

УДК 621.43.019.8:681.518
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.4\(502\).11](https://doi.org/10.15589/znp2025.4(502).11)

A MODERN APPROACH TO THE AUTOMATION OF MEASUREMENT PROCESSES IN EXPERIMENTAL RESEARCH ON CHARGE AIR COOLERS

СУЧАСНИЙ ПІДХІД ДО АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ ОХОЛОДЖУВАЧІВ НАДДУВНОГО ПОВІТРЯ

Oleksiy A. Gogorenko
oleksiy.gogorenko@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9157-6659

Andrii V. Nemchenko
andrii.nemchenko@nuos.edu.ua
ORCID: 0009-0005-0650-3949

О. А. Гогоренко,
канд. техн. наук, доцент

А. В. Немченко,
аспірант

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. *Purpose.* Development and implementation of a modern hardware-software complex for the automation of measurements on a laboratory test bench for studying charge air coolers (CAC). The aim is to overcome the limitations of traditional techniques (manual data acquisition) by improving the accuracy, speed, and informativeness of experiments, particularly in operating modes with moisture condensation. *Methodology.* The research is based on an integrated approach: modernization of the test bench by equipping it with sensors for temperature, pressure, humidity, and flow rate, and the implementation of an automated data acquisition system based on an Arduino Nano controller. This ensures synchronous parameter registration at a frequency of 1 Hz for obtaining arrays of experimental data. *Results.* An integrated, synchronized system was created, enabling simultaneous data collection across the entire spectrum of parameters. The elimination of time gaps between measurements allowed for the investigation of both steady-state and dynamic processes. Automatic saving of up to 180 values per parameter per regime and statistical processing reduced the confidence interval of the error. The system minimized the influence of the human factor, reduced experiment duration, and enhanced data reliability. *Scientific novelty.* The implementation of an integrated automation system based on accessible hardware components (Arduino) with comprehensive integration of air stream humidity measurement – a critical parameter for studying heat transfer under condensation conditions, which was previously not accounted for in standard methodologies. High-frequency synchronous data acquisition for studying dynamic processes in the CAC is ensured. *Practical value.* The research results can be used to optimize CAC designs. The developed complex serves as a basis for creating modern monitoring systems and automated laboratory test benches for scientific and industrial applications. Automation significantly simplifies subsequent data processing and the validation of mathematical models. The solution is scalable and can be adapted for studying other types of heat exchangers.

Key words: automation; charge air cooler; experimental test bench; heat transfer surface; sensors.

Анотація. *Мета.* Розробка та впровадження сучасного апаратно-програмного комплексу для автоматизації вимірювань на лабораторному стенді дослідження охолоджувачів наддувального повітря (ОНП). Мета спрямована на подолання обмежень традиційних методик (ручний збір даних) шляхом підвищення точності, швидкості та інформативності експериментів, зокрема в режимах з вологовипаданням. *Методика.* Дослідження ґрунтується на комплексному підході: модернізація стенду шляхом дообладнання датчиками температури, тиску, вологості та витрати, та впровадження автоматизованої системи збору даних на базі контролера Arduino Nano. Це забезпечує синхронну реєстрацію параметрів з частотою 1 Гц для отримання масивів експериментальних даних. *Результати.* Створено цілісну синхронізовану систему, що забезпечує одночасний збір даних по всьому спектру параметрів. Усунено часовий розрив між вимірами, що дозволило досліджувати як стаціонарні, так і динамічні процеси. Автоматичне збереження до 180 значень на параметр за режим та статистична обробка зменшили довірчий інтервал похибки. Система мінімізувала вплив людського фактору, скоротила час експериментів та підвищила достовірність даних. *Наукова новизна.* Впровадження інтегрованої системи автоматизації на базі доступних апаратних компонентів (Arduino) з комплексною інтеграцією вимірювання вологості повітряного потоку – критично важливого параметра для дослідження теплообміну в умовах конденсації, який

раніше не враховувався в стандартних методиках. Забезпечено високочастотний синхронний збір даних для вивчення динамічних процесів у ОНП. Практична значимість. *Результати дослідження* можуть бути використані для оптимізації конструкцій ОНП. Розроблений комплекс слугує основою для створення сучасних систем моніторингу та автоматизованих лабораторних стендів для наукових і промислових застосувань. Автоматизація значно спрощує подальшу обробку даних та валідацію математичних моделей. Рішення є масштабованим і може бути адаптоване для дослідження інших теплообмінних апаратів.

Ключові слова: автоматизація; датчики; експериментальний стенд; охолоджувач наддувного повітря; поверхня теплообміну.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Ефективність сучасних двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) значною мірою залежить від параметрів повітря, що подається в циліндр [1]. У цьому контексті, охолоджувачі наддувного повітря є одними з ключових компонентів, що забезпечують необхідні умови для підвищення потужності та паливної економічності енергетичної установки з ДВЗ [2]. Дослідження теплотехнічних, гідравлічних та аеродинамічних характеристик охолоджувачів наддувного повітря (ОНП) є ключовою задачею для інженерного вдосконалення їхніх конструкцій [3–6]. Однак, експериментальні методи, що ґрунтуються на ручному зборі даних, часто супроводжуються високою трудомісткістю, недостатньою точністю та значними часовими витратами. Ці фактори ускладнюють отримання достовірних емпіричних даних, які є основою для валідації математичних моделей і розробки інноваційних інженерних рішень.

Зважаючи на зазначені обмеження, виникає об'єктивна необхідність у модернізації існуючих дослідницьких установок. Таке оновлення має бути спрямоване на впровадження автоматизованих систем вимірювань, що дозволить не лише підвищити точність фіксації параметрів, але й оптимізувати весь процес експериментального дослідження. Постає завдання розробити та реалізувати інтегроване програмно-апаратне рішення, яке, використовуючи сучасні технологічні досягнення, зможе забезпечити високу достовірність результатів і значно скоротить тривалість експериментів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Питання автоматизації експериментальних досліджень теплообмінних апаратів є актуальним напрямком [7–8]. У сучасній практиці все частіше застосовують цифрові датчики, програмовані логічні контролери та спеціалізоване програмне забезпечення, зокрема LabVIEW [9] і SCADA [10], для збору та обробки даних. Перевагами таких систем є висока точність, швидкодія, можливість віддаленого контролю та створення великих масивів даних. Для дослідження ОНП ключовим аспектом є не лише вимірювання температур і тисків, але й контроль вологості повітряного потоку, що безпосередньо впливає на інтенсивність теплообміну при конденсації пари

[11–12]. Проте, в більшості відомих публікацій описується автоматизація окремих вимірювань, тоді як комплексні рішення, що інтегрують вимірювання всіх необхідних параметрів (включаючи вологість) на базі доступних платформ типу Arduino [13–14], представлені недостатньо. Це обумовлює наукову новизну даної роботи.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Аналіз існуючих методик експериментальних досліджень теплообмінних апаратів, зокрема охолоджувачів наддувного повітря, свідчить, що попередні дослідження були зосереджені переважно на отриманні стаціонарних теплотехнічних характеристик у «сухому» режимі [15], без врахування впливу вологості повітряного потоку.

Попередні методики базувалися переважно на ручному або напівавтоматичному зчитуванні даних з мікроанометрів, манометрів та вимірювачів температури [16]. Це призводило до рознесеності вимірів у часі, вносило суб'єктивні помилки оператора та ускладнювало коректний аналіз взаємозалежних параметрів у перехідних режимах, особливо під час вивчення динамічних процесів, таких як конденсація вологи. Основними контрольованими параметрами традиційно були температура й тиск, однак для сучасних досліджень, спрямованих на оптимізацію теплообміну в умовах вологовипадання, критично важливим є також вимір відносної вологості повітряного потоку на вході та виході з ОНП.

Таким чином, нерозв'язаною частиною загальної проблеми залишалася розробка цілісного, синхронізованого апаратно-програмного комплексу, здатного забезпечити високочастотний, точний і одночасний збір даних по всьому спектру параметрів (тиск, температура, витрата, вологість), включаючи візуалізацію, для дослідження як стаціонарних, так і динамічних режимів роботи ОНП, зокрема, з ефектом вологовипадання. Запропонована в даній роботі система автоматизації вимірювань при експериментальних дослідженнях ОНП спрямована саме на подолання цих обмежень.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даного дослідження є розробка та впровадження сучасного апаратно-програмного комплексу для повноцінної автоматизації вимірювань

на існуючому лабораторному стенді для експериментальних досліджень охолоджувачів наддувного повітря.

Реалізація цієї мети направлена на подолання обмежень традиційних методик і має забезпечити підвищення точності, швидкості та інформативності експериментальних досліджень. Це досягається шляхом забезпечення синхронного збору даних з усіх вимірювальних каналів; усунення суб'єктивних помилок, пов'язаних із ручним зчитуванням та реєстрацією показань різноманітних приладів; розширення функціональних можливостей дослідного стенду через інтеграцію вимірювання вологості повітряного потоку на вході та виході з ОНП, що є важливим для дослідження теплообміну в умовах конденсації вологи; створення масштабованої основи для повної автоматизації експерименту.

Досягнення поставленої мети дозволить отримувати масиви достовірних експериментальних даних, необхідних для виведення критеріальних рівнянь з теплообміну та опору, що забезпечує можливість достовірної валідації математичних моделей і підвищення ефективності інженерних рішень у проектуванні теплообмінних апаратів.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є процес тепло- та масообміну в охолоджувачі наддувного повітря. Предметом дослідження є методика, апаратні засоби та програмне забезпечення для автоматизації вимірювальних процесів. Методи дослідження ґрунтуються на комплексному підході та включають теоретичний аналіз, експериментальні дослідження, апаратно-програмне моделювання.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Модернізація експериментального стенда для дослідження поверхонь теплообміну охолоджувачів наддувочного повітря полягала у дообладнанні його додатковими датчиками для вимірювання вологості повітряного потоку та автоматизації запису параметрів на комп'ютер. Схема лабораторно стенду приведена на рис. 1.

Стенд, створений в лабораторії кафедри ДВЗ, У та ТЕ НУК, дозволяє моделювати умови роботи поверхні теплообміну ОНП, наближені до реальних. Він дає можливість автономно регулювати параметри теплоносіїв у широкому діапазоні та забезпечує

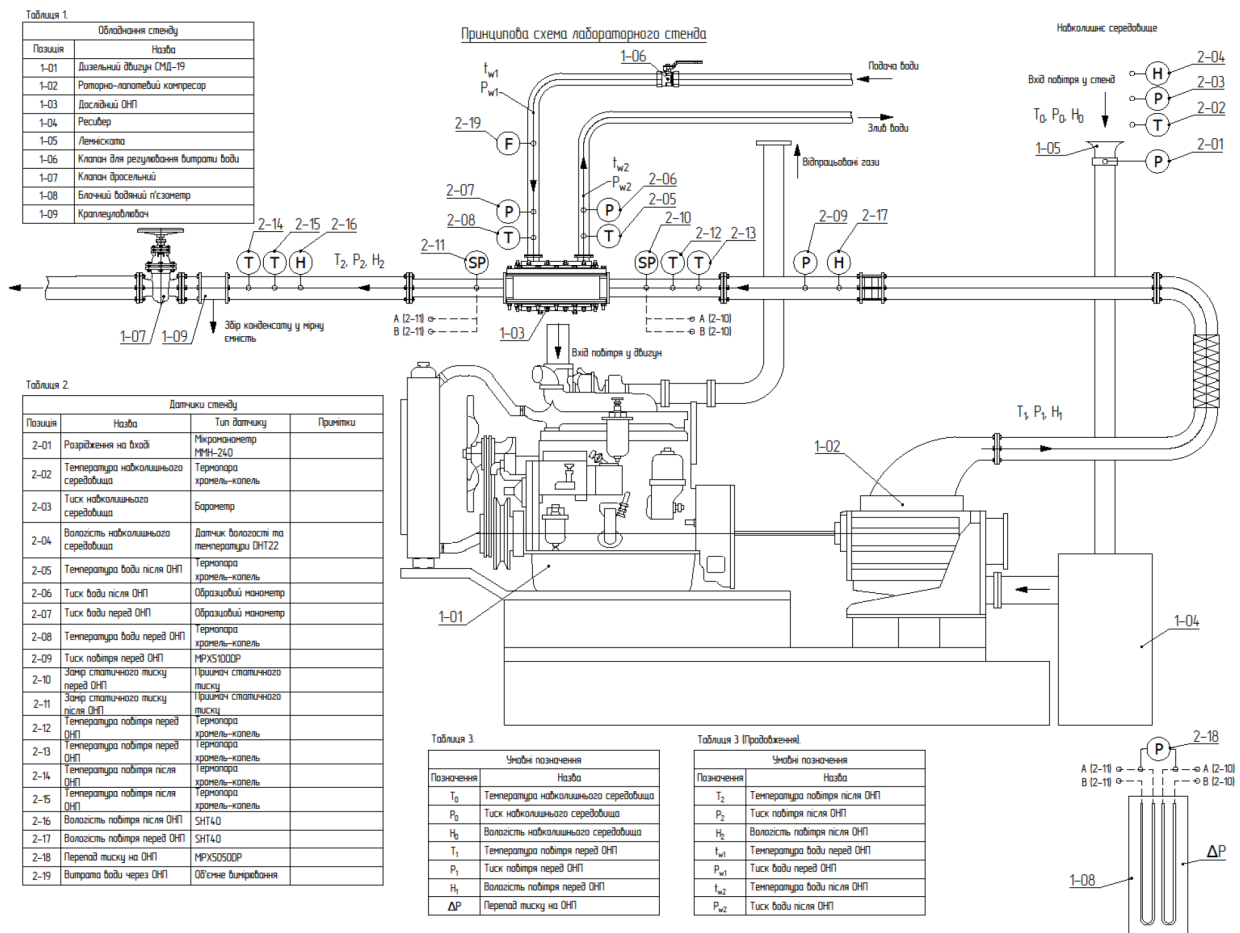


Рис. 1. Принципова схема експериментального стенду

високоточне вимірювання ключових величин. До базового стенду, призначеного для дослідження сухо-го теплообміну, додано обладнання для дослідження теплообміну з вологовипаданням.

Стиснене повітря на поверхню теплообміну подається роторно-лопасним компресором 1-02, який має прямий привід від дизельного двигуна СМД-19 1-01. Характеристики двигуна і компресора дозволяють забезпечувати стенд стисненим повітрям з абсолютним тиском 20...160 кПа та витратою від 0,1 до 0,5 кг/с. Температура повітря перед фронтом ОНП досягає 110...130 °С. Витрата повітря через дослідний ОНП регулюється шляхом зміни частоти обертання роторів компресора та регулюванням дросельного клапана 1-07.

Для вимірювання температур на стенді використовується система хромель-копелевих термопар, показання з яких зчитуються за допомогою 8-канального вимірювача температур «ОВЕН» УКТ38-Щ4, дані з нього передаються на комп'ютер через адаптер «ОВЕН» АС-2.

Витрата повітря через ОНП вимірюється за допомогою звужуючого пристрою (лемніскати) 1-05, встановленого на трубі, через яку повітря надходить до роторно лопатевого компресора. Падіння тиску вимірюється мікроманометром 2-01.

Параметри навколишнього середовища вимірюються комплексом датчиків. Тиск повітря вимірюється барометром BMP280 2-03 (Рис. 2), який дозволяє робити вимірювання з точністю $\pm 0,2$ Па.

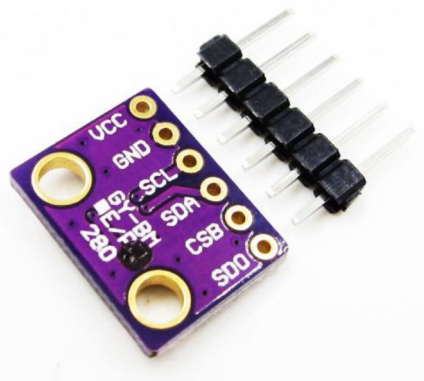


Рис. 2. Зовнішній вигляд датчику BMP280

Температура навколишнього середовища вимірюється однією з термопар системи 2-02. Вологість повітря під час дослідження ОНП вимірюється у трьох точках: вологість навколишнього повітря 2-04, вологість повітря перед 2-17 та після 2-16 ОНП. У всіх точках використовується датчик типу SHT40 (рис. 3), обраний через його швидкодію та діапазон вимірюваних температур. Датчик здатен вимірювати температуру і діапазоні $-40...+125$ °С з точністю $\pm 0,2$ °С. Вологість вимірюється в діапазоні 0...100 % з точністю $\pm 1,8$ %.



Рис. 3. Зовнішній вигляд датчика типу SHT40 у стандартному корпусі

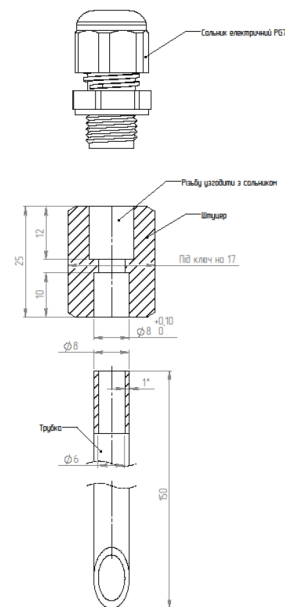


Рис. 4. Корпус датчика вологості

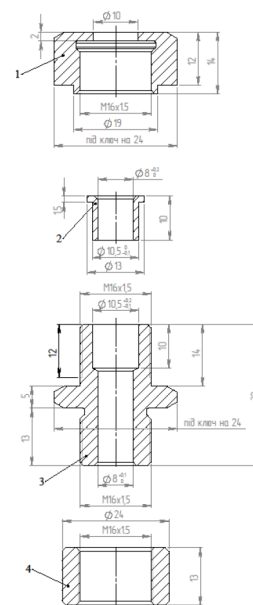


Рис. 5. Сальник датчика вологості

Для вимірювання вологості перед та після ОНП датчик монтується у корпусі ОНП 1-03 у направляючій трубці (рис. 4) за допомогою сальника (рис. 5).

Тиск повітря перед ОНП вимірюється електронним датчиком тиску MPX5100DP 2-09 (рис. 6). Цей датчик диференційного типу вимірює різницю між тиском у повітропроводі і атмосферним тиском. Результат вимірювання додається до показників барометра для отримання абсолютного тиску. Паралельно встановлено зразковий манометр для контролю правильності показників.



Рис. 6. Зовнішній вигляд датчиків MPX5100DP та MPX5050DP

Перепад тиску на ОНП вимірюється за допомогою блочного водяного п'єзометра 1-08. Для підключення п'єзометра, в потоці повітря на вході в ОНП та виході з нього встановлені приймачі статичного тиску 2-10 та 2-11. Для фіксації перепаду тиску за допомогою комп'ютера, паралельно під'єднано диференціальний датчик тиску MPX5050DP 2-18 (див. рис. 6). Датчики серії MPX5 вимірюють тиск з точністю $\pm 2,5\%$.

Тиск води перед та за ОНП вимірюється за допомогою зразкових манометрів 2-06, 2-07 та фіксується фотокамерою. Витрата води через ОНП вимірюється за допомогою витратоміра YF-DN50-S (рис. 7) 2-19 та регулюється клапаном 1-06. Витрата води підтримується незмінною протягом експерименту, тому постійний запис показників не потрібний.



Рис. 7. Зовнішній вигляд витратоміра YF-DN50-S

Вказаний витратомір може вимірювати витрату охолоджуючої води в діапазоні 10...200 л/хв з точністю $\pm 3\%$.

Для зчитування показників з витратоміра води використовується універсальний контролер протоку рідини (рис. 8)



Рис. 8. Зовнішній вигляд універсального контролера протоку рідини

Значення параметрів зібраних електронними датчиками, крім термопар, зчитуються та передаються на комп'ютер за допомогою контролера на базі Arduino Nano. Показники аналогових приладів фіксуються за допомогою фотокамери з синхронізацією за часом. Синхронізація по часу дозволяє при обробці експериментальних даних вибрати параметри режимів які відповідають одному моменту часу. До цієї плати підключені барометр BMP280, датчики вологості SHT40 (через комутатор TCA9548A для вирішення проблеми однакових адрес I2C) та диференціальні датчики тиску MPX5100DP і MPX5050DP (за допомогою модуля на базі мікросхеми ADS1115). Принципову схему підключення датчиків показано на рис. 9.

Для обробки сигналів написана програма у середовищі розробки Arduino IDE, яка включає калібрувальні коефіцієнти для кожного датчика. Для запису оброблених результатів на ПК використовується додаток Serial Port Monitoring, який зчитує інформацію з COM-порту і зберігає її у текстовому файлі для подальшого експорту в Microsoft Excel. Приклад подання інформації показано на рис. 10.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Впровадження запропонованого апаратно-програмного комплексу дозволяє суттєво підвищити якість та ефективність експериментальних досліджень. Головним результатом є створення цілісної, синхронізованої системи, яка забезпечує одночасний збір даних параметрів: температури, тиску та відносної вологості.

Ключовою перевагою системи стала ліквідація часового розриву між вимірюваннями різних параметрів, що було характерно для ручних методик збору показників аналогових приборів. Використання контролера на базі Arduino Nano забезпечує синхронну реєстрацію показників усіх підключених цифрових датчиків з частотою 1 Гц. Це дозволяє не лише отримувати

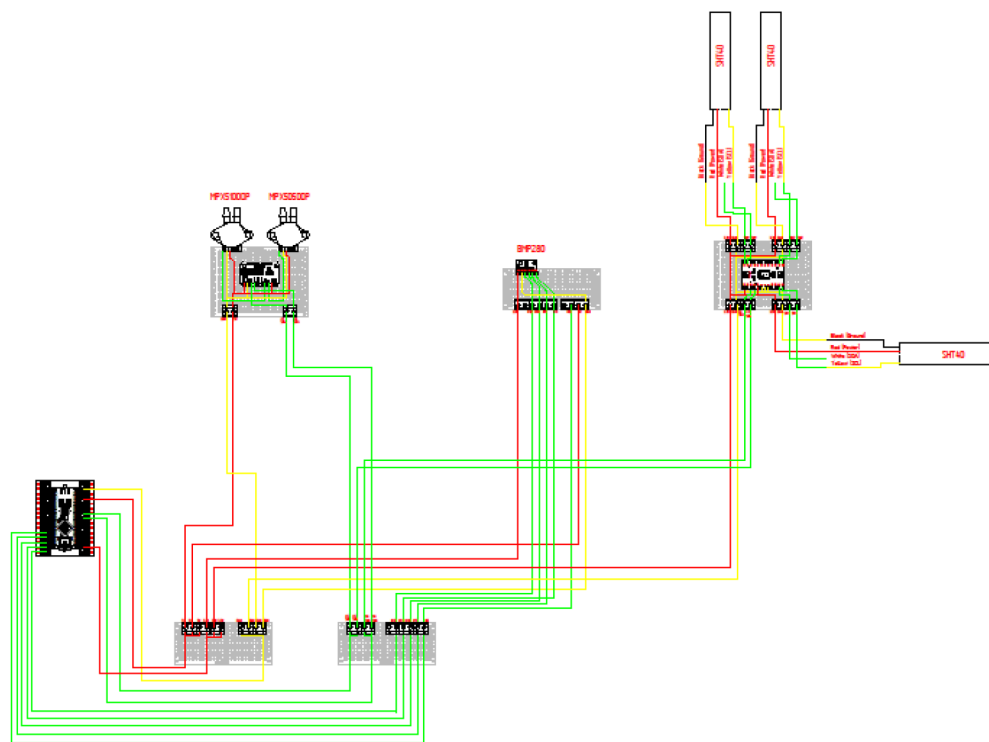


Рис. 9. Принципова схема підключення датчиків

24 15:48:49	00:00:02.0315098	Атмосферний тиск	Температура повітря	Вологість повітря	Температура перед ОНП	Вологість перед ОНП	Температура за ОНП	Вологість за ОНП	Тиск перед ОНП	Онір ОНП
24 15:48:49	00:00:02.1905608	101.18	32.65	54.40	106.62	22.56	65.11	22.72	153.77	17.91
24 15:48:50	00:00:03.3034841	101.21	32.68	54.49	106.66	22.55	65.13	22.73	153.70	17.89
24 15:48:51	00:00:04.4165486	101.20	32.67	54.56	106.69	22.58	65.15	22.70	153.82	17.85
24 15:48:52	00:00:05.5294540	101.20	32.68	54.60	106.74	22.56	65.15	22.77	153.89	17.92
24 15:48:53	00:00:06.6423857	101.20	32.67	54.68	106.77	22.61	65.18	22.78	153.74	17.92
24 15:48:54	00:00:07.7553767	101.20	32.69	54.66	106.82	22.58	65.22	22.80	153.69	17.93
24 15:48:55	00:00:08.8683548	101.19	32.68	54.62	106.86	22.51	65.23	22.74	153.74	17.93
24 15:48:56	00:00:09.9811948	101.19	32.70	54.61	106.86	22.60	65.27	22.66	153.70	17.83
24 15:48:58	00:00:11.0942180	101.19	32.71	54.54	106.94	22.55	65.27	22.72	153.64	17.84
24 15:48:59	00:00:12.2070341	101.19	32.72	54.43	106.96	22.57	65.28	22.77	153.65	17.92
24 15:49:00	00:00:13.3199575	101.19	32.70	54.32	107.00	22.59	65.30	22.76	153.71	17.89
24 15:49:01	00:00:14.4333003	101.19	32.71	54.31	107.04	22.57	65.31	22.72	153.89	17.85
24 15:49:02	00:00:15.5457802	101.19	32.73	54.27	107.04	22.56	65.32	22.73	153.86	17.94
24 15:49:03	00:00:16.6594054	101.19	32.71	54.25	107.07	22.51	65.36	22.67	153.83	17.92
24 15:49:04	00:00:17.7720765	101.18	32.73	54.29	107.12	22.50	65.36	22.59	153.85	17.90
24 15:49:05	00:00:18.8848130	101.18	32.73	54.28	107.13	22.49	65.40	22.60	153.78	18.00
24 15:49:06	00:00:19.9976765	101.18	32.73	54.39	107.21	22.57	65.44	22.72	153.80	17.88
24 15:49:08	00:00:21.1108190	101.18	32.73	54.43	107.24	22.57	65.48	22.73	153.79	17.90
24 15:49:09	00:00:22.2238631	101.18	32.75	54.52	107.28	22.55	65.46	22.68	153.73	17.88
24 15:49:10	00:00:23.3369842	101.18	32.74	54.51	107.34	22.55	65.52	22.64	153.71	17.95
24 15:49:11	00:00:24.4498098	101.18	32.74	54.55	107.38	22.46	65.52	22.72	153.61	17.90
24 15:49:12	00:00:25.5624227	101.18	32.77	54.60	107.41	22.52	65.54	22.71	153.91	17.97
24 15:49:13	00:00:26.6758683	101.18	32.77	54.61	107.45	22.51	65.58	22.68	153.72	17.90
24 15:49:14	00:00:27.7887492	101.18	32.77	54.60	107.54	22.52	65.59	22.67	153.74	17.87
24 15:49:15	00:00:28.9015584	101.18	32.77	54.60	107.56	22.50	65.63	22.60	153.78	17.96
24 15:49:17	00:00:30.0144908	101.18	32.80	54.53	107.62	22.51	65.66	22.52	153.72	17.90
24 15:49:18	00:00:31.1275594	101.18	32.78	54.42	107.65	22.41	65.66	22.54	153.80	17.96
24 15:49:19	00:00:32.2405313	101.18	32.78	54.35	107.67	22.51	65.69	22.51	153.76	17.89
24 15:49:20	00:00:33.3532111	101.18	32.79	54.35	107.71	22.49	65.72	22.52	153.89	17.89
24 15:49:21	00:00:34.4663354	101.18	32.77	54.37	107.77	22.48	65.74	22.49	153.81	17.95
24 15:49:22	00:00:35.5791064	101.18	32.79	54.42	107.80	22.44	65.75	22.58	153.70	17.86
24 15:49:23	00:00:36.6924138	101.18	32.82	54.46	107.82	22.45	65.75	22.62	153.78	17.86
24 15:49:24	00:00:37.8052565	101.18	32.81	54.48	107.86	22.47	65.78	22.60	153.77	17.91
24 15:49:25	00:00:38.9180473	101.18	32.80	54.46	107.92	22.46	65.82	22.59	153.69	17.89
24 15:49:27	00:00:40.0311104	101.18	32.80	54.47	107.95	22.45	65.82	22.53	153.78	17.91
24 15:49:28	00:00:41.1440847	101.18	32.80	54.50	107.99	22.49	65.88	22.57	153.75	17.96

Рис. 10. Приклад подання інформації при записі показників

сталі стаціонарні характеристики, але й аналізувати динамічні перехідні процеси, такі як можливе випадання конденсату при роботі охолоджувача.

Визначення похибки вимірювання температур здійснюється з урахуванням характеристик вимірювального обладнання та умов проведення експерименту. Для реєстрації температур у контрольних точках використовуються хромель-копелеві термопари з похибкою вимірювання $\pm 0,05$ °C, підключені до пристрою контролю температур «ОВЕН» УКТ-38Щ4 та мережевого адаптера АС-2. Основна приведена похибка приладу становить $\pm 0,5$ % від показів,

не враховуючи похибку самих датчиків. Висока роздільна здатність апаратури дає змогу фіксувати температуру з точністю до $\pm 0,1$ °C. Калібрування термопар за допомогою еталонного ртутного термометра з похибкою $\pm 0,05$ °C забезпечує підвищення точності вимірювань. Температура повітря до та після ОНП вимірюється двома термопарами, встановленими в одній площині, що забезпечує контроль правильності показів і дозволяє оперативно виявляти можливі відхилення або нестабільність вимірювань.

Кожен експериментальний режим підтримувався протягом 3 хвилин, що при інтервалі між

послідовними вимірюваннями 1 секунд, забезпечує автоматичне збереження даних та оперативність фіксації усіх параметрів для підвищення достовірності результатів, що дозволяло отримати 180 значень для кожного параметра. Обробка множинних вимірювань дала змогу зменшити довірчий інтервал відхилення від істинного значення у порівнянні з похибкою одичного вимірювання.

Так, за прийнятої довірчої ймовірності оцінки $P = 0,9$ і за 180-кратному вимірі температури з похибкою в кожному результаті $0,75\text{ }^{\circ}\text{C}$ довірна величина відхилення від справжнього значення становитиме:

$$\Delta t \leq 1,67 \frac{0,75}{\sqrt{180}} = 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Для зменшення впливу нерівномірності температурного поля, місце вимірювання було розташовано на відстані 1,2 м від заднього фронту ОНП, а термопари розташовано таким чином, щоб охопити локальні варіації температури в межах однієї площини та забезпечити отримання репрезентативного середнього значення. Максимальна різниця отриманих середніх значень температури в контрольованих точках не перевищувала $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким чином, комплексний підхід до організації вимірювань та ретельний аналіз отриманих даних дозволив зменшити сумарну абсолютну похибку визначення температури повітря у досліджуваній системі.

Похибки визначення статичних тисків та їхніх перепадів при використанні зазначених приймачів тиску і датчиків серії MPX становлять $\pm 2,5\%$, що відповідає їхньому номінальному класу точності. Однак, попереднє калібрування за допомогою еталонних манометрів дає змогу зменшити похибку до рівня, який не перевищує $0,5\%$ від вимірюваних значень для наявних швидкостей повітряного потоку.

Відповідно до використаної методики, витрата повітря, визначена через звукувальний пристрій, має похибку $1,8\%$.

Похибка вимірювання витрати охолоджуючої води складає 3% .

Практична експлуатація підтвердила коректність роботи комплектуючих у штатних умовах. Водночас було виявлено низку особливостей, що потребують урахування під час експериментальних досліджень. Зокрема, похибки датчиків SHT40 зростають біля меж діапазону вологості, а диференціальні датчики MPX5 характеризуються підвищеною відносною похибкою, що вимагає попереднього калібрування перед кожним експериментом. Крім того, витратомір YF-DN50-S потребує періодичної перевірки для відповідності заданій точності.

ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень розроблено та впроваджено сучасний апаратно-програмний комплекс для автоматизації вимірювань теплотехнічних, гідравлічних та аеродинамічних параметрів охолоджувачів наддувного повітря на дослідному стенді.

Запропонована автоматизована система на базі контролера Arduino Nano забезпечує синхронний збір даних із частотою 1 Гц , що дозволяє досліджувати як стаціонарні, так і динамічні режими роботи ОНП, включаючи процеси вологовипадання.

Запропоноване рішення дозволило мінімізувати вплив суб'єктивного людського фактору та скоротити час проведення експериментів. Автоматизація реєстрації та збереження даних у єдиному цифровому форматі значно спростила подальшу математичну обробку результатів і підвищила їх достовірність.

Проведена модернізація створила основу для подальшого вдосконалення стенду. Розроблений комплекс може бути використаний як основа для створення сучасних систем моніторингу та автоматизованих вимірювальних модулів для наукових застосувань, орієнтованих на дослідження та вдосконалення теплообмінних апаратів, що застосовуються в системах наддуву ДВЗ.

REFERENCES

- [1] Nalivayko, V. S., Tymoshevskiy, B. H., & Tkachenko, S. H. (2015). *Sudnovi dvyhuny vnutrishnyoho zghoriannia* [Marine internal combustion engines]. [Textbook]. 332 p. [in Ukrainian].
- [2] Moshentsev, Yu. L., Gogorenko, O. A., & Minchev, D. S. (2020). *Sistemy okholodzhennia ta teploobminni aparaty dvyhuniv vnutrishnoho zghoriannia* [Cooling systems and heat exchange apparatuses of internal combustion engines] [Study guide]. 234 p. [in Ukrainian].
- [3] Ikegami, Y., Mutair, S., & Kawabata, Y. (2015). Experimental and numerical investigations on plate-type heat exchanger performance. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 5, 92–98.
- [4] Jiang, H., Wang, H., Jiang, F., Hu, J., & Hu, L. (2024). Research on the optimization of a diesel engine intercooler structure based on numerical simulation. *Processes*, 12, 276.
- [5] Shah, R. K., & Sekulic, D. P. (2003). *Fundamentals of heat exchanger design*. John Wiley & Sons. [Textbook]. 941 p.
- [6] Kailkhura, G., Reimann, P., Das, S., & Gerling, P. (2022). Numerical and experimental study of a novel additively manufactured plate-fin heat exchanger. *Energies*, 15(2), 598.
- [7] Diaz-Choque, M., Chaccara-Contreras, V., Aquije-Cardenas, G., & Samanamud-Loyola, O. (2022). Supervision, control and data acquisition system of a heat exchanger. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 28(4), 1848–1857.
- [8] Payet, P., et al. (2024). Design of a highly affordable and reliable data acquisition system (DL2C) based on open-source hardware/software. *Preprints*.

- [9] LabVIEW User Manual. (2025). National Instruments Corporation. [Textbook]. 1843 p.
- [10] SCADA training manual. (2019). Siemens Industry Training Department.
- [11] Basler, I., et al. (2021). Experimental Investigation of the Pressure Drop during Water Condensation inside Charge Air Coolers (SAE Technical Paper 2021-01-0202). *SAE International*.
- [12] Choi, J., et al. (2017). An Experimental and Computational Analysis of Water Condensation inside Charge Air Coolers. *ASME 2017 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*, V001T03A011.
- [13] Goyal, D., Kumar, R., & Singh, B. (2024). Design and development of Arduino-based four-channel data acquisition system with digital temperature control. *International Journal of Thermophysics*.
- [15] Tchio, G. M. T., et al. (2024). Development of a low-cost data acquisition system for photovoltaic monitoring using Arduino. *TEM Journal*, 13(3), 2327–2340.
- [16] Apaydin, S., & Kose, R. (2021). Experimental comparison of air cooler designs in a heavy-duty diesel engine. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 5(3), 199–205.
- [17] Kuznetsov, V., Gogorenko, O., & Kuznetsova, S. (2021). The development of long-range heat transfer surfaces for marine diesel engine charge air coolers. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, 65, 51–57.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Наливайко, В. С., Тимошевський, Б. Г., & Ткаченко, С. Г. (2015). Суднові двигуни внутрішнього згоряння : Підручник. 332 с.
- [2] Мошенцев, Ю. Л., Гогоренко, О. А. & Мінчев Д. С. (2020). Системи охолодження та теплообмінні апарати двигунів внутрішнього згоряння. Навчальний посібник. 234 с.
- [3] Ikegami, Y., Mutair, S., & Kawabata, Y. (2015). Experimental and numerical investigations on plate-type heat exchanger performance. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 5, 92–98.
- [7] Jiang, H., Wang, H., Jiang, F., Hu, J., & Hu, L. (2024). Research on the optimization of a diesel engine intercooler structure based on numerical simulation. *Processes*, 12, 276.
- [8] Shah, R. K., & Sekulic, D. P. (2003). Fundamentals of heat exchanger design. *John Wiley & Sons*. [Textbook]. 941 p.
- [9] Kaikhura, G., Reimann, P., Das, S., & Gerling, P. (2022). Numerical and experimental study of a novel additively manufactured plate-fin heat exchanger. *Energies*, 15(2), 598.
- [10] Diaz-Choque, M., Chaccara-Contreras, V., Aquije-Cardenas, G., & Samanamud-Loyola, O. (2022). Supervision, control and data acquisition system of a heat exchanger. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 28(4), 1848–1857.
- [11] Payet, P., et al. (2024). Design of a highly affordable and reliable data acquisition system (DL2C) based on open-source hardware/software. Preprints.
- [12] LabVIEW User Manual. (2025). National Instruments Corporation. [Textbook]. 1843 p.
- [13] SCADA training manual. (2019). Siemens Industry Training Department.
- [14] Basler, I., et al. (2021). Experimental Investigation of the Pressure Drop during Water Condensation inside Charge Air Coolers (SAE Technical Paper 2021-01-0202). *SAE International*.
- [15] Choi, J., et al. (2017). An Experimental and Computational Analysis of Water Condensation inside Charge Air Coolers. *ASME 2017 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*, V001T03A011.
- [16] Goyal, D., Kumar, R., & Singh, B. (2024). Design and development of Arduino-based four-channel data acquisition system with digital temperature control. *International Journal of Thermophysics*.
- [17] Tchio, G. M. T., et al. (2024). Development of a low-cost data acquisition system for photovoltaic monitoring using Arduino. *TEM Journal*, 13(3), 2327–2340.
- [18] Apaydin, S., & Kose, R. (2021). Experimental comparison of air cooler designs in a heavy-duty diesel engine. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 5(3), 199–205.
- [19] Kuznetsov, V., Gogorenko, O., & Kuznetsova, S. (2021). The development of long-range heat transfer surfaces for marine diesel engine charge air coolers. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, 65, 51–57.

© Гогоренко О. А., Немченко А. В.

Дата надходження статті до редакції: 11.11.2025

Дата затвердження статті до друку: 01.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0