

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-13>

УДК 621.315.592

МИХАЛЕВСЬКИЙ Дмитро

Вінницький національний технічний університет

<http://orcid.org/0000-0001-5797-164X>

e-mail: adotq@ukr.net

СТАЛЬЧЕНКО Олександр

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0003-4764-1502>

e-mail: magicphenix@gmail.com

ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ ЗА РІВНЕМ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ШУМІВ

У статті представлено результати дослідження для розширення можливостей контролю виробів електронної техніки за рівнем низькочастотних шумів для оцінювання кількісних параметрів надійності. Це дає можливість виробникам електроніки визначати відповідні границі допустимих рівнів шуму, на основі яких можна забезпечити відповідний рівень надійності та стабільної роботи пристроїв на основі виробів електронної техніки.

Досліджено нестационарний процес деградації внутрішньої структури виробів електронної техніки на основі інформативного параметра та випадкової похибки для визначення параметрів надійності. Виявлено, що такий процес є подібним до лінійного закону та характеризується математичним очікуванням і дисперсією. Отримано узагальнений аналітичний вираз для випадкового процесу функції надійності виробів електронної техніки, який пов'язує середньоквадратичне значення шумової напруги, границі придатності та інтервал напрацювання на відмову. Параметри функції надійності можуть бути розраховані на основі статистичної обробки результатів експериментальних досліджень.

Встановлено, що рівень власних шумів з часом зростає за законом близьким до лінійного, і випадковий процес зміни інформативного параметра в часі є близьким до моделі лінійної регресії. Це також має місце і для деградації внутрішньої структури.

Ключові слова: вірогідність контролю, низькочастотні шуми, вироби електронної техніки, випадкова похибка, контроль, надійність.

MYKHALEVSKIY Dmytro, STALCHENKO Oleksandr
Vinnytsia National Technical University

ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF ELECTRONIC PRODUCTS BY THE LEVEL OF LOW-FREQUENCY NOISE

The article carries out a study of expanding the possibilities of monitoring electronic equipment products by the level of low-frequency noises for the evaluation of quantitative parameters of reliability. This allows electronics manufacturers to determine the appropriate limits of permissible noise levels, based on which it is possible to ensure the appropriate level of reliability and stable operation of devices based on electronic products.

To determine the reliability parameters, the non-stationary process of degradation of the internal structure of electronic equipment products was investigated based on an informative parameter and a random error. It was found that such a process is similar to a linear law and is characterized by mathematical expectation and dispersion. A generalized analytical expression for the random process of the reliability function of electronic products is obtained, which relates the root mean square value of the noise voltage, serviceability limits, and the failure interval. The parameters of the reliability function can be calculated on the basis of statistical processing of the results of experimental studies.

It was established that the level of intrinsic noise increases over time according to a law close to linear, and the random process of changing the informative parameter over time is close to the linear regression model. This also applies to the degradation of the internal structure. In addition, studies of the random process have shown that it has a linear dependence on the change of the informative parameter over time, and can be calculated on the basis of statistical processing of the results of experimental studies.

Keywords: control probability, low-frequency noise, electronic products, random error, control, reliability.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Контроль рівня НЧ шумів є важливою складовою процесу виготовлення виробів електронної техніки (ВЕТ) та встановлення рівня їх якості. Шуми можуть бути викликані різними факторами впливу, включаючи як дефекти внутрішньої структури так і дією електромагнітних завад, механічних вібрацій, теплових шумів і ін. Відповідно, виробники електроніки повинні встановлювати межі допустимих рівнів шуму, на основі яких можна забезпечити відповідний рівень надійності та стабільної роботи пристроїв на основі ВЕТ (вироби електронної техніки) [1]. Контроль ВЕТ за рівнем низькочастотних шумів, полягає у порівнянні основного інформативного параметра низькочастотного шуму із встановленими границями допуску [2]. В такому випадку, результатом контролю виступає логічне рішення про придатність або непридатність досліджуваного виробу. Але під час процесів старіння внутрішньої структури ВЕТ рівень НЧ шумів зростає, що дозволяє говорити про можливість проводити кількісну оцінку характеристик надійності.

Використовуючи математичні методи прогнозування на основі основного інформативного параметра, такого як середньоквадратичне значення шумової напруги, спробуємо отримати узагальнені аналітичні вирази оцінювання параметрів надійності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій та постановка проблеми

Як відомо [3], багато досліджень вказують на те, що не існує узагальненого процесу який би міг повністю пояснити процеси виникнення низькочастотних шумів у ВЕТ. Разом з тим, з точки зору математичного опису, середньостатистичне оцінювання таких процесів зводиться до спектру типу $1/f$, що пов'язано із сталим параметром часу та нелінійним перетворенням гаусового сигналу. Саме на основі експериментальних досліджень спектру типу $1/f$, можна визначити якісні показники надійності ВЕТ.

Згідно [4], математичні методи оцінювання параметрів надійності ВЕТ можна поділити на дві групи. До першої групи відносяться методи на основі диференціальних рівнянь із заданими початковими умовами. Оцінка надійності заключається у вирішенні цих рівнянь для певних значень часу. До другої групи відносять методи, які оперують із статистичними результатами експериментальних досліджень із використанням методу найбільшої правдоподібності.

Враховуючи [5], на основі прискорених досліджень методом електротермотренуванням із використанням математичної моделі прогнозуючого параметра, було встановлено залежність збільшення рівня НЧ шуму від часу, що передбачає можливість оцінювання кількісних характеристик надійності. Таким чином, мають місце параметри імовірності знаходження виробу в робочому стані в певний момент часу та час напрацювання на відмову. Так як, час напрацювання на відмову було розглянуто у [5], то встановимо закономірність знаходження виробу у придатному стані.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є знаходження узагальнених аналітичних виразів прогнозування надійності на основі середньоквадратичного значення шумової напруги.

Виклад основного матеріалу

Надійність ВЕТ безпосередньо пов'язана із відмовами в процесі експлуатації. Відмови можуть виникати від дії різного роду факторів впливу та мають випадковий характер. Тоді, враховуючи [7], узагальнений опис надійності для ВЕТ можна записати так:

$$P(t) = F(V_1, \dots, V_m, t), \quad V_m = f(\gamma_i, d_j, g_k(r), t), \quad (1)$$

де $(\gamma_1 \dots \gamma_i)$ – фактори, що залежать від дефектів внутрішньої структури; $d_1 \dots d_j$ – фактори, які залежать від недосконалості процесу виготовлення ВЕТ; $g_k(r)$ – фактори, які пов'язані із збільшенням рівня шумів, за рахунок деградації внутрішньої структури ВЕТ в залежності від режиму використання.

Оцінювання надійності на основі виразу (1) є досить трудомістким процесом, в якому необхідно визначити велику кількість невідомих. Як відомо [6], адекватність моделей та достовірність методів оцінювання придатності ВЕТ за рівнем НЧ шумів, виконується на основі методів прискорених досліджень. Тому, в такому випадку, буде доцільним застосування методів регресійного аналізу на основі статистичної обробки результатів експериментальних досліджень [8]. Найбільш загальним методом обробки експериментальних результатів є метод максимальної правдоподібності, який можна записати так:

$$F = \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^R \ln f_i(t_{j,e}, U_i) + \sum_{j=1+N}^N \ln(1 - F_i(t_j, U_i)) \right), \quad (1)$$

де $F_i(t_j, U_i)$ – закон розподілу інформативного параметра за час досліджень t_j ; $f_i(t_{j,e}, U_i)$ – щільність напрацювання на відмову за час t_j для j -ї відмови; N – кількість виробів у партії; R – кількість відмов під час досліджень; m – кількість досліджуваних факторів, що враховується параметрами $g_k(r)$.

При тестуванні ВЕТ за допомогою методів прискореної деградації можуть використовуватись різні режими (збільшений струм колектора, підвищена або понижена температура, коефіцієнт підсилення та ін.), для певної партії із N виробів. Тоді, можна припустити, що середньоквадратичне значення шумової напруги є інформативним параметром за яким можливо прогнозувати кількісний показник надійності ВЕТ. Оцінювання середньоквадратичного значення шумової напруги можна представити як сукупність двох випадкових процесів, і записати наступним чином:

$$U_i(t) = U(t) + \sigma(t), \quad (2)$$

де $U_1(t)$ – випадковий процес, який показує зміну інформативного параметра в часі в процесі деградації напівпровідникової структури; $U_2(t)$ – процес, який враховує випадкові похибки при операціях оцінювання інформативного параметра та залежить від характеристик вимірювального засобу.

Для прискорених досліджень можна використати середньостатистичне значення та інтервал відхилення від нього. Тоді, враховуючи [], випадковий процес зміни інформативного параметра в часі можна записати так:

$$U(t) = \overline{U_{u,0}^2} + \int_0^t \overline{U_u^2(t)} dt, \quad (3)$$

де $\overline{U_{u,0}^2}$ – середньоквадратичне значення шумової напруги, яке визначається із шумової моделі виробу, або як середньостатистичне значення із досліджуваної партії виробів при невідомій моделі; $\overline{U_u^2(t)}$ – випадковий процес, що характеризує ступінь деградації напівпровідникової структури в часі.

Оскільки, при дослідженні партій інтегральних транзисторів та операційних підсилювачів [5], було встановлено, що рівень власних шумів з часом зростає за законом близьким до лінійного то вираз (3), набуде вигляду лінійної регресії, яку можна записати так:

$$U(t) = \overline{U_{u,0}^2} + Kt, \quad (4)$$

де K – коефіцієнт, який показує швидкість зміни середньоквадратичного значення шумової напруги.

Для випадкового процесу вимірювальна величина визначається методом усереднення, тому математичне очікування можна записати так:

$$M_U(t) = M(\overline{U_{u,0}^2}) + M(K)t. \quad (5)$$

При технологічному процесі виготовлення ВЕТ рівень власних шумів залежить від технології виготовлення, тоді є доцільним застосувати функцію зв'язку:

$$K_U(t) = M\left(\left(\overline{U_{u,0}^2} - M(\overline{U_{u,0}^2})\right) \cdot (Kt - M(Kt))\right). \quad (6)$$

Для оцінки функції зв'язку необхідно знати властивості самого процесу зміни деградації внутрішньої структури виробу. Враховуючи, що рівень власних шумів з часом зростає за законом близьким до лінійного, можна зробити припущення, що деградація змінюється також за таким же законом. Тому, всі процеси деградації можна привести до розгляду тільки лінійних характеристик зміни інформативного параметра в часі. Таким чином, вираз (6) для швидкості зміни початкового значенням інформативного параметра у часі набуде наступного вигляду:

$$K_U(t_2, t_1) = D(\overline{U_{u,0}^2}) + (t_2 - t_1)K_{36} + D(K)t_2t_1, \quad (7)$$

де K_{36} – коефіцієнт зв'язку між двома випадковими величинами; D – дисперсія випадкової величини. Використовуючи умову $t_2 = t_1$, вираз (7) можна записати як, дисперсію випадкового процесу:

$$D_U(t) = D(\overline{U_{u,0}^2}) + 2t(K_{36}) + t^2 D(K). \quad (8)$$

Враховуючи вираз (8) функцію зв'язку прийме наступний вигляд:

$$K_U(t_2, t_1) = D_U(t) + \frac{dD_U(t)}{2dt}(t_1 - t_2). \quad (9)$$

Як видно із наведених вище виразів, випадковий процес має лінійну залежність зміни інформативного параметра в часі, та може бути розрахований на основі статистичної обробки результатів експериментальних досліджень. Наприклад, для середньоквадратичного значення шумової напруги можна записати такі вирази:

$$M(\overline{U_{u.0}^2}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \overline{U_i}, \quad D(\overline{U_{u.0}^2}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \overline{U_i} - \overline{U_i} \right|^2, \quad (10)$$

де U_i – i -показ засобу вимірювання.

Враховуючи нормальний розподіл основного інформативного параметра надійності ВЕТ за рівнем НЧ шумів, а також його лінійну зміну в часі, аналогічні вирази можна отримати для випадкового процесу $\sigma(t)$. Тоді отримаємо:

$$\sigma(t) = \sigma_0 + Bt, \quad (11)$$

де B – коефіцієнт, який показує швидкість зміни випадкової похибки.

Оскільки оцінювання випадкової похибки пов'язано із інформативним параметром, то отримаємо наступні вирази:

$$\begin{aligned} M_{\sigma}(t) &= M(\sigma_0) + M(B)t, \\ M(\sigma_0) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| M(\overline{U_{u.0}^2}) - \overline{U_i} \right|, \\ D(\sigma_0) &= \frac{0,079}{n-1} \sum_{i=1}^n \left| \left| M(\overline{U_{u.0}^2}) - \overline{U_i} \right| - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| M(\overline{U_{u.0}^2}) - \overline{U_i} \right| \right|^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Таким чином, існує нестационарний процес деградації внутрішньої структури ВЕТ, на основі інформативного параметра та випадкової похибки, який є подібним до лінійного закону та характеризується математичним очікуванням і дисперсією. Задаючи границю допуску та враховуючи вирази (4) і (11), функцію надійності можна записати так:

$$\begin{aligned} P(t) &= \frac{\left(0,5 - \Phi \left(\frac{t - M(t)}{M(\sigma)} \right) \right)}{\left(\Phi \left(\frac{t_2 - M(t)}{M(\sigma)} \right) - \Phi \left(\frac{t_1 - M(t)}{M(\sigma)} \right) \right)}, \\ M(t) &= (\overline{U_{ep}} - M(U)) / K, \quad M(\sigma) = \sigma_0 / B, \end{aligned} \quad (13)$$

де Φ – нормована функція Лапласа; $\overline{U_{ep}}$ – граничне значення шумової напруги для придатних ВЕТ.

Вираз (12) дозволяє розраховувати надійність ВЕТ враховуючи основний інформативний параметр на основі досліджень їх власних НЧ шумів. Інтервал $t_2..t_1$ визначає середнє значення щільності напрацювання на відмову. Недоліком оцінювання надійності за виразом (13) є необхідність встановлення початкових значень випадкового процесу основного інформативного параметра на основі експериментальних досліджень.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Отримано узагальнений аналітичний вираз для випадкового процесу функції надійності ВЕТ який пов'язує середньоквадратичне значення шумової напруги, границі придатності та інтервал напрацювання на відмову.
2. Встановлено, що рівень власних шумів з часом зростає за законом близьким до лінійного, і випадковий процес зміни інформативного параметра в часі є близьким до моделі лінійної регресії. Це також має місце і для деградації внутрішньої структури.
3. Параметри функції надійності можуть бути розраховані на основі статистичної обробки результатів експериментальних досліджень.

Література

1. Михалевський Д.В., Кичак В.М. Метод безпосереднього прогнозування надійності виробів електронної техніки за рівнем НЧ шуму. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, 2008, № 1, с. 196-203.
2. Кичак В.М., Михалевський Д.В., Стронський В.В. Оцінка якості інтегральних транзисторів за допомогою низькочастотних шумів. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, Хмельницький, 2005, №2, с.177-18.
3. Hei Wong. Low-frequency noise study in electron devices: review and update. [Microelectronics Reliability. Volume 43, Issue 4](#), 2003, P. 585-599. doi: 10.1016/S0026-2714(02)00347-5

4. H.G. Leventhall, [P. Pelmeur](#), [S. Benton](#). A Review of Published Research on Low Frequency Noise and its Effects. Report. Department for Environment, Food and Rural Affairs. 2003. 89p.
5. Михалевський Д.В. Прогнозування часу напрацювання на відмову виробів електронної техніки за рівнем НЧ шуму / ВОТТП-2012: матеріали одинадцятої Міжнар. науково-технічної конф., Хмельницький, 5-8 червня 2012 р. – Хмельницький, 2012. – С. 55–56.
6. Михалевський Д.В. Математична шумова модель інтегральних операційних підсилювачів для прогнозування надійності за рівнем низькочастотного шуму / В.М. Кичак, Д.В. Михалевський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – №3. – С. 102-108.
7. ДСТУ 2864-94 Надійність техніки експериментальне оцінювання та контроль надійності. Чинний від 01.01. 97 (12-95 с.32). Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 1997. 8 с.
8. D. Mykhalevskiy. Devising a technique to evaluate fluctuations in the main parameters of a wireless channel of the 802.11 standard. Easten-European Journal of Enterprise Technologies, № 6/9 (108), pp. 18–24. 2020. DOI: 10.15587/1729- 4061.2020.218720.

References

1. Mykhalevskiy D.V. Metod bezposerednoho prohozuvannia nadiinosti vyrobiv elektronnoi tekhniki za rivnem NCh шуму / D.V. Mykhalevskiy, V.M. Kychak // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2008. – № 1. – S. 196-203.
2. Kychak V.M. Otsinka yakosti itehralnykh tranzystoriv za dopomohoiu nyzkochastotnykh шумів / V.M. Kychak, D.V. Mykhalevskiy, V. V Stronskyi // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh, Khmelnytskyi, 2005, №2, s.177-18.
3. Hei Wong. Low-frequency noise study in electron devices: review and update. Microelectronics Reliability. Volume 43, Issue 4, 2003, P. 585-599. doi: 10.1016/S0026-2714(02)00347-5
4. H.G. Leventhall, P. Pelmeur, S. Benton. A Review of Published Research on Low Frequency Noise and its Effects. Report. Department for Environment, Food and Rural Affairs. 2003. 89p.
5. Mykhalevskiy D.V. Prohozuvannia chasu napratsiuvannia na vidmovu vyrobiv elektronnoi tekhniki za rivnem NCh шуму / ВОТТП-2012: materialy odynadtsiatoi Mizhnar. naukovo-tekhnichnoi konf., Khmelnytskyi, 5-8 chervnia 2012 r. – Khmelnytskyi, 2012. – S. 55–56.
6. Mykhalevskiy D.V. Matematychna shumova model intehralnykh operatsiinykh pidsylyuvachiv dlia prohozuvannia nadiinosti za rivnem nyzkochastotnoho шуму / V.M. Kychak, D.V. Mykhalevskiy // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2008. – №3. – S. 102-108.
7. DSTU 2864-94 Nadiinist tekhniki eksperymentalne otsiniuvannia ta kontrol nadiinosti. Chynnyi vid 01.01. 97 (12-95 s.32). Vyd. ofits. Kyiv : UkrNDNTs, 1997. 8 s.
8. D. Mykhalevskiy. Devising a technique to evaluate fluctuations in the main parameters of a wireless channel of the 802.11 standard. Easten-European Journal of Enterprise Technologies, № 6/9 (108), pp. 18–24. 2020. DOI: 10.15587/1729- 4061.2020.218720.