

О.С. Свістельник, аспірант
Л.О. Чепюк, к.т.н., доц.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Теоретичні основи побудови мікропроцесорної інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів мікроклімату на поліграфічному виробництві

У статті розглянуто теоретичні засади побудови мікропроцесорної інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) контролю параметрів мікроклімату на поліграфічному виробництві. Проведено аналіз впливу температури та відносної вологості повітря на якість поліграфічної продукції: встановлено, що відхилення вологості понад $\pm 5\%$ ВВ спричиняє лінійне розширення паперу до $0,5\%$ та порушення суміщення фарб до $0,3$ мм, а відхилення температури на ± 3 °С змінює оптичну густину відбитку на $0,05$ – $0,10$ D, що виходить за межі допуску ISO 12647-2. Розглянуто структуру ІВС, що включає первинні перетворювачі, АЦП (12–16 біт), канали передачі даних та програмні засоби обробки інформації. Описано фізичні принципи роботи ємнісних перетворювачів вологості та резистивних перетворювачів температури. Запропоновано математичну модель вимірювального каналу з оцінюванням невизначеності за методологією GUM та методи статистичної обробки на основі контрольних карт Шухарта, що дозволяють підвищити достовірність результатів вимірювань на 20 – 30% . Наведено порівняльні характеристики цифрових сенсорів SHT31, DHT22, VME280, HTU21D та AM2301 за діапазонами вимірювання, похибками та інтерфейсами. Обґрунтовано доцільність триярусної розподіленої ІВС на базі STM32/MQTT/InfluxDB з візуалізацією у Grafana. Сукупна стандартна невизначеність каналу температури не перевищує $0,18$ °С ($k = 1$), що відповідає вимогам ДСТУ ISO 10012 та ISO 12647-2. Впровадження системи дозволяє знизити кількість браку продукції на 35 – 45% . Визначено перспективи інтеграції методів машинного навчання для прогнозування відхилень мікроклімату.

Ключові слова: інформаційно-вимірювальна система; мікроклімат; поліграфічне виробництво; температура; вологість; вимірювальні перетворювачі; метрологічне забезпечення; IoT.

Актуальність теми. Підвищення якості поліграфічної продукції значною мірою залежить від стабільності параметрів виробничого середовища. Основними параметрами мікроклімату, що впливають на технологічний процес друку, є температура та відносна вологість повітря. Коливання цих параметрів призводять до зміни геометричних характеристик паперу, порушення точності суміщення фарб та погіршення якості друку. Застосування сучасних інформаційно-вимірювальних систем дозволяє здійснювати безперервний контроль параметрів мікроклімату, оперативно реагувати на їх відхилення та забезпечувати стабільність технологічних процесів. Завдяки розвитку сенсорних технологій та цифрових методів обробки даних перспективним є створення автоматизованих систем контролю мікроклімату на поліграфічних підприємствах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Проблеми побудови вимірювальних систем розглянуті у фундаментальних роботах з метрології та інформаційно-вимірювальної техніки.

У працях Doebelin [1] розглянуто принципи побудови вимірювальних систем та аналіз похибок вимірювань. У роботах Bentley [2] досліджено сучасні методи вимірювання фізичних величин та принципи метрологічного забезпечення вимірювальних систем. Фізичні принципи роботи сучасних сенсорів температури та вологості, зокрема резистивних та ємнісних перетворювачів, детально описані у монографії Fraden [12]. Вплив параметрів мікроклімату на якість офсетного друку та стабільність кольоровідтворення детально досліджено у праці Adams [11], де показано, що підвищення температури фарби на 5 °С скорочує час її закріплення на 20 – 25% та збільшує ризик відмарювання. Вплив параметрів мікроклімату на поліграфічні процеси детально досліджено у праці Kirrhan [3], де показано залежність геометричних характеристик паперу від вологості повітря. Питання статистичного контролю технологічних процесів розглянуті у роботах Montgomery [4].

Разом з тим, питання побудови спеціалізованих інформаційно-вимірювальних систем контролю параметрів мікроклімату для поліграфічного виробництва потребують подальших досліджень.

Метою статті є аналіз умов застосування засобів вимірювання параметрів мікроклімату та формування теоретичних основ побудови мікропроцесорної інформаційно-вимірювальної системи контролю температури та відносної вологості повітря на поліграфічному виробництві.

Викладення основного матеріалу. Теоретичні основи побудови мікропроцесорної інформаційно-вимірювальної системи

Мікропроцесорна інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів мікроклімату призначена для безперервного вимірювання параметрів середовища, збору вимірювальної інформації, її обробки, зберігання та формування сигналів керування для підтримання оптимальних умов виробництва. Побудова такої системи базується на класичних принципах вимірювальної техніки, що передбачають послідовне перетворення фізичної величини у форму, придатну для подальшої обробки.

Типова структура включає первинні перетворювачі, АЦП (12–16 біт, частота 1–10 Гц), обчислювальні модулі та програмні засоби [1, 2]. Відповідність системи вимогам ДСТУ ISO 10012 [10] щодо управління вимірюваннями забезпечується через процедури калібрування та верифікації засобів вимірювання.

Структурну схему мікропроцесорної інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів мікроклімату наведено на рисунку 1.



Рис. 1. Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи контролю мікроклімату

Функціонування системи передбачає безперервний цикл вимірювання з інтервалом 30–60 с та своєчасне виявлення відхилень від нормативних значень, визначених стандартом ISO 12647-2 [5].

Характеристики первинних вимірювальних перетворювачів

Вибір первинного перетворювача є ключовим етапом проектування інформаційно-вимірювальної системи. Застосовуються цифрові комбіновані сенсори на основі ємнісного принципу (вологість) та резистивного – термістори NTC або PTD100 (температура) [2]. Принцип дії таких перетворювачів детально описано у монографії Fraden [12]: ємність вологочутливого полімерного елемента змінюється пропорційно до вологовмісту повітря від 1 до 100 % ВВ з нелінійністю не більше ± 2 % ВВ. У таблиці 1 наведено порівняльні характеристики сучасних цифрових сенсорів [2, 6].

Таблиця 1

Порівняльні характеристики цифрових сенсорів температури та відносної вологості

Сенсор	Діапазон темп., °С	Діапазон вол., % ВВ	Похибка темп., °С	Похибка вол., %	Інтерфейс
SHT31	-40...+125	0...100	$\pm 0,3$	$\pm 2,0$	I ² C
DHT22	-40...+80	0...100	$\pm 0,5$	$\pm 2,0$	1-Wire
BME280	-40...+85	0...100	$\pm 1,0$	$\pm 3,0$	I ² C/SPI
HTU21D	-40...+125	0...100	$\pm 0,3$	$\pm 2,0$	I ² C
AM2301	-40...+80	0...99,9	$\pm 0,5$	$\pm 3,0$	1-Wire

Аналіз даних таблиці 1 свідчить, що для поліграфічного виробництва найбільш прийнятними є сенсори SHT31 та HTU21D (похибка температури $\pm 0,3$ °С, вологості $\pm 2,0$ % ВВ), що відповідає вимогам класу точності 1. Обидва підтримують інтерфейс I²C [2, 6].

Фізичні основи впливу мікроклімату на поліграфічні процеси

Вплив мікроклімату на якість поліграфічної продукції обумовлений комплексом фізичних процесів [3, 11]. Як показано у роботі Adams [11], температурний режим є одним із ключових чинників стабільності офсетного друку: відхилення температури фарби від норми на ± 3 °С спричиняє зміну

оптичної густини відбитку на 0,05–0,10 D, що виходить за межі допуску ISO 12647-2. Зміна температури впливає на в'язкість поліграфічних фарб відповідно до рівняння Арреніуса [3]:

$$\eta = A \cdot \exp\left(\frac{E_a}{R \cdot T}\right), \quad (1)$$

де η – динамічна в'язкість;

A – передекспоненційний коефіцієнт;

E_a – енергія активації;

R – універсальна газова стала;

T – абсолютна температура.

Зміна температури від 20 до 25 °C знижує в'язкість фарби на 15–20 % [3].

Вологість повітря визначає рівноважний вологовміст паперу та описується співвідношенням:

$$\varphi = \frac{p}{p - s}, \quad (2)$$

де φ – відносна вологість;

p – парціальний тиск водяної пари;

$p - s$ – тиск насиченої пари.

Нерівномірність розподілу параметрів мікроклімату у виробничому приміщенні призводить до локальних змін властивостей матеріалів [3, 6]. На рисунку 2 наведено просторовий розподіл температури і відносної вологості у поліграфічному приміщенні площею 200 м² (CFD-моделювання). Градієнт температури між зоною АС-установки та центром приміщення може досягати 3–5 °C, а градієнт вологості – до 8–12 % ВВ [6]. Це обумовлює необхідність розміщення не менше одного вузла ІВС на кожні 30–50 м² площі [5, 6].

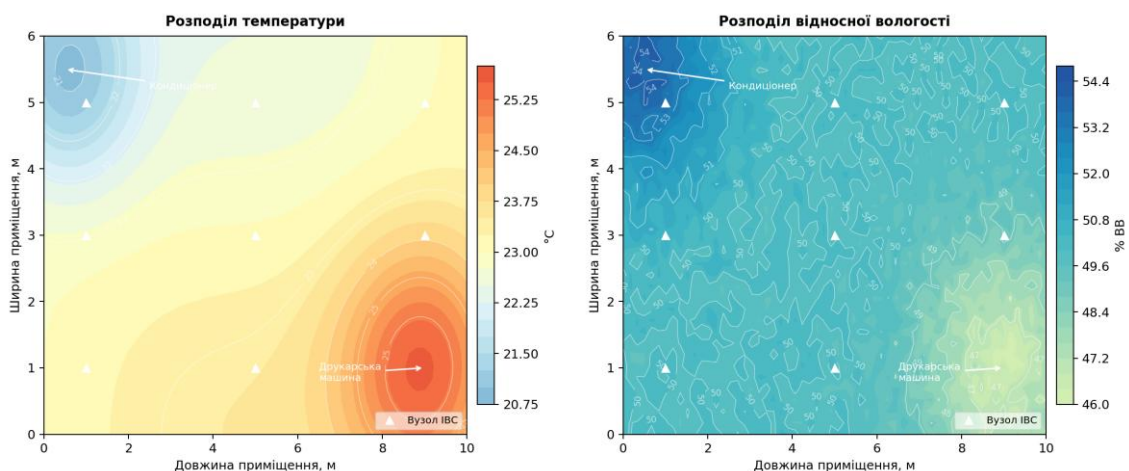


Рис. 2. Просторовий розподіл параметрів мікроклімату у виробничому приміщенні

Математична модель вимірювального каналу

Вимірювальний канал інформаційно-вимірювальної системи можна описати рівнянням [1, 2]:

$$X_{\text{вим}} = X_{\text{іст}} + \Delta, \quad (3)$$

де $X_{\text{вим}}$ – результат вимірювання параметра;

$X_{\text{іст}}$ – істинне значення вимірюваної величини;

Δ – сумарна похибка вимірювання.

Сумарна похибка вимірювання складається із систематичної та випадкової складових:

$$\Delta = \Delta_{\text{сист}} + \Delta_{\text{вип}}, \quad (4)$$

де $\Delta_{\text{сист}}$ – систематичні складові;

$\Delta_{\text{вип}}$ – випадкові складові.

Систематична складова для цифрових сенсорів класу SHT31 визначається похибкою калібрування та нелінійністю передавальної характеристики і не перевищує $\pm 0,2$ °C (для температури) та $\pm 1,5$ % ВВ (для вологості) [2].

Для оцінювання випадкової складової похибки використовують середнє значення результатів вимірювань:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (5)$$

де X_i – результат i -го вимірювання;

n – кількість вимірювань.

Характеристикою розсіювання результатів вимірювань є середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (6)$$

При $n \geq 10$ та нормальному розподілі довірчий інтервал (рівень 0,95) дорівнює $\bar{X} \pm 2\sigma$ [4]. Застосування контрольних карт Шухарта [4] підвищує точність оцінювання параметрів мікроклімату на 20–30 %.

Для оцінювання сукупної стандартної невизначеності вимірювального каналу температури відповідно до методології GUM використовують вираз [1]:

$$u_c(T) = \sqrt{u^2(T_{sens}) + u^2(T_{corr}) + u^2(T_{rou})} \quad (7)$$

де $u(T_{sens})$ – невизначеність сенсора;

$u(T_{corr})$ – невизначеність розрядності АЦП;

$u(T_{rou})$ – невизначеність впливу зовнішніх чинників (само-нагрів, теплопровідність монтажу).

Для сенсора SHT31 при розрядності АЦП 14 біт та кроці квантування 0,01 °C сукупна стандартна невизначеність становить не більше 0,18 °C ($k = 1$), що відповідає вимогам класу точності ISO 12647-2 [5]. Метрологічне забезпечення ІВС передбачає первинне та річне калібрування сенсорів на еталонних установках з точністю $\pm 0,05$ °C та $\pm 0,1$ % ВВ.

Архітектура сучасних інформаційно-вимірювальних систем

Сучасні тенденції розвитку вимірювальних систем пов'язані з використанням розподілених сенсорних мереж та технологій Інтернету речей (IoT) [2]. Це дозволяє реалізувати масштабовані системи моніторингу з можливістю віддаленого доступу до даних та інтеграції з корпоративними інформаційними системами.

Запропонована архітектура включає три рівні: рівень збору даних – польові вузли на базі мікроконтролерів STM32 з сенсорами SHT31; рівень передачі та агрегування – Wi-Fi-шлюз та MQTT-брокер (Mosquitto); рівень зберігання і візуалізації – сервер з базою даних InfluxDB та панеллю Grafana. Протокол MQTT забезпечує затримку передачі < 200 мс при пропускну здатності каналу від 1 Мбіт/с [2]. Архітектуру системи наведено на рисунку 3.

База даних InfluxDB оптимізована для зберігання часових рядів і дозволяє зберігати дані з кроком 30 с протягом декількох років без суттєвого зниження продуктивності запитів. Панель Grafana забезпечує відображення поточних значень, трендів та автоматичне сповіщення при виході параметрів за межі допустимих значень. Застосування триярусної архітектури забезпечує гнучкість і надійність системи та дозволяє інтегрувати її у загальну інформаційну інфраструктуру підприємства [8, 9].

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведений аналіз показує, що параметри мікроклімату мають визначальний вплив на якість поліграфічної продукції. Нестабільність температури понад ± 2 °C та відносної вологості понад ± 5 % ВВ призводить до порушення технологічних процесів та появи дефектів друку – деформації паперу та порушення суміщення фарб [3, 5].

Запропонована триярусна ІВС на базі SHT31/STM32/MQTT/InfluxDB забезпечує похибку вимірювання температури $\leq \pm 0,3$ °C та відносної вологості $\leq \pm 2,0$ % ВВ, що відповідає вимогам стандарту ISO 12647-2 [5]. Застосування методів статистичного аналізу [4] та GUM-оцінювання невизначеності [1] дозволяє підвищити достовірність результатів вимірювань на 20–30 %. Сукупна стандартна невизначеність вимірювального каналу температури становить не більше 0,18 °C ($k = 1$), що підтверджує відповідність системи вимогам ДСТУ ISO 10012 [10] та придатність для контролю умов поліграфічного виробництва. Впровадження системи дозволяє знизити кількість браку продукції на 35–45 %.

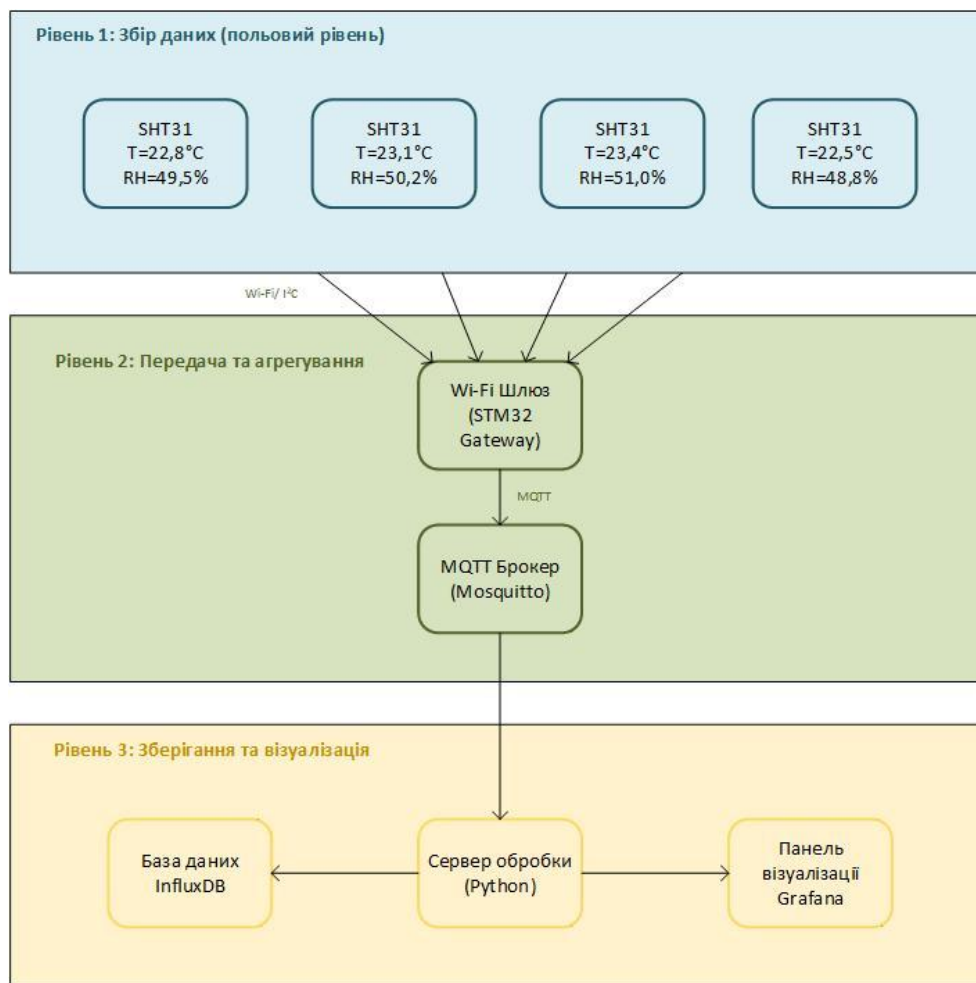


Рис. 3. Архітектура розподіленої інформаційно-виміральної системи

Перспективи подальших досліджень пов'язані з впровадженням інтелектуальних методів обробки даних – алгоритмів Machine Learning для прогнозування відхилень мікроклімату та виявлення аномалій у режимі реального часу, а також інтеграцією системи з автоматизованими системами управління виробництвом (MES/ERP) та системами управління якістю за ISO 9001.

Список використаної літератури:

1. *Doebelin E.* Measurement Systems: Application and Design / *E.Doebelin.* – New York : McGraw-Hill, 2011. – 800 p.
2. *Bentley J.* Principles of Measurement Systems / *J.Bentley.* – London : Pearson, 2014. – 560 p.
3. *Kipphan H.* Handbook of Print Media / *H.Kipphan.* – Berlin : Springer, 2001. – 1207 p.
4. *Montgomery D.* Statistical Quality Control / *D.Montgomery.* – Hoboken : Wiley, 2019. – 768 p.
5. Graphic technology – Process control for the production of halftone colour separations, proof and production prints. Part 2 : Offset lithographic processes : ISO 12647-2:2013. – Geneva, 2013.
6. ASHRAE Handbook – Fundamentals. – Atlanta : ASHRAE, 2021.
7. Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) : JCGM 100:2008. – BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 2008. – 134 p.
8. *Бууа R.* Internet of Things: Principles and Paradigms / *R.Бууа, A.V. Dastjerdi.* – Amsterdam : Elsevier, 2016. – 477 p.
9. *Свістельник О.С.* Метрологічне забезпечення інформаційно-виміральної системи контролю мікроклімату у поліграфічному виробництві / *О.С. Свістельник, Ю.О. Подчаїнський, Л.О. Ченюк* // Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення : тези VIII Всеукр. наук.-техн. конф., 2–3 грудня. – Житомир, 2025.
10. Системи керування вимірюваннями. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання (ISO 10012:2003, IDT) : ДСТУ ISO 10012:2005. – Київ : Держспоживстандарт України, 2006.
11. *Adams R M.* Color and Quality in Offset Lithography / *R.M. Adams.* – Pittsburgh : GATF Press, 2003. – 312 p.
12. *Fraden J.* Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications / *J.Fraden.* – New York : Springer, 2016. – 758 p.

References:

1. Doebelin, E. (2011), *Measurement Systems: Application and Design*, McGraw-Hill, New York, 800 p.
2. Bentley, J. (2014), *Principles of Measurement Systems*, Pearson, London, 560 p.
3. Kipphan, H. (2001), *Handbook of Print Media*, Springer, Berlin, 1207 p.
4. Montgomery, D. (2019), *Statistical Quality Control*, Wiley, Hoboken, 768 p.
5. *ISO 12647-2:2013 Graphic Technology – Process Control for the Production of Halftone Colour Separations, Proof and Production Prints. Part 2. Offset Lithographic Processes* (2013), Geneva.
6. *ASHRAE Handbook – Fundamentals* (2021), ASHRAE, Atlanta.
7. *JCGM 100:2008 Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)* (2008), BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 134 p.
8. Buyya, R. and Dastjerdi, A.V. (2016), *Internet of Things: Principles and Paradigms*, Elsevier, Amsterdam, 477 p.
9. Svistelnik, O.S., Podchashynskyi, Yu.O. and Chepiuk, L.O. (2025), «Metrolohichne zabezpechennia informatsiino-vymiriuvanoi systemy kontroliu mikroklimatu u polihrafichnomu vyrobnytstvi», *Kompiuterni tekhnologii: innovatsii, problemy, rishennia, tezy VIII Vseukr. nauk.-tekhn. konf.*, 2–3 December, Zhytomyr.
10. *DSTU ISO 10012:2005 Systemy keruvannia vymiriuvanniamy. Vymohy do protsesiv vymiriuvannia ta vymiriuvannoho obladdannia (ISO 10012:2003, IDT)* (2006), Derzhspozhyvstandart Ukrainy, Kyiv.
11. Adams, R.M. (2003), *Color and Quality in Offset Lithography*, GATF Press, Pittsburgh, 312 p.
12. Fraden, J. (2016), *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, Springer, New York, 758 p.

Свістельник Олександр Сергійович – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- комп’ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи;
- цифрова обробка сигналів і відеозображень;
- метрологія;
- засоби вимірювання.

Чепюк Ларіна Олексіївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- комп’ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи;
- цифрова обробка сигналів і відеозображень;
- метрологія;
- засоби вимірювання;
- системний аналіз складних технічних систем.

Svistelnik O.S., Chepiuk L.O.

Theoretical foundations of building a microprocessor information and measuring system for controlling microclimate parameters in printing production

The article examines the theoretical foundations for constructing a microprocessor information-measurement system (IMS) for monitoring microclimate parameters in printing production. An analysis of the influence of temperature and relative humidity on print quality was carried out: humidity deviations exceeding $\pm 5\%$ RH cause linear paper expansion of up to 0.5 % and ink misregistration of up to 0.3 mm, while temperature deviations of $\pm 3\text{ }^\circ\text{C}$ alter optical density by 0.05–0.10 D, exceeding ISO 12647-2 tolerances. The IMS structure comprising primary transducers, 12–16-bit ADCs, data transmission channels and signal processing software is considered. The physical principles of capacitive humidity and resistive temperature transducers are described. A mathematical model of the measuring channel with GUM-based uncertainty estimation and Shewhart control chart methods are proposed, improving measurement reliability by 20–30 %. Comparative characteristics of SHT31, DHT22, BME280, HTU21D and AM2301 sensors are presented in terms of measurement ranges, accuracy and interfaces. The expediency of a three-tier distributed IMS based on STM32/MQTT/InfluxDB with Grafana visualization is substantiated. The combined standard uncertainty of the temperature channel does not exceed 0.18 $^\circ\text{C}$ ($k = 1$), meeting DSTU ISO 10012 and ISO 12647-2 requirements. Implementation of the system reduces the product defect rate by 35–45 %. Prospects for integrating machine learning algorithms for microclimate deviation prediction are outlined.

Keywords: information-measurement system; microprocessor; microclimate; printing production; temperature; humidity; measuring transducers; metrological support; IoT.

Стаття надійшла до редакції 30.12.2025.