

УДК 381.6

М.Ю. Яковлев, Ю.О. Семеренко, С.В. Адаменко

## ПИТАННЯ ПІДВИЩЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНОЇ НАДІЙНОСТІ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ АВІАЦІЙНИХ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ НА ЕТАПІ ПРОЕКТУВАННЯ

*На основі аналізу залежностей характеристик нестабільності засобів вимірювальної техніки авіаційних радіотехнічних систем теоретично обґрунтовано перелік можливих способів підвищення їх стабільності та метрологічної надійності на етапі проектування. Розглянуто спосіб підвищення метрологічної надійності засобів вимірювальної техніки авіаційних радіотехнічних систем, який ґрунтується на взаємній компенсації швидкостей дрейфу параметрів структурних елементів засобів вимірювальної техніки авіаційних радіотехнічних систем.*

**Ключові слова:** метрологічна надійність, засоби вимірювальної техніки, стабільність, метрологічні характеристики, швидкість дрейфу.

### Постановка проблеми та аналіз літератури

Ускладнення засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) авіаційних радіотехнічних систем (АРТС), підвищені вимоги до точності та застосування в них якісно нової за фізичними та конструктивно-технологічними ознаками елементної бази викликали до життя проблему метрологічної надійності. Одним з найважливіших завдань цієї складної проблеми є розробка способів підвищення метрологічної надійності ЗВТ АРТС.

Перші роботи з питань надійності ЗВТ почали з'являтися з 1955 року [1 – 3]. Проведені авторами дослідження цих і наступних робіт [4 – 14] показали, що математичний апарат, розроблений для широкого класу радіоелектронних пристроїв, не може бути застосований для оцінювання та підвищення надійності ЗВТ (і, зокрема, для ЗВТ АРТС). Це обумовлено, насамперед, їх специфікою – метрологічними властивостями, зв'язком між показниками надійності та точності ЗВТ АРТС.

**Мета статті** – теоретичне обґрунтування переліку можливих способів підвищення стабільності та метрологічної надійності ЗВТ АРТС на етапі їх проектування та розробка способу підвищення метрологічної надійності ЗВТ АРТС на основі взаємної компенсації швидкостей дрейфу параметрів структурних елементів ЗВТ АРТС.

### Основний матеріал

Метрологічна надійність ЗВТ АРТС визначається його стабільністю, інтенсивністю та умовами експлуатації, нормативами метрологічної справності, а також організацією їх метрологічного обслуговування [6]. У загальному випадку запишемо аналі-

тичний вираз для показника метрологічної надійності ЗВТ АРТС:

$$P = F\{\bar{I}, \bar{Z}, \bar{M}\}, \quad (1)$$

де  $P$  – показник метрологічної надійності ЗВТ АРТС;

$\bar{I}$  – вектор інтенсивностей дрейфу метрологічних характеристик (МХ) ЗВТ АРТС;

$\bar{Z}$  – вектор норм точності ЗВТ АРТС;

$\bar{M}$  – вектор параметрів метрологічного обслуговування ЗВТ АРТС.

Вимоги до точності ЗВТ АРТС, інтенсивності та умов їх експлуатації задаються в технічних завданнях на проектування і тому є фіксованими параметрами у співвідношенні (1), а інші параметри змінюються. Тому забезпечення заданого рівня метрологічної надійності ЗВТ АРТС при проектуванні може бути досягнуто підвищенням стабільності їх МХ і плануванням метрологічного обслуговування на етапі експлуатації.

Підвищення стабільності ЗВТ АРТС забезпечується зменшенням інтенсивності дрейфу їх МХ. За параметри інтенсивності дрейфу МХ ЗВТ АРТС розглянемо середнє значення  $m(\tau, x)$  та середньоквадратичне відхилення (СКВ) значень МХ ЗВТ АРТС  $\sigma(\tau, x)$  у точці  $x$  діапазону вимірювань на момент часу  $\tau$ :

$$m(\tau, x) = \sum_{i=1}^n k_i(x) \sigma_i(\tau); \quad (2)$$

$$\sigma^2(\tau, x) = \sum_{i=1}^n k_i^2(x) \sigma_i^2(\tau), \quad (3)$$

де  $\tau$  – наробіток ЗВТ АРТС;

$x$  – значення вимірюваної величини;

$m_i(\tau, x)$ ,  $\sigma_i(\tau, x)$  – середнє значення та СКВ значень параметра  $i$ -го структурного елемента ЗВТ АРТС у момент часу  $\tau$ ;

$k_i(x)$  – коефіцієнт впливу  $i$ -го структурного елемента ЗВТ АРТС;

$n$  – кількість структурних елементів ЗВТ АРТС, що впливають на їх МХ.

Аналіз формул (2) і (3) дозволяє сформулювати основні способи підвищення стабільності та метрологічної надійності ЗВТ АРТС. До них належать такі.

1. Підвищення стабільності структурних елементів ЗВТ АРТС, тобто зменшення значень  $m_i(\tau, x)$  і  $\sigma_i(\tau, x)$ .

2. Зменшення впливу нестабільності структурних елементів на нестабільність ЗВТ АРТС за рахунок скорочення інтервалу часу між коректуваннями значень їх МХ.

3. Скорочення кількості структурних елементів або їх параметрів, які впливають на нестабільність ЗВТ АРТС.

4. Підбір структурних елементів ЗВТ АРТС, які мають протилежні напрямки дрейфу параметрів, таким чином, щоб вплив на МХ ЗВТ АРТС нестабільності одних елементів нейтралізувався нестабільністю інших елементів.

5. Зменшення абсолютних значень коефіцієнтів впливу найбільш нестабільних структурних елементів ЗВТ АРТС, а також сполучення позитивних і негативних коефіцієнтів впливу різних структурних елементів ЗВТ АРТС з метою взаємної компенсації доданків у співвідношенні (2).

Цим списком вичерпується перелік теоретично можливих шляхів підвищення стабільності ЗВТ АРТС на сучасний момент розвитку науки та техніки. Однак способи їх практичної реалізації досить різноманітні. Стабільність елементної бази ЗВТ АРТС залежить від швидкості протікання в них процесів старіння. Підвищення стабільності ЗВТ АРТС забезпечується вибором найбільш стабільних елементів і матеріалів, створенням сприятливих електричних режимів їх роботи, зниженням механічних навантажень, а також попереднім штучним старінням. Відомим у практиці шляхом зниження швидкості старіння ЗВТ АРТС є зменшення теплового навантаження на їх структурні елементи. Його теоретичним обґрунтуванням є закон Арреніуса, згідно з до яким швидкість протікання всіх хімічних процесів пропорційна величині  $e^{-E/RT}$ , де  $T$  – температура навколишнього середовища;  $R$  – універсальна газова постійна;  $E$  – енергія активації даного процесу. Напевно, що зниження температури елемента

на кожний градус зменшує середню нестабільність  $m_i(\tau)$  та СКВ нестабільності  $\sigma_i(\tau)$  структурного елемента ЗВТ АРТС приблизно в  $e^{R/E}$  разів. Стабільність механічних елементів ЗВТ АРТС визначається швидкістю зношування. Її зниження забезпечується застосуванням зносостійких матеріалів, нанесенням спеціальних покриттів, вибором оптимальних профілів елементів, що сполучаються, та іншими аналогічними мірами.

Скорочення числа структурних елементів, які впливають на стабільність ЗВТ АРТС, досягається заміною аналогових елементів цифровими, а також застосуванням інтегральних схем з вбудованими мікропроцесорами, які дозволяють проводити калібрування в процесі вимірювань. Ці міри найбільш ефективні при підвищенні стабільності ЗВТ АРТС. Однак їх можливості не безмежні. По-перше, не вдається повністю відмовитися від аналогових елементів ЗВТ АРТС, первинні вимірювальні перетворювачі, елементи блоків живлення, опорні елементи систем калібрування, як правило, залишаються аналоговими. По-друге, не вдається охопити калібруванням весь діапазон ЗВТ АРТС. Тому й інші способи підвищення стабільності та метрологічної надійності ЗВТ АРТС набувають свого практичного значення.

Четвертий і п'ятий напрямки підвищення стабільності та метрологічної надійності ЗВТ АРТС, що входять в підбір найбільш сприятливих сполучень складових інтенсивності дрейфу МХ ЗВТ АРТС, реалізуються шляхом оптимізації структури ЗВТ АРТС. Один з таких способів розглядається у даній статті.

Суть пропонуємого способу підвищення стабільності та метрологічної надійності ЗВТ АРТС ґрунтується на підборі структурних елементів ЗВТ АРТС з протилежними напрямками дрейфу їх параметрів. Пояснимо це на прикладі групового еталона, який складається з  $N$  однакових мір, середня швидкість дрейфу дійсного значення кожної з яких визначається лінійною залежністю

$$m_{vi}(\tau) = m_1 + m_2\tau_i, \quad (4)$$

де  $\tau_i$  – наробіток  $i$ -ої міри;

$m_1$ ,  $m_2$  – швидкості дрейфу дійсного значення першої та другої мір зі складу еталону.

Визначимо значення приробітку окремих мір еталону, які забезпечують мінімум середньої квадратичної швидкості дрейфу дійсного значення еталона за термін служби  $\tau_{сл}$ .

Середня швидкість дрейфу еталона в момент часу  $\tau$  дорівнює

$$m_v(\tau) = m_1 + m_2\tau + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_2\tau_{\text{прі } i}, \quad (5)$$

де  $\tau_{\text{прі } i} = \tau_i - \tau$  – тривалість приробітку  $i$ -ої міри.

Знайдемо значення  $\tau_{\text{прі } i}$ , які забезпечують відповідно до методу найменших квадратів мінімум функції [11]:

$$Q(\tau_i) = \frac{1}{\tau_{\text{сл}}} \int_0^{\tau_{\text{сл}}} m_v^2(\tau) d\tau, \quad (6)$$

де  $Q(\tau_i)$  – функція, яка залежить від нарробітку  $i$ -ої міри.

З рівняння

$$\frac{\partial Q(\tau_{\text{прі } i})}{\partial \tau_{\text{прі } i}} = 0,$$

після перетворень одержимо таку рівність

$$\left[ m_1 + m_2 \left( \tau_{\text{сл}} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_{\text{прі } i} \right) \right]^2 - \left[ m_1 + \frac{1}{N} m_2 \sum_{i=1}^N \tau_{\text{прі } i} \right]^2 = 0,$$

звідки знайдемо

$$\sum_{i=1}^N \tau_{\text{прі } i} = -N \left[ \frac{m_1}{m_2} + 0,5\tau_{\text{сл}} \right]. \quad (7)$$

Мінімальна середня квадратична швидкість дрейфу МХ ЗВТ АРТС на інтервалі  $[0, \tau_{\text{сл}}]$ , яка відповідає співвідношенню (7), складе

$$\bar{m}_{v1} = \sqrt{Q_{\text{min}}(\tau_{\text{прі } i})} \approx 0,3m_2\tau_{\text{сл}}. \quad (8)$$

Якщо приробітку мір не проводити, то середня квадратична швидкість дрейфу МХ ЗВТ АРТС складе

$$\bar{m}_v = \sqrt{\frac{(m_2\tau_{\text{сл}})^2}{3} + m_1(m_1 + m_2\tau_{\text{сл}})}. \quad (9)$$

Для розглянутого групового еталона приймемо  $N = 20$ ,  $m_1 = 1 \cdot 10^{-5} \text{ p}^{-1}$ ,  $m_2 = -1,5 \cdot 10^{-6} \text{ p}^{-2}$ ,  $\tau_{\text{сл}} = 10 \text{ p}$  та відповідно до виразу (7) одержимо:

$$\sum_{i=1}^{20} \tau_{\text{прі } i} = 33 \text{ p}. \quad (10)$$

Це може бути забезпечено, наприклад, при таких значеннях:  $\tau_1 = \dots = \tau_{13} = 2 \text{ p}$ ,  $\tau_{14} = \dots = \tau_{20} = 1 \text{ p}$ . У цьому випадку маємо  $\bar{m}_{v1} = 0,45 \cdot 10^{-5} \text{ p}^{-1}$ . Якщо приробіток не проводити, то середня квадратична швидкість дрейфу МХ ЗВТ АРТС складе  $\bar{m}_v = 1,33 \cdot 10^{-5} \text{ p}^{-1}$ .

Таким чином, приробіток мір групового еталона, у відповідності з співвідношенням (7), дозволило скоротити в 3 рази середню нестабільність цього еталона.

Знизити швидкість дрейфу групового еталона можна якщо зробити заміну частини мір  $N_M$  новими, після закінчення терміну експлуатації  $\tau_e$ . У цьому випадку запишемо таку рівність:

$$m_v(\tau) = \begin{cases} m_1 + m_2\tau, & 0 \leq \tau < \tau_e; \\ m_1 + m_2(\tau - N_M\tau_e), & \tau_e \leq \tau < \tau_{\text{сл}}. \end{cases}$$

Знайдемо значення  $N_M$  та  $\tau_e$  з умови

$$Q(N_M, \tau_e) = \min, \quad (11)$$

де  $Q(N_M, \tau_e)$  – функція, яка залежить від кількості мір, що підлягають заміні та тривалості експлуатації еталона.

Вираз (11) тотожній системі двох таких рівнянь:

$$\frac{\partial Q(N_M, \tau_e)}{\partial N_M} = \frac{\tau_e}{\tau_{\text{сл}}} \left[ -(m_1 + m_2(\tau_{\text{сл}} - N_M\tau_e))^2 + (m_1 + m_2\tau_e(1 - N_M))^2 \right] = 0; \quad (12)$$

$$\frac{\partial Q(N_M, \tau_e)}{\partial \tau_e} = \frac{1}{\tau_{\text{сл}}} \left[ (m_1 - m_2\tau_e)^2 + N_M(m_1 + m_2(\tau_{\text{сл}} - N_M\tau_e))^2 \right] - \frac{1}{\tau_{\text{сл}}} \left[ (1 - N_M)(m_1 + m_2\tau_e(1 - N_M))^2 \right] = 0. \quad (13)$$

Після перетворення рівняння (12) одержимо

$$\tau_e(1 - 2N_M) + \tau_{\text{сл}} + 2\frac{m_1}{m_2} = 0. \quad (14)$$

Аналогічно після перетворень рівняння (13) одержимо співвідношення:

$$3m_2\tau_e(1 - N_M) + 2(2m_1 + N_M m_2\tau_{\text{сл}})\tau_e - \tau_{\text{сл}}(2m_1 + m_2\tau_{\text{сл}}) = 0. \quad (15)$$

З урахуванням виразу (9) співвідношення (14) і (15) відповідно приймуть такий вигляд:

$$N_M = 0,5 \left[ 1 + \frac{1}{\tau_e} \left( \tau_{\text{сл}} + 2\frac{m_1}{m_2} \right) \right]; \quad (16)$$

$$1 - N_M = 0,5 \left[ 1 - \frac{1}{\tau_e} \left( \tau_{\text{сл}} + 2\frac{m_1}{m_2} \right) \right]. \quad (17)$$

Підставляючи рівняння (16) і (17) у формулу (15) знайдемо необхідні значення величин  $\tau_e$  і  $N_M$ :

$$\tau_e = \frac{1}{3} \left( \tau_{\text{сл}} - 2\frac{m_1}{m_2} \right); \quad (18)$$

$$N_M = \left( \tau_{\text{сл}} + \frac{m_1}{m_2} \right) / \left( \tau_{\text{сл}} - 2 \frac{m_1}{m_2} \right). \quad (19)$$

Якщо виконується умова  $\frac{m_1}{m_2} \geq 0$ , то  $N_M > 1$ , що неможливо. Отже, оптимум, як і в першому випадку, є тільки при різних знаках величин  $m_1$  і  $m_2$ . У цьому випадку при таких значеннях  $\tau_e$  і  $N_M$  функція з виразу (6) набере такого вигляду:

$$Q(N_M, \tau_e) = \frac{1}{3m_2\tau_{\text{сл}}} \left[ \frac{1}{9} (m_1 + m_2\tau_{\text{сл}})^3 - m_1^3 \right] \quad (20)$$

і середня квадратична швидкість дрейфу дійсного значення еталона за термін його служби складе

$$\bar{m}_{\text{в2}} = \sqrt{\frac{(m_1 + m_2\tau_{\text{сл}})^3 - 9m_1^3}{27m_2\tau_{\text{сл}}}}. \quad (21)$$

Для прийнятих вище вихідних даних визначимо оптимальну стратегію заміни частини мір досліджуваного еталона. На підставі формул (18) і (19) одержимо значення тривалості експлуатації еталону та кількості мір, які потребують заміни:  $\tau_e = 7,8p$ ,  $N_M = 0,3$ . Для розглянутого еталона оптимальне рішення ґрунтується на заміні через  $7,8p$  шести мір. При цьому середня квадратична швидкість дрейфу дійсного значення еталона буде такою:

$$\bar{m}_{\text{в2}} = 0,47 \cdot 10^{-5} p^{-1}.$$

Порівняння результатів, отриманих у наведених прикладах, показує, що в розглянутому еталоні обидва варіанти способу взаємної компенсації нестабільностей мір дали практично однаковий ефект. Отже, для нього доцільно вибрати другий варіант способу, як більш простий та економічний.

### Висновок

Таким чином, у статті наведене теоретичне обґрунтування можливих способів підвищення стабільності та метрологічної надійності ЗВТ АРТС на етапі їх проектування. Запропоновано спосіб підвищення метрологічної надійності ЗВТ АРТС на основі взаємної компенсації швидкостей дрейфу параметрів структурних елементів ЗВТ АРТС.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Hayes I. Technical memorandum № 63 – 106 “Factors affecting measurement reliability” // U.S. Naval Ordnance Laboratory, Corona, CA. – October 1955.

2. Мельницкая И.В. Оценка срока службы электроизмерительных приборов по данным испытаний и эксплуатационной статистики // Вопросы надежности электроизмерительных приборов. – М.: 1965. – С. 59 – 67.

3. Арутюнов В.О., Козлов Б.А. и др. Проблемы и специфика надежности измерительных устройств // Измерительная техника. – 1969. – № 3. – С. 9 – 13.

4. Изменение надежности электроизмерительных приборов при их длительной эксплуатации / Лабунец В.С., Маркович А.Б. и др. // Измерительная техника. – 1974. – № 3. – С. 59 – 60.

5. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

6. Екимов А.В., Ревяков М.И. Надежность средств измерительной техники. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.

7. Schumacher R. Recalibration cycles and goals at Rockwell international document X 86-935/101. – June 1986.

8. Богданов Г.П. Метрологическое обеспечение и эксплуатация измерительной техники. – М.: Энергия, 1990. – 328 с.

9. Skakala L., Majek S., Kolesar M. Korigovanie kalibracnych intervalov pevnych mier // 10 Medzinarodne symposium metrologie “INSYMET – 90”. – Bratislava, 1990. – P. 77 – 79.

10. Фридман А.Э. Теория метрологической надежности средств измерений // Измерительная техника. – 1991. – № 11. – С. 3 – 10.

11. Мищенко С.В., Цветков Э.И., Чернышова Т.И. Метрологическая надежность измерительных средств. – М.: Машиностроение, 2001. – 96 с.

12. Чинков В.Н., Мельниченко А.Е. Избыточная модель надежной эксплуатации средств измерительной техники // Украинский метрологический журнал. – 2004. – № 2. – С. 57 – 60.

13. Яковлев М.Ю. Метрологическая надежность средств измерительной техники // Збірник наукових праць НТУ “ХПІ”. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2005. – Вип. 37. – С. 187 – 191.

14. Рыбачук О. И., Яковлев М.Ю., Прибылев Ю.Б. Способы повышения метрологической надежности средств измерительной техники авиационных радиотехнических систем на этапе проектирования // Материалы XV Научно-технической конференции “Научные проблемы разработки, модернизации и применения информационно-измерительных систем космического и наземного базирования”. – Житомир: ЖВИРЭ, 2006. – 188 с.

Надійшла 19.04.2006

Рецензент: д-р техн. наук професор Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба.