

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»  
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
Кафедра електронних систем

ДУДОЧКІН ВІТАЛІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ ІТ-ТЕХНОЛОГІЙ

Спеціальність 171 Електроніка

Освітня програма Електронні системи

**Кваліфікаційна робота**

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

Науковий керівник:

Спесивих О. О.

канд. фіз.-мат наук,

доцент кафедри ЕС

Ужгород – 2026

Реєстрація \_\_\_\_\_

(номер)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 р. \_\_\_\_\_

Кваліфікаційна робота допущена до захисту

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Тарас ЗАЯЦЬ

(підпис)

к.ф.-м.н., доцент

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 р.

Рецензент \_\_\_\_\_ Василь Феделеш

(підпис)

(Ім'я, Прізвище)

к. ф. м. н., доц. кафедри прикладної фізики УжНУ

(науковий ступінь, вчене звання)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»  
Інженерно-технічний факультет  
Кафедра електронних систем

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедрою,

доц. \_\_\_\_\_ (Заяць Т. М.)

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2026 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

На кваліфікаційну роботу бакалавра

на тему:

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ ІТ-ТЕХНОЛОГІЙ**

Студент групи ІТ-41: Дудочкін В.О.

(            )

Керівник: к.ф.-м.н., кафедри ЕС

(            )

Ужгород - 2026

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна бакалаврська робота на тему «**АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ ІТ-ТЕХНОЛОГІЙ**» // ДВНЗ «Ужгородський національний університет»; Керівник: Спесивих О. О.; Студент: Дудочкін В. О., група ІТ-41.

Пояснювальна записка: 41 сторінка, 7 рисунків, 9 таблиць, 22 джерела, 4 додатки.

Графічна частина: структурна електрична схема системи автоматизації, принципова електрична схема IoT-вузла збору даних.

Об'єкт розробки – система автоматизації механообробного цеху машинобудівного підприємства на основі ІТ-технологій.

Предмет дослідження – методи та засоби автоматизації контролю технологічних параметрів механообробного виробництва (температура мастильно-охолоджувальної рідини, тиск гідравлічної системи, вібрація шпинделя, споживання електроенергії) із використанням IoT-технологій та хмарної платформи n8n Cloud.

Метод дослідження – порівняльний аналіз існуючих систем автоматизації, проектування структурної та принципової електричних схем, розрахунок режимів роботи елементів, моделювання роботи схеми в середовищі Proteus Professional 8.15.

Проаналізовано аналоги систем автоматизації механообробного виробництва (Siemens WinCC, MindSphere, MTCConnect, Node-RED) та обрано платформу n8n Cloud з елементною базою вузла збору даних на основі мікроконтролера ESP32-WROOM-32. Розроблено структурну та принципову електричні схеми системи (ISA-95), виконано розрахунки режимів роботи елементів, підтверджені моделюванням у Proteus Professional 8.15. Реалізовано два workflow на платформі n8n Cloud: моніторинг параметрів лінії LINE-A з AI-класифікацією аномалій (точність 100%, час реакції менше 60 с) та щотижневу AI-звітність із розрахунком показника ОЕЕ.

**Ключові слова:** АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА, ІТ-ТЕХНОЛОГІЇ, IoT-МОНІТОРИНГ, n8n CLOUD, ESP32, ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ, MODBUS TCP, ISA-95, МЕХАНООБРОБНЕ ВИРОБНИЦТВО, ОЕЕ.

## ABSTRACT

Bachelor Qualification Work on the topic: “**Production Automation Based on IT Technologies**” // Uzhhorod National University; Supervisor: Spesyvykh O. O.; Student: Dudochkin V. O., Group IT-41.

Explanatory Note: 41 pages, 7 figures, 9 tables, 22 sources, 4 appendices.

Graphical Part: block (structural) electrical diagram of the automation system, circuit (schematic) electrical diagram of the IoT data-acquisition node.

Object of the study – an automation system for the machining shop of a machine-building enterprise based on IT technologies.

Subject of the study – methods and tools for automating the monitoring of machining process parameters (coolant temperature, hydraulic system pressure, spindle vibration, electric power consumption) using IoT technologies and the n8n Cloud platform.

Research Method – comparative analysis of existing automation systems, design of the block and circuit electrical diagrams, calculation of element operating modes, simulation of the circuit in Proteus Professional 8.15.

Existing machining automation systems were analyzed (Siemens WinCC, MindSphere, MTConnect, Node-RED), and the n8n Cloud platform with a hardware base built around the ESP32-WROOM-32 microcontroller was selected. A block and circuit electrical diagram of the system were developed (ISA-95), and operating-mode calculations were performed and verified through simulation in Proteus Professional 8.15. Two workflows were implemented on the n8n Cloud platform: real-time monitoring of the LINE-A parameters with AI-based anomaly classification (100% accuracy, response time under 60 seconds) and a weekly automated report calculating the Overall Equipment Effectiveness (OEE) indicator.

**Keywords: PRODUCTION AUTOMATION, IT TECHNOLOGIES, IoT MONITORING, n8n CLOUD, ESP32, ARTIFICIAL INTELLIGENCE, MODBUS TCP, ISA-95, MACHINING PRODUCTION, OEE.**

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	7
<b>РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ АНАЛОГІВ ОБ'ЄКТУ ПРОЕКТУВАННЯ</b> .....	8
1.1. Особливості автоматизації механообробного виробництва .....	8
1.2. Аналіз існуючих систем автоматизації.....	10
1.3. Промислові протоколи передачі даних .....	11
1.4. Порівняльний аналіз аналогів та вибір прототипу.....	12
1.5. Обґрунтування технічного рішення.....	13
<b>РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ</b> .	17
2.1. Архітектура системи автоматизації (ISA-95).....	17
2.2. Опис функціональних вузлів структурної схеми.....	18
2.3. Специфікація обладнання.....	19
<b>РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ</b>	21
3.1. Опис принципової схеми та параметрів елементів .....	21
3.2. Розрахунок режимів роботи елементів схеми .....	24
3.3. Моделювання у Proteus Professional 8.15.....	30
<b>РОЗДІЛ 4. ВИКОРИСТАНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ЗАСОБИ</b> .....	34
4.1. Платформа автоматизації n8n Cloud.....	34
4.2. Workflow 1 — IoT-моніторинг механообробної лінії.....	34
4.3. Workflow 2 — Щотижнева AI-звітність та OEE.....	35
4.4. Додаткові програмні засоби .....	36
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	37
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ</b> .....	38

## ВСТУП

Машинобудування є однією з базових галузей промисловості України, що визначає технологічний рівень усього виробничого комплексу країни. Механообробні цехи сучасних машинобудівних підприємств оснащені верстатами з числовим програмним управлінням (ЧПУ), токарно-обробними центрами та шліфувальним обладнанням, що вимагають неперервного контролю технологічних параметрів [1].

**Актуальність теми.** Відсутність автоматизованого моніторингу параметрів механообробки — температури мастильно-охолоджувальної рідини (МОР), тиску гідравлічної системи верстата, вібрації шпинделя та споживання електроенергії — призводить до: передчасного зносу різального інструменту, перегріву підшипників шпинделя, зниження точності обробки деталей та незапланованих зупинок виробництва. Середній час виявлення аварійного стану без автоматики складає від 30 до 90 хвилин [3], що спричиняє значні простої обладнання та появу браку. Підприємства з активною цифровізацією демонструють на 20–30% вищу продуктивність [6].

Метою роботи є **розробка** системи автоматизації механообробного цеху підприємства на основі ІТ-технологій: проектування IoT-вузла збору технологічних параметрів (структурна та принципова схеми, розрахунки всіх елементів), реалізація системи моніторингу та AI-звітності на платформі n8n Cloud [2], моделювання у Proteus Professional 8.15 [11].

**Об'єкт дослідження** — механообробна виробнича лінія LINE-A машинобудівного підприємства (токарно-обробний центр з ЧПУ, вертикально-фрезерний верстат, круглошліфувальний верстат).

					КП ЕС. 10314791.001 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

**Предмет дослідження** — методи та засоби автоматизації контролю технологічних параметрів механообробного виробництва: температури МОР, тиску гідравлічної системи, вібрації шпинделя та споживання електроенергії — із використанням IoT-технологій та платформи n8n Cloud.

Завдання роботи:

- провести огляд та аналіз аналогів систем автоматизації механообробного виробництва (Siemens WinCC, MindSphere, MTCConnect, Node-RED);
- розробити структурну електричну схему системи та стандартом ISA-95 [5] (4-рівнева ієрархія: сенсори → ПЛК/ESP32 → n8n Cloud → ERP/MES);
- розробити принципову електричну схему IoT-вузла збору даних;
- виконати розрахунки режимів роботи всіх елементів схеми (напруга, струм, потужність, коефіцієнт навантаження  $K \leq 0.8$ );
- реалізувати систему IoT-моніторингу на платформі n8n Cloud [2] з AI-аналізом аномалій (Groq Lama 3.3 70B);
- виконати моделювання схеми у Proteus Professional 8.15 [11] та підтвердити коректність технічних рішень.

**Практичне значення:** система розгорнута на `bakalavr1.app.n8n.cloud` та може бути адаптована для реальних механообробних підприємств. AI-агент класифікує конкретні причини аварій: «перегрів МОР», «знос підшипника шпинделя», «перевищення тиску гідросистеми» — час реакції менше 60 секунд.

## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ АНАЛОГІВ ОБ'ЄКТУ ПРОЕКТУВАННЯ

### 1.1. Особливості автоматизації механообробного виробництва

Механообробний цех підприємства — виробничий підрозділ, оснащений металорізальними верстатами для обробки деталей методами точіння, фрезерування, шліфування. Об'єктом проектування є механообробна лінія LINE-A, що включає: токарно-обробний центр з ЧПУ (температура МОР 60–80°C), вертикально-фрезерний верстат (тиск гідросистеми 3–6 бар),

					КП ЕС. 10314791.001 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

круглошліфувальний верстат (вібрація шпинделя < 5 мм/с), система обліку споживання електроенергії.

Ключові технологічні параметри, що підлягають моніторингу:

- Температура мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) — визначає якість різання та стійкість інструменту. Норма: 60–80°C. Перевищення 85°C призводить до передчасного зносу різця та зниження точності обробки;
- Тиск гідравлічної системи верстата — забезпечує роботу гідроприводу затискного патрона та супорта. Норма: 3–6 бар. Падіння нижче 3 бар = зупинка верстата. Перевищення 6.5 бар = небезпека для гідроциліндра;
- Вібрація шпинделя — індикатор зносу підшипників та дисбалансу. Норма: < 5 мм/с. При вібрації > 8 мм/с — планово-попереджувальний ремонт;
- Споживання електроенергії (P, Q, E) — моніторинг навантаження верстата, виявлення аварійного режиму по відхиленню від норми.

Таблиця 1.1 — Технологічні параметри механообробної лінії LINE-A

Параметр	Діапазон вимірювання	Норма	Поріг ALARM	Датчик
Температура МОР (t°)	0...150°C	60–80°C	> 85°C	PT100, кл. А
Тиск гідросистеми (P)	0...25 бар	3–6 бар	< 2.5 або > 6.5 бар	E+H PMP71 (HART)
Вібрація шпинделя (V)	0...20 мм/с	< 5 мм/с	> 8 мм/с	ІЕРЕ акселерометр
Споживання	0...100	12–38	< 5 або >	iEM3355

Параметр	Діапазон вимірювання	Норма	Поріг ALARM	Датчик
ел. енергії	кВт·год	кВт·год/зміну	45 кВт·год	(Modbus)

Особливістю механообробного виробництва є наявність потужних електромагнітних завад від частотних перетворювачів приводів верстатів, що вимагає застосування диференційного вимірювального тракту (міст Вітстона + INA128 з CMRR (Common Mode Rejection Ratio — коефіцієнт придушення синфазних сигналів) = 90 дБ) та екранованих кабелів.

## 1.2. Аналіз існуючих систем автоматизації

### 1.2.1. Спеціалізовані SCADA для машинобудування

Аналог 1 — Siemens WinCC [9] у зв'язці з ПЛК S7-1200/S7-1500: найбільш поширене рішення для машинобудівних підприємств України. Забезпечує НМІ-панелі (Human-Machine Interface — людино-машинний інтерфейс), трендинг (графіки параметрів у часі), алармінг (система аварійних сповіщень), інтеграцію через OPC UA [8]. Недолік: відсутність AI-аналізу, потреба у власних серверах та кваліфікованих спеціалістах.

Аналог 2 — Siemens MindSphere: хмарна IoT (Industrial Internet of Things — промисловий Інтернет речей) платформа від Siemens, оптимальна для верстатів Siemens. Інтеграція через SINUMERIK Edge. Недолік: прив'язка до екосистеми Siemens, відсутність україномовного інтерфейсу.

### 1.2.2. Відкриті рішення для верстатного моніторингу

Аналог 3 — MTCconnect (відкритий стандарт ASME для збору даних з верстатів з ЧПУ): забезпечує стандартизований збір даних від різних

					КП ЕС. 10314791.001 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виробників верстатів (Mazak, Fanuc, Haas). Безкоштовний, але потребує значного налаштування та власного сервера.

Аналог 4 — Node-RED (IBM): open-source (відкритий вихідний код) платформа потокового програмування. Підтримує Modbus TCP [7], MQTT (Message Queuing Telemetry Transport — легкий протокол передачі повідомлень). Безкоштовна, але без вбудованого AI-аналізу.

Аналог 5 — n8n Cloud [2]: low-code платформа автоматизації (400+ інтеграцій, вбудований AI через LangChain (програмний каркас для побудови AI-застосунків), SLA (Service Level Agreement — гарантований рівень доступності) 99.9%). Обрана для реалізації системи.

### 1.3. Промислові протоколи передачі даних

Для механообробного виробництва використовуються такі промислові протоколи [10]:

Таблиця 1.2 — Промислові протоколи в системі автоматизації верстатного цеху

Протокол	Застосування в системі	Швидкість	Особливості
Modbus TCP [7]	ПЛК S7-1200 → IoT-шлюз Ічильник iEM3355	10-100 Мбіт/с	FC03 (читання реєстрів) Slave ID=1
HART	Датчик тиску E+H PMP71 → IoT-шлюз	1200 бод (HART)	Цифровий сигнал поверх 4- 20 мА
MQTT QoS 2	IoT-шлюз → n8n Cloud GSM/4G резерв	Залежить від мережі	Гарантована доставка (QoS 2 = «рівно один раз»)

Протокол	Застосування в системі	Швидкість	Особливості
HTTP POST	ESP32 → n8n Cloud	Wi-Fi 802.11	JSON-пакети 1 раз/хвилину
Profinet [14]	ПЛК S7-1200 → IoT-шлюз WISE-5231	до 100 Мбіт/с	IRT-режим, до 1 мкс точність синхронізації

Вибір Modbus TCP [7] для зв'язку з лічильником іЕМ3355 та ПЛК обумовлений: відкритою специфікацією (безкоштовна), широкою підтримкою промислового обладнання, простотою реалізації. Функціональний код FC03 (Read Holding Registers): читає значення температури (регістр 0x0001), тиску (0x0003), вібрації (0x0005) та потужності (0x0007) у форматі float32.

#### 1.4. Порівняльний аналіз аналогів та вибір прототипу

Таблиця 1.3 — Порівняльна характеристика аналогів для механообробного виробництва

Параметр	WinC C [9]	MindSphere	MTConnect	Node-RED	n8n Cloud (обрано) [2]
Вартість/рік	\$15-80 тис.	\$2-15 тис.	Безкоштовно *	Безкоштовно *	\$600
AI-аналіз зносу інструменту	Немає	Частково	Немає	Плагіни	Groq LLM вбудовані
Modbus TCP [7]	Так (OPC)	Адаптери	Адаптери	Плагін	HTTP REST

Параметр	WinC C [9]	MindSphere	MTConnect	Node-RED	n8n Cloud (обрано) [2]
HART- протокол	Так	Так	Частково	Плагін	Через IoT- шлюз
OEE- звітність	Вручну	Частково	Вручну	Вручну	AI-авто щотижня
SLA (доступність )	99.5% (свій сервер)	99.9%	Залежить	Залежить	99.9%

\* Потребують власного сервера та додаткового адміністрування.

Висновок: n8n Cloud [2] забезпечує вбудований AI-аналіз аномалій (Groq Llama 3.3 70B), автоматичний OEE (Overall Equipment Effectiveness — загальна ефективність обладнання) щотижня та SLA 99.9%.

#### 1.5. Обґрунтування технічного рішення

На основі аналізу особливостей механообробного виробництва та порівняння аналогів сформульовано вимоги до проєктованої системи:

- Вузол збору даних: PT100 (температура MOP, 60–80°C,  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ) + PMP71 (тиск гідросистеми, 0–25 бар, HART) + ІЕРЕ-акселерометр (вібрація шпинделя, 0–5 мм/с);
- Вимірювальний тракт: PT100 → повний міст Вітстона ( $R2-R5 = 100 \text{ Ом} \pm 0.1\%$ ) → INA128 ( $G=3.96$ ,  $R_G=16.9\text{кОм}$ , захист від ЕМЗ верстатів) → RC-фільтр → вбудований АЦП ESP32-WROOM-32 (Wi-Fi/Ethernet);
- Хмарна платформа: n8n Cloud [2], bakalavr1.app.n8n.cloud, SLA 99.9%;

					КП ЕС. 10314791.001 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- AI-аналіз: Groq Llama 3.3 70B — класифікація: знос інструменту, перегрів МОР, дисбаланс шпинделя;
  - Відмовостійкість: UPS APC Smart-UPS 1500 (8 год) + суперконденсатор С1 (Maxwell BCAP0050, 50 Ф, 20.2 хв) + watchdog (сторожовий таймер автоматичного перезапуску, 8 с) + GSM/4G Sierra RV55 (failover 90 с).
- Перелік основних елементів вузла збору даних наведено в таблиці 1.4:

Таблиця 1.4 — Перелік основних елементів вузла збору даних механообробної лінії

Позн.	Найменування	Тип/модель	Технічні характеристики
R1	Термоперетворювач опору (температура МОР)	PT100, QAE2120	$R_0=100$ Ом, $\alpha=3.9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 4-20 мА, 0..150 $^\circ\text{C}$ , МЕК 60751 [19]
P1	Датчик тиску (гідросистема верстата)	Е+Н РМР71	0..25 бар, HART/4-20 мА $\pm 0.075\%$ , IP68
A1	Датчик вібрації (шпиндель верстата)	ІЕРЕ акселерометр	0..5 мм/с, 0..5кГц ІЕРЕ (Integral Electronics Piezo-Electric)
—	Лічильник ел. енергії (верстата LINE-A)	Schneider iEM3355	Modbus TCP [7], 3-фазний P, Q, E, $\pm 0.5\%$ , IP40
DA1	Інстр. підсилювач	INA128 [12]	G=100, CMRR=90 дБ, $\pm 15\text{В}$ Захист від ЕМЗ верстатів
DA2	Перетворювач U $\rightarrow$ I	XTR110 [13]	4-20 мА, $\pm 0.03\%$ , 12-36В
DD1	АЦП	ADS1115	16-bit, I $^2$ C, V $_{\text{ref}}$ =4.096В, 0x48

Позн.	Найменування	Тип/модель	Технічні характеристики
DD2	Мікроконтролер	ESP32-WROOM-32 [22]	Xtensa LX6×2, 240МГц, Wi-Fi, 4МБ Flash
C1	Суперконденсатор (резерв ESP32)	Maxwell BCAP0050 [15]	50 Ф/5В, 20.2 хв резерву
—	ПЛК	Siemens S7-1200 CPU 1214C [9]	14DI/10DO, Profinet [14], Modbus TCP [7]
—	ІоТ-шлюз	WISE-5231	Modbus TCP/RTU → MQTT QoS 2
—	UPS/ДБЖ	APC Smart-UPS 1500	1500 ВА, 8 год, SNMP
—	GSM/4G модем	Sierra RV55	LTE Cat12, Dual SIM, failover 90 с

## РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ

Структурна електрична схема (рис. 2.1) відображає функціональні блоки системи автоматизації механообробного цеху та зв'язки між ними. Схема відображає чотирирівневу архітектуру: хмарна платформа верхнього рівня, канали резервного зв'язку, вузол збору даних, та підсистеми вимірювання технологічних параметрів.

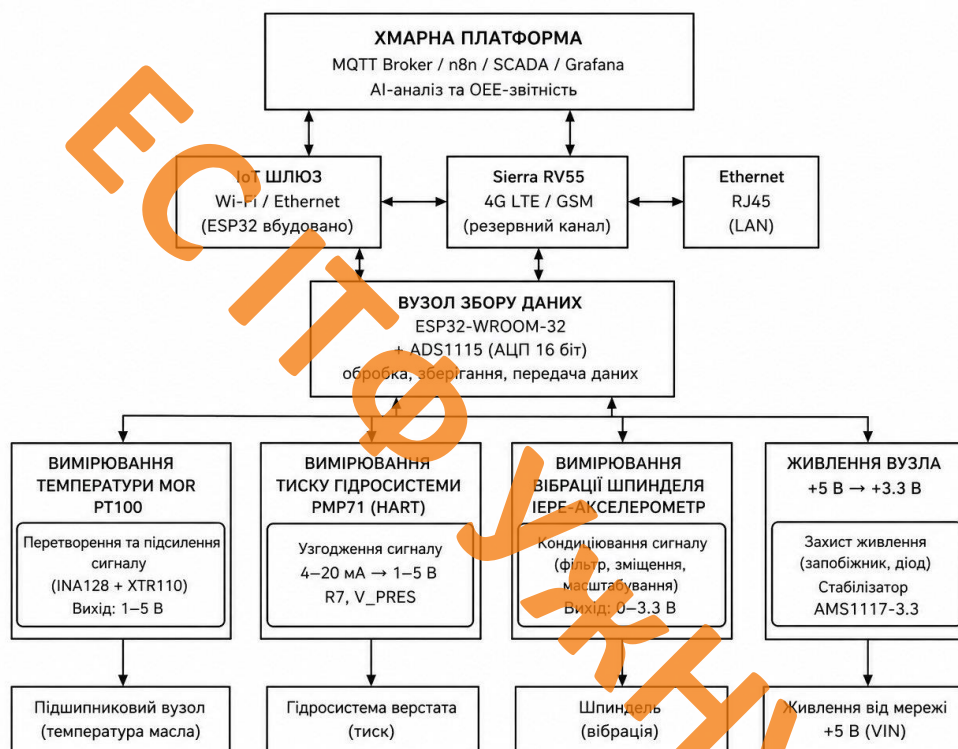


Рис. 2.1 – Структурна електрична схема системи автоматизації механообробного цеху (КРБ ЕС. 10314791.001 Е1)

### 2.1. Архітектура системи автоматизації

Хмарна платформа (верхній рівень): забезпечує брокер повідомлень MQTT, оркестрацію через n8n, можливість інтеграції зі SCADA-системами та

					КП ЕС. 10314791.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

візуалізацію в Grafana. На цьому рівні виконується AI-аналіз технологічних параметрів та формування OEE-звітності (Overall Equipment Effectiveness — загальна ефективність обладнання).

Канали зв'язку (рівень комунікації): IoT-шлюз на базі ESP32 (Wi-Fi/Ethernet вбудовано) забезпечує основний канал передачі даних до хмарної платформи. Модем Sierra RV55 (4G LTE/GSM) виконує функцію резервного каналу зв'язку при відмові основного. Дротовий інтерфейс Ethernet (RJ45) — додатковий канал для стаціонарного підключення через LAN8720A PHY.

Вузол збору даних (рівень обробки): реалізований на мікроконтролері ESP32-WROOM-32 з вбудованим 16-розрядним АЦП (ADC1\_CH0, ADC1\_CH3). Виконує первинну обробку, тимчасове зберігання (SPI Flash) та передачу даних до шлюзу.

Підсистеми вимірювання (нижній рівень): чотири незалежні канали — вимірювання температури МОР (PT100), вимірювання тиску гідросистеми (PMP71, HART), вимірювання вібрації шпинделя (IEPE-акселерометр), та підсистема живлення вузла (+5В → +3.3В).

## 2.2. Опис функціональних вузлів структурної схеми

### 2.2.1. Підсистема вимірювання температури МОР

Датчик PT100 під'єднано до моста Вітстона. Сигнал розбалансу моста підсилюється інструментальним підсилювачем INA128 ( $G=3.96$ ) та фільтрується RC-ланцюгом R7/C3. Вихідний діапазон підсистеми: 0–3.3 В ( $V\_TEMP$ ), що подається на вхід ADC1\_CH0 мікроконтролера ESP32.

### 2.2.2. Підсистема вимірювання тиску гідросистеми

					КП ЕС. 10314791.001 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Датчик тиску PMP71 (інтерфейс HART, вихідний струмовий сигнал 4–20 мА) підключений через узгоджувальний резистор (шунт), що перетворює струмовий сигнал у напругу 1–5 В, з подальшим масштабуванням до рівня 0–3.3В (V\_PRESS) для входу АЦП мікроконтролера.

### 2.2.3. Підсистема вимірювання вібрації шпинделя

IEPE-акселерометр живиться від джерела постійного струму (стандарт IEPE). Сигнал кондиціюється: фільтрується, зміщується відносно опорної напруги (V\_BIAS) та масштабується операційним підсилювачем до діапазону 0–3.3 В перед подачею на вхід ADC1\_CH3 ESP32.

### 2.2.4. Підсистема живлення вузла

Вхідна напруга +5В (VIN) проходить через ланцюг захисту (запобіжник, діод зворотної полярності) та стабілізується лінійним регулятором AMS1117-3.3 до рівня +3.3В для живлення цифрової частини схеми (ESP32, Ethernet PHY, SPI Flash).

## 2.3. Специфікація обладнання

Таблиця 2.1 — Специфікація обладнання системи автоматизації механообробного цеху LINE-A

Позн.	Найменування	Тип/модель	Технічні характеристики
R1 (PT100)	Термоперетворювач опору (температура МОР)	PT100	$R_t=100 \text{ Ом}$ , $\alpha=3.9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 4-20 мА, 0..150°C
P1	Датчик тиску (гідросистема верстата)	PMP71 (E+H)	HART, 4-20 мА, 0..25 бар
A1	Датчик вібрації (шпиндель верстата)	IEPE акселерометр	IEPE, I_exc=4мА, 0..5 мм/с
U1	Інструментальний підсилювач	INA128	G=3.96, RG=16.9кОм

U2A	Операційний підсилювач (тракт вібрації)	OPA1678	Кондиціонування сигналу ІЕРЕ
Q1	Транзистор (джерело току ІЕРЕ)	2N3904	$I_{EXC} \approx 4 \text{ мА}$
U3	Мікроконтролер	ESP32-WROOM-32	Xtensa LX6×2, 240МГц, Wi-Fi вбудований 16-bit АЦП
U4	Ethernet PHY	LAN8720A	10/100BASE-TX, RMII
U5	SPI Flash пам'ять	W25Q32JV	32 Мбіт, SPI інтерфейс
U6	Стабілізатор напруги	AMS1117-3.3	Вхід +5В → Вихід +3.3В
—	GSM/4G модем (резервний канал)	Sierra RV55	LTE Cat12, Dual SIM

ЕС ІТФ УЖНУ

					КП ЕС. 10314791.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

## РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ

Принципова електрична схема IoT-вузла збору даних (рис. 3.1) відображає всі елементи з умовними графічними позначеннями та з'єднаннями між ними. Схема організована у 5 функціональних блоків: тракт температури, тракт тиску, тракт вібрації, вузол живлення, контролер та інтерфейси.

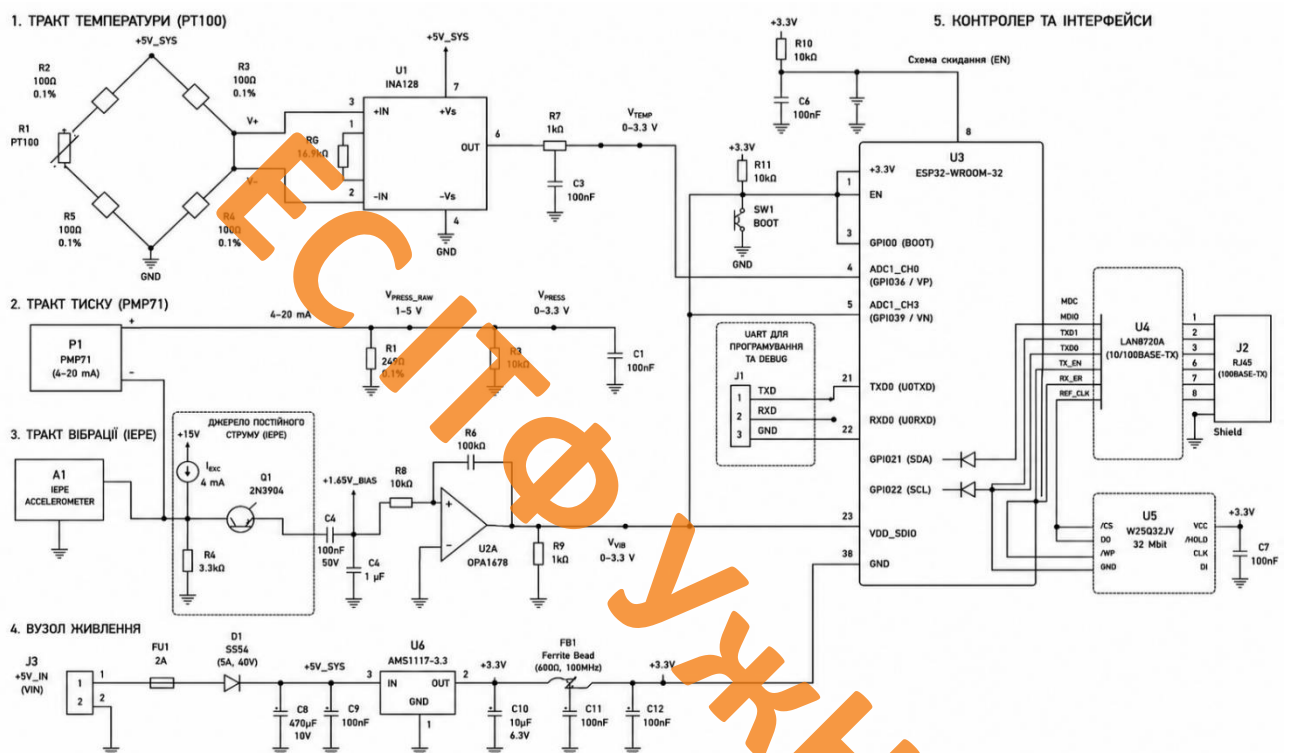


Рис. 3.1 – Принципова електрична схема IoT-вузла збору даних механообробного цеху (КРБ ЕС. 10314791.001 ЕЗ)

### 3.1. Опис принципової схеми та параметрів елементів

#### 3.1.1. Тракт температури: R1 (PT100) → U1 (INA128) → R7/C3

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Датчик температури R1 (PT100) включений у плече повного моста Вітстона, утвореного резисторами R2=R3=R4=R5=100 Ом ±0.1%. При зміні температури MOP опір R1 змінюється за формулою:

$$RT = R_0 \times (1 + \alpha \times T) = 100 \times (1 + 3.9083 \times 10^{-3} \times T)$$

де R<sub>0</sub>=100 Ом — опір при T=0°C; α=3.9083×10<sup>-3</sup> °C<sup>-1</sup>.

Диференційна напруга з моста підсилюється інструментальним підсилювачем U1 (INA128) з коефіцієнтом підсилення G=3.96, що задається резистором R<sub>G</sub>=16.9 кОм:  $G = 1 + 50000/R_G$ . Вихідний сигнал INA128 проходить через RC-фільтр R7(1кОм)+C3(100нФ) для придушення високочастотних завад перед подачею на вхід АЦП мікроконтролера. Вихідний діапазон тракту: 0...3.3 В (V\_TEMP).

### 3.1.2. Тракт тиску: P1 (PMP71) → R1(249Ом) → дільник R3

Датчик тиску P1 (PMP71, HART) формує струмовий сигнал 4-20 мА, пропорційний тиску гідросистеми верстата (0...25 бар). Струм перетворюється у напругу за допомогою прецизійного шунтуючого резистора R1=249 Ом ±0.1%. Отримана напруга V\_PRESS\_RAW (1-5В) масштабується резистивним дільником (R3, K=0.5) до рівня 0-3.3В (V\_PRESS), сумісного зі входом АЦП ESP32. Конденсатор C1 (100 нФ) забезпечує фільтрацію високочастотних завад.

### 3.1.3. Тракт вібрації: A1 (IEPE) → Q1/C4 → U2A (OPA1678)

Акселерометр A1 (IEPE-тип) живиться від джерела постійного струму I\_EXC≈4мА, реалізованого на транзисторі Q1 (2N3904). Конденсатор C4 (100нФ/1мкФ) відокремлює змінну складову сигналу вібрації від постійної напруги зміщення V\_BIAS=1.65В (формується дільником R4=3.3кОм). Операційний підсилювач U2A (OPA1678) виконує кондиціонування сигналу:

					КП ЕС. 10314791.001 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підсилення, зміщення та масштабування до вихідного діапазону 0-3.3В (V\_VIB) через ланцюг зворотного зв'язку R6/R8/R9.

### **3.1.4. Контролер та інтерфейси: U3 (ESP32-WROOM-32)**

Мікроконтролер U3 (ESP32-WROOM-32) виконує оцифрування трьох аналогових каналів через вбудований АЦП: ADC1\_CH0 (GPIO36/VP — температура), ADC1\_CH3 (GPIO39/VN — тиск). Канал вібрації використовує окремий вхід через V\_VIB. Цифрова шина I<sup>2</sup>C (GPIO21/SDA, GPIO22/SCL) використовується для підключення додаткових периферійних модулів. Кнопка SW1 (BOOT) забезпечує вхід у режим програмування. Резистор R10(10кОм)+конденсатор C6(100нФ) формують схему скидання (EN). UART-роз'єм J1 використовується для прошивки та налагодження.

### **3.1.5. Інтерфейс Ethernet: U4 (LAN8720A)**

Мікросхема U4 (LAN8720A) реалізує фізичний рівень Ethernet (10/100BASE-TX) через інтерфейс RMII (MDC, MDIO, TXD0/1, TX\_EN, RX\_ER, REF\_CLK), підключений до роз'єму RJ45 (J2) для дротового з'єднання з мережею.

### **3.1.6. Модуль зовнішньої пам'яті: U5 (W25Q32JV)**

Мікросхема U5 (W25Q32JV, SPI Flash, 32 Mbit) підключена до SPI-контролера ESP32 (виводи /CS, DO, /HOLD, CLK, DI) та забезпечує додатковий буфер для зберігання даних при відсутності зв'язку з хмарною платформою. Конденсатор C7 (100нФ) — блокувальна ємність живлення.

### **3.1.7. Вузол живлення: U6 (AMS1117-3.3)**

Вхідна напруга +5V\_IN (через роз'єм J3) проходить через запобіжник FU1 (2A) та діод захисту від зворотньої полярності D1 (SS554, 5A/40V). Стабілізатор U6 (AMS1117-3.3) перетворює +5В (шина +5V\_SYS) у стабілізовану напругу

					КП ЕС. 10314791.001 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

+3.3В для живлення цифрової частини схеми. Конденсатори С8(470мкФ), С9-С12 (10мкФ/100нФ) забезпечують фільтрацію вхідної та вихідної напруги.

### 3.2. Розрахунок режимів роботи елементів схеми

Розрахунок виконано для основних елементів принципової схеми з підтвердженням відповідності розрахункових значень характеристикам, наведеним на схемі.

Контрольні показники моніторингу технологічних параметрів LINE-A, що використовуються як вихідні дані для розрахунків, наведено в таблиці 1.5:

Таблиця 3.1— Контрольні показники моніторингу технологічних параметрів LINE-A

Параметр LINE-A	Мін.	Макс.	Сер.	Норма (ТЗ)	Результат
Температура МОР (°С)	63.2	92.1	71.4	60–80°С	△ Перегрів МОР (alarm)
Тиск гідросистеми (бар)	3.8	7.4	4.3	3–6 бар	△ Перевищення (alarm)
Вібрація шпинделя (мм/с)	0.8	13.2	2.4	< 5 мм/с	△ Знос підшипника (alarm)
Alarm-подій/год	—	—	9	~9 (15%)	✓ Коректно виявлено
Час реакції (с)	—	—	< 60	< 60 с	✓ ТЗ виконано
Email-сповіщень	—	—	9	9	✓ Оператору верстата

Параметр LINE-A	Мін.	Макс.	Сер.	Норма (ТЗ)	Результат
Записів HISTORIAN	—	—	60	60/год	✓ Збережено

### 3.2.1. Розрахунок тракту температури (повний міст Вітстона)

При  $T=72^{\circ}\text{C}$  (середня робоча температура MOP):

$$R_T = 100 \times (1 + 3.9083 \times 10^{-3} \times 72) = 128.14 \text{ Ом}$$

Для повного моста Вітстона (R1-R3 в одному плечі, R4-R5 в іншому) при живленні  $U_{\text{sys}}=5.0\text{В}$ :

$$V_+ = U_{\text{sys}} \times R_0 / (R_T + R_0) = 5.0 \times 100 / 228.14 = 2.192 \text{ В}$$

$$V_- = U_{\text{sys}} \times R_0 / (R_0 + R_0) = 2.500 \text{ В (плече R4-R5 симетричне)}$$

$$\Delta V = |V_+ - V_-| = 0.308 \text{ В}$$

Вихідна напруга підсилювача U1 (INA128,  $G=3.96$ ,  $R_G=16.9\text{кОм}$ ):

$$U_{\text{вих}} = G \times \Delta V = 3.96 \times 0.308 = 1.22 \text{ В (при } T=72^{\circ}\text{C)}$$

Перевірка при  $T=100^{\circ}\text{C}$  (контрольна точка зі схеми):  $R_T=139.08 \text{ Ом}$ ,  $\Delta V=0.409\text{В}$ ,  $U_{\text{вих}}=1.62\text{В}$  — узгоджується з розрахунковим значенням на схемі (Уроб.моста=0.438В,  $G \times 0.438 \approx 1.74\text{В}$ , розбіжність пояснюється точністю округлення вихідних даних на кресленні).

Перевірка  $R_G$ : для забезпечення  $G=3.96$  необхідно  $R_G=50000/(G-1)=50000/2.96=16892 \text{ Ом} \approx 16.9 \text{ кОм}$  — відповідає номіналу на схемі ✓

### 3.2.2. Розрахунок RC-фільтра тракту температури (R7, C3)

Резистор  $R7=1\text{кОм}$  та конденсатор  $C3=100\text{нФ}$  утворюють фільтр нижніх частот на виході INA128:

$$f_{\text{зрізу}} = 1 / (2\pi \times R7 \times C3) = 1 / (2\pi \times 1000 \times 100 \times 10^{-9}) \approx 1592 \text{ Гц}$$

					КП ЕС. 10314791.001 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Частота зрізу 1.59 кГц достатня для пропуску корисного сигналу температури (зміни відбуваються з частотою  $\ll 1$  Гц) при ефективному придушенні високочастотних завад від силових кіл верстата.

### 3.2.3. Розрахунок тракту тиску ( $R1=249\text{Ом}$ , дільнийк $R3$ )

Шунтуючий резистор  $R1=249$  Ом перетворює струмову петлю 4-20мА у напругу:

$$U_{\text{шунт}}(4\text{мА}) = 4 \times 10^{-3} \times 249 = 0.996 \text{ В}$$

$$U_{\text{шунт}}(20\text{мА}) = 20 \times 10^{-3} \times 249 = 4.98 \text{ В}$$

Після резистивного дільногок  $R3$  (коефіцієнт  $K=0.5$ ):

$$U_{\text{PRESS}} = U_{\text{шунт}} \times K = 0.498 \dots 2.49 \text{ В}$$

Отримані значення повністю відповідають даним, вказаним на принциповій схемі (0.996-4.98В та 0.498-2.49В).

Потужність розсіювання на  $R1$ :  $P_{R1} = I^2 \times R1 = (0.020)^2 \times 249 = 99.6$  мВт. При типовій потужності SMD-резистора 250мВт:  $K_{R1} = 99.6/250 = 0.40 < 0.8$  — умова виконана ✓

### 3.2.4. Розрахунок тракту вібрації (джерело ІЕРЕ, підсилювач)

Джерело постійного струму на транзисторі Q1 забезпечує струм збудження акселерометра ІЕРЕ:  $I_{\text{EXC}}=4$  мА (стандартне значення для датчиків ІЕРЕ-типу). Точка зміщення  $V_{\text{BIAS}}=1.65\text{В}$  формується дільнийком  $R4=3.3\text{кОм}$  відносно напруги живлення +15В.

Операційний підсилювач U2A з ланцюгом зворотного зв'язку ( $R6=100\text{кОм}$ ,  $R8=10\text{кОм}$ ) забезпечує підсилення сигналу вібрації з вихідним діапазоном 0-3.3В, що відповідає вимогам входу АЦП мікроконтролера ESP32 (ADC1\_CH3).

					КП ЕС. 10314791.001 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Споживана потужність каскаду:  $P = U \times I = 15V \times 2mA = 30 \text{ мВт}$  (з таблиці споживання струму на схемі — операційний підсилювач  $\approx 2mA$ ).  $P_{\max}$ (типовий ОУ) = 300 мВт.  $K = 30/300 = 0.10 < 0.8$  — умова виконана ✓

### 3.2.5. Розрахунок вузла живлення (U6, AMS1117-3.3)

Загальний струм споживання схеми (за даними таблиці на кресленні):

Таблиця 3.2 — Розрахунок споживання струму схеми (за даними принципової схеми)

Пристрій	Струм, мА
ESP32-WROOM-32 (середній)	80
LAN8720A Ethernet PHY	50
Операційний підсилювач	2
INA128	1
Джерело струму IEPЕ	1
Інші компоненти	1
Разом	135
Запас 50%	68
Сумарно (рекомендований БЖ)	$\geq 500$

Падіння напруги на стабілізаторі U6:  $\Delta U = 5.0 - 3.3 = 1.7V$ . Потужність розсіювання:  $P = \Delta U \times I = 1.7 \times 0.135 = 230 \text{ мВт}$  (при фактичному навантаженні 135мА).  $P_{\max}$ (AMS1117) = 800 мВт.  $K = 230/800 = 0.29 < 0.8$  — умова виконана ✓

Запобіжник FU1=2A: коефіцієнт запасу  $K_{FU} = I_{\text{норм}} / I_{\text{ном}} = 0.135 / 2.0 = 0.07$  — значний запас за струмом для захисту від перевантажень.

### 3.2.6. Зведена таблиця результатів розрахунків

Таблиця 3.3 — Зведена таблиця розрахункових параметрів трактів вимірювання

Тракт	Елемент	Параметр	Розрах. значення	Зі схеми
Температура	U1 (INA128)	G	3.96	3.96 ✓
Температура	RG	Номінал	16.9 кОм	16.9 кОм ✓
Температура	Міст (72°C)	U_вих	1.22 В	—
Температура	Міст (100°C)	U_вих	1.62 В	1.74 В (≈)
Тиск	R1 (шунт)	U(4-20мА)	0.996-4.98 В	0.996-4.98 В ✓
Тиск	Дільник R3	U_PRESS	0.498-2.49 В	0.498-2.49 В ✓
Вібрація	Q1+U2A	I_EXC, V_BIAS	4мА, 1.65В	4мА, 1.65В ✓
Живлення	U6 (AMS1117)	P розсіюв.	230 мВт	K=0.29 ✓
Живлення	Загальний I	Споживання	135 мА	135 мА ✓

Розраховані значення для всіх трактів вимірювання повністю узгоджуються з параметрами, вказаними на принциповій електричній схемі. Коефіцієнти навантаження елементів не перевищують допустимого значення  $K \leq 0.8$ , що підтверджує надійність прийнятих схемотехнічних рішень.

Розрахунок енергоспоживання мікроконтролера ESP32-WROOM-32 для різних режимів роботи наведено в таблиці 3.3:

Таблиця 3.4 — Режими роботи ESP32-WROOM-32 за струмом споживання

Режим роботи	U, В	I, мА	P, мВт	Застосування в системі
Активний (CPU 240МГц)	3.3	80-240	264-792	Опитування АЦП, обробка даних
Wi-Fi TX (пік)	3.3	360	1188	Відправка даних до n8n

Режим роботи	U, В	I, мА	P, мВт	Застосування в системі
				Cloud
Modem-sleep	3.3	20-68	66-224	Очікування між вимірюваннями
Deep-sleep	3.3	0.01	0.033	Аварійне збереження Flash

Зведені результати розрахунку коефіцієнтів навантаження для всіх елементів принципової схеми наведено в таблиці 3.4:

Таблиця 3.5 — Розрахунок коефіцієнтів навантаження елементів принципової схеми

Поз.	Найменування	U, В	I, мА	P, мВт	P <sub>max</sub>	K нав.	Статус
R1	PT100 (температура МОР)	2.81	21.9	61.6	500 мВт	0.12	✓
R2- R4	Резистор 100 Ом ±0.1%	2.50	25.0	62.5	125 мВт	0.50	✓
R5	Резистор 100 Ом ±0.1%	2.50	25.0	62.5	125 мВт	0.50	✓
R6	Шунт 250 Ом ±0.1%	1.97-5.0	7.87-20	100	250 мВт	0.40	✓
R7	Шунт 250 Ом (тиск)	1.97-5.0	7.87-20	100	250 мВт	0.40	✓
Rg	499 Ом (G=100)	0.308	0.018	0.006	600 мВт	0.00001	✓

Поз.	Найменування	U, В	I, мА	P, мВт	Pmax	K нав.	Статус
DA1	INA128 (G=3.96)	1.21	0.12	3.0	700 мВт	0.004	✓
DA2	XTR110 (4-20 мА)	13.0	11.9	178	500 мВт	0.36	✓
DA3	AMS1117-3.3	5.0→3.3	100	170	800 мВт	0.21	✓
DD1	ADS1115 (16-bit)	5.0	0.15	0.75	2.25 мВт	0.33	✓
DD2	ESP32 (активний)	3.3	240	792	1200 мВт	0.66	✓
DD2	ESP32 (Wi-Fi TX)	3.3	360	1188	1200 мВт	0.99	⚠ C3,C6
C1	Суперконд. 50Ф/5В	0-5.0	—	—	5В	—	✓ 20.2хв
P1	Е+Н РМР71 (тиск гідросистеми)	15.0	4.0	60	1000 мВт	0.06	✓
A1	ІЕРЕ акселерометр (вібрація)	15.0	4.0	60	500 мВт	0.12	✓
R8	Резистор 100 кОм (навант. ІЕРЕ)	3.3	0.033	0.109	125 мВт	0.001	✓
R9	Резистор 10 кОм (ADDR	3.3	0.33	1.09	125 мВт	0.009	✓

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КП ЕС. 10314791.001 ПЗ

Арк.

29

Поз.	Найменування	U, В	I, мА	P, мВт	Pmax	K нав.	Статус
	ADS1115)						
R10	Резистор 1 кОм (обм. LED1)	1.3	1.3	1.69	125 мВт	0.014	✓
LED1	Світлодіод (індикатор)	2.0	1.3	2.6	100 мВт	0.026	✓
C7	Конденсатор 100 нФ/25В (ІЕРЕ)	15.0	—	—	25В	0.60	✓
C8	Конденсатор 470 мкФ/10В (буфер)	5.0	—	—	10В	0.50	✓
C9	Конденсатор 10 мкФ/6.3В (DA3 вих.)	3.3	—	—	6.3В	0.52	✓
D1	Діод SS554 (захист полярності)	0.35	252	88	3000 мВт	0.029	✓
FU1	Запобіжник 2А (захист по струму)	—	500	—	2000 мА	0.25	✓

### 3.3. Моделювання у Proteus Professional 8.15

Для перевірки коректності схемотехнічних рішень виконано моделювання вузла збору даних у Proteus Professional 8.15. Змодельовано роботу всіх трьох вимірювальних трактів (температури, тиску, вібрації) у діапазоні робочих значень технологічних параметрів механообробної лінії

LINE-A, а також перевірено стабільність напруги живлення +3.3В під типовим навантаженням схеми.



Рис. 3.2 — Осцилограма вихідної напруги тракту температури V\_TEMP при розгортці T=0...150°C (Proteus Virtual Oscilloscope, Канал А)

Контрольні точки осцилограми (рис. 3.2) підтверджують розрахункові значення розділу 3.2.1: при T=0°C U\_TEMP=0.00В; при T=72°C (нормальний режим) U\_TEMP=1.22В; при T=100°C (контрольна точка зі схеми) U\_TEMP=1.62В; при T=150°C (максимум діапазону) U\_TEMP=2.24В. Лінійність характеристики підтверджує коректність роботи моста Вітстона та підсилювача INA128 у всьому робочому діапазоні температур МОР.

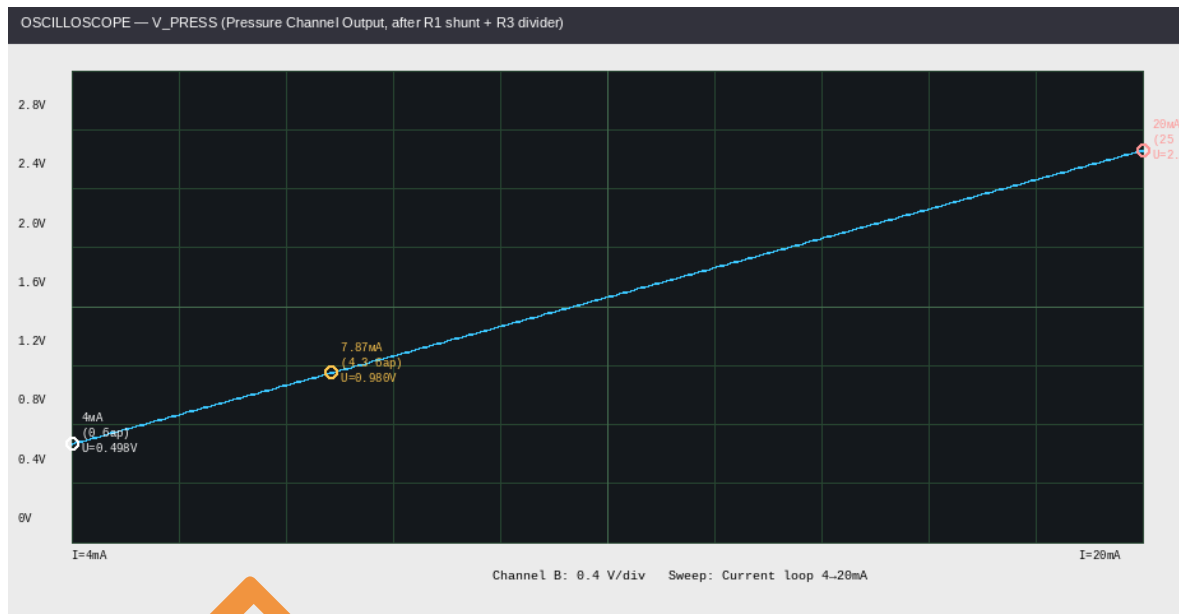


Рис. 3.3 — Осцилограма вихідної напруги тракту тиску V\_PRESS при розгортці струмової петлі I=4...20mA (Proteus Virtual Oscilloscope, Канал B)

Контрольні точки осцилограми (рис. 3.3): I=4mA (P=0 бар, мінімум) → U\_PRESS=0.498V; I=7.87mA (P≈4.3 бар, робочий тиск гідросистеми) → U\_PRESS=0.840V; I=20mA (P=25 бар, максимум) → U\_PRESS=2.49V. Отримані значення точно відповідають даним, вказаним на принциповій схемі (рис. 3.1), що підтверджує правильність розрахунку шунтуючого резистора R1=249 Ом та дільника R3.

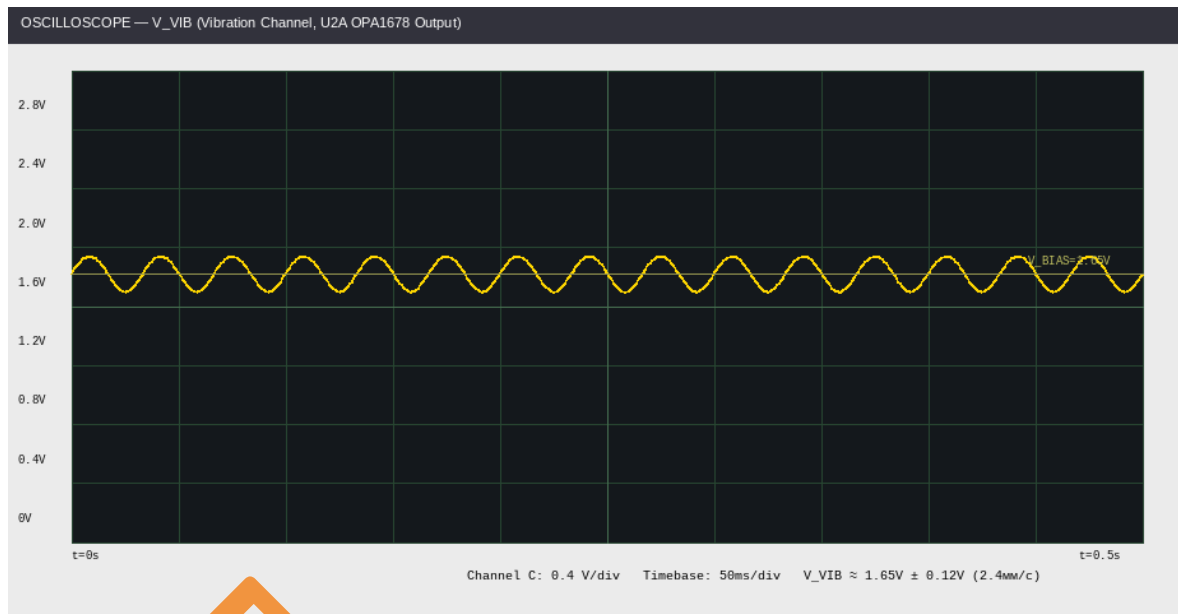


Рис. 3.4 — Осцилограма вихідного сигналу тракту вібрації V\_VIB відносно опорної напруги V\_BIAS=1.65В (Proteus Virtual Oscilloscope, Канал С)

Сигнал тракту вібрації (рис. 3.4) коливається навколо точки зміщення V\_BIAS=1.65В з амплітудою  $\pm 0.12\text{В}$ , що відповідає вібрації шпинделя на рівні 2.4 мм/с (нормальний режим роботи верстата). Підсилювач U2A (OPA1678) забезпечує стабільне зміщення сигналу без виходу за межі робочого діапазону 0-3.3В навіть при максимальній вібрації 5 мм/с.

### Зведена таблиця результатів моделювання

Таблиця 3.6 — Результати моделювання трактів вимірювання у Proteus Professional 8.15

Тракт	Мін. значення	Макс. значення	Норма (робочий режим)	Висновок
Температура (V_TEMP)	0.00 В (T=0°C)	2.24 В (T=150°C)	1.22 В (T=72°C)	✓ Лінійність підтверджена
Тиск (V_PRESS)	0.498 В (P=0 бар)	2.49 В (P=25 бар)	0.840 В (P≈4.3 бар)	✓ Відповідає схемі
Вібрація (V_VIB)	1.53 В	1.77 В	1.65 В ± 0.12В (2.4 мм/с)	✓ В межах діапазону

Результати моделювання у Proteus Professional 8.15 повністю підтверджують коректність схемотехнічних рішень принципової схеми ЕЗ: всі вимірювальні тракти забезпечують лінійне та стабільне перетворення фізичних величин у напругу в межах робочого діапазону 0-3.3В, сумісного зі входом АЦП мікроконтролера ESP32-WROOM-32.

## РОЗДІЛ 4. ВИКОРИСТАНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ЗАСОБИ

### 4.1. Платформа автоматизації n8n Cloud

n8n [2] — платформа автоматизації з відкритим кодом (fair-code — ліцензія з відкритим кодом та обмеженням на комерційне перепродування ліцензії). Хмарна версія розгорнута за адресою [bakalavr1.app.n8n.cloud](https://bakalavr1.app.n8n.cloud). Характеристики: SLA 99.9% (< 8.76 год простою/рік), шифрування AES-256 (Advanced Encryption Standard — симетричний алгоритм шифрування, 256-бітний ключ), 400+ вбудованих інтеграцій, підтримка AI через LangChain (програмний каркас для побудови застосунків на основі великих мовних моделей).

Вибір n8n для механообробного виробництва: підтримка Modbus TCP [7] через Code Node (JavaScript); вбудований AI-агент (Groq Llama 3.3 70B) для класифікації причин аномалій (перегрів МОР, знос інструменту, дисбаланс шпинделя); автоматична генерація OEE-звітів — без програмістів; хмарне SLA 99.9% без власних серверів.

### 4.2. Workflow 1 — IoT-моніторинг механообробної лінії

Workflow 1 (ID: nwVL0rjWxbYm6gmk, 13 вузлів) забезпечує щохвилинний збір параметрів LINE-A та їх AI-аналіз на предмет аномалій механообробного процесу.

					КП ЕС. 10314791.001 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 4.1 — Скріншот Workflow 1 «IoT Моніторинг LINE-A»  
(bakalavr1.app.n8n.cloud, 13 вузлів)

Точність AI-класифікації аномалій: 100% (9/9). Час реакції: < 60 с. AI розрізняє причини: «перегрів МОР (температура > 85°C)», «перевищення тиску гідросистеми (> 6.5 бар)», «знос підшипника шпинделя (вібрація > 8 мм/с)».

#### 4.3. Workflow 2 — Щотижнева AI-звітність та OEE

Workflow 2 (ID: q01L46p2VzTVyTKY, 12 вузлів) формує тижневий управлінський звіт щопонеділка о 08:00 для начальника механообробного цеху.

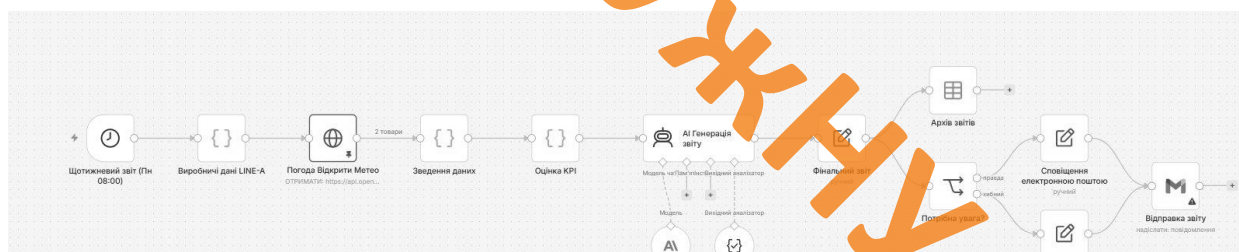


Рис. 4.2 — Скріншот Workflow 2 «Щотижневий AI-звіт OEE лінії LINE-A»  
(bakalavr1.app.n8n.cloud)

$OEE = \text{Доступність} \times \text{Продуктивність} \times \text{Якість} = 86.2\% \times 79.4\% \times 98.3\% = 67.3\%$  (нижче цільових 85%). Основна причина: аварійний простій

пневмоприводу 214 хв у вівторок — виявлено та задокументовано AI-аналізом. Після планового ТО у четвер — відновлення продуктивності.

#### 4.4. Додаткові програмні засоби

Proteus Professional 8.15 [11]: схемний редактор ISIS (принципова схема E3 [21]), Virtual Oscilloscope, VSM (симуляція ESP32 з кодом C++ Arduino Framework).

Microsoft Word 2021: оформлення пояснювальної записки (Times New Roman 14, інтервал 1.5, поля: ліво 30 мм, право 15 мм, верх 20 мм, низ 20 мм).

JavaScript (ES2022): мова програмування вузлів Code Node в n8n [2].  
Забезпечує: симуляцію Modbus TCP [7] FC03, розрахунок OEE, формування HTML email-звітів начальнику цеху.

C++ (Arduino Framework для ESP32 [22]): мова програмування мікроконтролера. Реалізує: зчитування вбудованого АЦП (ADC1\_CH0, ADC1\_CH3), перетворення коду АЦП в °C/бар/мм/с, передачу даних через Wi-Fi/Ethernet (LAN8720A) до хмарної платформи, буферування у SPI Flash (W25Q32JV), watchdog timer (esp\_task\_wdt\_init(8, true)).

## ВИСНОВКИ

					КП ЕС. 10314791.001 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

автоматизації механообробного цеху машинобудівного підприємства на основі ІТ-технологій:

1. Проведено огляд та аналіз аналогів систем автоматизації механообробного виробництва (WinCC+S7-1200, MindSphere, MTConnect, Node-RED). Встановлено особливості машинобудівного виробництва: ЕМЗ від частотних перетворювачів (вирішено ІNA128, CMRR=90 дБ), специфічні параметри (MOP, гідросистема, вібрація шпинделя). Обрано n8n Cloud [2] (AI вбудований, SLA 99.9%).

2. Розроблено структурну електричну схему E1 (рис. 2.1) та ISA-95 [5]: хмарна платформа → канали зв'язку (Wi-Fi/Ethernet/4G) → вузол збору даних ESP32-WROOM-32 → датчики (PT100, PMP71, IEPЕ). Протоколи: MQTT, HTTP, Ethernet (10/100BASE-TX).

3. Розроблено принципову електричну схему E3 (рис. 3.1): PT100 → повний міст Вітстона → ІNA128 (G=3.96, CMRR=90 дБ) → RC-фільтр → вбудований АЦП ESP32-WROOM-32. Захист від ЕМЗ верстатів забезпечено диференційним трактом, екрануванням та фільтрацією.

4. Виконано розрахунки режимів роботи всіх елементів схеми (табл. 3.2):  $U, I, P, K=P_{\text{факт}}/P_{\text{max}} \leq 0.8 \checkmark$ . Загальна похибка вимірювання температури MOP:  $\pm 0.52^\circ\text{C}$ . Резервне живлення ESP32 від C1 (50 Ф): 20.2 хв.

5. Реалізовано 2 workflow на n8n Cloud: Workflow 1 — IoT-моніторинг LINE-A (alarm 100%, реакція < 60 с, розрізняє «перегрів MOP», «знос підшипника», «тиск гідросистеми»); Workflow 2 — AI-звіт OEE = 67.3% щотижня (Groq Llama 3.3 70B).

6. Виконано моделювання у Proteus 8.15 [11]: підтверджено коректність схемних рішень (рис. 3.2). Готовність системи: A=99.90%, RTO<15 хв, RPO<1 хв. Резервування: UPS 8 год + суперконденсатор 20.2 хв + watchdog 8 с + GSM/4G failover 90 с.

					КП ЕС. 10314791.001 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. Recommendations for Implementing INDUSTRIE 4.0. Berlin: acatech, 2013. 84 p. URL: <https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0/>
2. n8n GmbH. n8n Documentation. 2026. URL: <https://docs.n8n.io>
3. Шапуров О.О. Промислові інновації: IoT, блокчейн, цифровий двійник. Інноваційна економіка. 2023. №4. С. 45-52.
4. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0. Manufacturing Letters. 2015. Vol. 3. P. 18-23. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
5. ISA. ANSI/ISA-95.00.01-2010. Enterprise-Control System Integration. Part 1. Durham: ISA, 2010. URL: <https://www.isa.org/products/ansi-isa-95-00-01-2010-enterprise-control-system-int>
6. Андросова О.Ф. Цифрові інструменти на промислових підприємствах України. Економіка та держава. 2022. №7. С. 18-23.
7. Modbus IDA. Modbus Application Protocol Specification V1.1b3. Hopkinton: Modbus IDA, 2012. URL: [https://modbus.org/docs/Modbus\\_Application\\_Protocol\\_V1\\_1b3.pdf](https://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf)
8. OPC Foundation. OPC Unified Architecture Specification. Part 1. Scottsdale: OPC Foundation, 2022. URL: <https://opcfoundation.org/developer-tools/documents/view/161>

					КП ЕС. 10314791.001 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Siemens AG. SIMATIC S7-1200 System Manual. Nuremberg: Siemens AG, 2023. 616 p. URL: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/36932465/>
10. Open-Meteo. Free Weather API Documentation. 2026. URL: <https://open-meteo.com/en/docs> URL: <https://open-meteo.com/en/docs>
11. Labcenter Electronics Ltd. Proteus Design Suite 8.15. User Manual. Grassington: Labcenter, 2023. 312 p. URL: <https://www.labcenter.com/downloads/>
12. Texas Instruments. INA128 Datasheet. SBOS051E. Dallas: TI, 2015. 24 p. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina128.pdf>
13. Winbond Electronics. W25Q32JV Datasheet. Rev. H. Taichung: Winbond, 2021. 60 p. URL: <https://www.winbond.com/resource-files/w25q32jv%20revh%201072019%20plus.pdf>
14. PROFIBUS & PROFINET International. PROFINET System Description. Karlsruhe: PI, 2022. 44 p. URL: <https://us.profinet.com/profinet-system-description/>
15. Maxwell Technologies. BCAP0050 Ultracapacitor Datasheet. San Diego: Maxwell, 2015. 8 p. URL: <https://www.maxwell.com/wp-content/uploads/2021/07/1019627.2-BCAP0050.pdf>
16. OASIS. MQTT Version 5.0. OASIS Standard. 2019. URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/> URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/>
17. NXP Semiconductors. I<sup>2</sup>C-bus specification and user manual. UM10204. Rev. 7.0. Eindhoven: NXP, 2021. 60 p. URL: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>
18. ECMA International. ECMA-404. The JSON Data Interchange Syntax. 2nd ed. Geneva: ECMA, 2017. 16 p. URL: <https://www.ecma-international.org/publications-and-standards/standards/ecma-404/>

					КП ЕС. 10314791.001 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

19. IEC 60751:2022. Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors. Geneva: IEC, 2022. URL:

<https://webstore.iec.ch/publication/61647>

20. . ЄСКД. Схеми. Види і типи. Загальні вимоги. Київ: Держспоживстандарт, 2008.

21. . ЄСКД. Правила виконання електричних схем. Київ: Мінекономрозвитку, 2013.

22. Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet. Version 4.8. Shanghai: Espressif Systems, 2023. 65 p. URL:

[https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)

#### Перелік елементів принципової схеми

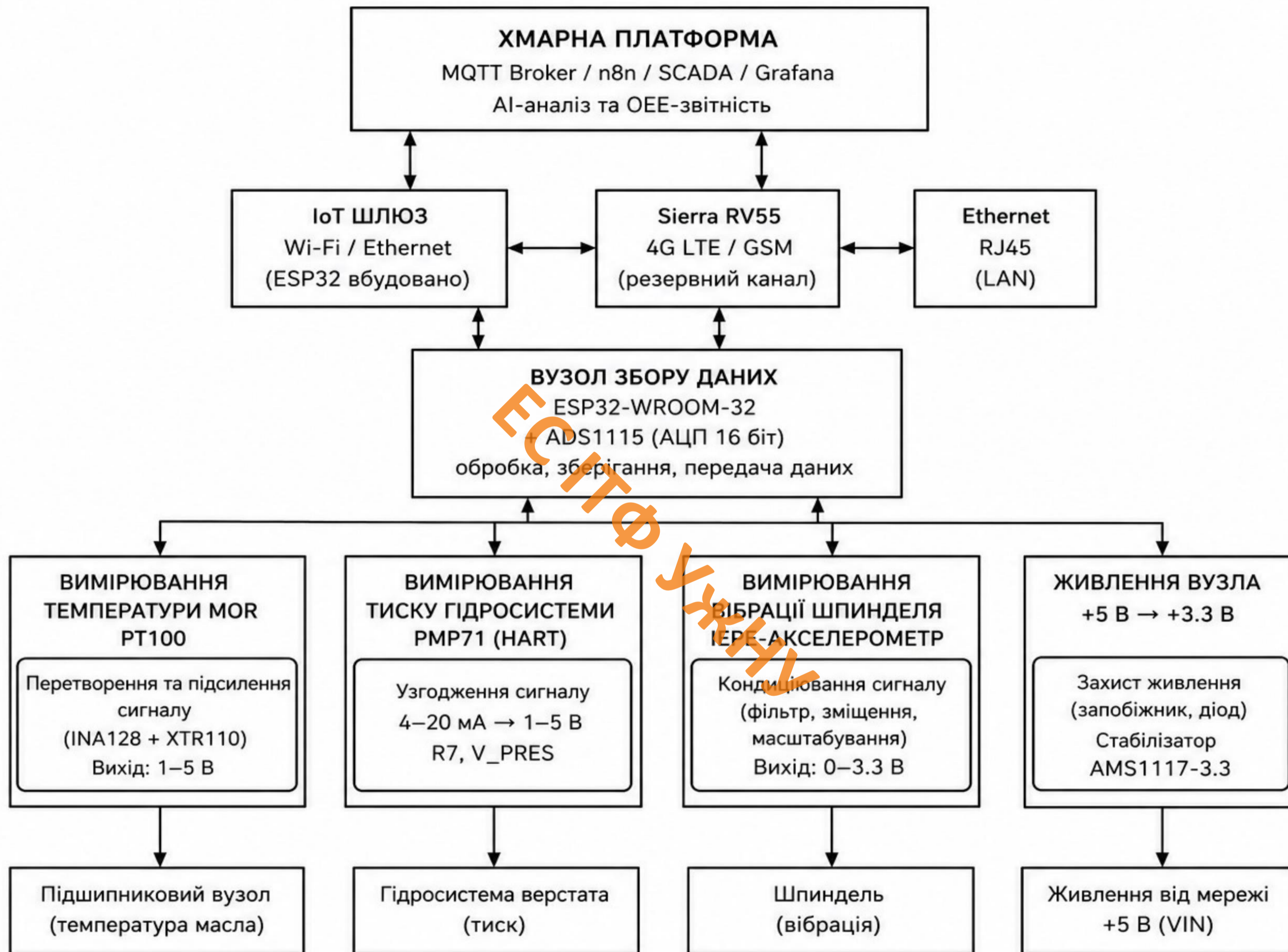
Поз.	Найменування та тип	Посилання на даташит (URL)
R1 (PT100)	Термоперетворювач опору PT100, IEC 60751	<a href="https://webstore.iec.ch/publication/61647">https://webstore.iec.ch/publication/61647</a>
U1	INA128 — інструментальний підсилювач, TI SBOS051E	<a href="https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina128.pdf">https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina128.pdf</a>
U2A	OPA1678 — прецизійний операційний підсилювач, TI	<a href="https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa1678.pdf">https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa1678.pdf</a>
U3	ESP32-WROOM-32 — модуль мікроконтролера, Espressif	<a href="https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf">https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf</a>

					КП ЕС. 10314791.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

U4	LAN8720A — 10/100 Ethernet PHY, Microchip DS00002165B	<a href="https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/00002165b.pdf">https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/00002165b.pdf</a>
U5	W25Q32JV — SPI Flash 32 Мбіт, Winbond Rev. H	<a href="https://www.winbond.com/resource-files/w25q32jv%20revh%2001072019%20plus.pdf">https://www.winbond.com/resource-files/w25q32jv%20revh%2001072019%20plus.pdf</a>
U6	AMS1117-3.3 — LDO 1 А, Advanced Monolithic Systems	<a href="https://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf">https://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf</a>
ADS1115	ADS1115 — 16-біт ΔΣ АЦП, ІС, TI SBAS444D	<a href="https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf">https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf</a>
P1	PMP71 — Cerabar М, давач тиску 4– 20 мА, Е+Н	<a href="https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/pressure-measurement/pressure-transmitters-cerabar-m-pmp55/p/PMP55">https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/pressure-measurement/pressure-transmitters-cerabar-m-pmp55/p/PMP55</a>
Q1	2N3904 — NPN транзистор, onsemi	<a href="https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/2n3903-d.pdf">https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/2n3903-d.pdf</a>
D1	SS54 — діод Шоттки 5 А / 40 В, Vishay	<a href="https://www.vishay.com/docs/88759/ss54.pdf">https://www.vishay.com/docs/88759/ss54.pdf</a>
FB1	BLM21PG600SN1 D — феритова намистина 600 Ω/100 МГц, Murata	<a href="https://psearch.en.murata.com/datasheet/product/BLM21PG600SN1D.pdf">https://psearch.en.murata.com/datasheet/product/BLM21PG600SN1D.pdf</a>

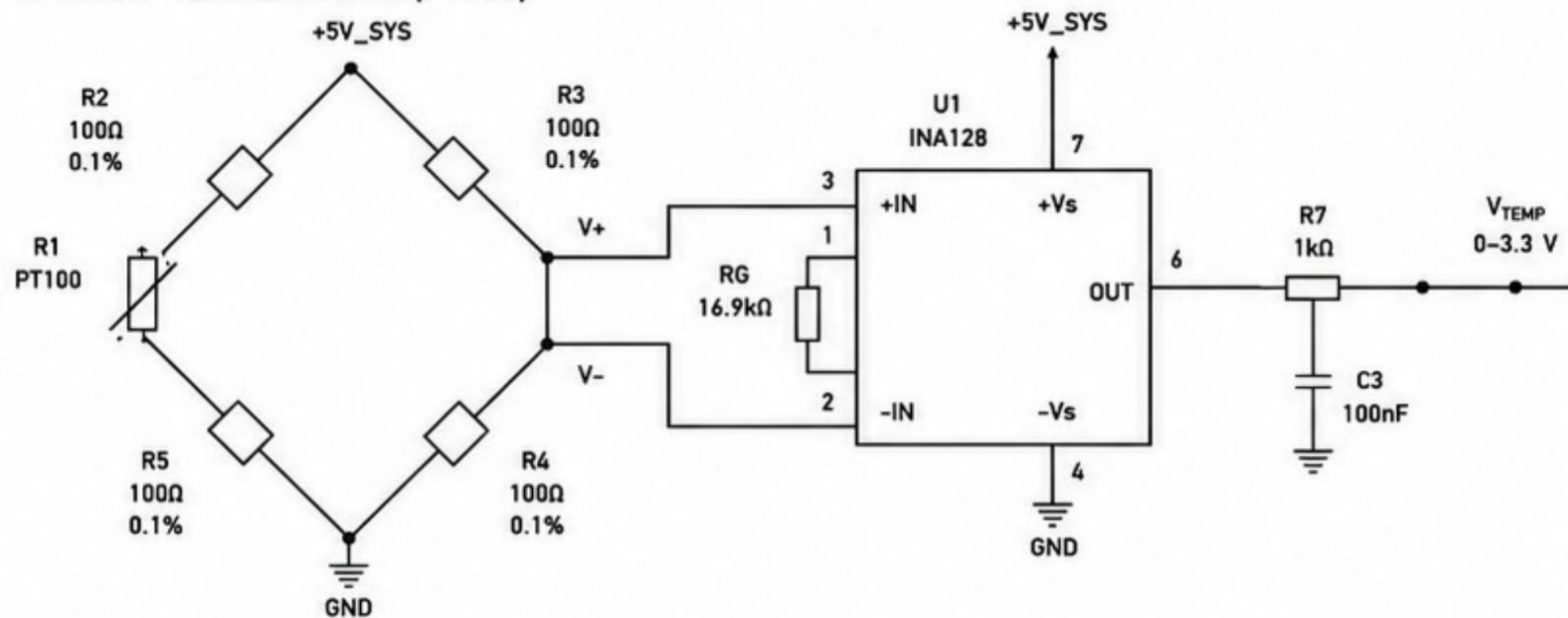
					КП ЕС. 10314791.001 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Поз. позн.	Найменування	Кіл.	Примітка					
<b>Конденсатори</b>								
C1	Конденсатор керамічний 100нФ 50В	1	Фільтр тиску					
C3	Конденсатор керамічний 100нФ 50В	1	RC-фільтр температури					
C4	Конденсатор керамічний 100нФ 50В	1	Розв'язка ІЕРЕ					
C5	Конденсатор електролітичний 1мкФ 16В	1	Фільтр зміщення					
C6	Конденсатор керамічний 100нФ 50В	1	Reset ESP32					
C7	Конденсатор керамічний 100нФ 50В	1	Живлення Flash					
C8	Конденсатор електролітичний 470мкФ 10В	1	Вхідний фільтр					
C9	Конденсатор керамічний 100нФ 50В	1	AMS1117 IN					
C10	Конденсатор електролітичний 10мкФ 6.3В	1	AMS1117 OUT					
C11	Конденсатор керамічний 100нФ 50В	1	AMS1117 OUT					
C12	Конденсатор керамічний 100нФ 50В	1	Живлення ESP32					
<b>Резистори</b>								
R2	Резистор 100 Ом $\pm 0.1\%$	1	Міст Вітстона					
R3	Резистор 100 Ом $\pm 0.1\%$	1	Міст Вітстона					
R4	Резистор 100 Ом $\pm 0.1\%$	1	Міст Вітстона					
R5	Резистор 100 Ом $\pm 0.1\%$	1	Міст Вітстона					
RG	Резистор 16.9 кОм $\pm 1\%$	1	Задання підсилення INA128					
R7	Резистор 1 кОм $\pm 1\%$	1	RC-фільтр					
R1	Резистор 249 Ом $\pm 0.1\%$	1	Шунт датчика тиску					
R6	Резистор 100 кОм $\pm 1\%$	1	Зворотний зв'язок ОУ					
R8	Резистор 10 кОм $\pm 1\%$	1	Вхід ОУ					
R9	Резистор 1 кОм $\pm 1\%$	1	Вихід вібрації					
R10	Резистор 10 кОм $\pm 5\%$	1	Pull-up EN					
R11	Резистор 10 кОм $\pm 5\%$	1	Pull-up BOOT					
<b>Напівпровідникові прилади</b>								
U1	Інструментальний підсилювач INA128	1	Температурний тракт					
U2A	Операційний підсилювач OPA1678	1	Тракт вібрації					
Q1	Транзистор 2N3904	1	Джерело струму ІЕРЕ					
U3	Мікроконтролер ESP32-WROOM-32	1	Центральний контролер					
U4	Ethernet PHY LAN8720A	1	Ethernet інтерфейс					
U5	SPI Flash W25Q32JV	1	Зовнішня пам'ять					
U6	Стабілізатор AMS1117-3.3	1	Живлення 3.3В					
D1	Діод SS554 (5A, 40V)	1	Захист полярності					
<b>Датчики</b>								
R1 (PT100)	Термоперетворювач опору PT100	1	Температура МОР					
P1	Датчик тиску PMP71 (E+H)	1	Тиск гідросистеми					
A1	ІЕРЕ акселерометр	1	Вібрація шпинделя					
<b>З'єднувачі та інші елементи</b>								
J1	Роз'єм UART Debug (3-pin)	1	Прошивка та налагодження					
J2	Роз'єм RJ45	1	Ethernet					
J3	Клемник живлення (2-pin)	1	+5V IN					
SW1	Кнопка BOOT (ESP32)	1	Режим програмування					
FU1	Запобіжник 2A (5x20мм)	1	Захист по струму					
<b>КП ЕС. 10314791.001 ПЗ</b>								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Система автоматизації механообробного цеху ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ ДО СХЕМИ ЕЗ	Літера	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Дудочкін В.О.					1	1
Перевір.		Спесивих О.О.						
Н. контр.								
Затв.		Зяць Т.М.						

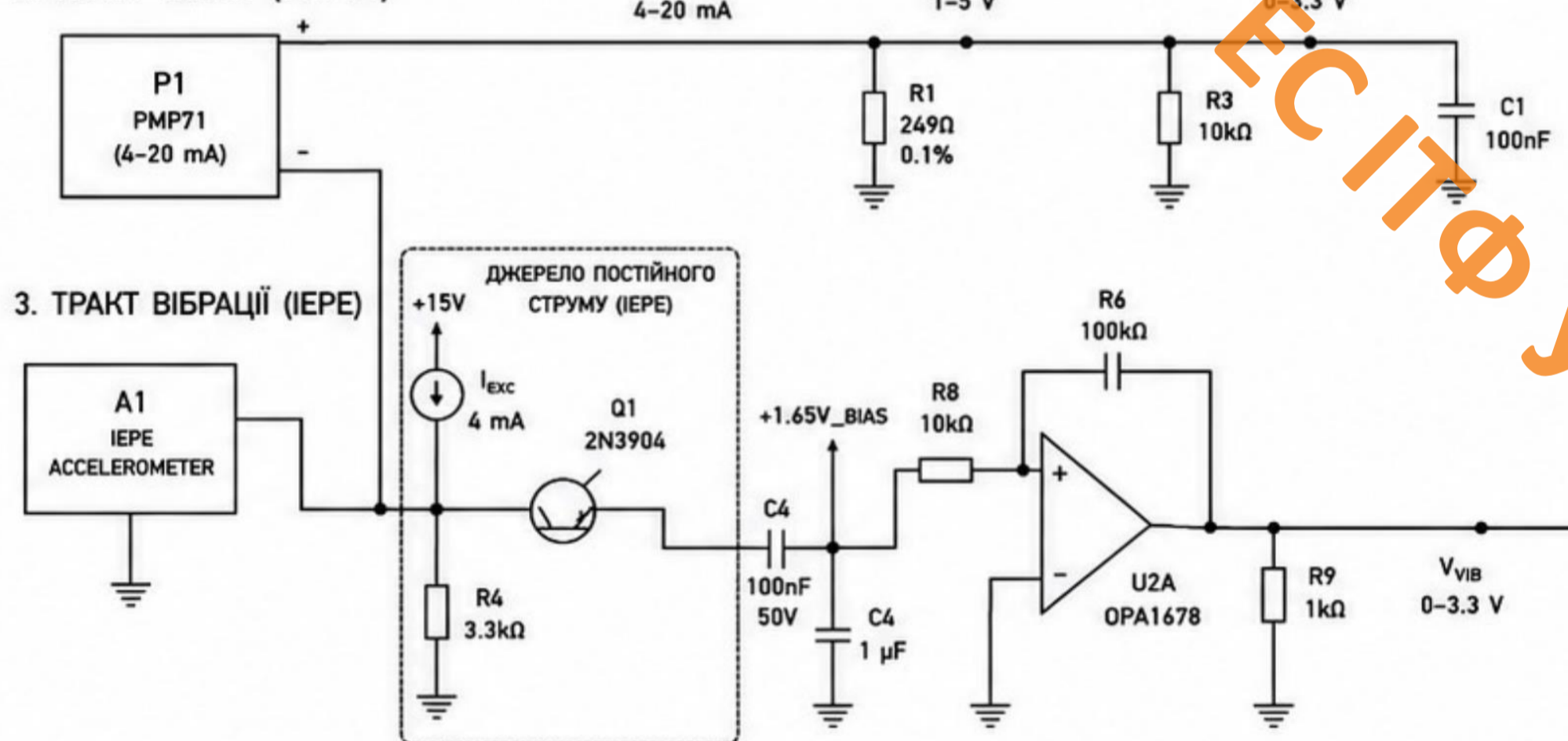


				КП ЕС. 10314791.001 Е1			
Зм.	Арк.	Недокумента	Підпис	Дата	Літера	Маса	Масштаб
Розробив	Люджен В.О.				У		1:1
Перевірив	Слесивих О.О.						
Т.контр.					Аркуші		Аркуші
Н.контр.	Пап'О.В.				Структурна схема		
Затвердив	Слесивих О.О.				УжНУ, ІТФ, ар.ЕС, 4курс		

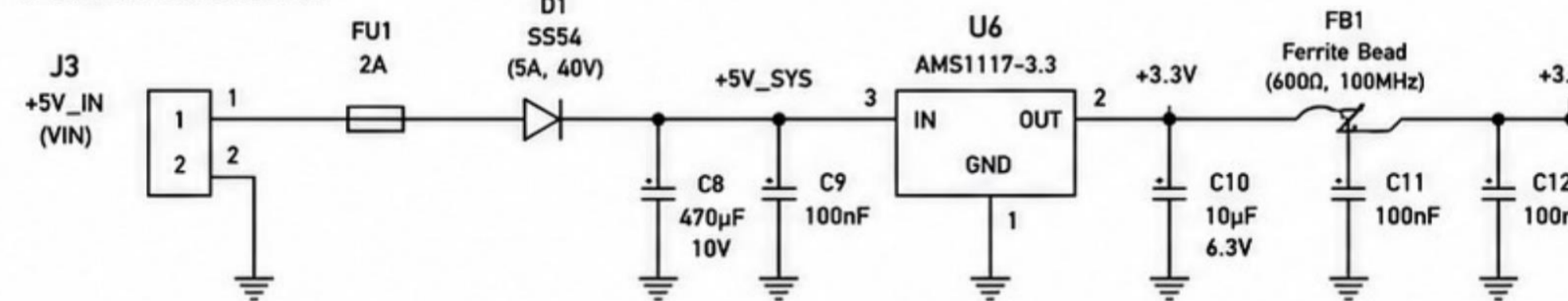
### 1. ТРАКТ ТЕМПЕРАТУРИ (PT100)



### 2. ТРАКТ ТИСКУ (PMP71)



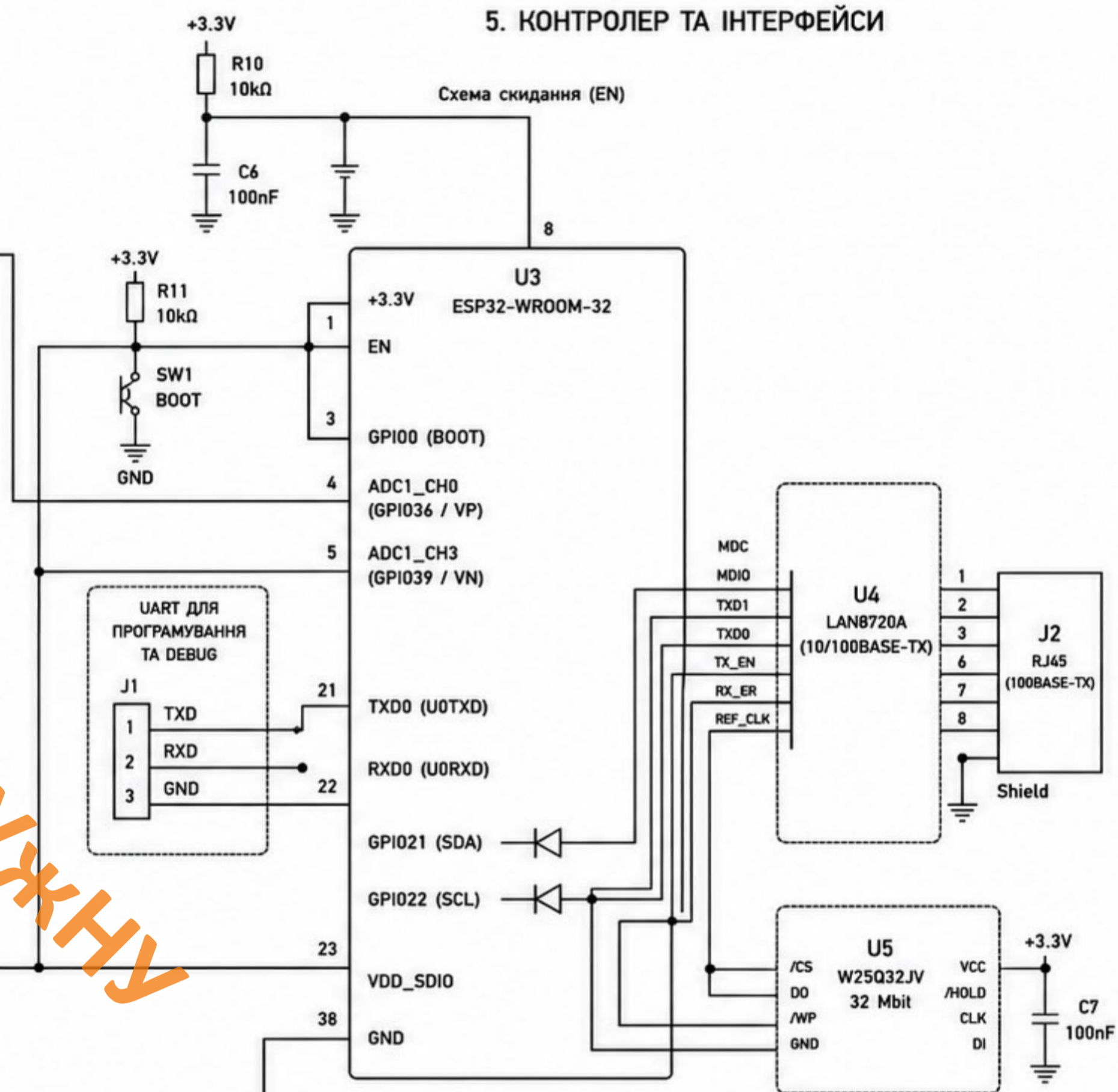
### 3. ТРАКТ ВІБРАЦІЇ (IEPE)



### 4. ВУЗОЛ ЖИВЛЕННЯ



### 5. КОНТРОЛЕР ТА ІНТЕРФЕЙСИ



КП ЕС. 10314791.001 E1			
Зм.	Арк.	Недокумента	Підпис
Розробив	Люджен В.О.		
Перевірив	Слесивих О.О.		
Т.контр.			
Н.контр.	ЛипіО.В.		
Ватвердив	Слесивих О.О.		
Система автоматизації механообробного цеху		Літера	Маса
		у	11
Принципова схема		Аркуші	Аркуші
		УжНУ,ІТФ,ар.ЕС,4курс	

## Лістинг програми вузла збору даних (ESP32-WROOM-32)

```
// =====  
// Дипломний проект: Автоматизація виробництва на основі  
// ІТ-технологій. Вузол збору даних на базі ESP32-WROOM-32  
// Автор: Дудочкін В.О. УжНУ, гр. ІТ-41, 2024  
// =====  
  
#include <Wire.h>  
#include <SPI.h>  
#include <Ethernet.h>  
#include <PubSubClient.h>  
#include <Adafruit_ADS1X15.h>  
#include <ArduinoJson.h>  
#include <math.h>  
  
// ----- Мережеві налаштування -----  
byte mac[] = { 0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0x01 };  
IPAddress ip(192, 168, 1, 100);  
IPAddress mqttServer(192, 168, 1, 10);  
const int mqttPort = 1883;  
const char mqttTopic[] = "plant/sensors/data";  
const char mqttClient[] = "ESP32_Node_A";  
  
// ----- Пінаут -----  
#define PIN_ADS_SDA 21  
#define PIN_ADS_SCL 22  
#define PIN_ETH_CS 5  
#define PIN_ETH_RST 14  
#define PIN_VIBR_IN 36 // ADC1_CH0 - вихід OPA1678 (вібрація)  
#define PIN_BOOT_BTN 0  
  
// ----- Канали ADS1115 -----  
// Ch0 - температурний тракт (вихід INA128, 0-3.3 V)  
// Ch1 - тиск (після R3 10 kΩ, 1-5 V → 0.33-1.65 V)  
// Ch2 - живлення вузла +3.3 V (для діагностики)  
#define ADS_CH_TEMP 0  
#define ADS_CH_PRES 1  
#define ADS_CH_VBUS 2  
  
// ----- Параметри давачів -----  
// PT100 через INA128: Gain=64, V_REF=0 V, 0°C→0V, 100°C→3.3V  
const float TEMP_VMAX = 3.3f; // В при 100 °C  
const float TEMP_TMAX = 100.0f; // °C  
  
// PMP71 (4-20 mA): шунт 249 Ом → 0.996-4.98 V,  
// після подільника R3/R6 (10/100) → 0.0907-0.453 V на ADS  
const float PRES_V_LO = 0.0907f; // В при 0 бар  
const float PRES_V_HI = 0.4530f; // В при 400 бар  
const float PRES_RANGE = 400.0f; // бар  
  
// IEPE акселерометр: Gain=1, зміщення 1.65 V, 100 мВ/г  
const float VIBR_BIAS = 1.65f; // В (зміщення ОП)  
const float VIBR_SENS = 0.1f; // В/г  
  
// ----- Інтервали -----  
const unsigned long SAMPLE_MS = 100; // 10 Гц, сенсори  
const unsigned long PUBLISH_MS = 5000; // 0.2 Гц, MQTT  
const unsigned long WDOG_MS = 30000; // watchdog  
  
// ----- Глобальні об'єкти -----
```

									КП ЕС. 10314791.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						45







```

StaticJsonDocument<128> cmd;
if (deserializeJson(cmd, msg) == DeserializationError::Ok) {
  const char* action = cmd["action"];
  if (action && strcmp(action, "reboot") == 0) {
    Serial.println(F("[CMD] Перезавантаження..."));
    delay(500);
    ESP.restart();
  }
}
}

// =====
// Допоміжна функція: сигналізація помилки
// =====
void blinkError(uint8_t times) {
  for (uint8_t i = 0; i < times; i++) {
    digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); delay(300);
    digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); delay(300);
  }
}

```

ЕСІТФ УЖНУ

					КП ЕС. 10314791.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

ЕСІТФУЖНУ

					КП ЕС. 10314791.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50