



**ПЛОВДИВСКИ УНИВЕРСИТЕТ
„ПАИСИЙ ХИЛЕНДАРСКИ“
ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА „ЕЛЕКТРОНИКА,
КОМУНИКАЦИИ
И ИНФОРМАЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ“**



маг. инж. Анатолий Росенов Парушев

**АВТОМАТИЗИРАНЕ НА ЛАБОРАТОРИЯ ПО ЕКОЕНЕРГИЙНИ
ТЕХНОЛОГИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
„ДОКТОР“

Област на висше образование:

5. Технически науки

Професионално направление:

5.3. „Комуникационна и компютърна техника“

Докторска програма:

„Автоматизация на области от нематериалната сфера
(медицина, просвета, наука, административна дейност и др.)“

Научен ръководител:

проф. д-р инж. Румен Костадинов Попов

Пловдив, 2025 г.

Дисертационният труд е с обем 224 страници , включително 81 фигури, 19 таблици, оформени в увод, 5 глави, общи изводи, научно-приложни и приложни приноси, списък с използваните обозначения и съкращения, списък с публикации на автора. Списъкът на цитираната литература включва 139 заглавия.

Означенията на формулите, фигурите и таблиците в автореферата съвпадат с тези в дисертационния труд на заседание на научно жури.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на заседание на разширения катедрен съвет на катедра „ЕЛЕКТРОНИКА, КОМУНИКАЦИИ И ИНФОРМАЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ“ при ПЛОВДИВСКИ УНИВЕРСИТЕТ „ПАИСИЙ ХИЛЕНДАРСКИ“ на 15.10.2025 г., Протокол № 81.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 05.12. 2025 г. от

Материалите по защитата на докторанта са на разположение на интересувашите се в канцеларията на Физико-технологичния факултет при ПЛОВДИВСКИ УНИВЕРСИТЕТ „ПАИСИЙ ХИЛЕНДАРСКИ“, стая 214.

Научно жури: проф. д-р Росица Желязкова Донева
проф. д-р инж. Атанаска Димитрова Босакова-Арденска
доц. д-р инж. Севил Аптула Ахмед-Шиева
доц. д-р инж. Сотир Иванов Сотиров
доц. д-р инж. Владимира Кръстева Ганчовска

Автор: маг. инж. Анатолий Росенов Парушев
Заглавие: **АВТОМАТИЗИРАНЕ НА ЛАБОРАТОРИЯ ПО
ЕКОЕНЕРГИЙНИ ТЕХНОЛОГИИ**

Тираж: 30 бр.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

В епохата на глобални трансформации в енергийния сектор и нарастваща дигитализация на инженерните системи, необходимостта от устойчиви, автоматизирани и достъпни технологични решения е по-осезаема от всякога. Натискът за преминаване към зелена енергия и интелигентно управление на ресурси е съпроводен от нуждата за модернизиране на образованието, научните изследвания и инженерната практика.

Автоматизацията на лабораторната дейност е съвременен отговор на тези нужди. Системите, базирани на сензори, изпълнителни механизми, програмируеми контролери и софтуерни платформи, позволяват прецизно управление, гъвкаво конфигуриране и дистанционен достъп до лабораторно оборудване.

Възможността да се работи с реални обекти в реално време – независимо от географското местоположение на потребителя – е ключова за изграждането на нов модел на инженерна подготовка. Освен образователната стойност, подобни системи притежават и изследователски потенциал. Те позволяват натрупване на емпирични данни, провеждане на серии от експерименти с контролирани параметри, както и повторемост и проследимост на резултатите – изисквания, характерни за съвременната научна методология.

Комбинацията от възможности за автоматично събиране, обработка и визуализация на данни превръща лабораторията не просто в място за демонстрация, а в активна среда за откриване и валидиране на нови знания.

Изграждането на такива системи предполага интердисциплинарен подход, обединяващ знания от електроника, комуникационни технологии, програмиране, енергетика и инженерна педагогика. Това съчетание е необходимо, за да се създаде функционална, устойчива и достъпна система, която може да бъде интегрирана както в учебен, така и в приложен научен контекст.

В съвременните условия, когато обучението все по-често преминава в хибриден или дистанционен режим, значението на автоматизирани лаборатории с отдалечен достъп се увеличава. Те се превръщат в алтернатива на класическите лабораторни занятия, като осигуряват достъп до реално оборудване и процеси през интернет, без компромис с качеството на обучението. Такива решения допринасят за по-равноправен достъп до технологични ресурси, независимо от физическата локация или финансовите възможности на образователната институция.

Настоящата дисертация е мотивирана от нуждата за създаване на устойчива, мащабируема и функционална лабораторна система в сферата на екоенергийните технологии, която да отговаря на съвременните изисквания за автоматизация, дигитализация и отворен достъп.

Цел на дисертационния труд:

Целта на настоящия дисертационен труд е разработването, изграждането и експерименталната валидация на автоматизиран лабораторен стенд с възможности за дистанционно управление, предназначен за обучение и изследване на топлинни процеси. Системата следва да бъде мащабируема, надеждна и приложима както в образователна, така и в научно-изследователска среда.

Задачи за постигане на целта:

1. Да се анализира съществуващото състояние в областта на средствата и технологиите за изграждане на автоматизирани лабораторни системи, подходящи за провеждане на дистанционно обучение.
2. Да се проектира и реализира хардуерна архитектура на лабораторен стенд с възможност за дистанционно управление и наблюдение в реално време.
3. Да се разработи комуникационна инфраструктура, базирана на индустриални протоколи (Modbus, TCP/IP) и съвременни IoT решения.
4. Да се създаде и конфигурира софтуерна система за съхранение, визуализация, контрол и анализ на експерименталните данни, използвайки среда като Node-RED.
5. Да се създаде методика за измерване и анализ на скорост, масов разход и термодинамични параметри на въздушно течение в затворен канал.
6. Да се проведат експериментални изследвания на скоростта и обемния разход на въздушно течение в затворен канал при вариране на производителността на вентилатора.
7. Да се определи специфичният топлинен капацитет, енталпията и вътрешна енергия на въздушния поток при различни режими на работа.

Използвани методи и средства на изследване:

Дисертацията прилага експериментални методики за определяне на профила на скоростта и разхода на въздух чрез тръба на Пито върху стенд SR1162E, с управление и дистанционен достъп през Modbus RS-485/TCP/IP и визуализация в Node-RED.

Внедряване и практическа приложимост

Разработената система осигурява устойчива платформа за дистанционно обучение и изследвания, оптимизира лабораторната дейност, намалява разходите и гарантира равнопоставен достъп до реални експерименти и данни.

Публикации по темата

Резултатите от дисертационния труд са публикувани в 6 научни статии: 1 в сборник на XXXIII International Scientific Conference Electronics ET 2024, индексирани в Scopus, 5 в сборници на международните конференции INTED 2023 и ICERI 2022. Всички публикации са в съавторство с научния ръководител.

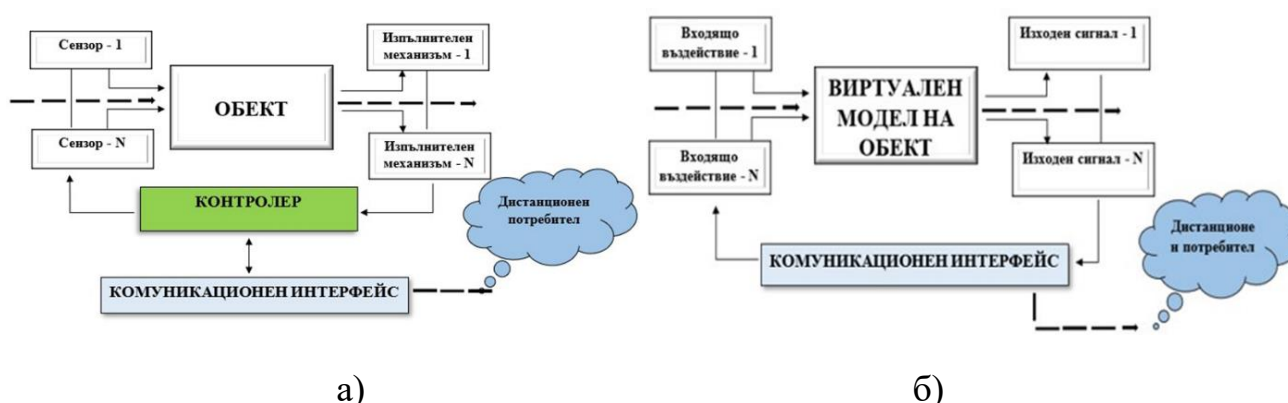
Обем и структура на дисертационния труд

Дисертационният труд е с обем 224 страници, включително 81 фигури, 19 таблици, оформени в увод, 5 глави, общи изводи, научно-приложни и приложни приноси, списък с използваните съкращения и обозначения, списък с публикациите на автора. Списъкът на цитираната литература включва 139 заглавия.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ОБЗОР НА СРЕДСТВАТА ЗА АВТОМАТИЗИРАНЕ НА ЛАБОРАТОРИИ В ОБЛАСТТА НА ЕКОЕНЕРГИЙНИТЕ ТЕХНОЛОГИИ.

В глава първа от дисертационния труд е направено литературно проучване по разглежданата проблематика. Представен е анализ на съществуващото състояние и тенденции в развитието на дистанционни и виртуални лаборатории. На фигура 1 са визуализирани блоково обобщените схеми на дистанционен и виртуален лабораторен стенд.



Фигура 1.1 Обобщени схеми на дистанционен а) и виртуален б) лабораторен стенд

Конкретизирани са особеностите на основните архитектурни решения, като се акцентира върху хардуерните и софтуерните платформи, осигуряващи мониторинг и управление на процесите. Разгледани са подробно системите базирани на програмируеми логически контролери (PLC) и специализираните микроконтролери. Направен е подробен анализ на протоколите и вътрешно системните интерфейси за комуникация. В таблица 1.1 е представен сравнителен анализ между различни софтуерни платформи.

ТАБЛИЦА 1.1 Сравнителен анализ на някои софтуерни платформи

Платформа	Основна функционалност	Приложения	Интеграция	Сигурност
SCADA	Наблюдение и контрол на промишлените процеси	Промислени сектори: енергетика, водоснабдяване	Интеграция с PLC, HMI, MES и др.	Вградени механизми за защита от кибератаки
Системи за менджмънт на енергия	Мониторинг и управление на енергийни ресурси и системи	Сгради, промишлени обекти, обществени сгради	Интеграция със сензори, счетоводни системи и др.	Защита на данните и комуникациите
Платформи за Интернет на нещата	Събиране, обработка и анализ на данни от свързани устройства	Индустрия 4.0, умни градове, здравеопазване	Интеграция с различни IoT устройства	Криптиране на данните и идентификация на устройства

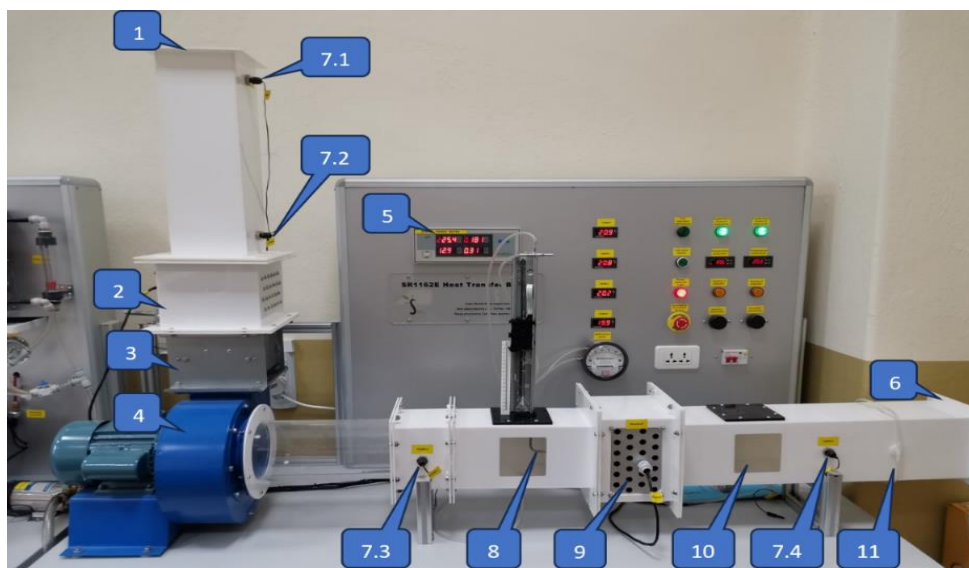
Платформа	Основна функционалност	Приложения	Интеграция	Сигурност
Софтуер за енергиен анализ	Мониторинг и анализ на енергийната консумация	Сгради, индустриални обекти, обновяеми източници	Интеграция със счетоводни системи и сензори	Разрешаване на достъпа и криптиране на данните
Системи за отдалечен мониторинг и контрол	Наблюдение и контрол на разпределени системи	Енергийни инсталации, преносни мрежи, транспорт	Интеграция със сензори, PLC, IoT устройства	Контрол на достъпа и шифроване на комуникациите

Анализирани са установените ограничения от проведеното литературно проучване. За постигане на поставената цел са дефинирани задачите на дисертационния труд. Подчертана е актуалността на темата, произтичаща от необходимостта за повишаване на достъпа до специализирано оборудване и за намаляване на разходите при реализиране на експерименти, което е в унисон с политиките на ЕС за дигитализация и зелена трансформация.

От направения обзор се констатира, че най-неблагоприятно влияние върху ефективността на дистанционните лаборатории оказват липсата на интеграция между хардуер и софтуер, недостатъчната интерактивност и ограничените възможности за симулация на реални процеси. Обръща се особено внимание на спазването на стандартите за сигурност, както и на използването на съвременни методи и системи за визуализация и дистанционен контрол на експериментите.

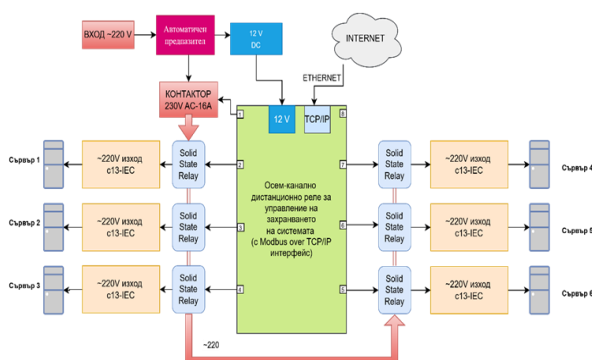
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА

В глава втора от дисертационния труд е разработена методика за провеждане на експериментални изследвания. Тя включва както избор и конфигуриране на реална апаратура, така и разработка на подходяща архитектура за автоматизация и дистанционен достъп. Представен е стендът SR1162E за пренос на топлина (фигура 2.1), използван като основна експериментална установка и са описани неговите компоненти.

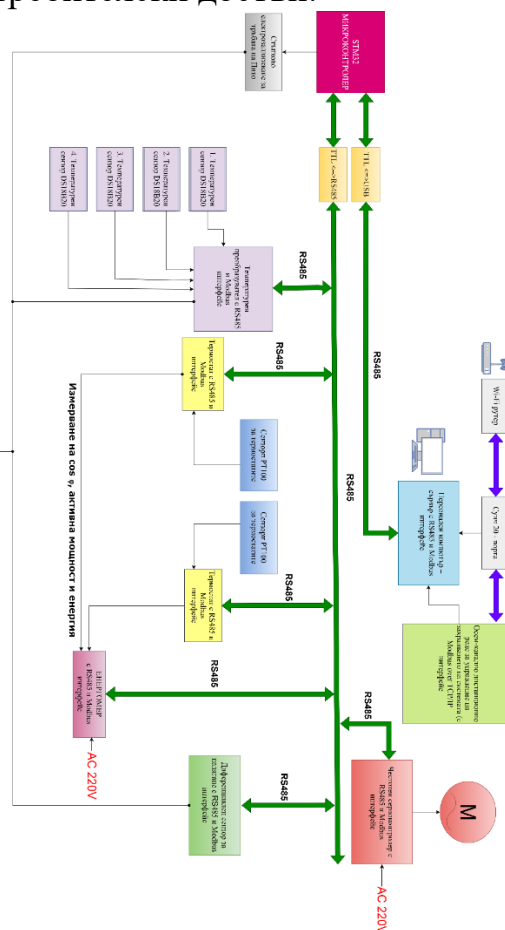


Фигура 2.1 Стенд SR1162E за пренос на топлина

За нуждите на дистанционното управление е изградена блокова схема за дистанционно управление на захранването (фигура 2.2), както и блокова схема на автоматизиран стенд SR1162E (фигура 2.3), в която ясно са разграничени отделните функционални модули – измервателни сензори, управляващ контролер, комуникационен интерфейс и потребителски достъп.

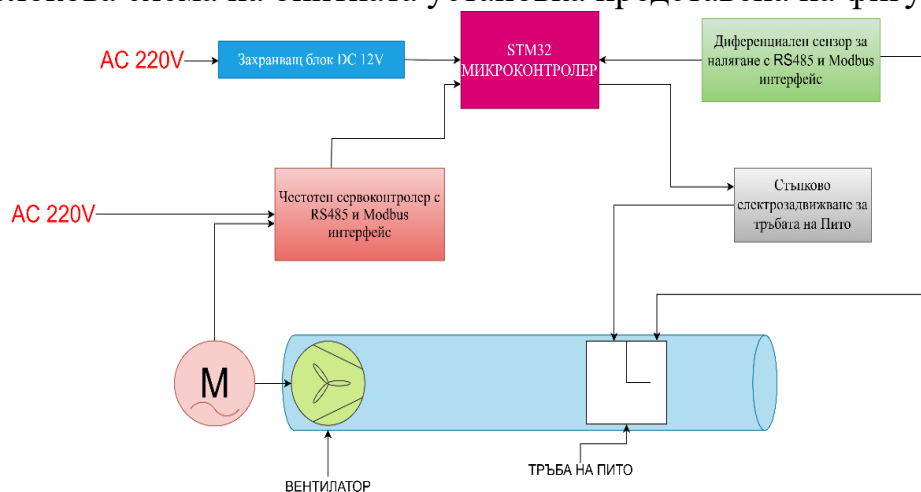


Фигура 2.2 Блокова схема на дистанционно управление на захранването



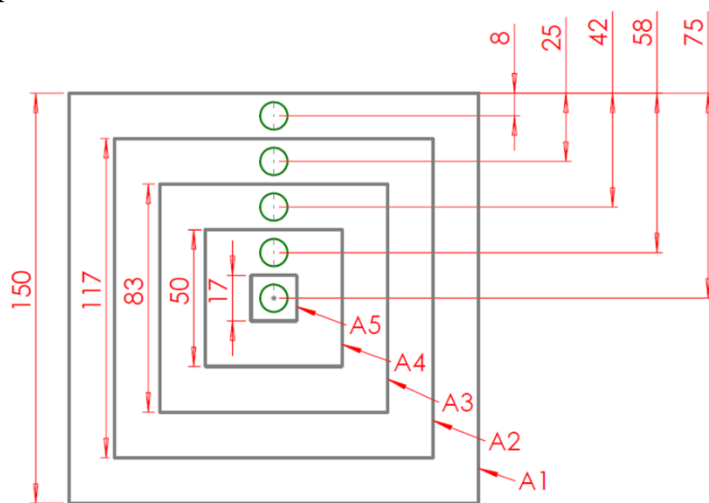
Фигура 2.3 Блокова схема на автоматизиран лабораторен стенд

Представени и описани подробно са две методики. Първата в свързана с определянето на профила на скоростта на въздушния поток в правоъгълна тръба. Подробно представени са методите за измерване на скоростта, като е реализирана блокова схема на опитната установка представена на фигура 2.4.



Фигура 2.4 Блокова схема на опитната установка

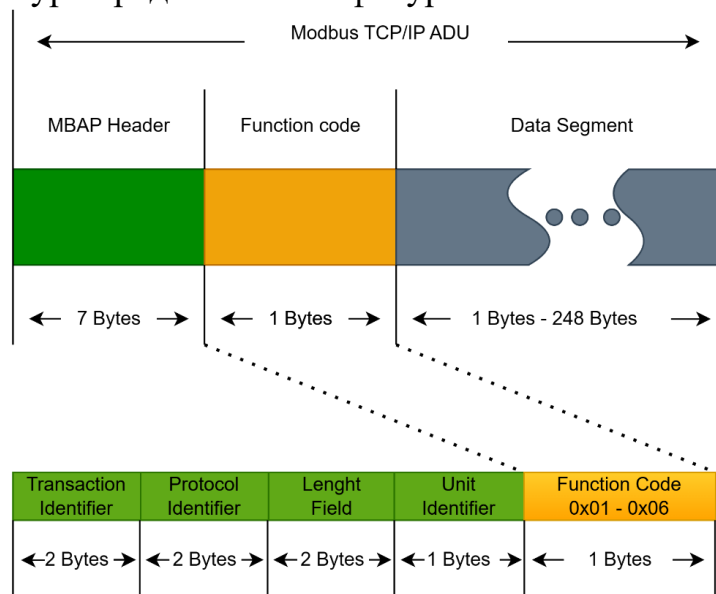
Поетапно представени са съставните елементи на системата, като същевременно са анализирани и дефинирани формулите касаещи определянето на плътността на въздуха и обемните разходи за съответните сечения. Блоквата схема на разпределението на сеченията за измерване на въздушния поток е представена на фигура 2.5.



Фигура 2.5 Схема на разпределение на сеченията за измерване на въздушния поток

Втората методика е свързана с определянето на специфичния топлинен капацитет на въздуха при постоянно налягане. В нея акцент се поставя на точността при измерването на масовия разход и температурната разлика на въздушния поток, като чрез енергийния баланс се осигурява надеждно изчисляване на топлинния капацитет.

Направен е анализ на методите използвани за дистанционен достъп и контрол. Описан е интерфейса Modbus over TCP/IP и е разгледана неговата рамка за данни и архитектура представени на фигура 2.6.



Фигура 2.6 Modbus TCP/IP рамка за данни

В заключение, в глава втора е представена цялостна експериментална методика, която съчетава реален лабораторен стенд и допълнителни установки за изследване на въздушни потоци, автоматизация чрез програмируеми контролери

и дистанционен достъп. Това създава предпоставки за ефективно изследване на топлинни процеси и валидиране на модели, използвани във виртуални лабораторни среди

2.1 ИЗВОДИ ПО ГЛАВА 2

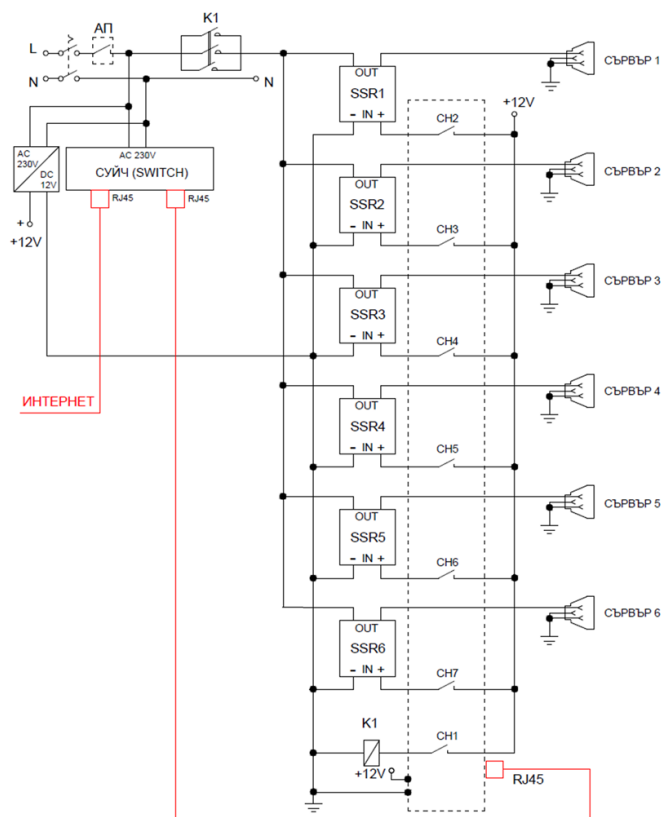
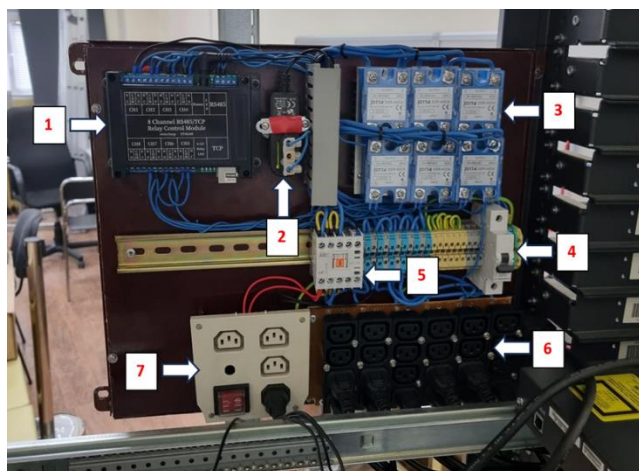
Проведените изследвания във втора глава показват, че стендът SR1162E представлява надеждна и високоефективна платформа за изучаване на топлинни процеси, осигуряваща необходимата точност на измерванията благодарение на вградените сензори и интегрираните системи за регулиране. Методиките за измерване на профила на скоростта и разхода на въздушния поток доказва своята прецизност и надеждност, като позволяват изчисляване на основни параметри с висока инженерна стойност. Наред с това, изследването на дистанционния достъп и приложението на комуникационни протоколи и интелигентни контролери показва, че стендът може да бъде модернизиран и адаптиран към съвременни изисквания, което го превръща в ценен инструмент не само за обучение и научни цели, но и за реални индустриални приложения.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТВАНЕ НА АВТОМАТИЗИРАН СТЕНД С ОТДАЛЕЧЕН ДОСТЪП

В глава трета от дисертационния труд е представена разработката на автоматизиран лабораторен стенд с възможност за дистанционно управление и мониторинг. Структурата на стенда е организирана в отделни подсистеми, всяка от които е проектирана да изпълнява специфични функции и да бъде интегрирана в общата архитектура на управление.

3.1 Система за дистанционно управление на захранването

За целите на дисертацията бе проектиран и реализиран макет представен на фигура 3.1, осигуряващ дистанционно включване и изключване на сървър (сървърите), върху който ще бъде разположен основният софтуерен продукт осигуряващ визуално представяне на всички необходими данни от измерванията. Разработената система предоставя възможност за прецизно управление на захранването чрез Modbus команди, които се подават към осем-каналното дистанционно реле за управление на електрозахранването.

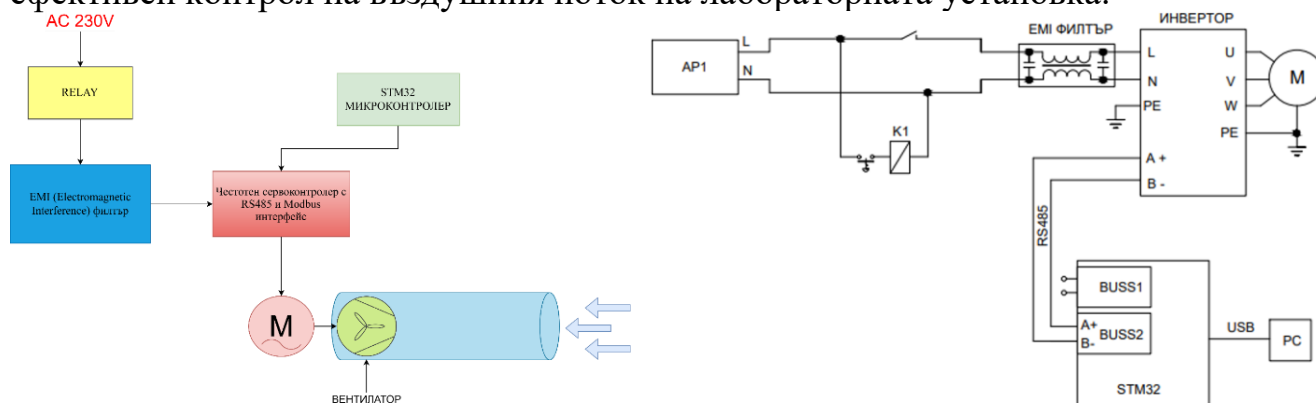


Фигура 3.1 Конструкция и принципна електрическа схема на системата за дистанционното управление на захранването: (1. Осем-канално дистанционно реле за управление на захранването; 2. Захранващ блок 12 V DC; 3. Solid-state relay; 4. Автоматичен предпазител; 5. Контактор 230V AC 16A; 6. Изходни захранващи съединители (с13-IEC); 7. Постоянно захранване 230 V)

3.2 Оборудване на стенда

А. Система за вентилация

Системата за вентилация на стенда е визуализирана блоково и чрез принципната си електрическа схема на фигура 3.2. Тя е проектирана да осигури ефективен контрол на въздушния поток на лабораторната установка.



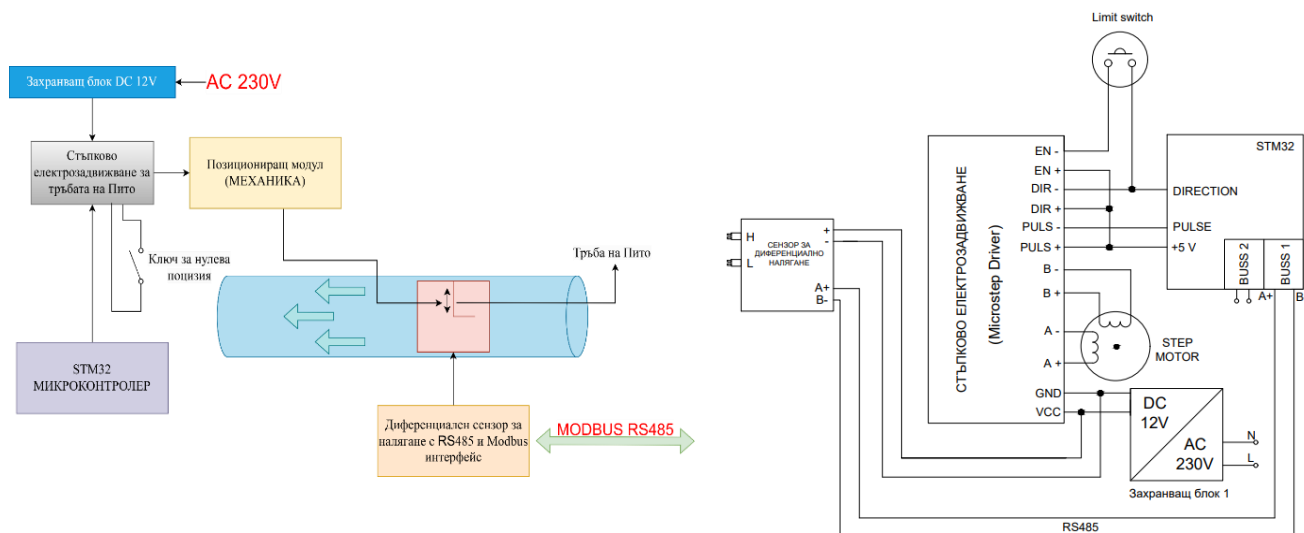
Фигура 3.2 Блокова и принципна електрическа схема на системата за вентилация

В дисертационния труд са описани всички съставни елементи на системата. Представени са техните характеристики в табличен вид, като особено

внимание е обърнато на асинхронния електродвигател и честотното сервозадвижване.

В. Система за измерване на въздушен поток

Системата за измерване на въздушния поток на лабораторния стенд и принципната и електрическата схема са представени на фигура 3.3. Тя е проектирана да осигури контрол на въздушния поток чрез използване на тръба на Пито, като данните от нея се отчитат и предават към микроконтролера посредством диференциалния сензор за налягане, който е с Modbus RS485 интерфейс.

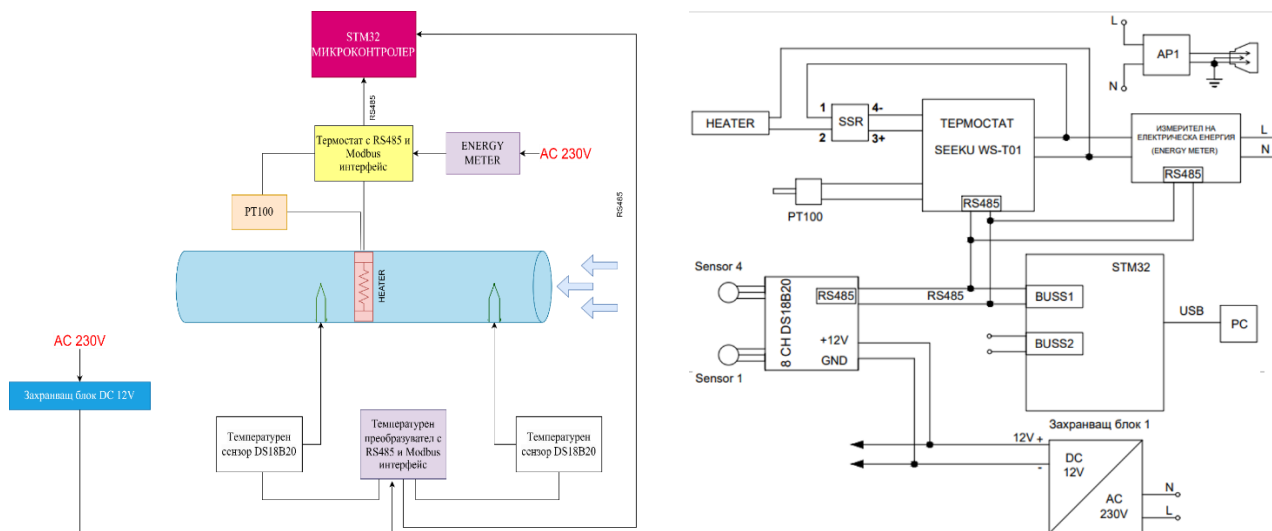


Фигура 3.3 Блокова и принципна електрическа схема на системата за измерване на въздушния поток

Разгледани са съставните елементи на системата, като е направен анализ за избора на конкретните хардуерни компоненти. Проектиран е 3D модел, който е отпечатан на 3D принтер Bambu Lab P1S, като основната му функция е да осигури плавно и контролирано предвижване на тръбата на Пито в предварително зададени точки.

С. Система за температурен контрол и разход на енергия

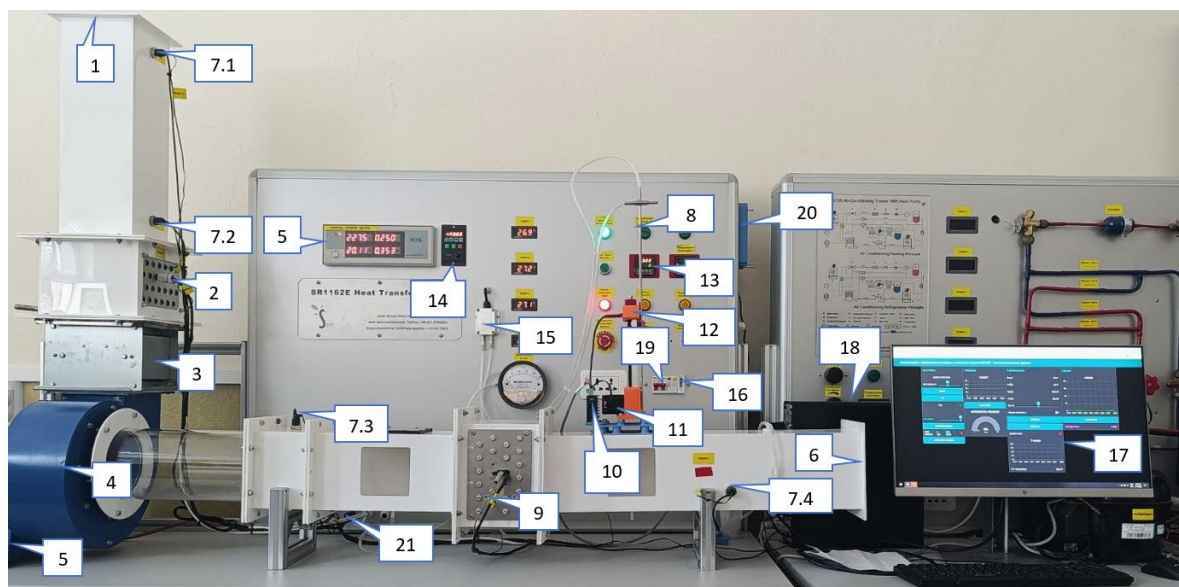
Системата е представена блоково на фигура 3.4, като е предназначена за прецизен температурен контрол и енергиен мониторинг с цел експериментално изследване на процесите на топлопренос в лабораторния стенд. Управлението и събирането на данни се осъществява чрез STM32 микроконтролер, а комуникацията между отделните елементи се реализира посредством RS485 шина с Modbus протокол.



Фигура 3.4 Блокова и принципна електрическа схема на системата за за температурен контрол и измерване на разхода на енергия

Към системата е интегриран и температурен модул с осем канала (8CH DS18B20), който събира данни от до осем температурни сензора (Sensor 1 – Sensor 4 показани) и ги предава към STM32 по същата RS485 шина. Всички компоненти от нисковолтовата част са захранени от стабилизирания източник 12V DC, преобразуван от 230V AC чрез захранващ блок 1. Микроконтролерът STM32 осъществява събиране, обработка и предаване на данните към компютър чрез USB интерфейс за целите на визуализация, конфигурация и архивиране.

С оглед на изложените подсистеми и техните функции на фигура 3.4 – А е представена цялостната конфигурация на лабораторния стенд след неговото автоматизиране с всички разгледани хардуерни компоненти. В този завършен вид, след извършеното доработване, стендът е реализиран като напълно функционираща лабораторна система, позволяваща дистанционно управление, мониторинг на параметри в реално време и провеждане на експерименти с висока точност и надеждност.



Фигура 3.4 – А. Цялостна конфигурация на лабораторния стенд след доработване и автоматизиране

КОМПОНЕНТИ НА СИСТЕМАТА:

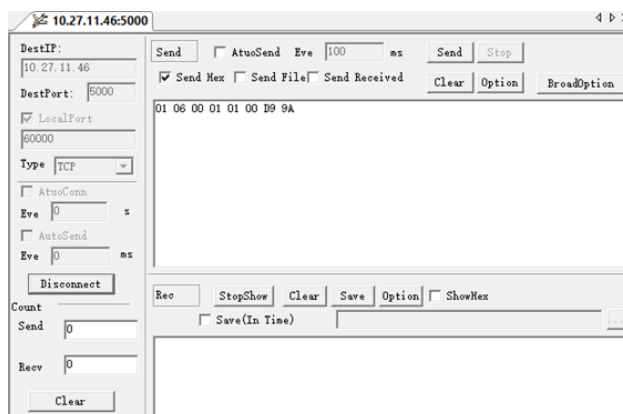
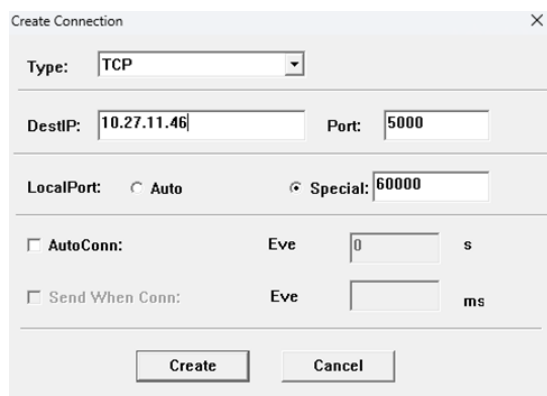
1. Изход - крайната точка на въздушния поток след топлинна обработка;
2. Нагревател за температурата на изхода - включва термостат 1, сензор и нагревателен елемент 1, който регулира и поддържа температурата на въздуха при изхода;
3. Въздушен клапан - позволява ръчно регулиране на отварянето за настройка на въздушния обем;
4. Вентилатор;
5. Интелигентен измервателен уред за електрически параметри;
6. Вход за въздух - точката, от която въздухът навлиза в системата за обработка;
- 7.1. Температурен сензор 1 – предвиден за бъдещи измервания на конвекция;
- 7.2. Температурен сензор 2 – предвиден за бъдещи измервания на конвекция;
- 7.3. Температурен сензор 3 – температура на въздуха след нагревателя;
- 7.4. Температурен сензор 4 – температура на въздуха преди нагревателя;
8. Тръба на Пито с позиция за измерване на диференциално налягане;
9. Входен нагревател;
10. Стъпково електрозадвижване (драйвер) за тръбата на Пито TB6600;
11. Електромотор за задвижване на Тръбата на Пито;
12. Позициониращ модул за Тръбата на Пито;
13. Термоконтролер WS-T01-2;
13. Честотно сервозадвижване TWS-02;
14. Сензор за диференциално налягане QDF70B;
15. Измерител на електрическа енергия (ENERGY METER);
17. Софтуер Node-RED за отдалечен контрол и мониторинг;
18. Сървър Lenovo ThinkCenter;
19. Автоматичен предпазител;
20. Комуникационен микроконтролер STM 32;
21. Температурен преобразувател AMDSG08.

3.3 Описание на софтуера

В раздел „Сървър“ са представени най-важните елементи от изграждането на системата за събиране и обработка на данни, като акцентът е поставен върху централния сървър, дистанционното управление на захранването и приложния сървър Node-RED.

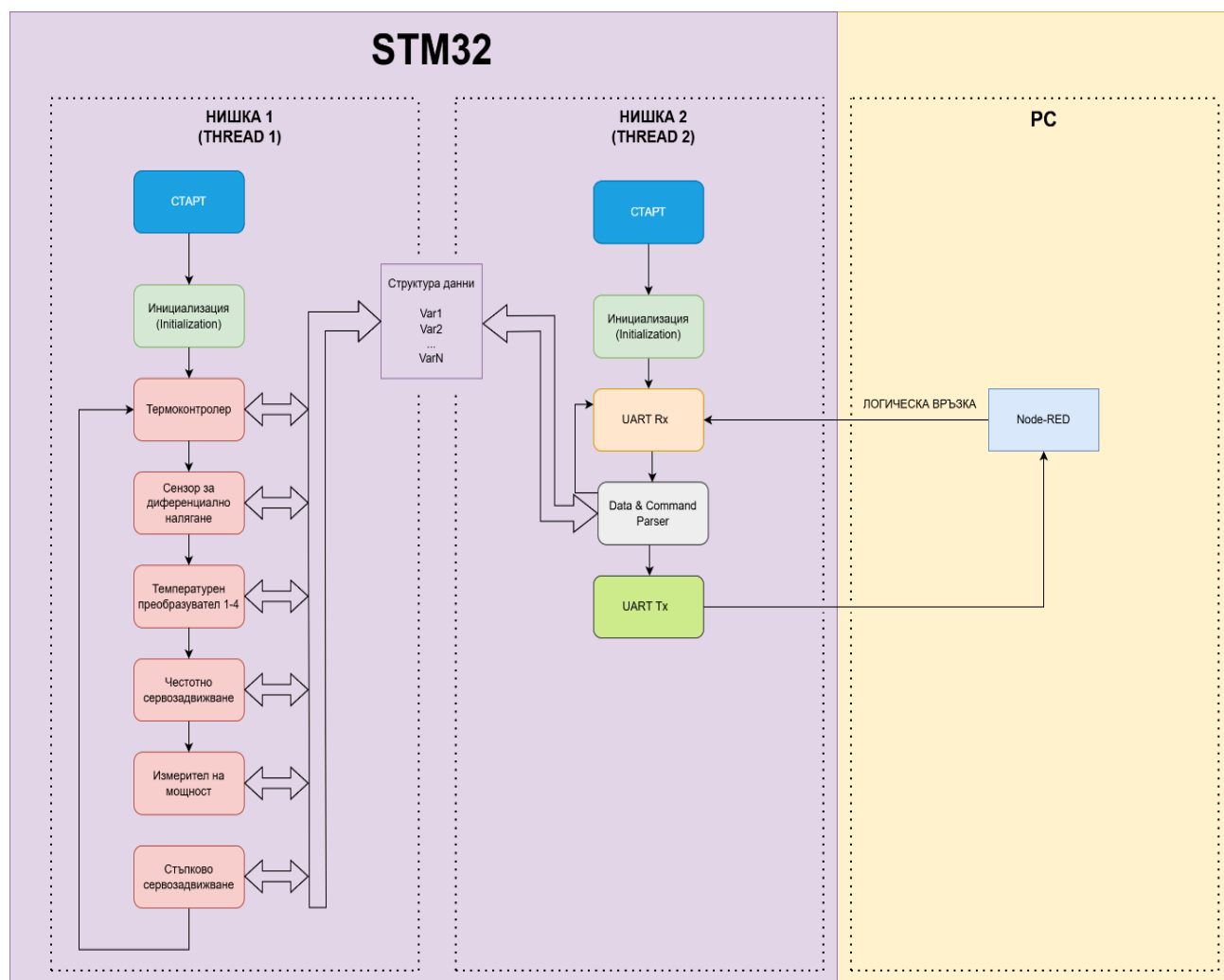
Тук е реализирана възможността за **централизирано управление**, при което компютър Lenovo ThinkCentre изпълнява ролята на основен възел, осигуряващ събиране, съхранение и визуализация на измервателните данни. Посочено е, че той е конфигуриран с локален и външен IP адрес и е включен към вътрешната мрежа на Пловдивски университет „Паисий Хилендарски, като по този начин се постига дистанционен достъп и надеждно управление на стенда.

Особено внимание е отделено на дистанционното включване на електрозахранването, реализирано чрез протокола Modbus over TCP/IP и осемканално реле. Управляващите команди в HEX формат позволяват безопасно включване и изключване на контактора и самия сървър. Това е онагледено на фигура 3.5.



Фигура 3.5 Конфигуриране на TCP клиентска връзка за Modbus комуникация и Изпращане на Modbus команда в HEX формат към устройство чрез TCP интерфейс

Архитектурата на софтуерната част е разделена на три основни секции (фигура 3.6): нишка 1 за физическите сензори, нишка 2 за комуникацията и Node-RED за визуализация и управление.



Фигура 3.6 Логическа архитектура на процесите

Първата нишка е отговорна за управлението на всички физически сензори и изпълнителни механизми, които са свързани към системата. Тази нишка включва следните ключови блокове:

- **Термоконтролер** – служи за управление на нагревателен елемент, като регулира температурата на базата на измервания от температурни преобразуватели;
- **Сензор за диференциално налягане** – отчита разликата в налягането между две точки в системата;
- **Температурни преобразуватели 1–4** – измерват температурата на различни участъци или елементи от системата;
- **Честотно сервозадвижване (инвертор)** – управлява скоростта на въртене на мотор или вентилатор, базирана на предварително зададени стойности;
- **Измерител на мощност** – отчита текущото електрическо потребление и го подава към логиката за анализ и средна стойност;
- **Стъпково сервозадвижване (позициониращ механизъм)** – регулира физическата позиция на тръбата на Пито, базирана на входни команди.

Данните от всички тези хардуерни компоненти се структурират в организиран масив от променливи (**Var1, Var2, ..., VarN**), който се използва за комуникация с втората нишка чрез вътрешна програмна връзка.

Втората нишка поема задачата за комуникация между хардуерната част и външния интерфейс (персоналния компютър, където се намира Node-RED). Тя включва следните основни блокове:

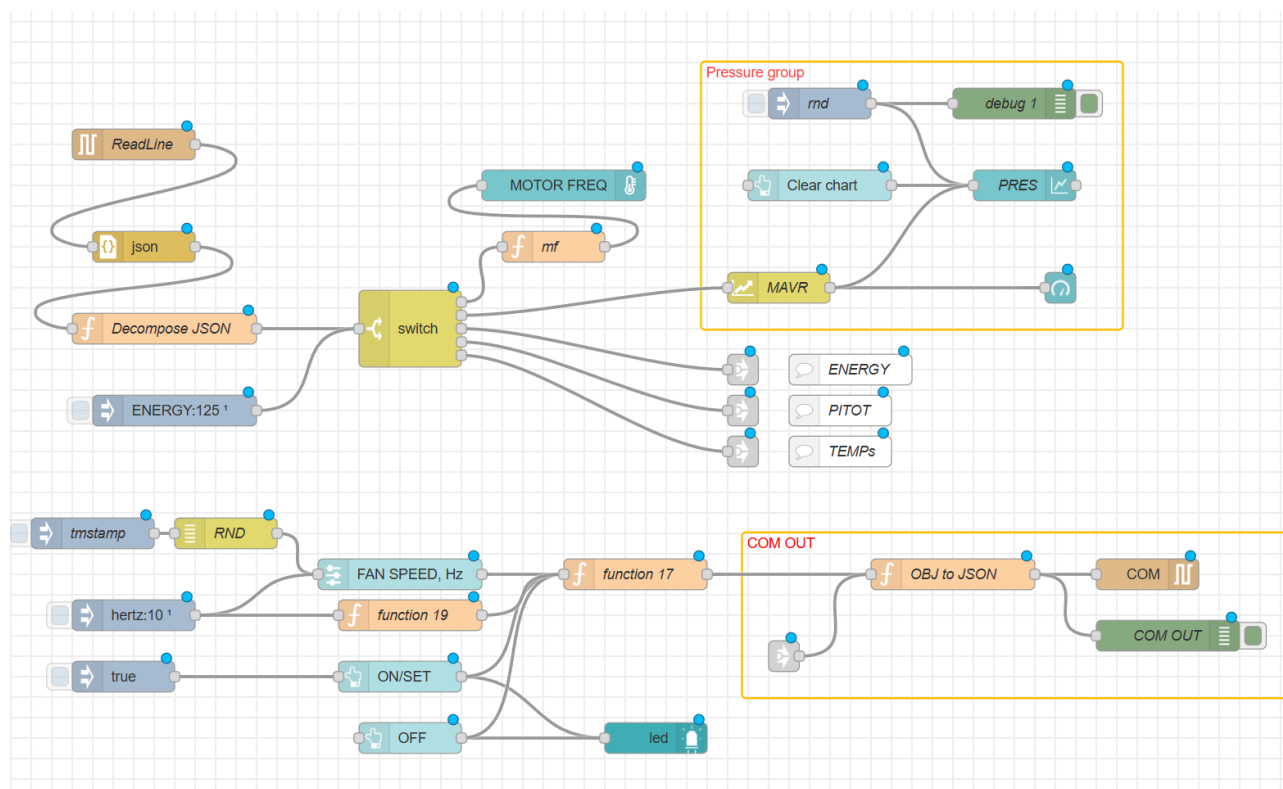
- **UART Rx (универсален асинхронен приемник)** – приема данни от Node-RED (PC) чрез сериен интерфейс. Получава команди и параметри за изпълнение на процесите.

- **UART Tx (предавател)** – изпраща обратно информация към външния сървър Node-RED. Тази информация включва потвърждения за изпълнение на команди, актуални стойности от сензорите и диагностични съобщения, които се използват за визуализация и наблюдение от страна на оператора.

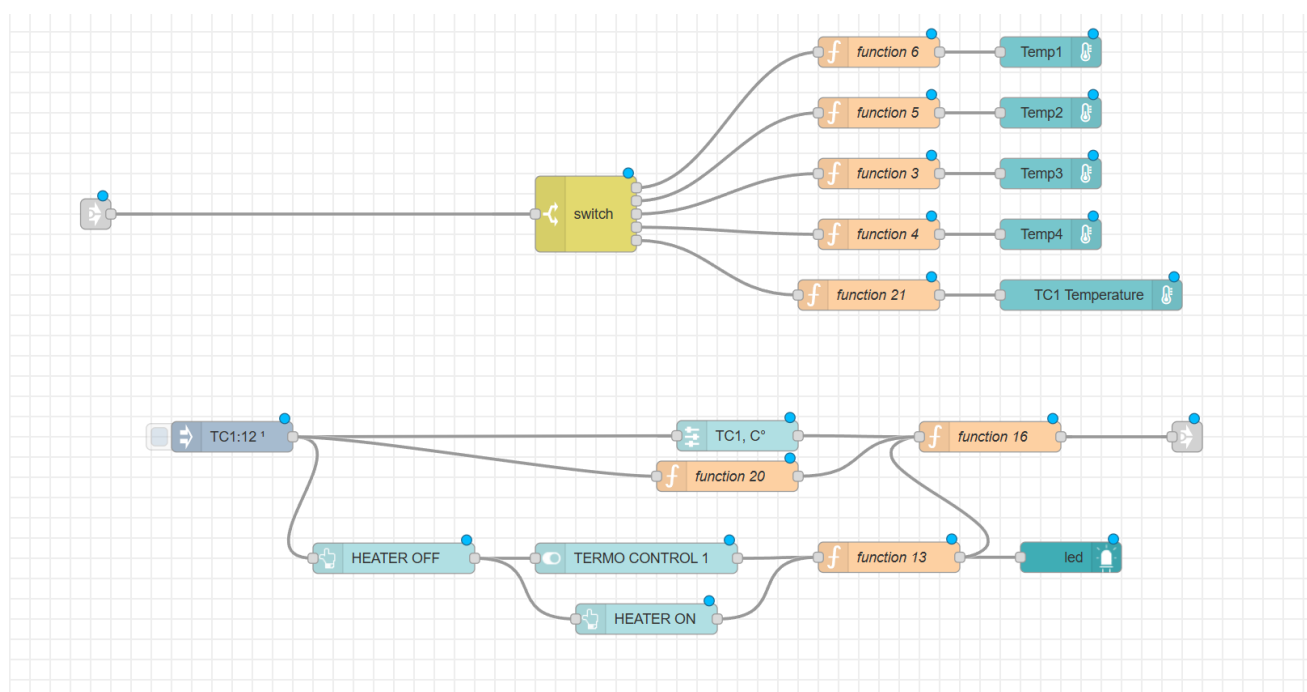
- **Data & Command Parser** – отговаря за декодирането и обработката на входните данни. Освен измервателни стойности, този блок приема и команди, изпратени от оператора чрез потребителския интерфейс в Node-RED (например задаване на позиция, включване/изключване на модул и др.). Данните се интерпретират и структурират, като резултатите се насочват към съответните хардуерни модули или се подготвят за обратна визуализация.

Третата част от архитектурата е приложният сървър Node-RED, който е инсталиран на персонален компютър. Той осъществява логическа връзка с нишка 2 и изпълнява няколко ключови функции. На първо място, Node-RED отговаря за визуализиране на данни – всички получени от сензори стойности се представят в реално време чрез графики, индикатори, текстови елементи и други визуални инструменти, които улесняват наблюдението на състоянието на системата.

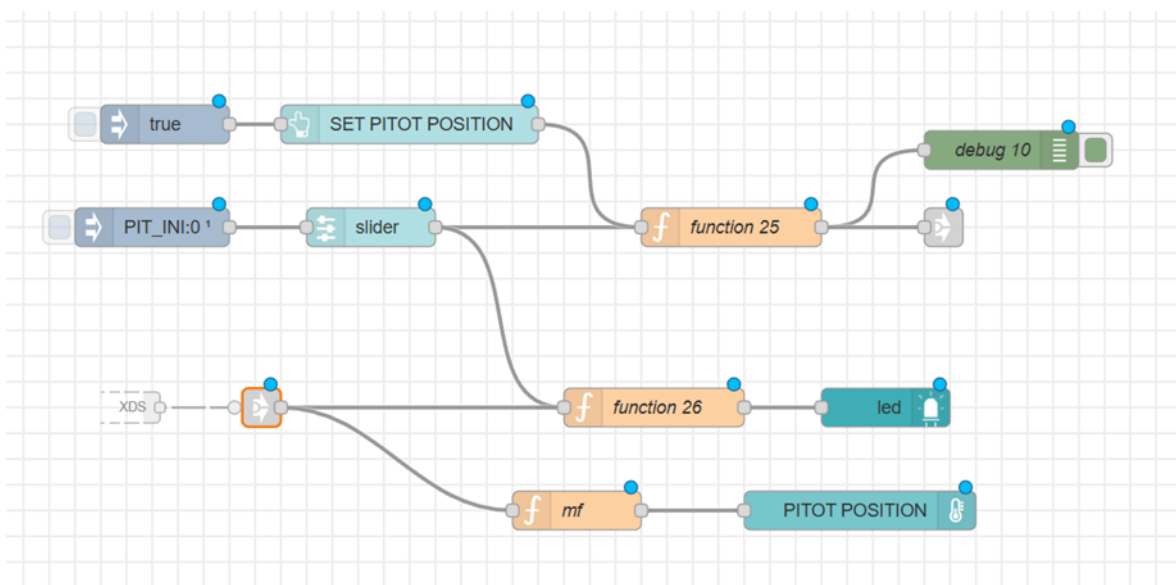
Важна част от раздела са и логическите потоци, реализирани в Node-RED, които показват как се обработват данните и как се осъществява управлението на отделните подсистеми. Те са представени последователно на фигури 3.7, 3.8, 3.9 и 3.10.



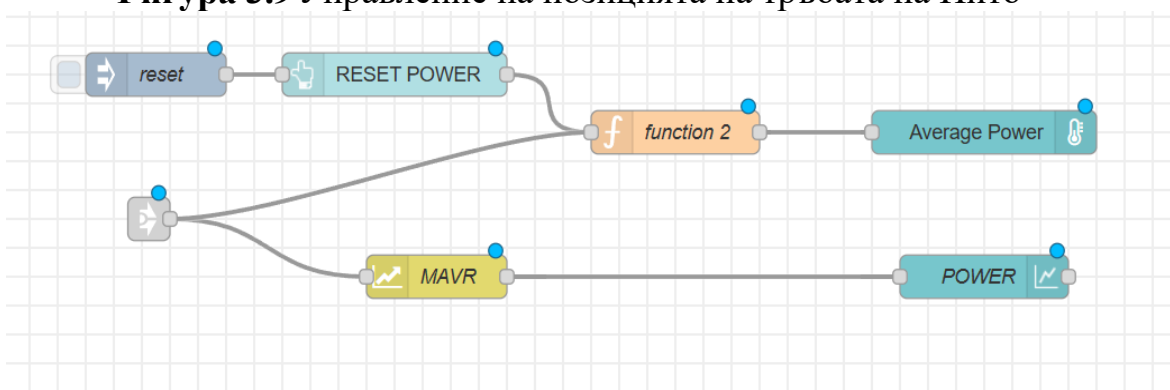
Фигура 3.7 Основна обработка на данни, визуализация и комуникация в Note-RED



Фигура 3.8 Управление на температурата и термоконтролера



Фигура 3.9 Управление на позицията на тръбата на Пито



Фигура 3.10 Измерване и управление на електрическата мощност

3.4 ИЗВОДИ ПО ГЛАВА 3

В глава 3 са разгледани процесът на разработване и реализация на автоматизирания лабораторен стенд с възможност за отдалечен достъп, като е акцентирано върху хардуерната структура, комуникационната архитектура и софтуерната интеграция. Реализирано е модулно и мащабируемо решение, което позволява комплексни измервателни и управляващи задачи чрез централизирана микроконтролерна система.

Избраният микроконтролер STM32F103ZE е обоснован като оптимално решение, което осигурява баланс между изчислителна мощност, надеждност и комуникационни интерфейси. Реализирани са устойчиви комуникационни процеси чрез Modbus RTU и TCP/IP, което гарантира съвместимост със SCADA и IoT платформи. Въведено е дистанционно управление на захранването чрез осемканално реле, което осигурява безопасност и ефективност, а интегрираните честотно сервозадвижване, температурни преобразуватели и сензори позволяват прецизен контрол и надеждни измервания.

Реализирана е и система за енергиен мониторинг, която дава точна информация за консумацията и енергийната ефективност. Чрез внедряването на Node-RED е осигурена интуитивна визуална среда за наблюдение и управление, позволяваща двупосочна комуникация, визуализация в реално време и активно взаимодействие с оператора.

В резултат е постигната устойчива и гъвкава платформа, която доказано

намира приложение както в образователна и научна среда, така и в индустриални приложения, където са необходими надеждност, автоматизация и възможност за дистанционен достъп.

ГЛАВА 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

В настоящата глава от дисертационния труд са представени резултатите от проведените експериментални изследвания, свързани с валидирането на разработената автоматизирана лабораторна система и приложимостта ѝ. Целта на тези изследвания е да се потвърдят функционалностите на методиките, описани в ГЛАВА 2, да се тества хардуера, проектиран в ГЛАВА 3 и да се анализират резултатите в контекста на използваната измервателна апаратура и автоматизирани средства за регистриране и управление на процесите.

4.1.1 Експериментално определяне на профила на скоростта на въздушен поток в правоъгълна тръба. Определяне на разхода на въздух в измерваното сечение.

Преди началото на същинските измервания е необходимо да бъде осъществена предварителна подготовка на системата в дистанционен режим, както от страна на преподавателя, така и от страна на участващите в експеримента. Процедурата включва следните основни стъпки:

1. Присъединяване към видеоконферентната връзка, осигурена от преподавателя;
2. Изчакване на дистанционното включване на сървър, управляващия панел и стенда от страна на преподавателя;
3. Стартиране на приложението SmartPSS Lite от потребителя и извършване на визуална проверка на работоспособността на стенда, чрез:
 - ✚ Задаване на различни позиции на тръбата на Пито през интерфейса;
 - ✚ Проследяване на изпълнението на командите и съответствието им с реалните движения;
 - ✚ Наблюдение на актуализацията на отчетените стойности за налягане и позиция в системата Node-RED.

Тази предварителна фаза е ключова за гарантиране на надеждността на дистанционната връзка и пълната функционалност на автоматизираната система преди започване на експерименталния процес.

➤ Измерване на плътността на въздуха

Измерванията трябва да бъдат стандартизирани спрямо системата SI. Плътността ρ се определя чрез уравнението на състоянието на идеалния газ (2.7):

$$\rho = \frac{P_{\text{атм}}}{R \cdot T}$$

където:

- $P_{\text{атм}}$ е атмосферното налягане (Pa);
- $R=287.05 \text{ J/(kg.K)}$ е газовата константа за въздуха;

- T е температурата в Келвини ($T = T_{\text{измерена}} + 273.15$).

За определянето на стойността на плътността на въздуха ρ по формула 2.7 е необходимо от [sinoptik.bg](https://www.sinoptik.bg) (LINK: <https://www.sinoptik.bg/plovdiv-bulgaria-100728193>) да вземем стойността на $P_{\text{атм}}$ за гр. Пловдив в настоящия момент на измерването ($P_{\text{атм}} = 1020.98 \text{ hPa}$). То се променя в зависимост от надморската височина, температурата и влажността на въздуха. Измерва се в паскали (Pa), но на практика в метрологията най-често се измерва в хектопаскали ($1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$). За $T_{\text{измерена}}$ отчитаме стойността на **Temp4** (температурата на околната среда) от секция **TEMPERATURES** на визуалния интерфейс на софтуерното приложение Node-RED. В нашия случай $T_{\text{измерена}} = 26.1^\circ\text{C}$. Преобразуваме температурата по Целзий в Келвини и заместваме във формулата за плътността на въздуха:

$$T = T_{\text{измерена}} + 273.15 = 26.1 + 273.15 = 299.25 \text{ K}$$

Стойността на плътността на въздуха ρ намираме по формула 2.7:

$$\rho = \frac{P_{\text{атм}}}{R \cdot T} = \frac{1020,98 \cdot 100}{287,05 \cdot 299,25} = \frac{102\,098}{85\,899,71} = 1.19 \text{ kg/m}^3$$

➤ **Изчисляване на скоростта на въздушния поток за всяка точка на измерване v_j**

Скоростта на въздуха за всяка точка на измерване се намира по формула (2.8):

$$v_j = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{\text{п},j} - P_{\text{с},j})}{\rho}},$$

където:

- v_j е скоростта на въздушния поток (m/s) в точка j от измерваното сечение, която искаме да изчислим;
- $P_{\text{п},j}$ е общото налягане (Pa) в точка j , измерено с тръбата на Пито
- $P_{\text{с},j}$ е статичното налягане (Pa) в точка j , също измерено с тръбата на Пито;
- $\Delta P_{\text{д},j}$ е динамичното налягане (Pa) в точка j , което представлява разлика между общото налягане $P_{\text{п},j}$ и статичното налягане $P_{\text{с},j}$;
- ρ е плътността на въздуха (kg/m^3), която се счита за постоянна в измерваното сечение. Тя е определена в предишния параграф.



Фигура 4.1 Схематично разположение на отворите на тръбата на Пито

В настоящия анализ скоростта на въздушния поток се измерва в 5 точки, разположени на различно разстояние от стената на тръбопровода (Фигура 2.6 от ГЛАВА 2), и при различни честоти на асинхронния електродвигател.

Увеличаването на честотата на захранване на електродвигателя води до пропорционално нарастване на честотата на въртене на вентилатора, интегриран в системата, което от своя страна предизвиква увеличаване на обемния разход на засмуквания въздух. Това изменение оказва пряко влияние върху стойностите на диференциалното налягане и, съответно, върху скоростите на въздушния поток, измерени в избраните точки на сечението.

За всяка честота се извършват измервания чрез тръба на Пито, като стойността на скоростта се изчислява по формула (2.8), използвайки стойността на плътността на въздуха, също получена по формула (2.7).

Измерванията се провеждат при четири различни честоти: 20 Hz, 40 Hz, 60 Hz и 80 Hz. Същевременно от разработеното софтуерното приложение, чрез секцията **CONTROLS**, подразделение **SET DEPTH**, тръбата на Пито се управлява и позиционира във всяка от петте определени измервателни точки, визуално представени на фигура 2.6 от ГЛАВА 2.

От контролния панел **PRESSURE** на приложението се отчита стойността на диференциалното налягане ΔP_d след приключване на преходния процес при зададени честоти на асинхронния електродвигател. Точките са разположени по височината на квадратния отвор, на разстояния 8 mm, 25 mm, 42 mm, 58 mm и 75 mm, като 75 mm съответства на центъра на сечението. Измерванията ще бъдат направени при четири отделни честоти на асинхронния двигател - 20 Hz, 40 Hz, 60 Hz и 80 Hz, като скоростите ще бъдат изчислени за всяка от петте измервателни точки при различните честоти.

ТАБЛИЦА 4.1. Разпределение на скоростта и обемния разход при честота 20 Hz

Разстояние от стената	ΔP_d Pa	v_j m/s
8 mm	3	$v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{n,1} - P_{c,1})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta P_{d,1})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (3)}{1.19}} = \sqrt{\frac{6}{1.19}} = \sqrt{5.0420} = 2.25 \text{ m/s}$
25 mm	4	$v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{n,2} - P_{c,2})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta P_{d,2})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (4)}{1.19}} = \sqrt{\frac{8}{1.19}} = \sqrt{6.722} = 2.59 \text{ m/s}$
42 mm	4	$v_3 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{n,3} - P_{c,3})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta P_{d,3})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (4)}{1.19}} = \sqrt{\frac{8}{1.19}} = \sqrt{6.722} = 2.59 \text{ m/s}$
58 mm	4	$v_4 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{n,4} - P_{c,4})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta P_{d,4})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (4)}{1.19}} = \sqrt{\frac{8}{1.19}} = \sqrt{6.722} = 2.59 \text{ m/s}$
75 mm	4	$v_5 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{n,5} - P_{c,5})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta P_{d,5})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (4)}{1.19}} = \sqrt{\frac{8}{1.19}} = \sqrt{6.722} = 2.59 \text{ m/s}$

ТАБЛИЦА 4.2. Разпределение на скоростта и обемния разход при честота 40 Hz

Разстояние от стената	$\Delta P_{\text{д}}$ Pa	v_j m/s
8 mm	13	$v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{n,1} - P_{c,1})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta P_{\text{д},1})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (13)}{1.19}} = \sqrt{\frac{26}{1.19}} = \sqrt{21.84} = 4.67 \text{ m/s}$
25 mm	16	$v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{n,2} - P_{c,2})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta P_{\text{д},2})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (16)}{1.19}} = \sqrt{\frac{32}{1.19}} = \sqrt{26.89} = 5.19 \text{ m/s}$
42 mm	17	$v_3 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{n,3} - P_{c,3})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta P_{\text{д},3})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (17)}{1.19}} = \sqrt{\frac{34}{1.19}} = \sqrt{28.57} = 5.35 \text{ m/s}$
58 mm	18	$v_4 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{n,4} - P_{c,4})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta P_{\text{д},4})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (18)}{1.19}} = \sqrt{\frac{36}{1.19}} = \sqrt{30.25} = 5.5 \text{ m/s}$
75 mm	18	$v_5 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{n,5} - P_{c,5})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta P_{\text{д},5})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (18)}{1.19}} = \sqrt{\frac{36}{1.19}} = \sqrt{30.25} = 5.5 \text{ m/s}$

ТАБЛИЦА 4.3. Разпределение на скоростта и обемния разход при честота 60 Hz

DEPTH	$\Delta P_{\text{д}}$	v_j
8 mm	22	$v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{n,1} - P_{c,1})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta P_{\text{д},1})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (22)}{1.19}} = \sqrt{\frac{44}{1.19}} = \sqrt{36.97} = 6.08 \text{ m/s}$
25 mm	36	$v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{n,2} - P_{c,2})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta P_{\text{д},2})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (36)}{1.19}} = \sqrt{\frac{72}{1.19}} = \sqrt{60.50} = 7.78 \text{ m/s}$
42 mm	39	$v_3 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{n,3} - P_{c,3})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta P_{\text{д},3})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (39)}{1.19}} = \sqrt{\frac{78}{1.19}} = \sqrt{65.54} = 8.10 \text{ m/s}$
58 mm	40	$v_4 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{n,4} - P_{c,4})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta P_{\text{д},4})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (40)}{1.19}} = \sqrt{\frac{80}{1.19}} = \sqrt{67.22} = 8.20 \text{ m/s}$
75 mm	40	$v_5 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{n,5} - P_{c,5})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta P_{\text{д},5})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (40)}{1.19}} = \sqrt{\frac{80}{1.19}} = \sqrt{67.22} = 8.2 \text{ m/s}$

ТАБЛИЦА 4.4. Разпределение на скоростта и обемния разход при честота 80 Hz

DEPTH	$\Delta P_{\text{д}}$	v_j
8 mm	45	$v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{n,1} - P_{c,1})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta P_{\text{д},1})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (45)}{1.19}} = \sqrt{\frac{90}{1.19}} = \sqrt{75.63} = 8.70 \text{ m/s}$

DEPT H	ΔP_d	v_i
25 mm	55	$v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{n,2} - P_{c,2})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta P_{d,2})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (55)}{1.19}} = \sqrt{\frac{110}{1.19}} = \sqrt{92.43} = 9.61 \text{ m/s}$
42 mm	66	$v_3 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{n,3} - P_{c,3})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta P_{d,3})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (66)}{1.19}} = \sqrt{\frac{132}{1.19}} = \sqrt{110.92} = 10.53 \text{ m/s}$
58 mm	67	$v_4 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{n,4} - P_{c,4})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta P_{d,4})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (67)}{1.19}} = \sqrt{\frac{134}{1.19}} = \sqrt{112.60} = 10.61 \text{ m/s}$
75 mm	67	$v_5 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{n,5} - P_{c,5})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta P_{d,5})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (67)}{1.19}} = \sqrt{\frac{134}{1.19}} = \sqrt{112.60} = 10.61 \text{ m/s}$

4.1.1 Определяне на разхода на въздух в измерваното сечение $w(m^3/s)$

Въздушният поток в различни зони се изчислява въз основа на скоростта на въздуха и площта на сечението, през което той преминава. От представената схема на фигура 2.6 от ГЛАВА 2 става ясно разположението на квадратните области с реални площи и съответните им сечения. Всяко измерено сечение има фиксирани размери, които определят реалните му стойности. Формулите за изчисление на площите и потоците са както следва (формули от 2.9 до 2.13):

$$A_1 = 150^2(mm) - 117^2(mm) = 22500 - 13685 = 8811 \text{ mm}^2 \cdot 10^{-6} = 0.00881 \text{ m}^2;$$

$$A_2 = 117^2(mm) - 83^2(mm) = 13689 - 6889 = 6800 \text{ mm}^2 \cdot 10^{-6} = 0.0068 \text{ m}^2;$$

$$A_3 = 83^2(mm) - 50^2(mm) = 6889 - 2500 = 4389 \text{ mm}^2 \cdot 10^{-6} = 0.004389 \text{ m}^2;$$

$$A_4 = 50^2(mm) - 17^2(mm) = 2500 - 289 = 2211 \text{ mm}^2 \cdot 10^{-6} = 0.002211 \text{ m}^2;$$

$$A_5 = 17 (mm) \cdot 17(mm) = 289 \text{ mm}^2 \cdot 10^{-6} = 0.000289 \text{ m}^2.$$

За изчисление на въздушния поток във всяка зона $w(m^3/s) = A(m^2) \cdot v(m/s)$ по формули (2.14 – 2.18) от ГЛАВА 2 замествахме, като пресмятането се извършва отделно при различните честоти на асинхронния двигател и се построяват графичните на зависимостите.

 Изчисляване на разхода на въздух в измерваното сечение $w(m^3/s)$ при честота на електродвигателя от 20 Hz

$$w_1 = v_1 \cdot A_1 = 2.25 \cdot 0.008811 = 0.01978 \text{ m}^3/s$$

$$w_2 = v_2 \cdot A_2 = 2.59 \cdot 0.0068 = 0.01763 \text{ m}^3/s$$

$$w_3 = v_3 \cdot A_3 = 2.59 \cdot 0.004389 = 0.01138 \text{ m}^3/s$$

$$w_4 = v_4 \cdot A_4 = 2.59 \cdot 0.002211 = 0.00573 \text{ m}^3/s$$

$$w_5 = v_5 \cdot A_5 = 2.59 \cdot 0.000289 = 0.00075 \text{ m}^3/s$$

Общият въздушен поток за всички сечения при 20 Hz честота на електродвигателя го намираме по формула (2.19) както следва:

$$w_A = w_1 + w_2 + \dots w_i = \sum_{i=1}^5 w_i$$

$$w_A = w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5$$

$$w_A = 0.01978 + 0.01763 + 0.01138 + 0.00573 + 0.00075$$

$$w_A = 0.05528 \text{ m}^3/\text{s}$$

По аналогичен начин са направени изчисленията на разхода на въздух в измерваното сечение $w(\text{m}^3/\text{s})$ про честоти на електродвигателя от 40 Hz, 60 Hz и 80 Hz.

4.1.2 Представяне на резултатите от измерванията

Въз основа на проведените експериментални измервания получените данни, характеризират разпределението на скоростта и обемния разход на въздушния поток при различни честоти на работа на системата. С цел по-ясно и структурирано представяне на получените експериментални резултати, данните са организирани в четири отделни таблици – 4.5 ... 4.8, съответстващи на всяка от изследваните честоти на въртене – 20 Hz, 40 Hz, 60 Hz и 80 Hz. Всяка таблица включва измерените стойности на диференциалното налягане, изчислената скорост на въздушния поток и съответния обем разход за пет различни дълбочини на измерване.

ТАБЛИЦА 4.5. Разпределение на скоростта и обемния разход при честота на сервозадвижване 20 Hz и плътност на въздуха $\rho = 1.19 \text{ kg/m}^3$

DEPTH	A_j	(m^2)	$\Delta P_{\Delta j} (\text{Pa})$	v_j	(m/s)	w_i	(m^3/s)
8 mm	A ₁	0.008811	3	v_1	2.25	w_1	0.01978
25 mm	A ₂	0.0068	4	v_2	2.59	w_2	0.01763
42 mm	A ₃	0.004389	4	v_3	2.59	w_3	0.01138
58 mm	A ₄	0.002211	4	v_4	2.59	w_4	0.00573
75 mm	A ₅	0.000289	4	v_5	2.59	w_5	0.00075
Общ въздушен поток за сеченията: w_A							0.05528

ТАБЛИЦА 4.6. Разпределение на скоростта и обемния разход при честота на сервозадвижване 40 Hz и плътност на въздуха $\rho = 1.19 \text{ kg/m}^3$

DEPTH	A_j	(m^2)	$\Delta P_{\Delta j} (\text{Pa})$	v_j	(m/s)	w_i	(m^3/s)
8 mm	A ₁	0.008811	13	v_1	4.67	w_1	0.04115
25 mm	A ₂	0.0068	16	v_2	5.19	w_2	0.03529
42 mm	A ₃	0.004389	17	v_3	5.35	w_3	0.02346
58 mm	A ₄	0.002211	18	v_4	5.50	w_4	0.01216
75 mm	A ₅	0.000289	18	v_5	5.50	w_5	0.00159
Общ въздушен поток за сеченията: w_A							0.11365

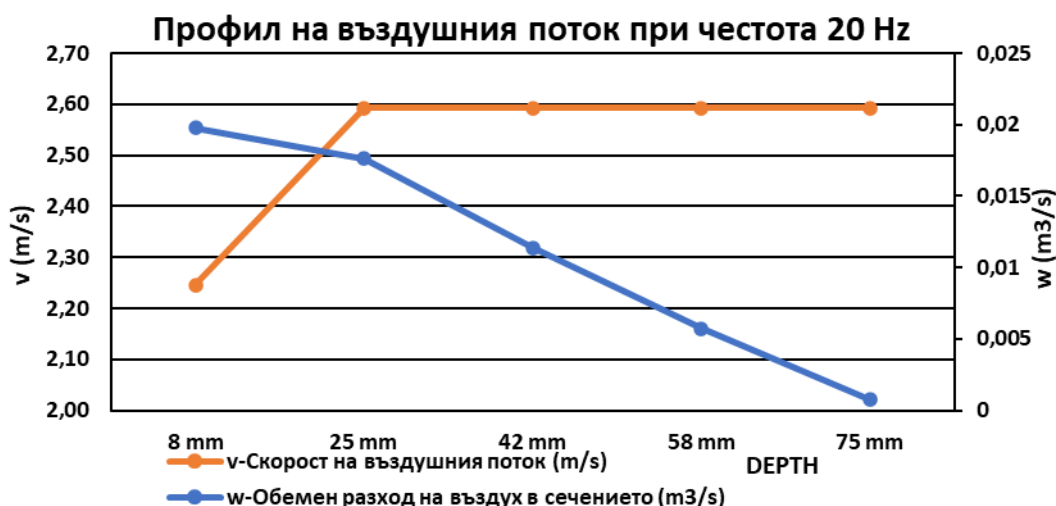
ТАБЛИЦА 4.7. Разпределение на скоростта и обемния разход при честота на сервозадвижване 60 Hz и плътност на въздуха $\rho = 1.19 \text{ kg/m}^3$

DEPTH	A_j	(m^2)	$\Delta P_{\Delta j} (Pa)$	v_j	(m/s)	w_i	(m^3/s)
8 mm	A ₁	0.008811	22	v_1	6.08	w_1	0.05358
25 mm	A ₂	0.0068	36	v_2	7.78	w_2	0.05289
42 mm	A ₃	0.004389	39	v_3	8.10	w_3	0.03553
58 mm	A ₄	0.002211	40	v_4	8.20	w_4	0.01813
75 mm	A ₅	0.000289	40	v_5	8.20	w_5	0.00237
Общ въздушен поток за сеченията: w_A							0.16250

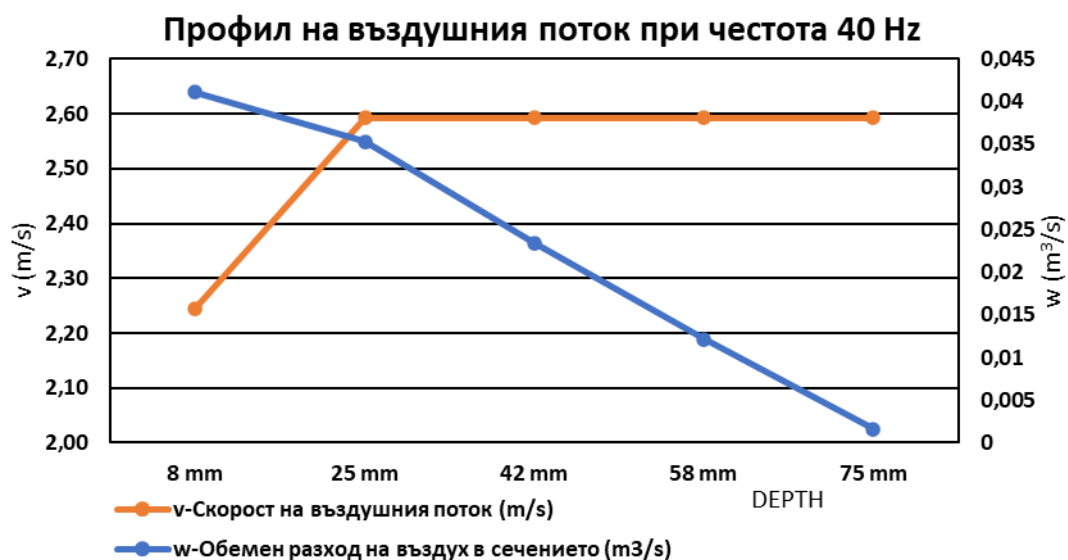
ТАБЛИЦА 4.8. Разпределение на скоростта и обемния разход при честота на сервозадвижване 80 Hz и плътност на въздуха $\rho = 1.19 \text{ kg/m}^3$

DEPTH	A_j	(m^2)	$\Delta P_{\Delta j} (Pa)$	v_j	(m/s)	w_i	(m^3/s)
8 mm	A ₁	0.008811	45	v_1	8.70	w_1	0.07663
25 mm	A ₂	0.0068	55	v_2	9.61	w_2	0.06538
42 mm	A ₃	0.004389	66	v_3	10.53	w_3	0.04623
58 mm	A ₄	0.002211	67	v_4	10.61	w_4	0.02346
75 mm	A ₅	0.000289	67	v_5	10.61	w_5	0.00307
Общ въздушен поток за сеченията: w_A							0.21476

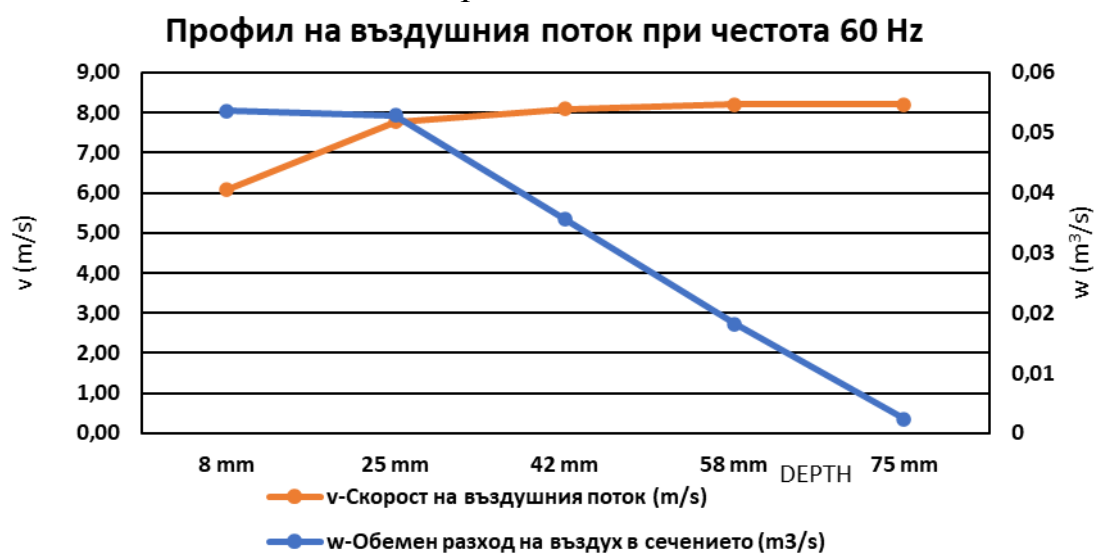
След представянето на експерименталните резултати в табличен вид, на база изходните данни и с помощта на Microsoft Excel, визуализираме графики, които отразяват зависимостите между обемния разход и скоростта на въздушния поток при различните честоти на работа. Тези зависимости са показани на следващите фигури 4.2 ... 4.5 и илюстрират характерните профили на потока за всяка от разглежданите честоти.



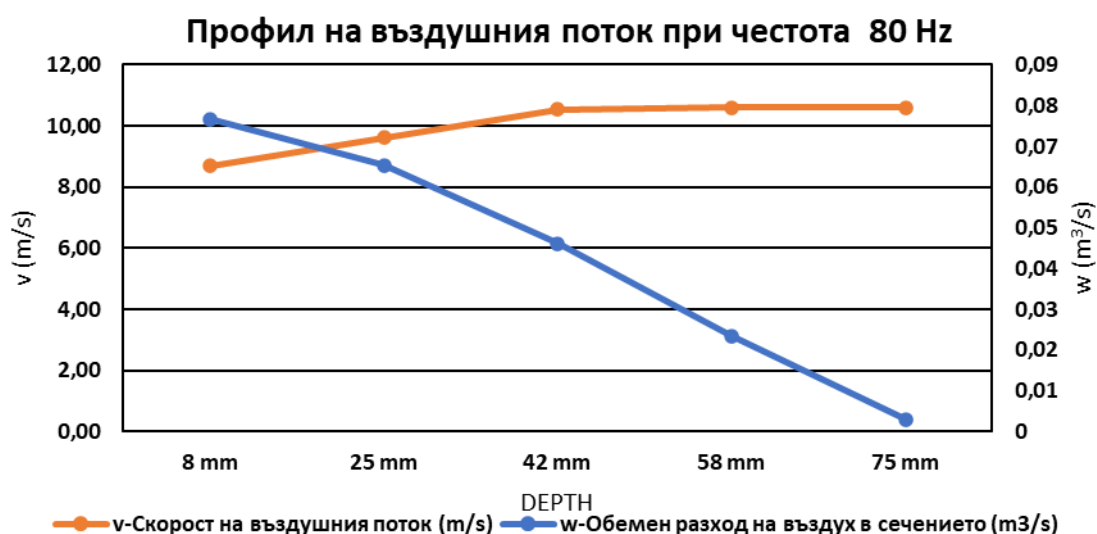
Фигура 4.2 Профил на въздушния поток при честота на сервозадвижване 20 Hz



Фигура 4.3 Профил на въздушния поток при честота на сервозадвижване 40 Hz



Фигура 4.1 Профил на въздушния поток при честота на сервозадвижване 60 Hz



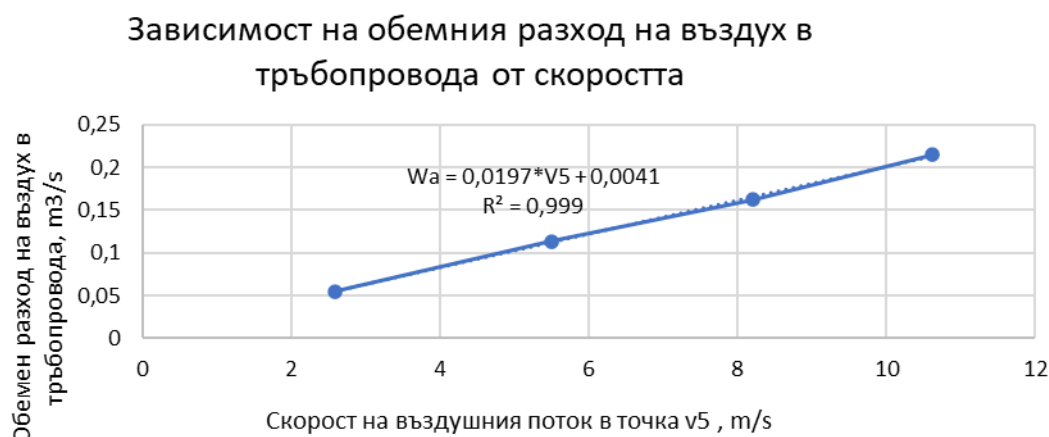
Фигура 4.2 Профил на въздушния поток при честота на сервозадвижване 80 Hz

След представянето на профилите на въздушния поток при всяка честота, визуализираме и обобщена графика, която представя зависимостта между обемния разход и скоростта на въздушния поток в точката на измерване v_5 . Тази точка се намира в централната зона на потока, на дълбочина **75 mm**, и е показателна за поведението на потока в най-интензивната му част.

На фигура 4.6 е представена **линейна апроксимация** на зависимостта между обемния разход w_A и скоростта в точка v_5 . Данните са получени при четирите изследвани честоти – 20, 40, 60 и 80 Hz. Получената регресионна функция е от вида:

$$w_A = 0.0197 v_5 + 0.0041$$

с коефициент на детерминация $R^2 = 0.999$, което свидетелства за изключително добра линейна зависимост между скоростта и обемния разход в тази точка.



Фигура 4.3 Апроксимация на зависимостта на w от v_5

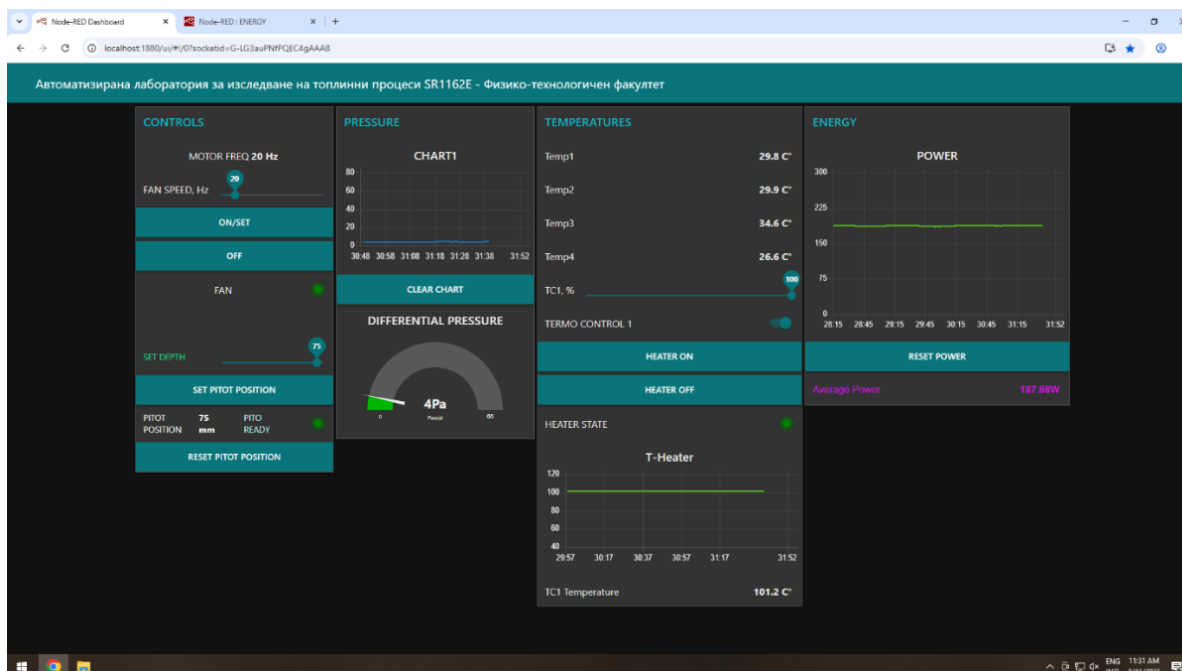
Графиката демонстрира ясно изразена линейна тенденция: с нарастване на скоростта в точка v_5 , обемният разход нараства пропорционално. Това поведение е напълно в съответствие с теоретичните очаквания, базирани на уравнението на непрекъснатостта, и потвърждава надеждността на измерванията.

4.2 Експериментално определяне на масовия специфичен топлинен капацитет на въздуха при постоянно налягане

Както при описаната процедура в методика 2.3, така и в настоящия експеримент, преди началото на същинските измервания е необходимо да бъде осъществена целенасочена предварителна подготовка на системата в дистанционен режим, блоковата схема на която е представенана фигура 2.5 в ГЛАВА 2. Целта на тази подготовка е да се гарантира функционалната изправност на лабораторния стенд, както и надеждната визуализация и отчетност на основните измервателни параметри чрез разработен софтуерен интерфейс.

4.2.1 Аналитични изчисления при честота 20 Hz

След приключване на фазата на настройка и стабилизиране на режима, както е описано в експерименталната методика, се извършват изчисленията за определяне на топлинните и енергийни параметри на въздуха при честота на захранването на асинхронния електродвигател от **20 Hz, 40 Hz, 60 Hz и 80 Hz**. Измерванията са проведени на 11.08.2025 г. в лаборатория по „Екоенергийни технологии“ в Пловдивски университет „Паисий Хилендарски“.



Фигура 4.4 Интерфейс Node-RED – отчетени стойности при 20 Hz

На базата на стойностите от фигура 4.7 ($Temp3 = 34.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Temp4 = 26.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Average\ Power\ \dot{Q} = 187.68\text{ W}$, $\Delta P_d = 4\text{ Pa}$) и плътност на въздуха $\rho = 1.18\text{ kg/m}^3$ (изчислена в методика 2.2 на база текущата стойност на околната температура), както и реалният диаметър на въздуховода $d = 0.15\text{ m}$ (визуализиран на фигура 2.7 от ГЛАВА 2) се извършват следните изчисления:

По методика 2.2 стойността на плътността на въздуха ρ се намира по формула:

$$\rho = \frac{P_{\text{атм}}}{R \cdot T}$$

където:

- $P_{\text{атм}}$ е текущото атмосферното налягане (Pa) за деня в град Пловдив;
- $R=287.05\text{ J/(kg}\backslash\text{K)}$ е газовата константа за въздуха;
- T е температурата в Келвини ($T = T_4 + 273.15 = 26.6 + 273.15 = 299.75\text{ K}$).

$$\rho = \frac{P_{\text{атм}}}{R \cdot T} = \frac{1018,73 \cdot 100}{287,05 \cdot 299,75} = \frac{101\,873}{85\,043.23} = 1.19\text{ kg/m}^3$$

Първата стъпка е изчисляване на температурната разлика в Келвини спрямо системта Si преди и след нагревателя между температурен сензор Temp3 (разположен след нагревателя $T_3 = 34.6\text{ }^{\circ}\text{C} + 273.15 = 307.75\text{ K}$) и температурен сензор Temp4 (разположен преди нагревателя $T_4 = 26.6\text{ }^{\circ}\text{C} + 273.15 = 299.75\text{ K}$):

$$\Delta T = T_3 - T_4 = 307.75 - 299.75 = 8\text{ K}$$

След това се изчислява скоростта на въздуха в съответствие с уравнението на Бернули в определена точка от сечението (в нашия случай точката е в централна позиция на въздуховода с отстъп от 75 mm от стената), като:

$$v_5 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{п.5} - P_{с.5})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\Delta P_{п.5})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (4)}{1.19}} = \sqrt{\frac{8}{1.19}} = \sqrt{6.722} = 2.59 \text{ m/s}$$

$$\dot{m} = 0.0078 v_5 + 0.0016,$$

получена след калибрирането на стенда и извършване на линейна апроксимация на експерименталните данни при $R^2 = 0.999$.

$$\dot{m} = 0.0078 \cdot v_5 + 0.0016 = 0.0078 \cdot 2.59 + 0.0016 = 0.0218 \text{ kg/s}$$

Следва определяне на подадената топлина към 1 kg въздух (тук $\dot{Q}$ е равна на средната електрическа мощност на нагревателя, отчетена в десния долен ъгъл на индикатора "POWER" маркирана като Average Power) ():

$$q = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} = \frac{187.68}{0.0218} = 8609 \text{ J/kg}$$

На базата на това се определя **средният масов специфичен топлинен капацитет $\bar{c}$** , използвайки формула (2.22):

$$\bar{c} = \frac{q}{T_3 - T_4} = \frac{q}{\Delta T} = \frac{8609}{8} = 1076 \text{ J/kg} \cdot K$$

Този резултат съвпада със стойността на c_p (специфичен топлинен капацитет при подвеждане (отвеждане) на топлина при постоянно налягане ($p = \text{const}$) ($\bar{c} = c_p$))

Използвайки формулата на Майер формула (2.25), може да бъде определен и специфичният топлинен капацитет при постоянен обем:

$$c_v = c_p - R = 1076 - 287.05 = 788.95 \text{ J/kg} \cdot K$$

Като следствие от това се пресмята и коефициента на адиабатата κ :

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1076}{788.95} \approx 1.36$$

Тази стойност с висока точност съответства на теоретичната стойност за въздух ($\kappa \approx 1.4$), което потвърждава прецизността на провеждане на експеримента.

За определяне на молния специфичен топлинен капацитет се използва молекулната маса (формула 2.27) на въздуха $\mu = 28.96 \text{ kg/kmol}$:

$$c_M = \bar{c} \cdot \mu = 1076 \cdot 28.96 = 31\,161 \text{ J/kmol} \cdot K,$$

а на база на това и обемният капацитет, като се има предвид че $v_M = 22.4 \text{ m}^3/\text{kmol}$ е газовият обем при нормални условия по формула (2.28):

$$c' = \frac{c_M}{v_M} = \frac{31\,161}{22.4} = 1391.11 \text{ J/m}^3 \cdot K.$$

Изменението на енталпията при изобарен процес се определя чрез (формула 2.29):

$$\Delta h = c_p \cdot \Delta T = 1076 \cdot 8 = 8\,608 \text{ J/kg}$$

А съответното изменение на вътрешната енергия при изохорен процес е (формула 2.32):

$$\Delta u = c_v \cdot \Delta T = 788.95 \cdot 8 = 6311.6 \text{ J/kg}$$

Изменението на ентропията пресмятаме по следната формула (2.35):

$$\Delta s = c_p \ln \frac{T_3}{T_4} = 1076 \cdot \ln \frac{307.75}{299.75} = 1076 \cdot 0.02526 = 27.17 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

Абсолютната енталпия спрямо нормалните условия (формула 2.31):

$$h_2 = c_p \cdot (T_3 - T_H) = 1076 \cdot (307.75 - 273.15) = 37\,229 \text{ J/kg}$$

Вътрешна енергия (формула 2.34):

$$u_2 = c_v (T_3 - T_H) = 788.95 \cdot (307.75 - 273.15) = 27\,297 \text{ J/kg}$$

По аналогичен начин са изчислени стойностите при различните честоти на асинхронния електродвигател в дисертационния труд.

4.2.2 Резултати от аналитичните изчисления

ТАБЛИЦА 4.9. Резултати от измерените параметри при различни честоти

	Честота	ρ	T_3	T_4	ΔT	v_5	$\dot{Q}$	$\dot{m}$
дим./ №	Hz	kg/m ³	°C	°C	K	m/s	W	kg/s
1.	20	1.19	34.6	26.6	8.0	2.59	187.68	0.0218
2.	40	1.19	31.1	26.6	4.5	5.34	187.58	0.0432
3.	60	1.19	29.8	26.7	3.1	7.88	187.32	0.0630
4.	80	1.19	29.1	26.9	2.2	10.13	185.15	0.0805

ТАБЛИЦА 4.10. Резултати от измерените топлинни капацитети при различни честоти

	Честота	$\bar{c}, c_p$	c_M	c'	c_v
дим./ №	Hz	J/kg.K	J/kmol.K	J/m ³ .K	J/kg.K
1.	20	1076	31161	1391.11	788.95
2.	40	964.88	27942	1247.41	677.83
3.	60	959.03	27773	1239.86	671.98
4.	80	1044	30234	1349.73	756.95

ТАБЛИЦА 4.11. Резултати от измерените термодинамични параметри

	Честота	Δh	h_2	Δu	u_2	Δs
дим./ №	Hz	J/kg	J/kg	J/kg	J/kg	J/kg.K
1.	20	8608	37229	6311.6	27297	27.17
2.	40	4342	30007	3050.24	21080	14.35

	Честота	Δh	h_2	Δu	u_2	Δs
дим./ №	Hz	J/kg	J/kg	J/kg	J/kg	J/ kg. K
3.	60	2972	28579	2083.14	20025	9.78
4.	80	2296	30380	1665.3	22027	7.51

4.3 ИЗВОДИ ПО ГЛАВА 4

На база получените резултати в четвърта глава може да се направи извод, че разработената автоматизирана лабораторна система с отдалечен достъп успешно изпълнява целите на изследването и потвърждава своята функционалност и надеждност при експериментално определяне на аеродинамични и термодинамични параметри на въздушния поток. Проведените експерименти демонстрират съответствие между теоретичните модели и реалните измервания, което валидира разработените методики и тяхното практическо приложение.

Получените зависимости между скорост, обемен и масов разход на въздуха показват висока степен на корелация ($R^2 = 0.999$), доказвайки точността и стабилността на измервателната система.

ГЛАВА 5. ИЗВОДИ И ПРИНОСИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Научно-приложни приноси:

1. Разработена и адаптирана за спецификата на дистанционното изследване при работа в реално време е методика за измерване на профила на скоростта на въздушния поток, базирана на тръба на Пито и диференциален сензор за налягане. Тя осигурява висока прецизност и надеждност на резултатите. Интегрирането на скоростния профил позволяват точно изчисление на разхода на въздушния поток, което е съществено за образователните и инженерните приложения;
2. Разработена и адаптирана за спецификата на дистанционното изследване при работа в реално време е методика за измерване на специфичния топлинен капацитет на въздуха при постоянно налягане. Тя е базирана на определянето на масовия разход на въздух в тръбен канал и измерването на скоростта на топлопренос от нагревателен елемент и на температурната разлика в потока преди и след нагревателя. Методиката отчита и текущата стойност на атмосферното налягане в зоната на измерване, която влияе на плътността на въздуха. Освен специфичния топлинен капацитет, се определят и редица други термодинамични параметри на въздуха, в процеса на топлообмен;
3. Разработен и апробиран е подход за отдалечено включване и контрол на стендове и сървъри, базиран на Modbus over TCP/IP протокол, в комбинация с Remote Desktop дистанционен достъп до сървъра от страна на преподавателя и предоставяне на права за достъп на студента, чрез популярни платформи за видеоконферентна връзка, като Microsoft Teams, Google Meet, или Zoom. Този подход осигурява отдалечено включване както на преподавателя, така и на студента и дава възможност за наблюдение и контрол от страна на преподавателя, както и евентуална намеса по всяко

време. При това се използват само стандартни приложения и се избягва необходимостта от разработване на специализиран сайт.

Приложни приноси:

1. На базата на съществуващ стенд, модел SR1162E са проектирани и тествани хардуера и софтуера на модернизирания лабораторен стенд, осигуряващ възможност за отдалечен достъп и контрол, и притежаващ модулна и мащабируема архитектура, с възможност за реализация на комплексни измервателни и управляващи задачи, чрез централизирана микроконтролерна система. В състава на стенда са добавени редица измервателни и изпълнителни модули, които притежават цифров интерфейс, базиран на RS485 over ModBus протокол. Изборът на микроконтролер STM32F103ZE е обоснован чрез сравнение с алтернативи (ESP32, Arduino Mega), като той предлага най-добър баланс между изчислителна мощност, комуникационни интерфейси и хардуерна надеждност за целите на дистанционно управление и събиране на данни;
2. Разработен е комуникационен контролер – основен елемент в изграждането на автоматизираната система, като той изпълнява ролята на интерфейс между физическите измервателни/изпълнителни устройства и приложния софтуер (сървър), реализиран в Node-RED. Контролерът е реализиран върху платформа с вграден микроконтролер STM32, функциониращ като вграден PLC. Той събира данни от различни периферни модули чрез индустриалния сериен протокол Modbus RTU и ги предава към HMI-интерфейса, осъществен в Node-RED. Освен това, комуникационният контролер отговаря за предаването на управляващи команди обратно към изпълнителни механизми.
3. В Node-RED е проектиран приложен сървър, който се инсталира на персонален компютър (сървър). Той осъществява логическа връзка със задачата за комуникация между хардуерната част (микроконтролера на стенда) и външния интерфейс и изпълнява няколко ключови функции. Наред с визуализацията и управлението, Node-RED изпълнява и логически операции, включително сравнение на стойности, математически изчисления, трансформации на данни, вземане на решения и генериране на управляващи сигнали в зависимост от постъпващата входна информация.
4. Извършена е експериментална валидация на функционирането на стенда в дистанционен режим. С негова помощ са валидирани, също така и разработените адаптирани методики за измерване на профила на скоростта на въздушния поток и измерване на специфичния топлинен капацитет на въздуха при постоянно налягане. Проведените измервания и анализи на получените данни доказват приложимостта му както в образователен, така и в изследователски аспект, благодарение на неговата гъвкава архитектура, надеждни комуникационни механизми и възможности за дистанционен достъп и автоматизация;
5. Разработени са два комплекта методични указания за студентите: за измерване на профила на скоростта на въздушния поток и за измерване на специфичния топлинен капацитет на въздуха при постоянно налягане.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ, СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. R. Popov, **A. Parushev**, A. Chekichev and N. Paunkov, "**Remote Monitoring of the Atmosphere Air Quality**," 2024 XXXIII International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/ET63133.2024.10721563. (Scopus).
2. **A. Parushev**, A. Chekichev, S. Lyubomirov, R. Popov, N. Paunkov. **VIRTUAL BENCH FOR REMOTE MEASUREMENT OF AIR FLOW VELOCITY IN A DUCT THROUGH A PITOT TUBE**, INTED 2023 17th annual International Technology Education and Development Conference Valencia (Spain) -6th, 7th and 8th of March, 2023 (online), Pages: 5536-5541, ISBN: 978-84-09-49026-4. doi:10.21125/inted.2023.
3. **Parushev**, A. Chekichev, N. Paunkov, R. Popov, S. Lyubomirov. **VIRTUAL BENCH FOR REMOTE MEASUREMENT OF THE SPECIFIC HEAT CAPACITY OF AIR**, INTED 2023 17th annual International Technology Education and Development Conference Valencia (Spain) -6th, 7th and 8th of March, 2023 (online), Pages: 5248-5253, ISBN: 978-84-09-49026-4. doi: 10.21125/inted.2023.
4. **A. Parushev**, A. Chekichev, R. Popov. **BUILDING A VIRTUAL LABORATORY BENCH TO EXAMINE HEAT TRANSFER PROCESSES**, ICERI 2022 15th annual International Conference of Education, Research and Innovation (online), Pages: 4760-4764 ISBN: 978-84-09-45476-1. DOI: 10.21125/iceri.2022.
5. A. Cekichev, **A. Parushev**, R. Popov. **BUILDING A VIRTUAL INSTRUMENT FOR RESEARCH AND ANALYZING FILTERS IN LABVIEW AND MATLAB**, ICERI 2022 15th annual International Conference of Education, Research and Innovation (online), Pages: 4795-4800 ISBN: 978-84-09-45476-1. DOI: 10.21125/iceri.2022.
6. N. Paunkov, R. Popov, A. Chekichev, **A. Parushev**, S. Lyubomirov. **MAGNETIC FIELD MEASUREMENT WITH MICROPROCESSOR PLATFORM WITH INTELLIGENT SENSOR**, INTED 2023 17th annual International Technology Education and Development Conference Valencia (Spain) -6th, 7th and 8th of March, 2023 (online), Pages: 5282-5289, ISBN: 978-84-09-49026-4. doi: 10.21125/inted.2023.