

УДК 531.7:62-2:629.7 (043.3)

DOI: 10.18372/2073-4751.72.17459

Квасніков В.П., д.т.н.,
orcid.org/0000-0002-6525-9721,Катаєв Д.А.,
orcid.org/0000-0002-2383-3123,Квашук Д.М., к.т.н.,
orcid.org/0000-0002-4591-8881

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ КООРДИНАТНО ВИМІРЮВАЛЬНОЇ РУКИ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Національний авіаційний університет

volodymyr.kvasnikov@npp.nau.edu.ua,
627627@stud.nau.edu.ua,
dmytro.kvashuk@npp.nau.edu.ua

Вступ

В останнє десятиліття спостерігається зростаючий розвиток систем розподіленої вимірювальної метрології, тобто приладів, що складаються з кількох пристроїв, які розташовані навколо об'єкта вимірювання та взаємодіють під час вимірювального процесу [1-3]. Найбільшого поширення серед таких приладів здобули метрологічні засоби типу координатно-вимірювальної руки (КВР). Більшість цих систем були розроблені в галузі великомасштабної вимірювальної метрології, що стосується вимірювання об'єктів середнього та великого розміру у промислових умовах. Типовими промисловими застосуваннями є вимірювання поверхонь складної геометричної форми, перевірка розмірів та збірки механічних компонентів великих розмірів. Не дивлячись на велику кількість вітчизняних та зарубіжних досліджень у цій галузі [3], більшість теоретичних та прикладних досліджень нових методів вимірювання з мінімальною похибкою не мають практичного застосування. Існуючі методи малопродуктивні, мають невисоку точність, завадостійкість, надійність та не можуть бути використані в складі гнучких виробничих систем. Ці методи не забезпечують необхідну точність вимірювання деталей із складною просторовою поверхнею за допомогою КВР та не відповідають сучасним вимогам щодо точності та швидкодії вимірювань. Тому

задача розробки гнучких та оперативних методів підвищення точності вимірювань та забезпечення контролю їх достовірності є досі актуальною та вимагає подальшого вирішення.

Мета

Метою дослідження є удосконалення методів контролю надійності вимірювань деталей із складною просторовою поверхнею за допомогою координатно вимірювальної руки в режимі реального часу.

Основна частина

У загальному вигляді поняття надійності вимірювання визначається наступним чином. Для кожної вимірної величини x можна визначити інтервал форми та розташування поверхонь $[Q_{\text{MIN}}, Q_{\text{MAX}}]$ (де Q_{MIN} означає нижню допустиму межу, а Q_{MAX} – верхню допустиму межу). Міра M_x величини x , яка отримана КВР, вважається надійною, якщо $M_x \in [Q_{\text{MIN}}, Q_{\text{MAX}}]$.

Імовірнісні ризики $I(\alpha)$ та $II(\beta)$ типу у цьому випадку будуть відповідати наступним параметрам:

$\alpha = \Pr\{x_M \notin [Q_{\text{MIN}}, Q_{\text{MAX}}]\}$ – за умов відсутності джерел систематичних похибок вимірювань;

$\beta = \Pr\{x_M \in [Q_{\text{MIN}}, Q_{\text{MAX}}]\}$ – за умов наявності джерел систематичної похибки вимірювання.

Зазвичай Q_{MIN} та Q_{MAX} визначаються з урахуванням природної невизначеності вимірювальної системи, яка пов'язана з її метрологічними

характеристиками точності, надійності та швидкодії, за відсутності джерел систематичних похибок [КВР]. Але, слід зазначити, що систематичні похибки ніколи не можуть бути повністю компенсовані, особливо коли вони відносно невеликі та взаємопов'язані одна з одною. В роботі [9] доведено, що припущення про наявність у результатах вимірювання після проведення корегувальних розрахунків лише випадкових похибок загалом не є дійсним, навіть якщо воно може бути достатнім для багатьох прикладних ситуацій.

Для розподілених систем, якою є КВР, локальні аномалії одного або кількох мережевих пристроїв можуть спотворити або навіть поставити під загрозу цілі вимірювання. З іншого боку, коли ці аномалії розпізнаються, результати вимірювань можна виправити, тимчасово виключивши або замінивши несправні пристрої. Це причина, чому розподілені системи, такі як КВР, до певної міри досить «вразливі», але можуть бути успішно захищені відповідними інструментами діагностики.

Для розподілених систем типовий діагностичний підхід базується на так званому резервуванні на основі моделі [10], де реплікація фізичного інструментарію, що є типовим для підходу фізичного

резервування, замінюється використанням відповідних математичних моделей. Ці моделі можуть впливати з фізичних законів, застосованих до експериментальних даних, або з методу самонавчання (наприклад, нейронних мереж) і дозволяють виявляти системні збої шляхом порівняння вимірних і розроблених моделлю змінних процесу. Цей діагностичний підхід став можливим завдяки тому факту, що для розподілених систем кількість мережевих пристроїв, які зазвичай беруть участь у вимірюванні, перевищує кількість, необхідну для проведення процесу вимірювання.

Цей тип діагностики заснований на взаємодії мережевих пристроїв, чії локальні спостереження використовуються разом не тільки для метрологічних показників вимірювального об'єкту, але й для виявлення можливих аномалій вимірювань або аварій.

Ця діагностика зазвичай включає чотири типи тестів, відповідно до кожного модуля, спрямовані на i -ую оцінку ненадійних вимірювань, її ідентифікацію та тимчасове виключення ймовірно несправних мережевих пристроїв. Блок-схема на рисунку 1 ілюструє типову послідовність виконання цих тестів.

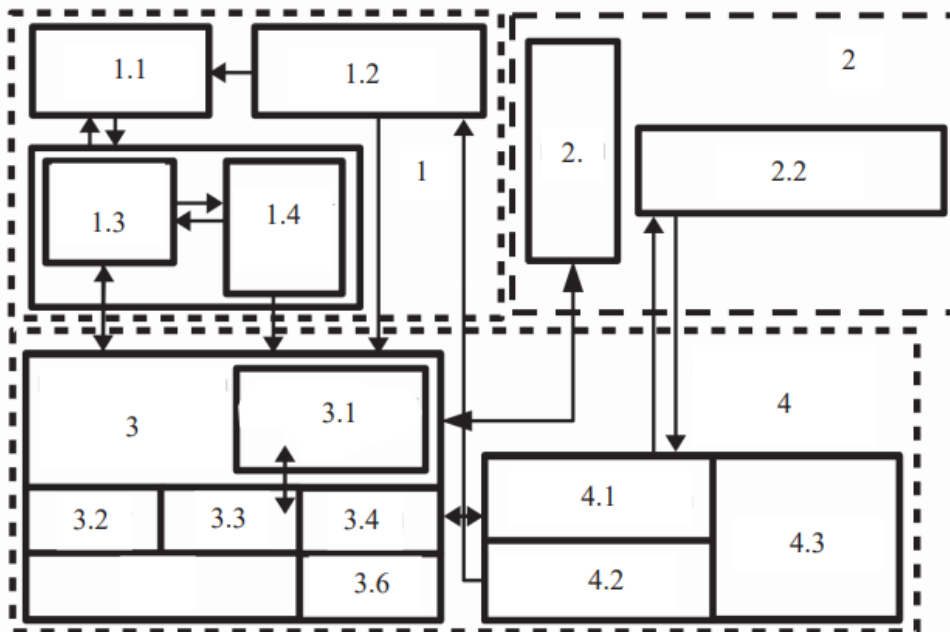


Рис. 1. Логічна-схема, що показує послідовність впровадження, пов'язану з діагностичними тестами в режимі онлайн.

Схема складається з чотирьох основних частин: 1 – сенсорний модуль, 2 – інтерфейсний модуль, 3 – обчислювальний модуль, 4 – модуль цифрового керування (верхній рівень).

В свою чергу, сенсорний модуль складається із: 1.1 – сенсора, 1.2 – поворотного механізму, 1.3 – генератора опорної частоти, 1.4 – диференціатора частот.

Сенсор (1.1) забезпечує відбір та зняття аналогового сигналу датчика КВР. Поворотний механізм (1.2) виконує переміщення вимірювального об'єкту. Генератор опорної частоти (1.3) подає на вимірювальну частину датчика КВР задану вхідну частоту. Диференціатор (1.4) порівнює вихідний сигнал з датчика КВР та опорний (заданий) сигнал і передає інформацію на обробку.

Інтерфейсний модуль (2) містить в собі: 2.1 – мікроконтролер та 2.2 – екран (ЖКІ) і призначений для зберігання та виведення інформації.

До складу обчислювального модуля (3) входить: 3.1 – генератор частоти, 3.2 – STM32, 3.3 – USART, 3.4 – OWEN, 3.5 – I2C (шини), 3.6 – MODBUS.

Мікроконтролер STM32 (3.2) забезпечує перетворення аналогового сигналу в цифровий та виконує математичну обробку даних. Блоки 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 є апаратним інтерфейсом і призначені для обміну даними з верхнім рівнем (PLC, ПЕОМ). Інтерфейсний модуль забезпечує

налаштування АПК керування швидкістю переміщення датчика КВР та контроль введення/виведення інформації.

Блок цифрового керування (4) складається із: 4.1 – клавіш керування, 4.2 – модуля керування швидкістю, 4.3 – модуля контролю введення/виведення інформації. Склад даного блоку може формуватися за вимогами користувача. Тобто може містити в собі ЕОМ відповідного класу та потужності, або PLC різних виробників для візуалізації і збереження даних.

Кожен модуль піддається таким видам тестування:

- Два глобальних тести, спрямовані на оцінку надійності вимірювань на основі їх невизначеності.
- Локальний тест, який проводиться у випадку, якщо принаймні одним із глобальних тестів ідентифікує потенційно несправні пристрої та тимчасово виключає їх із процесу вимірювання, не перериваючи його.

Розглянемо метод проведення глобального тесту. Як відомо, зонд КВР оснащений двома зондовими пристроями – тобто $A = (X_A, Y_A, Z_A)$ і $B = (X_B, Y_B, Z_B)$.

Відстань між двома зондовими пристроями (d_{AB}) апіорі відома. З іншого боку, локалізувавши дві вимірювальні точки, їхню евклідову відстань можна оцінити як:

$$\bar{\alpha}_{AB} = \|A - B\| = \sqrt{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2 + (Z_A - Z_B)^2} \quad (1)$$

Відхилення ε_{AB} визначається як:

$$\varepsilon_{AB} = \bar{\alpha}_{AB} - d_{AB} \quad (2)$$

За відсутності просторових/спрямованих ефектів доцільно пов'язати значення ε_{AB} із нульовим середнім нормальним розподілом:

$$\varepsilon_{AB} \sim N(\mu_{AB} \approx 0, \sigma_{AB}). \quad (3)$$

Припускаючи α як помилку I типу, можна виконати додатковий статистичний тест, щоб оцінити надійність вимірювання. Нехай Q_{MIN} і Q_{MAX} будуть відповідно $(\alpha/2)$ -квантиль і $(1-\alpha/2)$ -квантиль нормального розподілу із середнім $\varepsilon_{AB} = 0$ і стандартним відхиленням σ_{AB} .

Для заданого значення α Q_{MIN} і Q_{MAX} можна виразити як кратні стандартного відхилення σ_{AB} :

$$\begin{aligned} Q_{MIN} &= z_{\alpha/2} \cdot \sigma_{AB} \\ Q_{MAX} &= z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma_{AB} \end{aligned} \quad (4)$$

де $z_{\alpha/2}$ та $z_{(1-\alpha/2)}$ – та $(1-\alpha/2)$ -квантилями стандартного нормального розподілу. Вони можуть бути визначені

$\Phi^{-1}(\alpha/2)$ і $\Phi^{-1}(1-\alpha/2)$ відповідно, будучи $\Phi^{-1}(Pr)$ оберненою інтегральною функцією розподілу, що відноситься до стандартного нормального розподілу.

Знову ж таки, значення σ_{AB} можна апіорі оцінити на попередньому етапі

встановлення та калібрування системи КВР.

Кожного разу, коли виконується вимірювання, система діагностики обчислює кількість у формулі (2). $[Q_{\text{MIN}}, Q_{\text{MAX}}]$ приймається як симетричний інтервал прийнятності для тесту на надійність вимірювання; тобто якщо розрахована нерівність ε_{AB} задовольняє умову:

$$\varepsilon_{\text{AB}} \in [Q_{\text{MIN}}, Q_{\text{MAX}}] \quad (5)$$

вимірювання можна вважати надійним.

Зазвичай, рівень ризику α встановлюється користувачем. Подібно до попереднього діагностичного тесту, стандартне відхилення σ_{AB} можна оцінити емпірично, на основі прийнятної кількості кутів вимірювань.

Набір M точок, випадково розподілених у вимірювальному просторі $\xi \subseteq \mathbb{R}^3$ вимірюються у випадковій послідовності. Для кожного j -го вимірювання (де $j = 1 \dots M$), розраховується відхилення $\varepsilon_{\text{AB},j}$.

За відсутності причин систематичної похибки та часових або просторових спрямованих ефектів, можна припустити однаковий нормальний розподіл для всіх випадкових величин $\varepsilon_{\text{AB},j}$, тобто

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{AB},j} &\sim N(\mu_{\text{AB}}, \sigma_{\text{AB}}), \\ \mu_{\text{AB}} &= (\sum_{j=1}^M \varepsilon_{\text{AB},j}) / M \approx 0. \end{aligned}$$

Стандартне відхилення можна оцінити як:

$$\hat{\sigma}_{\text{AB}} = \sqrt{\frac{[\sum_{j=1}^M (\varepsilon_{\text{AB},j} - \mu_{\text{AB}})^2]}{(M-1)}}$$

Результуюче значення $\hat{\sigma}_{\text{AB}}$ вважається еталонним значенням для тесту КВР. Межі випробувань, визначені в рівнянні (5) стають:

$$\begin{aligned} Q_{\text{MIN}} &= z_{\alpha/2} \cdot \hat{\sigma}_{\text{AB}} \\ Q_{\text{MAX}} &= z_{1-\alpha/2} \cdot \hat{\sigma}_{\text{AB}} \end{aligned} \quad (6)$$

Якщо принаймні один із глобальних тестів виходить невдалим, потрібно виконати локальний тест для ізоляції помилок у певному конкретному модулі КВР. Метод полягає в тому, щоб виправити результати сумнівного вимірювання, виключивши мережевий пристрій (пристрої), який імовірно спричинив несправність, без зупинки спостережень від решти мережевих

пристроїв. Таким чином, цільовий процес локалізації ніколи не переривається, навіть за наявності локальних аномалій.

Посилаючись на вимірювання, проведені кожним мережевим пристроєм, два типи відхилень, визначені в можна стандартизувати як:

$$\frac{\varepsilon_{\theta_i}}{\sigma_{\theta}} \text{ and } \frac{\varepsilon_{\phi_i}}{\sigma_{\phi}} \quad i = 1 \dots N, \quad (7)$$

де: σ_{θ} і σ_{ϕ} позначають стандартні відхилення вимірювань, пов'язаних з кутами θ і ϕ відповідно; H – кількість мережевих пристроїв, залучених до i -го вимірювання.

Стандартизовані відхилення можна використовувати для виявлення викидів за допомогою некорельованих та нормально розподілених спостережень у тому сенсі, що якщо i -те спостереження не є викидом, то $\varepsilon_{\theta_i}/\sigma_{\theta}$ та $\varepsilon_{\phi_i}/\sigma_{\phi}$ розподіляються нормально $\sim N(0,1)$. Кожне стандартизоване відхилення порівнюється з квантилем $\alpha/2$ і $(1 - \alpha/2)$ квантилем стандартного нормального розподілу (тобто $z_{\alpha/2}$ і $z_{1-\alpha/2}$) з рівнем значущості α . Нульова гіпотеза, яка означає, що i -те спостереження не є викидом, відхиляється, якщо принаймні одне з двох стандартизованих відхилень у рівнянні (7) не входить до $[z_{\alpha/2}, z_{1-\alpha/2}]$ симетричного довірчого інтервалу, або його абсолютне значення менше або дорівнює $z_{1-\alpha/2}$. Викид в стандартизованому відхиленні зазвичай призводить до збільшення абсолютних значень інших похтбок.

Локальне тестування є простим за умови, що в поточному вимірюванні є лише один передбачувано несправний модуль (або викид): локальне кутове спостереження з найбільшим абсолютним значенням стандартизованих відхилень, за умови, що воно виходить за межі довірчого інтервалу, розглядається як викид, а відповідний мережевий пристрій (D_i) виключається з проблеми триангуляції вимірювальної поверхні.

Припущення, що існує лише один викид, є суворим обмеженням у випадку, якщо вимірювання від кількох мережевих пристроїв погіршуються.

Однак процедуру можна розширити до кількох викидів ітераційно: після

виключення потенційно несправного пристрою статистичний тест і відхилення одного або іншого пристрою можна повторити доти, доки не буде виявлено більше викидів. Звичайно, оцінка таких численних викидів може призвести до великих обчислень. Однак вони являють собою дуже рідкісну подію.

Точність КВР залежить і від додаткових факторних впливів, зокрема обертальних динамічних параметрів мікроелектродвигунів та засобів їх вимірювання. Найбільш вагомим можна вважати вплив електромагнітних перешкод на рівень вихідного сигналу тензометричних сенсорів обертального моменту. Для його виявлення, можна використати систему диференціальних рівнянь руху роботизованої руки, що записується з використанням рівнянь Лагранжа другого роду [11]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_n} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_n} = Q_n, T = \sum_{i=1}^4 T_i,$$

де T – Кінетична енергія системи; q_n , $n=1-6$ – узагальнена координата; Q_n – узагальнена сила за координатою q_n .

Кінетична енергія системи із чотирьох електромоторів визначається за такою формулою:

$$T = \sum_{i=1}^4 T_i,$$

де $i=1 \div 4$ – ланки пристрою.

Кінетичні енергії ланок, кожна з яких здійснює плоский рух, що можна записати у вигляді

$$T_i = m_i \frac{\dot{x}_{Ci}^2 + \dot{y}_{Ci}^2}{2} + \frac{J_{Ci} \dot{\phi}_i^2}{2},$$

де $J_{Ci}, i=1 \div 3 = \frac{m_i l_i^2}{12}$ – центральні моменти інерції ланок; $\dot{x}_{Ci}, \dot{y}_{Ci}$ – проекції швидкостей центрів мас ланок на осі абсолютної системи координат.

Визначивши кінетичні енергії усіх ланок:

$$T_1 = \frac{m_1}{2} (\dot{x}_{C1}^2 + \dot{y}_{C1}^2) + \frac{J_{C1} \dot{\phi}_1^2}{2} + T_2 + \dots + T_3,$$

Для узагальнених сил можна використати принцип можливих переміщень, відповідно до якого системі по кожній узагальненій координаті повідомляється

віртуальне переміщення δq_n , на якому обчислюється робота всіх діючих сил та моментів:

$$Q_n = \frac{\sum_{u=1}^v \delta (A_u)_n}{\delta q_n},$$

де $\sum_{u=1}^v \delta (A_u)_n$, $u = 1 - v$ – сума робіт активних сил на можливі переміщенні δq_n .

Запишемо диференціальні рівняння, що описують рух електромоторів роботизованої руки, де приватні та тимчасові похідні кінетичних енергій кожної ланки для координати x_{C1} мають такий вигляд:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_i}{\partial \dot{x}_{C1}} \right) = m_i \ddot{x}_{C1};$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial x_{C1}} = 0;$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_i}{\partial \dot{x}_{C1}} \right) - \frac{\partial T_i}{\partial x_{C1}} = m_i \ddot{x}_{C1},$$

Розрахувавши диференціальні рівняння, що описують рух роботизованої руки КВР та порівнявши прикладений рівень електромагнітного випромінювання за час переміщення, можна отримати різницю між наявним електромагнітним полем та за його відсутності.

Висновки

Отже, онлайн діагностика, представлена в статті, дозволяє контролювати надійність вимірювань КВР в режимі реального часу на основі деяких статистичних тестів та можуть бути застосовані до будь-якої розподіленої системи. Важливою характеристикою цих тестів є їх здатність вибірково виключати несправні мережеві пристрої, не перериваючи процес вимірювання.

Представлені глобальний та локальні тести вимагають оцінки деяких параметрів; в першу чергу стандартні відхилення, пов'язані з похибками вимірювання. Ці параметри можна оцінити емпірично шляхом виконання деяких попередніх вимірювань у контрольованих умовах, відповідно до обґрунтованого припущення про відсутність ефектів часу або просторових спрямованих ефектів. Цю операцію можна

виконати під час налаштування та калібрування системи без додаткових зусиль.

Оскільки виконання цих тестів у режимі онлайн вимагає певної обчислювальної потужності, це може уповільнити процес вимірювання. Однак цей наслідок мінімізується завдяки високій потужності існуючих процесорів і сегментації тесту за модулями.

Визначено вплив електромагнітних перешкод на точність КВР шляхом моделювання обертальних зусиль мікроелектродвигунів КВР, що вказує на можливість знехтувати даним факторним впливом.

Література

1. Саункін В.Т. Дослідження похибки обробки при використанні засобів активного контролю / В.Т. Саункін, С.Г. Онищук // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль: ТДТУ, 2010. – № 4 (15). – С. 85-89.

2. Yang Li, Meng Gao, Licheng Yang, Cuiping Zhang, Bo Zhang, Xiaonan Zhao. Design of and research on industrial measuring devices based on Internet of Things technology, Ad Hoc Networks. – Vol. 102. – 2020. – P. 102072.

3. Atsuhiko Nishino, Kenichi Fujii. Calibration of a torque measuring device using an electromagnetic force torque standard machine. Measurement. – Vol. 147. – 2019. – P. 106821.

4. Ігнаткін В.У. Моделі процесів метро-логічного обслуговування засобів

ви-мірювальної техніки / В.У. Ігнаткін, В.А. Литвиненко, Л.В. Олійник, О.В. Томашевський, О.Ю. Шпаковський // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2014. – № 1. – С. 21-27.

5. Томашевський О.В. Дослідження впливу на надійність засобів вимірювальної техніки параметрів системи метрологічного обслуговування / О.В. Томашевський, В.У. Ігнаткін, Г.В. Сніжної // Авиационно-космическая техника и технология. – 2018. – № 8. – С. 118-122.

6. Diaa F. ElKott. Automatic Sampling for CMM Inspection Planning of Free Form Surfaces / Diaa F. ElKott. Windsor. – Canada: Ontario, 2011. – 162 p.

7. Franco P., Jodar J. An equivalent error based stochastic model for improving the accuracy prediction in 3-axis FXYZ coordinate measuring machines. Measurement. – Vol. 182. – 2021. – P. 109660.

8. Jerzy Sladek, Ksenia Ostrowska, Adam Gaska. Modeling and identification of errors of coordinate measuring arms with the use of a metrological model. Measurement. – 2013. – Vol. 46. – Iss. 1. – P. 667-679.

9. Єжов С.М., Макарець М.В., Романенко О.В. Класична механіка. – К.: ВПЦ "Київський університет", 2008. – 480 с.

Квасніков В.П., Катаєв Д.А., Квашук Д.М.,

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ КООРДИНАТНО ВИМІРЮВАЛЬНОЇ РУКИ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

У статті розглянуто поняття надійності вимірювання, де для кожної вимірної величини можна визначити інтервал форми та розташування поверхонь. Якщо міра отриманої величини потрапляє в цей інтервал, то вона вважається надійною. У статті також розглянуто імовірнісні ризики вимірювань, які пов'язані з наявністю джерел систематичних похибок вимірювання. Для розподілених систем, таких як КВР, рекомендується діагностичний підхід на основі резервування на основі математичних моделей. У статті також зазначено, що систематичні похибки ніколи не можуть бути повністю компенсовані. Розподілені системи досить вразливі, але можуть бути успішно захищені відповідними інструментами діагностики. Доведено що онлайн діагностика, представлена в статті, дозволяє контролювати надійність вимірювань КВР в режимі

реального часу на основі деяких статистичних тестів та може бути застосовані до будь-якої розподіленої системи.

Ключові слова: *координатно-вимірвальна машина, похибка вимірювання, координатні вимірювання, калібрування, метод розрахунку.*

Kvasnikov V.P., Kataiev D.A., Kvashuk D.M.

METHOD OF IMPROVING MEASUREMENT RELIABILITY USING A COORDINATE MEASURING ARM IN REAL-TIME MODE

The article discusses the concept of measurement reliability, where for each measured quantity, the interval of form and surface location can be determined. If the measure of the obtained quantity falls within this interval, it is considered reliable. The article also examines the probability risks of measurements, which are associated with the presence of sources of systematic measurement errors. For distributed systems, such as KVR, a diagnostic approach based on reservation using mathematical models is recommended. The article also notes that systematic errors can never be fully compensated. Distributed systems are quite vulnerable, but can be successfully protected by appropriate diagnostic tools. It has been shown that the online diagnostics presented in the article allows for real-time monitoring of the reliability of KVR measurements based on some statistical tests and can be applied to any distributed system.

Keywords: *coordinate measuring machine, measurement error, coordinate measurements, calibration, calculation method.*