

**ІНТЕЛЕКТУАЛІЗОВАНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ФІЗИЧНИХ
ВЕЛИЧИН У СКЛАДІ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ****О.О. Храмцов, С.В. Бондаренко**

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: oleksandr.khramtsov@nure.ua, serhii.bondarenko@nure.ua

Анотація: У роботі розглянуто особливості побудови та функціонування інтелектуалізованих вимірювальних перетворювачів, призначених для використання в автоматизованих системах керування технологічними процесами. Проаналізовано принципи перетворення фізичних величин у електричні сигнали з подальшою їх обробкою безпосередньо на рівні вимірювального пристрою. Показано, що інтеграція обчислювальних засобів у структуру сенсорів, забезпечує виконання первинної обробки даних, підвищення точності вимірювань та реалізацію функцій самодіагностики і адаптації. Розглянуто особливості формування вихідних сигналів та їх сумісність із сучасними цифровими протоколами обміну даними. Обґрунтовано доцільність застосування таких пристроїв для підвищення ефективності, надійності та інформативності систем керування.

Ключові слова: інтелектуалізований сенсор, вимірювальний перетворювач, автоматизована система керування, технологічний процес, обробка сигналу, цифровий протокол

**INTELLIGENT MEASURING TRANSDUCERS OF PHYSICAL QUANTITIES IN
PROCESS CONTROL SYSTEMS****O. Khramtsov, S. Bondarenko**

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky ave., 14

E-mail: oleksandr.khramtsov@nure.ua, serhii.bondarenko@nure.ua

Annotation: This paper examines the design features and operational principles of intelligent measuring transducers intended for use in automated process control systems. The principles of converting physical quantities into electrical signals with subsequent processing directly at the measurement device level are analyzed. It is shown that the integration of computational capabilities into sensor structures enables primary data processing, improves measurement accuracy, and supports self-diagnostics and adaptive functions. Particular attention is given to the formation of output signals and their compatibility with modern digital communication protocols. The feasibility of employing such devices to enhance the efficiency, reliability, and informativeness of control systems is substantiated.

Key words: intelligent sensor, measuring transducer, automated control system, technological process, signal processing, digital communication protocol

Сучасний етап розвитку промисловості характеризується широким впровадженням автоматизованих систем керування технологічними процесами, що зумовлює підвищення вимог до точності, надійності та оперативності отримання вимірювальної інформації. У таких умовах вимірювальні засоби перестають виконувати виключно функцію передавання сигналу до центрального контролера і стають активними елементами інформаційної інфраструктури. Якість функціонування систем керування значною мірою визначається достовірністю первинних даних, які формуються на рівні сенсорних пристроїв. Традиційні вимірювальні

перетворювачі, побудовані за принципом віддаленої обробки сигналів, мають обмеження, пов'язані з впливом завад, втратами інформації під час передавання та недостатньою гнучкістю при зміні режимів роботи. Це обумовлює необхідність переходу до нових підходів у побудові вимірювальних засобів, зокрема до використання інтелектуалізованих сенсорів, здатних виконувати частину обчислювальних функцій безпосередньо на місці вимірювання.

Актуальність даного напрямку визначається також загальними тенденціями цифровізації виробництва та інтеграції технологічних процесів у єдині інформаційні середовища. Використання інтелектуалізованих вимірювальних перетворювачів дозволяє не лише підвищити точність вимірювань, але й забезпечити оперативну адаптацію до змінних умов експлуатації, що є критично важливим для складних та динамічних технологічних систем.

Інтелектуалізовані вимірювальні перетворювачі являють собою складні технічні системи, у структурі яких поєднуються чутливі елементи, аналогові та цифрові компоненти обробки сигналів, а також програмно-апаратні засоби керування процесом вимірювання. Базовим елементом такого пристрою є сенсор, який здійснює первинне перетворення фізичної величини у електричний сигнал. Отриманий сигнал, як правило, має низький рівень і піддається впливу шумів, тому на наступному етапі він підсилюється та проходить попередню аналогову обробку, що може включати фільтрацію та нормалізацію. Ключовою відмінністю інтелектуалізованих перетворювачів від традиційних є наявність вбудованого мікропроцесорного модуля, який забезпечує подальшу обробку сигналу у цифровій формі. Це дозволяє виконувати складні алгоритми обробки даних безпосередньо в межах вимірювального пристрою, зменшуючи навантаження на центральні елементи системи керування. Мікропроцесор здійснює аналого-цифрове перетворення, корекцію похибок, лінеаризацію характеристик сенсора, а також формування вихідного сигналу у зручному для передавання вигляді.

Функціональні можливості інтелектуалізованих вимірювальних перетворювачів значною мірою визначаються характером і глибиною реалізації алгоритмів обробки сигналів, що виконуються безпосередньо на рівні вимірювального пристрою. На відміну від традиційних підходів, де основна обробка здійснюється у центральних обчислювальних вузлах, сучасні сенсорні системи забезпечують первинну інтерпретацію вимірювальної інформації ще на етапі її формування. Однією з ключових функцій є фільтрація сигналів, спрямована на зменшення впливу випадкових завад і шумів, що виникають у процесі вимірювання або передавання даних. Застосування цифрових методів фільтрації дозволяє більш гнучко налаштовувати параметри обробки залежно від динамічних характеристик сигналу та умов експлуатації, що позитивно впливає на стабільність та достовірність результатів вимірювання.

Не менш важливою складовою є лінеаризація вихідних характеристик сенсорів, яка забезпечує приведення нелінійної залежності між вхідною фізичною величиною та електричним сигналом до лінійної форми. Це досягається шляхом використання апроксимаційних алгоритмів або табличних методів, реалізованих у вбудованому програмному забезпеченні. Завдяки цьому значно спрощується подальша обробка даних та підвищується точність відтворення вимірюваної величини. Водночас компенсація похибок, зумовлених температурними впливами, старінням елементів або нестабільністю живлення, здійснюється на основі каліброваних залежностей і моделей, що враховують зміну параметрів у часі. Такий підхід дозволяє мінімізувати систематичні відхилення та забезпечити стабільність метрологічних характеристик у широкому діапазоні умов експлуатації.

Особливу роль у підвищенні надійності вимірювань відіграють функції самодіагностики, які реалізуються за рахунок постійного контролю внутрішніх параметрів пристрою. Аналіз стану окремих функціональних вузлів, перевірка цілісності сигналів та виявлення аномальних режимів роботи дозволяють своєчасно ідентифікувати потенційні відмови або деградацію

характеристик. У разі виявлення відхилень інтелектуалізований перетворювач може формувати попереджувальні сигнали або переходити у безпечний режим функціонування. Це особливо важливо для критичних технологічних процесів, де навіть незначні похибки можуть призводити до суттєвих наслідків.

Адаптаційні можливості таких пристроїв проявляються у здатності змінювати параметри обробки сигналів залежно від умов середовища або режимів роботи об'єкта керування. Використання адаптивних алгоритмів дозволяє автоматично підлаштовувати коефіцієнти фільтрації, корекції та масштабування, що забезпечує оптимальне співвідношення між швидкістю та точністю. Крім того, важливим аспектом є реалізація процедур калібрування, які можуть виконуватися як у заводських умовах, так і безпосередньо під час експлуатації. Застосування програмних методів калібрування дає змогу оперативного коригувати параметри перетворювача без необхідності фізичного втручання, що значно спрощує технічне обслуговування.

Вбудоване програмне забезпечення виступає ключовим елементом, який забезпечує узгоджену роботу всіх функціональних компонентів інтелектуалізованого вимірювального перетворювача. Воно реалізує алгоритми обробки сигналів, керує режимами роботи пристрою, забезпечує взаємодію з зовнішніми системами та підтримує обмін даними. Гнучкість програмної архітектури дозволяє оновлювати функціональність пристрою без зміни його апаратної частини, що є важливою перевагою в умовах швидкого розвитку технологій.

Інтеграція інтелектуалізованих вимірювальних перетворювачів в автоматизовані системи керування технологічними процесами є одним із ключових чинників підвищення ефективності функціонування сучасних виробничих комплексів. На відміну від традиційних вимірювальних засобів, які передають переважно аналогові сигнали до центральних контролерів, інтелектуалізовані пристрої забезпечують більш гнучку та інформативну взаємодію з елементами системи керування. Це досягається завдяки використанню цифрових інтерфейсів, що дозволяють передавати не лише результати вимірювань, але й додаткову службову інформацію, пов'язану зі станом пристрою, параметрами його налаштування та умовами функціонування.

Одним із важливих аспектів інтеграції є забезпечення сумісності вимірювальних перетворювачів із різними типами контролерів та програмно-технічних комплексів. Це вимагає дотримання загальноприйнятих стандартів обміну даними та підтримки поширених протоколів зв'язку. У промисловій практиці широко використовуються такі протоколи, як HART, Modbus та Fieldbus, кожен з яких має свої особливості та сфери застосування. Протокол HART забезпечує можливість накладання цифрового сигналу на аналогову лінію, що дозволяє модернізувати існуючі системи без значних змін у їхній інфраструктурі. Modbus, у свою чергу, характеризується простотою реалізації та широкою підтримкою у різноманітних пристроях, що робить його універсальним рішенням для організації обміну даними. Fieldbus орієнтований на побудову розподілених систем керування та забезпечує високий рівень інтеграції польових пристроїв у єдину мережу.

Використання цифрових протоколів дозволяє значно підвищити надійність передавання інформації за рахунок застосування механізмів контролю помилок, підтвердження приймання даних та повторної передачі у разі виникнення збоїв. Крім того, цифровий формат сигналів є менш чутливим до електромагнітних завад, що особливо важливо для промислових умов експлуатації. Інтелектуалізовані перетворювачі здатні формувати структуровані пакети даних, які містять не лише вимірювальну інформацію, але й ідентифікаційні параметри, діагностичні повідомлення та службові команди. Це створює передумови для реалізації більш складних алгоритмів керування та моніторингу.

Інтеграція інтелектуалізованих вимірювальних перетворювачів також пов'язана з необхідністю забезпечення кібербезпеки та захисту переданої інформації. Використання цифрових каналів зв'язку потребує впровадження механізмів автентифікації, шифрування та контролю доступу, що запобігає несанкціонованому втручанню у роботу системи. У сукупності це формує комплексний підхід до побудови сучасних автоматизованих систем керування, в яких вимірювальні пристрої виступають не лише джерелом даних, але й активними учасниками інформаційної взаємодії.

Застосування інтелектуалізованих вимірювальних перетворювачів у промислових умовах зумовлює суттєве підвищення ефективності функціонування автоматизованих систем керування технологічними процесами. Насамперед це пов'язано з підвищенням точності та достовірності вимірювань, що досягається завдяки використанню вбудованих алгоритмів обробки сигналів, компенсації похибок та адаптації до змінних умов експлуатації. На відміну від традиційних сенсорів, які виконують лише функцію перетворення фізичної величини у сигнал, інтелектуалізовані пристрої забезпечують комплексну обробку даних безпосередньо на місці їх отримання. Це дозволяє зменшити вплив зовнішніх завад, скоротити обсяг переданої інформації та підвищити швидкодію системи в цілому.

Важливою перевагою є також підвищення надійності роботи вимірювальних систем. Наявність функцій самодіагностики та контролю внутрішнього стану дає змогу своєчасно виявляти відхилення у роботі пристрою, що знижує ризик виникнення аварійних ситуацій. У традиційних системах подібні функції, як правило, відсутні або реалізовані на рівні центрального контролера, що ускладнює локалізацію несправностей та збільшує час їх усунення. Інтелектуалізовані перетворювачі, навпаки, здатні автономно аналізувати власний стан і передавати відповідні повідомлення до системи керування, що сприяє підвищенню експлуатаційної надійності та зменшенню витрат на технічне обслуговування.

Порівняння з традиційними вимірювальними засобами свідчить про істотні переваги інтелектуалізованих рішень у частині гнучкості та масштабованості. Завдяки програмній конфігурації параметрів роботи такі пристрої можуть бути адаптовані до різних типів технологічних процесів без необхідності зміни апаратної частини. Це особливо важливо в умовах модернізації виробництва, коли виникає потреба у швидкому переналаштуванні систем керування. Використання цифрових інтерфейсів забезпечує спрощення інтеграції у складні багаторівневі системи, де важливим є узгодження форматів даних та протоколів обміну.

Сучасні тенденції розвитку промислових технологій безпосередньо впливають на подальше вдосконалення інтелектуалізованих вимірювальних перетворювачів. Однією з ключових тенденцій є цифровізація виробничих процесів, яка передбачає створення єдиного інформаційного простору, де всі елементи системи взаємодіють на основі цифрових даних. У цьому контексті сенсори виступають як первинні джерела інформації, від якості яких залежить ефективність функціонування всієї системи. Інтеграція вимірювальних пристроїв у концепцію промислового Інтернету речей відкриває нові можливості для збору, обробки та аналізу даних у реальному часі, що дозволяє реалізовувати більш складні алгоритми керування, прогнозування та оптимізації технологічних процесів.

Таким чином, інтелектуалізовані вимірювальні перетворювачі не лише забезпечують підвищення ефективності сучасних систем керування, але й формують основу для подальшого розвитку високотехнологічних виробничих середовищ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Невлюдов, І.Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами: підручник / І.Ш. Невлюдов, О.В.Токарева. – Харків: ХНУРЕ, 2018.–190 с.

2. Автоматизація регулювання технологічних параметрів виготовлення ВВКМ на основі контролю діелектричних характеристик / Невлюдов І.Ш., Овчаренко В.Є., Токарева О.В., Гурін І.В. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2025, №2, с. 89-101.
3. Digital technologies for monitoring the dielectric properties of carbon-carbon composites / Vitalii Ovcharenko, Olena Tokarieva // Manufacturing & Mechatronic Systems 2025: Proceedings of IX st International Conference, Kharkiv, October 25-26, 2025: Theses of Reports. - Kharkiv: [electronic version], 2025. P. 92-94.
4. Сучасні системи автоматичного керування технологічними комплексами: навч. посіб. / Сільвестров А. М., Островерхов М. Я., Шефер О. В., Ладік Н. А., Зіменков Д. К.; – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 386 с.
5. Feedback Control of Dynamic Systems. 9th Edition [Electronic resource] / J David Powell, Abbas F. Emami-Naeini, Christina M. Ivler. – Pearson, 2025. – 1046 p.
6. Yevsieiev, V. V., & Holod, I. V. (2026). HARDWARE-SOFTWARE MODULE FOR INTELLIGENT MICROCLIMATE CONTROL IN INDUSTRIAL FACILITIES. Scientific Papers of Donetsk National Technical University. Series: "Computer Engineering and Automation", 7-17.
7. Yevsieiev V. Digital Twin in Modeling and Control of Collaborative Robots: Analysis, Comparison and Application Recommendations / V. Yevsieiev, S. Starikova // Computer-integrated technologies, automation and robotics 2026 : Proceedings of III st All-Ukrainian Conference, May 14-15, 2026. - Kharkiv .: [electronic version], 2026. - P. 89-92.
8. Industry 5.0 та колаборативна робототехніка: динамічний опис навколишнього середовища роботів-маніпуляторів з використанням мови Python: монографія / І. Ш. Невлюдов, В. В. Євсєєв, С. С. Максимова. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2026. – 279 с.
9. Yevsieiev V. Digital Twins of Collaborative Robotic Systems for Decision Support in Emergency Situations / V. Yevsieiev, S. Svetlana // Intelligent Civil Safety Technologies and Robotic Systems for Emergency and Rescue Operations (ICSTRO-2026) : Proceedings of I-st All-Ukrainian Conference, February 12-23, 2026. – Kharkiv, 2026. - P. 153-156.
10. Yevsieiev, V., Gurin, D., Kulish, S., & Voloshyn, Y. (2025). Development of a partially supervised Markov decision-making model for a 3-link collaborative robot-manipulator. Radioelectronic and Computer Systems, 2025(4), 83-94.
11. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gopejenko, V., & Kosenko, V. (2025). Development of mathematical support for adaptive control for the intelligent gripper of the collaborative robot manipulator. Advanced Information Systems, 9(3), 57-65.
12. Abu-Jassar, A. T., Attar, H., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Solyman, A. (2025). Remote monitoring system of patient status in social IoT environments using amazon web services technologies and smart health care. International Journal of Crowd Science, 9(2), 110-125.
13. Невлюдов, І. Ш., Євсєєв, В. В., & Гурін, Д. В. (2025). МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ БЛОЧНОГО ПРОЦЕСНОГО ПЛАНУВАННЯ В СИСТЕМАХ АЛОКАЦІЇ ЗАВДАНЬ МІЖ ЛЮДЬМИ ТА КАЛАБОРАТИВНИМИ РОБОТАМИ В РАМКАХ ІНДУСТРІЙ 5.0. Вісник Херсонського національного технічного університету, 1(1 (92)), 157-163.

Науковий керівник: Овчаренко Віталій Євгенович, проф., д.т.н., професор кафедри КІТАРБІ Харківського національного університету радіоелектроніки.