

УДК: 681.5:004.738.5:664.8.047.8.002.5

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2026-28-9

Смолій О. В., ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-3295-0162>Микитишин А. Г., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2999-3232>

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

## ІОТ-МОНІТОРИНГ ПРОЦЕСУ ЕКСТРУЗІЇ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СНЕКІВ НА ДВОШНЕКОВОМУ ЕКСТРУДЕРІ

У статті представлено поглиблене дослідження архітектури Інтернету речей (IoT), розробленої для високоточного та багаторівневого моніторингу процесу екструзії снєків на двошнековому екструдері. Запропонована система охоплює повний життєвий цикл даних: збирання технологічних сигналів із датчиків та інверторів, їх попередню обробку і нормалізацію за допомогою програмованого логічного контролера (PLC), передавання в режимі реального часу за протоколом MQTT, а також структуроване довготривале зберігання у системі керування базами даних (СКБД). Такий підхід забезпечує надійність даних і створює основу для оперативної візуалізації та розробки аналітичних інструментів для оптимізації процесу.

Визначено комплекс ключових технологічних індикаторів, що характеризують поведінку системи. До них належать температурні профілі по зонах, динаміка тиску в області формувальної матриці, струм та частота обертання приводних двигунів, точне дозування сировини та сумарне енергоспоживання установки. Безперервний моніторинг цих параметрів формує основу для стабілізації процесу, раннього виявлення відхилень і підвищення відтворюваності властивостей готового продукту. Систематичний аналіз публікацій та промислових кейсів останніх трьох років підтверджує поширення технологій Індустрії 4.0 у харчовому виробництві. Зокрема, застосування легких MQTT-орієнтованих каналів обміну даними, впровадження предиктивного обслуговування електроприводів та перші етапи реалізації концепції Process Analytical Technology (PAT) створюють передумови для побудови цифрового двійника екструзійної лінії.

На основі проведеного дослідження сформульовано рекомендації щодо побудови математичної моделі процесу, визначення економічно обґрунтованого, але інформативного набору датчиків та проектування оптимальної структури даних для довготривалої експлуатації в промислових умовах. Запропоновано покрокову дорожню карту, яка спрямовує підприємство від базового моніторингу до впровадження предиктивної аналітики, алгоритмів виявлення аномалій і, зрештою, розгортання повноцінного цифрового двійника. Аналіз літератури засвідчує наявність помітного дефіциту практичних, орієнтованих на дані досліджень, що стосуються оптимізації та моніторингу двошнекових екструзійних систем у виробництві снєків. Це підкреслює оригінальність, практичну значущість і науковий потенціал представленої роботи у контексті цифрової трансформації харчової промисловості.

**Ключові слова:** IoT, екструзія, MQTT, Node-RED, SQL, Індустрія 4.0.

**Постановка проблеми.** Екструзія є базовою технологією виробництва зернових снєків. Двошнекові екструдери забезпечують кращий контроль змішування, тепло-масообміну та структурування білків/крохмалю, що визначає текстуру та показники якості. Сучасні підходи Індустрія 4.0/5.0 для харчових виробництв (смарт-сенсори, аналітика, цифрові двійники) декларують підвищення якості, прогнозованість та стабільність процесів. Однак предметних кейсів для харчової екструзії все ще небагато, в порівнянні, наприклад, із виробництвом полімерів. Останні огляди підтверджують тренд на інтеграцію IoT-моніторингу та аналітики в харчовій переробці, але підкреслюють необхідність практичних реалізацій і стандартизованих моделей даних [1]. Мета дослідження. Сформувати відтворювану IoT-архітектуру моніторингу двошнекової екструзії снєків, визначити мінімальний набір індикаторів якості процесу та запропонувати підхід до аналітики (статистичне контрольоване управління процесом, виявлення аномалій, прогнози), спираючись на досягнення останніх років.

**Мета дослідження.** Сформувати відтворювану IoT-архітектуру моніторингу двошнекової екструзії снєків, визначити мінімальний набір індикаторів якості процесу та запропонувати підхід до аналітики (статистичне контрольоване управління процесом, виявлення аномалій, прогнози), спираючись на досягнення останніх років.

**Аналіз останніх джерел.** Сучасні підходи до цифровізації екструзійних процесів активно розвиваються у межах концепцій Індустрії 4.0 та 5.0. У роботі [1] проведено комплексний аналіз тенденцій розвитку харчової переробки, відповідно до парадигми Індустрії 4.0, де підкреслено важливість застосування інтелектуальних давачів, MQTT-обміну даних та систем аналітики даних. Проте автори відзначають, що конкретні галузеві реалізації у сфері харчової екструзії все ще залишаються поодинокими.

Детальніше проблеми моніторингу екструзійних процесів розглянуто в дослідженнях [2], де запропоновано систему акустичної емісії для контролю процесу пластифікації полімерних гранул у двошнековому екструдері. Незважаючи на те, що робота присвячена полімерній екструзії, принципи застосування акустичних методів можуть бути адаптовані й для аналізу процесів у харчових екструдерах.

У роботі [3] розглянуто використання методів машинного навчання для моніторингу деградації полімерів під час екструзії. Автори застосували моделі машинного навчання (ML-моделі) для аналізу температури, тиску та спектральних показників, що дозволяє прогнозувати властивості матеріалу в реальному часі. Використання такої моделі дозволяє виявляти закономірності, робити прогнози або приймати рішення без прямого програмування правил. Подібні підходи можна перенести на харчову екструзію для побудови моделей якості.

У роботі [4] представлено впровадження Raman-спектроскопії (аналітичний метод, який ґрунтується на вимірюванні розсіювання світла) безпосередньо в корпусі екструдера, коли лазерне випромінювання взаємодіє з молекулами речовин. Хоча приклади здебільшого належать до фармацевтичної галузі, підхід може бути використаний у рамках PAT - систем.

Інший напрям представлено у роботі [5], де за допомогою CFD-моделювання (Computational Fluid Dynamics) оцінювалась технологічність полімерів при двошнековій екструзії. CFD-моделювання це метод чисельного моделювання руху рідин, газів і теплопередачі на основі рівнянь механіки суцільного середовища (передусім рівнянь Нав'є-Стокса). Аналогічні чисельні підходи можуть бути використані для побудови цифрових двійників харчових екструдерів.

В статті [6] розглянуто проблеми змішування в коекструдерах, які показали вплив геометрії гвинтів на дисперсійне та дистрибутивне змішування. Для харчових систем це може бути корисним для контролю рівномірності зволоження та однорідності продукту загалом.

У дослідженні [7] розроблено нові методи вимірювання розподілу часу перебування (Residence Time Distribution) у двошнекових екструдерах, що дозволяє оцінювати стабільність процесу.

Важливий практичний приклад промислової IoT-архітектури наведено в офіційній документації Node-RED [8], де описано реалізацію потоку MQTT - Node-RED - MariaDB. Node-RED використано як основну платформу для збирання, обробки та візуалізації даних у реальному часі. Такий підхід підтверджує доцільність застосування low-code середовища Node-RED як центральної ланки системи моніторингу процесів екструзії снєків.

У 2024–2025 рр. активно досліджено можливості впровадження цифрових двійників у харчовій індустрії [9]. Автори зазначають, що застосування цифрових копій технологічних ліній дозволяє скорочувати час оптимізації параметрів.

У харчовій тематиці найбільш релевантним до нашої теми є огляд [10], де досліджено вплив температури, вологості та швидкості обертання шнеків на показники розширення і текстуру снєків.

Таким чином, аналіз літератури свідчить, що значний прогрес досягнуто у полімерній та фармацевтичній екструзії, проте у харчовій галузі такі рішення перебувають на етапах впровадження. Розробка IoT-системи моніторингу двошнекової екструзії снєків із подальшою інтеграцією в цифровий двійник є актуальним напрямом досліджень.

**Виклад основного матеріалу.** В межах роботи було реалізовано два незалежні підходи моніторингу даних. В першому випадку дані отримуються безпосередньо від давачів або частотних перетворювачів (інверторів). В другому - первинні дані збираються та обробляються програмованим логічним контролером, і в подальшому, через комунікаційний шлюз передаються на сервер.

1. Система А - моніторинг екструдера без використання промислового контролера. Структура наведена на рисунку 1.

Призначення: забезпечення збору та відображення ключових технологічних параметрів.

Архітектура потоку даних: MQTT → Node-RED → MariaDB.

Джерела даних: Польові давачі (сенсори) температури зон, тиску перед матрицею, електричні параметри приводу (струм, напруга, потужність, швидкість частота). Сигнали надходять через наявні комунікаційні інтерфейси та перетворювачі сигналів (послідовні інтерфейси або шлюз у форматі MQTT).

Функції Node-RED:

- нормалізація повідомлень, масштабування та валідація даних;
- агрегації даних (зведення, усереднення) з інтервалом 1–5 хв, запис у MariaDB;
- формування подій та попереджень: контроль телеметрії (watchdog) та відстеження перевищення порогових значень (тиск Р, температура Т, струм І)

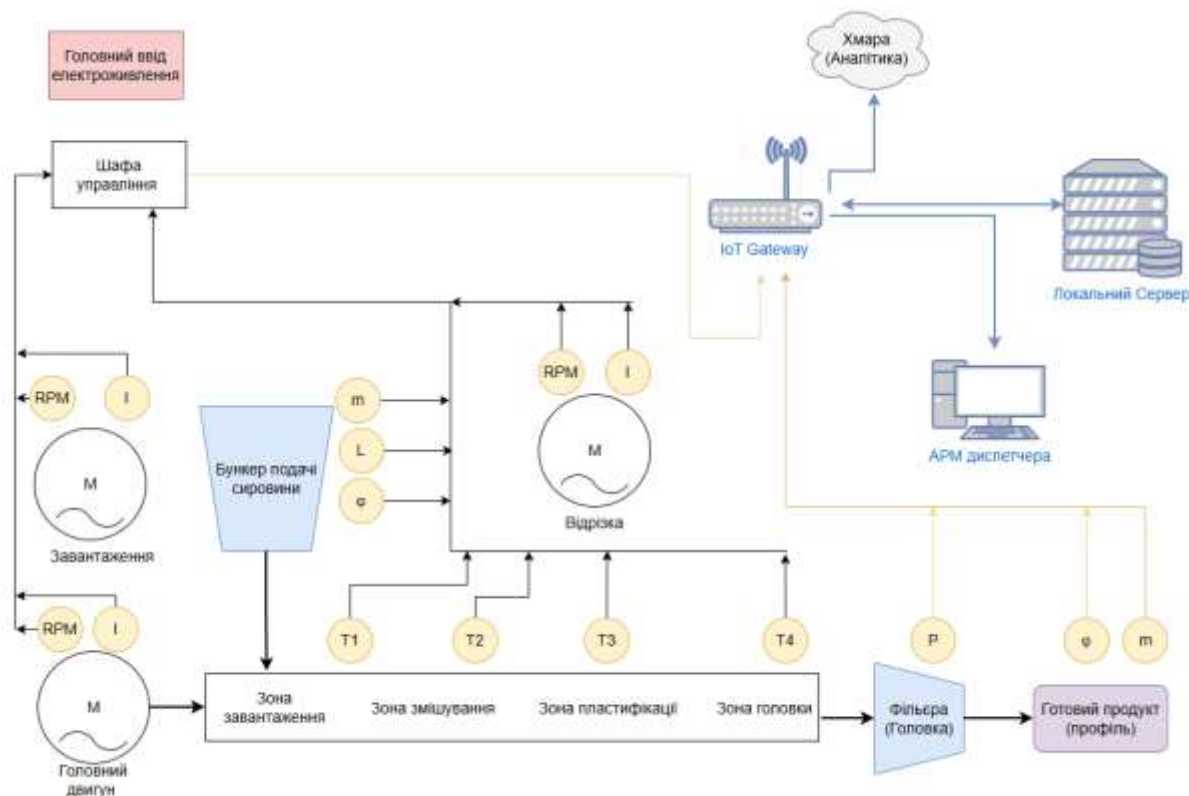


Рисунок 1 – Архітектура Система А

2. Система В — моніторинг з підключенням до системи керування на базі промислового контролера Delta DVP. Структура наведена на рис. 2.

Призначення: Інтегрований моніторинг технологічного процесу, що використовує ПЛК Delta DVP як первинне джерело узгоджених параметрів процесу та станів обладнання.

Архітектура потоку даних: PLC – HMI – Gate - MQTT - Node-RED - MariaDB.

Джерела даних: Дані від давачів поступають в відповідні регістри ПЛК звідки зчитуються панеллю оператора (HMI) і через шлюз передаються на MQTT сервер. Параметрами що контролюються є температури зон, тиск, стани аварій, частота приводу, оцінка крутного моменту за струмом або біти/слово стану (status word), а також окремі канали від частотного перетворювача (VFD). Обмін з ПЛК здійснюється через існуючий польовий протокол Modbus.

Функції Node-RED: Отримання даних від MQTT сервера, парсинг (аналіз) регістрів та уніфікація імен тегів, контроль цілісності та повноти даних (наприклад, watchdog за адресами регістрів, запобігання "затримці кадру"), збереження в MariaDB (первинні дані та агреговані значення), формування аналітичних звітів та операторських панелей (дашбордів).

Було спроектовано та зібрано електричну шафу керування екструдером, яка забезпечує живлення, захист і підключення виконавчих механізмів, частотних перетворювачів (інверторів), контролера Delta DVP, модулів введення-виведення (I/O) та інтерфейсних адаптерів. Система живиться від трифазної мережі змінного струму 380 В, 50 Гц. Основний привід екструдера керується частотним перетворювачем Delta C2000, а допоміжні приводи завантаження та транспортування — перетворювачами серії Delta EL.

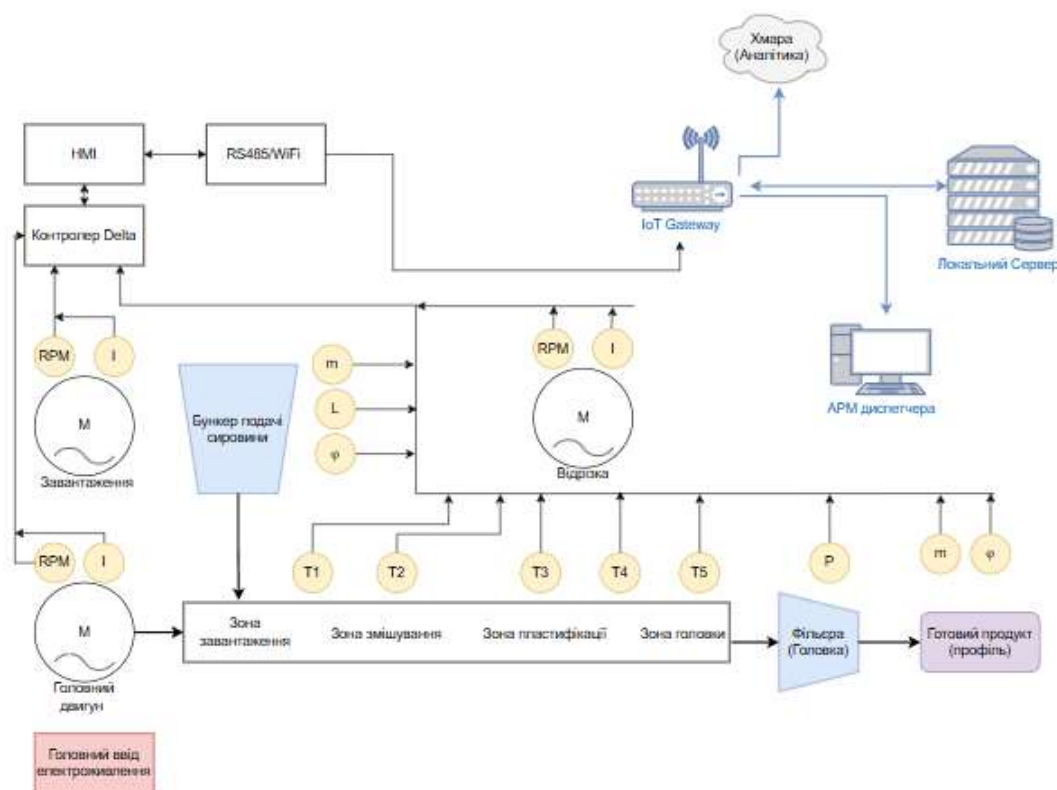


Рисунок 2 – Архітектура Система В (з PLC Delta DVP)

Зв'язок між контролером та частотними перетворювачами (ЧП) здійснюється через шину RS-485 (з використанням протоколу Modbus RTU/ASCII). Для взаємодії з системою IoT-моніторингу застосовано промисловий IoT-шлюз Waveshare ESP32-S3-RS485-CAN, який забезпечує двосторонній обмін даними через RS-485 і передачу даних у мережу Wi-Fi, використовуючи протокол MQTT та брокер Mosquitto. Шлюз виконує роль комунікаційного вузла між нижнім рівнем автоматизації (ПЛК, ЧП) та верхнім рівнем збору та аналізу даних (Node-RED, MariaDB), уніфікуючи телеметрію.

Електрична шафа (рис. 3) містить логічно відокремлені секції: живлення (автоматичні вимикачі, контактори, трансформатори/блоки живлення), секція автоматики (контролер, модулі I/O, інтерфейсні плати), захист (аварійні кнопки, плавкі запобіжники (вставки), індикатори) та комунікації (промислові (RS-485) та комп'ютерні (WiFi) мережі). Конструкція забезпечує безпечну експлуатацію, зручність обслуговування і можливість подальшого розширення. Використано комунікаційні шлюзи для обміну даними з сервером та системою керування вищого рівня.



Рисунок 3 – Електрична шафа керування екструдером з використанням промислового контролера та реалізація шлюза RS485/WiFi

На рисунку 4 показано фрагмент програми агрегації даних реалізований за допомогою Node-RED.

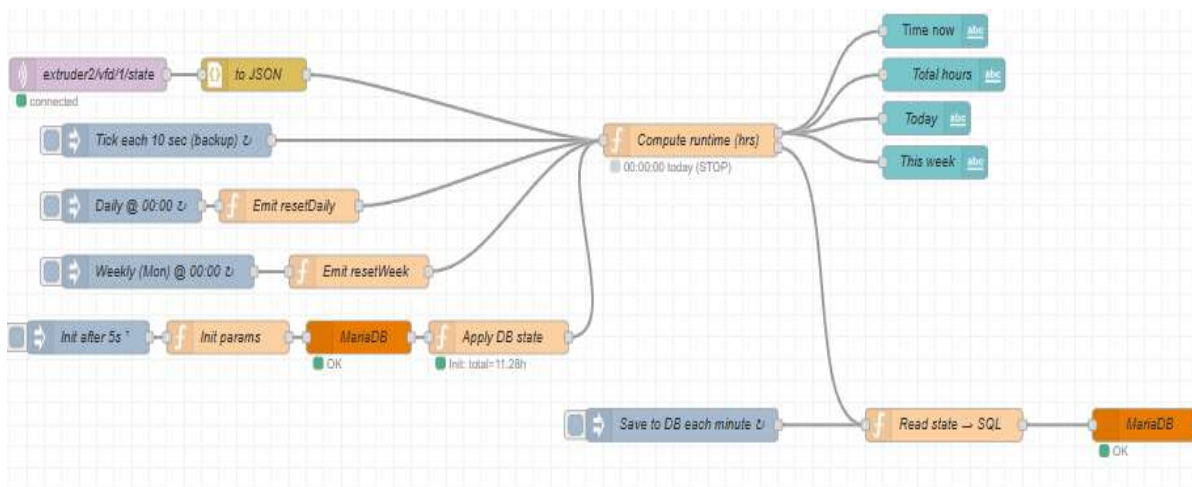


Рисунок 4 – Фрагмент програми агрегації даних реалізований за допомогою Node-RED

Віддалений моніторинг технологічних режимів дозволяє в реальному часі контролювати режими роботи лінії та оперативно їх коригувати. Приклад візуалізації температурних режимів роботи екструдера по секціях у табличному вигляді представлено на рис. 5.

Температура секцій

Секція	Т задана	Т фактична	Нагрівання	Охолодження
Секція 1	50.0 °C	52.90 °C	●	●
Секція 2	90.0 °C	87.00 °C	●	●
Секція 3	125.0 °C	126.30 °C	●	●
Секція 4	120.0 °C	118.80 °C	●	●
Секція 5	80.0 °C	78.40 °C	●	●
Секція 6	75.0 °C	85.20 °C	●	●

Рисунок 5 – Візуалізація температури секцій екструдера

Візуалізація даних режимів роботи екструдера здійснюється як у реальному часі, так і у вигляді графіків за обраний період. На основі отриманих даних побудовано графік зміни частоти та струму головного двигуна (рис.6).

### 3. Структура бази даних (спільна для обох систем)

Єдина база даних (БД), що сформована з використанням системи керування базами даних (СУБД) MariaDB, використовується обома системами для забезпечення стандартизованого зберігання даних. Пропонована структура БД включає такі логічно виокремлені таблиці:

- tags (ідентифікатори параметрів, одиниці виміру, адреси джерел, коефіцієнти масштабування (scaling factors), активність),
- telemetry\_raw (первинні дані з датчиків з часовими мітками у мілісекундах і посиланням на tag\_id),
- telemetry\_agg\_5min (агреговані ряди за 5 хвилин із полями avg, min, max, кількість вимірів),
- recipes (рецептурні налаштування, зокрема T\_zone1..N, P\_set, freq\_set),
- alarms (журнал подій і аварій із кодом, рівнем важливості та повідомленням),
- users (облікові записи та ролі доступу).

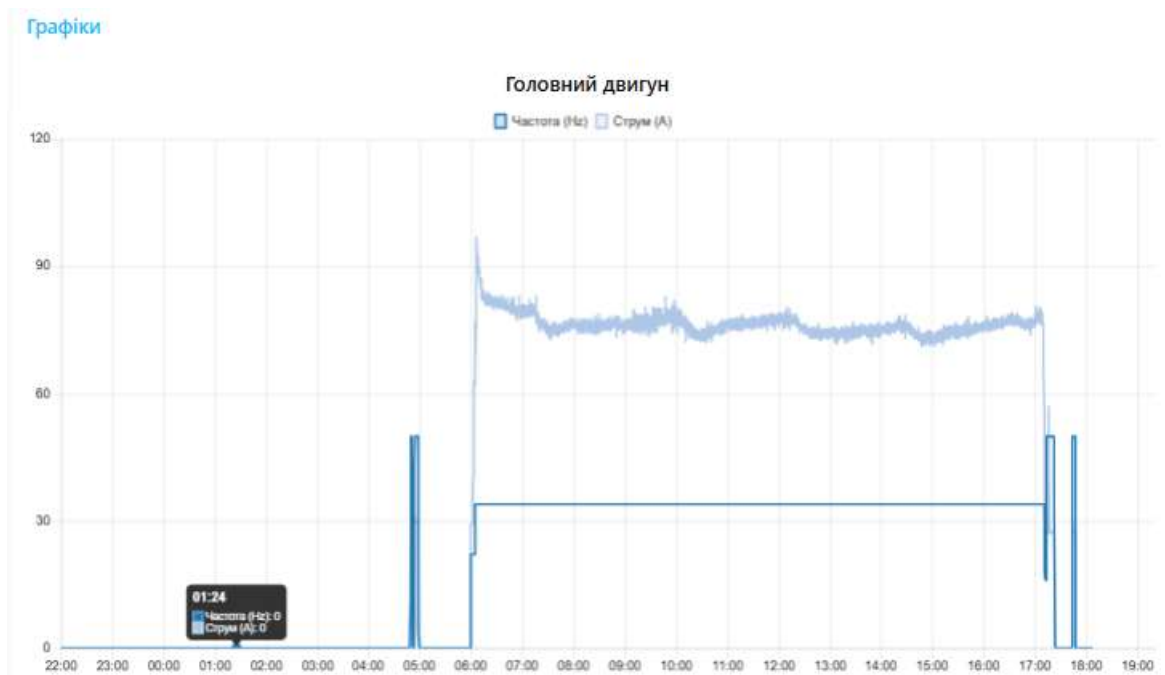


Рисунок 6 – Графік роботи головного двигуна

База даних спільна, що забезпечує порівнянність даних між системами А і В. Запропонована схема таблиць приведена нижче:

- tags (id, name, unit, source\_addr, scale, is\_active)
- telemetry\_raw (id, ts\_ms, tag\_id, value, quality)
- telemetry\_agg\_5min (ts\_5min, tag\_id, avg\_val, min\_val, max\_val, n)
- recipes (id, name, T\_zone1..N, P\_set, freq\_set)
- alarms (id, ts\_ms, code, severity, message, message, src\_tag\_id)
- users (id, login, role, email)

Така структура розроблена для забезпечення масштабованості та гнучкості розширення бази даних відповідно до подальших дослідницьких завдань (рис. 7).

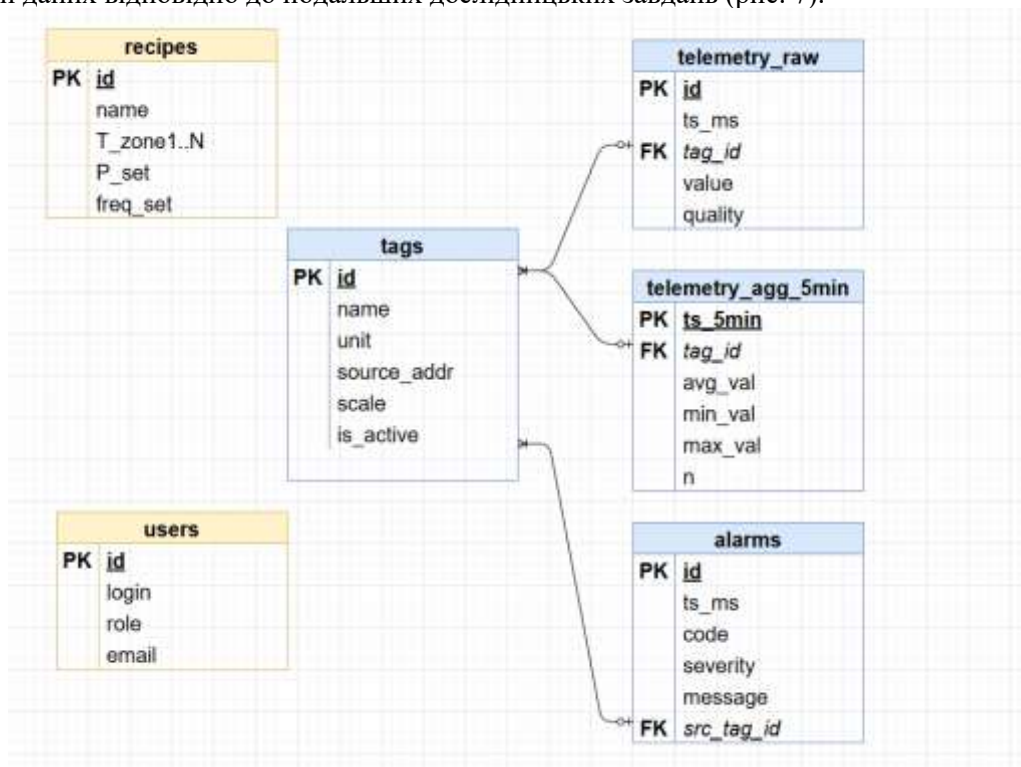


Рисунок 7 – Структура бази даних IoT-моніторингу

#### 4. Порівняльний аналіз реалізацій

Система А (прямий моніторинг) та Система В (моніторинг через ПЛК) являють собою дві принципово різні стратегії IoT-інтеграції.

Система А є рішенням з меншими капітальними витратами (CAPEX) та нижчою складністю інтеграції, оскільки вона збирає дані безпосередньо від польових давачів та частотних перетворювачів через IoT-шлюз. Такий підхід ідеально підходить для швидкого пілотного впровадження або для ліній, які не мають централізованого керуючого ПЛК. Однак, її основним недоліком є низька стабільність і залежність якості даних від надійності комунікаційного каналу (шлюзу). Крім того, аварійність тут реєструється лише за пороговими значеннями (P, T, I), що обмежує можливості детальної діагностики.

На противагу, Система В використовує програмований логічний контролер Delta DVP як єдине джерело даних. Це суттєво підвищує стабільність телеметрії та знімає навантаження з IoT-шлюзу. Хоча капітальні витрати (CAPEX) та складність інтеграції є середніми (через необхідність конфігурації ПЛК та забезпечення доступу до його регістрів), переваги полягають у більшому наборі подій та аварій. ПЛК надає не лише порогові спрацювання, але й коди станів та сигнали несправностей обладнання, що є критично важливим для реалізації предиктивної аналітики та цифрового двійника. Обидві системи забезпечують агрегацію даних з інтервалом 1–5 хв для подальшого аналізу.

Зрештою, Система В більш перспективна для довгострокового впровадження та побудови складних моделей якості, оскільки забезпечує вищу надійність, консистентність даних та деталізований контроль подій, що є необхідною передумовою для переходу від простого моніторингу до предиктивної аналітики.

Порівняльний аналіз реалізованих систем приведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз реалізацій Систем А і В

Критерій	Система А (ручне керування)	Система В (PLC Delta DVP)	Коментар
Джерело даних	Польові сенсори / шлюз MQTT	PLC (регістри)	У В - єдине «джерело даних» від PLC
Затримка / стабільність	Залежить від шлюзу/каналу	Стабільна з боку PLC-опитування	Обидві підтримують 1–5 хв агрегати
Аварійність (події)	Пороги за величинами	Події/стани з PLC + пороги	В має багатший набір подій
Складність інтеграції	Низька/середня	Середня	В потребує доступу до PLC
Супровід (OPEX)	Низький	Низький/середній	Залежить від частоти змін у PLC
Капітальні витрати (CAPEX)	Низькі (мін. сенсори/шлюз)	Середні (PLC-доступ, налаштування)	Обидві альтернативи прийнятні

Примітка: обидві системи використовують однаковий стек обробки даних: MQTT → Node-RED → MariaDB.

#### 5. Інтеграція та верифікація

В обох реалізованих системах (А і В) застосовано механізми контролю якості даних, що включають контроль активності з'єднання (watchdog за адресами/топіками MQTT) та перевірку діапазонів допустимих значень, а також синхронізацію часових міток. Ключовим елементом інтеграції є уніфікація та стандартизація імен тегів за допомогою таблиці tags. Для фіксації та відстеження нештатних подій введено журнали аварій та подій. Всі ключові показники агреговані у п'ятихвилинні часові інтервали для подальшого аналізу.

**Висновки.** Було успішно реалізовано два варіанти системи IoT-моніторингу екструзії снєків: з прямим підключенням до давачів (Система А) і інтегровану через програмований логічний контролер Delta DVP (Система В). Обидва варіанти продемонстрували стабільність у виробничих умовах, забезпечуючи надійний збір, збереження та візуалізацію ключових параметрів процесу. Обрана IoT-архітектура MQTT → Node-RED → MariaDB підтвердила свою ефективність і масштабованість для задач моніторингу та подальшої аналітики.

Надані таблиці та графіки моніторингу (див. рис. 3, 6) відображають динаміку температур зон, частоти обертання і струму головного приводу у реальному часі. Рисунок 3 та 6 слугують візуальним підтвердженням працездатності та практичної корисності впровадженого підходу.

Цей проект реалізовано в рамках розробки дорожньої карти з впровадження Індустрії 4.0 для керування екструдером для виробництва снєків.

#### Інформаційні джерела

1. Hassoun A. Food processing 4.0: Current and future developments spurred by the fourth industrial revolution / A. Hassoun, S. Jagtap, H. Trollman, G. Garcia-Garcia, Abdullah N., G. Goksen, G. Bader, F. Ozogul, F. Barba, J. Cropotova, P. Munekata, J. Lorenzo // Food control. 2023. Vol. 145. Article 109507. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109507>.
2. Kida T. Real-time monitoring of pellet plastication in a full-flight screw and kneading disk elements of a co-rotating self-wiping twin-screw extruder by acoustic emission (AE) sensing / T. Kida, M. Ohara, S. Nagasawa // Polymers. 2023. Vol. 15, no. 5. Article 1140. <https://doi.org/10.3390/polym15051140>.
3. Munir N. Interpretable machine learning methods for monitoring polymer degradation in extrusion of polylactic acid / R. McMorro, K. Mulrennan, D. Whitaker, S. McLoone, M. Kellomäki, E. Talvitie, I. Lyyra, M. McAfee, // Polymers. 2023. Vol. 15, no. 17. Article 3566. <https://doi.org/10.3390/polym15173566>.
4. Thermo Fisher Scientific. How In-Line Monitoring with Raman Spectroscopy Can Make a Difference in Polymer Extrusion Processes [Електронний ресурс]. URL: <https://www.thermofisher.com/blog/materials/how-in-line-monitoring-with-raman-spectroscopy-can-make-a-difference-in-polymer-extrusion-processes/> (дата звернення: 31.10.2025).
5. Marquez J. Predicting the processability of polymers in a twin-screw extruder / J. Marquez, Y. Quan, X. Zhu, H. Sue, Q. Wang // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2024. Vol. 63, no. 22. Article 9823–9832. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c01039>.
6. Oldemeier J. Analysis of the dispersive and distributive mixing effect of screw elements on the co-rotating twin-screw extruder with particle tracking / J. Oldemeier, V. Schöppner // Polymers. – 2024. Vol. 16, no. 21. Article 2952. <https://doi.org/10.3390/polym16212952>.
7. Yu H. Residence time distribution in an asymmetrical twin-screw extruder / H. Yu, Z. Zhao, B. Xu, G. Hu, C. Lemaitre, Y. Feng // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2023. – Vol. 62, no. 43. Article 17997–18008. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c02065>.
8. Node-RED documentation [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://nodered.org/docs/> (дата звернення: 31.10.2025).
9. Abdurrahman E. E. M. Digital twin applications in the food industry: a review / E. E. M. Abdurrahman, G. Ferrari // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2025. Vol. 9. Article 1538375. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1538375>.
10. Ali I. M. Effects of extrusion process conditions on nutritional, anti-nutritional, physical, functional, and sensory properties of extruded snack: a review / I. M. Ali, S. F. Forsido, C. G. Kuyu, E. H. Ahmed, K. N. Andersa, K. T. Chane, T.K. Regasa // Food Science & Nutrition. 2024. Vol. 12, no. 11. Article 8755–8761. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4472>.

**Smolii O., Mykytyshyn A.**

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

#### IOT MONITORING OF THE EXTRUSION PROCESS DURING SNACK PRODUCTION ON A TWIN SCREW EXTRUDER

*The article presents an in-depth investigation of an Internet of Things (IoT) architecture designed to enable advanced, high-resolution monitoring of the snack extrusion process on a twin-screw extruder. The proposed solution integrates the complete data lifecycle: the acquisition of process signals from sensors and inverters, preprocessing and normalization by a Programmable Logic Controller (PLC), real-time transmission through the MQTT protocol, and structured long-term storage in a Database Management System (DBMS). This approach ensures reliable data continuity and supports both operational visualization and the development of advanced analytical tools for process optimization and quality assurance.*

*A comprehensive set of key technological indicators has been defined, reflecting the critical behavior of the extrusion system. These include multi-zone temperature profiles, pressure dynamics in the die zone, motor current and rotational frequency, precise dosing of raw materials, and cumulative*

*energy consumption. Continuous monitoring of these parameters provides the foundation for stabilizing the process, detecting anomalies at an early stage, and improving reproducibility of product characteristics. A systematic review of scientific literature and industrial case studies published in the last three years confirms the increasing adoption of Industry 4.0 technologies within food manufacturing. Notably, the integration of lightweight MQTT-based data pipelines, the deployment of predictive maintenance strategies for electric drive systems, and the initial stages of Process Analytical Technology (PAT) implementation create the prerequisites for building a Digital Twin of the extrusion line.*

*Based on the conducted research, the article formulates detailed recommendations for constructing a mathematical process model, defining an economically justified but sufficiently informative sensor set, and designing an optimal data structure capable of supporting long-term industrial operation. A step-by-step roadmap is proposed, guiding enterprises from fundamental monitoring tasks toward the implementation of predictive analytics, anomaly detection algorithms, and eventually, the deployment of a full-scale Digital Twin. The literature review highlights a noticeable gap in practical, data-driven studies focused specifically on the optimization and monitoring of twin-screw snack extrusion systems. This gap underscores both the originality and the practical relevance of the presented work, as well as its potential to contribute to further research in data-centric food process control and digital transformation.*

**Keywords:** *IoT; extrusion; MQTT; Node-RED; SQL; Industry 4.0.*

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
17.03.2026 р.

Дата прийняття статті  
до друку  
28.04.2026 р.

Дата  
оприлюднення  
30.05.2026 р.