

УДК 621.38.001.4.603.13/045

С.В. Ленков, д-р техн. наук, проф.,
 В.В. Зубарєв, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.,
 В.І. Маленко,
 Р.М. Салімов, канд. техн. наук,
 С.А. Шомін

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИСКОРЕНИХ ВИПРОБУВАНЬ КОМПЛЕКТУЮЧИХ ВИРОБІВ БОРТОВОЇ АПАРАТУРИ

Розглянуто методика скорочення терміну проведення прискорених випробувань комплектуючих виробів бортової апаратури, яка дозволяє економити кошти на їх проведення та зберігати ресурс об'єктів випробувань за умови адекватного виявлення прихованих дефектів.

Основними труднощами в процесі реалізації прискорених випробувань є визначення стійких, інваріантних до виробництва базових закономірностей, що використовують як для прогнозу у випадку скорочених випробувань, так і для встановлення вірогідного зв'язку між результатами випробувань у форсованому та нормальному режимах, і складність правильного вибору параметрів форсованого режиму. Найбільш суттєві результати з цього питання отримані в галузі радіоелектроніки [1; 2]. У теорії надійності запропоновано різні моделі і принципи витрати ресурсу виробів [3; 4].

У теорії форсованих випробувань найбільш широкого застосування набули активаційні моделі оцінки впливу температури на кінетику фізичних і хімічних процесів, у основу яких покладено формулу (модель) Ареніуса. Однак деградація (старіння) і відмови виробів у переважній більшості випадків не підпорядковуються закону Ареніуса, оскільки відмови можуть бути обумовлені механічними напруженнями, пов'язаними зі змінами температури, локальними перегрівками через недоліки конструкції та ін. [5; 6].

Найвідоміші моделі, що застосовуються для оцінки показників надійності матеріалів і елементів, є емпіричними [4]. Через об'єктивно обмежений обсяг експериментальних даних установлені залежності не можна вважати достатньо науково обґрунтованими [3]. Технічні характеристики виробів є випадковими величинами, розподіли яких визначаються станом процесу виробництва. Різноманітність факторів, які впливають на якість виробів, призводить до того, що від партії до партії показники надійності можуть змінюватися в широких межах.

Рішення проблеми форсованих випробувань у даний час ґрунтується на принципах витрати ресурсу. Усі принципи витрати ресурсу засновані на інтуїтивному уявленні про фізику відмов, і кожний з них припускає існування функціональної залежності ресурсу від режиму випробувань. Найвідоміший із принципів витрати ресурсу – принцип Седякіна. Установлення залежності, яка інваріантна до процесу сучасного виробництва, складає ключову проблему теорії прискорених випробувань.

У роботах [7-9] авторами виведені фізико-статистичні моделі відмов виробів електронної техніки (ВЕТ) до різних механізмів їхньої деградації та відмов і показано, що для більшості механізмів відмов моделі можуть бути апроксимовані розподілом Вейбулла і лише для окремих – логнормальним розподілом. Отже, ці розподіли є фізико-статистичними моделями відмов. При цьому вигляд моделі (розподіл) цілком визначається механізмом відмов. Як видно з досліджень, у процесі зміни режимів випробувань у визначених межах, при яких фізичний механізм відмов не змінюється, вигляд фізико-статистичної моделі відмов також не змінюється, тобто залишається інваріантним і до режимів випробувань, і до процесу виробництва, хоча окремі параметри моделі змінюються.

З урахуванням основних положень принципу Седякіна цю залежність покладено в основу розробленого підходу до реалізації прискорених випробувань у форсованих режимах для одержання оцінок показників надійності виробів, які відповідають нормальному режимам

випробувань. Попередньо на основі апріорних даних про можливі механізми деградації виробів обираються режими форсованих випробувань, що прискорюють процеси деградації. При цьому дуже важливо, щоб обраний форсований режим не спричинив появу якогось додаткового механізму деградації. Ця задача не викликає труднощів у спеціалістів, якщо йдеться про окремі типи елементів, оскільки можлива кількість механізмів їхньої деградації обмежена. У більшості випадків застосовується один механізм. У разі необхідності можуть бути проведені попередні дослідження для встановлення режимів форсованих випробувань, які задовольняють зазначені умови. Далі організуються власне прискорені випробування. Тут можливі два варіанти.

Перший варіант передбачає проведення рівнобіжних випробувань двох вибірок виробів – однієї (для якої потрібно визначити показники надійності) в нормальному режимі, а іншої – у форсованому. Однак цей варіант, крім того, що потребує випробувань двох однакових вибірок, вимагає і порівняно великої тривалості випробувань. Це пояснюється тим, що для одержання оцінок показників надійності необхідні відмови елементів в обох вибірках, а відмови сучасних високонадійних елементів при випробуваннях у режимах, що відповідають нормальним умовам експлуатації, можуть виникнути після досить тривалої наробки. Тому пропонується проводити випробування однієї вибірки виробів.

Для цього випадку на конкретному прикладі проаналізуємо процедуру проведення й оцінки результатів прискорених випробувань. Нехай є партія елементів, які в процесі напрацювання деградують за одним механізмом, і розподіл накопиченої частки відмов елементів у процесі випробувань відповідає розподілу Вейбулла, що характерно для більшості механізмів відмов ВЕТ[8].

Розподіл дослідних даних у цьому випадку апроксимується трипараметричним розподілом Вейбулла, тобто інтегральна функція розподілу відмов набуде вигляду [10]:

$$F(f) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{(t-\gamma)^\delta}{\eta}\right), & t \geq \gamma; \\ 0, & t < \gamma, \end{cases}$$

де t – час; γ – параметр місця; δ – параметр форми; η – характеристичний параметр.

На практиці зручно відображати результати випробувань на вірогідній сітці, що відповідає одержуваному розподілу відмов, у прямокутній системі координат. Горизонтальна вісь сітки – вісь часу t , вертикальна – накопиченої частки відмов q . Відмова кожного елемента відображається на сітці у вигляді точки з координатами, що відповідають цьому моменту відмови і накопиченої до цього моменту частки відмов. Якщо всі точки, що відображають відмови, лежать практично на прямій лінії, то розподіл відмов відповідає теоретичному розподілу [9].

Якщо на практиці за результатами аналізу причин відмов елементів на основі встановленого механізму можна визначити тільки можливий вигляд апроксимуючого розподілу, а не його параметри, то при нанесенні на вірогідну сітку експериментальних точок, що відповідають реальним моментам відмов, може утворитися замість прямої лінії з криволінійною початковою ділянкою. Тому випробування необхідно продовжувати, поки кількість відмов не досягне деякого числа k , при якому лінія, що апроксимує розподіл відмов, не почне випрямлятися. Для повного випрямлення підбирають параметр місця γ , при зсуві на який усі експериментальні точки будуть розташовані на прямій лінії. Для цього запропоновано наступну ітераційну процедуру знаходження параметра зсуву γ : проводимо плавну лінію через експериментальні точки, нанесені на вірогідну сітку і дотичну пряму до перетину з віссю часу. Відстань від початку координат до точки перетину по осі часу є першим наближенням значення. Далі зміщуємо абсциси всіх експериментальних точок на значення $\tilde{\gamma}_1$ і через них проводимо плавну лінію. Якщо кривизна лінії ще залишилася, то процедуру повторюємо. Звичайно після двох-трьох процедур одержуємо шукану практично пряму лінію.

прс
ла.
ки,жи
ніс
пом
хід
ділде
накток
виг
чит
відяку
виг
фо
рез
відР
з
п
1
о
г

Описана процедура проілюстрована на рис. 1, де показано два кроки ітерації. Сама процедура не залежить від того, яка кривизна лінії на початковій ділянці – увігнута чи опукла. Від цього залежить тільки напрямок зсуву точок кривої на третій стадії процедури. Точки, які відповідають відмовам на рис. 1, не показані.

Після знаходження оцінки параметра зсуву $\tilde{\gamma}_\phi$ для розподілу відмов у форсованому режимі і побудови на вірогідній сітці апроксимуючої прямої необхідно перевірити відповідність одержаного експериментального розподілу теоретичному. Це зручно здійснити за допомогою критерію узгодження Колмогорова [11]. Для розв'язання поставленої задачі необхідно визначити параметри δ_ϕ і η_ϕ розподілу Вейбулла, які апроксимують одержаний розподіл відмов у процесі випробувань у форсованому режимі.

Оцінку параметрів δ_ϕ і η_ϕ можна зробити методом найменших квадратів за формулами [12]:

$$\bar{\delta}_\phi = \frac{k \sum_{i=1}^k [\ln(t_{i\phi} - \gamma_\phi)] \ln \ln \frac{1}{1 - q_i} \left[\sum_{i=1}^k \ln(t_{i\phi} - \gamma_\phi) \right] \sum_{i=1}^k \ln \ln \frac{1}{1 - q_i}}{k \sum_{i=1}^k [\ln(t_{i\phi} - \gamma_\phi)]^2 - \left[\sum_{i=1}^k \ln(t_{i\phi} - \gamma_\phi) \right]^2};$$

$$\ln \eta_\phi = \frac{\sum_{i=1}^k \ln(t_{i\phi} - \gamma_\phi) - \frac{1}{\delta} \sum_{i=1}^k \ln \ln \frac{1}{1 - q_i}}{k},$$

де k – кількість відмов (експериментальних точок); $t_{i\phi}$ – момент i -ї відмови ($i=1...k$); q_i – накопичена частка відмов на момент t_i .

Отже, тривалість випробувань у форсованому режимі має бути такою, щоб за досягнутою кількістю відмов k можна було оцінити параметри одержаного розподілу. Після цього випробування повинні бути продовжені в нормальному режимі, для якого необхідно визначити показники надійності до одержання ще деякої кількості n відмов. Загальна кількість відмов при цьому буде дорівнювати $k+n$.

Кожну відмову в нормальному режимі випробувань показуємо на вірогідній сітці, на яку вже нанесена випрямлена лінія, що відповідає розподілу відмов у режимі форсованих випробувань (рис. 2). Потім продовжуємо пряму лінію, що відображає розподіл відмов у форсованому режимі, і позначаємо на ній точки накопичених часток відмов у нормальному режимі. Цим точкам відповідають значення $t_{i\phi}'$ (рис. 2), що є прогнозованими моментами відмов елементів, якби випробування продовжувалися у форсованому режимі.

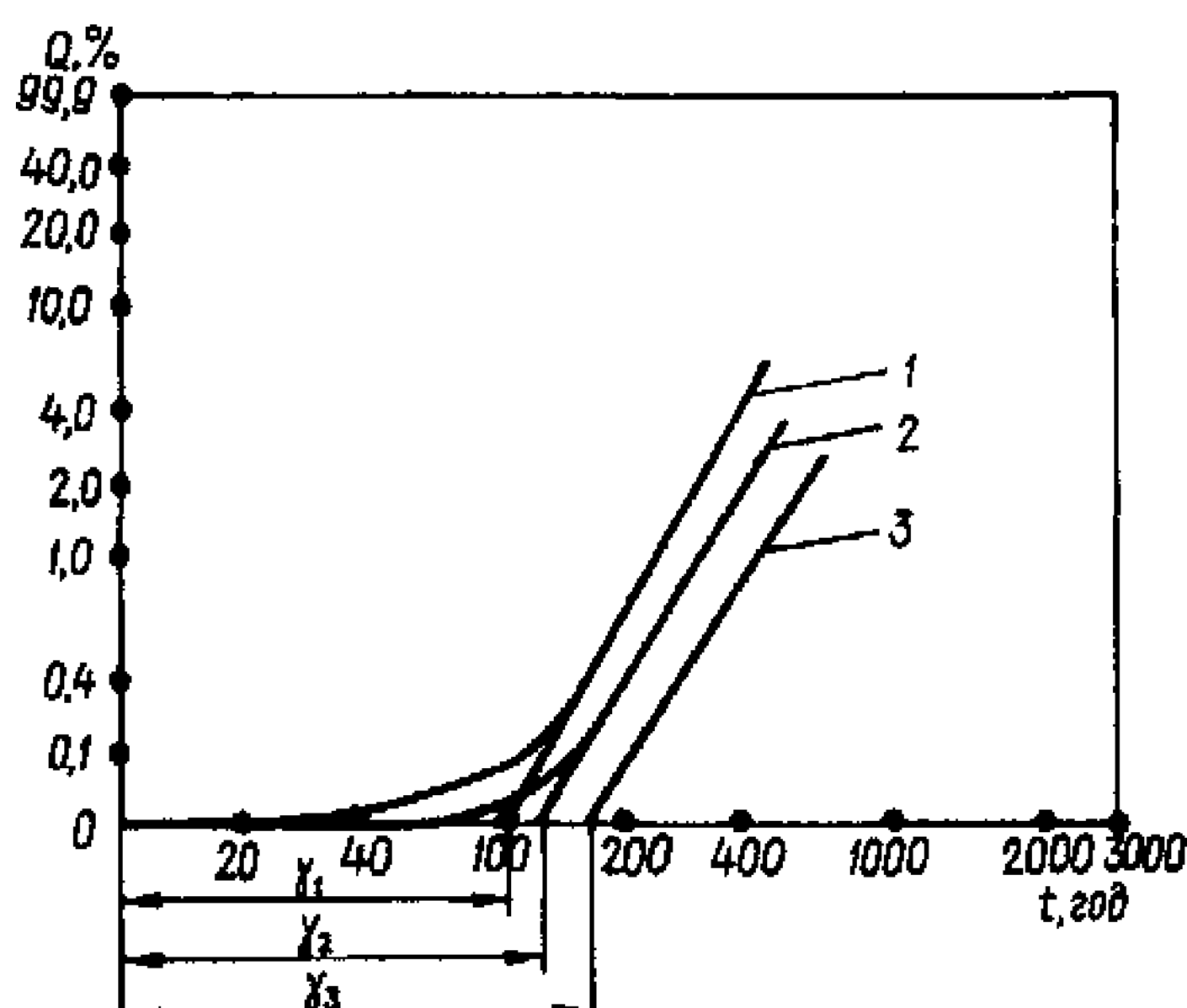


Рис. 1. Ітераційна процедура оцінки параметра зсуву розподілу Вейбулла, що апроксимує розподіл відмов у процесі випробувань:

1 – вихідний розподіл відмов; 2, 3 – розподіли, одержані відповідно після першого і другого кроків ітерації

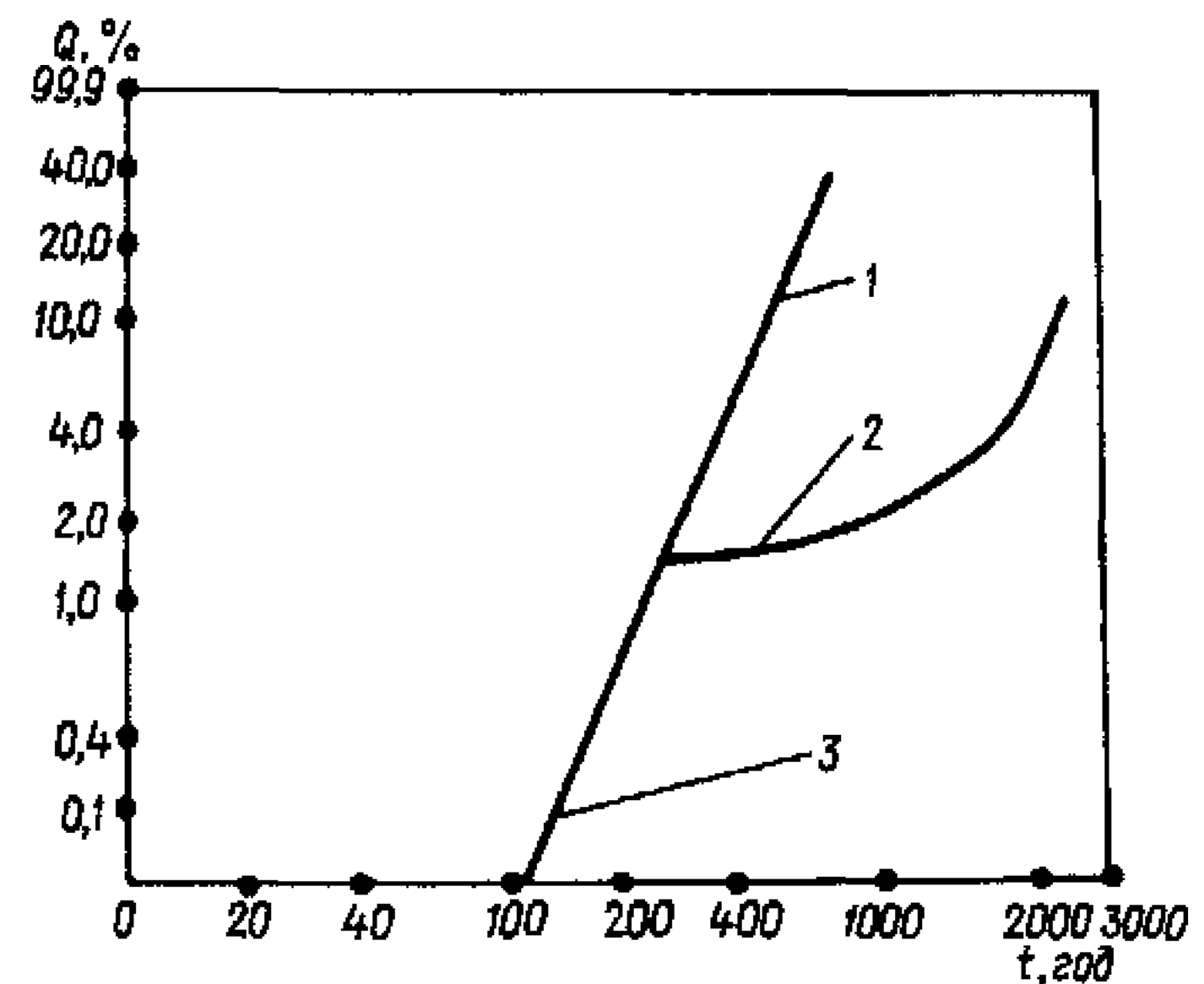


Рис. 2. Оцінка результатів випробувань у форсованих режимах:

1 – апроксимований розподіл відмов для форсованих режимів; 2 – розподіл відмов при нормальних умовах випробувань; 3 – розподіл відмов при форсованому режимі випробувань після ітерації

Далі випробування можна або припинити, оскільки є базова закономірність відмов у форсованому режимі, за якою можна спрогнозувати моменти наступних відмов, або продовжити у форсованому режимі до досягнення заданого рівня накопиченої частки відмов.

Коефіцієнт прискорення випробувань визначається співвідношенням

$$K_y = \frac{\bar{\eta}_n}{\eta_\phi}$$

Для перерахування результатів випробувань у форсованому режимі на нормальний режим необхідно визначити і параметр зсуву:

$$\bar{\gamma}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=k+1}^{r+n} \left[t_{in} - \frac{\bar{\eta}_n}{\eta_\phi} (t'_{i\phi} - \tilde{\gamma}_\phi) \right]$$

Прогнозований час напрацювання в нормальному режимі випробувань \tilde{t}_{qn} , при якому накопичена частка відмов досягне значення q , можна визначити із співвідношення

$$\tilde{t}_{qn} = K_y (t_{q\phi} - \tilde{\gamma}_\phi) + \bar{\gamma}_n,$$

де $t_{q\phi}$ – час випробувань у форсованому режимі, протягом якого накопичена частка відмов досягла значення q .

Отже, запропонований підхід до реалізації прискорених випробувань у форсованих режимах дозволяє ефективно вирішувати практичні задачі організації й оцінки результатів прискорених випробувань виробів, розподіл відмов яких у часі апроксимується, зокрема, розподілом Вейбулла. Аналогічно може бути розв'язана задача й у випадках, коли розподіли відмов апроксимуються іншими видами статистичних розподілів.

Список літератури

1. *Перотте А.И., Сторчак М.А.* Вопросы надежности РЭА. – М.: Сов. радио, 1976. – 84 с.
2. *Смирнов Н.И., Широков В.Б.* Оценка безотказности интегральных микросхем. – М.: Радио и связь, 1983. – 104 с.
3. *Карташов Г.Д.* Физико-статистические принципы расходования ресурса изделий // Электронная техника. Сер.8. – Вып. 6 (48). – 1976. – 36 с.
4. *Карташов Г.Д.* Модели расходования ресурса изделий электронной техники // Управление качеством и стандартизация. – Сер. 8. – Вып.1(473). – М.: ЦНИИ Электроника, 1977. – 76 с.
5. *O'Connor P.T.* Reliability prediction. Help or hoax/Solid State Technology. – 1990. – Vol. 33. – № 8. – P. 237–242.
6. *Hakin E.B.* Reliability predictions: IS Arrhenius emoneons / Solid State Technology. – 1990. – 33. – № 8. – P. 37.
7. *Физико-статистические модели отказов изделий электронной техники и их применение в задачах обеспечения надежности РЭА / С.В. Ленков, З.А. Фишер, В.В. Зубарев и др. / Одесса: Ин-т проблем критичных технологий и надежности радиоэлектроники. – К., 1998. – 22 с. – Рус. – Деп. в ГНТБ Украины 16.02.98, № 102 - Ук.98.*
8. *Ленков С.В., Фишер З.А., Зубарев В.В.* Анализ и экспериментальная апробация моделей отказов дефектных ИЭТ // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 1998. – № 1. – С. 12–14.
9. *Ленков С.В., Савельев А.А., Зубарев В.В.* Повышение эффективности технологических тренировочных прогонов РЭА – один из основных путей обеспечения ее безотказности // Придніпр. наук. вісн. Техн. науки. – 1998. – №27(94). – С. 43–47.
10. *Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д.* Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 212 с.
11. *Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.* Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных: Справ. изд. – М.: Финансы и статистика, 1983. – С. 369–371.
12. *Онопенко Д.И., Катеринич И.И.* Использование результатов электротермотренировки для оперативного контроля надежности БИС в процессе производства // ЭТ. Сер. 8. Управление качеством, стандартизация, метрология и испытания. – 1982 – Вып.1. – С. 93–94.

Стаття надійшла до редакції 21.01.02.