

УДК 621.316

## ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ПОТУЖНИМИ НЕЛІНІЙНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ

- ПАПАЙКА Ю.А. д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: [papaika@ukr.net](mailto:papaika@ukr.net);
- ЛИСЕНКО О.Г. канд. техн. наук, доцент кафедри електроприводу Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: [lysenkoag@ukr.net](mailto:lysenkoag@ukr.net);
- БУБЛІКОВ А.В. д-р техн. наук, професор кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: [bublikov.a.v@ntu.one](mailto:bublikov.a.v@ntu.one);
- ОЛІШЕВСЬКИЙ І.Г. асистент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: [olishevskiyi@ukr.net](mailto:olishevskiyi@ukr.net).

**Мета роботи.** Виконати обґрунтування доцільності застосування законів розподілу для моделювання надійності роботи систем електропостачання з потужними нелінійними навантаженнями.

**Методи дослідження.** Застосування експоненційного та нормального законів розподілу, та закону Вейбулла.

**Отриманні результати.** При комплексній оцінці проблеми електромагнітної сумісності та розробці багатокритеріальних параметрів енергетичної ефективності систем електропостачання промислових підприємств найбільш доцільно використовувати показники надійності елементів, які математично описуються розподілом Вейбулла. При цьому результати моделювання типових електричних режимів та варіації схем розміщення підприємств показали чутливість показників надійності до змін потужності енергосистеми.

**Наукова новизна.** Нові теоретичні засади для виконання досліджень у сучасних системах електропостачання із зростанням потужностей нелінійних навантажень дозволили розвинути наукові основи аналізу та синтезу енергетичних процесів у багатозначних електричних системах та запропонувати методи корекції з урахуванням комплексної дії джерел електромагнітних завад, характерних для промислових підприємств. А також запропонувати методи оцінки їх впливу на надійність та ефективність роботи основного електроенергетичного обладнання.

**Практична цінність.** Обґрунтовано можливість застосування отриманих результатів для оцінки надійності систем електропостачання з потужними нелінійними навантаженнями. Забезпечено необхідну точність та достовірність рішення на рівнях випадкових подій, величин і процесів. Наведено математичний апарат для аналізу основних показників надійності при наявності несинусоїдальності напруги. Зроблено висновки щодо адекватності результатів розрахунку на різних ступенях розподілу електроенергії. Показано, що одночасна оптимізація показників надійності та якості напруги – це складові комплексної наукової проблеми забезпечення енергетичної ефективності електричних мереж при впровадженні децентралізованих моделей енергосистеми.

**Ключові слова:** закон розподілу випадкової величини; показники надійності електрообладнання; термін експлуатації; індекс надійності; електричні мережі; математичне очікування, інверторне обладнання; моделювання.

### І. ВСТУП

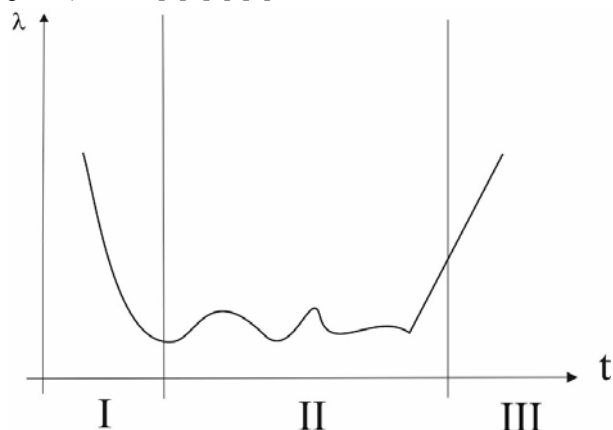
Надійність елементів систем електропостачання (СЕР) промислових підприємств аналізується в залежності від постановки задачі, необхідної точності і достовірності рішення на рівнях випадкових подій, величин і процесів. Для інженерних методів розрахунку надійності в основному використовується апарат випадкових величин.

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.

Статистичні дані про відмови елементів СЕР дозволили представити зміни  $\lambda(t)$  в часі за допомогою

кривой (рис. 1), на якій чітко виділяються 3 стадії (періоди) зміни [1], [3]-[6].



**Рисунок 1.** Крива статистичних відмов електрообладнання

*I. Ця стадія - обкатки:* коли в основному виділяються дефекти виробів, споруд, монтажу, наладки;  $\lambda(t)$  знижується за рівнем усунення недоліків (дефектів);  $\lambda(t)$  описується законом Вейбулла. Період приросту, в основному, до 5 років для повітряних ліній.

*II. Період нормальної роботи.* Можливі відмови відбуваються, в основному, внаслідок перевищення факторів, що впливають понад допустимих (розрахункових) значень;  $\lambda(t)$  описується експоненціальним законом. Цей закон має переважне використання в задачах надійності СЕП.

*III. Третя фаза - період старіння елементів.* В результаті зносу, старіння, незворотніх фізико-хімічних процесів, впливу вологості, агресивного середовища і т.д. навіть при нормальній експлуатації старіння збільшується.

Час життя кабельних ліній та трансформаторів, обумовлений старінням їх ізоляції, 20 - 30 років, комутаційного обладнання - 40 - 50 років.

В СЕП тривалість безвідмовної роботи, як правило, значно більше часу відновлення:  $T \gg \tau_r$  [2], [4]-[7].

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

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 [1], [2], [4]-[6], [10].

В роботах [3], [8]-[9] обґрунтовано методологію оцінки надійності обладнання при зниженій якості електроенергії. Це питання є дуже актуальним, оскільки наявність великої кількості потужних напівпровідникових перетворювачів призводить до спотворення синусоїдальності форми напруги в енергосистемі. Доведено негативний вплив зниженої якості електро-

енергії на надійність елементів систем електропостачання.

В статті [11] обґрунтовано доцільність оптимізації параметрів надійності систем електропостачання задля підвищення енергоефективності їх роботи.

Невирішеним залишалось питання можливості застосування відомих законів розподілу для одночасної оптимізації показників надійності та якості напруги при забезпеченні енергетичної ефективності електричних мереж при впровадженні децентралізованих моделей енергосистеми.

## III. МЕТА РОБОТИ

Виконати обґрунтування доцільності застосування законів розподілу для моделювання надійності роботи систем електропостачання з потужними нелінійними навантаженнями.

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Експоненціальний розподіл визначається одним параметром - інтенсивністю відмов  $\lambda(t)$ . Для цього випадку показники надійності:

- ймовірність безвідмовної роботи в інтервалі від 0 до  $t$  [2], [5]-[9].

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

- ймовірність відмови [2], [5]-[9]:

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

- густина ймовірності відмови [2], [5]-[9]:

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

- середній час безвідмовної роботи [2], [5]-[9]

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

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

Умова (5) передбачає, що обладнання, час безвідмовної роботи, має експоненціальний розподіл та 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 це 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 [2], [5]-[9].

В якості параметра експоненціального розподілу відновлення використовується інтенсивність відновлення  $\mu$ . Вірогідність відновлення елемента за час від 0 до  $t$  [2], [5]-[9]

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

- середній час відновлення [2], [5]-[9]

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

Для інженерних розрахунків надійності в СЕП приймається, що час безвідмовної роботи  $T$  і час відновлення  $\tau$  розподіляються за експоненціальним законом [2], [5]-[9].

Використання результатів імовірнісних розрахунків є правильними при необхідності дотримання двох умов: застосування в розрахунках одних і тих самих значень параметрів потоків відмов  $\lambda$  та однакових методів розрахунку, основних на прийнятті закону розподілу випадкових величин [7].

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 ПЛІ 35-110 кВ, застосовуються в системах електропостачання, значення потоку відмов  $\lambda_{eq}^{CL}$  знаходяться в межах 0,75 - 2,2, найбільша імовірність  $\lambda_{eq}^{CL} = 0,85$ . Середній час відновлення  $\tau_e$  приймається рівним  $10^{-3}$  при коефіцієнті планових простотів  $K_s = 4 - 5 \cdot 10^{-3}$ .

Для кабельних ліній при прокладанні в каналах і балках в середньому  $\lambda_{CL} = 0,015$  при  $\tau_r^{CL} = 1,4 \times 10^{-3}$ . Для трансформаторів і автотрансформаторів  $\lambda_{eq}^T = 0,04 - 0,1$ ; переважають значення  $\lambda_{eq}^T = 0,03$ ,  $\tau_r = 10^{-3}$  [2].

#### Нормальний закон розподілу.

Нормальний закон розподілу в задачах надійності СЕП застосовується порівняно рідко [2], [5]-[9]. Перевага віддається 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 зміни його терміну служби (тривалості життя). Спочатку розглянемо процеси за умови нормального закону розподілу надійності.

Функція надійності  $R(t)$ . Для нормального закону надійності має вид [2]:

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

де  $m_t$  та  $\sigma_t$  - 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 к виду [2], [5]-[9]:

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

Значення функції  $\Phi\left(\frac{1 - \frac{t}{m_t}}{\frac{\sigma_t}{m_t}}\right)$  знаходиться за

наступними таблицями в залежності від  $t$ , рік.

$$m_t = t_{ном}(1 - \Delta t_x).$$

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

Інтеграли імовірності  $\Phi\left(\frac{1 - \frac{t}{m_t}}{\frac{\sigma_t}{m_t}}\right) = \Phi(x)$  є непар-

ною функцією тобто:

$\Phi(-x) = -\Phi(x)$ , що враховувалося при виконанні розрахунку.

Таблиця значень функції  $\Phi(x)$  при  $x = 0 - 5$  приведена в довідковій літературі.

Виконаємо розрахунків для силових трансформаторів типу ТМ з номінальною первинною напругою 150 кВ при вихідних даних:

$$а) t_{ном} = 30 \text{ років}; \Delta t_x = 0,1; \frac{\sigma_t}{m_t} = 0,33;$$

$$б) t_{ном} = 25 \text{ років}; \Delta t_x = 0,2; \frac{\sigma_t}{m_t} = 0,33.$$

Результати розрахунку приводяться в табл. 1 і табл. 2. Відповідні криві представлені на рис. 2.

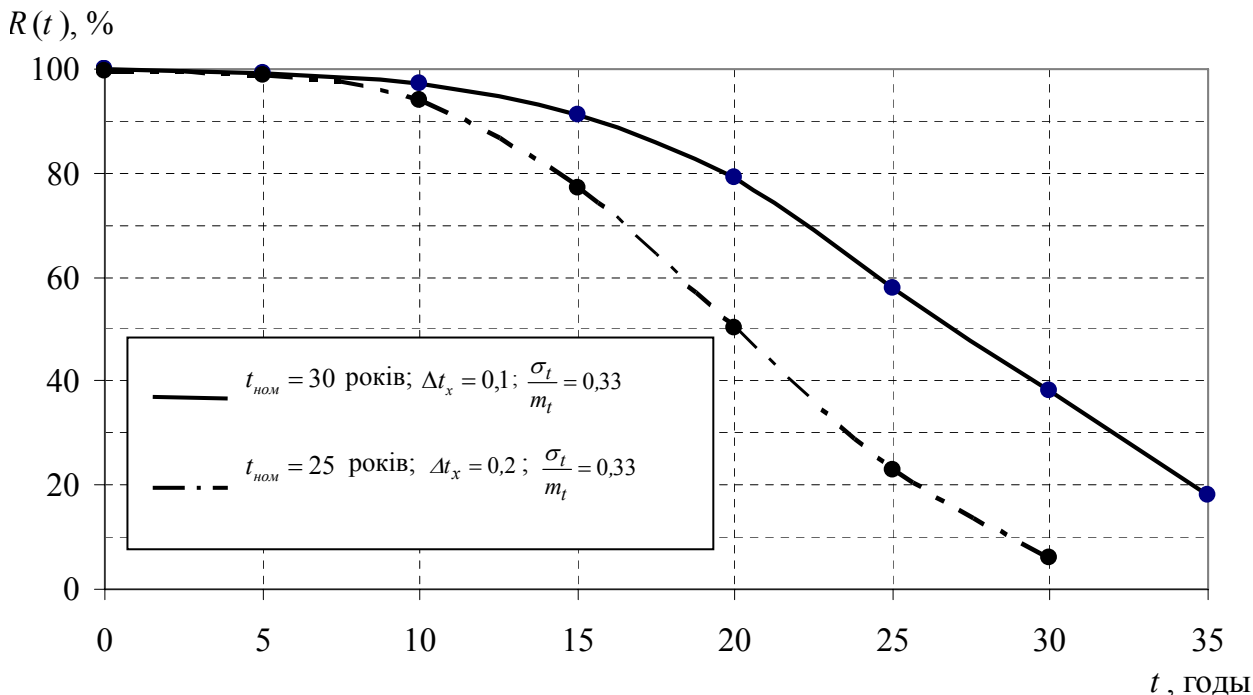


Рисунок 2. Криві надійності  $R(t)$

Таблиця 1. Результати розрахунку значень  $R(t)$  для  $\frac{t}{m_t} = \frac{t}{30(1-0,1)} = 0,037t$ ;  $\frac{\sigma_t}{m_t} = \frac{1}{3}$

$t$ , роки	1	2	5	10	15	20	25	30	35
$\frac{1-t/m_t}{1/3}$	2,9	2,8	2,4	1,9	1,35	0,8	0,21	-0,37	-0,9
$\Phi\left(\frac{1-t/m_t}{\sigma_t/m_t}\right)$	0,498	0,497	0,491	0,47	0,41	0,29	0,08	-0,12	-0,32
$0,5 + \Phi\left(\frac{1-t/m_t}{\sigma_t/m_t}\right)$		0,997	0,991	0,97	0,91	0,79	0,58	0,38	0,18

Таблиця 2. Результати розрахунку значень  $R(t)$  для  $\frac{t}{m_t} = \frac{t}{25(1-0,2)} = 0,05t$

$t$ , роки	1	2	5	10	15	20	25	30
$\left(\frac{1-t/m_t}{\sigma_t/m_t}\right)$	0,05	0,497	0,487	0,439	0,273	0	-0,273	-0,439
$0,5 + \Phi\left(\frac{1-t/m_t}{0,33}\right)$	1,0	0,997	0,987	0,939	0,773	0,5	0,227	0,061

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.

Нижче представленні результати розрахунку па-

раметра  $R(t)$  ізоляції трансформатора ТМ 630/10 в мережі з параметрами несинусоїдальності:

$$m_{K_U} = 6,2\% \text{ і } \sigma_{K_U} = 0,05m_{K_U} .$$

Аналогічні залежності справедливі і для інших видів електрообладнання - генераторів, АД, СД та ін.

Як свідчать численні розрахунки, при постійному впливі несинусоїдальності, значення параметрів

яких відповідають гранично допустимим згідно ГОСТ 13109-97, термін служби трансформатора 10 МВ·А, 35/6 кВ знижується на 25-30%. При середніх значеннях цих параметрів термін служби скорочується на 8-10%.

#### Методи розрахунку надійності, засновані на законі Вейбула.

Аналітичні методи розрахунку надійності роботи електричних систем і їх основних елементів у багатьох випадках ґрунтуються на законі Вейбула. З  $\lambda = \lambda(t)$  теорії надійності відомо, що розподіл Вейбула є найменш складним і найбільш загальним законом розподілу зі змінним параметром відмов.

Функція надійності в цьому випадку має вигляд [2], [5]-[9]:

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

де  $\alpha$  - параметр форми розподілу;  $\lambda_0$  - 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  $\alpha$ : при  $\alpha^\infty$ ,  $\alpha < 1$  вона монотонно убуває, при  $\alpha > 1$  зростає, при  $\alpha = \lambda(t) = \lambda_0$  - значення в початковий момент часу (рис. 3).

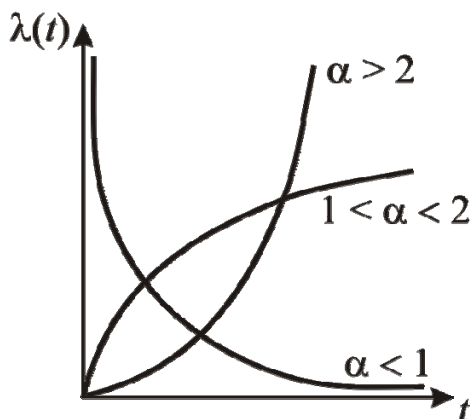


Рисунок 3. Залежність  $\lambda(t)$  при законі Вейбула

У елемента з прихованими дефектами, однак, не старіючого протягом тривалого часу, небезпека відмови різко підвищена спочатку і швидко падає; функція надійності добре описується законом Вейбула 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 Вейбула з  $\alpha > 1$  [2], [5]-[9].

При  $\alpha = 1$  розподіл Вейбула переходить в експоненціальний [2], [5]-[9].

Для розрахунків на практиці використовуються табличні значення  $\alpha$  і  $\lambda_0$  для різних видів електроустаткування, отримані теоретично і підтверджені експериментально з ймовірністю не менше 95% (табл. 3).

Таблиця 3. Значення коефіцієнтів для оцінки параметрів потоку відмов (закон Вейбулла)

Напруга, кВ	Повітряні лінії		Трансформатори та автотрансформатори	
	$\alpha$	$\lambda_0$ , 1/рік	$\alpha$	$\lambda_0$ , 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		0,103

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  $\Delta t_x \neq 0$ , величина  $\lambda_0$  - визначається значенням  $\lambda_0' = \lambda_0(1 + \Delta t_x)$ .

Найбільш розповсюдженими номінальними параметрами головних знижувальних підстанцій гірничих підприємств є первинна напруга 110-150 кВ, тому найбільший інтерес представляє моделювання параметрів надійності силових трансформаторів 110-150/6-10 кВ. Розрахункова функція  $\lambda(t)$  і  $R(t)$  для трансформатора з високою напругою 150 кВ зображена на рис. 4.

Оцінимо зменшення ймовірності безвідмовної роботи кабельної лінії при скороченні терміну служби ізоляції за рахунок впливу ВГ на 10%. Потік відмов без урахування впливу ВГ підпорядковується розподілу Вейбула; параметр потоку відмов (питома пошкоджуваність  $\lambda$ ) і параметр форми розподілу  $\alpha$  рівні

$$\lambda = 0,8 \text{ рік}^{-1}; \quad \alpha = 1,5.$$

Ймовірність безвідмовної роботи  $R(t)$  в загальному випадку [2], [5]-[9]:

$$R = e^{-\lambda t^\alpha}.$$

Середній час безвідмовної роботи з використанням гамма-функції [2], [5]-[9]:

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t^\alpha} dt = \frac{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha} + 1\right)}{\lambda^{1/\alpha}}.$$

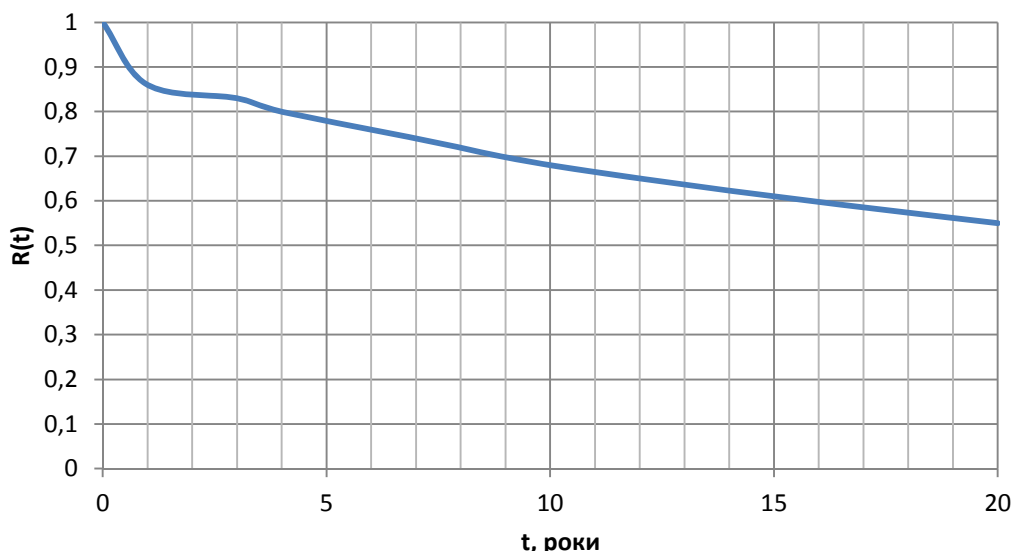


Рисунок 4. Криві надійності  $R(t)$

Приймемо, що середній час безвідмовної роботи пропорційний терміну служби ізоляції; тоді

$$T'_{cp} = T_{cp} = (\lambda/\lambda')^{1/\alpha};$$

де  $T'_{cp}$  і  $\lambda$  - середній час безвідмовної роботи і параметр потоку відмов з урахуванням зносу ізоляції від впливу ВГ.

Звідси отримуємо [2], [5]-[9]

$$\lambda' = \lambda(T'_{cp}/T_{cp})^\alpha = 0,8(1/0,9)^{1,5} = 0,94.$$

Відносне значення ймовірності безвідмовної роботи кабельної лінії при скороченні терміну служби ізоляції на 10%

$$\frac{R'(t)}{R(t)} = \frac{e^{-\lambda't^\alpha}}{e^{-\lambda t^\alpha}} = e^{-(\lambda'-\lambda)t^\alpha} = e^{-0,14t^{1,5}}.$$

Відносні значення ймовірності безвідмовної роботи кабельної лінії для різних інтервалів часу представлені у табл. 4.

Таблиця 4. Результати розрахунків відносного значення ймовірності

t, рік	1	2	3	4	5
$\frac{R'(t)}{R(t)}$	0,87	0,67	0,48	0,33	0,21

**V. ВИСНОВКИ**

1. Нові теоретичні засади для виконання досліджень у сучасних системах електропостачання із зростанням потужностей нелінійних навантажень дозволили розвинути наукові основи аналізу та синтезу енергетичних процесів у багатофазних електричних системах та запропонувати методи корекції з урахуванням комплексної дії джерел електромагнітних за-

вад, характерних для промислових підприємств, та оцінки їх вплив на надійність та ефективність роботи основного електротехнологічного обладнання.

2. При комплексній оцінці проблеми електромагнітної сумісності та розробці багатокритеріальних параметрів енергетичної ефективності систем електропостачання промислових підприємств найбільш доцільно використовувати показники надійності елементів, які математично описуються розподілом Вейбулла. При цьому результати моделювання типових електричних режимів та варіацій схем заміщення підприємств показали чутливість показників надійності до змін потужності енергосистеми.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

[1] Жаркин А.Ф. Пути решения проблемы высших гармоник в электрических сетях Украины / А.Ф. Жаркин, И.В. Мостовяк, С.А. Палачев // Технічна електродинаміка. Темат. Вип.: Силова електроніка та енергоефективність. – 2006. – Ч1.– С.79 – 82.

[2] Папаика Ю.А. Энергетична ефективність систем електропостачання / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка. – Д.: НТУ «ДП», 2018. – 149 с.

[3] Оценка надежности оборудования при пониженном качестве электроэнергии / Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., А.В. Горпинич // Вести в електроенергетике, 2006. - №6 – с.13-17.

[4] Короткевич М. А. Оценка значения индекса надежности энергосистем / М. А. Короткевич // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: сборник научных статей . – Вып. 66. – Минск, БНТУ, 2015, С. 54-59.

[5] Непомнящий В.А. Экономические потери от нарушения электроснабжения потребителей / В.А.



- Непомнящий. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 188 с.
- [6] Шидловский А.К. Эффективные режимы работы электротехнологических комплексов / А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк, С.И. Выпанасенко, В.В. Слесарев. – Д.: НГА Украины, 2000.
- [7] Соколовская Г.А. Ресурсосбережение на предприятиях / Г.А. Соколовская, Т.С. Сигарева. – М.: Экономика, 1990. – 156 с.
- [8] Михайлов В.В. Надежность электроснабжения промышленных предприятий / В.В. Михайлов. – М.: Энергия, 1973. – 168 с.
- [9] Непомнящий В.А. Надежность оборудования энергосистем / В.А. Непомнящий. – М.: журнал «Электроэнергия. Передача и распределение», 2013. – 196 с., ил.
- [10] Paraika, Y., Lysenko, O., Koshelenko, Y. and Olisheskiy, I., 2021. Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), pp.97-103.
- [11] Pivnyak, G., & Dychkovskiy, R. (2017). Energy Saving and Efficiency: Technological, Economical and Social Challenges. In: *Advanced Engineering Forum: monograph*. Zurich: Trans Tech Publication Ltd.
- [12] A. Ghosh and G. Ledwich, Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices. Norwell, MA: Kluwer, 2002.
- [13] Janik P. Photovoltaic Power Generation Assessment Based on Advanced Signal Processing and Optimisation Techniques. Wroclaw: Publishing house of Wroclaw University of Science and Technology Wroclaw, 2014.
- [14] Janik P., Kosobudzki G., Schwarz. Influence of increasing numbers of RE-inverters on the power quality in the distribution grids: A PQ case study of a representative wind turbine and photovoltaic system. Higher Education Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017, DOI 10.1007/s11708-017-0469-3.
- [15] Олишевский И. Г. Обоснование рациональной схемы теплонасосной системы отопления / И. Г. Олишевский // *Механіка гіроскопічних систем / НТУУ «Київський політехнічний інститут»*. – Київ. – 2015. – № 30. – С. 26 – 35.
- [16] Ryszard Strzelecki, Henryk Supronowicz. Wspolczynnik mocy w systemach zasilania pradu przemiennego i metody jego poprawy / Ryszard Strzelecki, Henryk Supronowicz, Warszawa: Oficyna Wydaw. Politechniki Warszawskiej, 2000, 452 s.
- [17] Олишевский И. Г. Обоснование применения теплонасосного оборудования для утилизации тепловых потерь в силовых трансформаторах большой мощности / И. Г. Олишевский, Г. С. Олишевский // *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Ракетно-космічна техніка. / Дніпр. нац. ун-т ім. О. Гончара. – Дніпропетровськ, 2015. – № 4. – Т. 23. – Вип. 18(1) – С. 131-136.*
- [18] Пивняк Г.Г. Электрификация горничих работ / Г.Г. Пивняк, М.М. Білий та ін. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2005. – 320 с.
- [19] Олишевский Г. С. Обоснование метода утилизации теплоты системы кондиционирования для теплонасосной системы отопления / Г. С. Олишевский, И. Г. Олишевский // *Інформаційні системи, механіка та керування / НТУУ «Київський політехнічний інститут»*. – Київ. – 2017. – № 17. – С. 86 – 94.

Стаття надійшла до редакції 05.09.2020

## ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С МОЩНЫМИ НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ

- ПАПАЙКА Ю.А. д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электроэнергетики НТУ «Днепровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: paraika@ukr.net;
- ЛЫСЕНКО А. Г. канд техн. наук, доцент кафедры электропривода НТУ «Днепровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: lysenkoag@ukr.net;
- БУБЛИКОВ А.В. д-р техн. наук, профессор кафедры киберфизических и информационно-измерительных систем НТУ «Днепровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: bublikov.a.v@nmu.one.
- ОЛИШЕВСКИЙ И.Г. ассистент кафедры безопасности информации и телекоммуникаций НТУ «Днепровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: olisheskiyi@ukr.net;

**Цель работы.** Выполнить обоснование целесообразности применения законов распределения для моделирования надежности работы систем электроснабжения с мощными нелинейными нагрузками.

**Методы исследования.** Применение экспоненциального и нормального законов распределения, и закона Вейбула.

**Полученные результаты.** При комплексной оценке проблемы электромагнитной совместимости и раз-

работке многокритериальных параметров энергетической эффективности систем электроснабжения промышленных предприятий, наиболее целесообразно использовать показатели надежности элементов, которые математически описываются распределением Вейбулла. При этом результаты моделирования типовых электрических режимов и вариаций схем замещения предприятий показали чувствительность показателей надежности к изменениям мощности энергосистемы.

**Научная новизна.** Новые теоретические положения для выполнения исследований в современных системах электроснабжения с возрастанием мощностей нелинейных нагрузок позволили развить научные основы анализа и синтеза энергетических процессов в многофазных электрических системах, и предложить методы коррекции с учетом комплексного действия источников электромагнитных помех, характерных для промышленных предприятий. А также предложить методы оценки их влияния на надежность и эффективность работы основного электротехнологического оборудования.

**Практическая ценность.** Обоснованно возможность применения полученных результатов для оценки надежности систем электроснабжения с мощными нелинейными нагрузками. Обеспечено необходимую точность и достоверность решения на уровнях случайных событий, величин и процессов. Приведено математический аппарат для анализа основных показателей надежности при наличии несинусоидального напряжения. Сделано выводы насчет адекватности результатов расчета на разных ступенях распределения электроэнергии. Показано, что одновременная оптимизация показателей надежности и качества электроэнергии – это составляющие комплексной научной проблемы обеспечения энергетической эффективности электрических сетей при внедрении децентрализованных моделей энергосистемы.

**Ключевые слова:** закон распределения случайной величины; показатели надежности электрооборудования; срок эксплуатации; индекс надежности; электрические сети; математическое ожидание; инвертированное оборудование; моделирование.

## RELIABILITY ASSESSMENT OF POWER SUPPLY SYSTEMS WITH POWERFUL NONLINEAR LOADS

- PAPAİKA YU. A. Sci.D, Professor, Head of the Department of Power Engineering, Dnipro University of technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: papaika@ukr.net;
- LYSENKO O. H. PhD, docent of the Electric Drive department, Dnipro University of technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: lysenkoag@ukr.net;
- BUBLIKOV A.V. Sci.D, Professor of the Department of Cyberphysical and Information-measuring Systems, Dnipro University of technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: bublikov.a.v@nmu.one;
- OLISHEVSKIY I. H. Assistant of Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: olishevskiyi@ukr.net.

**Purpose.** To substantiate the expediency of applying distribution laws to model the reliability of power supply systems with powerful nonlinear loads.

**Methodology.** Application of exponential and normal distribution laws, and Weibull's law.

**Findings.** In a comprehensive assessment of the problem of electromagnetic compatibility and the development of multicriteria parameters of energy efficiency of power supply systems of industrial enterprises, it is most appropriate to use the reliability of the elements that are mathematically described by the Weibull distribution. At the same time, the results of modeling of typical electrical modes and variations of substitution schemes of enterprises showed the sensitivity of reliability indicators to changes in power system capacity.

**Originality.** New theoretical foundations for research in modern power supply systems with increasing nonlinear load capacity have developed the scientific basis for analysis and synthesis of energy processes in multiphase electrical systems and propose methods of correction taking into account the complex action of sources of electromagnetic interference. And also to offer methods of estimation of their influence on reliability and efficiency of work of the basic electrotechnological equipment.

**Practical value.** The possibility of applying the obtained results to assess the reliability of power supply systems with powerful nonlinear loads is substantiated. The necessary accuracy and reliability of the decision at the levels of random events, quantities and processes is provided. The mathematical apparatus for the analysis of the main indicators of reliability in the presence of non-sinusoidal voltage is given. Conclusions are made on the adequacy of the calculation results at different stages of electricity distribution. It is shown that the simultaneous optimization of reliability and voltage quality are components of a complex scientific problem of ensuring energy efficiency of



*electrical networks in the implementation of decentralized models of the energy system.*

**Keywords:** *the law of distribution of a random variable; indicators of reliability of electrical equipment; service life; reliability index; electrical networks; mathematical expectation, inverter equipment; modeling.*

#### REFERENCES

- [1] Zharkin A.F., Mostovjak I.V., Palachev S.A. (2006). Puti reshenija problemy vysshih garmonik v jelektricheskikh setjah Ukrainy. *Tehnichna elektrodinamika. Temat. Silova elektroni-ka ta energoefektivnist'*. Vol. 1, 79-82.
- [2] Papaika Ju.A., Pivnjak G.G., Zhezhenko I.V. (2018). Energetichna effektivnist' sistem elektropostachannja. Dnipro, NTU «DP», 149.
- [3] Zhezhenko I.V., Saenko Ju.L., A.V. Gorpnich. (2006). Ocenka nadezhnosti oborudovanija pri ponizhen-nom kachestve jelektroenergii. *Vesti v jelektrojenergetike*, No 6. 13-17.
- [4] Korotkevich M. A. (2015). Ocenka znachenija indeksa na-dezhnosti jenergosistem. Metodicheskie voprosy issledovanija nadezhnosti bol'shijh sistem jenergetiki: sbornik nauchnyh statej. Vol. 66, Minsk, BNTU, 54-59.
- [5] Nepomnjashhij V.A. (2010). Jekonomicheskie poteri ot na-rushenija jelektrosnabzhenija potrebitelej. Moscow, Izdatel'skij dom MJeI, 188.
- [6] Shidlovskij A.K., Pivnjak G.G., Vypanasenko S.I., Slesarev V.V. (2000). Jeffektivnye rezhimy raboty jelektrotehnologicheskijh kompleksov. Dnipro. NGA Ukrainy.
- [7] Sokolovskaja G.A., Sigareva T.S. (1990). Resursosberezhenie na predpri-jatijah. Moscow. Jekonomika, 156.
- [8] Mihajlov V.V. (1973). Nadezhnost' jelektrosnabzhenija promyshlennyh predpriyatij. Moscow, Jenergija, 168.
- [9] Nepomnjashhij, V.A. (2013). Nadezhnost' oborudovanija jene-rgosistem. Moscow. *Jelektrojenergija. Peredacha i raspredelenie*, 196.
- [10] Papaika, Y., Lysenko, O., Koshelenko, Y. and Olishevskij, I., 2021. Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 97-103.
- [11] Pivnyak, G., Dychkovskiy, R. (2017). Energy Saving and Efficiency: Technological, Economical and Social Challenges. In: *Advanced Engineering Forum: monograph*. Zurich: Trans Tech Publication Ltd.
- [12] Ghosh A., Ledwich G. (2002). Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices. Norwell, MA: Kluwer.
- [13] Janik P. Photovoltaic Power Generation Assessment Based on Advanced Signal Processing and Optimisation Techniques. Wroclaw: Publishing house of Wroclaw University of Science and Technology Wroclaw, 2014.
- [14] Janik P., Kosobudzki G., Schwarz. Influence of increasing numbers of RE-inverters on the power quality in the distribution grids: A PQ case study of a representative wind turbine and photovoltaic system. Higher Education Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017, DOI 10.1007/s11708-017-0469-3.
- [15] Olishevskij I. G. (2015). Obosnovanie racional'noj shemy teplonasosnoj sistemy otoplenija. *Mehanika giroskopichnih sistem*. NTUU «Kiïvs'kij politechnij institut». Kiïv, No 30, 26-35.
- [16] Ryszard Strzelecki, Henryk Supronowicz. Wspolczynnik mocy w systemach zasilania pradu przemienneho i metody jego poprawy / Ryszard Strzelecki, Henryk Supronowicz, Warszawa: Oficyna Wydaw. Politechniki Warszawskiej, 2000, 452.
- [17] Olishevskij I. G., Olishevskij G. S. (2015). Obosnovanie primenenija tep-lonasosnogo oborudovanija dlja utilizacii teplovyh poter' v silovyh transformatorah bol'shoj moshhnosti. *Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu. Serija: Raketno-kosmichna tehnika*. Dnipr. nac. un-t im. O. Gonchara, Dnipropetrovs'k, No 4.
- [18] Pivnjak G.G., Bilij M.M. (2005). Elektrifikacija gimichijh robot. Dnipropetrovs'k: Nacional'nij gimichij universitet, 320.
- [19] Olishevskij G. S., Olishevskij I. G. (2017). Obosnovanie metoda utiliza-cii teploty sistemy kondicionirovanija dlja teplonasosnoj sistemy otoplenija. *Informacijni si-stemi, mehanika ta keruvannja*. NTUU «Kiïvs'kij politechnij institut», Kiïv, 2017. No 17. 86-94.