

МОДЕЛЮВАННЯ ОЦІНЮВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИСТЕМНО-ОРІЄНТОВАНИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Олег Величко, д.т.н., проф., Сергій Курсін, к.т.н., старший дослідник

Державне підприємство “Укрметртестстандарт”, Україна;

e-mail: velychko@hotmail.com

Анотація

Основним призначенням системно-орієнтованих засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) є забезпечення автоматизованого збору, обробки, аналізу та передачі вимірювальних даних у складі складних інформаційно-вимірювальних систем. Такі ЗВТ застосовуються в автоматизованих виробничих системах, інтелектуальних вимірювальних системах, при контролі технологічних процесів та проведенні наукових досліджень тощо. Основні властивості системно-орієнтованих ЗВТ забезпечуються комбінацією сучасного апаратного забезпечення, потужних алгоритмів цифрової обробки та інтеграції в автоматизовані системи. В них впроваджуються мікропроцесорні системи з реалізацією алгоритмів самодіагностики, вбудовані контролери реального часу тощо. Вони мають модульну архітектуру з можливістю програмної конфігурованості. Окрім традиційних для ЗВТ методів їх випробувань для системно-орієнтованих ЗВТ підлягає обов'язковому випробовуванню його програмне забезпечення (ПЗ). Проведене математичне моделювання дозволило розробити множинну модель системи показників властивостей ЗВТ. Запропонована модель дозволяє здійснювати дослідження впливовості показників властивостей ЗВТ і виконувати їх оцінювання на всіх стадіях життєвого циклу ЗВТ. Вона також дозволяє враховувати специфічних параметрів властивостей ЗВТ і відповідні методики щодо їх визначення. Модель дозволяє враховувати особливості і системно-орієнтованих ЗВТ, зокрема показники властивості ЗВТ щодо забезпечення системних функцій і відповідні методики їх визначення. На кожній фазі життєвого циклу ЗВТ повинна здійснюватись як відповідна перевірка для множин показників властивостей ЗВТ, так і їх валідація. При здійсненні цих процедур необхідно використовувати встановлені вимоги широковживаних міжнародних і регіональних настанов з метрології.

Ключові слова:

Моделювання, математична модель, оцінювання властивостей, засіб вимірювальної техніки, системно-орієнтований засіб.

1. Вступ

Основним призначенням системно-орієнтованих засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) є забезпечення автоматизованого збору, обробки, аналізу та передачі вимірювальних даних у складі складних інформаційно-вимірювальних систем. Такі ЗВТ застосовуються в автоматизованих виробничих системах, інтелектуальних вимірювальних системах, при контролі технологічних процесів та проведенні наукових досліджень тощо. Системно-орієнтовані ЗВТ мають такі основні властивості: автоматизація проведення вимірювань; можливість інтеграції в керуючі промислові системи для автоматизації виробничих процесів; інтерактивність та передача даних з підтримкою стандартних протоколів передачі даних; обробка та аналіз даних у реальному часі, зокрема з використання цифрової обробки сигналів; можливість адаптації до різних завдань та середовищ з легкою інтеграцією нових модулів; висока точність з використання методів корекції похибок і надійність; стійкість до впливів зовнішнього середовища тощо.

Основні властивості системно-орієнтованих ЗВТ забезпечуються комбінацією сучасного апаратного забезпечення, потужних алгоритмів цифрової обробки та інтеграції в автоматизовані системи. В них впроваджуються мікропроцесорні системи з реалізацією алгоритмів самодіагностики, вбудовані контролери реального часу тощо. Вони мають модульну архітектуру з можливістю програмної конфігурованості. Окрім традиційних для ЗВТ методів їх випробувань таких як визначення основних метрологічних характеристик, випробування функціональних характеристик, випробовування на надійність, довговічність та вплив зовнішніх факторів для системно-орієнтованих ЗВТ підлягає обов'язковому випробовуванню його програмне забезпечення (ПЗ).

Для врахування суттєвих сторонніх впливів на властивості системно-орієнтованих ЗВТ повинні проводитись комплексні випробування. З цією метою повинні використовуватись такі основні методики випробувань: методики калібрування за вимогами стандарту ISO/IEC 17025 [1]; методики функціональних, кліматичних і механічних випробувань; методики випробувань на електромагнітну сумісність; методики випробування ПЗ ЗВТ як вбудованого, так і стороннього за вимогами міжнародних і регіональних настанов [2-4]. При цьому необхідне оцінювання всіх суттєвих ризиків, які можуть вплинути на основні властивості ЗВТ [5, 6].

2. Недоліки

Різноманітним методам проведення випробувань ЗВТ присвячена доволі велика кількість наукових робіт. Множинні моделі показників якості ЗВТ і оцінки показників їх якості, які дозволяють досліджувати вплив цих показників якості та проводити їх оцінку, наведені у [5]. Результати вивчення основи для встановлення спеціальних показників якості ЗВТ, методологія оцінки показників якості ЗВТ і алгоритм її реалізації наведені у [6]. Обмеження математичних моделей, перевірка моделей на наукові дані та ітераційність процесу вдосконалення моделі наведені у [7]. Єдиною роботою, у якій наведено результати математичного моделювання системно-орієнтованих ЗВТ з використанням апарату загальної теорії систем, є [8]. Такі моделі з їх графічною інтерпретацією дозволяють отримати необхідну та корисну інформацію про властивості ЗВТ як технічної системи. Однак, ці моделі не враховують вплив на властивості ЗВТ методик оцінювання їх характеристик та їх параметрів. Тому актуальним питанням залишається розроблення теоретичних основ достовірного оцінювання властивостей саме системно-орієнтованих ЗВТ, зокрема оцінювання властивостей їх ПЗ.

3. Мета

Метою статті є розроблення теоретичних основ для оцінювання показників властивостей сучасних системно-орієнтованих ЗВТ з урахуванням найбільш впливових чинників.

4. Структура та основні властивості засобів вимірювальної техніки

Системно-орієнтований ЗВТ узагальнено має такі основні складові: первинний перетворювач фізичних величин (взаємодіє з об'єктом вимірювання); аналого-цифровий перетворювач (АЦП) для перетворення вихідного сигналу первинного перетворювача у цифровий код; мікроконтролер для необхідного керування складовими ЗВТ і оброблення вимірювальних даних; інтерфейс зв'язку із зовнішніми технічними засобами; ПЗ, яке може бути вбудоване у ЗВТ чи встановлене на окремому персональному комп'ютері (ПК); індикатор показів ЗВТ, встановлений чи на самому ЗВТ, чи як екрані ПК.

На рис. 1 наведена узагальнена структурна схема системно-орієнтованого ЗВТ.

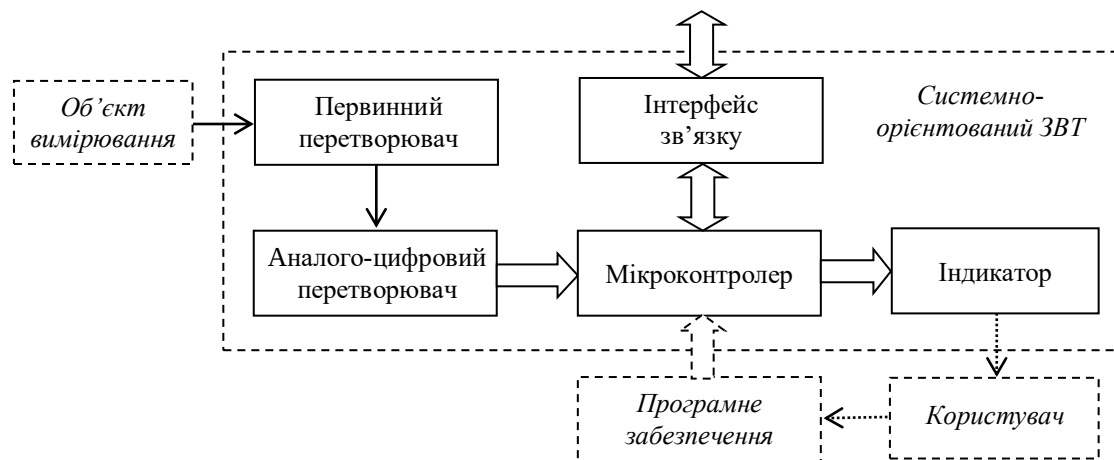


Рис. 1 Структурна схема системно-орієнтованого ЗВТ.

До загальних показників властивостей ЗВТ можна віднести: діапазон вимірювань певної фізичної величини; похибка вимірювання; чутливість, стабільність і відтворюваність вимірювань; показники надійності тощо. Дослідженню цих властивостей присвячена велика кількість наукових робіт, зокрема [5, 6]. Практично всі сучасні ЗВТ містять ПЗ, тому його дослідженню також присвячуються наукові роботи, зокрема [9, 10].

Особливістю саме системно-орієнтованих ЗВТ є те, що застосовуване у ЗВТ ПЗ призначено не лише для керування ним і оброблення даних для отримання результату вимірювань з його індикацією на спеціальному пристрої ЗВТ, але і для забезпечення системних функцій ЗВТ, таких як забезпечення зовнішнього керування ЗВТ, передачі вимірювальних даних на зовнішні технічні засоби тощо. На основі окремих системно-орієнтованих ЗВТ можуть створюватись інформаційно-вимірювальні комплекси чи системи. Такі системи дозволяють отримувати дані вимірювань від великої кількості об'єктів вимірювання і здійснювати оброблення отриманих вимірювальних даних.

5. Особливості математичних моделей засобів вимірювальної техніки

Математичні моделі використовуються для проектування і опису різноманітних технічних систем, зокрема для вимірювальних. Теоретичне обґрунтування універсальної концепції моделювання на основі ідеї класичного

вимірювального ланцюга і практичні процедури її застосування наведено у [11]. Узагальнена концепція вимірювання має обмеження, притаманне звичайних об'єктно-орієнтованим моделям вимірювальних систем [12].

Багатозначна модель для спільного моніторингу показників якості, яка встановлює кореляцію між різними показниками, пропонується у [13]. Однак ця модель має загальний характер і не придатна для оцінювання властивостей ЗВТ. Показники якості з однаковими цілями мають суперечливі та суттєво різні результати оцінювання властивостей, тобто ні одна з властивостей об'єкту не може мати переваги над іншою [14].

Математичне моделювання системно-орієнтованих ЗВТ з використанням апарату загальної теорії систем з їх графічною та аналітичною інтерпретацією проведено у [8]. Теоретико-множинну модель формування інформаційного стану кіберфізичної системи на базі моделі сенсорної інфраструктури наведено у [15]. Ця модель може бути використана для математичного моделювання системно-орієнтованих ЗВТ.

Для побудови математичної моделі системно-орієнтованого ЗВТ може бути застосований блочно-ієрархічний підхід для різних ієрархічних рівнів. Значення певної властивості ЗВТ можна визначити як функцію вимірювання елементу показника властивості (ЕПВ, Element of Property Indicator, EPI), яка визначається із застосуванням певних методів вимірювання. Показник однієї властивості є простим показником властивості (ППВ, Simple Property Indicator, SPI), а показник властивості, який об'єднує кілька простих показників, називається комплексним показником властивості (КПВ, Complex Property Indicator, CPI) [6, 15].

Математична модель оцінювання властивостей ЗВТ може бути наведена у загальному вигляді:

$$PI_{mi} = f \left(f \left(\{ (Par, Met), B \} \right), f \left(\{ EPI, B \} \right), f \left(\{ SPI, B \} \right), f \left(\{ CPI, B \} \right) \right), \quad (1)$$

де PI_{mi} – показник властивостей ЗВТ; (Par, Met) – множина кортежів параметрів і методів вимірювання; $EPI = f(\{Par, Met\}, B)$ – множина елементів показників властивостей ЗВТ; $SPI = f(\{EPI\}, B)$ – множина показників властивостей ЗВТ;

$CPI = f(\{SPI\}, B)$ – множина комплексних показників властивостей ЗВТ певного рівня

$$\begin{cases} CPI_{r \quad (|l|-2)} = f(\{SPI\}, B) \\ CPI_{r \quad (|l|-3)} = f \left(\left\{ CPI_{r \quad (|l|-2)} \right\}, B \right); \\ \dots \\ CPI_{r \quad 1} = f \left(\left\{ CPI_{r \quad 2} \right\}, B \right) \end{cases}$$

$$B = \{b_1, \dots, b_i, \dots, b_{|Q|}\} - \text{характеристичний вектор відповідних множин} \left(PI_l \subset PI_{r \quad l-1} \mid \forall PI_l \in PI_l, b_i = 1 \right);$$

PI_l – множина показників властивостей рівня l ($l = (1|l|)$ – індекс рівня, $|l|$ – нижній рівень); $(|l| - 1)$, $(1:|l| - 2)$ – рівні показників властивостей SPI і CPI відповідно; r – індекс показника властивості на відповідному рівні.

Математична модель оцінювання показників властивостей ЗВТ на певній фазі життєвого циклу ЗВТ (наприклад, проектування чи експлуатація) може бути наведена у загальному вигляді:

$$PI_{miLC} = f \left(\{ PhLC_{PI} \} \right), \quad (2)$$

де $PhLC_{CPI}$ – КПВ ЗВТ узагальненої фази певної моделі показників властивостей ЗВТ, який, в свою чергу, дорівнює:

$$PhLC_{CPI} = f \left(VerCPI, ValCPI, LC_{PrCPI}, LC_{SubSysCPI} \right), \quad (3)$$

де $VerCPI$ – КПВ перевіряння фази; $ValCPI$ – КПВ затвердження фази; LC_{PrCPI} – КПВ процесів фази; $LC_{SubSysCPI}$ – КПВ підсистем нижнього рівня, які відносяться до фази.

КПВ перевіряння і затвердження фази визначаються відповідно:

$$Ver_{PI} = f \left(f \left(\{ (Par, Met), B \} \right)_{Ver}, f \left(\{ EPI, B \} \right)_{Ver}, f \left(\{ SPI, B \} \right)_{Ver}, f \left(\{ CPI, B \} \right)_{Ver} \right), \quad (4)$$

$$Val_{PI} = f \left(f \left(\{ (Par, Met), B \} \right)_{Val}, f \left(\{ EPI, B \} \right)_{Val}, f \left(\{ SPI, B \} \right)_{Val}, f \left(\{ CPI, B \} \right)_{Val} \right). \quad (5)$$

КПВ процесів фази визначається у вигляді:

$$LC_{PrPI} = \bigcup_b \{ PrLC_{PIb} \}, \quad (6)$$

де b – індекс фази процесу.

Після певних узагальнень можна отримати ($LC_{PrPI} = \emptyset$, $PrLC_{PrPI} = \emptyset$, $VerPI = \emptyset$, $ValPI = \emptyset$):

$$LC_{PrPI} = f \left(\{ PrLC_{PI} \} \right), \quad (7)$$

$$PrLC_{PI} = f \left((VerPI), (ValPI) \right).$$

Множинна модель оцінювання показників властивостей ЗВТ набуде загального вигляду:

$$PI_{miLC} = \left\{ \bigcup_{a=1}^a \left\{ \bigcup_{g=1}^g \left\{ \left\{ \bigcup_c \left\{ \bigcup_d \{VerPI_{abcd}, ValPI_{abcd}\} \right\} \right\}, \{VerPI_{ab}, ValPI_{ab}\} \right\} \right\} \right\}, \dots, \left\{ \bigcup_{g=2}^g \left\{ \bigcup_b \left\{ \left\{ \bigcup_c \left\{ \bigcup_d \{VerPI_{abcd}, ValPI_{abcd}\} \right\} \right\}, \{VerPI_{ab}, ValPI_{ab}\} \right\} \right\} \right\}, \dots, \left\{ \bigcup_{|g|}^g \left\{ \bigcup_b \left\{ \left\{ \bigcup_c \left\{ \bigcup_d \{VerPI_{abcd}, ValPI_{abcd}\} \right\} \right\}, \{VerPI_{ab}, ValPI_{ab}\} \right\} \right\} \right\} \right\}, \dots \right\}, \quad (8)$$

де

$$VerPI_n = \left\{ CPI_{nr} \left\{ \dots \left\{ CPI_{nr} \left\{ SPI_{nr} \left\{ EPI_{nr} \left\{ (Par, Met)_{nrp} \right\} \right\} \right\} \right\} \right\} \right\} - \text{множина показників властивостей ЗВТ для}$$

процесу перевіряння;

$$ValPI_n = \left\{ CPI_{nr} \left\{ \dots \left\{ CPI_{nr} \left\{ SPI_{nr} \left\{ EPI_{nr} \left\{ (Par, Met)_{nrp} \right\} \right\} \right\} \right\} \right\} \right\} - \text{множина показників властивостей ЗВТ для}$$

процесу затвердження;

b, c, d, g – індекси фази життєвого циклу ЗВТ, процесу фази життєвого циклу ЗВТ, фази процесу, рівня відповідно; n – індекс процесів перевіряння і затвердження на етапах життєвого циклу ЗВТ; p – індекс кортежу множини параметрів і методів вимірювання $p=(1:|p|)$.

Бінарні відношення між множиною ЕПВ та параметрами і методами вимірювання мають такий вигляд:

$$(Par, Met)_{nrp} \subset EPI_{nr} | b_i = 1, \quad (9)$$

де $B = \{b_1, b_2, \dots, b_{|p|}\}$ – характеристичний вектор EPI_n , $i=(1:|p|)$.

6. Обговорення практичних аспектів запропонованої моделі

У загальному випадку до показників властивостей будь-якої технічної системи можна віднести: показники призначення; функціональні показники; ресурсозберігаючі показники, тощо. Для ЗВТ як технічної системи необхідно, в першу чергу, розглядати показники призначення, до яких відносяться метрологічні характеристики. До основних метрологічних характеристик можна віднести, зокрема: вимірювальний інтервал чи діапазон вимірювання; границя допустимої похибки; чутливість вимірювальної системи; нестабільність ЗВТ; інструментальний дрейф тощо [6, 16, 17].

Для визначення зазначених метрологічних характеристик всіх ЗВТ, а також деяких додаткових функціональних показників, таких як метрологічні надійність, справність, відмова, міжкалібрувальний інтервал [18], необхідно використовувати відповідні методики калібрування і випробування ЗВТ. Для системно-орієнтованих ЗВТ одним з важливих елементів є встановлення вимог до ПЗ ЗВТ і використання спеціальних методик випробування ПЗ ЗВТ як вбудованого, так і стороннього [2-4].

Особливістю запропонованої моделі, по зрівнянню з математичною моделлю на основі загальної теорії систем, є можливість врахування специфічних параметрів властивостей ЗВТ і відповідних методик щодо їх визначення. На основі метрологічних характеристик і відповідних методик їх визначення формується множина кортежів параметрів і методів вимірювання (Par, Met) для ЕПВ, ППВ і КПВ. Ще однією з особливостей моделі є встановлення КПВ ЗВТ для узагальненої фази життєвого циклу ЗВТ $PhLC_{CPI}$ (наприклад, фази експлуатації). Для кожної із фаз життєвого циклу ЗВТ необхідно встановлювати як множину показників властивостей ЗВТ для процесу перевіряння $VerCPI$, так і множину показників властивостей ЗВТ для процесу затвердження $ValCPI$.

7. Висновки

Проведене математичне моделювання дозволило розробити множинну модель системи показників властивостей ЗВТ. Запропонована модель дозволяє здійснювати дослідження впливовості показників властивостей ЗВТ КПВ, ППВ і ЕПВ та виконувати їх оцінювання на всіх стадіях життєвого циклу ЗВТ. Вона також дозволяє враховувати специфічних параметрів властивостей ЗВТ і відповідні методики щодо їх визначення. Модель дозволяє враховувати особливості і системно-орієнтованих ЗВТ, зокрема показники властивості ЗВТ щодо забезпечення системних функцій і відповідні методики їх визначення. На кожній фазі

життєвого циклу ЗВТ повинна здійснюватись як відповідна перевірка для множин показників властивостей ЗВТ, так і їх валідація. При здійсненні цих процедур необхідно використовувати встановлені вимоги широковживаних міжнародних і регіональних настанов з метрології.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що фінансових чи інших потенційних конфліктів щодо цієї роботи немає.

Список використаної літератури

- [1] ISO/IEC 17025, “General requirements for the competence of testing and calibration laboratories,” ISO/IEC, 2017, <https://www.iso.org/ISO-IEC-17025-testing-and-calibration-laboratories.html>
- [2] OIML D 31, “General requirements for software controlled measuring instruments,” OIML, 2023, https://www.oiml.org/en/publications/documents/en/files/pdf_d/d031-e23.pdf
- [3] WELMEC Guide 7.2, “Software Guide (Measuring Instruments Directive 2014/32/EU),” WELMEC, 2023, https://www.welmec.org/welmec/documents/guides/7.2/2023/WELMEC_Guide_7.2_2023.pdf
- [4] WELMEC Guide 7.6, “Software Risk Assessment,” WELMEC, 2021, https://www.welmec.org/welmec/documents/guides/7.6/2021/WELMEC_Guide_7.6_v2021.pdf
- [5] Velychko O., Gordiyenko T., “Comparative research of quality indicators of measuring instruments: practical aspects,” Ukrainian Metrological Journal, 2021, issue 3, pp. 24–30. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3.2021.241620>
- [6] Velychko O., Hrabovskyi O., Gordiyenko T., Volkov S., “Modeling of a system of quality assessment indicators of measuring instruments,” Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and controlling systems, 2021, no. 2/9(110), pp. 69–78, <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.228853>
- [7] Cain J.W., “Mathematical Models in the Sciences. Molecular Life Sciences,” Springer, New York, NY, 2014, 6 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6436-5_561-1
- [8] Velychko O., Hrabovskyi O., “The Mathematical Model of the System Oriented Measuring Instrument,” Ukrainian Metrological Journal, 2021, issue 2, pp. 15–19. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.2.2021.236057>
- [9] Velychko O., Gordiyenko T., Hrabovskyi O., “Testing of measurement instrument software on the national level,” Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and controlling systems, 2018, 2/9 (92), pp. 13-20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.125994>
- [10] Velychko O., Gaman V., Gordiyenko T., Hrabovskyi O., “Testing of measurement instrument software with the purpose of conformity assessment,” Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and controlling systems, 2019, 1/9 (97), pp. 19-26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154352>
- [11] K. D. Sommer and B. R. L. Siebert, “Systematic approach to the modelling of measurements for uncertainty evaluation,” Metrologia, vol. 43, 2006, no. 4. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/43/4/S06>
- [12] Q. Yang and C. Butler, “An Object-Oriented Model of Measurement Systems,” IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 47, 1998, no. 1, pp. 104-107. <https://doi.org/10.1109/19.728800>
- [13] Yan S., Yan X., “Joint monitoring of multiple quality-related indicators in nonlinear processes based on multi-task learning,” Measurement. vol. 165, 2020. 108158. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108158>
- [14] Ravber M., Memik M., Crepinsek M., “The impact of Quality Indicators on the rating of Multi-objective Evolutionary Algorithms,” Applied Soft Computing, vol. 55, 2017, pp. 265–275. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.01.038>
- [15] S. Volkov, “Set-theoretic model of the information State of the industrial cyber- physical system,” Scientific Journal of the Ternopil National Technical University, 2018, № 1 (89), pp. 132-138. <https://journals.indexcopernicus.com/search/article?articleId=1655920>
- [16] JCGM 200, “International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM),” BIPM, 2012. <https://doi.org/10.59161/JCGM200-2012>
- [17] JCGM 100, “Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995).” BIPM, 2008. <https://doi.org/10.59161/JCGM100-2008E>
- [18] ILAC-G24/OIML D10, “Guidelines for the Determination of Recalibration Intervals of Measuring Equipment Used in Testing Laboratories,” OIML, 2022. https://www.oiml.org/en/files/pdf_d/d010-e22.pdf