

УДК 621.311.6.03

О.М. ДМИТРИЄВА (канд.техн.наук, доц.)
Донецький національний технічний університет
led@ivc.com.ua

ПРИНЦИПИ ОЦІНЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ПРИ КОНДУКТИВНИХ ЗАВАДАХ

Principles of an estimation EMC by modeling of influences of a hindrance on object are considered. The incorrectness of an existing cumulative principle is shown. The inertial principle of rationing, measurement and calculation of indicators EMS is offered.

Постановка задачі. Однією з основних вимог до систем електропостачання є забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС), що потребує об'єктивного оцінювання впливу завад ЕМС на електричне обладнання й мережі. Розвиток теорії ЕМС і практичних застосувань починався з нормування показників якості напруги, які відносяться до кондуктивних завад (відхилення й коливання напруги, коефіцієнт несиметрії та ін.). Такий підхід не є універсальним, бо оцінювання ЕМС може здійснюватися лише для окремих видів завад: незмінних за часом або періодичних визначеної форми, коли між характеристиками завади й показниками впливу завад на об'єкт, що розглядається, існує однозначний зв'язок.

В [1] було запропоновано концепцію моделювання об'єктів, що розглядаються. Першою спробою її реалізації була пропозиція щодо осереднення поточних показників ЕМС на заданій тривалості кумуляції θ (термін наш). Такий кумулятивний принцип [2], який посередньо враховує інерційність об'єктів, прийнято в [3] для більшості показників ЕМС: 20 і 60 с – для відхилень частоти і напруги, 3 с – для несиметрії і несинусоїдальності¹. Проте у цьому стандарті доза флікеру напруги визначена згідно з [4], де осереднення відсутнє, проте є інерційне згладжування зі сталою часу 0,3 с.

Метою статті є узагальнення принципів оцінювання ЕМС і розробка рекомендацій щодо нормування, вимірювання й розрахунку показників ЕМС.

Принципи моделювання. В [2] запропоновано оцінювати ЕМС по діях завади на об'єкт, що розглядається. Для цього потрібно моделювати об'єкт, встановлюючи показники ЕМС по характеристиках процесу на виході моделі, а не по характеристиках вхідного процесу $x(t)$. Цей загальний принцип назовемо «принципом моделювання діянь завади» – на відміну від «моделювання об'єктів» у [1]. Завад і показників ЕМС може бути декілька. Вхідний процес має дві компоненти: неспотворену $x_0(t)$ і заваду $x_3(t)$.

При оцінюванні ЕМС спочатку визначається реакція $y(t)$ об'єкта на вхідний процес, тому у динамічних моделях присутній зважувальний фільтр ФЗ (термін з [4]), який моделює реакцію (рис. 1). Діяння залежать від потужності реакції й інерційності об'єкта. Потужність враховується піднесенням реакції у квадрат. Моделювання ж інерційності може бути здійснено по-різному: осередненням квадрату реакції на інтервалі θ (кумулятивний принцип) або інерційним згладжуванням зі сталою інерції T (інерційний принцип).

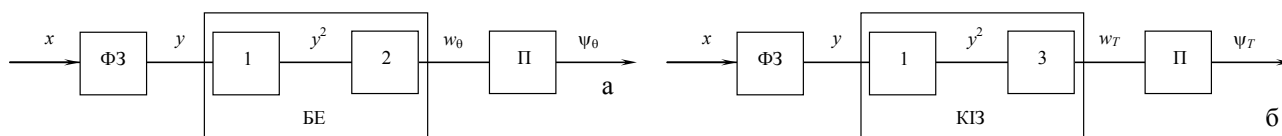


Рисунок 1 – Структурні схеми моделей діяння процесів на об'єкти: а – енергетична, б – інерційна

У першому випадку модель має енергетичний блок БЕ, складовими якого є квадрататор 1 і кумулятивна ланка 2, яку в теорії фільтрації називають природним вікном або вікном Дирихле, а в [3] – прямокутним вікном. У другому випадку блок квадратичного інерційного згладжування КІЗ (термін з [4]) окрім квадрататора 1 має інерційну ланку 3 першого порядку. На виході блоків БЕ і КІЗ протікають квадратичні кумулятивний $w_0(t)$ й інерційний $w_T(t)$ процеси, по яких у блоках П визначаються кумулятивний ψ_0 й інерційний ψ_T показники ЕМС.

Оцінка ЕМС виконується по спільному процесу $x(t)$, проте для розрахунків збитків й обґрунтування доцільності покращення ЕМС потрібно визначати долю завади у погіршенні ЕМС – навіть у випадках, коли внаслідок неповного завантаження об'єктів норми на ЕМС не порушуються. В силу нелінійності моделі це не можна робити при подачі на її вхід тільки завади – треба зіставити показники ЕМС від спільного процесу й від неспотвореної компоненти.

¹ В [3] немає єдиного терміну й позначення тривалості кумуляції θ : T_w – ширина вікна, $T_{VS} = T_{vs}$ – інтервал осереднення коефіцієнтів несиметрії і несинусоїдальності.

Принцип практичної впевненості. Згідно з принципом практичної впевненості [6] у розрахунках враховується не весь діапазон можливих значень випадкової величини, а тільки практично достовірних, коли мінімальні $w_{\theta\min}$, $w_{T\min}$ і максимальні $w_{\theta\max}$, $w_{T\max}$ межі діапазону встановлюються з інтегральними ймовірностями E_x і $1 - E_x$, де E_x – межа ймовірності. Чим вона є більшою, тим більше зменшується розрахунковий діапазон.

В [3] цей принцип реалізовано частково: лише для максимальних значень у нормальному режимі, що приймаються з інтегральною ймовірністю 0,95, якій відповідає значення $E_x = 0,05$. Це означає, що у нормальному режимі допускається порушення норм сумарною тривалістю 72 хв. У [6] запропоновано й для мінімальних значень відхилень частоти й напруги у нормальному режимі приймати $E_x = 0,05$, а для граничного режиму брати $E_x = 0,001$ – на відміну від вимоги [3], де фактично прийнято значення $E_x = 0$, що суперечить фізичному смислу.

Зіставлення кумулятивного й інерційного принципів. В практиці завади найчастіше викликають додатковий перегрів об'єктів. Для цього випадку й зіставимо обидва принципи оцінювання ЕМС, коли реакцією є струм, а квадратичні процеси повинні моделювати додатковий перегрів.

Квадратичні кумулятивний й інерційний процеси зв'язані з квадратом реакції рівняннями:

$$w_{\theta}(t) = \frac{1}{\theta} \int_{t-\theta}^t y^2(t) dt, \quad Tw'_T(t) + w_T(t) = y^2(t). \quad (1)$$

Кумулятивна й інерційна ланки мають перехідні функції

$$h_{\theta}(t) = \begin{cases} t/\theta & \text{при } t \leq \theta, \\ 1 & \text{при } t \geq \theta, \end{cases} \quad h_T(t) = 1 - \exp\{-t/T\} \quad (2)$$

і амплітудно-частотні функції (АЧФ)

$$A_{\theta}(\omega) = \frac{|\sin(\omega\theta/2)|}{\omega\theta/2}, \quad A_T(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}, \quad (3)$$

де ω – кутова частота.

Показники ЕМС за тепловими ефектами повинні оцінювати тепловий знос ізоляції й максимальну температуру перевищення.

Тепловий знос розраховується по середньому значенню температури, яке пропорційне квадрату ефективного значення y_e реакції. Середні значення процесів (1) однакові й дорівнюють y_e^2 , тому за цим показником обидва принципи дають правильну оцінку.

Інакше стоїть справа з максимальною температурою. Очевидно, що інерційний процес у відносних одиницях співпадає з процесом зміни температури об'єкту зі сталою нагрівання T . Тому інерційний принцип дає достовірну оцінку ЕМС, а кумулятивний процес слід розглядати як можливе наближення.

Перехідна функція кумулятивної ланки змінюється від 0 до θ за лінійним законом. Нелінійну перехідну функцію інерційної ланки можна лінеаризувати лише при малих t , коли $h_T(t) \approx t/T$. З похибкою 5 % це наближене рівняння виконується при $t < 0,1$ с або з похибкою 10 % – при $t < 0,2$ с. Лінійність перехідної характеристики означає, що процес нагрівання є адиабатичним. Тому кумулятивний принцип можна використовувати лише у випадках, коли електроприймач вмикається на такий короткий час θ , що тепловіддача у навколишнє середовище відсутня. Таке буває досить рідко, наприклад, при точковому зварюванні. При вмиканні електроприймача на час, більший за θ , кумулятивний підхід потребує, щоб за час від 0 до θ нагрів був би адиабатичним, а після $t = \theta$ одразу наступив сталий режим, коли все тепло, що виділяється, віддавалося б у навколишнє середовище. Такий режим неможна реалізувати.

З особливою наочністю неадекватність оцінок за кумулятивним принципом проявляється при наявності постійної неспотвореної компоненти й гармонічної завади, тривалість циклу якої ціле число разів розміщується в інтервалі осереднення. У цьому випадку інерційний процес змінюється як і температура, проте кумулятивний процес вироджується у горизонталь, що свідчить начебто про незмінність температури.

Нормування. Для того, щоб будь-яка норма ЕМС мала фізичний смисл, при нормуванні потрібно виходити з принципу моделювання діянь завод. Це зумовлює необхідність вибору «стандартного» об'єкту. Наприклад, в [4] в якості стандартної прийнято лампу розжарювання 60 Вт, а частотні характеристики флікермоделі відображають діяння коливань напруги на середньостатистичну людину. В [7] і [8] в якості стандартних запропоновано силовий конденсатор й асинхронний двигун – при нормуванні несинусоїдальності й несиметрії напруг.

Розрахункові значення квадратичних інерційних процесів виражаються у квадратах одиниць виміру реакції, що незручно при використанні їх в якості показників ЕМС. Тому досвід використання поняття дози флікери з [4] в [7-9] розповсюджено на всі показники ЕМС.

На прикладі нагрівання об'єктів введемо поняття довгочасної ψ_c і короткочасної ψ_g доз завод. Перша з них оцінює додатковий тепловий знос від дії заводи, а друга – додаткову температуру перевищення. Заводу будемо вимірювати у процентах, а неспотворену компоненту x_0 приймемо за 100 %.

В [3] заводи нормуються окремо одна від одної. Позначимо через \hat{x}_3 норму заводи для нормального режиму, а через c_r – коефіцієнт збільшення цієї норми для граничного режиму. Тепловий знос є інтегральною характеристикою, тому його можна визначити за двосхідчастим графіком допустимих значень суми \hat{z} неспотвореної компоненти і заводи: зі ступенями $\hat{x}_0 + \hat{x}_3$ – для нормального режиму з відносною тривалістю 0,95 і $\hat{x}_0 + c_r \hat{x}_3$ – для граничного режиму з 0,05. В іменованих одиницях часу тривалості східців є дуже великими, тому у межах кожного східця режим буде тривалим. За цієї причини графік реакції стандартного електроприймача у процентах до номінального струму буде співпадати з графіком заводи. У °C середня температура буде пропорційною квадрату ефективного значення:

$$\hat{\Theta}_c = c_g \hat{z}_c^2 = c_g \left[(\hat{x}_0 + \hat{x}_3)^2 \cdot 0,95 + (\hat{x}_0 + c_r \hat{x}_3)^2 \cdot 0,05 \right] = \hat{\Theta} + c_g \left[0,1(19 + c_r) \hat{x}_0 \hat{x}_3 + 0,05(19 + c_r^2) \hat{x}_3^2 \right], \quad (4)$$

де $\hat{\Theta}$ – тривала допустима температура, $c_g = \hat{\Theta} / \hat{x}_0^2$ – коефіцієнт пропорційності у °C/(%)².

При відсутності заводи середня температура дорівнювала би величині $\hat{\Theta}$, відносно якої збільшення середньої температури (тобто доля заводи) становить

$$\Delta \hat{\Theta}_c = c_g \left[0,1(19 + c_r) \hat{x}_0 \hat{x}_3 + 0,05(19 + c_r^2) \hat{x}_3^2 \right]. \quad (5)$$

Фактична величина Θ_c розраховується аналітично по фактичному сумарному процесу. Представимо довгочасну дозу виразом

$$\psi_c = \sqrt{a_c \Theta_c},$$

коефіцієнт a_c у якому знайдемо за умови, що при $\Theta_c = \hat{\Theta}_c$ допустима доза дорівнює одиниці. Тому $a_c = 1/\hat{\Theta}_c$, що дає

$$\psi_c = \sqrt{\Theta_c / \hat{\Theta}_c}. \quad (6)$$

ЕМС не порушується, якщо $\psi_c \leq 1$. Ця умова є єдиною, оскільки при оцінюванні теплового зносу різниця між нормами в нормальному й граничному режимах вже врахована.

Якщо ж нормувати заводу окремо, то її доля

$$\hat{\Theta}_{zc} = \Delta \hat{\Theta}_{zc} = c_g (0,95 + 0,05 c_r^2) \hat{x}_3^2 = 0,05 c_g (19 + c_r^2) \hat{x}_3^2 \quad (7)$$

співпадала би з другим доданком в (5), що свідчить про заниження оцінок ЕМС. Незважаючи на це, нормування завод використовують в практиці для простоти. При такому підході відповідна довгочасна доза

$$\psi_{zc} = \sqrt{\hat{\Theta}_{zc} / \hat{\Theta}_{zc}} = \frac{1}{\sqrt{0,05(19 + c_r^2)}} x_{zc} / \hat{x}_3 \quad (8)$$

розраховується тільки по середньому значенню x_{zc} фактичної заводи.

Аналогічно визначається й короткочасна доза, але на відміну від довгочасної дози допустиме значення $\hat{\Theta}_{max}$ максимальної температури складається з $\hat{\Theta}$ і норми $\Delta \hat{\Theta}_{max}$ температури додаткового нагріву від заводи.

Наприклад, у [10] для машин потужністю до 5000 кВт $\Delta \hat{\Theta}_{max} = 10^\circ\text{C}$, а більшої потужності – вдвічі менше. Для граничного режиму норма максимальної температури є в c_r^2 більшою.

Фактичні температури Θ_{max} для нормального й Θ_{rmax} граничного режимів розраховуються по сумарному графіку й беруться з інтегральними ймовірностями 0,95 й 0,999. Для цих режимів умови ЕМС мають вигляд:

$$\psi_g = \sqrt{\Theta_{max} / \hat{\Theta}_{max}} \leq 1, \quad \psi_{g_r} = \sqrt{\Theta_{rmax} / \hat{\Theta}_{max}} \leq c_r. \quad (9)$$

Вимірювання й розрахунки. Вимірювання й розрахунки доз виконуються у рамках прийнятих динамічних моделей: при перевірці виконання технічних норм ЕМС – моделі зі стандартним об'єктом, а при оцінці ЕМС окремих об'єктів – їх моделей.

ЗФ може мати складну структуру, тому для розрахунку реакцій абр їх характеристик доцільно використовувати метод парціальних реакцій [11], згідно з яким ЗФ зображується у вигляді паралельно увімкнених інерційних ланок першого порядку. Кількість ланок дорівнює порядку диференціального рівняння, яке зв'язує реакцію з вхідним процесом. Полегшення розрахунків полягає в тому, щр визначення парціальної реакції на виході будь-якої ланки не зустрічає труднощів. Особливо ефективним метод є при наявності періодичних завад, коли відразу отримується періодичний розв'язок – без розрахунку перехідного процесу.

Нехай ЗФ має передавальну функцію у вигляді відношення багаточленів $M(p)$ і $N(p)$ порядків m і n при $m < n$, яке є помноженим на коефіцієнт передачі a_Φ цього фільтру. Якщо знаменник має множник T_n^n перед p^n і полюси \tilde{p}_i , то його представляють у вигляді

$$a_i = -a_\Phi \frac{M(p)}{T_n^n (p - \tilde{p}_1) \dots (p - \tilde{p}_i) \dots (p - \tilde{p}_n)} \Big|_{p=\tilde{p}_i}, \quad (10)$$

де однакові вирази $(\tilde{p}_i - \tilde{p}_i)$ взаємно скорочуються, а тому невизначеність 0/0 не виникає.

Шукана реакція дорівнює сумі парціальних реакцій. Після піднесення її до квадрату відповідний процес пропускається також через інерційну ланку в блоці КІЗ.

Висновки.

1. При оцінюванні ЕМС слід виходити з загального принципу моделювання діянь завади ЕМС на об'єкти.

2. Прийняте у ГОСТ 13109-97 осереднення на інтервалі (кумулятивний принцип) майже у всіх випадках не має фізичного смислу, тому потрібно визначати показники ЕМС з використанням інерційного згладжування (інерційний принцип).

3. Використання динамічних моделей ЕМС забезпечує достовірність і єдність нормування, вимірювання й розрахунку показників ЕМС при завадах будь-якого виду.

Список літератури

1. Куренный Э.Г. Оценка качества электроэнергии с использованием моделей объектов. / Куренный Э.Г., Ковальчук В.М., Коломытцев А.Д. // В кн.: Качество электроэнергии в сетях пром. предприятий. Материалы конференции. – М.: МДНТП, 1977. – С. 23-29.
2. Куренный Э.Г. Кумулятивный принцип оценки качества напряжения. /Куренный Э.Г., Дмитриева Е.Н., Ковальчук В.М., Коломытцев А.Д. // Электричество, 1978, № 9. – С. 19-24.
3. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Электромагнитная совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. в Украине с 01.01.2000.
4. СЕI/IEC 61000-4-15. Electromagnetic compatibility – Part 4, Section 15: Flickermeter – Functional and design specification. 1997.
5. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. / Вентцель Е.С. // М.: Наука, 1969. – 576 с.
6. Дмитриева Е.Н. Принцип практической уверенности в задачах электроэнергетики. / Дмитриева Е.Н. // Электричество, 2008, № 8. – С. 15-21.
7. Куренный Э.Г. Оценка несинусоидальности напряжения при анализе качества электроэнергии. /Куренный Э.Г., Лютый А.П. // Электричество, 2005, № 8. – С. 3-9.
8. Куренный Э.Г. Оценка и нормирование несимметрии напряжений в системах электроснабжения общего пользования. / Куренный Э.Г., Дмитриева Е.Н., Лютый А.П., Сидоренко О.В. // Электричество, 2008, № 4. – С. 18-26.
9. Dmitrieva E.N. Нормирование показателей электромагнитной совместимости по дозам. / Dmitrieva E.N., Chursinov V.I., Lyuty A.P. // XXXIV Miedzynarodowa Konferencja: Telecommunication and Safety Systems in Mining. ATI 2006. Sekcji Cybernetyki w Gornictwie KG PAN. – Poland: Szczyrk, 31 May – 2 June 2006. – P. 211-218.
10. ГОСТ 183-74. Машины электрические вращающиеся. Общие технические требования. – Введен 01.01.76.
11. Куренный Е.Г. Метод парциальных реакций для анализа процессов на выходе линейных фильтров в моделях электромагнитной совместимости. / Куренный Е.Г., Лютий А.П., Черникова Л.В. // Электричество, 2006, № 10. – С. 11-18.

Е.Н. ДМИТРИЕВА

Донецкий национальный технический университет

Принципы оценивания электромагнитной совместимости при кондуктивных помехах. Рассмотрены принципы оценивания ЭМС путем моделирования воздействий помехи на объект. Показана некорректность существующего кумулятивного принципа. Предлагается инерционный принцип нормирования, измерения и расчета показателей ЭМС.

Оценка, электромагнитная совместимость, кондуктивный, помеха.

О.М. ДМИТРИЄВА

Донецкий національний технічний університет

Принципы оцінювання електромагнітної сумісності при кондуктивних завадах. Розглянуто принципи оцінювання ЕМС шляхом моделювання діянь завад на об'єкти. Показано некоректність існуючого кумулятивного принципу. Пропонується інерційний принцип нормування, вимірювання й розрахунку показників ЕМС.

Оцінка, електромагнітна сумісність, кондуктивний, завада.