

Кичак В. М., Михалевський Д. В.

Вінницький національний технічний університет

Яблонський В. Ф.

Вінницька філія ВАТ Укртелеком

## МЕТОД БЕЗПОСЕРЕДНЬОГО ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ ЗА РІВНЕМ НЧ ШУМУ

### Вступ

При проектуванні та виготовленні нових виробів електронної техніки (ВЕТ), а також пристроїв на їх базі потрібно враховувати різні фактори: шумові параметри, електричні характеристики, вплив паразитних зв'язків, температурні характеристики і т. ін. Визначення шумових характеристик може надати певну інформацію про стан того чи іншого електронного виробу. Наприклад ВЕТ, що використовуються у високоякісній звуковідтворюючій апаратурі повинні мати якомога нижчий коефіцієнт власних шумів. З іншого боку низькочастотні шумові характеристики можуть надати інформацію про надійність, що дає змогу проводити прогнозування надійності виробів на етапі виготовлення та вхідному контролю.

Неруйнівний контроль надійності проводиться за експериментально вимірними параметрами. Для вимірювань цих параметрів існує чотири основних методи [1]: метод порівняння, компенсаційний, модуляційний і метод безпосереднього вимірювання шумової напруги. Перший метод базується на порівнянні шумів які досліджуються із еталонним джерелом шуму. При цьому вимірюються відносні значення і є доцільним використовувати коефіцієнт шуму. Недоліком даного методу є неможливість встановлення інтервалу контролю для партії ВЕТ, рівень шумів яких є невідомим. Компенсаційний і модуляційний методи забезпечують високу чутливість і точність вимірювань на високих частотах, але використовувати його для вимірювання НЧ шумів недоцільно. Останній метод полягає у вимірюванні ефективного параметра шуму на певній частоті за допомогою високочутливого вимірювача. Чутливість вимірювача визначається внутрішніми шумами. Цей метод є найоптимальнішим і нескладним у реалізації. Саме на базі цього методу вимірювання шумових характеристик, у даній роботі запропоновано підхід щодо прогнозування надійності ВЕТ за рівнем НЧ шуму.

### Суть методу прогнозування надійності

Прогнозування надійності ВЕТ проводиться в два етапи. Це вимірювання інформативного параметра шуму на будь-якій частоті від 10 Гц до 1 кГц і подальша обробка результатів із винесенням рішення (надійний, ненадійний). Об'єкт контролю, вмикається за відповідною схемою, яка забезпечує оптимальні умови для вимірювання шуму. Наприклад, для біполярного транзистора це схема зі спільним емітером. На виході має місце шумовий сигнал, який визначається середньоквадратичним значенням шумової напруги в певному діапазоні частот. Для виробів електронної техніки його можна записати так [2]:

$$\overline{e_{швух}^2} = \int_{f_1}^{f_2} K(f) \overline{e_{швх}^2(f)} df,$$

де  $K(f)$  – коефіцієнт передачі схеми;  $\overline{e_{швх}^2(f)}$  – еквівалентна шумова напруга, яка визначається із шумової моделі ВЕТ.

Використовуючи розрахунки шумової напруги для ВЕТ підінтегральний вираз запишемо як

$$\overline{e_{швух}^2} = \int_{f_1}^{f_2} \overline{U_{ш}^2(f)} df, \quad (1)$$

де  $U_{ш}^2$  – визначає повний рівень шумів на низьких частотах із врахуванням паразитних і зворотніх зв'язків схеми вмикання ВЕТ і коефіцієнта  $K(f)$ .

Після підсилення і фільтрації вираз (1) запишеться

$$e_{U_{ш}} = k_1 k_2 k_{\phi} \int_{f_1}^{f_2} \overline{U_{ш}^2(f)} df.$$

Для реєстрації рівня шуму необхідно використовувати квадратичний детектор. Характеристика перетворення квадратичного детектора для малого рівня сигналу має вигляд [3]

$$i_i(t) = i_0(t) + a_1(t)e(t) + a_2e^2(t),$$

де  $a_1, a_2$  – крутість вольт-амперної характеристики діода.

Оскільки шум характеризується середньоквадратичним значенням, то на виході діода приріст струму буде визначатися за виразом

$$i_\delta = \frac{1}{2} S_\delta U_{ск}^2,$$

де  $U_{ск}^2 = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} e_{U_{ш}}^2(t) dt$  – напруга на виході детектора із крутістю  $S_\delta$ .

Таким чином рівняння перетворення шумового сигналу на виході детектора буде

$$U = \frac{k_1^2 k_2^2 k_\phi^2 S_\delta R_n}{2T_c} \int_0^{T_c} \left( \int_{f_1}^{f_2} U_{ш}^2(f) df \right)^2 dt, \quad (2)$$

де  $R_n$  – опір навантаження детектора.

Отже наведена вище формула є перетворенням шумового сигналу на виході вимірювального блоку, який забезпечує рівень вхідного сигналу АЦП.

В результаті аналого-цифрового перетворення отримаємо

$$N = \frac{U \cdot k_3}{U_{он}} \cdot 2^n, \quad (3)$$

де  $n$  – розрядність регістра наближення АЦП;  $U_{он}$  – рівень опорної напруги;  $k_3$  – коефіцієнт підсилення внутрішнього підсилювача мікроконтролера.

Підставивши рівняння (2) у (3) отримаємо

$$N = 2^n \frac{k_1^2 k_2^2 k_3 k_\phi^2 S_\delta R_n \int_0^{T_c} \left( \int_{f_1}^{f_2} U_{ш}^2(f) df \right)^2 dt}{2T_c U_{он}}. \quad (4)$$

На рис. 1 показана статична характеристика вимірювального пристрою розрахована за виразом, яка справедлива для двадцяти чотирьох розрядів квантування АЦП.

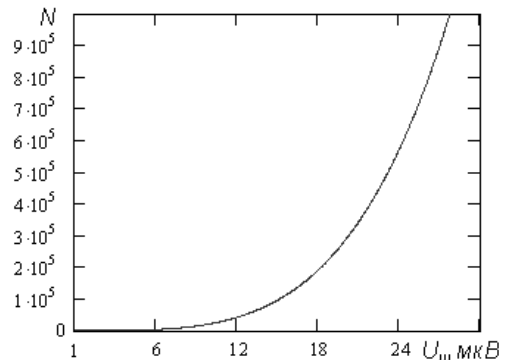


Рис. 1. Статична характеристика пристрою прогнозування надійності

### Структурна схема пристрою контролю надійності ВЕТ

Для прогнозування надійності потрібно мати відповідний вимірювальний прилад із логічним аналізатором надійності ВЕТ. Використовуючи наведені вище результати, було побудовано прилад, структурна схема якого наведена на рис. 2.

Тут використовується метод безпосереднього вимірювання напруги. Схема вмикання (СВ) і блок режиму (БР) забезпечують оптимальний режим роботи ВЕТ і виконанні окремим змінним блоком, на виході якого формується шумова напруга  $U_{ш}$ . Підсилювач напруги забезпечує підсилення шуму до рівня сприйняття аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Підсилювач складається із двох частин: попереднього підсилювача, із коефіцієнтом підсилення  $k_1$  і кінцевого  $k_2$ . Попередній підсилювач узгоджує СВ із вимірювальним блоком пристрою. Він є малозумлячим, оскільки вносить основний рівень власних шумів вимірювальної схеми, і побудований на інтегральній схемі AD8599 із внутрішнім рівнем шуму 1,5 нВ на частотах вище 10 Гц. Діапазон частот  $f_2 - f_1$  вибирається смуговим фільтром із коефіцієнтом послаблення  $k_\phi$ . Середньо-квадратичний детектор (СКД) виділяє середньо-квадратичне значення шуму, яке подається на аналого-цифровий перетворювач. Для оцінки викидів імпульсного шуму введена ланка із компаратором (К). Для визначення систематичної похибки пристрою використовується внутрішній цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) мікроконтролера MSC 1212 із згладжуючим фільтром нижніх частот (ФНЧ).

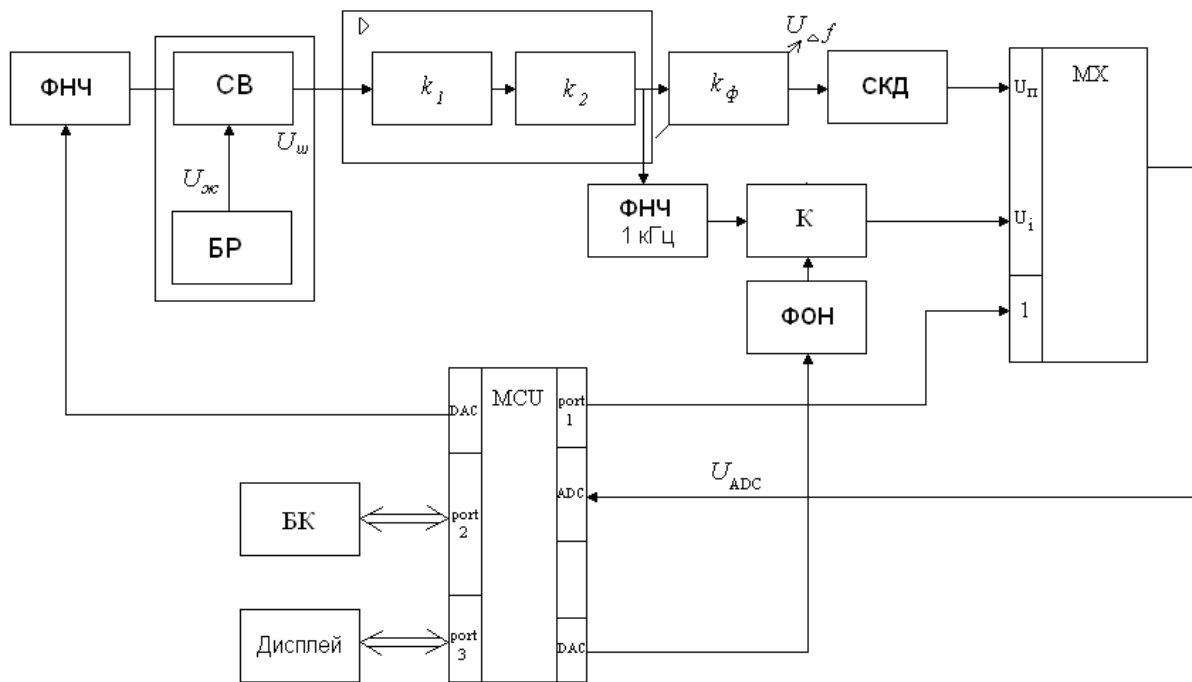


Рис. 2. Структурна схема пристрою для прогнозування надійності ВЕТ

В деяких ВЕТ, а особливо в інтегральних схемах, можуть мати місце імпульсні шуми. Цей вид шуму являє собою послідовність імпульсів постійної амплітуди, рівень яких більший у два і більше рази від власних шумів. Тому для реєстрації цього виду шумів введена схема із використанням компаратора (К). Реєстрація цих імпульсів полягає в наступному. Із вбудованого ЦАП подається еталонний рівень шумового сигналу, на основі якого у формувачі опорної напруги формується пороговий рівень допустимої амплітуди. По суті це коло автоматичного регулювання порогу компаратора. На інший вхід подається сигнал із основного підсилювача в смузі від нуля до одного кілогерца. Компаратор реєструє імпульси шуму і подає їх на вхід АЦП, де протягом заданого часового інтервалу проводиться аналіз наявності імпульсів.

#### Визначення вимірювального інтервалу

Процес прогнозування надійності ВЕТ передбачає порівняння вимірюваного значення шуму із еталонним. На результат вимірювань впливає похибка вимірювального засобу. Тому для контролю за рівнем шумової напруги можна задати допустимий інтервал, за яким будуть зрівнюватись результати вимірювань [4]. Визначивши цей інтервал можна чітко визначити надійний чи ненадійний виріб.

Спершу визначимо похибку вимірювального засобу. Шум є нестационарним процесом, тому для отримання достовірного результату із імовірністю більше 0,995 необхідно провести до тисячі вимірювань інформативного параметра. Похибка вимірювання визначає довірковий інтервал, у який попадають виміряні значення.

Використовуючи методику визначення похибок [5], для даного пристрою систематична похибка визначається

$$\delta_{сист} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{абс.і} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |U_n - U_i|,$$

де  $\delta_{абс.і}$  – абсолютна похибка  $i$ -го вимірювання;  $U_n$  – нормоване значення отриманого сигналу.

Нормоване значення визначається за формулою

$$U_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i.$$

Випадкова похибка для кожного вимірювання складе

$$\delta_{вип.і} = \left| \delta_{абс.і} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{абс.і} \right|.$$

Середньо-квадратичне відхилення випадкової похибки визначається як

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\delta_{\text{вуні}})^2.$$

Довірковий інтервал випадкової похибки складе

$$\delta_{\text{дов}} = t \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 0,079 \sigma,$$

де  $t$  – коефіцієнт Стюдента.

Таким чином для даного пристрою діапазон вимірювальної величини складе

$$U_{\text{вим}} = U \pm (\delta_{\text{сист}} + \delta_{\text{дов}})$$

або

$$U - \delta_{\text{сист}} - 0,079 \sigma \leq U_{\text{вим}} \leq U + \delta_{\text{сист}} + 0,079 \sigma. \quad (5)$$

Вимірювальний пристрій по суті є вимірювачем напруги із діапазоном вимірювання від 1 мВ до 2,5 В. При цьому основна допустима відносна похибка вимірювального перетворювача визначається за формулою [5]

$$\delta_o = \pm \left( \delta_{\text{max}} + \delta_{\text{min}} \left( \frac{U_k}{U} - 1 \right) \right),$$

де  $\delta_{\text{max}}$  і  $\delta_{\text{min}}$  – відповідно приведені похибки на верхньому і нижньому діапазонах вимірювання;  $U_k$  – максимальне значення діапазону вимірювань напруги пристрою.

Графік залежності похибки в діапазоні вимірювання наведений на рис. 3 крива а. Як видно із графіка при малих значеннях напруги похибка вимірювання збільшується. Тому для зменшення похибки, діапазон вимірювання було поділено на три частини (рис. 3 криві б і в).

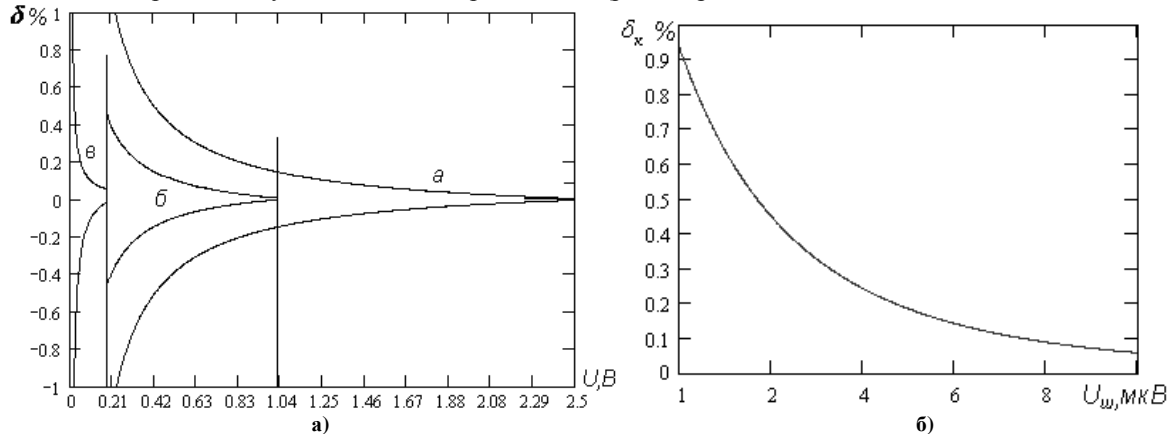


Рис.3. Основна допустима похибка а) і похибка квантування б)

Похибка квантування аналого-цифрового перетворювача визначається за виразом [6], графік якої представлений на рис. 3 б

$$\delta_k = \frac{100\%}{N} = \frac{2T_c U_{on}}{2^n k_1^2 k_2^2 k_3^2 k_\phi^2 S_\phi R_n \int_0^{T_c} \left( \int_{f_1}^{f_2} U_w^2(f) df \right) dt}.$$

Як видно із графіка цей вид похибки має максимальне значення на нижньому вимірювальному діапазоні, яке не перевищує 1 %.

#### Визначення допустимого інтервалу контролю надійності ВЕТ

Після операції вимірювання рівня шумової напруги слідує операція оцінки надійності. Тут має місце два випадки. Перший випадок має місце коли значення рівня контролю вже відоме, наприклад, за попередніми дослідженнями. Другий випадок передбачає здійснення дослідження і встановлення рівня контролю для певної вибірки виробів, для яких він є невідомим. На етапі виготовлення виробів використовується саме другий випадок. Тут проводяться вимірювання для кожного елемента окремо.

Визначивши довірковий інтервал вимірювального засобу, постає питання у виборі меж інтервалу прогнозування надійності ВЕТ. Раніше було встановлено, що ненадійними виробами можна вважати вироби рівень власних НЧ шумів яких перевищує допустимий у 2 і більше рази [1]. Сучасні дослідження [7,8,9] показують, що встановлення такого діапазону є недоцільним і його треба зменшувати. Це стає можливим при використанні високоточних вимірювачів.

Таким чином для вибірки із  $m$  виробів інтервал контролю можна записати так:

$$U_n - \Delta_{\kappa 1} \leq U_{вим} \leq U_n + \Delta_{\kappa 2},$$

де  $U_n$  – номінальне значення шумової напруги;  $\Delta_{\kappa 1}, \Delta_{\kappa 2}$  – допустимий інтервал контролю надійності.

Для  $m$  виробів номінальне значення шумової напруги можна визначити так

$$U_n = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m U_{n,i},$$

де  $U_{n,i}$  – нормоване значення напруги кожного виробу

Із врахуванням (5) допустимий інтервал можна записати так

$$U_n - \Delta_{\kappa 1} \leq U_{вим} + \delta_{сист} + 0,079\sigma \leq U_n + \Delta_{\kappa 2}.$$

Для прогнозування надійності використаємо верхню межу допуску. Таким чином

$$U_{вим} \leq U_n - \delta_{сист} - 0,079\sigma + \Delta_{\kappa 2}.$$

Вибираючи допустимий інтервал контролю надійності більшим за значення власного шуму у півтора рази отримуємо

$$U_{вим} \leq 2,5U_n - \delta_{сист} - 0,079\sigma.$$

або

$$U_{вим} \leq 2,5 \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \right) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i - U_i \right| - 0,079 \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i - U_i \right| - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i - U_i \right| \right)^2}. \quad (6)$$

Випадкова похибка є найбільш непередбачувана тому умова контролю надійних виробів відносно неї запишеться

$$\sigma \leq \frac{2,5U_n - U_{вим} - \delta_{сист}}{0,079}. \quad (7)$$

Аналогічно визначається умова для потенційно ненадійних виробів

$$\frac{2,5U_n - U_{вим} - \delta_{сист}}{0,079} < \sigma < \infty \quad (8)$$

Таким чином, за виразом (6), на етапі контролю, можна отримати межу допуску для будь-якої вибірки ВЕТ, шумові характеристики яких невідомі. Всі ВЕТ, які задовільняють умову (6) вважаються високонадійними.

#### Алгоритм прогнозування надійності

Даний метод прогнозування надійності базується на безпосередньому вимірюванні інформативного параметра. Таким чином, спочатку проводиться вимірювання власного НЧ шуму виробу, а потім оцінюється його надійність. Алгоритм роботи наведений на рис. 4.

Спочатку відбувається ініціалізація мікроконтролера і його периферійних пристроїв. Після запуску програми АЦП надається команда встановлення циклічної роботи і лічильнику вимірювань  $N$  присвоюється значення 1000. Відомий інтервал контролю надійності можна ввести за допомогою клавіатури (значення  $K$ ), якщо ні, то залишається рівним нулю.

Потім проводиться корекція похибки вимірювання. Із мікроконтролера за допомогою ЦАП формується тестовий шумовий сигнал із значенням нижнього вимірювального діапазону 1 мВ і визначається коефіцієнт коригування.

Після встановлення першого входу мультимплексора, шляхом подачі логічної одиниці із першого порта, виконується запуск АЦП. В результаті отримується квантований відлік сигналу, який описується виразом (4). Отриманий код заноситься до оперативної пам'яті і значення лічильника  $N$  зменшується на одиницю. За допомогою циклічної операції у пам'яті створюється масив даних із тисячі вимірювань. При цьому коли  $N$  стає рівним нулю вимірювальний етап завершується.

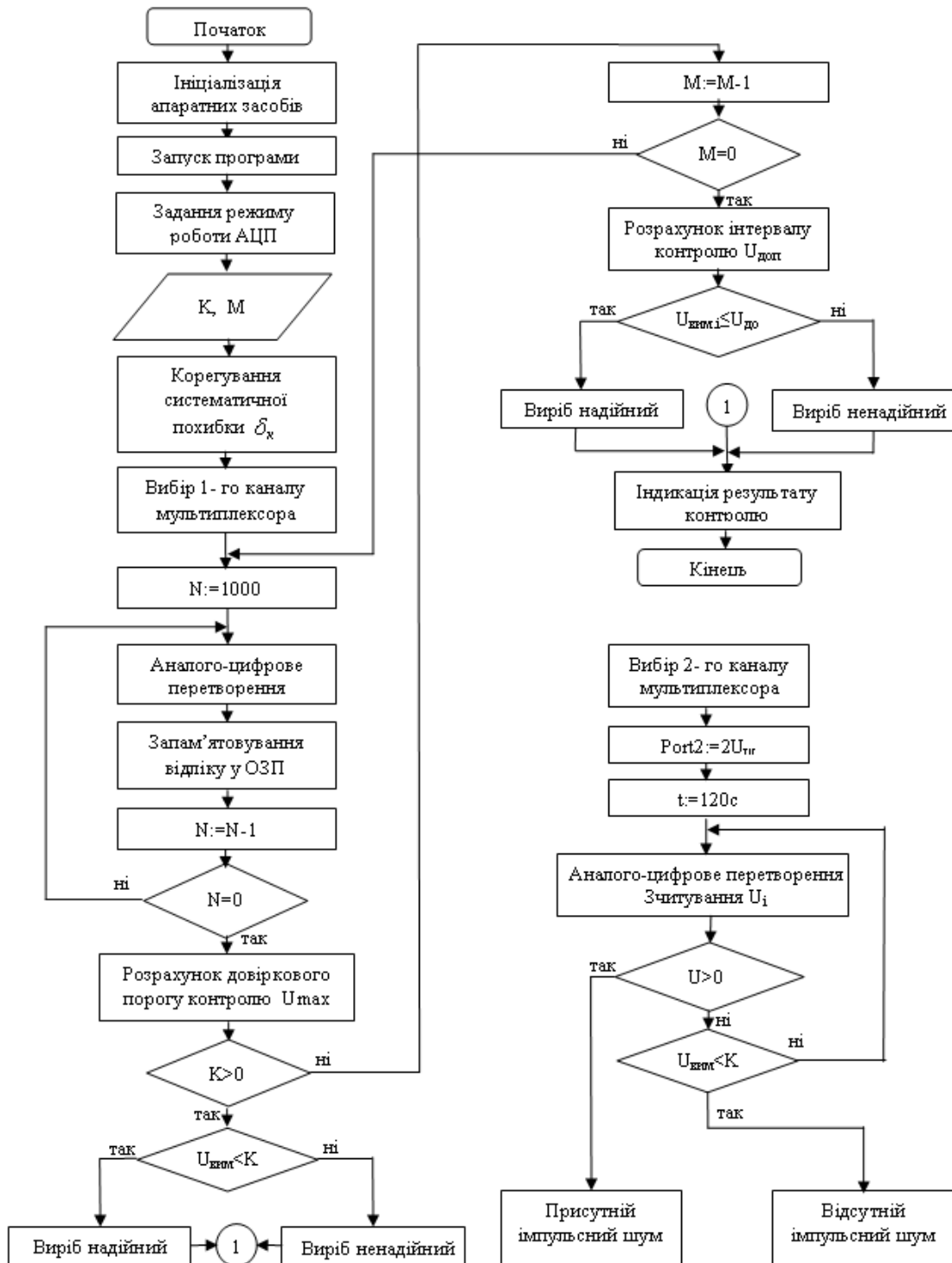


Рис. 4. Алгоритм роботи пристрою безпосереднього прогнозування надійності

Другий етап вимірювання полягає в обробці отриманого масиву даних. Цей етап полягає у знаходженні параметра  $U_{max}$ , яке порівнюється із заданим значенням  $K$ . Спочатку знаходиться середнє значення масиву даних. Потім визначається значення похибки і встановлюється довірковий

інтервал вимірювань за (5) із врахуванням коригувального коефіцієнта  $\delta_k$ . Оскільки інформативним параметром є верхній діапазон то

$$U_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i + (\delta_{\text{сист}} - \delta_k) + 0,079\sigma.$$

Наступним кроком є перевірка заданого порогу контролю  $K$ . Якщо поріг заданий, то проводиться порівняння його із вимірним значенням. При виконанні умови  $U_{\max} < K$  виріб визнається надійним із виводом інформації на екран. В протилежному випадку виріб визнається ненадійним.

Інша річ коли поріг контролю є невідомим. Тоді для цього випадку передбачено визначення меж контролю виходячи із випадкової вибірки однотипних виробів. Кількість таких виробів вводиться і присвоюється параметру  $M$ . Для кожного виробу проводиться процедура вимірювань, яка була описана вище. Таким чином у оперативній пам'яті створюється масив даних у формі матриці. Потім на другому етапі, за аналогічним методом, проводиться статистична обробка результатів. Інтервал допустимого контролю  $U_{\text{дон}}$  визначається за нерівністю 6, що є пороговим значенням для надійних виробів. Потім проводиться перевірка вимірного значення шуму кожного виробу із пороговим значенням. Якщо виконується нерівність  $U_{\text{вим}} \leq U_{\text{дон}}$ , то виводиться інформація про надійність виробу, в протилежному випадку виріб є ненадійним.

Після подачі логічного нуля на перший порт встановлюється другий вхід мультиплексора. Цим вмикається схема перевірки ВЕТ на наявність імпульсного шуму. Опорна напруга компаратора вибирається із вимірної раніше шумової напруги. На порт ЦАП подається сигнал  $2U_{\text{ш}}$ . Потім проводиться встановлення таймера вимірювань  $t$ . Далі проводиться перетворення напруги  $U$ . Якщо із компаратора прийшов імпульс  $U > 0$ , то, робиться висновок про наявність імпульсного шуму. При невиконанні цієї умови протягом 120с. – виріб є високонадійним.

### Висновки

Отже в даній роботі запропоновано метод прогнозування надійності виробів електронної техніки із використанням безпосереднього вимірювання інформативного параметра. Для реалізації даного методу було спроектовано прилад, в якому використовуються операція вимірювання і операція аналізу інформації контролю. В приладі застосовано автоматичну корекцію систематичної похибки. Вимірювання проводиться в діапазоні низьких частот від 10 до 500 Гц із смугою 20 Гц із загальною похибкою не більше 2%, а також використано систему прийняття рішень, що дозволяє виносити результат контролю надійності ВЕТ із імовірністю не менше 0,995.

### Література

1. Пряников В. С. Прогнозирование отказов полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1978. – 112 с.
2. Букингом М. Шумы в электронных приборах и системах: Пер. с англ. / Под. ред. В. Н. Губанкова. – М.: Мир, 1986. – 400с.
3. Измерения в электронике: Справочник / В. А. Кузнецов, В. А. Долгов, В. М. Коневских и др.; Под ред. В. А. Кузнецова. – М.: Энергоатомиздат, 1987 – 512 с.
4. Дунаев Б. Б. Точность измерений при контроле качества. – К.: Техніка, 1981. 152с.
5. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1991. – 304с.
6. Измерения и контроль в микроэлектронике: Учебное пособие по специальностям электронной техники/Дубовой Н.Д., Осокин В.И., Очков А.С. и др.; Под ред. А.А.Сазонова.- М.:Высш. Шк.,1984.- 367с.
7. Методы диагностики полупроводниковых изделий с использованием электростатических разрядов / М.И. Горлов, В.А. Емельянов, И.И. Рубцевич, Д.Ю. Смирнов // Микроэлектроника. 2005. Т. 34. № 3. С. 27 – 36.
8. Использование уровня шумов для контроля полупроводниковых изделий при термоциклировании / М.И. Горлов, Д.Ю. Смирнов, Ю.Е. Сегал, А.В. Емельянов // Известия вузов. Электроника. 2005. № 6. С. 89 – 92.
9. Диагностические методы оценки надежности полупроводниковых изделий с использованием электростатических разрядов / М. И. Горлов., В. А. Емельянов, А. Г. Адамян, А. П. Жарких, А. В. Строгонов // Инженерная микроэлектроника. №10. 2002. С. 30-33.

**Кичак Василь Мартинович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри телекомунікаційних систем та телебачення.

**Михалевський Дмитро Валерійович** – аспірант кафедри телекомунікаційних систем та телебачення.

Тел. 80963030602,

E-Mail: adotq@ukr.net

Вінницький національний технічний університет

**Яблонський Віктор Феодосійович** – кандидат технічних наук, директор Вінницької філії ВАТ Укртелеком.