sqrt{\frac{1}{\theta} \int_{t-\theta}^t K_2^2(t) dt} \quad (4)$$

квадратів поточних значень коефіцієнтів несиметрії при $\theta = 3$ с (в [1] замість інтегралу прийнята сума).

Метою розрахунків є функція розподілу $F(K_{2\theta})$ кумулятивних значень (4), по якій за заданими межовими імовірностями знаходяться розрахункові максимальні значення $K_{2\theta\max}$ і $\tilde{K}_{2\theta\max}$ коефіцієнтів несиметрії для нормального і граничного режимів. Для цих режимів норми становлять: $[K_{2\theta}] = 2\%$ і $[\tilde{K}_{2\theta}] =$

$= 4\%$. Згідно з [1] перша норма може перевищуватися з межевою імовірністю 0,05, а друга – з нульовою імовірністю. Якщо перша норма не суперечить відомому принципу практичної впевненості, то вимога щодо нульової імовірності є принципово невірною.

Дійсно, якщо за якусь добу знайдена статистична функція розподілу (ломана 1, рис. 1), її найбільша абсциса (точка a) дійсно має статистичну імовірність $E_x = 0$. Але це зовсім не означає, що це значення

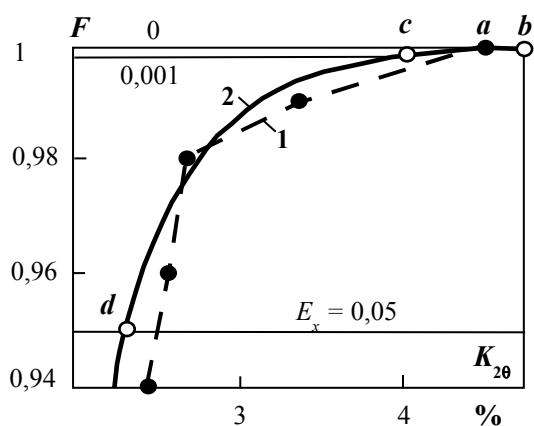


Рис. 1

буде зареєстроване за інші доби. Тому приймати його в якості розрахункового значення не можна – потрібно виконати статистичні дослідження за декілька діб (в [1] – за 7 діб) і на їх основі підібрати теоретичну функцію розподілу (крива 2), яка при нульовій імовірності дає значення K_{2M} (точка b). Розрахункове значення приймається саме по теоретичній функції. Для граничного режиму істотно прийняти значення $E_x = 0,001$, яке відповідає відомому правилу трьох сигм. Для нормального режиму слушно залишити значення 0,05. На рис. 1 точки c і d дають розрахункові значення для цих межових імовірностей.

В проектуванні прийняття нульової імовірності призводить до завищення оцінок ЕМС і перевитрат на її забезпечення, бо у цьому випадку було б потрібно вести розрахунки по значенню K_{2M} , яке дорівнює сумі найбільших ординат індивідуальних процесів зміни

несиметрії. Завищення оцінок визначається різницею абсцис точок b і c . Воно тим більше, чим більше кількість джерел несиметрії.

Очевидно, що в стандартах норми ЕМС не можливо встановити для всіх електроприймачів – звичайно вони приймаються для деякого стандартного електроприймача. З перетворення (4) випливає, що в [1] фактично розглядається такий електроприймач, робота якого залежить від енергії, яка спожита за час θ його увімкнення. Структурну схему відповідної моделі ЕМС наведено на рис. 2, де позначено: 1 – квадрататор, 2 – кумулятивна ланка з параметром $\theta = 3$ с, 3 – блок здобуття квадратного кореня, $y = K_{2U}^2$, $w = K_{2\theta}^2$. Процеси після блоків 1 і 2 мають однакові середні значення:

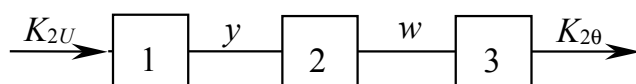


Рис. 2

$$y_c = w_c = K_{2c}^2 = K_{2c}^2 + \sigma_2^2, \quad (5)$$

де K_{2c} – ефективне значення коефіцієнтів несиметрії.

Коли вихідний розподіл є нормальним, КФ квадратів коефіцієнтів

несиметрії обчислюється за формулою

$$B_y(\tau) = 2B_2^2(\tau) + 4K_{2c}^2 B_2(\tau), \quad (6)$$

яку можна застосовувати і для інших розподілів – хоча б у якості першого наближення. Коли це не можливо, КФ потрібно знаходити методами імітації.

Дисперсія D_w квадратичного кумулятивного процесу обчислюється за загальною формулою теорії імовірностей по КФ (6). Для вихідної КФ виду (1) знайдемо

$$D_w = \frac{\sigma_2^2}{2\alpha^2\theta^2} \left[\sigma_2^2 (2\alpha\theta + e^{-2\alpha\theta} - 1) + 16K_{2c}^2 (\alpha\theta + e^{-\alpha\theta} - 1) \right]. \quad (7)$$

Слід відзначити, що в аналогічній (7) формулі (П.70) з [3] припущено описку.

Задача про імовірнісний розподіл квадратичного кумулятивного процесу не має аналітичного рішення, тому її потрібно розв'язувати статистичними методами на підставі експериментальних досліджень або шляхом імітації. Статистичні розподіли досить часто апроксимують бета-розподілом [5], який, наприклад, було прийнято в роботі [6] для квадратичних інерційних процесів. Наші експерименти підтвердили коректність такої гіпотези і для кумулятивних процесів.

У випадку, що розглядається, границі зміни ординат квадратичного кумулятивного процесу становлять: $w_m = K_{2m}^2$ і $w_M = K_{2M}^2$, а ширина діапазону $K_w = w_M - w_m$. Як показано у додатку, розрахунки доцільно робити з використанням стандартного бета-розподілу (Д. 1). Його параметри p_w і q_w розраховуються за формулою (Д. 5), для чого в ній достатньо змінити s на w .

Розрахункові значення w_{\max} і \tilde{w}_{\max} знаходяться за формулами (Д. 6) і (Д. 7) для межових імовірностей 0,05 і 0,001. Від них згідно з (4) потрібно перейти до максимальних значень

$$K_{2\theta\max} = \sqrt{w_{\max}}, \quad \tilde{K}_{2\theta\max} = \sqrt{\tilde{w}_{\max}}.$$

ЕМС дотримується, якщо

$$K_{2\theta\max} \leq [K_{2\theta}], \quad \tilde{K}_{2\theta\max} \leq [\tilde{K}_{2\theta}]. \quad (8)$$

Прямі показники ЕМС. Коефіцієнт несиметрії є непрямим показником ЕМС, бо він може відображати результати діяння несиметрії на електроприймачі лише при повільній його зміні, коли показники діяння зв'язані з коефіцієнтом несиметрії функціональною залежністю (статична задача). У загальному випадку потрібно моделювати реакції електроприймачів на несиметрію. Характеристики реакцій є прямими показниками ЕМС.

Найбільш критичними до несиметрії є асинхронні двигуни. У роботі [7] наведені вирази щодо температури ϑ додаткового перегріву і відносного скорочення z терміну служби двигунів для випадку незмінної несиметрії. Якщо вона змінюється, потрібно враховувати інерційність двигунів до діяння несиметрії. Тому для оцінки ЕМС за несиметрією прийемо енергетичну інерційну модель (рис. 3), основу

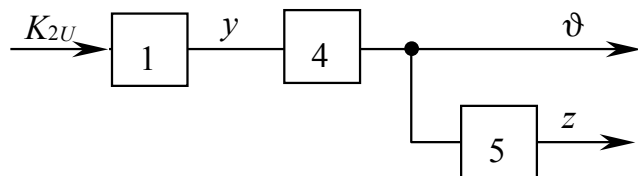


Рис. 3

якої складає квадратор 1 і інерційна (апериодична) ланка 4 з коефіцієнтом передачі c_ϑ у $(^\circ\text{C}) / (\%)^2$ і сталою часу T , яка співпадає зі сталою нагріву двигуна. Ці блоки моделюють температуру перегріву двигуна зі сталою часу T згідно з диференціальним рівнянням

$$T\vartheta' + \vartheta = c_\vartheta K_{2U}^2. \quad (9)$$

Згідно з [8] для двигунів можна приймати $c_\vartheta = 2(^\circ\text{C}) / (\%)^2$. Середнє значення температури

$$\vartheta_c = c_\vartheta \nu_c = c_\vartheta K_{2c}^2. \quad (10)$$

Хоча перетворення (4) і (9) принципово розбіжні, в літературі вважають, що їх можна еквівалентувати відносно максимальних значень процесів $w(t)$ і $\vartheta(t)$. Наприклад, в теорії електричних навантажень [9] еквівалентне значення T_ϑ сталої часу приймають у три рази меншим за θ (в [3] $T_\vartheta = \theta / 2,25$). Не зупиняючись на цьому припущенні, відмітимо, що еквівалентне значення можна знайти з порівняння процесів $w(t)$ і $\vartheta(t) / c_\vartheta$. Їх середні значення співпадають, тому величину T_ϑ визначимо з рівності дисперсій (7) і $D_\vartheta / c_\vartheta^2$, яка розв'язується чисельно. Очевидно, що в різних задачах відношення θ / T_ϑ не буде однаковим, тому що дисперсії залежать від виду і параметрів вихідних КФ.

Відносне скорочення строку служби двигунів при незмінній несиметрії становить

$$z = \exp(a\vartheta_c) = \exp(a_2 K_{2c}^2), \quad (11)$$

де коефіцієнти a і $a_2 = c_{\vartheta} a$ залежать від виду ізоляції. З формули (7) в [7] випливає, що $a_2 = 0,0434 (\%)^{-2}$, тобто $a = 0,0217 (^\circ\text{C})^{-1}$. На рис. 3 нелінійне перетворення (11) виконується блоком 5.

У якості прямих показників ЕМС приймемо максимальне значення ϑ_{\max} температури перегріву і відносне скорочення строку служби. Їх допустимі значення беруться з норм для двигунів, що досліджуються. При відсутності таких даних можна виходити з норм [1]. У цьому випадку для нормального і граничного режимів отримуємо

$$[\vartheta_{\max}] = c_{\vartheta} [K_{2U}]^2 = 8 \text{ }^\circ\text{C}, \quad [\tilde{\vartheta}_{\max}] = 32 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (12)$$

Слід відзначити, що в літературі (наприклад, в [10]) не визнається коректність застосування максимальної температури як показника режиму при змінному навантаженні, оскільки норми на цей показник відносяться до тривалого режиму. Але наявність норм [1] потребує використання максимальної температури хоча б з формальних міркувань.

Оскільки знос ізоляції залежить від середньої температури, то при змінній несиметрії в формулу (11) потрібно підставити одне середньодобове значення

$$[K_{2U}]_c = 2^2 \cdot 0,95 + 4^2 \cdot 0,05 = 4,6 (\%)^2,$$

яке дає одну норму

$$[z] = \exp(4,6a_2), \quad (13)$$

в тому числі для двигунів $[z] = 1,22$.

ЕМС виконується, якщо

$$\vartheta_{\max} \leq [\vartheta_{\max}], \quad \tilde{\vartheta}_{\max} \leq [\tilde{\vartheta}_{\max}], \quad z \leq [z]. \quad (14)$$

До мережі підключаються двигуни з різними сталими часу, тому метою розрахунків є отримання залежності максимальних температур від T у межах від 0 до нескінченності.

Умови (14) відображають технічні вимоги: якщо вони не виконуються, потрібно зменшувати несиметрію. Економічна ж доцільність застосування засобів зменшення несиметрії обґрунтовується шляхом порівняння вартості цих засобів і їх обслуговування зі збитками від несиметрії. Збитки залежать від додаткових втрат ΔP активної потужності і зменшення строку служби.

В долях від номінальної потужності двигуна втрати потужності визначаються рівнянням [7]

$$\Delta P = bK_{2U}^2, \quad (15)$$

у якому коефіцієнт b у середньому дорівнює $4,2 \cdot 10^{-4} (\%)^2$. Якщо виходити з норм [1], то, як і в (13), по середньодобовому значенню $4,6 (\%)^2$ отримаємо допустиме значення $[\Delta P] = 0,0193$.

Задача другого типу. Квадратичний кумулятивний процес і температура є результатом лінійних перетворень процесу $y(t)$. Тому рішення задачі про температуру аналогічне такому, що було знайдено для задачі першого типу. Температура змінюється у діапазоні з границями

$$\vartheta_{\min} = c_{\vartheta} K_{2\min}^2, \quad \vartheta_{\max} = c_{\vartheta} K_{2\max}^2$$

і шириною $\kappa_{\vartheta} = \vartheta_{\max} - \vartheta_{\min}$.

Дисперсія D_{ϑ} температури визначається по КФ (6). Для вихідної КФ виду (3) за загальною формулою теорії імовірностей щодо дисперсії процесу після лінійного перетворення знайдемо

$$D_{\vartheta} = c_{\vartheta}^2 \sigma_2^2 \left[\frac{\sigma_2^2}{1+2\alpha T} + \frac{\sigma_2^2(1+2\alpha T)}{(1+2\alpha T)^2 + 4\omega_0^2 T^2} + \frac{4K_{2c}^2(1+\alpha T)}{(1+\alpha T)^2 + \omega_0^2 T^2} \right]. \quad (16)$$

Для КФ виду (2) дисперсія розраховується за формулою (16) при $\omega_0 = 0$:

$$D_{\vartheta} = 2c_{\vartheta}^2 \sigma_2^2 \left(\frac{\sigma_2^2}{1+2\alpha T} + \frac{2K_{2c}^2}{1+\alpha T} \right). \quad (17)$$

Щільність $f_{\vartheta}(\vartheta)$ розподілу температур визначається за формулами додатку шляхом заміни в них s на ϑ . Розрахункові значення ϑ_{\max} і $\tilde{\vartheta}_{\max}$ для нормального і граничного режимів обчислюються згідно (Д. 6) і (Д. 7).

Щільності розподілів нелінійних функцій (11) і (15) знайдемо за загальною формулою теорії імовірностей (наприклад, (П.2) в [3]). Опускаючи викладки, приведемо кінцеву формулу для щільності розподілу зменшення строку служби:

$$f(z) = \frac{1}{az} f_{\vartheta} \left(\frac{1}{a} \ln z \right). \quad (18)$$

При знаходженні щільності розподілу втрат потужності треба враховувати те, що коефіцієнт несиметрії не може бути від'ємним. Це призводить до зрізаного зліва нормального розподілу коефіцієнтів несиметрії. Для двигунів отримано щільність розподілу втрат потужності

$$f(\Delta P) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma_2 \Phi(K_{2c}/\sigma_2) \sqrt{b\Delta P}} \exp \left(-\frac{(\sqrt{b\Delta P} - K_{2c})^2}{2\sigma_2^2} \right), \quad (19)$$

Теоретично середнє значення нелінійної функції (11) потрібно було б розраховувати по щільності розподілу (18):

$$z_c = \int_{z_m}^{z_M} f(z) dz,$$

де межі інтегрування $z_{m,M} = \exp(a\vartheta_{m,M})$. Проте, як показують розрахунки, для практичних цілей можна застосовувати приближене рівняння

$$z_c \approx \exp(a_2 K_{2c}^2). \quad (20)$$

Аналогічно середнє значення втрат потужності допустимо розраховувати не по щільності (19), а за формулою

$$\Delta P_c \approx bK_{2c}^2, \quad (21)$$

яка випливає з (15).

Приклад розрахунку. Група електроприймачів у мережі електропостачання, яка проектується, створює несиметрію напруги з середнім значенням $K_{2c} = 0,9$ %, стандартом $\sigma_2 = 0,8$ % і експоненціальною КФ при $\alpha = 0,2$ с⁻¹. За рахунок пауз сума мінімальних ординат індивідуальних графіків несиметрії дорівнює нулю, а максимальних – 4,2 %. Оцінити ЕМС за несиметрію напруги².

Спочатку стосовно [1] розглянемо кумулятивні коефіцієнти несиметрії (4). Формули (5) і (7) дають: $w_c = 1,45$ (%)² і $D_w = 2,628$ (%)⁴. Розрахуємо значення: $w_M = 0$, $w_m = \kappa_w = 17,64$ (%)². За формулами (Д.4) моменти стандартного бета-розподілу становлять: $x_{wc} = 0,082$ і $D_{xw} = 8,445 \cdot 10^{-3}$, які дають значення $c_{xw} = 7,934$. Моменти розподілу розрахуємо згідно з (Д.5): $p_w = 0,652$ і $q_w = 7,282$. За цими параметрами по межовим імовірностям 0,05 і 0,001 згідно (Д.6) знайдемо розрахункові значення $x_{w\max} = 0,296$ і $\tilde{x}_{w\max} = 0,565$, які відповідають значенням $w_{\max} = 5,223$ і $\tilde{w}_{\max} = 9,962$, а також $K_{2\theta\max} = 2,29$ і $\tilde{K}_{2\theta\max} = 3,16$ %.

Оскільки перша умова з (8) не виконується, ЕМС за нормами [1] не дотримується. Якщо ж прийняти нульову межу імовірність, для граничного режиму відповідне максимальне значення становить 4,2, а не 3,16 %. У цьому разі не будуть виконуватися обидві умови (8).

Перейдемо до оцінки ЕМС за прямими показниками. Спочатку знайдемо, що дисперсія (7) співпадає з $D_{\vartheta}/c_{\vartheta}^2$ при $T_{\vartheta} = 1,068$ с, тобто при відношенні $\theta / T_{\vartheta} = 2,81$, яке близьке до 3. Розрахуємо максимальну температуру для цієї сталої часу.

З урахуванням (10) аналогічним чином знайдемо: $\vartheta_c = 2,9^{\circ}\text{C}$, $D_{\vartheta} = 10,51$ (°C)², $\vartheta_m = 0$, $\vartheta_M = \kappa_{\vartheta} = 35,28^{\circ}\text{C}$, $x_{\vartheta c} = 0,082$, $D_{x\vartheta} = 8,45 \cdot 10^{-3}$, $c_{x\vartheta} = 7,933$, $p_{\vartheta} = 0,652$, $q_{\vartheta} = 7,281$, $x_{\vartheta\max} = 0,274$ і $\tilde{x}_{\vartheta\max} = 0,546$. За

² Приклад ілюструє порядок розрахунків. Самі ж розрахунки виконуються на комп'ютері за розробленою автором програмою.

формулою (Д.7) розрахуємо значення $\vartheta_{\max} = 9,67$ і $\tilde{\vartheta}_{\max} = 19,25^\circ\text{C}$. Нульова ж межа імовірність завищує оцінку ЕМС для граничного режиму в $35,28 / 19,25 = 1,83$ рази. Для нормального режиму розрахункове значення (кружок на рис. 4) перевищує 8°C , тому при $T_0 = 1,068$ с ЕМС не дотримується.

На рис. 4 зображені результати розрахунків для інших сталих часу. При $T \rightarrow \infty$ температура прямує до середнього значення $2,9^\circ\text{C}$. Для сталих часу, менших за $1,63$ с ЕМС порушується (область 1), а для більших – дотримується (область 2). Оскільки у двигунів сталі часу дорівнюють хвилинам, то всупереч оцінці за нормами [1], робимо висновок, що ЕМС не порушується.

До такого ж висновку приводить і оцінка за строком служби, бо його відносне скорочення (20)

$$z = \exp(0,0217 \cdot 2,9) = 1,065$$

менше за $1,22$.

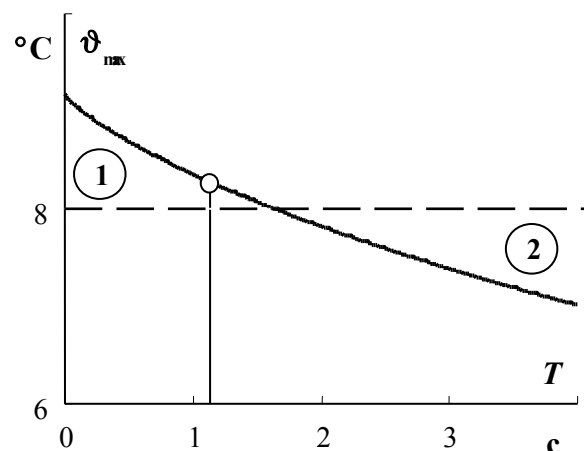
Висновки. 1. Оцінку ЕМС з несиметрії потрібно виконувати з межевими імовірностями $0,05$ і $0,001$ – відповідно для нормального і граничного режимів. Прийняте в ГОСТ 13109-97 нульове значення імовірності для граничного режиму не є коректним.

2. Оцінка ЕМС згідно ГОСТ 13109-97 потребує знаходження імовірнісного розподілу трьохсекундних значень коефіцієнтів несиметрії, який доцільно вважати бета-розподілом.

3. Техніко-економічні обґрунтування доцільності застосування засобів зменшення

камі ЕМС: максимальній температурі додаткового кби електрообладнання і зростанню втрат активної

дільно застосовувати енергетичну інерційну модель



згідно рис. 3. Розрахункові значення температур знаходяться по межевим імовірностям за припущенням, що процес зміни температур має бета-розподіл.

5. Скорочення строку служби і зростання втрат активної потужності допустимо розраховувати по середньому значенню коефіцієнту несиметрії без знаходження імовірнісного розподілу температур.

Додаток. У розрахунках доцільно використовувати бета-розподіл першого роду випадкової величини x у границях від 0 до 1 , який назовемо стандартним. Він має два параметри p і q , щільність

$$f_x(x) = \frac{x^{p-1} (1-x)^{q-1}}{B(p, q)}, \quad (\text{Д.1})$$

інтегральну функцію

$$F_x(x) = \int_0^x f_x(x) dx, \quad (\text{Д.2})$$

середнє значення і дисперсію

$$x_c = \frac{p}{p+q}, \quad D_x = \frac{pq}{(p+q)^2 (1+p+q)},$$

де $B(p, q)$ – бета-функція.

Якщо якась випадкова величина s , що розглядається, змінюється в діапазоні (s_m, S_m) шириною κ_s , то для переходу до стандартного розподілу використаємо лінійне співвідношення

$$x_s = (s - s_m) / \kappa_s, \quad (\text{Д.3})$$

яке дозволяє зв'язати моменти розподілів величин x і s :

$$x_{sc} = (s_c - s_m) / \kappa_s, \quad D_{xs} = D_s / \kappa_s^2. \quad (Д.4)$$

Позначивши через

$$c_{xs} = x_c (1 - x_c) / D_{xs} - 1 = (s_c - s_m) (s_m - s_c) / D_{xs} - 1,$$

знайдемо параметри

$$p_s = c_x x_c, \quad q_s = c_x (1 - x_c), \quad (Д.5)$$

які згідно з (Д.1) і (Д.2) визначають функцію розподілу $F_{xs}(x_s)$.

Розрахункове значення

$$x_{smax} = \text{arc}F_{xs}(1 - E_x) \quad (Д.6)$$

знайдемо по зворотній функції $\text{arc}F_{xs}(x)$, після чого згідно з (Д.3) перейдемо до шуканого розрахункового значення

$$s_{max} = s_m + \kappa_s x_{smax}. \quad (Д.7)$$

Слід відзначити, що у випадку нормального розподілу коефіцієнтів несиметрії можливо використовувати гама-розподіл, але для уніфікації і в цьому випадку приймемо бета-розподіл, коли за правилом трьох сигм границі дорівнюють:

$$s_m = s_c - 3\sigma_s, \quad s_M = s_c + 3\sigma_s, \quad \kappa_s = 6\sigma_s,$$

де $\sigma_s = \sqrt{D_s}$ – стандарт величини s .

1. *ГОСТ 13109-97.* Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. в Украине с 01.01.2000.
2. *Кузнецов В.Г., Олянишин В.О.* Нормирование несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях / Препр. АН Украины, Ин-т электродинамики. – №732. – Киев, 1993. – 32 с.
3. *Шидловский А.К., Куренный Э.Г.* Введение в статистическую динамику систем электроснабжения. – Киев: Наукова думка, 1984. – 271 с.
4. *Коломытцев А.Д.* Динамические показатели электромагнитной совместимости электрооборудования с системами электроснабжения промышленных предприятий по несимметрии и несинусоидальности напряжения. – Автореферат на соиск. уч. степени канд. техн. наук. – Донецк: ДПИ, 1993. – 24 с.
5. *Плескунин В.И., Воронина Е.Д.* Теоретические основы организации и анализа выборочных данных в эксперименте. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1979. – 232 с.
6. *Kourennyi E.G., Petrosov V.A., Pogrebnyak N.M.* Squaring and smoothing in EMC models: a statistical solution. – Fifteenth International Wroclaw symposium and exhibition: Electromagnetic compability 2000. – Wroclaw: National Institute of Telecommunications, 2000, part I.
7. *Кузнецов В.Г., Николаенко В.Г.* Оценка экономического ущерба от несимметрии и несинусоидальности напряжений в промышленных системах электроснабжения // Техн. электродинамика. – 1980. – № 1. – С. 33–37.
8. *Вольдек А.И.* Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
9. *Основы построения промышленных электрических сетей / Под общ. ред. Г.М. Каялова.* – М.: Энергия, 1978. – 352 с.
10. *Сыромятников И.А.* Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.