

УДК 681.518.3.672:51

Костянтин Янгурський, Ірина Атаманова  
Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій

## ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСОВОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ЕТАЛОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРЕЦИЗІЙНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ

© Янгурський Костянтин, Атаманова Ірина, 2003

**Пропонується метод статистичної класифікації еталонних елементів для прогнозування часової стабільності прецизійних вимірювальних засобів. Наведені результати практичної реалізації алгоритму статистичної класифікації кремнієвих стабілітронів.**

**A method of reference elements statistical classification for time stability prediction of precise measuring instruments is proposed. The results of algorithm realization for Zener diodes statistical classification are presented.**

Однією з найважливіших якісних характеристик сучасних прецизійних електро-радіовимірювальних засобів є їх часова стабільність в процесі експлуатації, що визначає як значення сумарної похибки вимірювання, так і величину міжповірного інтервалу. В переважній більшості схемотехнічних рішень забезпечення точності та стабільності вимірювання покладається на еталонні елементи, порівняно з параметрами (або сигналами) яких визначається вимірювана величина. Тому вибір еталонних елементів з високими характеристиками часової стабільності параметрів є надзвичайно важливою задачею.

Традиційні методи визначення часової стабільності елементів базуються на експериментальних дослідженнях, що вимагають тривалого часу (не менше кількох тисяч годин) і приводять до значної витрати ресурсу елементів. У роботі пропонується метод статистичної класифікації прецизійних елементів, який являє собою прогнозування рівня їх часової стабільності за результатами короточасних випробувань. Запропонований метод слід розглядати як розв'язок однієї із задач розпізнавання незорових образів\*.

Задача статистичної класифікації полягає у віднесенні виробу, який пройшов цикл скорочених випробувань, до одного з класів відповідно до вибраного критерію розділення виробів на класи (необхідним рівнем часової стабільності). Вирішується ця задача шляхом навчання ЕОМ розпізнаванню елементів, що належать до різних класів.

Процес навчання полягає в тому, що в ЕОМ вводяться описи груп виробів класів А і В (навчальна вибірка) у вигляді результатів вимірювань множини параметрів, що контролюються при випробуваннях, і інформація, до якого класу належить та чи інша точка  $x$  в багатовимірному просторі параметрів. Заздалегідь вважається відомим, що необхідно розділити дві області в просторі  $X$  і що ЕОМ показуються точки тільки з цих областей. Мета навчання – побудувати поверхню  $f(x^*)$ , яка розділяє не тільки показані точки, але й всі решта точок, які належать цим областям.

Розподільну функцію  $f(x^*)$  зручно будувати, застосовуючи ідею методу потенціальних функцій, алгоритм якого, використовуючи точки, які показуються і інформацію про них,

---

\* Русин Б.П. Системи аналізу, обробки та розпізнавання складно-структурованих зображень. – Львів: Вертикаль, 1997. – 264 с.

будує послідовність функцій  $f^n(\mathbf{x})$ , яка при  $n \rightarrow \infty$  повинна апроксимувати функцію  $f(\mathbf{x}^*)$  ( $n$  – неточний номер точки, що показується).

Спосіб побудови послідовних наближень  $f^n(\mathbf{x})$  характеризується рекурентною процедурою:

$$f^{n+1}(\mathbf{x}) = f^n(\mathbf{x}) + r^n \cdot K(\mathbf{x}^{n+1}, \mathbf{x}), \quad (1)$$

де  $r^n$  – деяка числова послідовність, вибір якої визначається такою формулою:

$$r^n = 0,5 [\text{sign} f^*(\mathbf{x}^{n+1}) - \text{sign} f^n(\mathbf{x}^{n+1})] \quad (2)$$

У формулі (2)  $\mathbf{x}^{n+1}$  – точка простору  $X$ , яка була пред'явлена в процесі навчання на  $(n+1)$  – му кроці алгоритму;

$f^n(\mathbf{x})$  –  $n$  наближення розподільної функції, яке було побудоване до  $(n+1)$ -го кроку алгоритму:

$$\text{sign} f^*(\mathbf{x}^{n+1}) = +1, \text{ якщо } \mathbf{x}^{n+1} \in A,$$

$$\text{sign} f^*(\mathbf{x}^{n+1}) = -1, \text{ якщо } \mathbf{x}^{n+1} \in B.$$

Другим етапом процесу навчання ЕОМ статистичній класифікації є мінімізація опису, тобто вибір параметрів з найбільшою інформативністю. Для цього зручно задаватися параметричним сімейством потенціальних функцій, підбором коефіцієнтів якого можна отримати задовільне розділення класів і швидко збіжність алгоритму. Групою таких коефіцієнтів можуть бути вагові коефіцієнти складових простору  $X$  параметрів, які являють собою оцінки їх відносної інформативності. У цьому випадку існує можливість поєднати обидва етапи процесу навчання і на основі цього методу розробити алгоритм побудови розподільної функції з одночасною оптимізацією простору параметрів, в якому простір оптимізується вибором вагових коефіцієнтів для кожного параметра. При цьому забезпечується найбільша для даного простору і прийнятого способу розбиття на класи величина оцінки імовірності правильних класифікацій  $Y^*$ .

Технічно оптимізація здійснюється шляхом підбору коефіцієнтів потенціальної функції

$$K(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}) = \delta \exp \left\{ -\gamma \left[ \sum_{i=1}^m \alpha_i (x_i - y_i)^2 \right]^\beta \right\}. \quad (3)$$

де  $\alpha_i$  – ваговий коефіцієнт  $i$ -го параметра елемента;  $m$  – число параметрів простору  $X$ ;  $x_i$ ,  $y_i$  – координати точок  $\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}$  по  $i$ -му параметру;  $\beta, \gamma, \delta$  – коефіцієнти, пов'язані зі статистичними характеристиками класу.

Коефіцієнти  $\alpha_i$  обмежені умовою  $\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1$ . Потенціальний портрет класу із збільшенням об'єму вибірки наближається до густини імовірності даного класу.

Зміна коефіцієнтів  $\beta, \gamma, \delta$  приводить до зміни величини і характеру зони впливу кожної точки, що, в свою чергу, визначає вид границі між класами. Оцінюючи кожен крок зміни  $Y^*$  за приростом величини оцінки імовірності правильних класифікацій, можна вибрати напрямок зміни коефіцієнтів і здійснити лінійне перетворення початкового простору параметрів з метою досягнення  $Y^*_{\max}$ .

Величина  $Y^*$  залежить від якості потенціального портрету класу. При правильному підборі зони впливу кожного представника даного класу в межах всього класу потенціал

буде мати один знак. Отже, контроль за зміною величини  $Y^*$  можна проводити шляхом визначення ступеня однозначності потенціалу в зоні кожного з класів. З цією метою застосовується операція ковзаючого розпізнавання виробів навчальної вибірки і з'ясування приналежності точок простору саме до цього класу. Для цього необхідно позбавити точку, яка перевіряється, свого потенціалу і проєктувати її як новий виріб. Вирішальне правило при ковзаючому розпізнаванні записується так:

Для виробів класу А

$$\text{sign}^* \bar{A}_t = \text{sign} \left[ \frac{1}{N_A - 1} \sum_{j \in N_A} \delta \cdot \exp \left\{ -\gamma \left[ \sum_{i=1}^m \alpha_i (A_{ti} - A_{ji})^2 \right]^\beta \right\} + \frac{1}{N_B} \sum_{i=1}^{N_B} \delta \cdot \exp \left\{ -\gamma \left[ \sum_{i=1}^m \alpha_i (A_{ti} - B_{ii})^2 \right]^\beta \right\} \right], \quad (4)$$

Для виробів класу В

$$\text{sign}^* \bar{B}_r = \text{sign} \left[ \frac{1}{N_A} \sum_{j=1}^{N_A} \delta \cdot \exp \left\{ -\gamma \left[ \sum_{i=1}^m \alpha_i (B_{ri} - A_{ij})^2 \right]^\beta \right\} + \frac{1}{N_B - 1} \sum_{i \in N_B} \delta \cdot \exp \left\{ -\gamma \left[ \sum_{i=1}^m \alpha_i (B_{ri} - B_{ii})^2 \right]^\beta \right\} \right], \quad (5)$$

Помилкова класифікація свідчить про те, що в даній області можливе існування представників різних класів.

Якість ковзаючого розпізнавання оцінюється за формулою:

$$Y^* = \frac{N_A + N_B - \sum_{r=1}^{N_A+N_B} Z_r}{N_A + N_B}, \quad (6)$$

де

$$Z_r = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \text{sign}^* M_r = \text{sign} M, \\ 1, & \text{якщо } \text{sign}^* M_r \neq \text{sign} M. \end{cases}$$

Оцінка імовірності правильних класифікацій може бути наведена у вигляді цільової функції

$$Y^* = G(\beta, \gamma, \delta, \{\alpha_i\}, \bar{A}_t, \bar{B}_r), \quad (7)$$

де  $\{\alpha_i\}$  – множина вагових коефіцієнтів координат простору параметрів;  $\bar{A}_t, \bar{B}_r$  – множина точок класів **A** і **B** навчальної вибірки.

Дослідження показали, що імовірність (7) опукла в області оптимізації і конкретні значення  $Y^*$  обраховуються без помилок. Це дає можливість застосування будь-якого з нерегулярних пошукових методів оптимізації для розв'язання задачі мінімізації простору опису.

Отримане в процесі оптимізації значення оцінки імовірності правильних класифікацій  $Y^*_{\max}$  визначається відносною інформативністю простору параметрів. Мінімізація опису навчальної вибірки у заданому просторі параметрів полягає в тому, що параметри з малими ваговими коефіцієнтами  $\alpha_i$ , які відрізняються на 1...2 порядки, можна не розглядати.

Оскільки виміри одного й того ж параметра в різні моменти часу можна розглядати як самостійні характеристики, то, пред'являючи на навчання результати вимірювань в декількох часових перерізах і проводячи оптимізацію утвореного простору, можна визначити інформативні моменти часу, які визначають необхідну тривалість скорочених випробувань.

Запропонована методика практично реалізована при статистичній класифікації кремнієвих стабілітронів за рівнем часового дрейфу напруги стабілізації.

Результати практичної реалізації алгоритму статистичної класифікації кремнієвих стабілітронів дозволили сформулювати основні параметри скорочених випробувань:

– тривалість випробувань – 150 год неперервного напрацювання;

– параметри, які контролюються:

а) початкове значення напруги стабілізації при номінальному струмі  $I_{ст} = 10$  мА;

б) напруга стабілізації після 100 год напрацювання (або дрейф напруги стабілізації за 100 год напрацювання);

в) напруга стабілізації після 150 год напрацювання (або дрейф напруги стабілізації за 150 год напрацювання);

г) початкове значення напруги низькочастотного шуму на частоті  $(20 \pm 2)$  Гц при струмі  $I = 0,5$  мА.

Розроблена методика статистичної класифікації дозволила досягнути значення оцінки ймовірності правильних класифікацій  $Y^* = 0,913$ , що достатньо для практичних цілей.

Подальші наукові і експериментальні дослідження дозволяють розширити перелік еталонних елементів електрорадіовимірювальних засобів, які підлягають класифікації. Це, наприклад, кварцові резонатори, прецизійні резистори, аналогові інтегральні схеми тощо.