

УДК 519.873

¹Володимир Іванович Мірненко (д-р техн. наук, професор)²Сергій Олексійович Пустовий (канд. техн. наук, с.н.с.)¹Петро Михайлович Яблонський (канд. техн. наук, доцент)¹Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна²ТОВ "Котрис", Київ, Україна

РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ПОСЛІДОВНО З'ЄДНАНИХ І РЕЗЕРВОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ БЕЗ ВІДНОВЛЕННЯ ДЛЯ ДИФУЗІЙНО-НЕМОНОТОННОГО РОЗПОДІЛУ ЇХ ВІДМОВ

В роботі здійснено розрахунок ймовірності безвідмовної роботи послідовно з'єднаних і резервованих елементів без відновлення для дифузійно-немонотонного (ДН) розподілу їх відмов. Розрахунки здійснені для виробів електронного типу. Показана залежність функції ДН-розподілу при різних значеннях коефіцієнтів масштабу і форми. Враховуючи, що інтенсивність відмов несе інформацію про щільність і функцію розподілу, наведена залежність інтенсивності відмов від поточного часу для різних значень коефіцієнтів масштабу і форми. Розрахунки здійснені для гіпотетичних елементів виробів електронного типу. При $t \rightarrow \infty$ інтенсивність відмов прагне до деякої постійної величини, що є характерним для ДН-розподілу. Середнє напрацювання на відмову при збільшенні числа послідовно з'єднаних елементів зменшується, а зі збільшенням коефіцієнту масштабу і форми – збільшується. При низькій надійності елементів, збільшення числа паралельно з'єднаних елементів не дозволяє суттєво підвищити середнє напрацювання на відмову системи у цілому. Збільшення коефіцієнту масштабу призводить до зростання ймовірності послідовно і паралельно з'єднаних елементів. Збільшення кратності резервування призводить до збільшення середнього напрацювання на відмову для паралельно з'єднаних елементів. Для послідовно з'єднаних елементів збільшення числа елементів призводить до зменшення середнього напрацювання на відмову. Наведено порівняння ймовірності безвідмовної роботи і середнього напрацювання на відмову для вказаних видів з'єднань елементів для експоненціального і дифузійно-немонотонного законів.

Ключові слова: ймовірність безвідмовної роботи; середнє напрацювання на відмову; коефіцієнт масштабу і форми дифузійно-немонотонного закону.

Вступ

Постановка проблеми. Під час створення електронної техніки в засобах інформаційних технологій широко застосовується послідовне і паралельне з'єднання елементів. При цьому, зазвичай, у переважній більшості підручників з надійності [1–7] розрахунки ймовірності безвідмовної роботи і середнього напрацювання на відмову здійснюються головним чином для експоненціального закону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо [8], що для високонадійних елементів з інтенсивністю відмов $\lambda = 10^{-7} \dots 10^{-9}$ 1/год експоненціальний закон розподілу дає суттєво завищені значення напрацювання на відмову. Так у роботі [8] вказано, що при використанні експоненціального закону математичне очікування часу до відмови (або на відмову) для високонадійних елементів приблизно у 50...500 разів перебільшує аналогічні показники для двопараметричних законів, більш адекватних до статистики відмов. Таким чином, прийняття експоненціальної моделі відмов може призвести до суттєвих помилок при створенні зразків, наприклад, електронної техніки.

Враховуючи це метою статті є розрахунок

надійності послідовно з'єднаних і резервованих елементів без відновлення для дифузійно-немонотонного розподілу (ДН).

Методи дослідження. Дифузійно-немонотонний закон розподілу вважається найбільш універсальним для вирішення практично всіх задач теорії надійності [8,9,10]. Єдиним недоліком такого закону вважається його математична складність, що стримує його застосування для вирішення практичних задач. Державним стандартом України [8] дифузійно-немонотонний закон розподілу рекомендується застосовувати для виробів електронної техніки. У зв'язку з цим, у статті здійснюється порівняння ймовірності безвідмовної роботи і середнього напрацювання на відмову (до відмови) для дифузійно-немонотонного і експоненціального законів розподілу для послідовно і паралельно з'єднаних елементів.

Виклад основного матеріалу дослідження

Враховуючи, що у наукових роботах дифузійно-немонотонний закон розподілу застосовується відносно рідко, наведемо його основні характеристики для певних значень коефіцієнту масштабу μ і форми ν .

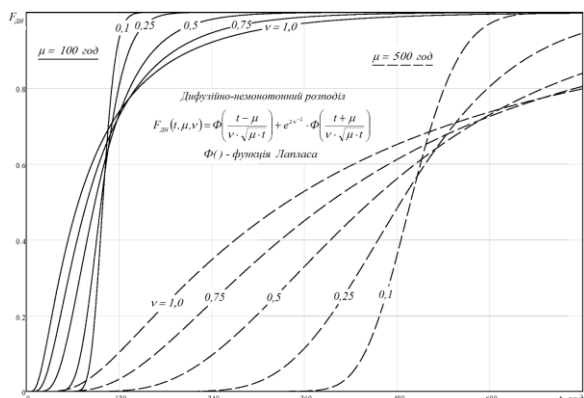


Рис. 1. Функція ДН-розподілу при різних значеннях коефіцієнтів масштабу μ і форми v .

На рис. 1. показана функція ДН-розподілу при різних значеннях коефіцієнту масштабу μ і форми v , де через $\Phi(x)$ позначена функція Лапласа:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$$

З рис. 1. видно, що зі збільшенням коефіцієнту форми v зростання функції розподілу уповільнюється. Крім того, при менших значеннях коефіцієнту масштабу μ спостерігається більш стрімке її збільшення, що добре пояснюється фізичними міркуваннями. Важливе значення при розрахунках надійності має інтенсивність відмов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)}$$

$f(t)$ і функцію $F(t)$ розподілу.

Інтенсивність розподілу для ряду законів суттєво відрізняється. Особливо показовим є відмінність на кінцях розподілу, коли $t \rightarrow \infty$. Для нормального закону розподілу і розподілу Вейбула при $t \rightarrow \infty$ інтенсивність відмов зростає до нескінченності, для логарифмічно-нормального закону і α -розподілу $\lambda \rightarrow 0$, а для ДН-розподілу $\lambda(t)$ прагне до деякої константи.

На рис.2 показана залежність інтенсивності відмов для ДН-розподілу.

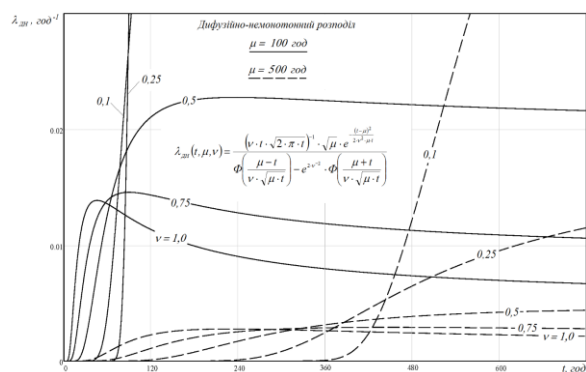


Рис. 2. Залежність інтенсивності відмов від поточного часу при різних значеннях коефіцієнту масштабу μ і форми v .

З рис. 2 видно, що збільшення коефіцієнту масштабу μ з 100 год до 500 год суттєво зменшує

інтенсивність відмов. Для ДН-розподілу коефіцієнт масштабу співпадає з напрацюванням на відмову. Таку характеристику в теорії надійності прийнято називати безвідмовністю. Зростання безвідмовності призводить до зменшення інтенсивності відмов, що добре видно з рис. 2.

На рис. 3 показана схема N послідовно з'єднаних елементів.

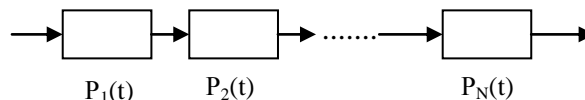


Рис.3. Схема N послідовно з'єднаних елементів.

Ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ для схеми послідовного з'єднання N елементів при використанні ДН-розподілу розраховується згідно із формулою

$$P_{DN}(t) = \prod_{i=1}^n \left[\Phi\left(\frac{\mu_i - t}{v_i \sqrt{\mu_i t}}\right) - e^{2(v_i - 2)} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_i + t}{v_i \sqrt{\mu_i t}}\right) \right] \quad (1)$$

де μ_i – коефіцієнт масштабу i -го елемента;

v_i – коефіцієнт форми i -го елемента.

Середнє напрацювання на відмову T_0 розраховується згідно із формулою

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} \prod_{i=1}^n \left[\Phi\left(\frac{\mu_i - t}{v_i \sqrt{\mu_i t}}\right) - e^{2(v_i - 2)} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_i + t}{v_i \sqrt{\mu_i t}}\right) \right] dt \quad (2)$$

На рис.4 показана $P(t)$, що розрахована за формулою (1), при різній кількості N однакових елементів системи та значеннях μ та v .

З рис.4 видно, що зі збільшенням числа N послідовно з'єднаних елементів $P(t)$ зменшується, а зі збільшенням μ та v – збільшується, що добре відповідає фізичним міркуванням.

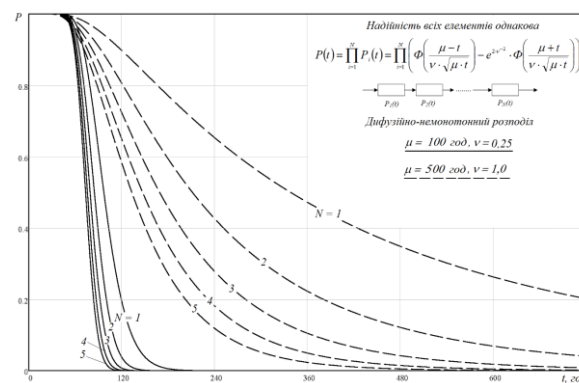


Рис.4. Залежність ймовірності безвідмовної роботи від поточного часу N послідовно з'єднаних однакових за надійністю елементів при різних значеннях μ та v .

На рис.5 показана залежність $P(t)$ одного елемента при його різній надійності (значеннях μ та v), а також $P(t)$ для системи з 5 послідовно або паралельно з'єднаних таких елементів. З рис.5 видно, що зі збільшенням μ та v для окремого елемента $P(t)$ збільшується, для всієї схеми при послідовному з'єднанні елементів $P(t)$ менше, а при паралельному з'єднанні елементів $P(t)$ значно більша, ніж для будь-якого окремого елемента.

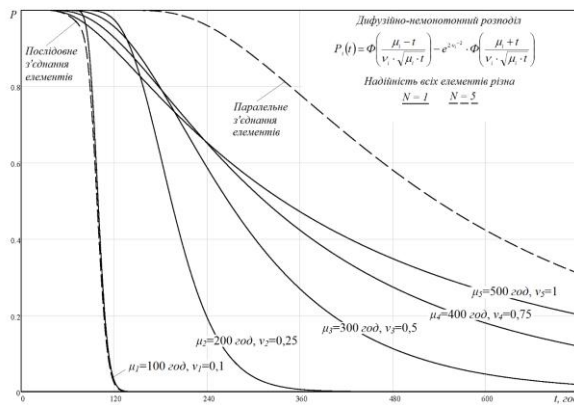


Рис. 5. Залежність ймовірності безвідмовної роботи від поточного часу N послідовно та паралельно з'єднаних різних за надійністю елементів при різних значеннях μ та ν .

На рис.6 показана залежність середнього напрацювання на відмову T_0 , що розрахована за формулою (2), від кількості N однакових за надійністю елементів при різних значеннях μ та ν . З рис.6 видно, що T_0 при збільшенні числа N послідовно з'єднаних елементів зменшується, а із збільшенням μ та ν – збільшується.

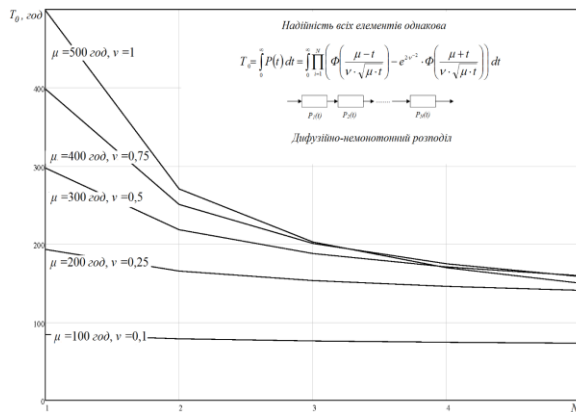


Рис.6. Залежність середнього напрацювання на відмову T_0 , що розрахована за формулою (2), від кількості N послідовно з'єднаних однакових за надійністю елементів при різних значеннях μ та ν .

На рис.7 показана схема паралельного з'єднання двох елементів. $P(t)$ для такої схеми визначається наступним чином

$$P(t) = 1 - (1 - P_1(t)) \cdot (1 - P_2(t)) = P_1(t) + P_2(t) - P_1(t) \cdot P_2(t)$$

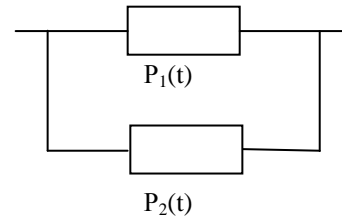


Рис. 7. Схема двох паралельно з'єднаних елементів.

З урахуванням ДН-розподілу запишемо

$$P(t) = \Phi\left(\frac{\mu_1 - t}{\nu_1 \sqrt{\mu_1 t}}\right) - e^{-\frac{1}{\nu_1^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_1 + t}{\nu_1 \sqrt{\mu_1 t}}\right) + \Phi\left(\frac{\mu_2 - t}{\nu_2 \sqrt{\mu_2 t}}\right) - e^{-\frac{1}{\nu_2^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_2 + t}{\nu_2 \sqrt{\mu_2 t}}\right) - \left[\Phi\left(\frac{\mu_1 - t}{\nu_1 \sqrt{\mu_1 t}}\right) - e^{-\frac{1}{\nu_1^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_1 + t}{\nu_1 \sqrt{\mu_1 t}}\right) \right] \cdot \left[\Phi\left(\frac{\mu_2 - t}{\nu_2 \sqrt{\mu_2 t}}\right) - e^{-\frac{1}{\nu_2^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_2 + t}{\nu_2 \sqrt{\mu_2 t}}\right) \right] \quad (3)$$

На практиці нерідко застосовується трьохкратне резервування елементів для технічних систем високого рівня відповідальності. Схема паралельного з'єднання трьох елементів показана на рис.8.

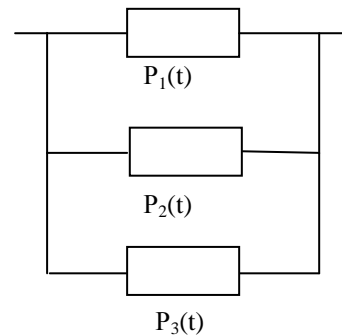


Рис. 8. Схема трьох паралельно з'єднаних елементів.

Для схеми рис.8, $P(t)$ буде:

$$P(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) - P_1(t) \cdot P_2(t) - P_1(t) \cdot P_3(t) - P_2(t) \cdot P_3(t) + P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t)$$

$$P(t) = \left[\Phi\left(\frac{\mu_1 - t}{\nu_1 \sqrt{\mu_1 t}}\right) - e^{-\frac{1}{\nu_1^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_1 + t}{\nu_1 \sqrt{\mu_1 t}}\right) \right] + \left[\Phi\left(\frac{\mu_2 - t}{\nu_2 \sqrt{\mu_2 t}}\right) - e^{-\frac{1}{\nu_2^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_2 + t}{\nu_2 \sqrt{\mu_2 t}}\right) \right] - \left[\Phi\left(\frac{\mu_1 - t}{\nu_1 \sqrt{\mu_1 t}}\right) - e^{-\frac{1}{\nu_1^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_1 + t}{\nu_1 \sqrt{\mu_1 t}}\right) \right] \cdot \left[\Phi\left(\frac{\mu_2 - t}{\nu_2 \sqrt{\mu_2 t}}\right) - e^{-\frac{1}{\nu_2^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_2 + t}{\nu_2 \sqrt{\mu_2 t}}\right) \right] + \left[\Phi\left(\frac{\mu_3 - t}{\nu_3 \sqrt{\mu_3 t}}\right) - e^{-\frac{1}{\nu_3^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_3 + t}{\nu_3 \sqrt{\mu_3 t}}\right) \right] - \left[\Phi\left(\frac{\mu_1 - t}{\nu_1 \sqrt{\mu_1 t}}\right) - e^{-\frac{1}{\nu_1^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_1 + t}{\nu_1 \sqrt{\mu_1 t}}\right) \right] \cdot \left[\Phi\left(\frac{\mu_3 - t}{\nu_3 \sqrt{\mu_3 t}}\right) - e^{-\frac{1}{\nu_3^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_3 + t}{\nu_3 \sqrt{\mu_3 t}}\right) \right] - \left[\Phi\left(\frac{\mu_2 - t}{\nu_2 \sqrt{\mu_2 t}}\right) - e^{-\frac{1}{\nu_2^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_2 + t}{\nu_2 \sqrt{\mu_2 t}}\right) \right] \cdot \left[\Phi\left(\frac{\mu_3 - t}{\nu_3 \sqrt{\mu_3 t}}\right) - e^{-\frac{1}{\nu_3^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_3 + t}{\nu_3 \sqrt{\mu_3 t}}\right) \right] + \left[\Phi\left(\frac{\mu_1 - t}{\nu_1 \sqrt{\mu_1 t}}\right) - e^{-\frac{1}{\nu_1^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_1 + t}{\nu_1 \sqrt{\mu_1 t}}\right) \right] \cdot \left[\Phi\left(\frac{\mu_2 - t}{\nu_2 \sqrt{\mu_2 t}}\right) - e^{-\frac{1}{\nu_2^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_2 + t}{\nu_2 \sqrt{\mu_2 t}}\right) \right] \cdot \left[\Phi\left(\frac{\mu_3 - t}{\nu_3 \sqrt{\mu_3 t}}\right) - e^{-\frac{1}{\nu_3^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_3 + t}{\nu_3 \sqrt{\mu_3 t}}\right) \right] \quad (4)$$

$$\left[\Phi\left(\frac{\mu_3-t}{v_3 \cdot \sqrt{\mu_3 t}}\right) - e^{-\frac{2-t}{v_3^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_3+t}{v_3 \cdot \sqrt{\mu_3 t}}\right) \right] + \left[\Phi\left(\frac{\mu_1-t}{v_1 \cdot \sqrt{\mu_1 t}}\right) - e^{-\frac{2-t}{v_1^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_1+t}{v_1 \cdot \sqrt{\mu_1 t}}\right) \right]$$

$$\left[\Phi\left(\frac{\mu_2-t}{v_2 \cdot \sqrt{\mu_2 t}}\right) - e^{-\frac{2-t}{v_2^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_2+t}{v_2 \cdot \sqrt{\mu_2 t}}\right) \right] \cdot \left[\Phi\left(\frac{\mu_3-t}{v_3 \cdot \sqrt{\mu_3 t}}\right) - e^{-\frac{2-t}{v_3^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_3+t}{v_3 \cdot \sqrt{\mu_3 t}}\right) \right]$$

Середнє напрацювання на відмову T_0 для трьох паралельно з'єднаних елементів розраховується за формулою:

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} \left[\left[\Phi\left(\frac{\mu_1-t}{v_1 \cdot \sqrt{\mu_1 t}}\right) - e^{-\frac{2-t}{v_1^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_1+t}{v_1 \cdot \sqrt{\mu_1 t}}\right) \right] + \left[\Phi\left(\frac{\mu_2-t}{v_2 \cdot \sqrt{\mu_2 t}}\right) - e^{-\frac{2-t}{v_2^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_2+t}{v_2 \cdot \sqrt{\mu_2 t}}\right) \right] - \left[\Phi\left(\frac{\mu_1-t}{v_1 \cdot \sqrt{\mu_1 t}}\right) - e^{-\frac{2-t}{v_1^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_1+t}{v_1 \cdot \sqrt{\mu_1 t}}\right) \right] \cdot \left[\Phi\left(\frac{\mu_2-t}{v_2 \cdot \sqrt{\mu_2 t}}\right) - e^{-\frac{2-t}{v_2^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_2+t}{v_2 \cdot \sqrt{\mu_2 t}}\right) \right] + \left[\Phi\left(\frac{\mu_3-t}{v_3 \cdot \sqrt{\mu_3 t}}\right) - e^{-\frac{2-t}{v_3^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_3+t}{v_3 \cdot \sqrt{\mu_3 t}}\right) \right] - \left[\Phi\left(\frac{\mu_1-t}{v_1 \cdot \sqrt{\mu_1 t}}\right) - e^{-\frac{2-t}{v_1^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_1+t}{v_1 \cdot \sqrt{\mu_1 t}}\right) \right] \cdot \left[\Phi\left(\frac{\mu_3-t}{v_3 \cdot \sqrt{\mu_3 t}}\right) - e^{-\frac{2-t}{v_3^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_3+t}{v_3 \cdot \sqrt{\mu_3 t}}\right) \right] - \left[\Phi\left(\frac{\mu_2-t}{v_2 \cdot \sqrt{\mu_2 t}}\right) - e^{-\frac{2-t}{v_2^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_2+t}{v_2 \cdot \sqrt{\mu_2 t}}\right) \right] \cdot \left[\Phi\left(\frac{\mu_3-t}{v_3 \cdot \sqrt{\mu_3 t}}\right) - e^{-\frac{2-t}{v_3^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_3+t}{v_3 \cdot \sqrt{\mu_3 t}}\right) \right] + \left[\Phi\left(\frac{\mu_3-t}{v_3 \cdot \sqrt{\mu_3 t}}\right) - e^{-\frac{2-t}{v_3^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_3+t}{v_3 \cdot \sqrt{\mu_3 t}}\right) \right] + \left[\Phi\left(\frac{\mu_1-t}{v_1 \cdot \sqrt{\mu_1 t}}\right) - e^{-\frac{2-t}{v_1^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_1+t}{v_1 \cdot \sqrt{\mu_1 t}}\right) \right] \cdot \left[\Phi\left(\frac{\mu_2-t}{v_2 \cdot \sqrt{\mu_2 t}}\right) - e^{-\frac{2-t}{v_2^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_2+t}{v_2 \cdot \sqrt{\mu_2 t}}\right) \right] + \left[\Phi\left(\frac{\mu_3-t}{v_3 \cdot \sqrt{\mu_3 t}}\right) - e^{-\frac{2-t}{v_3^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_3+t}{v_3 \cdot \sqrt{\mu_3 t}}\right) \right] + \left[\Phi\left(\frac{\mu_1-t}{v_1 \cdot \sqrt{\mu_1 t}}\right) - e^{-\frac{2-t}{v_1^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_1+t}{v_1 \cdot \sqrt{\mu_1 t}}\right) \right] \cdot \left[\Phi\left(\frac{\mu_3-t}{v_3 \cdot \sqrt{\mu_3 t}}\right) - e^{-\frac{2-t}{v_3^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_3+t}{v_3 \cdot \sqrt{\mu_3 t}}\right) \right] + \left[\Phi\left(\frac{\mu_2-t}{v_2 \cdot \sqrt{\mu_2 t}}\right) - e^{-\frac{2-t}{v_2^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_2+t}{v_2 \cdot \sqrt{\mu_2 t}}\right) \right] \cdot \left[\Phi\left(\frac{\mu_3-t}{v_3 \cdot \sqrt{\mu_3 t}}\right) - e^{-\frac{2-t}{v_3^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_3+t}{v_3 \cdot \sqrt{\mu_3 t}}\right) \right] \right] dt \quad (5)$$

Для схем з ще більшим рівнем резервування немає сенсу записувати розрахункові формули, які мають досить громіздкий вигляд. Для N елементів, з'єднаних паралельно, $P(t)$ запишемо у вигляді

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_i(t)) = 1 - \prod_{i=1}^N \left[1 - \Phi\left(\frac{\mu_i-t}{v_i \cdot \sqrt{\mu_i t}}\right) - e^{-\frac{2-t}{v_i^2}} \cdot \Phi\left(-\frac{\mu_i+t}{v_i \cdot \sqrt{\mu_i t}}\right) \right] \quad (6)$$

На рис. 9 показана $P(t)$, що розрахована за формулою (6), при різній кількості N однакових за надійністю елементів та різних значеннях μ та v .

З рис. 9 видно, що мірою збільшення μ та v ДН-розподілу, а також числа резервованих елементів N , збільшується $P(t)$.

Наприклад, при $\mu_i = 500$ год та $v_i = 0,75$, якщо поточний час дорівнює $t = 720$ год, то один елемент буде мати $P(t)$ близько 0,2, а для того ж поточного часу при чотирьох паралельно з'єднаних елементів ($N=4$) $P(t)$ буде складати близько 0,6.

На рис.10 показана ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ для N паралельно з'єднаних елементів різної надійності від поточного часу t (залежність $P(t)$ кожного окремого з цих елементів показана на

рис.5). З рис.10 видно, що, наприклад, для $t = 720$ год. схема з п'ятьма паралельно з'єднаними елементами буде мати ймовірність безвідмовної роботи, більшу за 0,5, хоча лише один елемент має $\mu = 500$ год, а решта елементів мають меншу надійність.

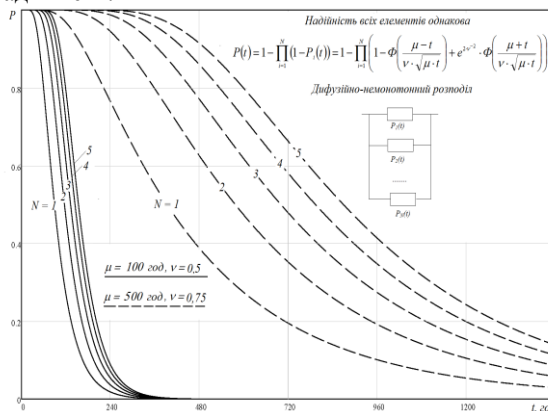


Рис. 9. Залежність ймовірності безвідмовної роботи від поточного часу для N паралельно з'єднаних однакових за надійністю елементів при різних значеннях μ та v .

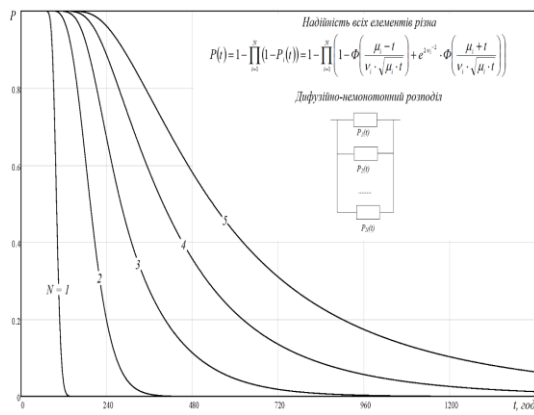


Рис. 10. $P(t)$ для N паралельно з'єднаних елементів різної надійності для ДН-розподілу: $\mu_1=100$ год, $\nu_1=0,1$; $\mu_2=200$ год, $\nu_2=0,25$; $\mu_3=300$ год, $\nu_3=0,5$; $\mu_4=400$ год, $\nu_4=0,75$; $\mu_5=500$ год, $\nu_5=1,0$.

На рис.11 показана залежність середнього напрацювання на відмову T_0 від кількості N однакових за надійністю паралельно з'єднаних елементів при різних значеннях коефіцієнтів масштабу μ та форми ν .

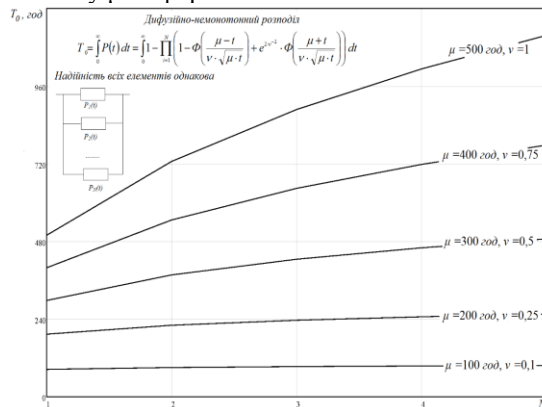


Рис.11. Залежність T_0 від кількості N однакових за надійністю паралельно з'єднаних елементів при різних значеннях μ та ν .

З рис.11 видно, що середнє напрацювання на відмову T_0 зростає при збільшенні числа N паралельно з'єднаних елементів або при збільшенні коефіцієнтів масштабу μ та форми ν . При низькій надійності елементів (низьких значеннях μ та ν), збільшення їх числа N не дозволяє суттєво підвищити середнє напрацювання на відмову T_0 системи в цілому. Так при $\mu = 200$ год та $\nu = 0,25$, незважаючи на те, що у схемі є п'ять паралельно з'єднаних елементів, напрацювання на відмову збільшилось з 193 годин для одного елемента до лише 255 годин для п'яти елементів.

На рис.12 показана залежність середнього часу напрацювання на відмову T_0 для N паралельно або послідовно з'єднаних елементів з різним рівнем надійності, залежність ймовірності безвідмовної роботи кожного окремого з яких від поточного часу t показана на рис.5. З рис.12 видно, що для одного елемента середнє напрацювання на відмову T_0 складає 84,39 годин, для двох елементів воно складає 193 та 84,34 годин для паралельного та послідовного з'єднання відповідно, для трьох елементів 314 та 84,09 год, для чотирьох елементів 472 та 83,34 години, а для п'яти елементів 673 та 81,87 годин відповідно.

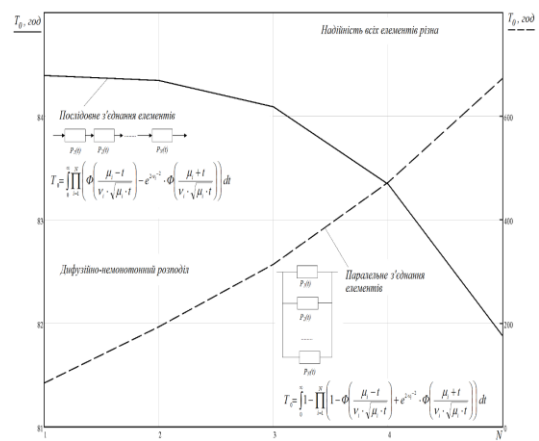
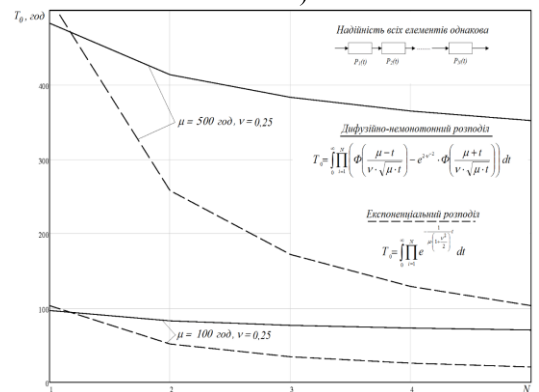


Рис.12. Залежність середнього часу напрацювання на відмову T_0 для N послідовно (ліва вісь) або паралельно (права вісь) з'єднаних елементів з різним рівнем надійності для ДН-розподілу: $\mu_1=100$ год, $\nu_1=0,1$; $\mu_2=200$ год, $\nu_2=0,25$; $\mu_3=300$ год, $\nu_3=0,5$; $\mu_4=400$ год, $\nu_4=0,75$; $\mu_5=500$ год, $\nu_5=1,0$.

З рис.12 видно, що для одного елемента середнє напрацювання на відмову T_0 складає 84,39 годин, для двох елементів воно складає 193 та 84,34 годин для паралельного та послідовного з'єднання відповідно, для трьох елементів 314 та 84,09 год, для чотирьох елементів 472 та 83,34 години, а для п'яти елементів 673 та 81,87 годин відповідно.

А)



Б)

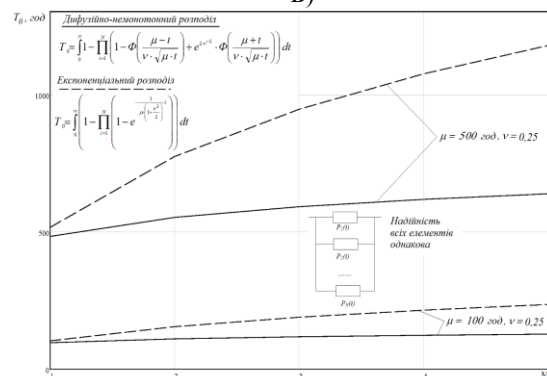


Рис. 13. Залежність T_0 від кількості N однакових за надійністю послідовно (А) та паралельно (Б) з'єднаних елементів при різних функціях розподілу їх відмов (ДН або експоненціальний) з параметрами $\mu=100$ год, $\nu=0,25$ та $\mu=500$ год, $\nu=0,25$.

На рис.13 виконано порівняння величини середнього напрацювання на відмову T_0 від кількості N в системі однакових за надійністю з'єднаних послідовно або паралельно елементів при дифузійно-немонотонній та експоненціальній функції розподілу їх відмов. Як видно з рис.13-А, для системи з п'яти послідовно з'єднаних елементів величина середнього напрацювання на відмову T_0 при експоненціальному законі розподілу в 3,41 рази нижче ніж при дифузійно-немонотонному розподілі: 103 год і 352 год при параметрах $\mu=500$ год та $\nu=0,25$, та 21 год і 70 год при параметрах $\mu=100$ год та $\nu=0,25$ відповідно. Як видно з рис.13-Б, для системи з п'яти паралельно з'єднаних елементів величина середнього напрацювання на відмову T_0 при експоненціальному законі розподілу в 1,79 рази вище ніж при дифузійно-немонотонному розподілі: 1177 год і 638 год при параметрах $\mu=500$ год та $\nu=0,25$, та 235 год і 128 год при параметрах $\mu=100$ год та $\nu=0,25$ відповідно.

Висновки й перспективи подальших досліджень. 1. В статті наведені розрахунки $P(t)$ для послідовно і паралельно з'єднаних п'яти елементів для ДН-розподілу від поточного часу при зміні μ та ν . Показано, що збільшення μ еквівалентно збільшенню безвідмовності електронних виробів. Тобто збільшення μ

призводить до збільшення $P(t)$ послідовно і паралельно з'єднаних елементів.

2. Розрахована залежність T_0 для послідовно і паралельно з'єднаних п'яти елементів в залежності від кількості з'єднаних елементів в системі. Показано, що збільшення кратності резервування призводить до збільшення T_0 для паралельно з'єднаних елементів. Для послідовно з'єднаних елементів збільшення числа елементів призводить до зменшення T_0 . З наведених розрахунків видно, що збільшення кратності резервування, більше трьох, недоцільне, тому що зростання середнього часу від кратності резервування здійснюється досить повільно.

3. Виконано порівняння T_0 для послідовно і паралельно з'єднаних елементів при експоненціальному та ДН-розподілах їх відмов. Показано, що при послідовному з'єднанні елементів експоненціальний закон розподілу значно знижує, а при паралельному – значно завищує T_0 системи у порівнянні з ДН - розподілом.

4. Наведені у статті розрахунки можуть знайти широке застосування у різних галузях технічних наук, де важливе значення має забезпечення заданого рівня надійності виробів. Отримані у статті результати можуть слугувати основою для проведення розрахунків для більшого числа елементів.

Література

1. Козлов Б. А. Справочник по расчёту надёжности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики / Б. А. Козлов, И. А. Ушаков – М. : Советское радио, 1975. – 472 с. 2. Гнеденко Б. В. Вопросы математической теории надёжности / Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Коваленко И. А., Под редакцией академика АН УССР Б.В. Гнеденко – М. : Советское радио, 1983. – 376 с. 3. Острейковский В. А. Теория надёжности – М. : Высшая школа, 2003. – 463 с. 4. Половко А. М. Основы теории надёжности. Практикум / А. М. Половко, С. В. Гуров – СПб. : БХВ–Петербург, 2006. – 559 с. 5. Беляев Ю. К. Надёжность технических систем. Справочник / Беляев Ю. К., Богатырёв В. А., Болотин В. В. и др. Под редакцией

Ушакова И. А.– М. : Радио и связь, 1985. – 609 с. 6. Шышмарёв В. Ю. Надёжность технических систем – М. : Изд.центр Академия, 2010. – 304 с. 7. ДСТУ 3942–2000 (ГОСТ 27.506–2000). Надійність техніки. Плани випробувань для контролю середнього наробітку до відмови (на відмову). Частина 2. Дифузійний розподіл, 2001. – 36 с. 8. Стрельников В. П. О методических погрешностях прогнозирования ресурса высоконадёжных изделий электронной техники / В. П. Стрельников, К. А. Антипенко // Математичні машини і системи. – 2004. – №3. – С.164–167. 9. ДСТУ 2862–94. Надійність техніки. Методи розрахунків показників надійності. Загальні вимоги. – 1996. – 39 с.

РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ И РЕЗЕРВИРУЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ БЕЗ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЛЯ ДИФфуЗИОННО-НЕМОНОТОННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ОТКАЗОВ

¹Владимир Иванович Мирненко (д-р техн. наук, профессор)

²Сергей Алексеевич Пустовой (канд. техн. наук, с.н.с.)

¹Петр Михайлович Яблонский (канд. техн. наук, доцент)

¹Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского, Киев, Украина

²ООО “Котрис”, Киев, Украина

В работе произведен расчет вероятности безотказной работы последовательно соединенных и резервируемых элементов без восстановления для диффузионно-немонотонного (ДН) распределения их отказов. Расчеты осуществлены для изделий электронного типа. Показана зависимость функции ДН-распределения при различных значениях коэффициентов масштаба и формы. Учитывая, что интенсивность отказов несет информацию о плотности и функцию распределения, приведена зависимость интенсивности отказов от текущего времени для различных значений коэффициентов масштаба и формы. Расчеты осуществлены для гипотетических элементов изделий электронного типа. При $t \rightarrow \infty$ интенсивность отказов стремится к некоторой постоянной величине, что характерно для ДН-распределения. Средняя наработка на отказ при увеличении числа последовательно соединенных элементов уменьшается, а с увеличением коэффициента масштаба и формы – увеличивается. При низкой надежности элементов, увеличение числа параллельно соединенных элементов не позволяет

существенно повысить среднюю наработку на отказ системы в целом. Увеличение коэффициента масштаба приводит к росту вероятности последовательно и параллельно соединенных элементов. Увеличение кратности резервирования приводит к увеличению средней наработки на отказ для параллельно соединенных элементов. Для последовательно соединенных элементов увеличение числа элементов приводит к уменьшению средней наработки на отказ. Приведено сравнение вероятности безотказной работы и средней наработки на отказ для указанных видов соединений элементов для экспоненциального и диффузионно-немонотонного законов.

Ключевые слова: вероятность безотказной работы; средняя наработка на отказ; коэффициент масштаба и формы диффузионно-немонотонного закона.

THE RELIABILITY MEASURES COMPUTATION OF THE SERIES CONNECTED AND RESERVED ELEMENTS WITHOUT RECOVERY FOR DIFFUSION-NONMONOTONIC DISTRIBUTION OF THEIR FAILURES

¹*Volodymyr I. Mirnenko, (Doctor of Technical Sciences, Professor)*

²*Serhii O. Pustovyi (Candidate of Technical Sciences, Senior Research Fellow)*

¹*Petro M. Yablonskyi (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)*

¹*National Defence University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovsky, Kyiv, Ukraine*

²*Kotrys Ltd, Kyiv, Ukraine*

In the article is carried out the computation of reliability function and mean time between failures of the series connected and reserved elements without recovery for diffusion-nonmonotonic distribution of their failures. Calculations are carried out for the wares of electronic type. The shown dependence of function of DN-distribution is at the different values of coefficients of scale and shape. Taking into account, that failure rate carries information about a failure density and distribution function, the dependence over of failure rate on current time for the different values of coefficients of scale and shape was given. Calculations are carried out for the hypothetical elements of electronic wares. If the $t \rightarrow \infty$, the failure rate go to some constant magnitude which is characteristic for DN-distribution. Mean operating time between failures decreases with increasing the quantity consistently of united elements, and with increasing the scale and shape coefficient – increasing. The increase of number of in-parallel united elements does not allow substantially promoting mean operating time between failures of the system on the whole at low reliability of elements. Increasing the scale coefficient leads to increasing probability of consistently and in-parallel united elements. The increase of redundancy ratio results leads to increasing mean operating time between failures for in-parallel united elements. For the consistently united elements increasing the number of elements leads to decreasing mean operating time between failures. The probability comparison of the mean time between failures for series and parallel connected elements for exponential and diffusion-nonmonotonic distribution laws is given.

Keywords: reliability function; mean operating time between failures; scale and shape coefficients of diffusion-nonmonotonic law.

References

- 1. Kozlov B.A.** Ushakov I.A. (1975), Handbook of electronics equipment and automation reliability calculation. [Spravochnik po raschyotu nadyozhnosti apparatury radioelektroniki i avtomatiki], Moscow, Sovetskoe radio, 472 p.
- 2. Gnedenko B.V.** Belyaev Y.K., Kovalenko I.A. (1983), Questions of mathematical theory of reliability. [Voprosyi matematicheskoy teorii nadyozhnosti], Moscow, Sovetskoe radio, 376 p.
- 3. Ostreykovskiy V.A.** (2003), Reliability theory. [Teoriya nadyozhnosti], Moscow, Vysshaya shkola, 463 p.
- 4. Polovko A.M.,** Gurov S.V. (2006), Fundamentals of reliability theory. Practical work. [Osnovyi teorii nadyozhnosti. Praktikum], Sankt Peterburg, 559 p.
- 5. Belyaev Y.K.,** Bogatyryov V.A., Bolotin V.V. and others (1985), Reliability of technical systems. Reference book [Nadyozhnost tehnikeskikh sistem Spravochnik], Moscow, Radio i svyaz, 609 p.
- 6. Shyshmaryov V.Y.** (2010), Reliability of technical systems [Nadyozhnost tehnikeskikh sistem], Moscow, 304 p.
- 7. DSTU 3942-2000** (GOST 27.506-2000) (2001), Machinery reliability. Testing plans for monitor the average operating time to failure (failures). Part 2. Diffusion distribution [Nadiynist tehniky. Plany viprobuvan dlia kontroliu serednoho narobitku do vidmovy (na vidmovu). Chastyna 2. Difuziynyi rozpodil], 36 p.
- 8. Strelnikov V.P.,** Antipenko K.A. (2004), About the methodical prediction errors of highly reliable resource of electronic equipment [O metodicheskikh pogreshnostyakh prognozirovaniya resursa vyisokonadyozhnyih izdeliy elektronnoy tehniki], Matematychni mashyny i systemy, Vol. 3, pp.164–167.
- 9. DSTU 2862-94.** (1996), Machinery reliability. Methods of calculating reliability indices. General requirements. [Nadiynist tehniky. Metodi rozrahunkiv pokaznykiv nadiynosti. Zagalni vimogi], 39 p.

Отримано: 04.03.2015 року