

УДК 681.12

О.М. ВАСІЛЕВСЬКИЙ,
Вінницький національний технічний університет
В.М. ДІДИЧ
Вінницький національний медичний університет ім. М.І. Пригорова

ОЦІНЮВАННЯ МІЖКАЛІБРУВАЛЬНИХ ІНТЕРВАЛІВ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Запропоновано методику оцінювання міжкалібрувальних інтервалів засобів вимірювальної техніки на основі показників надійності, яка дає змогу встановлювати (коригувати) черговий інтервал метрологічної перевірки шляхом використання як довірчих меж похибок та СКВ градувальної характеристики при випуску ЗВТ з виробництва, так і розширеної та комбінованої невизначеностей вимірювання.

Ключові слова: калібрування, міжкалібрувальний інтервал, метрологічна перевірка, засіб вимірювальної техніки, метрологічна надійність.

O. VASILEVSKYI,
Vinnytsia National Technical University
V. DIDYCH

Vinnytsia National Medical University named after M. I. Pirogov

ESTIMATING INTER-VERIFICATION INTERVALS OF MEASURING DEVICES

The methodology for estimating the inter-calibration intervals of measuring equipment based on reliability indicators is proposed, which makes it possible to establish (correct) the next interval of metrological verification by using both the confidence limits of the error and the Standard deviation of the calibration characteristic when the device is manufactured from production, and the extended and combined uncertainty of the measurement. The development of a mathematical model for the establishment or correction of intercalibration intervals, which will allow to check the metrological characteristics of the FTA on the basis of reliability indicators, is an actual scientific task. Given the foregoing purpose, the article is the creation of a mathematical model that will allow to assess (to determine or correct) the intercalibration interval of the FTA on the basis of metrological reliability indicators for checking the conformity of metrological characteristics, established norms and maintaining the efficiency of the FTA. Based on the normalized metrological reliability of the FTA, mathematical models are proposed for establishing (correction) of the intercalibration interval of the FTA, which allow to calculate the intervals between the calibration of the FTA both with the help of the metrological probability of failure-free operation (or the technical probability of failure-free operation if the proportion of metrological bugs can not be determined), and with the mean time until the first failure.

Keywords: calibration, inter-calibration interval, metrological verification, means of measuring equipment, metrological reliability.

ВСТУП. Характерною особливістю сучасного розвитку засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) є широке впровадження елементів та пристроїв автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки у виробничі процеси для їх автоматизації. В умовах сучасної економіки автоматизація є одним з основних напрямів розвитку науково-технічного прогресу. І, звичайно, покращення ефективності та якості роботи ЗВТ неможливе без оцінювання надійності їх функціонування. Таким чином, вищевикладене є першою причиною необхідності періодичного калібрування ЗВТ для перевірки відповідності метрологічних характеристик їх нормованим значенням. Другою причиною, яка потребує нормування міжкалібрувальних інтервалів ЗВТ, є підвищення складності ЗВТ, апаратури їх обслуговування, умов їх експлуатації і відповідальності задач, які на них покладають. Недостатня надійність ЗВТ призводить до збільшення долі експлуатаційних витрат порівняно із загальними витратами на проектування, виробництво і використання цих засобів. Через це вартість експлуатації ЗВТ може в багато разів перевищити вартість їх розробки і виготовлення. Крім того відмови ЗВТ можуть призводити до таких наслідків: втрат важливої інформації, простоїв виробництва, аварій тощо. Таким чином, наступною причиною підвищення ролі періодичного калібрування ЗВТ в сучасних умовах є економічний фактор. Надійність є найважливішим техніко-економічним показником якості будь-якого ЗВТ, що визначає здатність безвідмовно працювати з незмінними технічними характеристиками протягом заданого проміжку часу за певних умов експлуатації. Надійність зберігається шляхом правильного зберігання і підтримується правильною експлуатацією ЗВТ, профілактичним контролем, калібруванням і ремонтом.

Відповідно до закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» повірці підлягають законодавчо регульовані засоби вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації. Міжповірочні інтервали законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки за категоріями встановлюються центральним органом виконавчої влади, що забезпечує формування державної політики у сфері метрології та метрологічної діяльності [1]. Порядок встановлення міжповірочних інтервалів визначається Кабінетом Міністрів України. Інші засоби вимірювальної техніки, які застосовуються поза сферою законодавчо

регульованої метрології підлягають калібруванню в добровільному порядку. Калібрування засобів виміральної техніки проводиться відповідно до документів, прийнятих міжнародними та регіональними організаціями з метрології [1]. Таким документом, який прийнятий міжнародною організацією законодавчої метрології (OIML) є міжнародний документ ІЛАС-G24:2007/OIML D 10:2007 [2], в якому рекомендуються до застосування 5 (п'ять) методів встановлення калібрувальних інтервалів. Однак, чіткої математичної послідовності виконання розрахунків для встановлення значень міжкалібрувальних інтервалів на основі метрологічної надійності ЗВТ не пропонується. Крім того, зазначається [2], що можуть бути застосовані інші (різні) статистичні підходи.

Таким чином, розробка математичної моделі для встановлення або коригування міжкалібрувальних інтервалів, що дасть змогу перевіряти метрологічні характеристики ЗВТ на основі показників надійності є актуальною науковою задачею.

З огляду на вищесказане *метою статті* є створення математичної моделі, яка дозволить оцінювати (визначати або коригувати) міжкалібрувальний інтервал ЗВТ на основі показників метрологічної надійності для перевірки відповідності метрологічних характеристик, встановленим нормам і підтримання працездатності ЗВТ.

АНАЛІЗ СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ

Основними показниками, що можуть використовуватися для розрахунку характеристик метрологічної надійності ЗВТ, є [3]:

- вірогідність безвідмовної роботи;
- інтенсивність метрологічних відмов;
- середній час до першої метрологічної відмови;
- параметр потоку відмов (метрологічних);

- напрацювання до першої метрологічної відмови. Вірогідністю безвідмовної роботи називається вірогідність того, що за певний проміжок часу в ЗВТ не відбудеться відмови. Наближено її можна визначити за формулою [4]

$$P(t) \approx \frac{N(t)}{N_0}, \quad (1)$$

де $N(t)$ – кількість працюючих ЗВТ в кінці проміжку часу t ; N_0 – кількість працюючих ЗВТ на початку проміжку часу t .

Інтенсивністю відмов називають вірогідність відмови ЗВТ, що не ремонтується за одиницю часу при умові, що відмова до кінця цього часу не виникла. Вона може бути визначена за формулою

$$\lambda(t) \cong \frac{\Delta n}{N(t)\Delta t}, \quad (2)$$

де Δn – кількість ЗВТ, що відмовили за час Δt ; $N(t)$ – кількість справних ЗВТ в кінці проміжку часу; Δt – час спостереження [5].

Середнім напрацюванням до першої відмови T_{cp} є середнє значення напрацювань ЗВТ в партії до першої відмови. Воно визначається виразом

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}, \quad (3)$$

де T_i – час роботи i -го ЗВТ до першої відмови; n – кількість ЗВТ в партії для якої визначається T_{cp} .

Параметром потоку відмов $\omega(t)$ називається середня кількість відмов ЗВТ, що ремонтується за одиницю часу для моменту часу, який розглядається. Він визначається за формулою

$$\omega(t) = \frac{\Delta n}{N_0 \Delta t}, \quad (4)$$

де N_0 – кількість працюючих ЗВТ в проміжку часу Δt ; Δn – кількість ЗВТ, які відмовили за проміжок часу Δt [3–5].

Необхідно врахувати, що при визначенні величини $\omega(t)$ ЗВТ, що відмовляють протягом часу Δt , ремонтується. В цьому випадку $N_0 = N(t)$.

Напрацюванням на відмову T називається середнє значення напрацювання ЗВТ, що ремонтується між відмовами

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n T_{cp_i}}{n}, \quad (5)$$

де T_{cp_i} – середнє значення напрацювання до відмови i -го ЗВТ; n – кількість ЗВТ в партії, що досліджується.

Значення T_{cp_i} визначається за формулою

$$T_{cp_i} = \frac{\sum_{j=1}^m T_{ij}}{m}, \quad (6)$$

де T_{ij} – середній час роботи i -го ЗВТ між j -м та $(j+1)$ -ю відмовами; m – число відмов i -го ЗВТ.

Інтенсивність відмов, що розраховується за формулою (2), визначається експериментально в процесі випробувань ЗВТ на надійність, що потребує значного часу досліджень. На практиці інтенсивність відмов можна прогнозувати. Для більшості серійно виготовлюваних елементів ЗВТ існують спеціальні таблиці, в яких зазначаються інтенсивності відмов за одиницю часу.

Знаючи інтенсивність відмов кожного з елементів λ_i , що входять до складу ЗВТ, можна визначити інтенсивність відмови ЗВТ в цілому за формулою

$$\lambda_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i m_i, \quad (7)$$

де n – загальна кількість типів елементів, що входять до складу ЗВТ; m – кількість елементів i -го типу.

Ймовірність безвідмовної роботи ЗВТ в цьому випадку можна розрахувати за формулою [3, 7]

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda_{\Sigma}(t) dt}. \quad (8)$$

Середній час безвідмовної роботи, що називається напрацюванням до відмови, можна визначити за формулою [3–8]

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (9)$$

Інтенсивність відмови $\lambda_{\Sigma}(t)$, ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ і напрацювання до відмови T_{cp} є показниками, які найчастіше використовуються для визначення метрологічної надійності.

Оскільки випадкова відмова може відбутися в будь-який момент часу, незалежно від того, скільки часу пропрацював ЗВТ, то інтенсивність раптової відмови не залежить від часу, тобто $\lambda_{\Sigma}(t) = \lambda_{\Sigma} = \text{const}$.

Тому, коли мова іде про раптові відмови, то ймовірність безвідмовної роботи ЗВТ можна визначити за простішою залежністю [8]

$$P(t) = e^{-\lambda_{\Sigma} t}. \quad (10)$$

Напрацювання до відмови в цьому випадку розраховується за формулою

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}}. \quad (11)$$

МЕТОДИКА ВСТАНОВЛЕННЯ (КОРИГУВАННЯ) МІЖКАЛІБРУВАЛЬНОГО ІНТЕРВАЛУ ЗВТ.
 Метрологічною відмовою називають вихід метрологічних характеристик ЗВТ за межі встановлених норм. Метрологічна надійність ЗВТ встановлюється експериментальним шляхом, в ході випробувань ЗВТ на метрологічну надійність. Для випробувань відбирається n ЗВТ конкретного типу. У кожного конкретного екземпляра ЗВТ визначаються індивідуальні значення метрологічних характеристик, а потім закони розподілу цих значень та їх числові характеристики. Для більшості ЗВТ сумарний закон розподілу ймовірності досліджуваної метрологічної характеристики є нормальним. Оцінку середнього значення ймовірності можна визначити за формулою

$$\bar{q}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} q_i}{n_1} \quad (12)$$

Її дисперсію можна оцінити за формулою

$$S_{q_1}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} (q_i - \bar{q}_1)^2}{n_1 - 1} \quad (13)$$

При правильному нормуванні середнє арифметичне значення має збігатися з номінальним значення досліджуваної метрологічної характеристики, а максимальні та мінімальні межі, в яких повинна знаходитись конкретна метрологічна характеристики будь-якого ЗВТ даного типу, встановлюються симетричними номінальному значенню [9, 10].

Для практичних розрахунків пропонується використати спрощену методику визначення міжкалібрувального інтервалу, який розраховується за формулою [11]

$$T_{МПИ} = \frac{\ln(1 - Q_M(t))}{\ln P_M(t)} \quad (14)$$

де $P_M(t)$ – метрологічна вірогідність безвідмовної роботи; $Q_M(t)$ – вірогідність метрологічної відмови за час між повірками, що визначається за встановленими довідниковими значеннями (табл. 1).

Таблиця 1

Значення допустимих вірогідностей метрологічної відмови

| Для ЗВТ, що використовуються при | Значення допустимої ймовірності метрологічної відмови |
|--|---|
| технічних вимірюваннях | 0,2 ... 0,1 |
| передачі інформації про розмір одиниці | 0,15 ... 0,005 |
| особливо важливих та відповідальних вимірюваннях | 0,003 ... 0,001 |

Як показує досвід [10–34], в матеріалах розробників ЗВТ, поданих на випробування з метою затвердження типу, часто відсутня достовірна інформація про нестабільність ЗВТ, що необхідна для обґрунтованого присвоєння первинного міжкалібрувального інтервалу ЗВТ. У цих випадках для його орієнтовної оцінки можна скористатися нормованими значеннями показників надійності, що вказані в технічних умовах на ЗВТ.

Якщо вдається визначити, хоча б орієнтовно, середню частку q метрологічних відмов в загальному потоці відмов ЗВТ, то оцінюють вірогідність роботи ЗВТ без метрологічних відмов $P_M(t)$ за час (напрацювання) t за формулою

$$P_M(t) = 1 - q[1 - P(t)] \quad (15)$$

де $P(t)$ – вірогідність безвідмовної роботи ЗВТ (технічна) за час напрацювання t [4].

Якщо середню частку метрологічних відмов q визначити не вдається, то приймають $P_M(t) = P(t)$.

На підставі матеріалів, наданих на випробування, визначають СКВ σ_0 розподілу похибки градування ЗВТ (або комбіновану невизначеність u_c) при випуску з виробництва, межу Δ_N допустимої похибки ЗВТ (або розширену невизначеність вимірювання U_N), що пронормована в технічних умовах (ТУ), межу Δ_E допустимої похибки ЗВТ (або розширену невизначеність вимірювання U_E) в реальних умовах експлуатації.

Встановлюють відповідно до критеріїв значення вірогідності метрологічної справності $P_{м.с.}$ чи довірчої вірогідності P .

Як критерії при встановленні міжкалібрувального інтервалу слід вибирати показники метрологічної надійності або стабільності ЗВТ. Вид критерію визначається способом метрологічної перевірки ЗВТ.

При метрологічній перевірці, що полягає у встановленні дійсних значень ЗВТ або його градуванні, критерієм є межа допустимих значень довірчих меж (розширена невизначеність) нестабільності ЗВТ за міжкалібрувальний інтервал при заданій довірчій вірогідності P .

При метрологічній перевірці, що полягає у визначенні придатності до застосування ЗВТ за критерієм стабільності (із забракуванням екземплярів, зміна дійсних значень або градувальної характеристики яких за міжкалібрувальний інтервал перевищує встановлену межу допустимої нестабільності) та подальшому встановленні його дійсного значення. В такому випадку показником метрологічної надійності є межа допустимих значень вірогідності метрологічної справності ЗВТ в момент повірки $P_{м.с.}$.

При метрологічній перевірці, що полягає у визначенні придатності до застосування ЗВТ за критерієм точності (із забракуванням екземплярів, дійсні значення характеристик похибок яких перевищують встановлені межі допустимих значень), показником метрологічної надійності також є вірогідність метрологічної справності $P_{м.с.}$.

В припущенні про симетричність закону розподілу похибок (невизначеностей) оцінити міжкалібрувальний інтервал T_1 можна за формулою

$$T_1 = t \frac{\ln\left(\frac{\Delta_E}{\lambda_P \sigma_0}\right)}{\ln\left(\frac{\Delta_H}{\lambda_{P_{MC}(t)} \sigma_0}\right)} = t \frac{\ln\left(\frac{U_E}{\lambda_P u_c}\right)}{\ln\left(\frac{U_N}{\lambda_{P_{MC}(t)} u_c}\right)}, \quad (16)$$

де λ_P – коефіцієнт нормального розподілу, що відповідає ймовірності $P(t)$ або $P_{M}(t)$; $\lambda_{P_{MC}(t)}$ – коефіцієнт нормального розподілу, що відповідає вірогідності метрологічної справності $P_{M.C.}$.

Прийнявши припущення про те, що випадковий процес зміни в часі похибки (невизначеності) ЗВТ полягає в лінійній зміні середнього значення похибки (за сукупністю ЗВТ даного типу) при незмінному СКВ розподілу похибки σ , оцінку міжкалібрувального інтервалу T_2 можна визначити за формулою

$$T_2 = t \frac{\Delta_E - \lambda_P \sigma_0}{\Delta_H - \lambda_{P_{MC}(t)} \sigma_0} = t \frac{U_E - \lambda_P u_c}{U_N - \lambda_{P_{MC}(t)} u_c}. \quad (17)$$

За знайденими міжкалібрувальними інтервалами T_1 і T_2 пропонується встановити первинний міжкалібрувальний інтервал ЗВТ прийнявши його рівним мінімальному значенню між значеннями T_1 і T_2 , тобто

$$T = \min[T_1, T_2]. \quad (18)$$

Якщо вдається визначити, хоча б приблизно, середню долю q метрологічних відмов в загальному потоці відмов ЗВТ даного типу, то можна також оцінити і середній час (середнє напрацювання) до першої метрологічної відмови $T_{ср.м}$ за формулою

$$T_{ср.м} = \frac{1}{q} [T_{ср.в} - T_{ср.в} (1 - q)], \quad (19)$$

де $T_{ср.в}$ – середній час ЗВТ до першої раптової відмови (визначається структурним розрахунком надійності ЗВТ за даними про інтенсивність відмов його елементів). Якщо q невідомо, то приймають $T_{ср.м} = T_{ср.м} [10]$.

На підставі матеріалів, наданих на випробування, визначають СКВ σ_0 розподілу похибки градування (невизначеності) ЗВТ при випуску з виробництва, межу Δ_H допустимої похибки (або розширеної невизначеності) ЗВТ, що пронормована в ТУ та межу Δ_E допустимої похибки (або розширеної невизначеності) ЗВТ в реальних умовах його експлуатації.

Для оцінки міжкалібрувального інтервалу T_1 пропонується прийняти припущення про симетричність розподілу похибки (невизначеності) ЗВТ відносно нуля і міжкалібрувальний інтервал розрахувати за формулою

$$T_1 = T_{ср.м} \frac{\ln\left(\frac{\Delta_E}{\lambda_P \sigma_0}\right)}{\ln\left(\frac{\Delta_H}{\sigma_0} + 0.635\right)} = T_{ср.м} \frac{\ln\left(\frac{U_E}{\lambda_P u_c}\right)}{\ln\left(\frac{U_N}{u_c} + 0.635\right)}. \quad (20)$$

Потім в припущенні про лінійний випадковий процес оцінити міжкалібрувальний інтервал T_2 за формулою

$$T_2 = T_{ср.м} \frac{\Delta_E - \lambda_P \sigma_0}{\Delta_H} = T_{ср.м} \frac{U_E - \lambda_P u_c}{U_N}. \quad (21)$$

Кінцевий міжкалібрувальний інтервал визначасмо за формулою (18).

ВИСНОВКИ. На основі нормованих показників метрологічної надійності ЗВТ запропоновано математичні моделі для встановлення (коригування) міжкалібрувального інтервалу ЗВТ, які дають змогу розраховувати інтервали між калібруванням ЗВТ як за допомогою метрологічної вірогідності безвідмовної роботи (або технічної вірогідності безвідмовної роботи, якщо частку метрологічних відмов визначити не вдається), так і за допомогою середнього часу до першої відмови.

Література

1. Про метрологію та метрологічну діяльність : закон України № 1314 від 5 червня 2014 р. [Електронний ресурс] – Режим доступу : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1314-18/page>.
2. Guidelines for the determination of calibration intervals of measuring instruments : ILAC-G24:2007/OIML D 10:2007 : міжнародний документ.
3. Васілевський О. М. Нормування показників надійності технічних засобів : [навчальний посібник] / О. М. Васілевський, В.О. Поджаренко. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 129 с.
4. Яковлев М. Ю. Забезпечення метрологічної надійності засобів вимірювальної техніки авіаційних радіотехнічних систем на етапі експлуатації / М. Ю. Яковлев // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил. – 2007. – Вип. 3 (15). – С. 136 – 141.
5. Васілевський О. М. Нормування показників метрологічної надійності / О. М. Васілевський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 4. – С. 9 – 13.
6. Яковлев М. Ю. Оцінка метрологічної нестабільності метрологічних характеристик при визначенні первинного міжповірного інтервалу засобів вимірювальної техніки авіаційних радіотехнічних систем / М. Ю. Яковлев // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2008. – № 2 (29). – С. 40 – 44.
7. Ryzhov, Y. Optimization of requirements for measuring instruments at metrological service of communication tools / Y. Ryzhov, L. Sakovych, P. Vankevych, M. Yakovlev, & Y. Nastishin // Measurement. – 2018. – Vol. 123. – P. 19–25.
8. Половко А. М. Основы теории надёжности / А. М. Половко. – М. : Наука, 1964. – 446 с.
9. Васілевський О. М. Статистичні методи виявлення систематичних похибок вимірювань / О. М. Васілевський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 1. – С. 9 – 12.
10. Vasilevskiy O. M. Calibration method to assess the accuracy of measurement devices using the theory of uncertainty / O. M. Vasilevskiy // International Journal of Metrology and Quality Engineering. – 2014. – Vol. 5. – Num. 4. – DOI: 10.1051/ijmqe/2014017.
11. Васілевський О. М. Методика визначення міжповірного інтервалу засобів вимірювання на основі концепції невизначеності / О. М. Васілевський // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 6. – С. 81 – 88.
12. Васілевський О. М. Актуальні проблеми метрологічного забезпечення : [навчальний посібник] / О.М. Васілевський, В.О. Поджаренко. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 214 с. – ISBN 978-966-641-348-5.
13. Stephens M. A. Anderson-Darling Test for Goodness of Fit. In: Encyclopedia of Statistical Sciences. – Vol. 1. – 1982. – pp.81-85, (eds. Johnson, N.L. and Kotz, S.), Wiley Interscience.
14. Васілевський О.М. Основы теорії невизначеності вимірювань : [підручник] / О.М. Васілевський, В.Ю. Кучерук, Є.Т. Володарський. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 230 с. – ISBN 978-966-641-632-5.
15. Поджаренко В. О. Оцінка вірогідності автоматизованого контролю складових елементів гумусу в ґрунті / В.О. Поджаренко, В. М. Дідич, О. М. Васілевський // Вісник національного університету „Львівська політехніка”. Серія: „Автоматика, вимірювання та керування”. – 2009. – № 639. – С. 51 – 54.
16. Васілевський О. М. Елементи теорії підвищення точності вимірювання та синхронізації кутових швидкостей роторів взаємозв'язаних електромоторів : [монографія] / О. М. Васілевський, П. І. Кулаков. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 176 с.
17. The method of translation additive and multiplicative error in the instrumental component of the measurement uncertainty / O. Vasilevskiy, V. Kucheruk, V. Bogachuk K. Gromaszek, W. Wójcik, S. Smailova, N. Askarova // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 10031. – 2016. - art. no. 1003127. - DOI: 10.1117/12.2249195.
18. Васілевський О. М. Повірка вимірювальних каналів кутової швидкості призначених для контролю несинхронності обертання роторів / О. М. Васілевський // Вісник інженерної академії України. – 2011. – № 1. – С. 253–256.
19. Subrahmanyan V. Electric Drives / V. Subrahmanyan. – McGraw-Hill: USA, 1996. – 715 p.
20. Васілевський О. М. Оцінювання невизначеності динамічних вимірювань / О. М. Васілевський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 3. – С. 9–13.
21. Поджаренко В. О. Оцінка статичних метрологічних характеристик вимірювальних каналів вібрації / В. О. Поджаренко, О. М. Васілевський, В. М. Севаст'янов // Український метрологічний журнал. – 2005. – № 2. – С. 60–65.
22. Crowder R. M. Electric Drives and their Controls / R. M. Crowder. – Oxford University Press: Oxford, 1998. – 256 p.
23. Васілевський О. М. Елементи теорії побудови потенціометричних засобів вимірювального контролю активності іонів з підвищеною вірогідністю : [монографія] / О. М. Васілевський, В. М. Дідич. – Вінниця : ВНТУ. – 2013. – 176 с.
24. Sysoev Yu.S. Analysis of the operational stability of measurement instruments by stochastic prediction of drift in their metrological characteristics / Yu.S. Sysoev, A.I. Tikhomirova // Meas. Tech. – 2012. – Vol. 6. – p. 613–621.
25. Didych V. M. Potentiometer facilities of ions activity measurement of humus elements in soil / V. M. Didych, O. M. Vasilevskiy, V. O. Podzharenko // Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute. – 2008. – № 5. – P. 5–10.
26. Vasilevskiy O. M. Metrological characteristics of the torque measurement of electric motors / O. M. Vasilevskiy // International Journal of Metrology and Quality Engineering. – 2017. – Vol. 8. – Num. 7. – DOI 10.1051/ijmqe/2017005.
27. Васілевський О.М. Практикум з метрологічного нагляду за засобами вимірювань : [практикум] / О. М. Васілевський, В. О. Поджаренко. – Вінниця : ВНТУ, 2008. – 87 с.
28. Vasilevskiy O. M. A frequency method for dynamic uncertainty evaluation of measurement during modes of dynamic operation / O. M. Vasilevskiy // International Journal of Metrology and Quality Engineering. – 2015. – Volume 6. – Number 2. – P. 202. – DOI 10.1051/ijmqe/2015008.
29. Поджаренко В. О. Оцінка статичних метрологічних характеристик вимірювального каналу температури / В. О. Поджаренко, В. М. Дідич, О. М. Васілевський // II Міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси» (ІПРТК-2009). – Київ : НАУ. – 2009. – С. 83–85.
30. Vasilevskiy O. M. Means for measuring the dynamic torque electric motors and an analysis of its accuracy / O. M. Vasilevskiy // Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia. – 2012. – № 73. – P. 52–56.
31. Podzharenko V. O. Diagnostics of technical condition of electromechanical systems for the logarithmic decrement / V.O. Podzharenko, O.M. Vasilevskiy // Proceedings of Donetsk National Technical University. – 2005. – 88. – P. 138–144.
32. Сопрунок П. М. Неопределенность результатов измерений при контроле асинхронности вращения электромеханических преобразователей / П. М. Сопрунок, А. Н. Василевский, Ю. А. Чабанюк // Системи обробки інформації. – 2006. – № 7 (56). – С. 72 – 75.
33. Васілевський О. М. Система вимірювального контролю параметрів взаємозв'язаних роторних машин : [монографія] / О. М. Васілевський, В. О. Поджаренко. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 156 с.
34. Васілевський О. М. Метрологічне забезпечення засобу вимірювання кутової швидкості та моменту інерції електромоторів / О. М. Васілевський // Вісник інженерної академії України. – 2012. – № 1. – С. 211 – 215.

References

1. Pro metrolohiuu ta metrolohichnu diialnist : zakon Ukrainy № 1314 vid 5 chervnia 2014 r. [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1314-18/page>.
2. Guidelines for the determination of calibration intervals of measuring instruments : ILAC-G24:2007/OIML D 10:2007 : mizhnarodnyi dokument.
3. Vasilevskiy O. M. Normuvannya pokaznykiv nadiinosti tekhnichnykh zasobiv : [navchalnyi posibnyk] / O. M. Vasilevskiy, V.O. Podzharenko. – Vinnytsia : VNTU, 2010. – 129 s.
4. Yakovlev M. Yu. Zabezpechennia metrolohichnoi nadiinosti zasobiv vymiriuvanoi tekhniki aviatsiinykh radiotekhnichnykh system na etapi ekspluatatsii / M. Yu. Yakovlev // Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho universytetu povitrianykh syl. – 2007. – Vyp. 3 (15). – S. 136 – 141.
5. Vasilevskiy O. M. Normuvannya pokaznykiv metrolohichnoi nadiinosti / O. M. Vasilevskiy // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnogo instytutu. – 2011. – № 4. – S. 9 – 13.
6. Yakovlev M. Yu. Otsinka metrolohichnoi nestabilnosti metrolohichnykh kharakterystyk pry vyznachenni pervynnoho mizhpovirochnoho intervalu zasobiv vymiriuvanoi tekhniki aviatsiinykh radiotekhnichnykh system / M. Yu. Yakovlev // Radioelektronni i kompiuterni systemy. – 2008. – № 2 (29). – S. 40 – 44.
7. Ryzhov, Y. Optimization of requirements for measuring instruments at metrological service of communication tools / Y. Ryzhov, L. Sakovych, P. Vankevych, M. Yakovlev, & Y. Nastishin // Measurement. – 2018. – Vol. 123. – P. 19–25.
8. Polovko A. M. Osnovy teorii nadejnosti / A. M. Polovko. – M. : Nauka, 1964. – 446 s.
9. Vasilevskiy O. M. Statystychni metody vyivlennia systematychnykh pokhybok vymiriuvan / O. M. Vasilevskiy // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnogo instytutu. – 2012. – № 1. – S. 9 – 12.
10. Vasilevskiy O. M. Calibration method to assess the accuracy of measurement devices using the theory of uncertainty / O. M. Vasilevskiy // International Journal of Metrology and Quality Engineering. – 2014. – Vol. 5. – Num. 4. – DOI: 10.1051/ijmqe/2014017.
11. Vasilevskiy O. M. Metodyka vyznachennia mizhpovirochnoho intervalu zasobiv vymiriuvannya na osnovi kontseptsii nevyznachenosti / O. M. Vasilevskiy // Tekhnichna elektrodynamika. – 2014. – № 6. – S. 81 – 88.
12. Vasilevskiy O. M. Aktualni problemy metrolohichnogo zabezpechennia : [navchalnyi posibnyk] / O.M. Vasilevskiy, V.O. Podzharenko. - Vinnytsia : VNTU, 2010. – 214 s. – ISBN 978-966-641-348-5.
13. Stephens M. A. Anderson-Darling Test for Goodness of Fit. In: Encyclopedia of Statistical Sciences. – Vol. 1. – 1982. – pp.81-85, (eds. Johnson, N.L. and Kotz, S.), Wiley Interscience.
14. Vasilevskiy O.M. Osnovy teorii nevyznachenosti vymiriuvan : [pidruchnyk] / O.M. Vasilevskiy, V.Iu. Kucheruk, Ye.T. Volodarskiy. – Vinnytsia : VNTU, 2015. – 230 s. – ISBN 978-966-641-632-5.
15. Podzharenko V. O. Otsinka virohidnosti avtomatyzovanoho kontroliu skladovykh elementiv humusu v grunti / V.O. Podzharenko, V. M. Didych, O. M. Vasilevskiy // Visnyk natsionalnogo universytetu „Lvivska politekhnika”. Serii: „Avtomatyka, vymiriuvannya ta keruvannya”. – 2009. – № 639. – S. 51 – 54.
16. Vasilevskiy O. M. Elementy teorii pidvyshchennia tochnosti vymiriuvannya ta cynkronizatsii kutovykh shvydkosti rotoriv vzaiemozviazanykh elektromotoriv : [monohrafiia] / O. M. Vasilevskiy, P. I. Kulakov. – Vinnytsia : VNTU, 2011. – 176 s.
17. The method of translation additive and multiplicative error in the instrumental component of the measurement uncertainty / O. Vasilevskiy, V. Kucheruk, V. Bogachuk K. Gromaszek, W. Wójcik, S. Smailova, N. Askarova // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 10031. – 2016. - art. no. 1003127. - DOI: 10.1117/12.2249195.
18. Vasilevskiy O. M. Povirka vymiriuvalnykh kanaliv kutovoi shvydkosti pryznachenykh dlia kontroliu nesynkhnornosti obertannia rotoriv / O. M. Vasilevskiy // Visnyk inzhenernoi akademii Ukrainy. – 2011. – № 1. – S. 253–256.
19. Subrahmanyam V. Electric Drives / V. Subrahmanyam. – McGraw-Hill: USA, 1996. – 715 p.
20. Vasilevskiy O. M. Otsiniuvannya nevyznachenosti dynamichnykh vymiriuvan / O. M. Vasilevskiy // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnogo instytutu. – 2011. – № 3. – S. 9–13.
21. Podzharenko V. O. Otsinka statychnykh metrolohichnykh kharakterystyk vymiriuvalnykh kanaliv vibratsii / V. O. Podzharenko, O. M. Vasilevskiy, V. M. Sevastianov // Ukrainyskiy metrolohichnyi zhurnal. – 2005. – № 2. – S. 60–65.
22. Crowder R. M. Electric Drives and their Controls / R. M. Crowder. – Oxford University Press: Oxford, 1998. – 256 p.
23. Vasilevskiy O. M. Elementy teorii pobudovy potentsiometrychnykh zasobiv vymiriuvannoho kontroliu aktyvnosti ioniv z pidvyshchenoi virohidnistiu : [monohrafiia] / O. M. Vasilevskiy, V. M. Didych. – Vinnytsia : VNTU. – 2013. – 176 s.
24. Sysoev Yu.S. Analysis of the operational stability of measurement instruments by stochastic prediction of drift in their metrological characteristics / Yu.S. Sysoev, A.I. Tikhomirova // Meas. Tech. – 2012. – Vol. 6. – p. 613–621.
25. Didych V. M. Potentiometer facilities of ions activity measurement of humus elements in soil / V. M. Didych, O. M. Vasilevskiy, V. O. Podzharenko // Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute. – 2008. – № 5. – R. 5–10.
26. Vasilevskiy O. M. Metrological characteristics of the torque measurement of electric motors / O. M. Vasilevskiy // International Journal of Metrology and Quality Engineering. – 2017. – Vol. 8. – Num. 7. – DOI 10.1051/ijmqe/2017005.
27. Vasilevskiy O.M. Praktykum z metrolohichnogo nahliadu za zasobamy vymiriuvan : [praktykum] / O. M. Vasilevskiy, V. O. Podzharenko. – Vinnytsia : VNTU, 2008. – 87 s.
28. Vasilevskiy O. M. A frequency method for dynamic uncertainty evaluation of measurement during modes of dynamic operation / O. M. Vasilevskiy // International Journal of Metrology and Quality Engineering. – 2015. – Volume 6. – Number 2. – R. 202. – DOI 10.1051/ijmqe/2015008.
29. Podzharenko V. O. Otsinka statychnykh metrolohichnykh kharakterystyk vymiriuvannoho kanalu temperatury / V. O. Podzharenko, V. M. Didych, O. M. Vasilevskiy // II Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Intehrovani intelektualni roboto-tekhnichni kompleksy» (IIRTK-2009). – Kyiv : NAU. – 2009. – S. 83–85.
30. Vasilevskiy O. M. Means for measuring the dynamic torque electric motors and an analysis of its accuracy / O. M. Vasilevskiy // Vymiriuvanna tekhnika ta metrolohiia. – 2012. – № 73. – R. 52–56.
31. Podzharenko V. O. Diagnostics of technical condition of electromechanical systems for the logarithmic decrement / V.O. Podzharenko, O.M. Vasilevskiy // Proceedings of Donetsk National Technical University. – 2005. – 88. – R. 138–144.
32. Sopruniuk P. M. Neopredelennost rezultatov zmyereniy pry kontrole asynkhnornosti vrashchennia elektromekhanicheskyykh preobrazovatelei / P. M. Sopruniuk, A. N. Vasylevskiy, Yu. A. Chabaniuk // Systemy obrobky informatsii. – 2006. – № 7 (56). – S. 72 – 75.
33. Vasilevskiy O. M. Systema vymiriuvannoho kontroliu parametriv vzaiemozviazanykh rotornykh mashyn : [monohrafiia] / O. M. Vasilevskiy, V. O. Podzharenko. – Vinnytsia : UNIVERSUM-Vinnytsia, 2007. – 156 s.
34. Vasilevskiy O. M. Metrolohichne zabezpechennia zasobu vymiriuvannya kutovoi shvydkosti ta momentu inertsi elektromotoriv / O. M. Vasilevskiy // Visnyk inzhenernoi akademii Ukrainy. – 2012. – № 1. – S. 211 – 215.