

## Деякі питання моделювання процесу експлуатації і метрологічного обслуговування засобів вимірювальної техніки при оптимізації метрологічного контролю

ЛИТВИНЕНКО В.А.

Дніпродзержинський державний технічний університет

В роботі розглядаються питання моделювання процесів експлуатації і метрологічного обслуговування засобів вимірювальної техніки, вибору вхідних моделей метрологічних і явних відмов при оптимізації параметрів систем метрологічного контролю

В работе рассматриваются вопросы моделирования процессов эксплуатации и метрологического обслуживания средств измерительной техники, выбора входных моделей метрологических и явных отказов при оптимизации параметров систем метрологического контроля

The questions of design of processes of exploitation and metrological maintenance of facilities of measuring technique, choice of entrance metrological and obvious failure patterns during optimization of parameters of the metrological checking systems are examined in work

**Вступ.** При організації контрольно-вимірювальних операцій на виробництві, виникає проблема динамічної оцінки рівня надійності груп однотипних засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) і вибору оптимальних параметрів системи метрологічного обслуговування (СМО) ЗВТ за визначеними критеріями ефективного функціонування цієї системи. При цьому потрібно враховувати вимоги виробництва до технічної (продуктивність виробництва) і метрологічної (достовірність вимірювань) складової надійності ЗВТ.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Велика кількість досліджень в області оцінки і аналізу надійності ЗВТ присвячена розвитку методів теорії метрологічної надійності (МН) ЗВТ, які базуються на формалізації зміни (дрейфу) метрологічних характеристик (МХ) ЗВТ в часі [1–2]. Практика показує, що експлуатація ЗВТ з метрологічною відмовою, яку можливо виявити тільки при повірці, призводить до недостовірності вимірювальної інформації, а внаслідок зниження якості продукції, порушення вимог стандартів і технологій. Застосування апарату теорії МН в автоматизованих системах управління (АСУ) СМО ЗВТ ускладнюється труднощами збору і аналізу статистичної інформації про розподіл похибки вимірювань [3–4]. Існуючі методики автоматизованого розв'язку задач оцінки, аналізу і прогнозування надійності ЗВТ на основі аналітичних, або імітаційних моделей експлуатації і метрологічного обслуговування (МО) ЗВТ обмежені допущеннями про експоненціальний закон розподілу ймовірностей виникнення метрологічних і явних відмов. Відкритим в цьому випадку залишається питання вибору базової моделі експлуатації ЗВТ і обґрунтування вхідних законів розподілу відмов. Разом з тим, детально не вивчалися питання розробки алгоритмічно-програмних засобів для автоматизованого розв'язку задачі вибору оптимальних параметрів СМО і дослідження їх впливу на рівень надійності ЗВТ[5].

**Формулювання цілі статті.** Дослідження залежностей показників експлуатаційної надійності ЗВТ від параметрів СМО ЗВТ для вхідних ймовірнісно-фізичних моделей метрологічної відмови. Удосконалення методики автоматизованого аналізу рівня надійності ЗВТ і вибору оптимальних параметрів МО ЗВТ.

**Викладення основного матеріалу.** Згідно з дискретно-безперервним апаратом моделювання процесу експлуатації і МО ЗВТ [4]  $p_{1,k}$ ,  $p_{2,k}$  – ймовірності знаходження ЗВТ в стані 1 (робота ЗВТ без відмов) або 2 (наявність метрологічної відмови) після  $k$ -ї повірки для досліджуваних моделей метрологічної і явної відмови;  $p_{-m,k}(t)$ ,  $p_{m,k}(t)$  ймовірностей роботи ЗВТ в станах 1 і 2 відповідно в інтервалах часу  $\tau_{\Pi} + kT_{\Pi} \leq t < T_{\Pi} + kT_{\Pi}$ , де  $\tau_{\Pi}$  – тривалість операцій повірки ЗВТ. Для аналізу показників надійності ЗВТ в якості вхідних розподілів відмов застосовані: для явної відмови – експоненціальну модель, для метрологічної – дифузійно-монотонний (DM) і дифузійно-немонотонний (DN) розподіли (в залежності від ідеалізації випадкового процесу виникнення параметричної відмови[6]).

Стандартизація DM і DN - моделей метрологічних та експоненціального розподілу явних відмов при автоматизації процедури діагностики і моніторингу експлуатаційної надійності груп однотипних ЗВТ дозволяє: підвищити точність оцінки метрологічної складової надійності ЗВТ за рахунок апроксимації розподілу ймовірності виникнення метрологічних відмов дифузійними функціями; проводити оцінку параметрів законів розподілу відмов по конкретним статистичним даним і на основі апріорного аналізу фізичного явища процесу виникнення відмов.

Вирази для  $p_{-m,k}(t)$  і  $p_{m,k}(t)$ , при дифузійному монотонному розподілі ймовірностей виникнення метрологічних відмов і для експоненціальної моделі явних відмов запишемо як рекурсивні функції:

$$\left. \begin{aligned} p_{-m,k}(t)_{DM} &= p_{1DM,k} \cdot (1 - F_{DMm}(t)) R_{\text{я}}(t); \\ p_{m,k}(t)_{DM} &= [p_{2DM} + p_{1DM,k} \cdot F_{DMm}(t)] R_{\text{я}}(t). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де  $F_{DMm}(t)$ ,  $R_{\text{я}}(t)$  – функції ймовірностей виникнення метрологічної відмови і роботи без явних відмов ЗВТ в інтервалі часу  $\tau_{\Pi} + kT_{\Pi} \leq t < \tau_{\Pi} + (k+1)T_{\Pi}$  відповідно. Для (1) справедливо

$$\left. \begin{aligned} p_{1DM,k+1} &= p_{1DM,k} \cdot (1 - F_{DM_M}(T_{\Pi})) R_{\text{я}}(T_{\Pi}) (1 - \alpha_{\Pi}); \\ p_{2DM,k+1} &= [p_{2DM,k} + p_{1DM,k} \cdot F_{DM_M}(T_{\Pi})] R_{\text{я}}(T_{\Pi}) \beta_{\Pi}; \end{aligned} \right\} (2)$$

Для зручності розрахунків введемо наступні величини:  $x = \frac{t}{T_M}$ ,  $x_{\Pi} = \frac{T_{\Pi}}{T_M}$ ,  $x_{\tau} = \frac{\tau_{\Pi}}{T_M}$ . Позначимо через  $Z_t = \frac{x-1}{v\sqrt{x}}$ ,  $Z_{\Pi} = \frac{x_{\Pi}-1}{v\sqrt{x_{\Pi}}}$ ,  $Z_{\tau} = \frac{x_{\tau}-1}{v\sqrt{x_{\tau}}}$ . В результаті для виразів (1-2):

$$\left. \begin{aligned} F_{DM_M}(t) &= \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{Z_t}{\sqrt{2}} \right) \right]; \\ F_{DM_M}(T_{\Pi}) &= \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{Z_{\Pi}}{\sqrt{2}} \right) \right]; \\ F_{DM_M}(\tau_{\Pi}) &= \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{Z_{\tau}}{\sqrt{2}} \right) \right]; \\ R_{\text{я}}(t) &= e^{-\frac{t}{T_{\text{я}}}}; R_{\text{я}}(T_{\Pi}) = e^{-\frac{T_{\Pi}}{T_{\text{я}}}}; R_{\text{я}}(\tau_{\Pi}) = e^{-\frac{\tau_{\Pi}}{T_{\text{я}}}}. \end{aligned} \right\} (3)$$

Згідно з (3) запишемо вираз для  $t_1$  при  $DM$  - розподілі напрацювання на метрологічну відмову:

$$t_1 = \sum_{k=0}^{\infty} p_{1DM,k} \int_{\tau_{\Pi} + kT_{\Pi}}^{T_{\Pi} + kT_{\Pi}} (R_{DM_M}(t) R_{\text{я}}(t)) dt, \quad (4)$$

$R_{DM_M}(t) = (1 - F_{DM_M}(t))$  – ймовірність роботи ЗВТ без метрологічних відмов в момент часу  $t$ . Вирази для обчислення математичного очікування сумарного часу перебування ЗВТ в стані 1 і 2 за час  $T_{\text{ц}}$  (життєвий цикл експлуатації ЗВТ) та міжремонтного інтервалу  $T_{\text{МР}}$ :

$$t_1 + t_2 = T_{\text{я}} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{T_{\Pi} - \tau_{\Pi}}{T_{\text{я}}} \right) \right] \sum_{k=0}^{\infty} p_{DM,k}; \quad (5)$$

$$T_{\text{МР}} = T_{\text{я}} \left[ \left( 1 - e^{-\frac{\tau_{\Pi}}{T_{\text{я}}}} \right) + \left( 1 - e^{-\frac{T_{\Pi}}{T_{\text{я}}}} \right) \sum_{k=0}^{\infty} p_{DM,k} \right], \quad (6)$$

де  $p_{DM,k} = p_{1DM,k} + p_{2DM,k}$ .

Застосування чисельних методів інтегрування необхідно тільки при обчисленні  $t_1$  (4). Для величин (5–6) дискретно-безперервна модель дозволяє отримати аналітичні розв'язки аналогічні для випадку вхідних експоненціальній моделі метрологічних і явних відмов[4]. Вирази (1–2) для випадку  $DN$  - розподілу метрологічних відмов одержуються аналогічно, враховуючи наступний зв'язок між дифузійними моделями[6]:

$$R_{DN}(t) = R_{DM}(t) - \exp \left\{ \frac{2}{v^2} \right\} \cdot \Phi \left( -\frac{1+x}{v\sqrt{x}} \right). \quad (7)$$

Рис. 1 а, б ілюструє залежності математичного очікування роботи ЗВТ без відмов ( $t_1/T_{\text{я}}$ ) і роботи тільки з метрологічною відмовою ( $t_2/T_{\text{я}}$ ) від періоду  $T_{\Pi}$  (масштаб логарифмічний) для ряду значень  $T_M$ : 1–1000 год., 2–10000 год., 4–46416 год., при коефіцієнті варіації  $v_M = 1$ . При  $T_{\Pi} \rightarrow 0$  час безвідмовної роботи прямує до нуля ( $t_1 \rightarrow 0$ ), оскільки ЗВТ перебуває все менше часу в експлуатації. Як бачимо  $DN$  - модель, яка враховує немонотонний характер реалізації випадкового процесу виникнення відмов знижує ймовірність роботи ЗВТ без відмов в порівнянні з дифузійно-монотонним розподілом. Слід відмітити, що при невеликих значеннях  $T_M$  функції  $t_1 = f(T_{\Pi})$   $DN$  - моделі досягають локального оптимуму і прямують до випадку експоненціальної моделі, в той час  $DM$  - модель завищує надійність ЗВТ.

Математичне очікування сумарного часу роботи ЗВТ з метрологічною відмовою, але без явної  $t_2$  для експоненціальної і дифузійних моделей монотонно зростає зі збільшенням  $T_{\Pi}$  і в залежності від значення  $T_M$  також прямує до деякої константи.

Із рис. 3.б видно, що із збільшенням  $T_M$  збільшується час роботи без метрологічних відмов, функція  $t_2 = f(T_{\Pi})$  в випадку дифузійних моделей наближаються до випадку експоненціального розподілу.

Вхідними даними для визначення закону розподілу ймовірності виникнення даного виду відмов можуть бути результати підконтрольної експлуатації груп однотипних ЗВТ, які перебувають в однакових умовах експлуатації. В даному випадку інформація про зміну МХ ЗВТ в часі враховує як вплив зовнішнього середовища так і специфіку експлуатації ЗВТ на конкретному підприємстві. Дифузійні моделі дозволяють визначати параметри законів розподілу відмов на основі статистики відмов; проводити апріорну оцінку на основі аналізу фізики процесу виникнення відмови, а також реалізацію процедури динамічного корегування характеристик експлуатаційної надійності ЗВТ ( $T_M, v_M, T_{\text{я}}$ ).

На рис. 2 приведені результати аналізу даних відмов підконтрольної експлуатації приладів обліку електроенергії: а) 1 – емпірична функція розподілу відмов; 2 – функція  $DM$  - розподілу; 3 – функція  $DN$  - розподілу (оцінка параметрів функцій 2–3 виконувалась за допомогою методу принципу максимальної правдоподібності (ПМП)); б) 1 – емпірична функція розподілу відмов; 2 – апроксимуюча крива  $DM$  – розподілу (оцінка параметрів функції виконувалась методом найменших квадратів(МНК)); 3 – функція  $DM$  – розподілу (оцінка параметрів розподілу 3 виконувалась за допомогою методу ПМП; інтервальна оцінка параметрів моделі приведена в табл. 1).

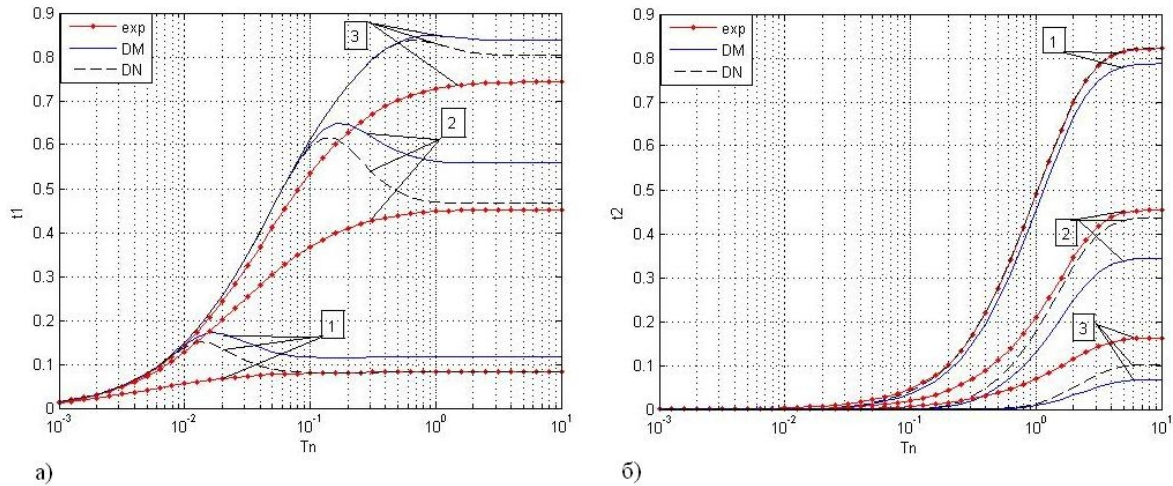


Рис. 1. Дослідження залежностей показників надійності ЗВТ від параметрів МО ЗВТ при експоненціальній і дифузійних моделях(DM, DN) метрологічних відмов

Якщо відомі межі довірчого інтервалу для параметрів моделі відмов можна підібрати такі параметри *DM* - розподілу, які б належали заданому довірчому інтервалу і не суперечили гіпотезі при підборі теоретичної функції для даних отриманих на основі накопиченої інтенсивності відмов. В нашому прикладі параметри  $\mu = 13,4318$  і  $\nu = 0,3895$  (рис.2. б) знаходяться в межах довірчого інтервалу і підбрана теоретична модель не суперечить експериментальним даним за критерієм згоди Колмогорова при рівні значимості  $\alpha = 0,05$ .

Максимальне розходження емпіричного і теоретичного розподілу не перевищує значення 0,1884.

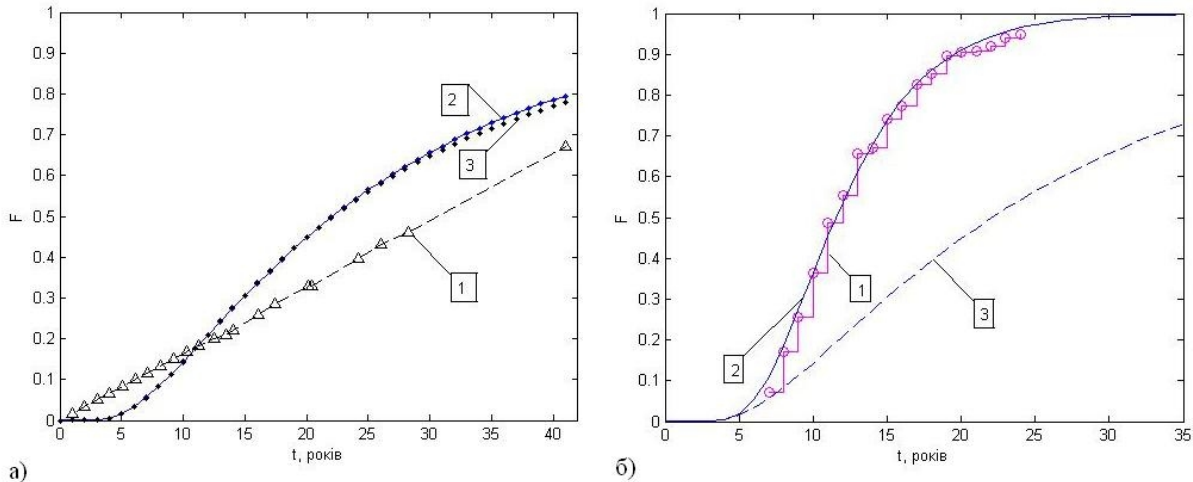


Рис. 2. Апроксимація експериментальних даних за допомогою *DM*- розподілу

З метою прикладного застосування, на основі проведених досліджень, розроблені інформаційно-мережна технологія програмних засобів і рекомендації щодо автоматизованого розв'язку задач оцінки і аналізу експлуатаційної надійності ЗВТ з наступним вибором оптимальних значень параметрів СМО ЗВТ.

Розроблений модуль орієнтований на розв'язок трьох основних задач: 1 – оцінка фактич-

ного стану (на даний момент часу) рівня надійності груп однотипних ЗВТ. Розрахунок значень показників надійності ЗВТ проводять для призначеного на підприємстві МПІ при фіксованих інших параметрах МО ЗВТ (рис. 3); 2 – будуються залежності показників надійності і цільової функції від періоду проведення повірочних робіт; 3 – враховуючи значення цільової функції і обмеження виробництва на показники надійності ЗВТ призначати

Таблиця 1. Довірчні межі для параметрів *DM* - функції розподілу (для плану випробувань [NUr])

<i>q</i>	<i>DM</i>	
0,95	$\mu \in [16,9182; 28,8467]$	$\nu \in [0,5308; 1,0967]$
0,99	$\mu \in [15,1667; 32,1801]$	$\nu \in [0,4580; 1,2710]$
0,999	$\mu \in [13,4317; 36,3344]$	$\nu \in [0,3894; 1,4951]$
0,9999	$\mu \in [12,1713; 40,0971]$	$\nu \in [0,3418; 1,7033]$

оптимальні(у визначеному змісті) МПІ, як індивідуальні, так і для груп однотипних приладів. Слід додати, що дану процедуру можна використовувати для дослідження впливу параметрів якості обслуговування і ремонту на показники надійності, а також допов-

нити функціями 3-D візуалізації, для побудови поверхні цільової функції двох аргументів( $T_{п}$ ,  $T_{м}$ ) і процедурою вибору оптимальної комбінації параметрів СМО ЗВТ.

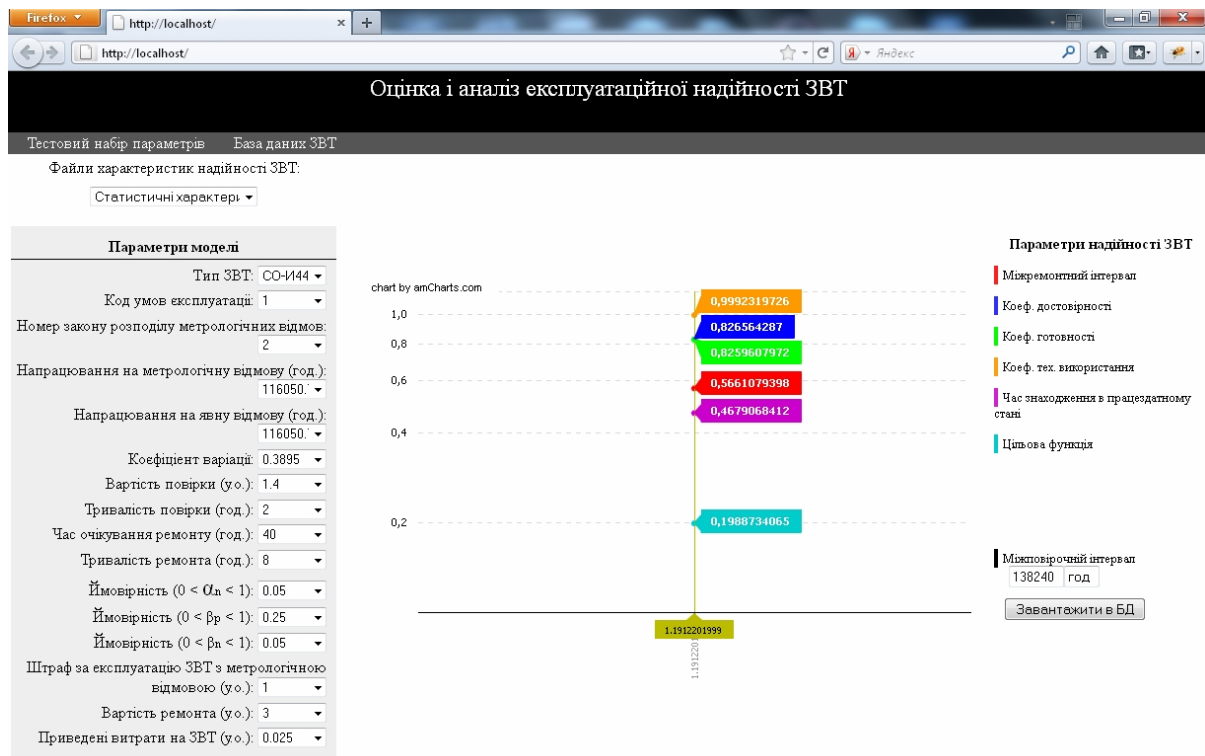


Рис. 3. Оцінка фактичного стану рівня надійності ЗВТ

Локальний оптимум цільової функції не завжди може служити критерієм для вибору МПІ, при наявності обмежень на коефіцієнти експлуатаційної надійності ЗВТ. В зв'язку з цим, для дослідження залежності рівня надійності груп однотипних ЗВТ від параметрів СМО ЗВТ запропоновано метод сканування графіків функцій показників надійності ЗВТ, який полягає в наступному: будуються графіки залежностей від періоду  $T_{п}$  наступних величин:  $t_1/T_{я}$ ,  $K_{Г}$ ,  $K_{Д}$ ,  $K_{ТВ}$ ,  $T_{МР}$ ,  $T_{МР}/T_{я}$  і  $Ц_{ЗВТ}$ . Після розрахунків залежностей і виводу графіків на екран, користувач в діалоговому режимі АРМ встановлює горизонтальний покажчик (динамічне середовище сканування графіків) в точку мінімуму цільової функції. Горизонтальний покажчик перетинає графіки залежностей і виводить на екран значення показників надійності в точках перетину (рис. 4). Переміщуючи покажчик, користувач з заданою частотою дискретизації діапазону зміни  $T_{п}$  коригує МПІ в області оптимальних значень, при наявності обмежень на показники надійності, або при фіксованому МПІ вирішує задачу оцінки фактичного рівня надійності ЗВТ. Поле «Номер закону розподілу метрологічних відмов» включає функцію «select», за допомогою якої

користувач обирає потрібний вид закону розподілу для однотипних ЗВТ: 1 – експоненціальний розподіл; 2 – дифузійно-монотонний; 3 – дифузійно-немонотонний.

Розроблена процедура дозволяє ефективно проводити кількісний аналіз рівня експлуатаційної надійності парку ЗВТ сучасних промислових підприємств і визначити оптимальну періодичність(за критеріями експлуатаційної надійності і визначеного показника економічної ефективності МО ЗВТ) проведення повірочних і ремонтних робіт, а також попередній аналіз можливих комбінацій параметрів СМО ЗВТ в інтерактивному режимі АРМ метролога.

На основі вхідних даних розглянутої процедури (рис. 3) розв'язана задача вибору оптимальних значень параметрів СМО ЗВТ методом Монте-Карло. Вектор параметрів МО ЗВТ, які підлягають процедурі оптимізації

$\pi = \left| \alpha_n, \beta_n, \beta_r, T_{п}, \tau_{п}, \tau_{р} \right|$ , де  $\tau_{п}$  і  $\tau_{р}$  - час знаходження ЗВТ на повірці і в ремонті відповідно; фіксовані параметри моделі  $v = \left| T_{м}, v_{м}, T_{я}, \tau_{оч} \right|$ , де  $\tau_{оч}$  - математичне очікування часу в черзі на ремонт. При цьому, пошук мінімуму цільової функції виконується при накладених обмеженнях на комплексні показники надійності(наприклад, на коефіцієнт готовності  $K_{Г}$ ).

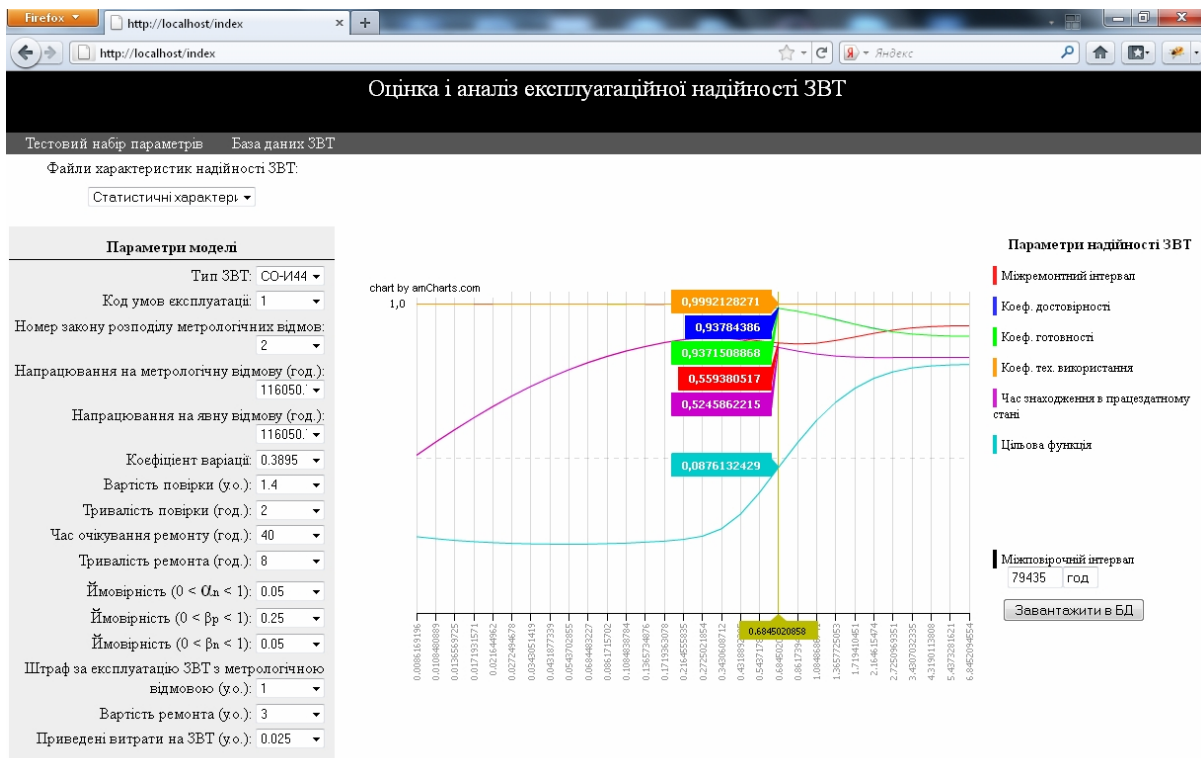


Рис. 4. Аналіз залежностей показників надійності і вибір оптимального МПП

Пошук оптимальної комбінації параметрів СМО ЗВТ виконувався за допомогою алгоритму випадкового ненаправленого пошуку[3]. В якості генератора випадкових чисел використаний математичний датчик псевдовипадкових чисел «Mersenne Twister», який відноситься до класу лінійних конгруентних генераторів (період гамми  $(2^{19937}-1)/2$ )[7].

Наприклад, при об'ємі статистичних випробувань  $N=10^5$ , діапазон варіювання параметрів СМО ЗВТ:  $\alpha_n = \beta_n = 0,05 \div 0,2$ ,  $\beta_p = 0,25 \div 0,35$ ,  $\tau_n = 1 \div 6$ ,  $\tau_p = 3 \div 8$ ;  $T_n = 8 \times 10^4 \div 1,6 \times 10^5$ , вектор комбінації оптимальних параметрів СМО ЗВТ  $\pi = |0,0583, 0,0508, 0,2535, 8,0203e^{+04}, 2,5244, 6,4182|^T$  при цьому значення цільової функції  $CF^{(k)} = 0,0602$  при рівні технічної надійності  $K_T = 0,9645$ ,  $K_{ТВ} = 0,9651$  (коефіцієнт технічного використання ЗВТ за час життєвого циклу  $T_u$ ) і метрологічної  $K_D = 0,9651$ , що підтверджує ефективність розроблених процедур і достовірність отриманих результатів.

Для оцінки точності обчислення показників надійності проведено порівняння і оцінка похибок методів чисельної квадратури. Було досліджено рекурсивні адаптивні алгоритми Сімсона і Гаусса-Лобатто, розроблені спеціалістами комп'ютерної математики проф. Вальтером Гаутсчі і Вальтером Гандером [7], а також модифіковані автором алгоритми Гаусса-Лежандра (3 і 10 -ти точковий методи). Розрахунки інтегралу даними методами для набору тестових алгебраїчних функцій показали переваги квадратур алгебраїчної точності Гаусса-Лобатто.

## Висновки

1. Отримані залежності комплексних показників надійності ЗВТ від параметрів системи МО ЗВТ для входних дифузійних метрологічних і експоненціальних моделей відмов дозволяють підвищити достовірність процедур оцінки і аналізу впливу параметрів МО ЗВТ на рівень експлуатаційної надійності ЗВТ.
2. На основі технологій програмування інформаційних мереж запропонована методика сканування функцій показників надійності ЗВТ, що дозволило автоматизувати розв'язок задач оцінки і аналізу рівня експлуатаційної надійності ЗВТ, вибору оптимального МПП.
3. Розроблені програмні засоби можуть бути адаптовані для роботи в складі функціонуючих на сьогоднішній день АСУ МО ЗВТ для вирішення задач діагностики і моніторингу надійності ЗВТ, оптимізації параметрів СМО ЗВТ на різних рівнях державних метрологічних служб і підрозділів підприємств.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Фридман А.Э. Теория метрологической надежности средств измерений // Измерительная техника. – 1991. – №11. – С.3–10.
2. В.Т.Кондратов. Свойства и функциональные возможности экспоненциальных функций распределения нормируемых погрешностей в течении времени работы на метрологический отказ // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2009. – №1. – С.57–65.

3. Игнаткин В.У и др. Автоматизация метрологического обслуживания средств измерений промышленного предприятия / Игнаткин В.У и др. – М.: Издательство стандартов, 1988 – 208с.
4. Игнаткин В.У и др. Оценка, контроль и прогнозирование метрологической надежности средств измерений/ Игнаткин В.У и др. – М.: Изд-во стандартов, 1991–190с.
5. Ігнаткін В.У., Віткін Л.М., Литвиненко В.А. Обґрунтування концепції оптимізації метрологічного обслуговування засобів вимірювальної техніки, оцінки його параметрів і показників функціонування/Системи озброєння і військова техніка. - Харків : ХУ ПС. -2008 – Вип. 3(15). – С.94-103.
6. Погребинский С.Б., Стрельников В.П. Проектирование и надежность многопроцессорных ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988. –168с.
7. Matsumoto, M. and Nishimura, T. "Mersenne Twister: A 623-Dimensionally Equidistributed Uniform Pseudorandom Number Generator," ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, (1998), 8(1):3-30.
8. Gander, W. and W. Gautschi. Adaptive quadrature – revisited. ВГТ, Vol.40, 2000, pp. 84 – 101.

Науковий керівник д.т.н., проф.. Ігнаткін В.У.

пост. 17.04.12

## Моделювання роботи вітроколеса при поривчастих вітрах

КОРЕНДІЙ В.М.

Національний університет «Львівська політехніка»

Для визначення умов стійкої роботи вітроустановки з різноманітними видами навантажень при змінному поривчастому вітрі виконано математичне моделювання роботи вітроколеса. Наведений наближений розв'язок рівняння руху вітроколеса може бути використаний для аналізу режимів роботи будь-яких лопатевих горизонтально-осьових вітроустановок з відомою характеристикою аеродинамічного моменту та величиною моменту інерції вітроколеса. Аналіз отриманих результатів показав, що при поривчастому вітрі нестійкі режими роботи вітроустановок виникають часто, а для їх уникнення необхідно підвищувати швидкість вітроколеса понад номінальне значення.

Для определения условий устойчивой работы ветроустановки с различными видами нагрузок при переменном порывистом ветре выполнено математическое моделирование работы ветроколеса. Приведенное приближенное аналитическое решение уравнения движения ветроколеса может быть использовано для анализа режимов работы любых лопастных горизонтально-осевых ветроустановок с известной характеристикой аэродинамического момента и величиной момента инерции ветроколеса. Анализ полученных результатов показал, что при порывистом ветре неустойчивые режимы работы ветроустановок возникают часто, а для их избежания необходимо повышать быстроходность ветроколеса выше номинального значения.

Mathematical modeling of wind-wheel operation is done for determination of stability conditions of wind turbine operation with different types of loadings at baffling gusty wind. Presented approximate solution of equation of wind-wheel motion may be used for analyzing of operation modes of any bladed horizontal axis wind turbines with known aerodynamic moment characteristic and value of wind-wheel inertial moment. The analysis of received results has shown, that unsteady wind turbines operation modes arise at gusty wind frequently, and for their avoidance it is necessary to boost the agility of the wind-wheel over its nominal value.

**Вступ.** На даний час для України поступово загострюється питання ошадного використання природних енергоресурсів. У контексті істотного зростання цін на нафту і газ у найближчі декілька років слід очікувати істотних змін у структурі виробництва та споживання енергії. Розширення виробництва енергії, очевидно, спостерігатиметься у бік зростання частки нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії.

Вагоме значення для зменшення витрат традиційних енергетичних ресурсів має використання енергії повітряних потоків. Нещодавно прийняті законодавчі акти про так звану «зелену енергетику» вселяють надію в інтенсифікацію використанні вітроустановок. Вітроенергетика на даний час розвивається найбільш динамічно у порівнянні навіть із такими потужними галузями, як атомна чи теплова. При цьому вона залишається однією з найбільш безпечних із погляду екології. Вітроус-

тановки можуть використовуватися не тільки для виробництва електроенергії, але й у якості безпосереднього механічного приводу багатьох машин і механізмів у промисловості та сільському господарстві (водонапірні та зрошувальні системи, механізми подрібнення і конвеєри для подачі кормів, обмелювання зерна, тощо).

У практиці експлуатації вітроенергетичних установок (ВЕУ) бувають випадки, коли навантаження на валу вітроколеса не відповідає характеристичі моменту, який ним розвивається. Така ситуація виникає, наприклад, при підключенні шнекового або транспортерного механізму, момент опору яких практично не змінюється при коливанні частоти обертання привідного валу. Дослідженню обертального руху вітроколеса та моделюванню взаємодії повітряного потоку з лопатями присвячено досить багато публікацій [1-6].