

ПРОБЛЕМА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ В ЗАДАЧАХ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

*Ю.А. Папаїка, М.В. Рогоза, О.Г. Лисенко,
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна*

Дана публікація спрямована на пошук взаємозв'язків показників електромагнітної сумісності з показниками надійності електропостачання. Дана оцінка якості напруги, як основному критерію ефективності електропостачання. Розроблено теоретичні засади для побудови інтелектуальних електричних мереж для реалізації енергоефективних режимів з урахуванням тенденцій концепції Smart Grid.

Реальна ситуація сьогодення української електроенергетики визначається надвисоким рівнем втрат електроенергії при передачі (до 20 %). Порівняно з країнами з розвинутою економікою цей показник набагато більший (для країн Західної Європи втрати складають 4-5 %, США – 6 %). [1-3] Високий рівень втрат в електричних мережах України пов'язаний з низьким рівнем компенсації реактивної потужності [5], застарілими основними фондами об'єктів електроенергетики, недостатнім використанням засобів оптимізації режимів роботи і регулювання напруги та невирішеність проблем якості електричної енергії.

Низький рівень якості електричної енергії призводить до значного зниження енергетичної ефективності електричних мереж за рахунок збільшення втрат активної та реактивної потужностей, технологічних витрат електроенергії на її передачу. Також значно скорочується термін служби електрообладнання, збільшуються капітальні витрати в електричних мережах, порушуються умови нормального функціонування енергетичної системи [3].

Проблема якості електричної енергії – це складова комплексного поняття електромагнітної сумісності системи електропостачання (СЕС). Вона визнана провідними світовими вченими та відноситься до числа найважливіших проблем сучасної електроенергетики і є частиною проблеми підвищення енергоефективності електричних мереж [4-6].

Сучасні світові тренди в електроенергетиці, які заважають широко впровадити концепцію Smart Grid – це безперервне зростання встановленої потужності нелінійних, несиметричних різкозмінних навантажень та масове впровадження сонячних та вітрових електростанцій, що не завжди супроводжується своєчасним впровадженням рішень, спрямованих на корекцію якості електроенергії. Так, в розподільчих мережах Швейцарії за десятирічний період рівень вищих гармонік (ВГ) зріс на 0,7% [3]. Тому вимоги стандартів на якість електроенергії в промислових електричних мережах, за експертною оцінкою, виконують у 30-40% випадків, що призводить до лавинного ефекту погіршення енергетичної ефективності. При перевищенні нормованих рівнів можливо не тільки порушення завадостійкості технічних засобів в енергосистемі, на електростанціях і підстанціях, а й технологічних процесів в системах електропостачання [3].

Сьогодні понад 70% електричної енергії в промисловості споживається в перетвореному вигляді (в металургії на деяких підприємствах до 100%). Це пов'язано з тим, що сьогодні майже не використовують пряме включення асинхронних двигунів до електричної мережі. Експертні оцінки, виконані провідними вченими [3], показали, що у країнах пострадянського простору збиток від неякісної електроенергії складає 10-12% від всього збитку. Корекція цих перешкод вимагає розробки широкого класу спеціальних електромагнітних пристроїв з інтелектуальними системами керування. Електромагнітні перешкоди обумовлюють нагрівання струмоведучих частин електрообладнання, викликають порушення в роботі кіл управління, погіршують роботу пристроїв автоматики і зв'язку. Це призводить також до погіршення стану ізоляції електрообладнання і в ряді випадків - до передчасного виходу його з ладу, знижуються економічні показники електричних мереж. Цьому сприяє значною мірою неконтрольоване впровадження частотних перетворювачів в системах електропривода. Як наслідок, не тільки істотно зростає рівень канонічних ВГ, а й з'являється широкий спектр так

званих інтергармонік (ІГ) [6]. В останні роки помітно збільшився вихід з ладу електродвигунів внаслідок пошкодження ізоляції (до 20-25%), що є наслідком значного зростання рівня несинусоїдальності напруги. Так, еквівалентне діюче значення ІГ безпосередніх перетворювачів частоти може, в залежності від режиму роботи, в кілька разів перевершувати їх номінальні значення перетворювачів з ланкою постійного струму, які генерують ВГ та ІГ в меншій мірі. Практика свідчить про те, що в цьому випадку вартість заходів по компенсації рівнів ВГ може бути сумірною або більше вартості збитку від впливу ВГ та ІГ, що пояснює низьку зацікавленість керівників енергетичних компаній до вирішення проблеми електромагнітної сумісності. Високі рівні ВГ та ІГ ускладнюють вирішення низки питань концепції Smart Grid.

Метою даної публікації є виявлення науково обґрунтованих підходів для розробки загальних критеріїв ефективності роботи систем електропостачання для подальшого проектування та впровадження інтелектуальних систем Smart Grid в умовах енергооб'єднань України.

Закони розподілу випадкових величин в задачах надійності.

Надійність СЕП аналізується в залежності від постановки задачі, необхідної точності і достовірності рішення на рівнях випадкових подій, величин і процесів. Для інженерних методів розрахунку надійності в основному використовується апарат випадкових величин.

Закономірності випадкових величин описуються за допомогою інтегральної функції розподілу ймовірностей. Для опису розподілу ймовірностей безперервних випадкових величин застосовується диференціальна функція розподілу ймовірностей, або закон розподілу випадкових величин.

При аналізі надійності переважно застосовують закони розподілу, які визначаються за допомогою невеликої кількості числових характеристик. Так показовий (*експоненціальний*) закон розподілу визначається лише одним параметром - математичним очікуванням випадкової величини. *Нормальний* закон розподілу та, за певних умов, закон *Вейбулла* характеризується двома параметрами (математичним очікуванням випадкової величини і дисперсією). Інші закони розподілу вимагають більшої кількості числових характеристик.

У практичних інженерних розрахунках, в основному, використовуються такі показники (характеристики) надійності окремих елементів [3]:

- *параметр потоку відмов* (середня кількість відмов протягом року) λ , 1 / ... рік (іноді λ , 1/рік);
- *ймовірність відмови або середній коефіцієнтта вимушеного простою* q ;
- *середній час відновлення* t_v , годин;
- *параметр потоку навмисних відхилень* λ_n , 1/рік;
- *середній час навмисних простоїв або їх середня тривалість* t_n , годин;
- *збиток від недостатнього випуску електроенергії* Z , дол./кВт·год.

Експоненціальний розподіл

Параметри експоненціального розподілу:

Експоненціальний розподіл визначається одним параметром - інтенсивністю відмов $\lambda(t)$.

Для цього випадку показники надійності:

- *ймовірність безвідмовної роботи в інтервалі від 0 до t:*

$$R(t) = e^{-\lambda t}; \quad (1)$$

- *ймовірність відмови:*

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t}; \quad (2)$$

- *густина ймовірності відмови:*

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}; \quad (3)$$

- середній час безвідмовної роботи:

$$T = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) dt = 1 / \lambda; \quad (4)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{\int_0^{\infty} f(x) dx} = \frac{f(x)}{R(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda. \quad (5)$$

Умови (5) передбачають, що обладнання, у якого час безвідмовної роботи має експоненціальний розподіл, не старіє. Якщо об'єкт почав функціонувати в нескінченно далекому моменті часу в минулому, то кількість відмов в інтервалі $[0, t]$ залежить тільки від його довжини, тобто розглядається стаціонарний стан. Іноді ця умова не дотримується через процеси обкатки (перша фаза функціонування елемента) та старіння (третя фаза). Для опису цих періодів слід користуватися іншими, більш складними законами розподілу. В період обкатки надійність звичайно підвищується за рахунок додаткового контролю при виготовленні, монтажі, прийманні в експлуатацію, а в період старіння - за рахунок додаткового обслуговування. Тому в електроенергетиці при вирішенні практичних задач інтенсивність відмов вважається постійною протягом тривалого часу [3, 5].

В якості параметра експоненціального розподілу відновлення використовується інтенсивність відновлення μ .

- вірогідність відновлення елемента за час від 0 до t :

$$G(t) = 1 - e^{-\mu t}; \quad (6)$$

- середній час відновлення:

$$\tau = 1 / \mu \quad (7)$$

Для інженерних розрахунків надійності в СЕП приймається, що час безвідмовної роботи T і час відновлення τ розподіляються за експоненціальним законом.

Враховуючи великі масиви статистичних даних по відмовам електрообладнання міських електричних мереж центральної частини міста Дніпро були розраховані математичні залежності показників надійності в функції показників якості напруги (рис. 1). Наукова та практична цінність даних залежностей полягає у комплексності підходу до проблеми розробки новітніх енергетичних мереж з урахуванням багатофакторності та невизначеності вихідної інформації [4].

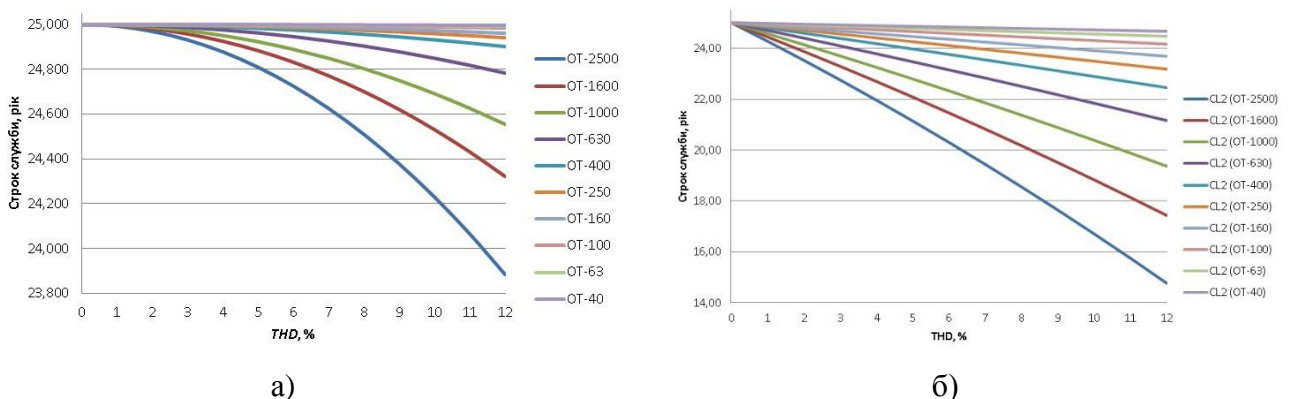


Рис. 1. Зниження надійності силових трансформаторів (а) та кабельних ліній (б) в залежності від коефіцієнта викривлення синусоїдальності THD_U

Усереднені значення параметрів надійності

Використання результатів імовірнісних розрахунків є правильними при необхідності дотримання двох умов: застосування в розрахунках одних і тих самих значень параметрів потоків відмов λ та однакових методів розрахунку, основних на прийнятті закону розподілу випадкових величин.

Нижче приведені загальні результати послідовних значень параметрів потоку відмов (інтенсивності відмов) ліній електропередачі, а також трансформаторів 500-35 кВ за оцінками вітчизняних та зарубіжних дослідників. Для повітряних ліній (ПЛ) 35-110 кВ, які застосовуються в системах електропостачання, значення потоку відмов $\lambda_{уст}^{ПЛ}$ знаходяться в межах 0,75 - 2,2, найбільша імовірність $\lambda_{уст}^{ПЛ} = 0,85$. Середній час відновлення τ_e приймається рівним 10^{-3} при коефіцієнті планових простоїв $K_{пр} = 4...5 \cdot 10^{-3}$.

Для кабельних ліній (КЛ) при прокладанні в каналах і лотках в середньому $\lambda^{КЛ} = 0,015$ при $\tau_e^{КЛ} = 1,4 \cdot 10^{-3}$. Для трансформаторів і автотрансформаторів $\lambda_{уст}^T = 0,04...0,1$. Переважають значення $\lambda_{уст}^T = 0,03$ та $\tau_e^T = 10^{-3}$ [3].

Нормальний закон розподілу.

Нормальний закон розподілу в задачах надійності СЕП застосовується порівняно рідко, віддаючи перевагу використанню методів, заснованих на експоненціальному розподілі або розподілі Вейбула. Нормальний закон застосовується при відомих розрахунках, що характеризують електромагнітні та подібні їм процеси.

Оцінка надійності електрообладнання проводиться з урахуванням змінення його терміну служби (тривалості життя). Спочатку розглянемо процеси за умови нормального закону розподілу надійності.

Функція надійності $R(t)$. Для нормального закону надійності маємо:

$$R(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{t-m_t}{\sigma_t}}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx, \quad (8)$$

де m_t та σ_t - математичне очікування і середньоквадратичне відхилення тривалості життя електрообладнання.

Вираз справедливий при $m_t \gg \sigma_t$. Цей вираз називається інтегралом імовірностей або, інтегралом помилок.

Інтеграл (8) перетворюється до виду:

$$R(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{m_t - t}{\sigma_t}\right) = \Phi\left(\frac{1 - \frac{t}{m_t}}{\frac{\sigma_t}{m_t}}\right). \quad (9)$$

Значення функції $\Phi\left(\frac{1 - \frac{t}{m_t}}{\frac{\sigma_t}{m_t}}\right)$ знаходиться за довідковими таблицями в залежності від t .

$$m_t = t_{ном} (1 - \Delta t_x).$$

При відносному часу житті Δt_x значення m_t , визначається залежно від його номінального значення $t_{ном}$, яке зазвичай вказується фірмою виробником. Як правило, $t_{ном} = 25 - 30$ років.

Інтеграл імовірності $\Phi \left(\frac{1 - \frac{t}{m_t}}{\frac{\sigma_t}{m_t}} \right) = \Phi(x)$ є непарною функцією, тобто

$\Phi(-x) = -\Phi(x)$, що враховувалося при виконанні дослідження [3].

Докладний аналіз впливу скорочення терміну служби електрообладнання (трансформатори, електродвигуни, конденсатори) дозволяє зробити висновок, що значне зниження надійності спостерігається при часу експлуатації понад 10 років. Тому на практиці, як правило, графіки $R(t)$ будуються для $t \geq 10$ років.

Методи розрахунку надійності, засновані на законі Вейбулла.

Аналітичні методи розрахунку надійності роботи електричних систем і їх основних елементів у багатьох випадках ґрунтуються на законі Вейбулла. З теорії надійності відомо, що розподіл Вейбулла є найменш складним і найбільш загальним законом розподілу зі змінним параметром відмов.

Функція надійності в цьому випадку має вигляд:

$$R(t) = e^{-\lambda_0 t^\alpha}, \quad (10)$$

де α - параметр форми розподілу;

λ_0 - параметр потоку відмов.

$\lambda(t)$ - характеризує небезпеку відмови:

$$\lambda(t) = \alpha \lambda_0 t^{\alpha-1}. \quad (11)$$

Характер зміни функції залежить від значення параметра α :

при $\alpha < 1$ вона монотонно убиває;

при $\alpha > 1$ зростає;

при $\alpha = 1$ $\lambda(t) = \lambda_0$ - значення в початковий момент часу.

У елемента з прихованими дефектами, однак не старіючого протягом тривалого часу, небезпека відмови різко підвищена спочатку і швидко падає; функція надійності добре описується законом Вейбулла при $\alpha < 1$. Якщо у елемента майже немає прихованих дефектів, проте він швидко старіє, то небезпека відмови монотонно зростає, функція надійності добре описує його законом Вейбулла з $\alpha > 1$.

При $\alpha = 1$ розподіл Вейбулла переходить в експоненціальний.

Для розрахунків практиці використовуються табличні значення α і λ_0 для різних видів електрообладнання, отримані теоретично і підтверджені експериментально з ймовірністю не менше 95%.

Значення коефіцієнтів для оцінки параметрів потоку відмов
(закон Вейбулла)

Напруга, кВ	Повітряні лінії		Трансформатори та автотрансформатори	
	α	λ_0 , 1/рік	α	λ_0 , 1/рік
35	1,005	1,7	0,5	0,08
110	0,97		0,5	0,09
220	0,87	2,1	0,5	0,014
350	0,83		0,5	0,034
500	0,77	4,3	0,5	0,103

При $\lambda t^\alpha \leq 1$ можна користуватися наближеною формулою:

$$R(t) \approx 1 - \lambda t^\alpha. \quad (12)$$

Якщо електрообладнання працює з постійним нагрівом, що визначає певне значення $\Delta t_x \neq 0$, то значення λ_0 - визначається значенням $\lambda_0' = \lambda_0(1 + \Delta t_x)$.

Часний випадок графіку функцій $\lambda(t)$ і $R(t)$ для трансформатора з високою напругою 110 кВ; прийнявши $\alpha = 0,5$; $\lambda_0 = 0,1$, зображено на рис.2.

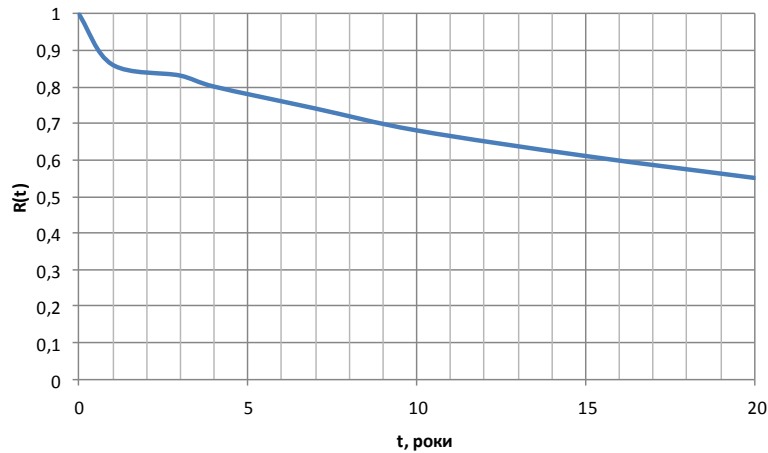


Рис. 2 Криві надійності $R(t)$

Визначення індексу надійності систем електропостачання.

Поняття надійності в електроенергетиці є одним з основних головних понять, які характеризують енергоефективність виробництва, передачі і розподілу електричної енергії. У різних нормативних і подібних документах під надійністю розуміється властивість об'єкта (електроустановки, електроенергетичної станції або її частини) забезпечувати необхідні функції (наприклад, безперебійне електропостачання споживачів в заданому обсязі і потрібній якості) зберігаючи свою працездатність і експлуатаційні показники. В сучасних умовах надійність розглядається також на оптовому ринку (тобто системна надійність) і на роздрібному ринку (надійність електромережі). Надійність як ймовірність бездефіцитної роботи електростанцій характеризується індексом надійності p . В Україні нормується індекс надійності, рівний 0,966, що значно нижче зарубіжних нормативів.

Розрахунок індексу надійності

Забезпечення значень p означає зниження вірогідності обмеження електропостачання, що вимагає додаткових капіталовкладень в підвищення надійності всіх складових енергосистем (генеруючих потужностей, електричних мереж різних рівнів, автоматичних пристроїв та ін., а також витрат K на забезпечення резерву генеруючих резервних потужностей $P_{рез}$. Значення K можна представити у вигляді:

$$K = P_{рез} \cdot K_{num}, \quad (13)$$

де K_{num} - питома вартість одного кіловату установки, що генерує потужність, дол/кВт.

Збиток, що виникає через недостачу електроенергії, при відсутності аварійного резерву:

$$Z = P_{рез} T z_0 q_{def}, \quad (14)$$

де z_0 - питомий збиток через недостатній відпуск електроенергії споживачу, дол/кВт·год;

q_{def} - інтегральна ймовірність виникнення дефіциту потужності.

Очевидно,

$$p = 1 - q_{def}. \quad (15)$$

З виразів для K та Z , враховуючи, що $Z \geq K$, отримаємо[3]:

$$q_{\text{деф}} > \frac{K_{\text{нум}}}{Tz_0}, \quad (16)$$

де $T = 8760$ годин.

Останній вираз використовується зазвичай з врахуванням коефіцієнта ефективності капітальних вкладів E_n протягом року, а також річних витрат на амортизацію α_0 , ремонтні роботи та обслуговування $\beta_{\text{екон}}$.

Таким чином:

$$q_{\text{деф}} > \frac{K_{\text{нум}}(E_n + \alpha_0 + \beta_{\text{екон}})}{z_0 \cdot T}, \quad (17)$$

Так, наприклад, при $K_{\text{нум}} = 2,75$ дол/кВт, $\alpha_0 + \beta_{\text{екон}} = 0,05$ та $z_0 = 0,125$ дол/кВт·год, виявляється $q_{\text{деф}} \geq 0,04$ та $p = 1 - q_{\text{деф}} = 0,96$. При нормуванні значень $p = 0,996$ можливий дефіцит електроенергії у споживача не більше $\Delta T = 35$ год/рік.

За кордоном в деяких країнах приймають $p \approx 0,999$, тоді дефіцит потужності не більше $\Delta T = 8$ год/рік.

Висновки

1. Світова електроенергетика знаходиться на стадії бурхливого розвитку, який відбувається в умовах здорожчання енергоносіїв, загрози тероризму, розробки та впровадженні нових джерел енергії. Ці реалії диктують засади для зміни класичних стандартів та розробки сучасних підходів до проектування інтелектуальних систем електропостачання. Задача забезпечення електромагнітної сумісності в умовах ризиків та невизначеності ситуації в енергетичній системі є надважливим фактором створення надійної та енергоефективної електричної мережі. Одним з показників, які впливають на можливість функціонування системи в цілому є індекс надійності. Зв'язки даного показника зі складовими електромагнітної сумісності висвітлюються в даній роботі.

2. В результаті аналізу характерних режимів роботи систем електропостачання з нелінійними навантаженнями та моделюванні електричних режимів отримано аналітичне описання та графічні залежності показників надійності електричних мереж в функції показників якості напруги, що є новою тенденцією пошуку ефективних режимів роботи системи Start Grid.

Список літератури

1. Transients in Electric Power Supply Systems. Textbook for institutions of higher education / G.G. Pivnyak, I.V. Zhezhelenko, Y.A. Papaika; under the editorship of G.G. Pivnyak; Ministry of Education and Science of Ukraine, National Mining University – 5th edition, revised and expanded: Translation from Ukrainian. – Dnipropetrovsk: NMU – 2016. – 392 pp.

2. Papaika Yu. Power Quality and Resonances in Power Supply Systems with non-sinusoidal Loads / Yu. Papaika, G. Kosobudzki, A.Lysenko // Advanced engineering forum, Trans Tech Publication, Switzerland, 2017, pp. 143-150.

3. Жежеленко І.В., Шидловський А.К., Півняк Г.Г., Саєнко Ю.Л. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання: Підручник / – Д.:Нац. гірнич. ун-т, 2009. – 319 с.: іл.

4. Pivnyak G. Normalization of voltage quality as the way to ensure energy saving in power supply systems / G. Pivnyak, I. Zhezhelenko, Yu. Papaika // “Energy Efficiency improvement of geotechnical systems”, Taylor&Francis Group (A Balkema Book). – 2013. – P. 11-18.

5. Pivnyak G. Estimating economic equivalent of reactive power in the systems of enterprise power supply / G. Pivnyak, I. Zhezhelenko, Yu. Papaika // Науковий вісник НГУ. – 2016. – №5. – С. 62-66.

6. Pivnyak G. Interharmonics in power supply systems/ G. Pivnyak, I. Zhezhelenko, Yu. Papaika, A.Lysenko// Науковий вісник НГУ. – 2017. – №6. – С. 109-114.