

УДК 621.317

¹О.М. Васілевський, д.т.н., ¹О.Г. Ігнатенко, ¹В.В. Присяжнюк, Костюк

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ МЕТРОЛОГІЧНОЇ НАДІЙНОСТІ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ З УРАХУВАННЯМ КОНЦЕПЦІЇ НЕВИ- ЗНАЧЕНОСТІ

¹Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, o.vasilevskyi@gmail.com

Запропоновано методику оцінювання метрологічної надійності засобів виміральної техніки, яка базується на використанні концепції невизначеності вимірювання, що дозволяє забезпечувати метрологічну простежуваність, а також встановлювати міжповірочний інтервал для засобів виміральної техніки.

Ключові слова: метрологічна простежуваність, метрологічна надійність, міжповірочний інтервал, невизначеність вимірювання, калібрування.

Вступ

Характерною особливістю сучасного стану засобів виміральної техніки (ЗВТ) є їх широке впровадження у виробничі та технологічні процеси. Надійність, що визначає здатність безвідмовно працювати з незмінними технічними характеристиками протягом значного періоду часу, є важливим техніко-економічним показником якості цих засобів. Вона підтримується правильною експлуатацією ЗВТ, профілактичним контролем, калібруванням та ремонтом. Однією із характеристик надійності ЗВТ, що підлягає визначенню, є міжповірочний інтервал. Однак існуючі в нашій країні методики оцінювання цього інтервалу не враховують сучасних міжнародних вимог до подання результатів вимірювання на основі концепції невизначеності. Цей факт унеможливує коректне порівняння показників якості вітчизняної продукції та аналогічної продукції передових країн світу, знижує її конкурентноспроможність.

Тому метою даної статті є створення такої методики оцінювання метрологічної надійності ЗВТ під час їхньої метрологічної атестації чи калібрування, яка б врахувала міжнародні вимоги, що діють у сфері оцінювання якості вимірювань і випробувань електротехнічної продукції.

Аналіз стану досліджень та публікацій

В сучасних літературних джерелах достатньо обґрунтовано розглядаються теоретичні підходи до оцінювання метрологічної надійності ЗВТ на основі допустимих меж нестабільності метрологічних характеристик, критерію метрологічної нестабільності, дрейфу метрологічних характеристик, що базуються на теорії похибок вимірювання і надійності технічних засобів [1 – 5]. Окремо розглянуті способи оцінювання і подання невизначеностей вимірювань, що ґрунтуються на міжнародних вимогах [6 – 10]. Однак, підходи до оцінювання метрологічної надійності ЗВТ під час їхньої метрологічної атестації чи калібрування на основі концепції невизначеності вимірювань у вітчизняних та зарубіжних літературних джерелах відсутні. Тому виникає необхідність у розробці методики оцінювання метрологічної надійності ЗВТ, яка б дозволяла встановлювати міжповірочних інтервалів ЗВТ на основі концепції невизначеності. Це дозволить забезпечити єдність та простежуваність вимірювань.

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

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

де $P(t)$ – технічна вірогідність безвідмовної роботи ЗВТ за час напрацювання t [1, 6].

Якщо середню частку метрологічних відмов $q(t)$ визначити не вдається, то приймають найгірший випадок, в якому $q(t) \approx 1$, і приймають $P_M(t) = P(t)$.

Відомо, що основними показниками, які можуть використовуватися для розрахунку характеристик метрологічної надійності, є [1, 4]: вірогідність безвідмовної роботи; інтенсивність метрологічних відмов; середній час до першої метрологічної відмови; параметр потоку відмов (метрологічних); напрацювання до першої метрологічної відмови. Однак, в матеріалах розробників ЗВТ, поданих на випробування з метою затвердження типу, калібрування чи метрологічної атестації, часто відсутня достові-

рна інформація про нестабільність метрологічних характеристик ЗВТ, яка необхідна для обґрунтованого присвоєння первинного міжповірного інтервалу. У цих випадках для його оцінки можна скористатися нормованими значеннями показників надійності, що вказані в технічних умовах на ЗВТ, або використати інформацію про міжповірочний інтервал аналога з подальшим коригуванням цього значення в процесі експлуатації на основі даних про інтенсивність використання та умови вимірювання.

Викладення основного матеріалу

Для оцінювання метрологічної надійності ЗВТ з урахуванням концепції невизначеності вимірювання пропонується наступна методика.

1. Проводиться серія вимірювань на нижній межі вимірювання ЗВТ (мінімальне значення, що нормується в ЗВТ), всередині діапазону вимірювання ЗВТ та на верхній межі вимірювання (максимальне значення, що нормується в ЗВТ). При цьому на вході ЗВТ задаються еталонні значення вимірюваної величини, що відповідають пронормованому діапазону вимірювання ЗВТ [11]. На основі отриманих експериментальних даних визначаються стандартні невизначеності типу *A* для нижньої межі вимірювання, для середини діапазону вимірювання та для верхньої межі вимірювання за формулою

$$u_A(\bar{x}_K) = \left[\sum_{i=1}^n (x_{i,K} - \bar{x}_K)^2 \right]^{1/2} / [(n-1)n]^{1/2}, \quad (2)$$

де $x_{i,K}$ – *i*-те значення, що отримане в *K*-ій групі спостережень ($K=1; 2; 3$), відповідно на нижній межі вимірювання ($K=1$), всередині діапазону вимірювання ($K=2$) та на верхній межі вимірювання ($K=3$); \bar{x}_K – середнє арифметичне значення *K*-ої групи спостережень; *n* – кількість значень в *K*-ій групі спостережень [10, 12].

З отриманих за формулою (2) стандартних невизначеностей типу *A* необхідно вибрати найбільшу за значенням (максимальну) стандартну невизначеність цього типу $u_{Amax}(\bar{x})$, яку в подальшому буде використано для нормування метрологічної надійності та встановлення міжповірного інтервалу ЗВТ.

2. Виконується оцінювання стандартних невизначеностей типу *B* на основі фонду доступної інформації про невилучені залишки систематичних похибок, які теоретично можуть проявлятися в процесі виконання вимірювань. При цьому слід спиратися на інформацію про раніше проведені вимірювання, допустимі робочі умови експлуатації ЗВТ, фізичні властивості вимірюваної величини, паспортні дані ЗВ або довідники [10]. Після оцінки теоретично можливих складових стандартних невизначеностей типу *B* необхідно розрахувати комбіновану (сумарну) стандартну невизначеність типу *B* u_{CB} на основі відомих форм подання комбінованих невизначеностей [12].

3. На основі вище визначених максимальної стандартної невизначеності типу *A* та комбінованої невизначеності типу *B* (теоретично можливих впливах на результат вимірювання складових невизначеностей типу *B*), визначається комбінована невизначеність результату вимірювання при некорельованих значеннях вхідної величини за формулою

$$u_c(y) = \sqrt{[u_{Amax}(\bar{x})]^2 + [u_{CB}]^2}, \quad (3)$$

де $y = f(x, \vec{\eta})$ – функціональна залежність між вхідною *x*, вихідною *y* та впливними $\vec{\eta}$ величинами.

В загальному випадку, якщо відома інформація про дію впливних величин $\vec{\eta}$ на результат вимірювання, комбіновану невизначеність розраховують за формулою

$$u_c(y) = \sqrt{u_{Amax}^2(\bar{x}) + \sum_{z=1}^Z (\partial f / \partial \eta_z)^2 u^2(\eta_z)}, \quad (4)$$

де $\partial f / \partial \eta_z = c_z$ – чутливості функції перетворення ЗВТ; $u(\eta_z)$ – стандартні невизначеності, оцінені за типом *B*, *z* – кількість впливних величин.

Якщо між значеннями вхідної величини існує кореляційний зв'язок, то формула для знаходження комбінованої невизначеності результату вимірювання буде мати вигляд

$$u_c(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\partial f / \partial x_i) u(x_i) (\partial f / \partial x_j) u(x_j) r(x_i, x_j)}, \quad (5)$$

де $y_{cor} = f(x_i, x_j)$ – функціональна залежність між значеннями вхідних величин x_i та x_j ; $u(x_i)$ – стандартна невизначеність вимірювання значення вхідної величини x_i , оцінена за типом A або за типом B ; $u(x_j)$ – стандартна невизначеність вимірювання значення вхідної величини x_j , оцінена за

типом A або за типом B ; $r(x_i, x_j) = \frac{\sum_{l=1}^{N_{ij}} (x_{i_l} - \bar{x}_i)(x_{j_l} - \bar{x}_j)}{\left[\sum_{l=1}^{N_{ij}} (x_{i_l} - \bar{x}_i)^2 \sum_{l=1}^{N_{ij}} (x_{j_l} - \bar{x}_j)^2 \right]^{-1/2}}$ – коефіцієнт

кореляційного зв'язку; l – кількість пар вимірних значень вхідних величин x_i та x_j .

4. Визначається розширена невизначеність, яка буде прописана як нормована величина в технічній документації на ЗВ. Її одержують шляхом множення комбінованої невизначеності результату вимірювання на коефіцієнт охоплення за формулою

$$U_H = k_{Puc}(y), \quad (6)$$

де k_P – коефіцієнт охоплення, що визначається на підставі інформації про довірчу ймовірність P та ефективне число ступенів свободи ν_{eff} .

Довірча ймовірність P , як правило, вказується в технічних умовах на ЗВТ. Якщо в технічній документації не вказано довірчу ймовірність, то вона визначається експериментальним шляхом, або встановлюється апріорно [1, 2, 4, 16].

Ефективне число ступенів свободи розраховується за формулою Велча-Саттерсвейта

$$\nu_{eff} = (n-1)u_c^4(y) [u_{Amax}(\bar{x})]^{-4}. \quad (7)$$

На основі інформації про довірчу ймовірність P та ефективне число ступенів свободи ν_{eff} з таблиці Стюдента визначається коефіцієнт охоплення k_P .

Якщо ефективне число ступенів свободи більше 30 ($\nu_{eff} > 30$), то коефіцієнт охоплення $k_{0,9} = 1,64$ при ймовірності $P = 0,9$, $k_{0,95} = 1,96$ – при $P = 0,95$, $k_{0,99} = 2,58$ – при $P = 0,99$ і $k_{0,9973} = 3$ – при $P = 0,9973$.

5. На основі апріорної інформації про інтенсивність експлуатації ЗВТ та значення середнього напруження до відмови ЗВТ визначають календарну тривалість t експлуатації ЗВТ.

6. Для визначення міжповірного інтервалу ЗВТ його потрібно деякий час випробувати (експлуатувати) в реальних умовах, за яких будуть виконуватись вимірювання.

7. Після тривалих випробувань (дослідної експлуатації) ЗВТ розраховують (перераховують) комбіновану та розширену невизначеності в реальних умовах експлуатації. При цьому під час розрахунків враховують робочі умови експлуатації (реальне значення температури навколишнього повітря та інші умови вимірювань). Тобто виконують перерахунок невизначеностей вимірювань відповідно до пунктів 1 – 4. В результаті отримують значення розширеної невизначеності вимірювань U_E в реальних умовах експлуатації, яке в подальшому буде використане для визначення (уточнення) міжповірного інтервалу ЗВТ.

8. На основі розрахованих в пунктах 1 – 7 величин та в припущенні про симетричність закону розподілу невизначеностей першу оцінку міжповірного інтервалу T_1 пропонується виражати за формулою [12 - 15]

$$T_1 = t \ln \left(\frac{U_E}{k_{2P-1} u_{Amax}(\bar{x})} \right) \ln^{-1} \left(\frac{U_H}{k_P u_{Amax}(\bar{x})} \right), \quad (8)$$

де k_{2P-1} – коефіцієнт охоплення, що відповідає довірчій ймовірності $2P-1$; t – календарна тривалість експлуатації ЗВТ.

Коефіцієнт охоплення k_{2P-1} визначається з таблиці Стюдента на основі інформації про довірчу ймовірність $2P-1$ та ефективне число ступенів свободи ν_{eff} .

9. Другу оцінку міжповірного інтервалу ЗВТ T_2 пропонується виражати формулою [12 - 15]

$$T_2 = t (U_E - k_{2P-1} u_{Amax}(\bar{x})) [U_H - k_P u_{Amax}(\bar{x})]^{-1}. \quad (9)$$

10. На основі визначених оцінок міжповірних інтервалів T_1 і T_2 встановлюється міжповірний інтервал ЗВТ, який приймається рівним мінімальному значенню між значеннями T_1 і T_2 , тобто

$$T_{ЗВТ} = \min[T_1, T_2]. \quad (10)$$

Отже, описана методика оцінювання метрологічної надійності ЗВТ дозволяє встановлювати міжповірний інтервалів ЗВТ з урахуванням концепції невизначеності вимірювань. Запропонована методика відповідає міжнародним вимогам до оцінювання якості вимірювань та сприяє забезпеченню

єдності та простежуваності вимірювань та випробувань, а також забезпечує конкурентоспроможність вітчизняної продукції на світовому ринку.

Висновки

Запропонована методика оцінювання метрологічної надійності ЗВТ дозволяє встановлювати терміни проведення чергових повірок, врахувавши при цьому міжнародні вимоги до оцінювання показників якості вимірювань – концепцію невизначеності. Вона сприяє забезпеченню єдності та простежуваності вимірювань, а також забезпечує конкурентоздатність продукції на світовому ринку. Апробація методики оцінювання метрологічної надійності під час метрологічної атестації засобів вимірювання обертових параметрів електричних машин (електродвигунів) підтвердила її коректність та ефективність.

Список літературних джерел

1. РМГ 74-2004 ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений. – М.: Стандартинформ, 2005.
2. Матвеевский В. Р. Надежность технических средств управления. – М.: МГИЭМ, 1993. – 92 с.
3. Яковлев М. Ю. Забезпечення метрологічної надійності засобів вимірювальної техніки авіаційних радіотехнічних систем на етапі експлуатації // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2007. – Вип. 3 (15). – С. 136 – 141.
4. Васілевський О. М. Нормування показників метрологічної надійності // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 4. – С. 9 – 13.
5. Яковлев М. Ю. Оцінка метрологічної нестабільності метрологічних характеристик при визначенні первинного міжповірочного інтервалу засобів вимірювальної техніки авіаційних радіотехнічних систем // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2008. - № 2 (29). – С. 40 – 44.
6. ISO/IEC Guide 98-1:2009 «Uncertainty of measurement – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement». – Geneva (Switzerland): ISO. – 2009. – 32 p.
7. IEC GUIDE 115-2007 «Application of uncertainty of measurement to conformity assessment activities in the electrotechnical sector». – Geneva (Switzerland): IEC. – 2007. – 54 p.
8. Dorozhovets M., Warsza Z. Evaluation of the uncertainty type A of autocorrelated measurement observations // Measurement Automation and Monitoring. – 2007. – № 2. – PP. 20-24.
9. Васілевський О. М. Оцінювання невизначеності динамічних вимірювань // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 3. – С. 9 – 13.
10. Васілевський О. М., Кучерук В. Ю., Володарський Є.Т. Основи теорії невизначеності вимірювань. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 229 с.
11. Васілевський О. М., Поджаренко В. О. Актуальні проблеми метрологічного забезпечення. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 214 с.
12. Vasilevskiy O. M. Calibration method to assess the accuracy of measurement devices using the theory of uncertainty, International Journal of Metrology and Quality Engineering, 2014, 5.04: 403.
13. Васілевський О. М., Ігнатенко О.Г. Нормування показників надійності технічних засобів. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 160 с.
14. Васілевський О. М. Методика визначення міжповірочного інтервалу засобів вимірювання на основі концепції невизначеності // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 6. – С. 81 – 88.
15. Васілевський О. М., Кулаков П.І. Елементи теорії підвищення точності вимірювання та синхронізації кутових швидкостей роторів взаємозв'язаних електромоторів. – Монографія. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 176 с.
16. Васілевський О. М. Методика визначення довірчого рівня при оцінюванні розширеної непевності вимірювання віброприскорення // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2015. – № 3 (34). – С. 100-103.