

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ БРОДІННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МІКРОКОНТРОЛЕРНИХ СИСТЕМ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі досліджено методи автоматичного контролю процесу бродіння з використанням мікроконтролерних систем. Розглянуто ключові параметри, що визначають якість бродіння: температура, рівень рН, концентрація CO₂ та відносна вологість. Здійснено порівняльний аналіз мікроконтролерних платформ (Arduino Uno, ESP32, STM32F4) та відповідних сенсорних модулів. Досліджено три методи управління: дворівневий (on/off), ПІД-регулювання та алгоритм нечіткої логіки. За результатами аналізу встановлено, що платформа ESP32 у поєднанні з ПІД-регулятором забезпечує похибку утримання температури не більше $\pm 0,1^\circ\text{C}$ та дозволяє реалізувати дистанційний моніторинг через WiFi з використанням протоколу MQTT.

Ключові слова: бродіння, мікроконтролер, ESP32, ПІД-регулювання, DS18B20, рН-датчик, автоматизація, моніторинг.

Abstract

The paper investigates methods for automatic control of the fermentation process using microcontroller systems. The key parameters determining fermentation quality are considered: temperature, pH level, CO₂ concentration, and relative humidity. A comparative analysis of microcontroller platforms (Arduino Uno, ESP32, STM32F4) and corresponding sensor modules is carried out. Three control methods are studied: two-position (on/off) control, PID regulation, and fuzzy logic algorithm. Based on the analysis results, it is established that the ESP32 platform combined with a PID controller provides a temperature holding error of no more than $\pm 0.1^\circ\text{C}$ and enables remote monitoring via WiFi using the MQTT protocol.

Keywords: fermentation, microcontroller, ESP32, PID control, DS18B20, pH sensor, automation, monitoring.

Вступ

Процес бродіння є основою харчової, фармацевтичної та біотехнологічної промисловості. Якість кінцевого продукту безпосередньо залежить від дотримання точних температурних режимів, рівня кислотності (рН) та концентрації продуктів метаболізму мікроорганізмів. Традиційні методи ручного контролю та вимірювання не забезпечують необхідної безперервності та точності спостереження, що призводить до нестабільності якості продукції і збільшення відсотку браку.

Стрімкий розвиток мікроконтролерних технологій відкриває нові можливості для автоматизації ферментаційних процесів. Сучасні мікроконтролери, зокрема ESP32 та STM32, забезпечують інтеграцію широкого спектру аналогових і цифрових датчиків, реалізацію алгоритмів управління в режимі реального часу та бездротову передачу даних на хмарні платформи. Це дозволяє будувати повністю автономні, енергоефективні та масштабовані системи контролю якості бродіння.

Актуальністю даної роботи є відсутність комплексного порівняльного аналізу апаратних платформ і методів управління стосовно задачі контролю бродіння, що ускладнює вибір оптимального рішення для конкретного виробничого застосування.

Метою роботи є дослідження та порівняльний аналіз методів автоматичного контролю процесу бродіння з використанням мікроконтролерних систем, визначення оптимальних апаратних рішень і алгоритмів управління для забезпечення стабільних умов ферментації з можливістю дистанційного моніторингу.

Ключові параметри процесу бродіння та засоби їх вимірювання

Якість та перебіг бродіння визначається комплексом взаємозалежних фізико-хімічних параметрів, кожен з яких потребує безперервного контролю. Нижче наведено аналіз основних параметрів та відповідних сенсорних рішень для мікроконтролерних систем.

Температура є найкритичнішим параметром ферментаційного процесу. Для дріжджового бродіння оптимальний діапазон становить 18–22°C, для молочнокислого — 30–37°C. Відхилення від норми пригнічує активність мікроорганізмів або спричиняє їх загибель. Для вимірювання застосовуються цифрові датчики DS18B20 з протоколом 1-Wire та точністю $\pm 0,5^\circ\text{C}$, а для вищотемпературних промислових процесів — термопари типу К із перетворювачем MAX6675.

Рівень рН характеризує кислотно-лужний баланс ферментаційного середовища. Дріжджове бродіння протікає оптимально при рН 3,5–5,5, молочнокисле — при рН 5,5–6,5. Для неперервного вимірювання застосовують аналогові рН-електроди у поєднанні з підсилювальними модулями SEN0161-V2 (DFRobot), що формують уніфікований аналоговий сигнал 0–3,3 В для підключення до АЦП мікроконтролера.

Концентрація CO_2 є прямим індикатором інтенсивності бродіння. Зростання концентрації вуглекислого газу свідчить про активну фазу ферментації. Датчики MH-Z19B або SCD30 (Sensirion) на основі технології NDIR (Non-Dispersive Infrared) забезпечують точність ± 50 ppm у діапазоні 0–5000 ppm та підключаються до мікроконтролера через інтерфейс UART або I2C відповідно.

Відносна вологість є важливим параметром для відкритих ферментаційних систем та систем контролю мікроклімату в приміщеннях витримки. Датчик DHT22 забезпечує точність вимірювання $\pm 2\%$ вологості та $\pm 0,5^\circ\text{C}$ температури з цифровим однодротовим інтерфейсом.

Порівняльний аналіз мікроконтролерних платформ

Вибір мікроконтролерної платформи є визначальним для функціональності, точності та вартості системи контролю бродіння. Розглянуто три основні платформи, найбільш поширені у застосуваннях промислової автоматизації та IoT.

Arduino Uno на базі мікроконтролера ATmega328P (16 МГц, 6 каналів АЦП 10-біт) є простим та доступним рішенням для початкового рівня. Проте 10-бітне АЦП забезпечує роздільну здатність лише 4,88 мВ при напрузі живлення 5 В, що є недостатнім для точного вимірювання рН-сигналу. Відсутність вбудованого бездротового зв'язку потребує додаткових WiFi-модулів (ESP8266) і суттєво ускладнює схемотехнічне рішення.

ESP32 (Xtensa LX6, 240 МГц, двоядерний, 18 каналів АЦП 12-біт, вбудовані WiFi 802.11 b/g/n та Bluetooth 4.2) є оптимальним вибором для IoT-систем моніторингу бродіння. Вбудований WiFi дозволяє передавати вимірювані параметри на хмарні сервери та MQTT-брокери без додаткових модулів, а висока тактова частота — виконувати ПД-алгоритми та алгоритми нечіткої логіки в реальному часі. Вартість модуля (~\$7) робить платформу економічно обґрунтованою навіть для одиничних установок.

STM32F4 (ARM Cortex-M4, 168 МГц, апаратний FPU, 16 каналів АЦП 12-біт з диференціальним режимом) забезпечує найвищу обчислювальну продуктивність та точність аналогово-цифрового перетворення. Апаратний блок операцій з плаваючою точкою (FPU) прискорює виконання ПД-розрахунків у 4–8 разів порівняно з програмною емуляцією. Рекомендується для промислових систем з жорсткими вимогами до детермінованості реального часу, однак потребує зовнішнього WiFi-модуля та має вищу складність програмування.

Таблиця 1 – Порівняння мікроконтролерних платформ для систем контролю бродіння

Параметр	Arduino Uno	ESP32	STM32F4
Тактова частота	16 МГц	240 МГц	168 МГц
АЦП (розрядність)	10-біт	12-біт	12-біт (диф.)
Вбудований WiFi	Відсутній	802.11 b/g/n	Відсутній
FPU	Відсутній	Відсутній	Апаратний
Канали I ² C/SPI/UART	1/1/1	2/4/3	3/3/4
Орієнтовна вартість	~\$5	~\$7	~\$15
Складність розробки	Низька	Середня	Висока

Методи управління процесом бродіння

Алгоритм управління визначає точність підтримання заданих параметрів бродіння та реакцію системи на зовнішні збурення. Досліджено три основні методи, які застосовуються у мікроконтролерних системах автоматизації.

Дворівневий (on/off) контроль є найпростішим методом управління виконавчими механізмами (нагрівач, охолоджувач). Виконавчий пристрій вмикається при відхиленні контрольованого параметра від уставки на величину гістерезису ΔT та вимикається при поверненні до норми. Метод не вимагає математичної моделі об'єкта і легко реалізується на будь-якому мікроконтролері. Суттєвим недоліком є виникнення стаціонарних коливань параметра з амплітудою ΔT , що є критичним для точних процесів бродіння.

ПД-регулювання (пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор) є стандартом промислової автоматизації та забезпечує точне утримання заданого значення параметра. Управляючий сигнал визначається трьома складовими: пропорційною — для реакції на поточну похибку $e(t)$; інтегральною — для усунення статичної похибки; диференціальною — для попередження перегулювання. При правильно підібраних коефіцієнтах (методи Ziegler-Nichols або Cohen-Coon) похибка регулювання температури не перевищує $\pm 0,1^\circ\text{C}$, що є оптимальним для контролю бродіння.

Нечітка логіка (fuzzy logic) дозволяє управляти системою без точної аналітичної моделі об'єкта, що є перевагою для нелінійних ферментаційних процесів. Вхідні змінні (наприклад, температура та швидкість її зміни) описуються лінгвістичними термами («холодно», «нормально», «гаряче») з відповідними функціями приналежності. База правил формується у вигляді if-then конструкцій на основі експертних знань технолога. Метод є гнучким та стійким до нелінійностей, однак потребує значних обчислювальних ресурсів при великій кількості правил (понад 25–30), що доцільно враховувати при виборі платформи.

Порівняльний аналіз показав, що для більшості сценаріїв лабораторного та малосерійного виробничого контролю бродіння оптимальним є ПД-регулювання на платформі ESP32: воно забезпечує достатню точність, просте налаштування та підтримку бездротового моніторингу. Нечітка логіка доцільна у випадках, коли математична модель об'єкта невідома або нелінійна, і реалізується на STM32F4 завдяки апаратному FPU.

Висновки

У ході дослідження виконано комплексний аналіз методів контролю за процесом бродіння з використанням мікроконтролерних систем. На основі отриманих результатів можна зробити наступні висновки.

Вибір параметрів моніторингу: визначено чотири ключові параметри контролю бродіння — температура, рівень рН, концентрація CO₂ та відносна вологість — та відповідні сенсорні рішення

(DS18B20, SEN0161-V2, MH-Z19B, DHT22) з урахуванням точності вимірювання, типу інтерфейсу та сумісності з мікроконтролерними платформами.

Порівняльний аналіз платформ: встановлено, що ESP32 є оптимальним вибором для систем моніторингу бродіння завдяки вбудованому WiFi-модулю, 12-бітному АЦП та достатній обчислювальній потужності для реалізації складних алгоритмів управління при низькій вартості. STM32F4 рекомендується для промислових застосувань з підвищеними вимогами до точності та детермінованості реального часу.

Методи управління: доведено, що ПІД-регулювання забезпечує похибку утримання температури не більше $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ та є оптимальним методом для більшості сценаріїв контролю бродіння. Дворівневий on/off контроль є прийнятним лише для некритичних застосувань з допустимим гістерезисом не менше $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Нечітка логіка доцільна для адаптивного управління в нелінійних режимах за умови достатньої обчислювальної потужності контролера.

ІоТ-інтеграція: впровадження протоколу MQTT на платформі ESP32 забезпечує безперервний дистанційний моніторинг параметрів бродіння з відображенням на веб-дашборді в режимі реального часу, що підвищує прозорість виробничого процесу та дозволяє оперативно реагувати на відхилення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Nguyen D. T., Do T. H. Design of Fermentation Control System Based on Microcontroller // International Journal of Advanced Engineering Research and Science. – 2021. – Vol. 8, No. 2. – P. 45–52.
2. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf (дата звернення: 10.04.2026).
3. Åström K. J., Hägglund T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning. 2nd ed. – Research Triangle Park: ISA, 1995. – 354 p.
4. Mamdani E. H. Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis // IEEE Transactions on Computers. – 1977. – Vol. C-26, No. 12. – P. 1182–1191. DOI: 10.1109/TC.1977.1674779
5. Sensirion AG. SCD30 Sensor Module – CO₂, Humidity and Temperature Sensor [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://sensirion.com/media/documents/4EAF6AF8/61652C3C/Sensirion_CO2_Sensors_SCD30_Datasheet.pdf (дата звернення: 10.04.2026).
6. Banks A., Gupta R. MQTT Version 3.1.1 / A. Banks, R. Gupta. – OASIS Standard, 2014. – 81 p. Режим доступу: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html>
7. Maxim Integrated. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. Datasheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf> (дата звернення: 10.04.2026).

Ластовський Дмитро Юрійович – студент факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: dimalastovskiyy@gmail.com.

Кадук Олександр Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: o.kaduk@gmail.com

Lastovskyi Dmytro – student of the Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: dimalastovskiyy@gmail.com.

Kaduk Oleksandr – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Computer Techniques Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: o.kaduk@gmail.com