

Сукало М.Л.

Київський національний університет технологій та дизайну

Захаров К.О.

Київський національний університет технологій та дизайну

Гуйда О.Г.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ШВЕЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

У сучасних умовах цифровізації легкої промисловості та переходу до стандартів Індустрії 4.0, ключовими факторами конкурентоспроможності швейного виробництва стають не лише швидкість випуску продукції, але й безвідмовність технологічного парку. Традиційні підходи до технічного обслуговування виробничого обладнання в наш час виявляються недостатньо гнучкими та економічно ефективними. Це зумовлено двома факторами: нераціональною заміною компонентів, які ще мають значний залишковий ресурс, та високим ризиком непередбачуваних аварійних відмов у випадках прискореної деградації обладнання. Отже, звідси витікає гостра необхідність у створенні автоматизованих систем діагностики, здатних моніторити стан обладнання в режимі реального часу.

Метою даної роботи є розробка та імплементація комплексної системи автоматизованої діагностики швейного обладнання на базі технології Інтернету речей (IoT), що дозволяє реалізувати стратегію прогнозного обслуговування (Predictive Maintenance, PdM). В рамках дослідження спроектовано архітектуру системи, яка охоплює парк із 12 промислових швейних машин, об'єднаних у єдину інформаційну мережу.

Ключовим елементом методології є мультисенсорний моніторинг фізичних параметрів: вібраційного навантаження, акустичного шуму та температурних режимів критичних вузлів. Програмна реалізація системи виконана у середовищі SCADA Zenon, що забезпечує збір, обробку та архівування даних. Для виявлення аномалій застосовано метод порогового аналізу (Threshold Analysis) середньоквадратичних значень (RMS) вібрації та шуму, а також поточних значень температури критичних вузлів, що дозволяє з високою точністю ідентифікувати початок деградації механічних компонентів до настання аварійної ситуації.

Особливу увагу приділено ергономіці людино-машинного інтерфейсу: візуалізація поточного стану цеху реалізована через інтерактивну мнемосхему з інтуїтивно зрозумілою колірною індикацією (зелений – норма, жовтий – попередження, червоний – тривога). Практична цінність роботи полягає у доведенні ефективності IoT-рішень для мінімізації часу простоїв.

Оцінка економічної ефективності демонструє, що впровадження автоматизованої IoT-системи дозволяє зменшити час аварійних простоїв на 35–45% та оптимізувати витрати на технічне обслуговування на 25–30%, завдяки точному плануванню ремонтних робіт та попередженню критичних поломок.

Ключові слова: Інтернет речей (IoT), автоматизована система діагностики, швейне промислове обладнання, SCADA Zenon, прогнозне обслуговування (PdM), RMS-аналіз, вібромоніторинг, температурний контроль.

Постановка проблеми. У сучасній текстильній промисловості високі вимоги до обсягів виробництва та якості продукції вимагають повної безперервності роботи основного обладнання. Будь-яка незапланована зупинка швейних машин, спричинена поломкою, призводить до прямих економіч-

них втрат: простій персоналу, порушення ланцюгів поставок, невиконання замовлень, погіршення репутації, втрата позицій на ринку та погіршення рівня конкурентоспроможності.

Ефективність виробництва безпосередньо залежить від стратегії технічного обслуговування

обладнання. Технічне обслуговування пройшло три основні етапи:

- Реактивне обслуговування (Breakdown Maintenance): Ремонт або заміна вузлів відбувається лише після повної відмови. Це призводить до максимальних непередбачуваних простоїв і високих вторинних збитків [2, с. 3].

- Планово-попереджувальний ремонт (ППР), виявляється недостатньо гнучкими. Він часто призводить до заміни компонентів, які ще мають ресурс, або, навпаки, не можуть запобігти раптовій поломці, якщо деградація механізму відбулася швидше запланованого терміну.

- Прогнозне обслуговування (PdM, Predictive Maintenance): Найбільш сучасний підхід, який використовує дані реального часу для оцінки фактичного стану обладнання та прогнозування залишкового терміну служби (RUL). Обслуговування призначається лише тоді, коли діагностичні ознаки вказують на неминучу відмову [3, с. 1-5].

Перехід до PdM дозволяє значно оптимізувати операційні витрати. Згідно з галузевими дослідженнями, впровадження систем PdM забезпечує скорочення непередбачених простоїв на 35–45% та зниження витрат на обслуговування на 25–30% [1, с. 52-57]. Зокрема, у текстильній промисловості, де швидкість і точність є критичними, PdM допомагає уникнути дефектів продукції, спричинених поступовою деградацією механізмів. Інвестиційна привабливість автоматизованої системи діагностики є високою, оскільки її вартість швидко компенсується уникненням значних щорічних втрат [2, с. 1-8].

Більшість існуючих рішень для прогнозного обслуговування (PdM) орієнтовані на великі промислові об'єкти з високою капіталізацією (нафтогазова галузь, енергетика, важке машинобудування). Такі системи вимагають дороговартісних промислових сенсорів, складної серверної інфраструктури та значних інвестицій, що робить їх економічно недоцільними для легкої промисловості, зокрема для малих та середніх швейних підприємств. Для невеликого цеху (наприклад, на 10–15 машин) вартість традиційної промислової системи діагностики може перевищувати вартість самого обладнання. Через це швейні виробництва часто змушені залишатися на етапі реактивного або планового обслуговування, що, як зазначено вище, призводить до неминучих втрат.

Звідси виникає невирішена науково-практична задача: розробка архітектури автоматизованої системи діагностики, яка б поєднувала ефективність промислових PdM-рішень з економічною

доступністю та простотою масштабування для невеликих виробничих кластерів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасної науково-технічної літератури свідчить про глобальну зміну парадигми в управлінні промисловими активами: перехід від реактивного та планового обслуговування до прогнозного обслуговування (Predictive Maintenance – PdM). Фундаментальні праці, такі як керівництво Міністерства енергетики США [1, с. 52] та дослідження R. K. Mobley [11, с. 1-6], визначають PdM як найбільш економічно ефективну стратегію, що базується на моніторингу фактичного стану обладнання, а не на статистичних припущеннях середнього наробітку на відмову.

Впровадження PdM у сучасне виробництво нерозривно пов'язане з розвитком технологій Інтернету речей (IoT) та Індустрії 4.0. У роботах А. Хан [2, с. 1-8] та Х. Лі [4, с. 1-10] доведено, що IoT-архітектура дозволяє створити масштабовану екосистему для збору даних з великої кількості обладнання в режимі реального часу, забезпечуючи перехід до «розумних фабрик». Дослідники В. Пен [9, с. 45] та Л. Радю [6, с. 213-216] виділяють вібраційний аналіз як основний метод діагностики обертового обладнання. У контексті швейних машин Л. Радю експериментально підтверджує, що зміна вібраційних характеристик корелює з дефектами основних механізмів (голководія, човникового пристрою). Сучасні дослідження фокусуються на використанні методів штучного інтелекту для аналізу сигналів. Ю. Чжао [5, с. 1] пропонує використовувати глибокі нейронні мережі для діагностики підшипників, а І. Дж. Брісті [3, с. 460] розглядає інтелектуальні системи виявлення несправностей для роторного обладнання. Роботи С. Кі [10, с. 97-98] та М. Й. Алі [8, с. 1152] підкреслюють важливість інтеграції діагностичних модулів у єдину систему управління, що дозволяє реалізувати віддалений моніторинг та автоматизацію прийняття рішень.

Постановка завдання. Метою даної статті є підвищення ефективності експлуатації швейного обладнання на малих та середніх підприємствах шляхом розробки економічно доступної автоматизованої системи моніторингу в середовищі SCADA Zenon. Система має забезпечувати інтуїтивно зрозумілу візуалізацію технічного стану в режимі реального часу, що дозволить мінімізувати аварійні простої без залучення вузькопрофільних фахівців з діагностики.

Виклад основного матеріалу. Технічна реалізація PdM ґрунтується на синергії технологій

Інтернету речей (IoT) та середовища SCADA Zenon. IoT-рішення забезпечують безперервний збір телеметрії безпосередньо зі швейних машин, тоді як SCADA Zenon виконує функцію централізованого інтерфейсу для візуалізації стану обладнання та оперативного управління тривогами в єдиній мережі моніторингу. Для діагностики швейних машин критично важливими є вузли, що зазнають інтенсивних динамічних навантажень: механізми приводу, голководій та човниковий пристрій [6, с. 213]. Поступова деградація цих елементів проявляється у зміні трьох ключових фізичних параметрів:

1. Вібрація: збільшення вібрації є прямим наслідком механічних дефектів – дисбалансу, неспіввісності або зносу підшипників [5, с. 1].

2. Шум: аналіз шуму ефективний для виявлення проблем у механізмах голководія. Підвищення рівня шуму також може бути ознакою зношення деталей [6, с. 217].

3. Температура: підвищення температури в підшипникових вузлах свідчить про збільшення тертя та є критичною ознакою наближення поломки

Розроблена система діагностики побудована на двохшаровій IoT-архітектурі, адаптованій для прямої інтеграції з програмним застосунком SCADA Zenon. Система охоплює 12 швейних машин, організованих у три ряди по чотири одиниці. Система включає мультисенсорну базу для кожної

з 12 машин з датчиками температури, шуму та вібрації, рис. 1.

Ефективна система моніторингу має не лише збирати ці дані, а й оперативно їх обробляти, представляючи результат у формі, зручній для швидкого прийняття рішень. Для цього рівень збору та передачі даних представлений апаратним контролером ESP32, який збирає дані з датчиків (для показників вібрації та шуму вираховує їх середньоквадратичні значення, адже це динамічні сигнали) і забезпечує їхню пряму передачу на центральний сервер Zenon. Приймаючи дані від усіх 12 мікроконтролерів ESP32, встановлених на кожній машині, та здійснюючи безпосередній пороговий аналіз згідно створеної бази правил, яка наведена нижче в таблиці 1, система за допомогою зміни кольору кожної швейної машини виводить її технічний стан (зелений – гарний стан, жовтий – середній стан, попередження, червоний – поганий стан).

У середовищі SCADA Zenon спроектовано систему змінних для реєстрації фізичних параметрів і режимів роботи обладнання. Це дозволяє виконувати безперервну діагностику. Перелік та характеристики змінних представлено у таблиці 2.

Для забезпечення стійкої роботи системи в Zenon були реалізовані такі функціональні елементи:

– Limit Function Blocks – формування попереджень при перевищенні допустимих порогів

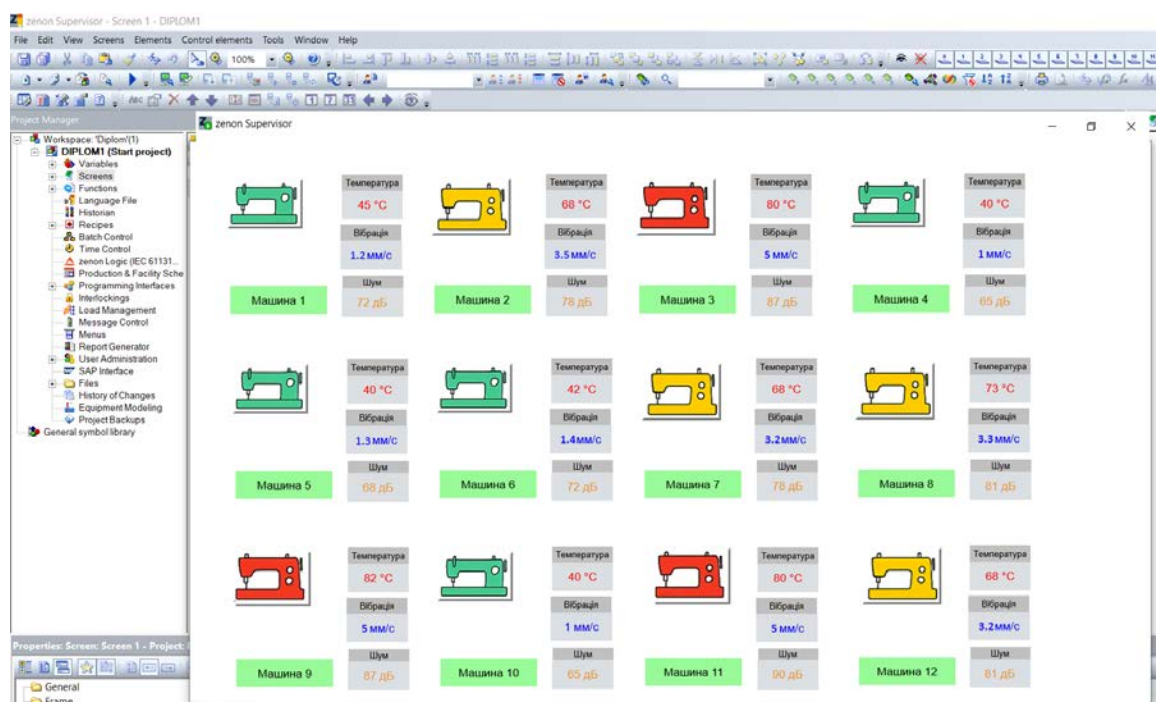


Рис. 1. Реалізація проекту у програмному засобі Scada Zenon

(наприклад, Temp_Sensor > 60 °C або Vib_Sensor > 2,5 мм/с);

– Script Actions – автоматичне перемикання стану Machine_state і зміна кольори швейної машини на схемі при отриманні сигналів про перевищення параметрів датчиків, або аварію;

– Logging Task – архівування усіх параметрів у базу даних Zenon Historian для подальшого аналізу у модулі Report Viewer.

Розроблена структура змінних є модульною. Кожен параметр може бути масштабований або розширений додатковими сенсорами без зміни основної архітектури SCADA-модуля. Такий підхід забезпечує високу гнучкість системи та придатність до промислової інтеграції в рамках концепції Індустрії 4.0.

Модель обміну даними між IoT-модулями та системою SCADA Zenon.

Система виконує передачу даних від датчиків до мікроконтролера він виконує оцифрування,

фільтрацію, нормалізацію даних, вираховування середньоквадратичних значень за необхідності, і передає інформацію до брокера повідомлень SCADA. Протокол MQTT забезпечує швидкий та надійний обмін даними при мінімальному навантаженні на канал зв'язку [8, с. 1154-1155]. Далі відбувається індикація технічного стану обладнання на мнемосхемі для оператора та архівування інформації для подальшого аналізу деградації вузлів. Функціональна схема даних має такий вигляд:

Датчики → Мікроконтролер ESP32 → Брокер повідомлень → SCADA Zenon Runtime → Архіви та аналітика

Обґрунтування Вибору Сенсорів для Системи Діагностики

Вибір діагностичних сенсорів для автоматизованої системи моніторингу швейного обладнання ґрунтується на вимогах до мультисенсорного підходу, необхідності масштабування (12 машин) та використанні порогового аналізу в SCADA Zenon.

Таблиця 1

База правил значень датчиків

Параметр	Зелений (норма)	Жовтий (попередження)	Червоний (тривога)
Температура	< 60 C	60 – 80 C	> 80 C
Вібрація (RMS)	0 – 2.5 мм/с	2.5 – 5.0 мм/с	> 5.0 мм/с
Шум (Рівень)	< 75 дБ	75 – 85 дБ	> 85 дБ

Таблиця 2

Наведені створенні змінні, їх типи та функціональне призначення

Назва змінної	Одиниця вимірювання	Опис функції
TEMP_SENSOR_1-12	°C	Відображає температуру електродвигуна або зони голководу. Значення формується на основі даних з термодатчика DS18B20, переданих через MQTT-брокер.
VIB_SENSOR_1-12	мм/с	Реєструє рівень вібрацій на корпусі швейного обладнання. Використовується для діагностики дисбалансу або початку зношування підшипників.
NOISE_SENSOR_1-12	дБ	Фіксує акустичний шум під час роботи машини. Значення корелює зі ступенем тертя рухомих елементів
MACHINE_STATE_1-12	Гарний, середій, поганий	індикатор загального стану швейної машини.

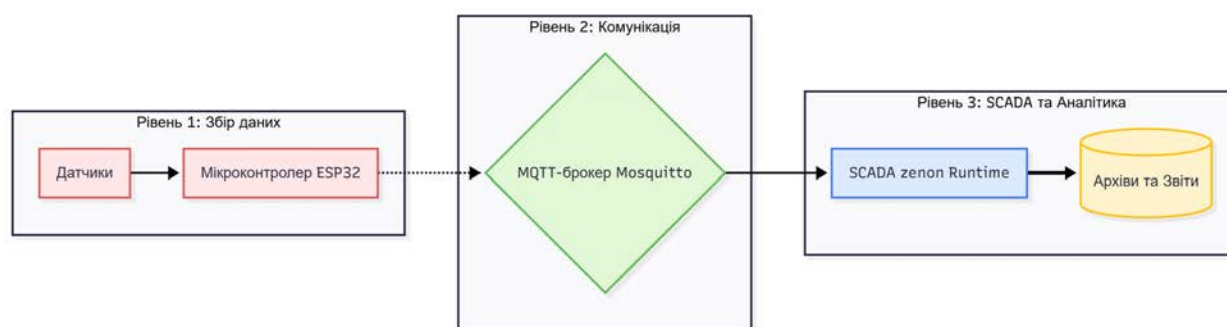


Рис. 2. Функціональна схема даних

Для забезпечення економічної ефективності та простоти інтеграції були обрані високоточні цифрові датчики IoT-класу.

1. Моніторинг Вібрації здійснюється за допомогою трьохвісного акселерометра ADXL345. Він підтримує сучасні протоколи цифрового інтерфейсу SPI/I2C, які виключають шум та помилки, типові для аналогово-цифрового перетворення на рівні мікроконтролера, забезпечуючи стабільну передачу даних до Zenon. Також він має необхідний частотний діапазон і може працювати з частотою дискретизації до 3200 Гц, яка є достатньою для виявлення основних ознак дисбалансу чи неспіввісності, які проявляються на відносно низьких частотах [9, с. 47].

Компактність та вартість: Мініатюрний розмір та низька вартість роблять цю модель оптимальною для масової інсталяції (12 вузлів), де критичним є бюджет проекту.

2. Для реєстрації рівня шуму (дБ), що є індикатором тертя, нестачі мастила або механічних ударів у механізмі голководія, обрано модель сенсора: MAX9814. Це мікрофонний підсилювач з підтримкою функції «автоматичного регулювання посилення» (AGC). Це важлива перевага, враховуючи те, що промислові цехи мають високий фоновий шум. Технологія AGC автоматично вирівнює рівень запису, дозволяючи сенсору ефективно виділяти аномальні піки шуму машини, а не лише загальний шум цеху. Також підтримує просту інтеграцію. Модуль видає стабільний аналоговий сигнал, який легко зчитується контролером і конвертується в значення децибел (дБ) для подальшого порогового контролю в Zenon.

3. Для моніторингу температурного режиму підшипникових вузлів та двигуна, що є ключовою ознакою зростання тертя, обрано модель цифрового датчика температури DS18B20. Він використовує

Таблиця 3

Приблизна вартість впровадження системи

Компонент	Призначення	Одиниця	Орієнтовна Ціна за Одиницю (USD)	Загальна Кількість	Загальна Вартість (USD)
ADXL345	Вібрація (Акселерометр)	шт.	2.5	12	30
MAX9814	Шум (Мікрофон з AGC)	шт.	3.5	12	42
DS18B20	Температура (Цифровий)	шт.	1	12	12
ESP32 Dev Module	IoT-Шлюз/Контролер (з WiFi)	шт.	4	12	48
Блоки живлення 5В	Живлення кожного вузла	шт.	3	12	36
Корпуси/Кабелі/Кріплення	Інсталяційні матеріали	компл.	5	12	60
Пайка/Складання	Робота інженера (12 вузлів)	люд./год.	10	12	120
Всього в сумі:					348.00 USD

Таблиця 4

Вартість програмного забезпечення та інтеграції

Позиція	Призначення	Орієнтовна Вартість (USD)
Ліцензія SCADA Zenon	Ліцензія Zenon Supervisor (мінімальна) або Runtime (для 12 тегів)	1 500 – 3 000
Розробка SCADA-інтерфейсу	Налаштування плану цеху, колірної логіки, зв'язку	500.00
Всього вартість ПЗ:		2 000 USD (Середня оцінка)

Таблиця 5

Загальна вартість впровадження

Стаття витрат	Вартість (USD)	Вартість (UAH)
1. Апаратне Забезпечення (12 вузлів)	348	14 616
2. Програмне Забезпечення та Інтеграція	2 000	84 000
РАЗОМ (Орієнтовна Вартість Впровадження)	2 348 USD	≈ 98 616 грн

протокол 1-Wire, що дозволяє підключити декілька датчиків (наприклад, 12 одиниць) до одного цифрового порту контролера. Це значно спрощує та здешевлює прокладку кабелів і апаратну частину системи збору даних, що є необхідним для масштабного проекту [10, с. 99]. Також забезпечує високу точність вимірювання, до $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, у робочому діапазоні до $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, що є більш ніж достатнім для виявлення критичного перегріву.

Приклад розрахунку економії після впровадження системи

Для розрахунку економічного ефекту, ми приймаємо середній річний непередбачуваний простій на одну одиницю швейного обладнання при реактивному обслуговуванні, як $D = 20$ год/рік. Ця величина є консервативною оцінкою, що знаходиться в межах типових показників простою (15–30 годин на рік), підтверджених галузевими дослідженнями та обговоренням витрат на реактивне обслуговування, представленим у другій главі джерела номер [11, с. 15-18]

- Кількість машин: $N = 12$ (шт.)
- Середній щорічний простій на машину при реактивному обслуговуванні: $D = 20$ год/рік
- Очікуване скорочення простоїв після впровадження PdM: $r_D = 40\% = 0.40$
- Прийmemo, що середня вартість однієї години простою швейної машини (включаючи втрату прибутку) становить $\Pi_{\text{год}} = 4000$ грн/год
- Річні потенційні втрати без PdM:
- Втрати = Кількість машин $\times D \times \Pi_{\text{год}} = 12 \times 20 \times 4000 = 960\,000$ грн/рік.

Згідно з дослідженнями, PdM здатне запобігти 40% аварійних простоїв.

Річна економія = $960\,000 \text{ грн} \times 0.40 = 384\,000 \text{ грн/рік}$

Проведений детальний кошторис показав, що орієнтовна вартість впровадження (включаючи сенсори ADXL345, MAX9814, DS18B20 та ліцензування Zenon) становить приблизно 98 616 грн.

$\text{ROI} = \text{Вартість впровадження} / \text{Річна економія} = 98\,616 / 384\,000 \approx 0.26 \text{ року} \approx 3.1 \text{ місяці.}$

Отриманий результат підтверджує, що інвестиції у систему діагностики мають надзвичайно високу економічну доцільність та короткий термін окупності (менше чотирьох місяців)

Висновки. У ході виконання роботи була розроблена економічно доступна автоматизована система діагностики швейного обладнання на основі технології Інтернету речей та платформи SCADA Zenon. Поставлена мета щодо підвищення ефективності експлуатації обладнання на малих та середніх підприємствах була досягнута. Для цього були проаналізовані існуючі наукові матеріали в цій сфері, створено прикладний проєкт у SCADA Zenon та реалізовано ефективну візуалізацію. Розроблено інтуїтивно зрозумілий людино-машинний інтерфейс (HMI) з інтерактивним планом цеху. Використання колірної індикації (зелений/жовтий/червоний) дозволяє персоналу з невисокою кваліфікацією миттєво оцінювати ситуаційну обізнаність, що є ключовим для невеликих виробництв. Обґрунтовано вибір апаратної бази (доступних IoT-сенсорів) та її економічну доцільність, що дозволило мінімізувати вартість впровадження системи (приблизно 98 616 грн для 12 машин) та значно знизити час простою обладнання, приблизно на 40%.

Список літератури:

1. Sullivan G. P., Pugh R., Melendez A. P., Hunt W. D. Operations & Maintenance Best Practices: A Guide to Achieving Operational Efficiency. Release 3.0. U.S. Department of Energy, Federal Energy Management Program, 2010. 52 p. URL: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/04/f74/omguide_complete_w-co-disclaimer.pdf
2. Khan A., et al. The Role of IoT in Enhancing Predictive Maintenance in Manufacturing Industries. *American Journal of Interdisciplinary Studies*, 2023, vol. 6, pp. 1–8. URL: <https://ajisresearch.com/index.php/ajis/article/view/1>
3. Israt Jahan Bristy, Marzia Tabassum, Md Iftakhayrul Islam, Md. Nisharul Hasan. IoT-Driven Predictive Maintenance Dashboards in Industrial Operations. *Saudi Journal of Engineering and Technology*, pp. 2–5. URL: https://saudi-journals.com/media/articles/SJEAT_109_457-466.pdf
4. Li X., et al. An IoT-Based Intelligent Predictive Maintenance System for Rotating Machinery. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 91526–91539. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8740857>
5. Zhao Y., et al. Fault Diagnosis of Rolling Bearings Using a Deep Convolutional Neural Network. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 16, article 8081, pp. 1–8. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/16/8081>
6. Radu L., et al. Technical condition monitoring of sewing machines by using vibration analysis. *Revista Industria Textilă*, 2016, vol. 67, no. 4, pp. 213–219. URL: https://www.revistaindustriatextila.ro/images/2016/Textila_nr_4_2016.pdf#page=32
7. ADXL345 Accelerometer. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl345.pdf> (дата звернення: 12.10.2025).

8. Ali M. Y., et al. Development of an IoT-based system for remote monitoring and diagnosis of industrial machines. *Alexandria Engineering Journal*, 2023, vol. 62, no. 6, pp. 1152–1163. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016823011572>
9. Peng W. Vibration Condition Monitoring of Rolling Element Bearings: A Review. *SAGE Journals*, 2004, vol. 20, no. 5, pp. 45–56. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1475921704047500>
10. Kim S. Predictive Maintenance System based on IoT and Machine Learning for Smart Factory. *STUME Journals*, 2024, vol. 4, no. 3, pp. 97–105. URL: <https://stumejournals.com/journals/i4/2024/3/97>
11. Mobley R. K. An Introduction to Predictive Maintenance. Butterworth-Heinemann, 2002, pp. 15–25. URL: https://www.google.com.ua/books/edition/An_Introduction_to_Predictive_Maintenanc/SjqXzxpAzSQC?hl=ru&gbpv=1

Sukalo M.L., Zakharov K.O., Guida O.G. AUTOMATED DIAGNOSTIC SYSTEM FOR SEWING EQUIPMENT USING INTERNET OF THINGS TECHNOLOGY

In the modern landscape of light industry digitalization and the transition to Industry 4.0 standards, not only production speed but also the reliability of the technological fleet have become critical factors for competitiveness. Traditional maintenance approaches, based on scheduled preventive repairs or reactive responses to breakdowns, prove to be economically inefficient due to unpredictable downtime and a decline in seam quality caused by mechanism wear. This creates an urgent scientific and practical need for the development of automated diagnostic systems capable of monitoring equipment status in real-time.

The aim of this paper is the development and implementation of a comprehensive automated diagnostic system for sewing equipment based on Internet of Things (IoT) technology, facilitating a Predictive Maintenance (PdM) strategy. The study designs a system architecture encompassing a fleet of 12 industrial sewing machines integrated into a unified information network.

A key methodological element is the multi-sensor monitoring of physical parameters: vibration load, acoustic noise, and temperature regimes of critical components. The software implementation is executed within the SCADA Zenon environment, which ensures data collection, processing, and archiving. To detect anomalies, a Threshold Analysis method of Root Mean Square (RMS) values for vibration and noise is applied, allowing for high-precision identification of mechanical degradation onset prior to emergency failure.

Particular attention is paid to the ergonomics of the Human-Machine Interface (HMI): visualization of the current shop floor status is realized through an interactive mnemonic scheme with intuitive color coding (green – normal, yellow – warning, red – alarm).

The economic efficiency evaluation demonstrates that implementing the developed IoT system allows for reducing emergency downtime by 35–45% and optimizing maintenance costs by 25–30%, owing to precise repair scheduling and prevention of critical failures. [1, c.52-57]

Key words: Internet of Things (IoT), automated diagnostic system, industrial sewing equipment, SCADA Zenon., Predictive Maintenance (PdM), RMS analysis, vibration monitoring, temperature control.

Дата надходження статті: 12.11.2025

Дата прийняття статті: 01.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025