

В. І. Мірненко¹, д.т.н., професор,
П. М. Яблонський¹, к.т.н., доцент,
e-mail: mirnenkovi@gmail.com
А. М. Петренко², ст. викладач
e-mail: petrenko1969@ukr.net

¹Національний університет оборони України імені Івана Черняховського
Повітрофлотський просп., 28, м. Київ, 03049, Україна

²Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ТИПУ ТМН, ТМГ і ТМ

У статті розроблено методику оцінювання техніко-економічної ефективності експлуатації силових трансформаторів типу ТМН, ТМГ і ТМ з використанням дифузійно-немонотонного закону розподілу їх відмов з урахуванням помилок першого і другого роду. Для стандартних умов експлуатації показано графіки залежності коефіцієнта технічного використання і питомих витрат на годину роботи трансформаторів у справному стані від основних параметрів математичної моделі.

Ключові слова: дифузійно-немонотонний розподіл, коефіцієнт технічного використання, питомі витрати, періодичність проведення профілактичних робіт.

Вступ. Силові трансформатори ТМН, ТМГ і ТМ належать до найбільш уживаних у народному господарстві і забезпечують електроенергією населення держави. Вони працюють цілодобово, за виключенням часу на аварійні відключення і профілактичні роботи. В сучасних умовах спостерігається певний дефіцит електроенергії для народного господарства. Тому забезпечення електроенергією повинно бути надійним і економічним. З різних варіантів досягнення заданого рівня технічної готовності силових трансформаторів необхідно обрати найбільш економічний.

Аналіз останніх джерел та публікацій. У наукових роботах дослідження силових трансформаторів спостерігається відносно рідко. Так, в роботі [5] обґрунтовано доцільність застосування саме дифузійно-немонотонного розподілу (ДН) для електричних установок. Використання ДН-розподілу для створення зразків електронної техніки описано в роботі [2]. Залежності коефіцієнту технічного використання (K_{TB}) від параметрів експлуатації для дифузійно-монотонного (ДМ) і дифузійно-немонотонного (ДН) розподілів відмов показано в праці [6]. Роботи [7, 8] присвячені застосуванню лише закону ДМ-розподілу.

Метою даної роботи є обґрунтування оптимальної за критерієм коефіцієнта технічного використання періодичності проведення

профілактичних робіт з урахуванням витрат на одну годину роботи силових трансформаторів ТМН, ТМГ і ТМ. За критерій ефективності експлуатації силових трансформаторів будемо використовувати коефіцієнт технічного використання (K_{TB}), рекомендовано державним стандартом України [1].

Експлуатація таких силових трансформаторів пов'язана з певними економічними витратами, які залежать від часу їх роботи, кількості і характеру відмов, періодичності і тривалості проведення профілактичних робіт, якості вбудованих систем контролю, закупівельної вартості виробів.

Виклад основного матеріалу дослідження. За модель відмов силових трансформаторів будемо використовувати дифузійно-немонотонний закон розподілу, який рекомендовано державним стандартом України [1] для виробів електротехнічного типу з функцією розподілу

$$F(t) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{v\sqrt{\mu t}}\right) + e^{2v^2} \cdot \Phi\left(-\frac{t + \mu}{v\sqrt{\mu t}}\right),$$

де $\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{v^2}{2}} du$; μ – параметр масштабу; v – параметр форми.

Для дифузійно-немонотонного закону розподілу параметр масштабу співпадає з

математичним сподіванням часу роботи між відмовами, а параметр форми з коефіцієнтом варіації. Вказаним стандартом для електроте-

хнічних виробів рекомендується параметр форми $\nu = 0,5$. У табл. 1 наведені параметри експлуатації силових трансформаторів.

Таблиця 1

Параметри експлуатації силових трансформаторів

№ з/п		Тип трансформатора		
		ТМН	ТМГ	ТМ
1	параметр масштабу μ , год	2190	4380	8760
2	параметр форми ν	0,5	0,5	0,5
3	інтенсивність надходження сигналів помилкових тригів λ , 1/год	$2,85 \cdot 10^{-6}$	$2,85 \cdot 10^{-6}$	$5,71 \cdot 10^{-5}$
4	інтенсивність проявлення відмов, що сталися у трансформаторів $\lambda_{\text{пр}}$, 1/год	$1,427 \cdot 10^{-6}$	$2,85 \cdot 10^{-6}$	$2,85 \cdot 10^{-7}$
5	ймовірність надходження інформації про відмову ρ	0,7	0,3	0,3
6	тривалість проведення профілактичних робіт $t_{\text{пр}}$, год.	1,5	1,5	1,5
7	тривалість перевірки трансформатора пересувною системою контролю t_n , год.	2	1,5	1,5
8	тривалість перевірки трансформатора вбудованою системою контролю t_n^* , год.	0,5	0,5	0,5
9	тривалість повного відновлення трансформатора, що відмовив $t_{\text{в}}$, год.	4,8	6	4
10	ймовірність правильного визначення несправного трансформатора під час проведення профілактичних робіт $d_{\text{нз}}$	0,9	0,85	0,9
11	ймовірність правильного визначення несправного трансформатора пересувними засобами контролю $d_{\text{нз}}^*$	0,8	0,8	0,8
12	ймовірність правильного визначення справного стану трансформатора пересувними засобами контролю $d_{\text{с}}^*$	0,9	0,9	0,9
13	періодичність проведення профілактичних заходів у силових трансформаторах T , год.	1000	1000	1000

У роботі [3] показано, що коефіцієнт технічного використання системи дорівнює

$$K_{\text{ТВ}} = \frac{\pi_1(T) \cdot B(T)}{\pi_1(T) \cdot \mu_1(T) + \pi_2(T) \cdot \mu_2(T) + \pi_3(T) \cdot \mu_3(T) + \pi_4(T) \cdot \mu_4(T) + \pi_5(T) \cdot \mu_5(T) + \pi_6(T) \cdot \mu_6(T) + \pi_7(T) \cdot \mu_7(T)}, \quad (1)$$

де

$$\left. \begin{aligned} \pi_1(T) &= \frac{M}{D}; \\ \pi_2(T) &= a_1 \cdot \frac{M}{D}; \\ \pi_3(T) &= a_2 \cdot \frac{M}{D} + a_3 \cdot \frac{a_2(1-d_{\text{нз}}) + a_4(1-d_{\text{нз}}^*)}{D}; \\ \pi_4(T) &= \frac{M[d_{\text{нз}} \cdot a_2 + d_{\text{нз}}^* \cdot a_4 + (1-d_{\text{с}}^*)a_6]}{D} + \frac{[d_{\text{нз}} \cdot a_2 + d_{\text{нз}}^* \cdot a_5] \cdot [a_2(1-d_{\text{нз}}) + a_4(1-d_{\text{нз}}^*)]}{D}; \\ \pi_5(T) &= a_4 \cdot \frac{M}{D} + a_5 \cdot \frac{a_2 - d_{\text{нз}} \cdot a_2 + a_4 - d_{\text{нз}}^* \cdot a_4}{D}; \\ \pi_6(T) &= a_6 \cdot \frac{M}{D}; \\ \pi_7(T) &= \frac{a_2(1-d_{\text{нз}}) + a_4(1-d_{\text{нз}}^*)}{D}; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

У формулі (2): $\pi_i(T)$ – частина потрапляння Маркова до стану i , де $i = \overline{1,7}$;

$$M = 1 - (1 - d_{H2})a_3 - (1 - d_{H2}^*)a_5;$$

$$\begin{aligned} D = & (1 + a_1 + a_2 + a_4 + 2a_6 + d_{H2} \cdot a_2 + d_{H2}^* \cdot a_4 - \\ & - d_{H2}^* \cdot a_6) \cdot [1 - a_3(1 - d_{H2}) - a_5(1 - d_{H2}^*)] + \\ & + [a_3 \cdot (1 + d_{H2}) + a_5(1 - d_{H2}^*) + 1] + \\ & + [a_2 \cdot (1 - d_{H2}) + a_4(1 - d_{H2}^*)]. \end{aligned}$$

Для визначення складових компонентів вектора $\pi(T)$ введемо такі позначення:

$$a_1(T) = [1 - F(T)] \cdot e^{-\lambda T};$$

$$a_2(T) = (1 - \rho) \int_0^T e^{-\lambda t} dF(t);$$

$$a_3(T) = e^{-\lambda_{np} T}; \quad a_4(T) = \rho \int_0^T e^{-\lambda t} dF(t);$$

$$a_5(T) = 1 - e^{-\lambda_{np} T}; \quad a_6(T) = \lambda \int_0^T e^{-\lambda t} [1 - F(t)] dt.$$

Для початкових даних табл. 1 (силового трансформатора ТМН) вектор частот потрапляння ланцюга Маркова до стану i , де $i = \overline{1,7}$ для дифузійно-немонотонного закону розподілу дорівнює

$$\begin{aligned} \pi_1(T) = 0,4745; \quad \pi_2(T) = 0,4362; \quad \pi_3(T) = 0,018; \\ \pi_4(T) = 0,0037; \quad \pi_5(T) = 0,0259; \\ \pi_6(T) = 0,001; \quad \pi_7(T) = 0,0069. \end{aligned}$$

Сума компонент вектора $\pi(T)$ дорівнює одиниці, з досить високою точністю, що свідчить про правильність виконаних розрахунків числовим методом.

Для трансформатора ТМГ вектор $\pi_{TMG}(T)$ буде мати такі складові:

$$\begin{aligned} \pi_1(T) = 0,4996; \quad \pi_2(T) = 0,4976; \\ \pi_3(T) = 0,0005; \quad \pi_4(T) = 0,0006; \\ \pi_5(T) = 0,0001; \quad \pi_6(T) = 0,0014; \\ \pi_7(T) = 0,0001. \end{aligned}$$

Для трансформатора ТМ вектор $\pi_{TM}(T)$ буде мати такі складові:

$$\begin{aligned} \pi_1(T) = 0,4986; \quad \pi_2(T) = 0,4709; \\ \pi_3(T) = 5,663 \cdot 10^{-8}; \quad \pi_4(T) = 0,0027; \\ \pi_5(T) = 2,012 \cdot 10^{-8}; \quad \pi_6(T) = 0,0276; \\ \pi_7(T) = 9,6871 \cdot 10^{-9}. \end{aligned}$$

Для визначення K_{TB} необхідно знати компоненти вектора $\mu(T)$ середніх тривалостей перебування напівмарковського процесу у станах i , де $i = \overline{1,7}$. У першому стані напівмарковський процес перебуває в середньому час $\mu_1(T)$, що дорівнює

$$\begin{aligned} \mu_1(T) = & [1 - F(T)] \cdot e^{-\lambda T} \cdot T + \\ & + (1 - \rho) \int_0^T e^{-\lambda t} dF(t) \cdot T + \\ & + \rho \cdot \int_0^T e^{-\lambda t} dF(t) \cdot \int_0^T t \cdot dF_{15}(t) + \\ & + \lambda \cdot \int_0^T e^{-\lambda t} [1 - F(t)] dt \cdot \int_0^T t \cdot dF_{16}(t); \\ F_{15}(t) = & \frac{\int_0^t e^{-\lambda x} dF(x)}{\int_0^T e^{-\lambda x} dF(x)}; \\ F_{16}(t) = & \frac{\int_0^t e^{-\lambda x} [1 - F(x)] dx}{\int_0^T e^{-\lambda x} [1 - F(x)] dx} \end{aligned}$$

Можна показати, що для силового трансформатора ТМН решта компонент вектора $\mu(T)$ дорівнюють

$$\mu_2(T) = t_p + t_{np}; \quad \mu_3(T) = t_p - d_{HГ} \cdot t_p + t_{np};$$

$$\mu_4(T) = t_B; \quad \mu_5(T) = t_{np}^*; \quad \mu_6(T) = t_{np}^*;$$

$$\mu_7(T) = \frac{1 - e^{-\lambda_{np} T}}{\lambda_{np}}.$$

Для початкових умов табл. 1 складові вектора $\mu(T)$ дорівнюють: $\mu_1(T) = 989,4200$; $\mu_2(T) = 3,5200$; $\mu_3(T) = 2,2200$; $\mu_4(T) = 4,8200$; $\mu_5(T) = \mu_6(T) = 0,5200$; $\mu_7(T) = 999,3200$.

За аналогією вектор $\mu(T)$ для трансформаторів ТМГ і ТМ дорівнює відповідно:

$$\mu_{TMG}(T) = [998,5; 3,1; 7,6; 0,5; 0,5; 998,6];$$

$$\mu_{TM}(T) = [972; 3,1; 7,4; 0,5; 0,5; 999,9].$$

$B(T)$ є середнім часом перебування силового трансформатора у справному стані. Цей час являє собою математичне сподівання мінімуму двох випадкових величин, а саме $B(T) = M\{\min(\tau, \tau_n)\}$. Якщо вважати, що помилкові тривоги розподілені за експоненціальним законом, тобто $\Delta(T) = 1 - e^{-\lambda T}$, де λ – інтенсивність надходження помилкових сигналів про відмову, то

$$B(T) = M\{\min(\tau, \tau_n)\} = \int_0^T [1 - F(t)] \cdot [1 - \lambda(t)] dt = \int_0^T [1 - F(t)] \cdot e^{-\lambda t} dt = 985,5 \text{ год.}$$

За аналогією можуть бути визначені середні тривалості перебування інших силових трансформаторів у справному стані.

Для розрахунку техніко-економічної ефективності силових трансформаторів будемо вважати, що середні витрати на перебу-

вання виробу у стані h_i та вихід зі стану дорівнюють [4]

$$C_i(T) = C_{ii}(T) \cdot \mu_i(T) + \sum_{j=i}^T P_{ij}(T) \cdot C_{ij}(T), \quad (3)$$

де $C_{ij}(T)$ – витрати на перебування виробу в станах процесу технічної експлуатації, грн/год.

В подальших розрахунках вважається, що $C_{ii}(T)$ представляє собою закупівельну вартість виробу у цінах на 2017 року; $C_{ij}(T)$ – витрати на вихід виробу зі станів технічної експлуатації, грн; $P_{ij}(T)$ – матриця перехідних ймовірностей напівмарковського процесу зі стану i до стану j , де $i = \overline{1, 7}$; $j = \overline{1, 7}$.

Для моделі, що опублікована у роботі [2], матриця перехідних ймовірностей має вигляд:

$$P_{ij}(T) = \begin{pmatrix} 0 & P_{12} & P_{13} & 0 & P_{15} & P_{16} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{n2} & 0 & 0 & 1 - d_{n2} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{n2}^* & 0 & 0 & 1 - d_{n2}^* \\ d_{e2}^* & 0 & 0 & 1 - d_{e2}^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\lambda_{np} T} & 0 & 1 - e^{-\lambda_{np} T} & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Елементи матриці дорівнюють

$$P_{12}(T) = [1 - F(T)] \cdot e^{-\lambda T};$$

$$P_{13}(T) = (1 - \rho) \int_0^T e^{-\lambda t} dF(t);$$

$$P_{15}(T) = \rho \int_0^T e^{-\lambda t} dF(t)$$

$$P_{16}(T) = \lambda \int_0^T e^{-\lambda t} [1 - F(t)] dt.$$

Можна показати, що сума елементів по кожному рядку матриці (4) дорівнює одиниці.

Для вихідних умов таблиці 1 матриця $P_{ij}(T)$ має вигляд для трансформаторів ТМН, ТМГ і ТМ відповідно:

$$P_{ij}(1000)_{TMH} = \begin{pmatrix} 0 & 0,9193 & 0,0234 & 0 & 0,0545 & 0,0028 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0,1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,8 & 0 & 0 & 0,2 \\ 0,9 & 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,9936 & 0 & 0,0014 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$P_{ij}(1000)_{TMГ} = \begin{pmatrix} 0 & 0,9961 & 0,0007 & 0 & 0,0003 & 0,0028 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,85 & 0 & 0 & 0,15 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,8 & 0 & 0 & 0,2 \\ 0,9 & 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,9971 & 0 & 0,0028 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$P_{ij}(1000)_{TM} = \begin{pmatrix} 0 & 0,9445 & 9,4147 \cdot 10^{-2} & 0 & 4,035 \cdot 10^{-8} & 0,0555 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0,1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,8 & 0 & 0 & 0,2 \\ 0,9 & 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,9997 & 0 & 0,0002 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Вектори стаціонарних ймовірностей вкладеного ланцюга Маркова дорівнюють для трансформаторів ТМН, ТМГ і ТМ відповідно:

$$P_{i_{TMН}} = (0,4745; 0,4362; 0,0181; 0,0371; 0,0259; 0,0013; 0,0047);$$

$$P_{i_{TMГ}} = (0,4996; 0,4976; 0,0005; 0,0006; 0,0001; 0,0014; 0,0001);$$

$$P_{i_{TM}} = (0,4986; 0,4709; 5,663 \cdot 10^{-8}; 0,0028; 2,01 \cdot 10^{-8}; 0,028; 9,69 \cdot 10^{-9});$$

Вартість трансформатора ТМН складає 320000 грн. За рік експлуатації трансформатора ТМН

$$C_{ii} = \frac{320000}{8760} = 36,5297 \frac{\text{грн}}{\text{год}}.$$

Можна показати, що матриця витрат для трансформатора типу ТМН стосовно моделі його експлуатації має вигляд:

$$C_{TMН} = \begin{pmatrix} 36,5297 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 31523 & 36,5297 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 36,5297 & 31523 & 0 & 0 & 31523 \\ 23000 & 0 & 0 & 36,5297 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4600 & 36,5297 & 0 & 4600 \\ 4600 & 0 & 0 & 4600 & 0 & 36,5297 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 36,5297 \end{pmatrix}$$

Для трансформаторів типу ТМГ і ТМ матриці витрат дорівнюють відповідно:

$$C_{TMГ} = \begin{pmatrix} 7,9912 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 31523 & 7,9912 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7,9912 & 31523 & 0 & 0 & 31523 \\ 20000 & 0 & 0 & 7,9912 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4000 & 7,9912 & 0 & 4000 \\ 4000 & 0 & 0 & 4000 & 0 & 7,9912 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7,9912 \end{pmatrix};$$

$$C_{TM} = \begin{pmatrix} 8,105 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 31523 & 8,105 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8,105 & 31523 & 0 & 0 & 31523 \\ 21000 & 0 & 0 & 8,105 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4200 & 8,105 & 0 & 4200 \\ 4000 & 0 & 0 & 4200 & 0 & 8,105 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8,105 \end{pmatrix}.$$

В наведених матрицях розмірність елементів, що знаходяться на головній діагоналі – грн/год, а решта елементів мають розмірність у гривнях.

Здійсимо розрахунок витрат на перебування та вихід зі станів за формулою (3).

$$\begin{cases} C_1 = C_{11}\mu_1 + P_{12}C_{12} + P_{13}C_{13} + P_{15}C_{15} + P_{16}C_{16} \\ C_2 = C_{22}\mu_2 + P_{21}C_{21} \\ C_3 = C_{33}\mu_3 + P_{34}C_{34} + P_{37}C_{37} \\ C_4 = C_{44}\mu_4 + P_{41}C_{41} \\ C_5 = C_{55}\mu_5 + P_{54}C_{54} + P_{57}C_{57} \\ C_6 = C_{66}\mu_6 + P_{61}C_{61} + P_{64}C_{64} \\ C_7 = C_{77}\mu_7 + P_{73}C_{73} + P_{75}C_{75} \end{cases} \quad (5)$$

Вектор витрат для станів моделі силових трансформаторів буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} C_{TMH} &= (36144; 31651; 31602; 23175; 4618; 4618; 36504); \\ C_{TMГ} &= (7980; 31547; 31537; 20048; 4004; 4004; 7980); \\ C_{TM} &= (7878; 31547; 31536; 21032; 4204; 4204; 8104). \end{aligned}$$

Далі здійсимо розрахунок витрат на одиницю календарного часу за формулою

$$C_{ПИТ} = \frac{\sum_{i=1}^7 C_i(T) \cdot \pi_i(T)}{\mu_{сер}}, \quad (6)$$

де,

$$\begin{aligned} \mu_{сер}(t) &= \pi_1(T)\mu_1(T) + \pi_2(T)\mu_2(T) + \pi_3(T)\mu_3(T) + \pi_4(T)\mu_4(T) \\ &+ \pi_5(T)\mu_5(T) + \pi_6(T)\mu_6(T) + \pi_7(T)\mu_7(T) \end{aligned}$$

Можна показати, що

$$\begin{aligned} C_{ПИТ} &\approx 18 \text{ грн / год}; \quad \mu_{сер, TMГ}(t) = 500,4 \text{ год}; \\ \mu_{сер, TM}(t) &= 486,1 \text{ год}. \end{aligned}$$

Якщо підставити у формулу (6) відповідні C_i з рівняння (4) і π_i з рівняння (2), то можна визначити питомі витрати на одиницю календарного часу для силових трансформаторів ТМН, ТМГ і ТМ:

$$C_{ПИТ, TMH} = 68,5 \text{ грн / год};$$

$$C_{ПИТ, TMГ} = 39,4 \text{ грн / год};$$

$$C_{ПИТ, TM} = 39,1 \text{ грн / год}.$$

Далі здійсимо розрахунки питомих витрат на одиницю часу перебування силових трансформаторів у справному стані згідно з формулою

$$C_{1ПИТ} = \frac{\sum_{i=1}^7 C_i \cdot \pi_i}{\pi_1(T) \cdot \mu_1(T)} \quad (7)$$

Можна показати, що питомі витрати за одиницю часу перебування силових трансформаторів у працездатному стані дорівнюють:

$$C_{1ПИТ, TMH} = 70,1 \text{ грн / год};$$

$$C_{1ПИТ, TMГ} = 39,5 \text{ грн / год};$$

$$C_{1ПИТ, TM} = 39,1 \text{ грн / год}.$$

Для наочності розраховані вище характеристики розміщені у табл. 2.

Таблиця 2

Характеристики витрат і середні тривалості перебування напівмарковського процесу у станах моделі.

№ п/п	Характеристики		Тип силового трансформа- тора		
			ТМН	ТМГ	ТМ
1	Витрати на перебування та вихід зі станів C , грн.	C_1	36149	7980	7878
2		C_2	31651	31547	31547
3		C_3	31602	31537	31536
4		C_4	23175	20048	21032
5		C_5	4618	4004	4204
6		C_6	4618	4004	4204
7		C_7	36504	7980	8104
8	Середні тривалості перебування в станах напівмарковського процесу $\mu_{ср\text{ед}}$, год.	$\mu_{ср\text{ед}_1}$	989,4	998,5	972
9		$\mu_{ср\text{ед}_2}$	3,5	3	3
10		$\mu_{ср\text{ед}_3}$	9,2	1,7	1,7
11		$\mu_{ср\text{ед}_4}$	4,8	6	4
12		$\mu_{ср\text{ед}_5}$	0,5	0,5	0,5
13		$\mu_{ср\text{ед}_6}$	0,5	0,5	0,5
14		$\mu_{ср\text{ед}_7}$	999,3	998,6	999,9
15	Питомі витрати на одиницю календарного часу, $C_{\text{пит}}$, грн		68,5	39,4	39,1
16	Питомі витрати на одиницю часу перебування тран- сформатора у справному стані, $C_{\text{пит}}$, грн/год		70,1	39,5	39,1

За формулами (1) і (7) виконано розрахунки коефіцієнту технічного використання і питомих витрат на підтримання силових трансформаторів у справному стані для вихідних даних табл. 1 і змінних значеннях періодичності проведення профілактичних робіт. Результати розрахунків наведені на рис. 1-5, де по осі ординат зліва відкладені значення $K_{\text{те}}$, а праворуч питомі витрати на одиницю часу перебування силових трансформаторів у справному стані. По осі абсцис на рис. 1 відкладені значення періодичності проведення T профілактичних заходів, на рис. 2 – ймовірність правильного визначення профілактичних робіт $d_{\text{не}}$, на рис. 3 – тривалість відновлення трансформатора $t_{\text{в}}$, на рис. 4 – ймовірність надходження інформації про відмову ρ , на рис. 5 – тривалість проведення профілактичних робіт $t_{\text{пр}}$.

Усі розрахунки виконані при постійних значеннях параметрів, що вказані в табл. 1, крім тих, що змінюються по осі абсцис.

З рис. 1 видно, що для всіх типів силових трансформаторів існує оптимальний період проведення профілактичних робіт, при якому забезпечується максимальне значення $K_{\text{те}}$. При цьому спостерігається закономірність: що чим більше напрацювання на відмову, тим більшим є $K_{\text{те}}$ і рідше потрібно проводити роботи з технічного обслуговування. Так, наприклад, для трансформатора ТМН $T_{\text{опт}} \approx 600 \text{ год}$, для ТМГ $T_{\text{опт}} \approx 890 \text{ год}$, для ТМ $T_{\text{опт}} \approx 2190 \text{ год}$. Крім того, існує оптимальний період $T_{\text{опт}}$ при якому будуть мінімальні витрати на одну годину роботи трансформатора у справному стані.

Так для трансформатора ТМН $C_{\text{пит}} \approx 62 \text{ грн/год}$, для ТМГ $C_{\text{пит}} \approx 20 \text{ грн/год}$, для ТМ $C_{\text{пит}} \approx 18 \text{ грн/год}$.

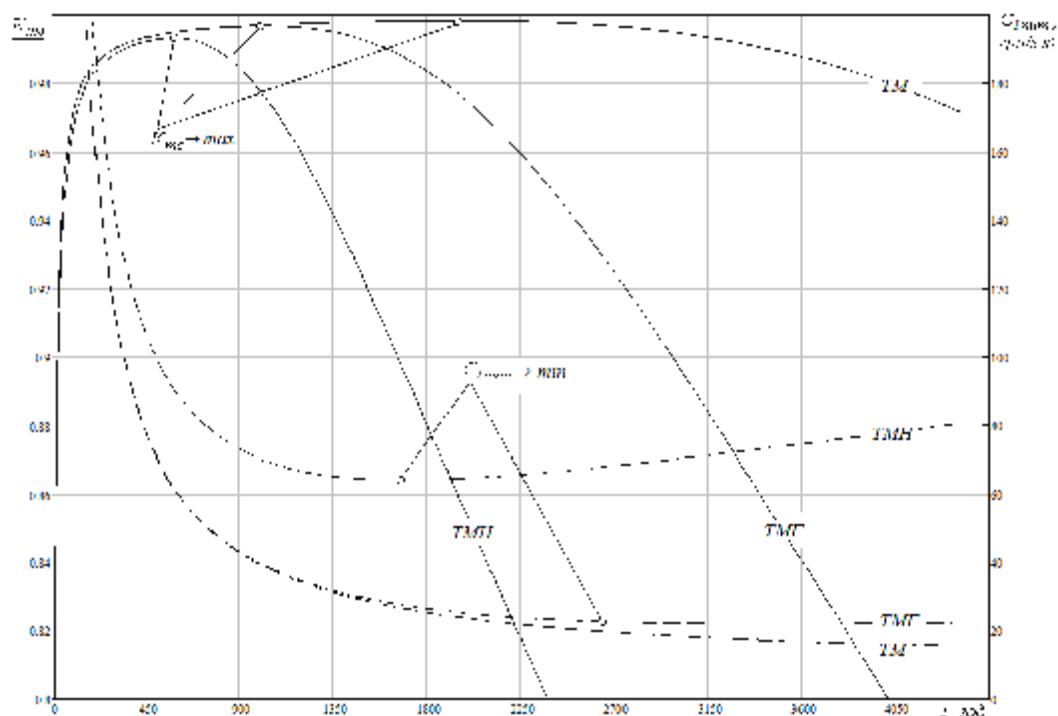


Рис. 1. Залежність коефіцієнта технічного використання K_{mv} та питомих витрат C_{1nut} на експлуатацію від періодичності проведення профілактичних робіт T

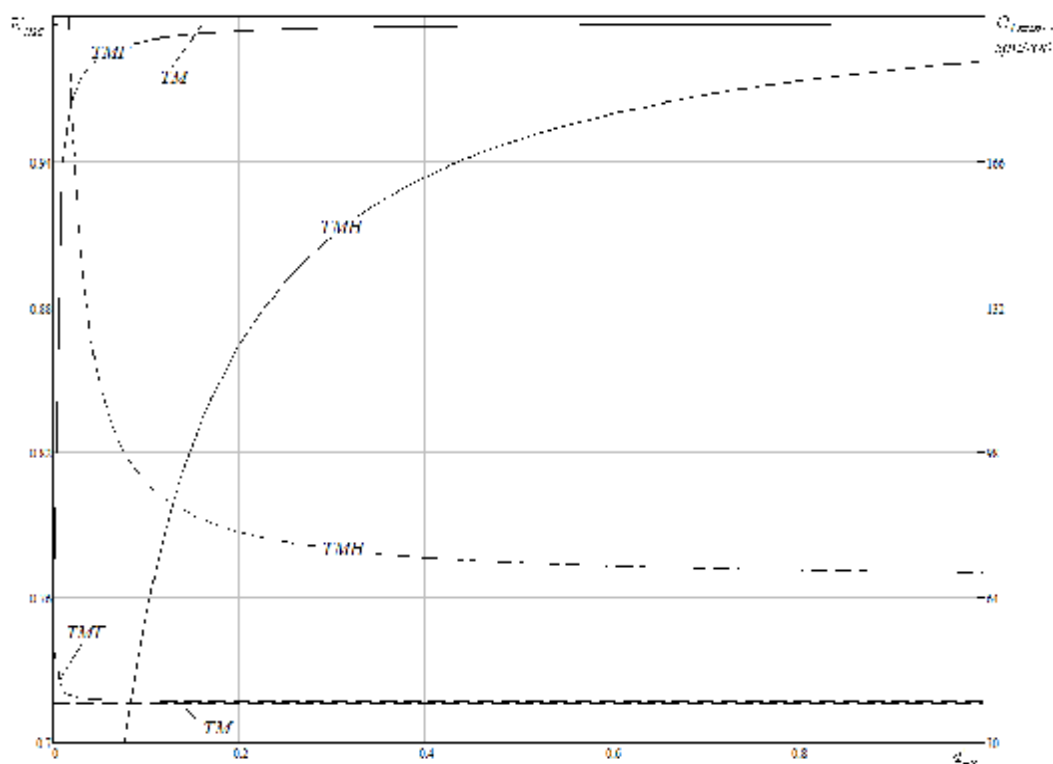


Рис. 2. Залежність K_{mv} та C_{1nut} від ймовірності правильного визначення несправного стану трансформаторів під час проведення профілактичних робіт d_{ne}

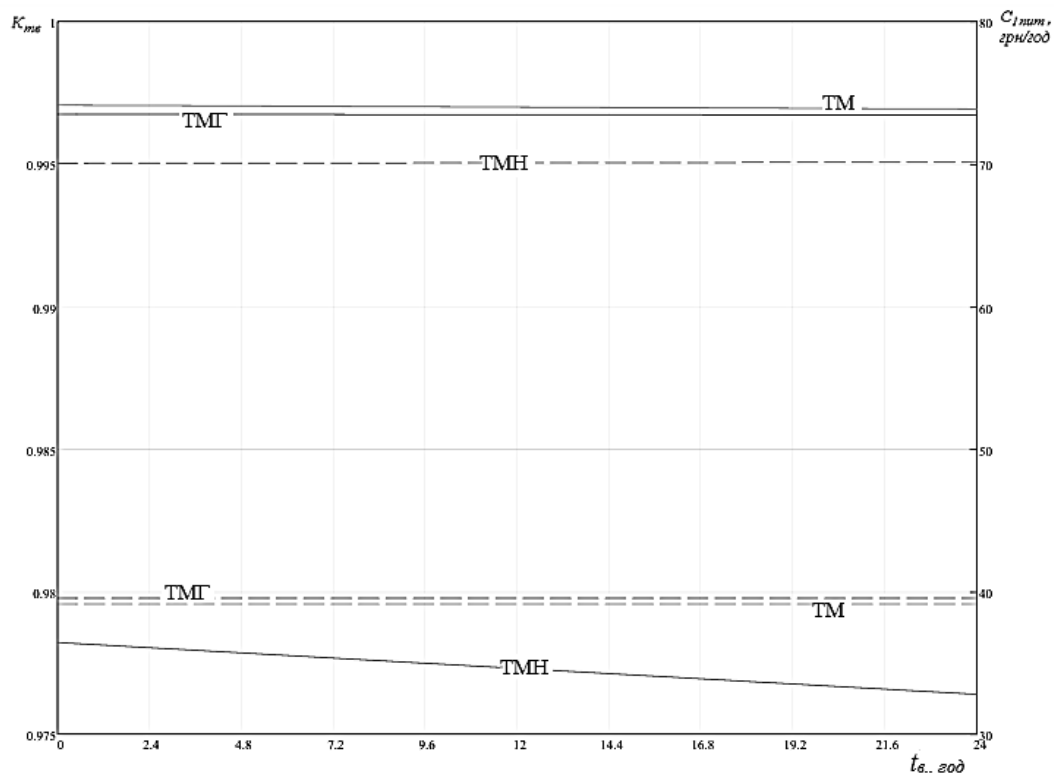


Рис. 3. Залежність K_{mt} та C_{lum} від тривалості відновлення силових трансформаторів t_e

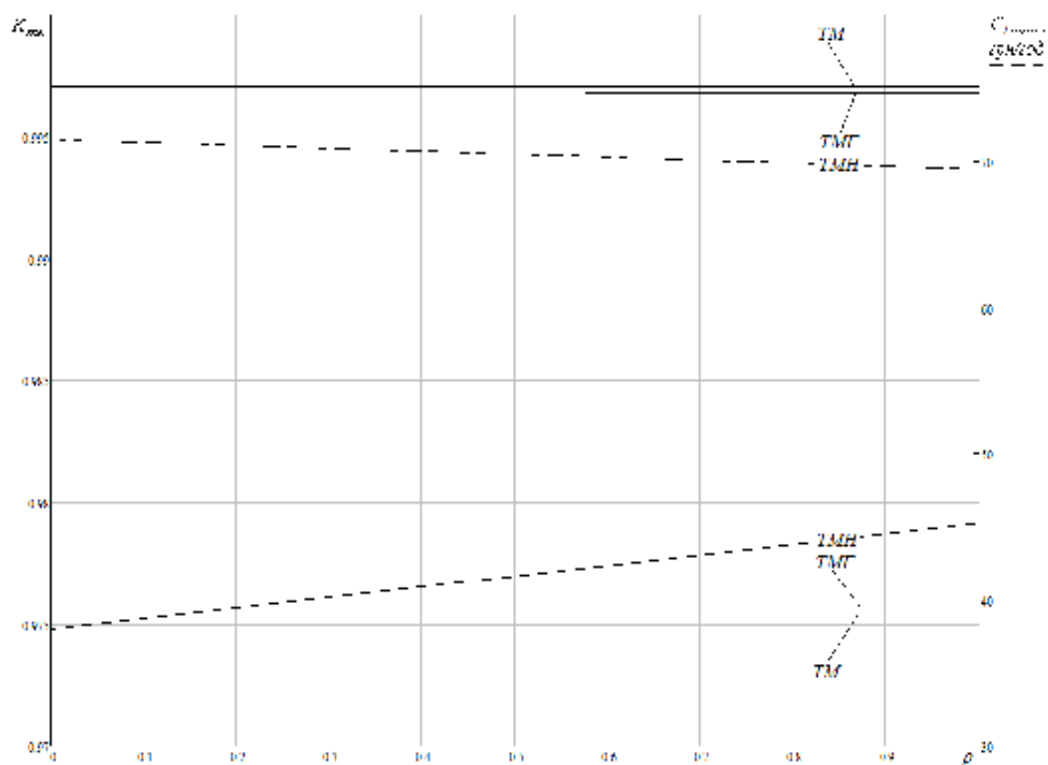


Рис. 4. Залежність K_{mt} та C_{lum} від ймовірності надходження інформації про відмову ρ

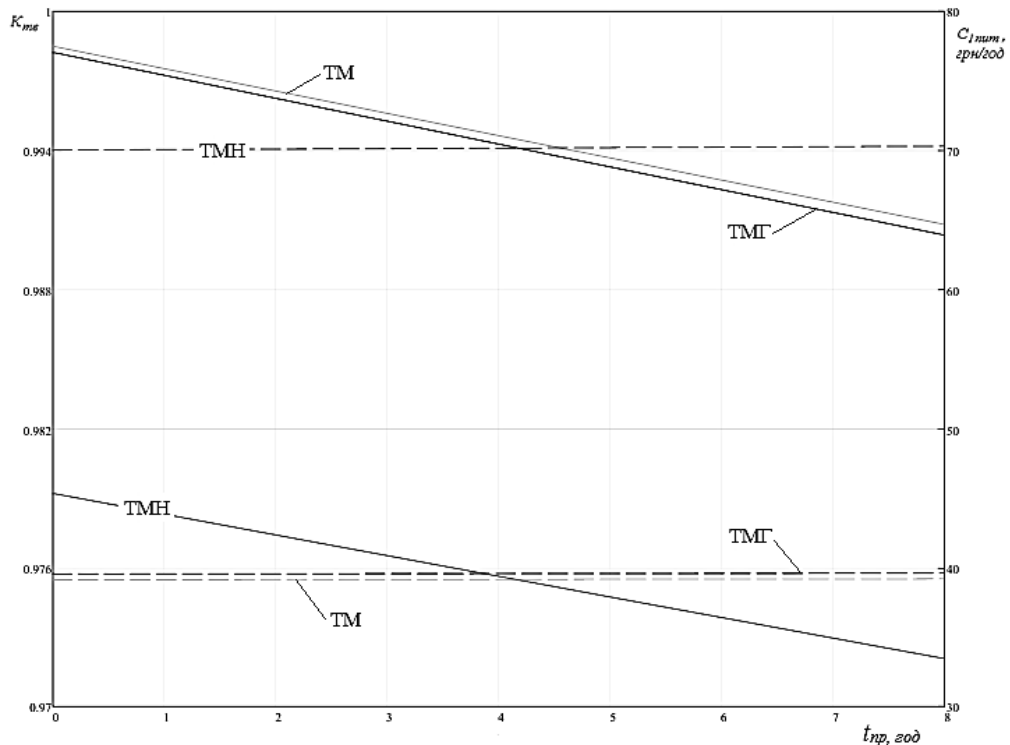


Рис. 5. Залежність K_{mt} та C_{1pit} від тривалості проведення профілактичних робіт t_{np} .

З рис. 2 видно, що зі збільшенням ймовірності d_{nc} правильного визначення несправного стану трансформатора під час проведення профілактичних робіт збільшується K_{mt} і тим більше, що менше рівень його надійності. Так, наприклад, для трансформатора ТМН така залежність є досить суттєвою. Для трансформатора ТМ і ТМГ збільшення ймовірності d_{nc} несуттєво впливає на його технічну готовність. Для трансформатора ТМН, який має найменший час напрацювання на відмову, існує оптимальне значення ймовірності d_{nc} , при якій будуть мінімальні витрати на одну годину роботи у справному стані. Такі витрати складають приблизно 60 грн/год. Для інших трансформаторів такого оптимума не існує.

З рис. 3 видно, що збільшення часу t_e на відновлення несправного трансформатора призводить до зменшення K_{mt} . Найбільш яскраво така залежність спостерігається для трансформатора ТМН, який має найменше напрацювання на відмову. Для більш надійних трансформаторів ТМ і ТМГ така залежність для умов таблиці 1 є несуттєвою.

Питомі витрати C_{1pit} на годину роботи у справному стані слабо залежать від збільшення t_e від 0 до 24 год. З рис. 4 видно, що збільшення ймовірності ρ надходження інформації про відмову призводить до збільшення K_{mt} і тим більше, що менше напрацювання трансформатора на відмову. Питомі витрати C_{1pit} від ρ залежать не суттєво.

З рис. 5 видно, що збільшення часу t_{np} на проведення профілактичних робіт призводить до зменшення K_{mt} і тим сильніше, що менше напрацювання трансформатора на відмову. Для трансформаторів ТМГ і ТМ така залежність є несуттєвою. Питомі витрати C_{1pit} від збільшення часу t_{np} від 0 до 8 год змінюються несуттєво.

Висновок. Отримані у роботі результати будуть використані під час експлуатації силових трансформаторів для обґрунтування параметрів, за яких досягаються найвищі показники технічної готовності з урахуванням вартості їх роботи у справному стані. Наведена у статті методика може бути застосована і для інших типів силових трансформаторів.

Список літератури

1. Державний стандарт України. ДСТУ 3433-96.
2. Мірненко В. І., Пустовий С. О., Яблонський П. М. Розрахунок показників надійності послідовно з'єднаних і резервованих елементів без відновлення для дифузійно-немонотонного розподілу їх відмов. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2015. № 1 (22). С. 83–89.
3. Герцбах И. Б. Модели профилактики. Москва: Сов. радио, 1969. 216 с.
4. Волков Л. И. Управление эксплуатацией летательных аппаратов. Москва: Высшая школа, 1981. 368 с.
5. Петренко А. М. Дифузійно-немонотонний розподіл часу безвідмовної роботи як найбільш адекватний закон для електричних установок. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. 2013. № 2. С. 77–83.
6. Мірненко В. І., Пустовий С. О., Яблонський П. М., Авраменко О. В. Порівняння ефективності технічного обслуговування виробів авіаційної техніки, що експлуатуються за технічним станом, для моделей дифузійно-монотонного і дифузійно-немонотонного розподілів відмов. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2015. № 2 (23). С. 88–93.
7. Мірненко В. І., Пустовий С. О., Яблонський П. М., Целищев Ю. П. Розрахунок надійності послідовно з'єднаних і резервованих елементів без відновлення для дифузійно-монотонного розподілу їх відмов. *Japanese Educational and Scientific Review*. 2015. № 1 (9). С. 745–754.
8. Мірненко В. І., Пустовий С. О., Яблонський П. М., Диптан В. П.. Вплив параметрів експлуатації на ефективність зберігання механічних виробів для дифузійно-монотонного закону розподілу їх відмов. *Harvard Journal of Fundamental and Applied Studies*. 2015. № 1 (7). С. 531–538.

References

1. Derzhavnyy standart Ukrayiny. DSTU 3433-96 [in Ukrainian].
2. Mirnenko, V. I., Pustovyi, S. O., Jablonskyi, P. M. (2015) The reliability measures computation of the series connected and reserved elements without recovery for diffusion-nonmonotonic distribution of their failures. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, No. 1 (22), pp. 83–89 [in Ukrainian].
3. Hertsbakh, I. B. (1969) Modeli profilaktiki. Moscow: Sov. radio, 216 p. [in Russian].
4. Volkov, L. I. (1981) Upravleniye ekspluatatsiyey letatel'nykh apparatov. Moscow: Vysshaya shkola, 368 p. [in Russian].
5. Petrenko, A. M. (2013) Dyfuziyno-nemonotonnyy rozpodil chasu bezvidmovnoyi roboty yak naybil'sh adekvatnyy zakon dlya elektrychnykh ustanovok. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Seria: Tehnichni nauky*, No. 2, pp. 77–83 [in Ukrainian].
6. Mirnenko, V. I., Pustovyi, S. O., Jablonskyi, P. M., Avramenko, O. V. (2015) Comparison of aerotechnics devise maintenance efficiency which are exploited with the technical condition for diffusion-monotonic and diffusion-nonmonotonic failure distribution models, *Suchasni informatsiyni tehnologiyi u sferi bezpeky ta oborony*, No. 2 (23), pp. 88–93 [in Ukrainian].
7. Mirnenko, V. I., Pustovyi, S. O., Jablonskyi, P. M., Tselyshcheyev, Yu. P. (2015) Rozrakhunok nadiynosti poslidovno z'yednanykh i rezervovanykh elementiv bez vidnovlennya dlya dyfuziyno-monotonnoho rozpodilu yikh vidmov. *Japanese Educational and Scientific Review*, No. 1 (9), pp. 745–754 [in Ukrainian].
8. Mirnenko, V. I., Pustovyi, S. O., Jablonskyi, P. M., Dyptan, V. P. (2015) Vplyv parametriv ekspluatatsiyi na efektyvnist' zberihannya mekhanichnykh vyrobiv dlya dyfuziyno-monotonnoho zakonu rozpodilu yikh vidmov, *Harvard Journal of Fundamental and Applied Studies*, No. 1 (7), pp. 531–538 [in Ukrainian].

V. I. Mirnenko¹, *Dr.Tech.Sc., professor,*
e-mail: mirnenkovi@gmail.com

P. M. Yablonskyi¹, *Ph.D., associate professor,*

A. M. Petrenko², *senior lecturer*

e-mail: petrenko1969@ukr.net

¹National Defense University of Ukraine named after Ivan Chernyakhovsky,
Povitroflotsky ave., 28, Kyiv, 03049, Ukraine

²Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

FEASIBILITY OPERATING EFFICIENCY OF POWER TRANSFORMERS OF TMN, TMG AND TM TYPES

In this article the methodology of evaluation of technical and economic efficiency of operation of power transformers using diffusion-nonmonotonic of the distribution of refusals based errors of the first and second kind is presented. For standard operating conditions the graphs of the coefficient of technical use and specific expenditures per hour of transformers in good condition on the basic parameters of the mathematical model are shown.

Keywords: *diffusion-nonmonotonic distribution, technical use coefficient, specific expenditures, the frequency of maintenance work.*

Статтю представляє В. І. Мірненко, д.т.н., професор.