

Abstracts of Dissertations

**Institute of Information and
Communication Technologies**

**BULGARIAN ACADEMY OF
SCIENCES**



6/ 2025



**CYBER-PHYSICAL
SYSTEMS FOR
INTELLIGENT MANAGEMENT
OF
ANIMAL HUSBANDRY
COMPLEXES**

Kristiyan Dimitrov

**КИБЕР-ФИЗИЧНИ
СИСТЕМИ ЗА
ИНТЕЛИГЕНТНО
УПРАВЛЕНИЕ НА
КОМПЛЕКСИТЕ ЗА
ОТГЛЕЖДАНЕ НА
ЖИВОТНИИ**

Кристиян Димитров

Автореферати на дисертации

**Институт по информационни и
комуникационни технологии**

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

ISSN: 1314-6351

Поредицата „Автореферати на дисертации на Института по информационни и комуникационни технологии при Българската академия на науките“ представя в електронен формат автореферати на дисертации за получаване на научната степен „Доктор на науките“ или на образователната и научната степен „Доктор“, защитени в Института по информационни и комуникационни технологии при Българската академия на науките. Представените трудове отразяват нови научни и научно-приложни приноси в редица области на информационните и комуникационните технологии като Компютърни мрежи и архитектури, Паралелни алгоритми, Научни пресмятания, Лингвистично моделиране, Математически методи за обработка на сензорна информация, Информационни технологии в сигурността, Технологии за управление и обработка на знания, Грид-технологии и приложения, Оптимизация и вземане на решения, Обработка на сигнали и разпознаване на образи, Интелигентни системи, Информационни процеси и системи, Вградени интелигентни технологии, Йерархични системи, Комуникационни системи и услуги и др.

Редактори

Геннадий Агре

Институт по информационни и комуникационни технологии, Българска академия на науките
E-mail: agre@iinf.bas.bg

Райна Георгиева

Институт по информационни и комуникационни технологии, Българска академия на науките
E-mail: rayna@parallel.bas.bg

Даниела Борисова

Институт по информационни и комуникационни технологии, Българска академия на науките
E-mail: dborissova@iit.bas.bg

Настоящото издание е обект на авторско право. Всички права са запазени при превод, разпечатване, използване на илюстрации, цитирания, разпространение, възпроизвеждане на микрофилми или по други начини, както и съхранение в бази от данни на всички или част от материалите в настоящето издание. Копирането на изданието или на част от съдържанието му е разрешено само със съгласието на авторите и/или редакторите

The series Abstracts of Dissertations of the Institute of Information and Communication Technologies at the Bulgarian Academy of Sciences presents in an electronic format the abstracts of Doctor of Sciences and PhD dissertations defended in the Institute of Information and Communication Technologies at the Bulgarian Academy of Sciences. The studies provide new original results in such areas of Information and Communication Technologies as Computer Networks and Architectures, Parallel Algorithms, Scientific Computations, Linguistic Modelling, Mathematical Methods for Sensor Data Processing, Information Technologies for Security, Technologies for Knowledge management and processing, Grid Technologies and Applications, Optimization and Decision Making, Signal Processing and Pattern Recognition, Information Processing and Systems, Intelligent Systems, Embedded Intelligent Technologies, Hierarchical Systems, Communication Systems and Services, etc.

Editors

Gennady Agre

Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Sciences
E-mail: agre@iinf.bas.bg

Rayna Georgieva

Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Sciences
E-mail: rayna@parallel.bas.bg

Daniela Borissova

Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Sciences
E-mail: dborissova@iit.bas.bg

This work is subjected to copyright. All rights are reserved, whether the whole or part of the materials is concerned, specifically the rights of translation, reprinting, re-use of illustrations, recitation, broadcasting, reproduction on microfilms or in other ways, and storage in data banks. Duplication of this work or part thereof is only permitted under the provisions of the authors and/or editor.



BULGARIAN ACADEMY OF SCIENCES

Abstract of PhD Thesis

CYBER-PHYSICAL SYSTEMS FOR INTELLIGENT MANAGEMENT OF ANIMAL HUSBANDRY COMPLEXES

Kristiyan Simeonov Dimitrov

Supervisor: Prof. Nayden Shivarov

Approved by Supervising Committee:

Prof. Vera Angelova-Dimitrova
Assoc. Prof. Stefan Biliderov
Prof. Nikolay Stoimenov
Assoc. Prof. Martine Kambushev
Prof. Marin Marinov



**INSTITUTE OF INFORMATION AND
COMMUNICATION TECHNOLOGIES**
Department of Cyber-Physical Systems

CHAPTER 1. Introduction, analysis and systematization of existing research and practices on the topic

Nowadays, microclimate management in livestock farms is becoming increasingly important. This is due not only to the growing demands for energy efficiency, increased productivity and sustainability, but also to the humane attitude towards animals. Microclimate is a set of parameters such as temperature, humidity, air speed, lighting and concentration of harmful gases, etc. which have a direct and indirect impact on the health, productivity and well-being of animals. Inappropriate conditions can lead to slowed growth, reduced productivity of meat, milk, eggs, increased morbidity and mortality.

The topic is especially relevant in the context of climate change and the introduction of increasingly strict environmental regulations. Automated systems can help to more efficiently use resources such as electricity, water and time for farm management. In addition, digitalization and the use of "smart" technologies fit into the trend towards building sustainable and precision agriculture.

The introduction of automated climate control systems is a key to the modernization of farms. They allow precise control of the internal environment through sensors and algorithms that can manage the parameters of the environment in real time. Considering the cost of existing climate control systems in livestock farms, it is necessary to develop new systems that are accessible to a wider range of users.

The aim of this work is to develop a Cyber-Physical System (CPS) for microclimate management in animal husbandry complexes and for environmental management in fish farming based on openHAB.

The object of the research is not only the study of the possibility of implementing the CPS with the selected software, but also the analysis of the influence of the environment on the productivity and health status of animals.

The subject of the study includes the need to consider the various parameters of the microclimate in livestock farms and the impact they have on the given species of animals directly and indirectly. The influence of the parameters and quality of water when raising fish or other aquatic animals in a closed ecosystem or so-called aquaponic system is also considered. Different methods for controlling these parameters are considered, because the environment affects both the health of the animals and their productivity and, last but not least, the humane attitude towards them. Therefore, it is very important to develop systems that can reliably control the environment, using minimal resources for this purpose.

1.1 Introduction

The main purpose of the first two chapters is to demonstrate the need for this research and to define the problem area. Here, motivation is discussed, the goals, methodology and the tasks of the dissertation are presented.

1.1.1 Problem definition

The first and second chapters examine the main problems that are on the agenda in modern animal husbandry and methods and practices for its improvement and development. In

particular, attention is paid to the methods and means for improving the microclimate in closed livestock farms for raising dairy cows, pigs and broilers. Some basic problems in improving the environment for growing fish and plants in aquaponic systems are also discussed. The direct and indirect influence of the microclimate on the economic indicators of animal farms is examined. Existing microclimate automation systems with their main subsystems of leading companies worldwide are shown, as well as some scientific developments from the last few years are examined, in order to get a general idea of how far the development in the given area has come.

1.2 Influence of the environment on productivity in livestock farms

1.2.1 Influence of microclimate on milk production in a cow farm

Microclimate affects productivity both directly and indirectly. Temperature is the main factor that must be controlled to maintain the thermoneutral zone TNZ. At temperatures above 28 °C, even at low relative humidity, cows show a state of hypertension and heat stress [1,2] in which feed intake, milk yield, milk fat and protein production, as well as fertility rates are reduced [3]. The effect that temperature has on animals is directly related to the relative humidity RH. This is determined by the so-called temperature-humidity index (THI) [4]. High values of THI have the greatest impact on milk yield after two days [5]. At THI values around 68 we have the highest milk yield, and increasing THI values from 68 to 78 reduce DMI by 9.6% and milk production by 21% [6] feed intake starts to decrease the day after the onset of heat stress HS, while milk yield decreases on the second day after HS [7]. According to other studies [8], THI has no effect on milk yield at values between 35 and 72. Heat stress also affects the health of cows.

1.2.2 Impact of microclimate on meat production in pig and poultry farms

The microclimate seriously affects the health status and production of all age categories of pigs [9,10]. The increase in temperature above the comfort zone leads to a decrease in feed intake and, consequently, a progressive decrease in pig productivity [11]. It affects reproductive abilities, growth and development of the body, quality and quantity of production, the development of new diseases and mortality [12]. Deviation from the nominal parameters of the microclimate in the room leads to a decrease in the average daily weight gain and affects the safety of birds, especially in the autumn-winter period, as well as on productivity [13]. The optimal microclimate in poultry farms reduces the cost of poultry products by 15-20%. In cold, humid and poorly ventilated poultry farms, birds are up to 4 times more susceptible to disease, and their productivity decreases by 10-50%, although feed consumption increases by 10-30% [14]. Heat stress has a negative impact on feed intake, feed efficiency, body mass index, meat quality and mortality [15]. Despite advances in technology and modernization of the sector, poultry farming worldwide is significantly affected in terms of productivity, health and overall welfare of chickens by heat stress [16]. In poultry exposed to heat stress, abnormalities in the immune system, hormonal irregularities, respiratory difficulties and electrolyte imbalance are observed [17,18]. Ventilation has a serious impact on all parameters of the microclimate in the building, as well as controlling the presence of harmful gases in the premises.

1.3 Influence of the environment on aquaculture production in an aquaponic system

In connection with the increased consumption of food products in recent years, aquaculture has also developed significantly. Over the past 20 years, aquaculture in the EU has had a sustainable growth rate, with the share of fish obtained through aquaculture in the total

harvest increasing from around 15% in 2000 to around 20% in 2021 [19]. Attention is also being paid to the recirculation of wastewater, which has a major impact on reducing pollution in aquaculture [20].

In high-density aquaculture, water pollution from waste products such as excrement, food scraps, etc. is converted into harmful substances such as ammonia NH_3 , nitrite NO_2 and hydrogen sulfide H_2S . These can be extremely dangerous in high concentrations for aquaculture. This can lead to large economic losses as well as negative environmental impacts on a global scale [21,22]. One of the advantages of aquaponics is the closed loop, in which fish waste released through the gills and as urine, which is mainly ammonia, is converted through the processes of nitrification [23] and mineralization [24]. Solid waste is also separated, some of which is converted to ammonia by microbial activity [23]. This reduces biological pollution of wastewater. Aquaponic systems can be located outdoors or indoors. There are many examples of combining aquaponics and greenhouses, and this approach is constantly evolving [25,26,27].

1.4 Summary

After careful review and analysis of the above facts regarding the influence of the environment and microclimate on farmed animals, we can conclude that the implementation of control over certain environmental parameters is of utmost importance for their welfare. Environmental management helps both to increase productivity and to improve the health of animals and, last but not least, ensures humane treatment of them.

We can summarize that in closed livestock farms it is necessary to control the temperature, humidity and air velocity, the presence of pollutants in the air such as harmful gases, dust particles and microbial contamination, as well as the lighting and ambient noise. In the second case, in an aquaponic system it is necessary to control not only the quality of the water, but also other parameters of the environment. These are the temperature and pH of the water, dissolved oxygen and carbon dioxide, ammonia, nitrites, nitrates and other parameters, as well as exposure to direct sunlight.

Therefore, it is necessary to review and compare the existing methods and means of environmental and microclimate control in animal farms and aquaponic systems. This comparison would allow analyzing some gaps and weaknesses, proposing new methods or more accessible ways of management.

CHAPTER 2. Research of existing methods and means

2.1 Existing methods for maintaining microclimate in livestock farms

As examples of leaders in the production of automation and control systems for livestock farms, we can consider companies such as Big Dutchman, Fancom, SKOV, etc.

2.1.1 Executive mechanisms

They offer a variety of equipment for maintaining the microclimate. They have different types of fresh air inlets, blinds, fresh air or circulation chimneys, fans, heating systems, sprayers for evaporative cooling, etc. Some basic components for microclimate management on livestock farms are discussed below.

Fresh air inlets for wall [28,29,30] or for ceiling [28,29] allow easy control by servomotors [28,29], being equipped with a spring that keeps them tightly closed, and the servomotor pulls

them out. The fresh air chimney for fresh air [28,29] has the advantage over other ceiling flaps because they are not affected by wind speed.

Blinds are used when it is necessary to make the ventilation openings larger. For example, in warmer climates, in natural ventilation, in tunnel ventilation. Their control is like that of fresh air inlets, but some blinds are not equipped with a closing spring [28,30].

For tunnel ventilation, in addition to blinds, vertically opening flaps [29] or large panel flaps [28] can also be used. Both have less air resistance than louvers [28,29]. In many cases, it is more convenient and cheaper to use blinds [28] instead of flaps or louvers.

Fans used in livestock farms can be divided into several groups according to their purpose. These are fresh or exhaust air fans (inlet or outlet), circulation fans or mixed-type fans [28,29,30]. According to the design of the blades, fans can be divided into axial or radial (centrifugal). There are fans with or without flaps to close the opening. They can be without the ability to adjust the speed, with step regulation or with the possibility of stepless regulation. In recent years, etc. smart fans have appeared [29].

Various heating systems are available on the market. In addition to conventional steam heating with radiators or pipes, there are various methods of gas heating [28]. In recent years, heating systems with heat exchangers [28] have been used more and more often in livestock farms. With this, heating costs can be reduced by more than 50% [28].

Sprinkler systems [30,31] are used for air cooling and humidity control in premises, for directly wetting animals to cool them, for loosening dried dirt on walls and floors, and for disinfecting premises [30,31]. They can be used in poultry houses, pig farms, and cattle barns, and their main advantage over other cooling systems is lower cost. They are most effective in dry climates and at high temperatures. Evaporative cooling pads [28,30] are widely used in various types of livestock operations, particularly with tunnel ventilation. They are installed at tunnel inlets and work as follows. Water is poured over the top edge of the pads, wetting them. As air passes through the pads, the water evaporates, cooling the air without leaving water droplets that could wet bedding and worsen conditions inside the facility.

2.1.2 Sensors

Common sensors used to control microclimate in livestock farms monitor only some environmental parameters. These include temperature and relative humidity RH, which is usually a combined sensor, a sensor for ammonia NH_3 , carbon dioxide CO_2 , pressure, air velocity and illumination. Even global leaders in automation do not use sensors for continuous monitoring of carbon monoxide CO, methane CH_4 , hydrogen sulfide H_2S , or fine particulate matter [28,29,30].

2.1.3 Climate-control computers in livestock facilities

On the market, there are various solutions for managing microclimate in livestock farms. At one end are control systems for a single room with support for several temperature sensors—these can turn heating and cooling on or off based on temperature, and ventilation power is adjusted manually, not based on measured temperature. At the other end are multi-zone systems with support for numerous sensors that can control every environmental component [28,29].

2.2 Existing methods for maintaining environment and controlling aquaponics systems

When it comes to automation in existing and commercially available aquaponics systems, it's still in its infancy. Aquaponics systems have been thoroughly researched, yielding enough information to create systems for controlling basic environmental parameters, but practically few such systems exist. Commercial aquaponics solutions from reputable global brands with long-standing experience offer minimal automation: they only monitor and regulate water temperature in tanks, air temperature in rooms, and pH. Other environmental parameters—water hardness, dissolved oxygen, carbon dioxide CO₂, ammonia NH₃, ammonium NH₄⁺, nitrites NO₂⁻ and nitrates NO₃⁻ are measured manually using reagent test kits and litmus strips.

2.2.1 Actuators

Choosing the right air pumps is crucial to provide the necessary dissolved oxygen DO. Pumps are mainly divided into two types based on their construction. The first are piston pumps and the second are turbine pumps [32]. Diffusers are needed to transfer more oxygen from air bubbles to water [23]. Diffusers [32,33] may be made from porous materials like volcanic rock or from various types of plastic, ceramic, or metal. Those with smaller pores are more effective but require higher air pressure, clog more easily, and need more frequent maintenance [23]. Electric heaters are mainly used to maintain temperature in aquaponic systems [32,33,34]. Often made of titanium due to its high corrosion resistance, heaters can come equipped with temperature sensors and in some cases, controllers. They can be installed submerged in tanks or in-line with circulating water [32,33,34]. In colder climates, using heat-pump installations is more cost-effective for water heating, significantly reducing heating costs, though initial investment is higher. Heat pumps can also cool water, which is critical for rearing cold-water fish that cannot thrive above 18 °C [23]. Automatic feeders are used for fish feeding and can dispense food very precisely [32,33]. Existing systems typically use timers to schedule feeding times and durations. Vibrating feeders are suitable for all types of food, and even oily foods pass through without clogging the feeder. Rotary roller feeders have a very accurate feed amount, and spreader feeders are suitable for larger areas because they do not pour the food in one place.

2.2.2 Sensors

Flow meters (for air and water) are used to monitor the operation of air pumps and water circulation pumps [32]. Generally, these include a normally open or changeover contact that activates when air or water passes through them. pH sensors [35] are available that can trigger alarms if the value exceeds or falls below predefined thresholds.

2.2.3 Aquaponics system controllers

Feeders in these systems are time-controlled [32]. Timers range from simple units with settings for on-time and duration to specialized timers capable of managing one or more feeders [32].

Many aquaponics equipment suppliers use the Sensaphone 800 controller [32,33] for monitoring and remote access, as it can monitor several temperatures and has inputs for various alarms. If a threshold is exceeded or an alarm is triggered by a sensor or flow meter, the controller can call preset phone numbers and play different recorded voice messages depending on the alarm triggered.

In recent years, with IoT and affordable electronic sensors, various scientific developments have emerged for continuous monitoring and remote access in aquaponics systems, often including partial control, though temperature is the only parameter usually controlled automatically. Below are some examples of existing systems and research, mainly concerning DWC systems.

2.2.4 Examples of existing research on monitoring and control systems in aquaponics

With the development of the Internet of Things (IoT) and the emergence of affordable electronic sensors, many developments have emerged for continuous monitoring and remote access to information, which also include partial control over aquaponic systems.

A monitoring system for an aquaponic system has been developed [36] in which it was found that the metabolism of fish is directly related to the amount of oxygen they consume. Active movement of fish is peaked for the period before, during and after feeding, for about 15 to 30 minutes [36]. Taking this into account, it is necessary to monitor the DO change during active movement, and not only when the fish are at rest.

Another system measures pH, water level, temperature, electrical conductivity EC, total dissolved solids TDS, ammonium NH_4^+ , nitrite NO_2^- and nitrate NO_3^- . It also measures air temperature, relative humidity RH, carbon dioxide CO_2 , and light intensity. It uses a NodeMCU controller that controls water circulation pumps, EC levels, and ammonia concentration; however, its mechanism for achieving control is not explained. The system also claims to control air temperature, RH, CO_2 , and lighting in the room [37].

Some NodeMCU-based systems monitor only pH, water temperature, dissolved oxygen DO, and ammonia NH_3 . The first three parameters are measured directly by sensors, while ammonia is assessed using a test strip submerged in water and read by a color sensor [38].

Another system for monitoring and control not only manages the water pump and lighting but also has autonomous fish feeding capability. It measures temperature, pH, and water level, with data viewable via a Raspberry Pi-hosted web interface [39].

2.3 Summary

A comprehensive review of microclimate control devices and actuators in livestock farms shows a wide variety of offerings: different wall, ceiling, or chimney ventilation flaps and their controllers; fans; heating and cooling systems; disinfection equipment, etc. A broad range of sensors is also available, though those specialized for livestock use come at relatively high prices. On the other hand, climate-controlled computers are offered by various manufacturers, but selecting them requires predefining all necessary sensors and actuator channels. Most systems lack future expandability, and high-channel-count systems are too expensive for the small and medium farms.

In the realm of aquaponics, commercial systems do not offer full environmental control. Only some parameters are monitored and controlled; others are manually measured, typically with litmus strips. Although research prototypes exist for partial control, they fall short of achieving fully balanced, expert-free management.

Therefore, it would be beneficial to develop more modular environmental control systems, easily expandable in terms of both the number and type of controlled parameters, and capable of flexible control logic. This would make them accessible on a wider user base. To achieve

this goal, the first step is to create a concept outlining the necessary requirements for such a system.

CHAPTER 3. Developing a requirements-based concept for a CPS for intelligent management of animal husbandry facilities

3.1 Definitions of a Cyber–Physical System

The overall architecture of a Cyber–Physical System (CPS) includes models of physical processes, software models, computational platforms, and networks. The feedback loop between physical processes and computation encompasses sensors, actuators, physical dynamics, computation, software scheduling, and networks with contention and communication delays. [40]. CPS are integrations of computational and physical processes: embedded computers and networks monitor and control these physical processes, typically with feedback where the physical world influences computation and vice versa [41]. There are many definitions of a CPS. It comprises multiple components and layers, intertwining physical and virtual elements - from sensors, hardware components, actuators, to corresponding software. Different types of telecommunications are used between the networks through which the components are connected. Approaches from cybernetics, mechatronics, and embedded systems are involved. Unlike them, a CPS is generally a network of interlinked interacting elements with physical inputs and outputs.

3.2 CPS requirements

To implement a CPS suitable for managing animal farming complexes, one must consider required components and their specific requirements. These components can be physical or virtual, necessitating careful analysis of all external and internal influencing factors. The following steps outline the required process to realize a CPS tailored to the specific livestock facility.

3.3 Summary

Creating a concept for implementing a CPS in animal husbandry facilities provides clear steps to build the system. Once component requirements are defined, one only needs to select suitable elements and test them for compatibility.

After outlining core requirements and guidelines for CPS implementation, it's necessary to choose and test both an operating system and compatible software. Additionally, initial installation and configuration software with remote-access capability must be selected.

CHAPTER 4. Research and analysis of software and systems for CPS management. Concept development for CPS management software in animal husbandry facilities

4.1 OS and software requirements

We'll detail software requirements prior to selection. The operating system, along with additional software, libraries, and drivers, must work in harmony, this must be thoroughly evaluated before deploying the system into production.

Firstly, the OS must support real-time operation (Real-Time Operating System – RTOS), synchronization protocols like NTP or PTP, and a wide range of communication protocols (e.g., TCP, HTTP/HTTPS, FTP/SFTP, SSH, EtherNet/IP, WebSocket, MQTT, Modbus). It

must also support wireless networking protocols like IEEE 802.11, Zigbee, BT/BLE, Z-Wave, 6LoWPAN, LPWAN, LoRa, SigFox. The goal is to support a large volume of ultra-low-rate, ultra-low-power wireless sensors and devices.

4.2 Operating system selection

For this research, the Linux-based system OpenHABian was chosen, which includes the independent, Java-based platform OpenHAB.

4.2.1 OpenHAB

OpenHAB (Open Home Automation Bus) is an open-source smart-home automation platform. It enables management and integration of various IoT devices, such as sensors, thermostats, cameras, smart bulbs, alarm systems, controllers, and more [42]. It supports multiple communication protocols, including Z-Wave, Zigbee, Wi-Fi, Bluetooth/BLE, Modbus, RS232, RS485, HTTP/HTTPS, MQTT, WebSocket Thread, KNX, DMX, REST, IFTTT, HomeKit, Hue, LIFX, Nest, Sonos, EnOcean, Xiaomi Mi Home, OpenWeatherMap, SolarEdge, SMA, Fronius, Kodi, MySensors, DLNA/UPnP, and others [42].

4.2.2 OpenHABian

OpenHABian is a Linux distribution based on Raspberry Pi OS Lite (a lightweight Debian variant), optimized for various Raspberry Pi models. It's tailored to simplify setup and optimization for OpenHAB. Although designed for Raspberry Pi, it can also run on other Linux-based systems, including x86 computers.

4.3 Additional software selection

The following open-source software products were chosen. While some have paid versions, all have free, open-source variants.

4.3.1 Eclipse Mosquitto MQTT Broker

Eclipse Mosquitto is an open-source MQTT message broker supporting MQTT versions 5.0, 3.1.1, and 3.1 [43]. In this CPS, it's installed on the server to provide wired or wireless communication between sensors, controllers, actuators, and the CPS server.

4.3.2 InfluxDB

InfluxDB is an open-source time-series database (TSDB) [42,44]. In this CPS, it's used on the server to store sensor measurements and current states of control devices and actuators. Stored data can be used by automation algorithms or accessed on demand by users.

4.3.3 Grafana

Grafana is a cross-platform, open-source web application for interactive visualization and analysis. It can create charts, graphs, and network alerts when connected to supported data sources [45]. In this CPS, it's installed on the server to visually display system parameters.

4.3.4 Samba

Samba is free software implementing the SMB (Server Message Block) protocol. It allows access to the Linux-based CPS server's file system from Windows or Android devices, facilitating configuration file access during setup or operation.

4.3.5 Frontail

Frontail is a log viewer useful during server startup, configuration, and system operation. It provides real-time logs, error messages, and sensor/connection interruptions—facilitating troubleshooting.

4.3.6 Amanda Backup

Amanda (Advanced Maryland Automatic Network Disk Archiver) is open-source backup software capable of backing up data on multiple networked computers [46]. After deploying the CPS, backing up its data, whether using Amanda or another solution is essential for reliable recovery.

4.3.7 Visual Studio Code

Visual Studio Code is a free source-code editor available on Windows, Linux, and macOS [47]. It's essential for programming this CPS. Installed on an external computer, it facilitates creating and editing system files, with extensions such as OpenHAB and OpenHAB Alignment Tool.

4.3.8 Solar-PuTTY

Solar-PuTTY is a free standalone network terminal and file transfer tool. Installed on an external computer, it's used for system installation, updates, and editing configuration files on the CPS server—allowing creation and editing of files, directories, and system configuration.

4.3.9 Tasmotizer

Tasmotizer is software used on an external computer to flash ESP32/ESP8266-based controllers with Tasmota firmware. Tasmota is open-source firmware enabling local control of smart devices without cloud services [48]. In this CPS, Tasmotizer is used to flash NodeMCU ESP8266 controllers, and Tasmota enables them to connect via Wi-Fi to the CPS server.

4.3.10 MQTT.fx

MQTT.fx is a tool for testing IoT topics during development [49]. In this CPS, it allows viewing sensors and actuator data messages across MQTT topics. Moreover, it can publish test data to topics subscribed by Mosquitto, enabling testing of the CPS without connected sensors.

4.3.11 MG Configuration

MG Configuration (Modbus Gateway Administrator Configuration – VOLISON) is software for configuring controllers like ADM-5850G, ADM-5832G, and IDM-7842MG. For this CPS, MG Configuration is used to configure the ADM-5832G gateway, which links Modbus RS485 sensors to the CPS server.

4.4 Summary

Selecting software is a key step in implementing the CPS. The chosen software meets criteria set out in the system concept and has undergone preliminary testing to verify configurability. Full compatibility testing must wait until all hardware components are chosen and algorithms

for managing various livestock types are implemented. Thus, the next step is to select sensors and additional controllers.

CHAPTER 5. Research and selection of IoT actuators and sensors with required parameters for use in a CPS for animal husbandry facilities

A wide range of sensors, controllers, relays, and other devices are available for building livestock farm control systems. The main challenge is the high cost of professional-grade equipment. Conversely, there is a vast array of lower-cost sensors, albeit with reduced quality. Environmental conditions also affect sensor suitability. For this project, the following sensors were selected.

5.1 Sensors

For the purposes of this study, the characteristics of various sensors for measuring temperature, relative humidity RH, ammonia NH_3 , ammonium NH_4^+ , carbon dioxide CO_2 , methane CH_4 , carbon monoxide CO, hydrogen sulfide H_2S , fine dust particles $2.5\mu\text{m}$ and $10\mu\text{m}$, air velocity SAF, illumination, differential pressure Δp , dissolved oxygen, DO, nitrites, NO_2^- , nitrates, NO_3^- , hydrogen indicator, pH, and water level were examined, with some of the sensors being combined to measure more than one quantity..

Temperature sensor DS18B20, Maxim Integrated – Analog Device [51], temperature and relative humidity sensor AM2302, Aosong Electronics [52], temperature and relative humidity sensors SHT31 and SHT35, Sensirion [53]. For the purposes of the study, the above sensors are mainly used via a NodeMCU controller to measure temperature and relative humidity RH both indoors and outdoors.

Carbon dioxide sensor MH-Z19B (MH-Z19C) - Winson [54], carbon dioxide sensor Senseair S88 LP, Senseair [55] and carbon dioxide sensor SCD30, Sensirion [53]. For the purpose of the study, the sensors were tested with a NodeMCU controller using the UART protocol.

Ammonia sensor KM21, KLHA [56], for the purposes of the study the Modbus version was chosen, which connects to the system via Modbus gateway ADM-5832G.

Methane sensor MH-Z1341B, Winson [54], which uses a NodeMCU controller to communicate with the system.

Carbon monoxide, temperature and relative humidity sensor - JXBS-3001-CO/TH-RS, Jingxun [57] - uses Modbus gateway ADM-5832G to connect to the system.

Hydrogen sulfide sensor JXBS-3001-H₂S, Jingxun [57] - uses Modbus gateway ADM-5832G to connect to the system.

Sensor for fine dust particles (PM_{2.5} and PM₁₀) RS-PM-2-EX, Renke [58]. For the purposes of the study, the Modbus RS485 variant was chosen, and the Modbus gateway ADM-5832G was used for connection to the system.

Ultrasonic anemometer for air speed and direction RS-CFSFX-N01-3-EX, Renke [58], and for connection to the system again a Modbus gateway ADM-5832G is required.

Differential pressure sensor A2G-50, WIKA [59]. For the purposes of the study, a sensor Variant 1 with a differential pressure measurement range of -100 Pa to 2500 Pa with a Modbus output signal via a Modbus gateway ADM-5832G was selected.

BH1750 light sensor, ROHM Semiconductor [60] and TSL2561 light sensor, ams-OSRAM AG [61] For the purposes of the study, the sensors are used via a NodeMCU controller.

Dissolved oxygen and temperature sensor TriOxmatic 700 IQ, YSI Incorporated [62], ammonium and potassium sensor AmmoLyt Plus 700 IQ, YSI Incorporated [62], nitrite and nitrate sensor NiCaVis 701 IQ NI, YSI Incorporated [62] and pH sensor SensoLyt 700 IQ, YSI Incorporated [62]. For connection to the KFS of these four sensors, the use of an additional IQ SensorNet 282 or 284 controller is required.

Liquid level sensor SL-M5, NN ELEKTRONIK [63], which uses a NodeMCU controller to connect to the system.

5.2 Controllers

5.2.1 NodeMCU Controller

The NodeMCU controller originally developed by the NodeMCU Team is an open-source product. It is produced by various manufacturers such as Amica, Lolin, DOIT, Devkit and many others, and there are several versions of NodeMCU such as V0.9, V1, V2 and V3. There are also two variants with the CP2102 chip or with the CH340, and tests of the various variants did not reveal any difference in performance or functionality. The other difference is in the dimensions of the controller, as most are close to 48mm x 25mm, but some boards with a CH340 chip are wider with dimensions close to 56mm x 31mm. For the purposes of the study, NodeMCU is used to establish a connection between sensors, control buttons, relays for controlling end devices, signal lamps, etc. on the one hand and the KFS server on the other.

5.2.2 Controller Modbus gateway ADM-5832G

The ADM-5832G [50] is an industrial Modbus gateway that can be easily used to seamlessly integrate devices with serial Modbus (MODBUS-RTU/ASCII) and devices with Modbus Ethernet (MODBUS-TCP). For the purposes of the study, NodeMCU is used to establish a connection between the sensors used with Modbus RS485 interface and the system. The two RS-485/422 ports allow the connection of sensors with different Baud rates, as in general one such controller is sufficient to connect all the necessary sensors that work with the Modbus protocol (a total of up to 32 on the two RS-485/422 ports).

5.2.3 IQ SensorNet 282 and 284, YSI Incorporated

The IQ SensorNet 282 and 284 controllers [62] provide a plug-and-play connection between the YSI sensors and the KFS server. This connection can be made using almost any communication protocol, including Modbus TCP, Modbus RTU, PROFIBUS and PROFINET. The YSI IQ SensorNet 282 can connect up to 2 sensors and the 284 can connect up to 4 sensors [62]. They meet all CPS requirements and are suitable for use in the proposed aquaponic system.

5.3 Summary

This chapter examines a number of sensors that meet both the requirements for compatibility of the connecting interface and the range and resolution of the functions they are required to perform in the microclimate control algorithms in various livestock farms. The selected sensors are part of the price-oriented sensors offered on the market. In addition to them, the market offers a large selection of sensors from other manufacturers, with similar parameters and affordable price, which can also be used to implement the system.

The selected additional controllers for connecting sensors and end devices to the system server offer different connection options. Their number for building one or another CPS depends on the number and type of sensors and end devices, and they in turn depend on the control algorithm. If necessary, other similar controllers can be used.

The next step in the development and testing of the considered CFS for microclimate management in animal husbandry complexes is the development of separate algorithms expressing the specifics and needs of different animal species.

CHAPTER 6. Development of intelligent control for the CPS in animal husbandry based on OpenHAB

The proposed Cyber-Physical System (CPS) can be used to control the microclimate in livestock farms intended for raising various types of domestic animals for different purposes. To ensure energy efficiency, increase productivity, and improve animal health, the system must meet strict criteria tailored to the animals' needs and the farming objectives. It is essential to thoroughly study the impact of all environmental parameters on the animals, depending on whether they are raised for meat, milk, eggs, etc. Therefore, this study examines the rearing conditions and develops control algorithms for the most commonly raised livestock. This includes CPS for microclimate control in dairy cow farms, meat pig farms, and broiler chicken farms. A CPS has also been developed for environmental control in an aquaponic system for raising fish and plants. The systems mentioned are discussed below. The chapter also examines the installation, configuration, and setup of the system, presenting the main nodes and how components are interconnected.

6.1 Development of intelligent CPS control for dairy cow rearing

6.1.1 Specifics and environmental requirements for dairy cow rearing

One of the key aspects of modern livestock farms is ensuring an optimal and healthy environment, as well as increasing animal productivity through precise microclimate control, reducing building energy consumption, and optimizing feed intake. A fundamental requirement for any livestock building is to provide the necessary conditions tailored to the physiological needs of the animals housed within it, through technological modeling of natural microclimatic factors and the creation of a desired anthropogenic environment [64]. Air quality and harmful gas levels must also be monitored and controlled. The standards are as follows: ammonia $\text{NH}_3 < 20\text{mg/m}^3$ (28ppm) [65] for dairy cows and 5mg/m^3 (7,2ppm) [66] for calves up to 6 months; carbon dioxide $\text{CO}_2 < 3000\text{ppm}$ [65], with people present $< 2500\text{ppm}$ [67], and for calves up to 6 months $< 3600\text{mg/m}^3$ (2000ppm) [66]; methane $\text{CH}_4 < 500\text{mg/m}^3$ (762ppm) [67]; carbon monoxide $\text{CO} < 0,005\text{ mg/l}$ (4,4ppm) [65]; hydrogen sulfide $\text{H}_2\text{S} < 10\text{mg/m}^3$ (7,2ppm) [65]; temperature $> 5^\circ\text{C}$, for calves $> 10^\circ\text{C}$ [65]. particulate matter $< 3\text{ mg/m}^3$ [65]; lighting depending on location $> 30\text{lx}$ or $> 50\text{lx}$ на in the milking area, $> 100\text{lx}$ in the handling area [65]; noise $< 75\text{ dB}$ [65]. Optimal values for temperature, relative humidity, and air speed can be found in [65]. In high temperatures, controlling the environment based on the Temperature-Humidity Index (THI) is more important than based on temperature alone.

6.1.2 Sensors and control systems

Depending on the available equipment in the dairy farm, parameters to be monitored and logged can be selected during the initial installation of the system. The system can control blinds, circulation fans, ventilation, heating, water heating for drinking systems, sprinklers,

and lighting. Depending on the type of environmental control system, the CPS can either directly manage it or, if the system has its own controller, the CPS can set target control values (via communication through various protocols) or simply turn it on and off for a set period as needed. Based on current research, the CPS has default values for the parameters that must be maintained. These can be modified according to specific needs, both during the initial setup and later to enhance and optimize the system. The CPS management takes into account the prioritization of specific actions required to ensure a safe and optimal microclimate in the dairy farm. The developed control algorithm consists of two parts, with the first addressing emergency mode.

6.1.3 CPS control algorithm for microclimate management in emergency mode

The developed algorithm monitors for exceeding maximum permissible levels of harmful gases, THI, or for temperature drops below the minimum threshold. Upon detecting such an event, it adjusts the shutter positions, ventilation status, and heating. In each case, the system sends a message to the operator with the exceeded value.

6.1.4 CPS control algorithm for microclimate management in normal mode

The algorithm is shown in Figure 6.2. When any value exceeds the set norm, the system switches to emergency mode.

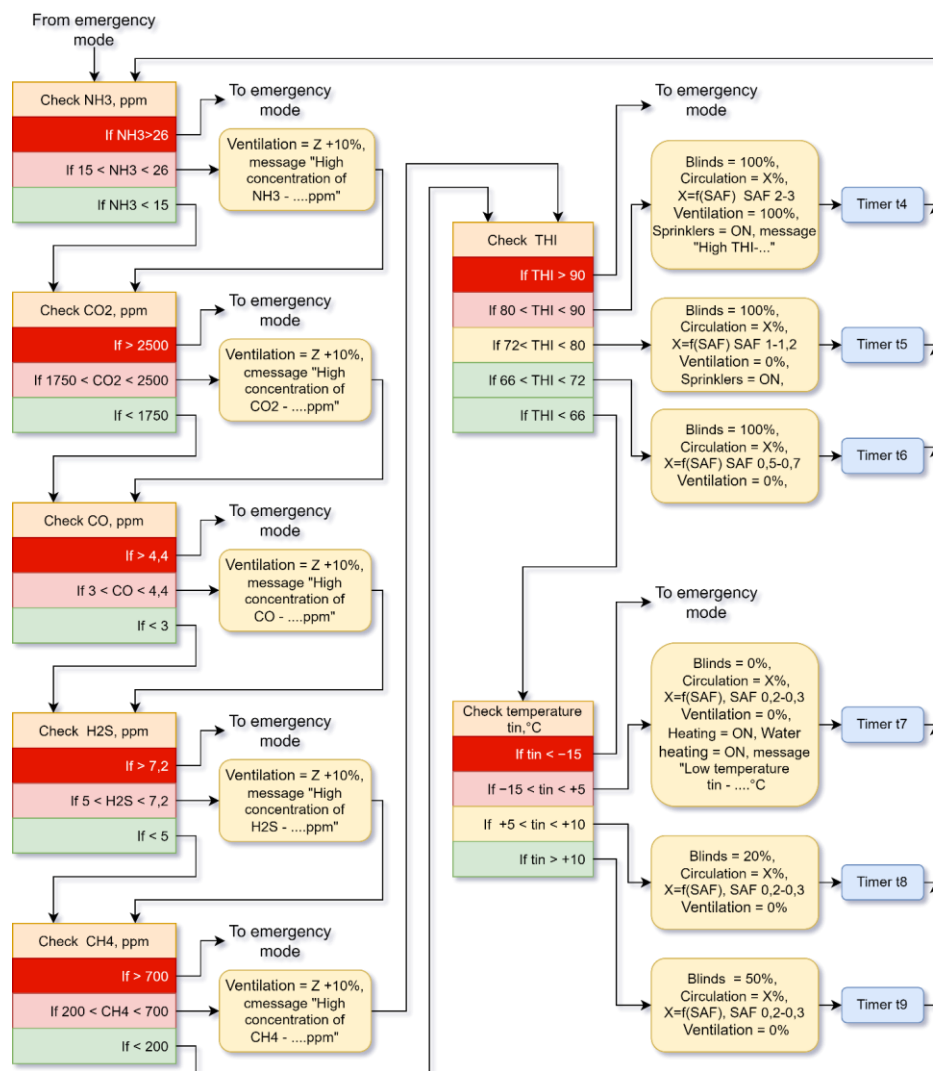


Figure 6.2 Algorithm for microclimate control for dairy cows in normal mode.

6.1.5 Conducted tests of CPS for microclimate control

A prototype of the CPS was developed based on the proposed algorithms. A Raspberry Pi 4 single-board computer was used as the server, running the open-source OpenHAB server. Sensor connections, control devices, automation rules, and more, were defined through text-file configuration. Sensors of all types mentioned above were connected to the system via Modbus and MQTT protocols to test compatibility and potential communication issues. Sensor readings were used to collect data and monitor graphs. Simulated devices resembling real farm equipment were used. The system controlled an electric heater; a PWM-controlled fan; a simple on/off fan; standard and dimmable (PWM) LED lamps; and a small blind driven by a DC motor. Where required by tests, a simulated sensor input was sent via MQTT Broker for example, to simulate a high concentration of harmful chemical gases.

Testing proved that the server could handle the load for automating small to medium-sized livestock farms. For large farms with many sensors, actuators, and automation equipment, a more powerful PC server is recommended. Various automation scenarios are likely to occur on actual livestock farms, the conditions of both large industrial and small family farms were simulated and tested.

Because testing on a real farm was not possible, the following tests were conducted in a bedroom within an apartment equipped with a recuperation unit. This unit was connected through a relay so the system could turn it on and off. The system was set to maintain CO₂ levels below 2000 ppm. It successfully kept CO₂ concentration below this threshold for several days while people exhaled in the room.

Temperature control was tested in an empty, poorly insulated south-facing room by managing an electric heater and an exhaust fan to draw air out, allowing fresh air to enter. The system successfully maintained room temperature within the pre-set range (18 °C–20 °C), despite varying outdoor temperatures and additional solar heating through the south-facing windows during parts of the day.

To test the algorithm's response to an emergency (high concentration of harmful gases in the barn), we simulated sensor inputs outside the defined safety limits for NH₃, CO₂, CH₄, H₂S, and CO via MQTT Broker. Each time, the system reacted appropriately maximizing ventilation and circulation fans (two test fans), fully opening the electric blind, and immediately notifying the operator by email with the measured gas concentration. A similar test was performed for particulate matter PM_{2.5} and PM₁₀. The alert threshold was lowered so that the system would send a message upon reading above the threshold.

6.2 Development of smart CPS for pig farming

6.2.1 Environmental specifications and requirements for pig farming

Pig farming requires strict control of environmental parameters: temperature, relative humidity RH, air velocity, and concentrations of ammonia NH₃, hydrogen sulfide H₂S and carbon dioxide CO₂. H₂S alone can cause respiratory diseases and even at low concentrations can weaken pigs' immune systems, making them more prone to viral diseases like Influenza A virus (IAV) [68]. Pigs are kept under different conditions depending on their age and purpose, divided into 14 categories [65]. Toxic gas concentration limits must be observed: CO₂ < 2500ppm [65], H₂S accepted up to 5 ppm or even 10 ppm by some sources [69], though others demand zero tolerance [65]. Relative humidity is relatively high, and on warm days

cooling spray systems may be used. Air velocity, particulate matter, noise, and illumination should comply with relevant regulations [65].

6.2.2 Sensors and control systems

The proposed Sensors may include indoor temperature, humidity, outdoor temperature, NH_3 , CO_2 , H_2S , PM, air velocity SAF and illumination. The first two are mandatory. Controllable systems include blinds, fresh-air ventilation, heating, cooling (climate control), spray cooling and humidification/disinfection, disinfectant deployment, and lighting; the first three are mandatory. All threshold values for temperature, humidity, air velocity, and toxic gas limits can be adjusted by the technologist based on pig breed and selection. Additional categories beyond the fourteen default ones can be created, allowing grouped parameter settings for different pig categories within the same room.

6.2.3 Control algorithm for CPS in pig farms

Pigs are kept in separate premises by category. Before introducing animals, cleaning and disinfection are always performed manually. The algorithm (Figure 6.5) is divided into two parts: initial setup and optional cleaning/disinfection cycle, followed by autonomous environmental control until the pig category changes or the cycle is manually stopped.

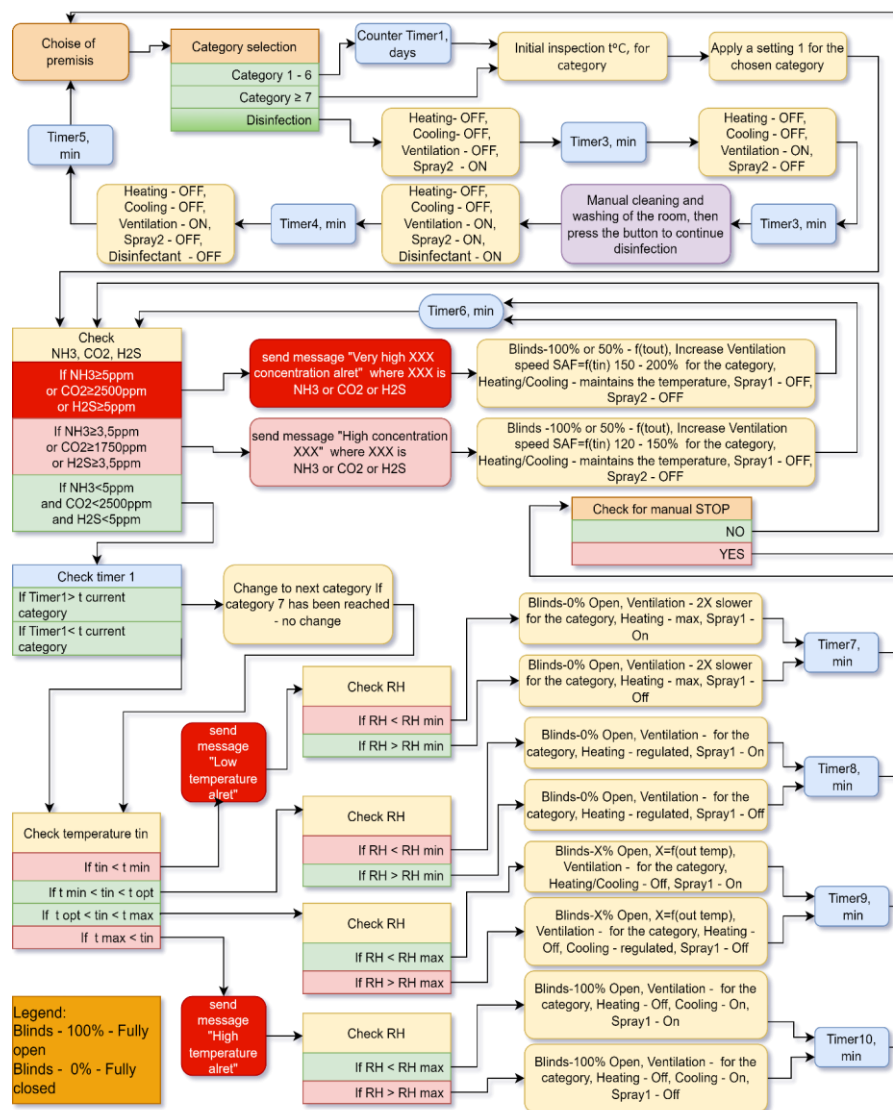


Figure 6.5 Control Algorithm for CPS in pig farms.

6.2.4 Conducted tests of CPS for microclimate management in a pig farm

Tests were conducted in a lab model setup including many listed components: Raspberry Pi 4 server, AM2302 temperature/humidity sensors indoors and outdoors, CO₂ sensor SCD30. The system controlled an electric heater, a fresh-air ventilation recuperation unit, and a blind. Tests were conducted with the outdoor temperature about 15 °C below the target settings (for category 5: 20/23/25 °C), and the category duration was reduced from 7 days to 7 hours for study purposes. When the system was started in a room at 18 °C, it sent an email alert for low temperature, closed the blind, started heating and the ventilation unit. Upon reaching 20 °C, heater power reduced to 50% via PWM. At the optimal 23 °C, the heater switched off; when temperature dropped to 22.4 °C, it resumed at 50%. After 15 minutes, a second, uncontrolled heater was switched on to simulate warming; when temperature reached 23.2 °C, the shutter opened to 30%. At 24 °C, the second heater was switched off and a window was opened for faster cooling. Meanwhile, the system transitioned from category 5 to 6. When the temperature reached 19.8 °C, the roller-shutter closed, and the window was closed; at 19.4 °C, the system turned the heater on again.

An emergency test for high CO₂ was performed by lowering the maximum threshold from 2500 ppm to 1000 ppm. The recuperation unit was replaced with a variable-speed fan set at 1200 rpm under category 5; the blind was closed, and the heater kept the temperature. When CO₂ exceeded 1000 ppm, fan speed increased to 2500 rpm, the blind opened fully, and the system sent an email alert. A window was opened to reduce CO₂ and temperature. During ventilation, temperature dropped below the minimum, blind partially closed to 50%, and the heater switched to maximum.

6.3 Development of intelligent CPS control for broiler farming

6.3.1 Environmental requirements for broiler farming

Broiler farming demands more precise environmental control than other meat-producing animals such as cattle or sheep. Even minor deviations from optimal parameters increase mortality, especially during the early brooding stage, and subsequently reduce productivity [70].

For broilers, the control CPS must monitor parameters including temperature, relative humidity RH, speed of air flow SAF, differential pressure Δp and concentrations of harmful gases like ammonia NH₃ [71], carbon dioxide CO₂, carbon monoxide CO and hydrogen sulfide H₂S [65,70]. Dust and microbial contamination also require monitoring [70]. Lighting intensity and duration, as well as noise levels, are critical [65,72,73,74]. Poor lighting can lead to cannibalism, stress, diseases, and even death [75,76,77]. Some sources recommend 16 hours of light and 8 hours of darkness [78,79], while others report better productivity with alternating shorter light/dark periods [80,81,82]. It is also important to note that the primary parameter defining broiler comfort is the “felt temperature” [70,83,84,85]. This often differs from the ambient air temperature, as it depends on factors including air temperature, floor temperature, RH, air speed (SAF), the birds’ age, and feathering. When air temperature, humidity, and airflow are within acceptable limits, perceived temperature matches ambient temperature. At higher ambient temperatures, increasing airflow prevents broilers from exiting their comfort zone [70]. With the proposed methods, the felt temperature can be calculated and used to operate the system. When the temperature zone is maintained correctly, the energy surplus from the feed is used for growth and weight gain, rather than providing thermal comfort for the broiler. This zone is determined by the felt temperature.

To ensure proper CPS functioning, sensors for indoor temperature t_i , indoor RH, airspeed SAF, NH_3 , CO_2 , CO, H_2S and fine particulate matter must be positioned within the birds' living zone, approximately 20 cm above the floor. The exceptions are the sensors for measuring the roof temperature t_{ih} , outdoor temperature t_o , outdoor RH_{out} and differential pressure Δp .

6.3.2 Ventilation types in poultry farm

The ventilation system must include a sufficient number of exhaust fans to draw indoor air out, while fresh air enters via multiple adjustable inlets or large tunnel openings at one end of the building. Three common types of ventilation are implemented: minimal ventilation, transitional ventilation, and tunnel ventilation [70].

6.3.3 Sensors and Control Systems

It is necessary to monitor the following parameters: indoor temperature at bird level, ceiling-level temperature, indoor relative humidity, outdoor relative humidity, outdoor temperature, ammonia NH_3 , carbon dioxide CO_2 , carbon monoxide CO hydrogen sulfide H_2S , fine particulate matter, air velocity SAF, differential pressure (indoor/outdoor), and indoor illumination. The building must also be equipped with the necessary systems for microclimate control. For the geographic latitude of Bulgaria, these include heating, fresh-air ventilation fans (referred to below as "Ventilation"), circulation fans ("Circulation"), tunnel fans ("Tunnel Ventilation"), fresh-air inlet dampers, tunnel ventilation openings (tunnel dampers), evaporative cooling pads, and lighting.

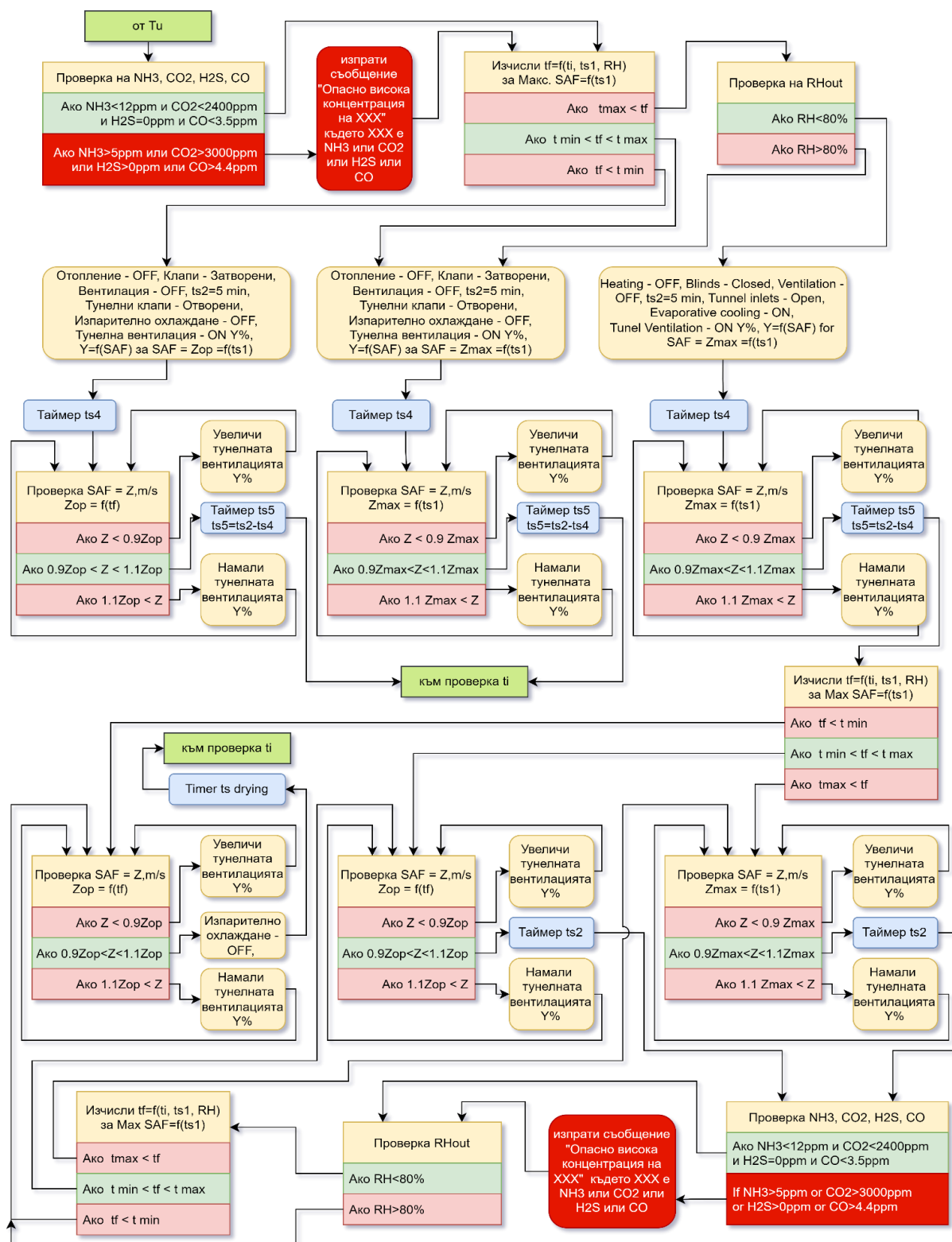
6.3.4 CPS control algorithm for microclimate management in poultry farm

In the proposed algorithm for autonomous operation under tunnel ventilation mode, the system regulates not the measured temperature t_i , but the felt temperature t_f . The system calculates the felt temperature based on predefined relationships derived from various sources [83,84,85,86], which are supplemented through interpolation and extrapolation. When relative humidity RH exceeds RH_{max} for the corresponding broiler age, the felt temperature increases by predetermined values calculated based on its relationship to the Temperature-Humidity Index THI. The felt temperature t_f is obtained using the following formula:

$$\text{Formula 6.1} \quad t_f = t_i - t_{cw} + t_{cRH}$$

where t_{cw} is a temperature correction factor dependent on air velocity SAF, and t_{cRH} is a correction based on relative humidity RH.

Two control algorithms have been developed for the system. The first is for preparing the facility before the placement of broilers, maintaining an optimal temperature in the building to adapt floor and wall temperatures. The operational algorithm is divided into a main part and four branches. Based on the detected environmental conditions, the algorithm transitions to one of the branches: the first two branches correspond to minimal ventilation conditions, the third to transitional ventilation and the fourth to tunnel ventilation. In the first three branches, the system maintains optimal conditions for broiler rearing (temperature, relative humidity, air velocity), periodically returning to the main section of the algorithm. If the system transitions into the fourth branch (Figure 6.11), it enters a closed loop, where specific conditions must be met before exiting. In this state, the CPS begins regulating based on the felt temperature t_f .

Figure 6.11 Control algorithm - tunnel ventilation branch T_u.

6.3.5 Conducted tests of the CPS for microclimate management in a poultry farm

Due to the inability to create an experimental setup that includes all types of sensors and control systems, and the fact that the system has not yet been implemented in a functioning poultry farm, testing was carried out in two stages. In the first stage, all sensors were connected to the system and tested for data reading and logging. The following sensors were used: AM2302 for temperature and humidity, SCD30 for CO₂, the Modbus version of the

A2G-50 for differential pressure, and the RS-CFSFX-3-EX for airspeed. Sensors for fine particulate matter and illumination had been tested previously in experimental setups for climate control systems in pig farms. In the second stage, instead of real sensor readings, synthesized data for temperature, humidity, differential pressure, and the presence of harmful gases were sent via an MQTT Broker. This allowed simulation of various conditions to verify the system's response.

During the testing, the following initial conditions were set: t_{s1} -14 days, Maximum broiler number - N. Then the system set t_{min} - 24 °C, t_{max} - 27 °C, t_{opt} - 25,5 °C. Once the system was started, data was transmitted to it every 30 seconds. Table 6.13 shows a partial set of rows with some modified values.

Minute	t_i , °C	t_o , °C	t_{ih} , °C	Δp , Pa	CO ₂
0'	22	5	26	25	500
4'	22	15	22	25	500
8'	26	15	30	25	500
14'	25	15	30	25	500
19'	25	15	25	25	2500
24'	24.5	15	25	25	3500
27'	25	15	25	25	500

Table 6.13 – Simulated data sent via MQTT Broker.

The system started as follows. First, it opened the connected blind, acting as a fresh air inlet, to the indicated position 2 out of a total of seven positions. It started the first fan, acting as a fresh air fan, at the set speed corresponding to position 2 of the inlets and turned on the heater at 100%. After 30 seconds, the system turned off the fan, closed the blind and turned on the second fan, acting as a circulation fan.

At the 5th minute, the cycle ended, and the algorithm started a new one, and the system checked the temperature t_i and took the following actions: turned off the circulation fan, turned on the fresh air fan and opened the blind to position 3. The heating remained at full power. After 30 seconds, the blind was closed, and the fan stopped.

At the 10th minute, the system checked the temperature t_i again and switched from the minimum ventilation mode to the transitional ventilation mode, since the temperature t_i is higher than t_{opt} . The heater was turned off; the blind was opened to position 4 and the fresh air fan was turned on at the corresponding power.

At the 15th minute, the system measured the temperature t_i and switched from the transitional ventilation mode to the minimum ventilation mode. The heater was turned on with a PWM of 10%, the blind was moved from position 4 to position 3, and the fresh air fan was switched to the appropriate power for the given shutter position. After 30 seconds, the fan stopped, the blind closed, and the circulation fan was turned on again.

At the 20th minute, the system measured temperature t_i and detected a carbon dioxide CO₂ level above 80% of the permissible value. The following actions followed: the blind was opened to position 4 instead of 3, the fresh air fan was switched on at the appropriate power, the heater remained running at 10%, and the circulation fan was switched off. After 30 seconds, the fresh air fan was switched off and the shutter was closed.

At the 25th minute, the system measured a temperature t_i and a carbon dioxide level CO₂ above the permissible norm and entered emergency mode for 3 minutes. After that, it sent a

message “Warning: high CO₂ level - 3000ppm”. The blind opened to position 4, the fresh air fan switched on at the appropriate power and the heater increased its power to 50%.

At the 28th minute, the system measured a temperature t_i and carbon dioxide level CO₂ below the permissible norm. The shutter was opened to position 3, the fresh air fan switched to the appropriate power and the heater was turned on at 10%.

The test above showed that the system (algorithm) can successfully switch to different ventilation modes, as well as enter and exit emergency mode.

6.4 Development of intelligent CPS control for fish and plant cultivation in a deep-water culture aquaponic system

6.4.1 Environmental characteristics and requirements for aquaculture in an aquaponic system

A fundamental requirement for the proper functioning of an aquaponic system is achieving environmental balance. One of the most critical indicators is water quality, which reflects its suitability for specific applications. Depending on the intended use of the water, certain parameters must be met to determine its quality. These parameters have different optimal values for fish, plants, and the development of beneficial bacteria. Therefore, it is essential to find the optimal balance point that allows all organisms to coexist in symbiosis [23,87]. In an aquaponic system, maintaining balance requires monitoring water temperature, pH level, hardness, dissolved oxygen DO, dissolved carbon dioxide CO₂, ammonia NH₃, nitrites NO₂⁻, nitrates NO₃⁻, alkalinity, and the development of various bacterial groups [23].

6.4.2 Components of the aquaponic system

The aquaponic system, based on the deep-water culture (DWC) method, must include the following components: fish tank, mechanical filter, biofilter, floating rafts, water circulation pump, air pumps with air stones (aerators) and pipe network.

In addition, sensors and actuators are required to implement the proposed Cyber-Physical System for monitoring and regulating water parameters. The system must be equipped with sensors for measuring water temperature (in the fish tank and biofilter), dissolved oxygen DO (in the fish tank, biofilter, and floating rafts), nitrites NO₂⁻, nitrates NO₃⁻, pH and ammonium NH₄⁺ (in the fish tank). To determine the concentration of total ammonia nitrogen TAN and ammonia NH₃, a calculation method is applied based on the concentration of NH₄⁺, water pH, and temperature. Monitoring and maintaining these parameters within specific ranges ensures the system remains in balance. Maintaining this balance through parameter regulation defines the functional requirements for the CPS. The required actuators include: water pump, auger for adding pH-lowering substance, auger for adding pH-increasing substance, solenoid valve for water replenishment (in the biofilter), heater and auger for feeding the fish (in the fish tank), air pumps (in the fish tank, biofilter, and floating rafts).

6.4.3 CPS control algorithm for environmental management in an aquaponic system

Two algorithms have been developed for controlling the system. The first ensures proper preparation and bacterial development prior to stocking the fish and planting the crops (Figure 6.15), while the second maintains balance within the aquaponic system (Figure 6.16).

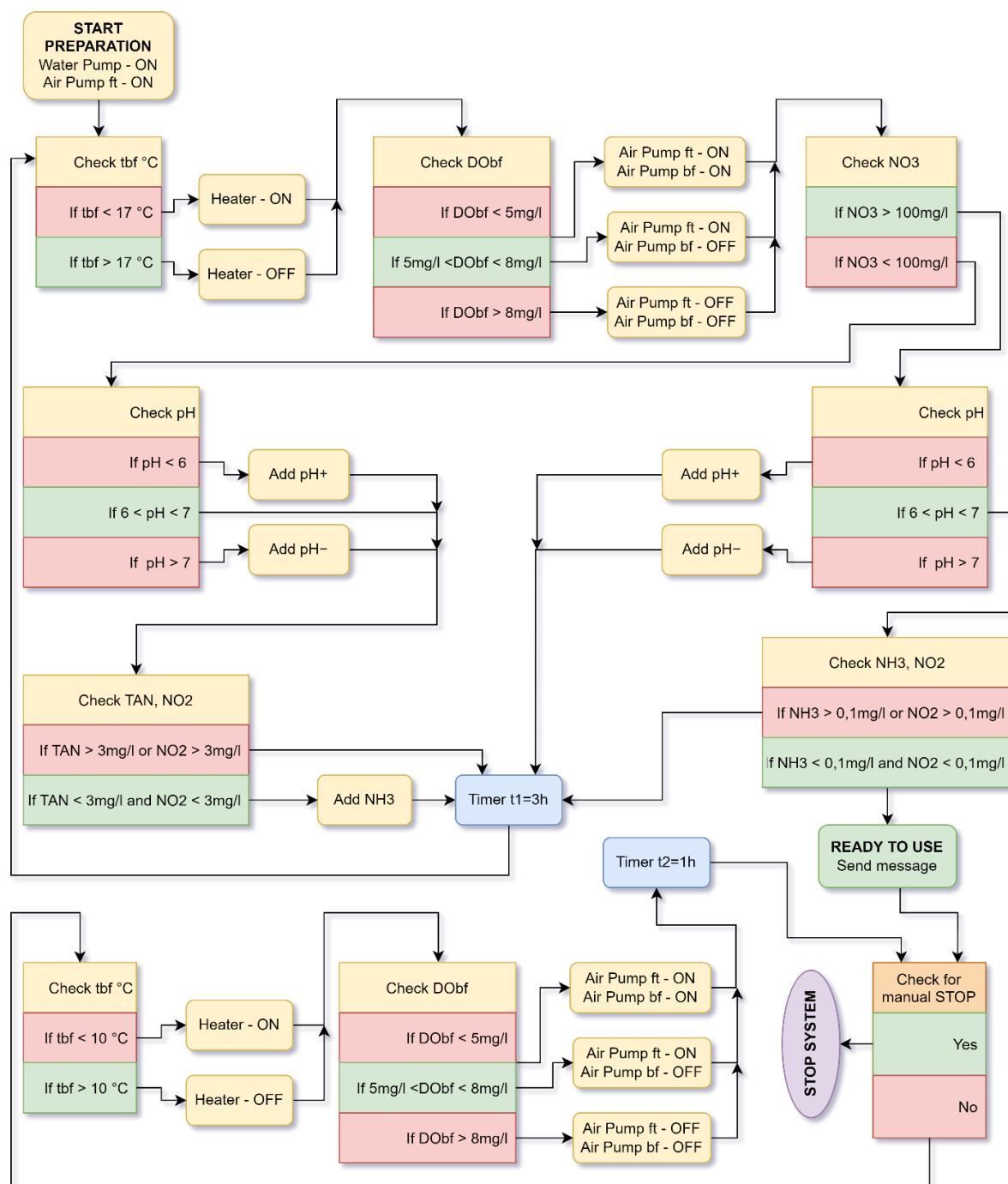


Figure 6.15 – Algorithm for initial startup and bacterial development in an aquaponic system.

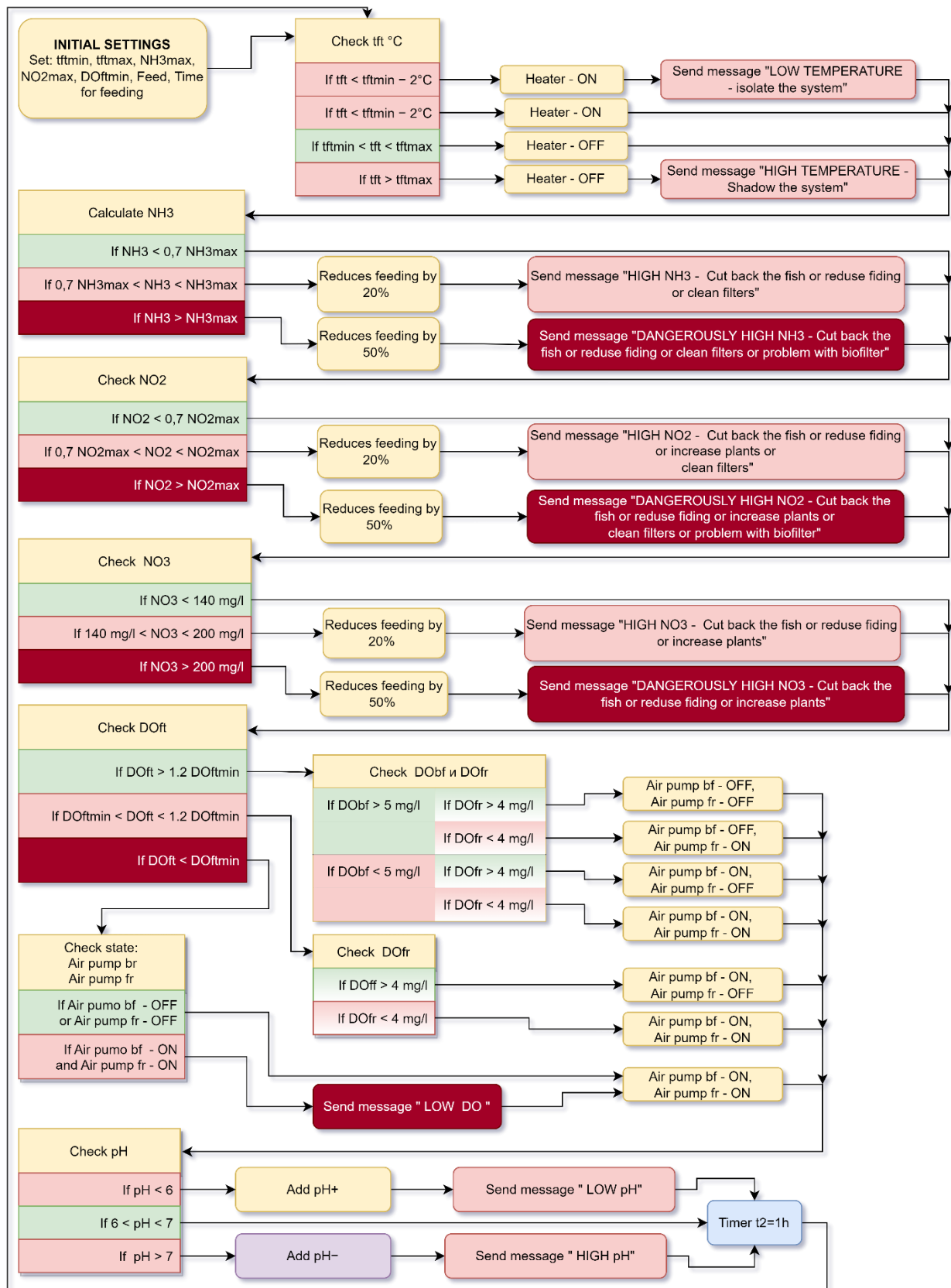


Figure 6.16 – Working algorithm.

6.4.3.3 Feeding Cycle

The feeding cycle is illustrated in Figure 6.18. To maintain system balance, if levels of NH_3 , NO_2 or NO_3 exceed acceptable thresholds, the system adjusts the amount of feed dispensed and records corrections in memory for the next feeding cycle.

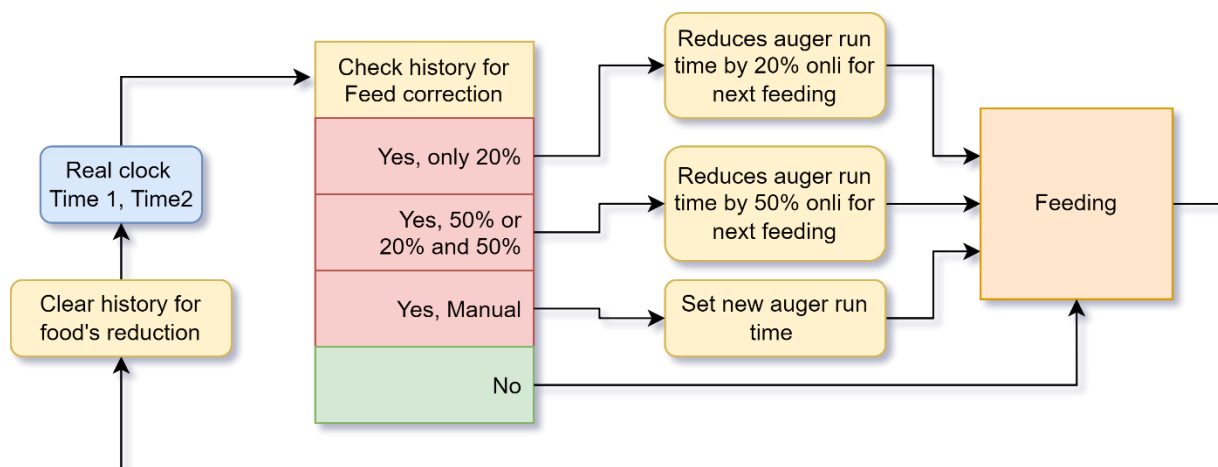


Figure 6.18 – Feeding Algorithm in an Aquaponic System

6.4.4 Conducted tests of the CPS for environmental management in an aquaponic system

A test setup was implemented using a Raspberry Pi 4 (8GB) server with the OpenHAB 3.0 operating system. Software was developed for managing the aquaponic system according to the previously described algorithms. Testing the CPS in a real aquaponic system would require significant time and would need to be conducted in environments with varying water hardness. Therefore, system functionality was tested under laboratory conditions. For this purpose, software and hardware were tested using synthesized data transmitted via MQTT Broker, instead of using actual sensor signals. The system's performance was analyzed using data that would realistically be measured in a real-world setting. This included synthesized values for deviations in water temperature in the fish tank and biofilter, dissolved oxygen levels in the fish tank, biofilter, and floating rafts, as well as nitrite, nitrate, pH, and ammonium NH_4^+ levels in the fish tank. The obtained data for ammonium NH_4^+ values were converted to ammonia NH_3 and total ammonia nitrogen TAN concentrations using a calculation based on pH and temperature. The actuators were replaced with signal lights to record their operation times. The accuracy of the notifications sent to the operator was also verified. When data was transmitted via the MQTT Broker, it was stored in memory and became available for the system to read. If new data did not reach the server for any reason, the system treated the last recorded values as current. This was necessary because obtaining accurate readings for some water parameters can take several minutes—or even more than 10 minutes. However, this is not an issue, as aquaponic systems are inherently inert and slow to change.

At preset intervals, the data was submitted to the system. The system was configured with the following parameters: $t_{\text{bfmin}} = 17\text{ }^\circ\text{C}$, $5\text{ mg/L} < \text{DO}_{\text{bf}} < 8\text{ mg/L}$, $6 < \text{pH} < 7$, TAN and NO_2^- greater than 3 mg/L , until NO_3^- reaches values greater than 100 mg/L , after which they must be reduced to values less than or equal to 0.1 mg/L , taking into account the readiness of the system. Upon reading the stored values, the system activated the heater and air pumps in the fish tank and biofilter, triggered the dosing auger (for ammonia addition), and the auger for

pH reduction, all based on preset parameters. The calculated values for TAN and NH_3 can also be checked. Monitoring the values confirmed that the system operated correctly according to the input data. After reading the final column values, an email notification was sent to the operator indicating that the startup cycle had been completed.

The system's working cycle was also tested under the following initial conditions: $t_{\text{ftmin}} = 12$ °C, $t_{\text{ftmax}} = 18$ °C, $\text{NH}_{3\text{max}} = 0,4$ mg/L, $\text{NO}_{2\text{max}} = 0,4$ mg/L, $\text{DO}_{\text{ftmin}} = 4$ mg/L, auger operating time for adjusting the pH = 12 min., auger operation time feeding food = 18 min., feeding times 12:30 and 19:00. The auger run time was intentionally set much longer than actual feeding duration to facilitate observation during testing. The test started at 10:00, with a cycle duration of 1 hour. The system correctly controlled the air pumps in the biofilter and floating rafts, the heater, and the pH augers. At 12:30, the feed auger activated at the designated time. At 13:00, upon detecting a low pH level, the auger was triggered and a message with the pH value was sent. In the next cycle, when high temperature was detected, the system also sent a notification. At 15:00, a warning was issued for a high NO_2^- level, above 70% of the acceptable limit, along with a recommendation to reduce it. A 20% correction was recorded to shorten the feed auger's run time. At 17:00, pH and NH_3 levels were found to exceed the permissible limits, and a message with their values and corrective suggestions was sent. Additionally, a 50% correction to the feed auger's run time was recorded. The next feeding time was reduced by half. The system also reacted to elevated NO_3^- levels and low temperature during the final test cycle.

6.5 System Installation and Configuration

The initial setup includes installing OpenHABian on the CPS server, followed by the installation of additional software and configuration of the system for operation. These installations can be performed via the command line, for example using Solar-PuTTY or another terminal, and some of the additional software can be installed directly via menu-based interfaces. Next, existing configuration text files are edited, and new ones are created to configure the system. These files are located in the „openHAB-conf“ directory and its subdirectories. Although they are accessible directly on the server or through a terminal, the most convenient way to create and edit them is using Visual Studio Code. Key configuration files include „addons.cfg“, „basicui.cfg“, „runtime.cfg“ among others. System configuration requires creating at least one file of each type or, for better clarity, multiple files organized in specific folders. These include files with the extensions .persist, .things, .items, .rules, and others, in which the actual system definition is performed. These files describe the connections between physical and virtual components and define the operational rules of the system.

6.6 Summary

The developed control algorithms for various livestock farms provide a high level of autonomy and enable environmental control to be performed without staff intervention, once the initial settings are defined. The CPS can monitor and control different environmental parameters depending on the installed sensor types and control devices. For maximum efficiency, it is recommended that the system includes the full set of components listed above.

The system allows the default parameter ranges to be modified through the graphical interface, according to specific needs. These changes may be based on the requirements of different animal breeds or at the discretion of the farm technologist. The adjustable parameter ranges are set during system configuration but can be updated at any time as needed. This can

also be done remotely via the access console using Solar-PuTTY or another terminal, or through Visual Studio Code connected to the system.

To enable user access to the system, a user interface must be developed that allows convenient monitoring of parameters and control of the system. This will be discussed in the following chapter.

CHAPTER 7. Research and development of a graphical interface for the CPS for livestock farming complexes with remote internet-based management using OpenHAB

The graphical user interface (GUI) is a type of user interface that allows users to interact with electronic devices through visual indicators and graphical elements. In this case, the developed GUI for the CPS in livestock farming complexes enables monitoring of parameters, control and regulation of the environment.

For the purposes of this research, two types of GUIs were developed and tested. They can operate simultaneously on the system without interference. These GUIs are based on OpenHAB's Basic UI and HABPanel. Each interface has specific advantages, which are discussed below. In addition, a panel for graphical representation of system parameters was developed and configured in Grafana. All mentioned elements are web-based interfaces.

7.1 GUI development based on Basic UI

As an example, we consider the main graphical interface of the CPS for climate control in a dairy farm, developed using the Basic UI. Figure 7.1 shows a sample view of the interface captured from a desktop monitor. The top panel displays real-time environmental parameters. The second panel shows the measured concentrations of harmful gases. Depending on the number of sensors in the facility, sensors can be added or removed from the panels, the number of panels can be adjusted, and so on. If multiple sensors of the same type (e.g., temperature) are present in a premises, the system can be configured to display and operate based on the average value.

The third panel displays actuators, their current status (on, off, position, speed, etc.), and control buttons for configuring their operation.

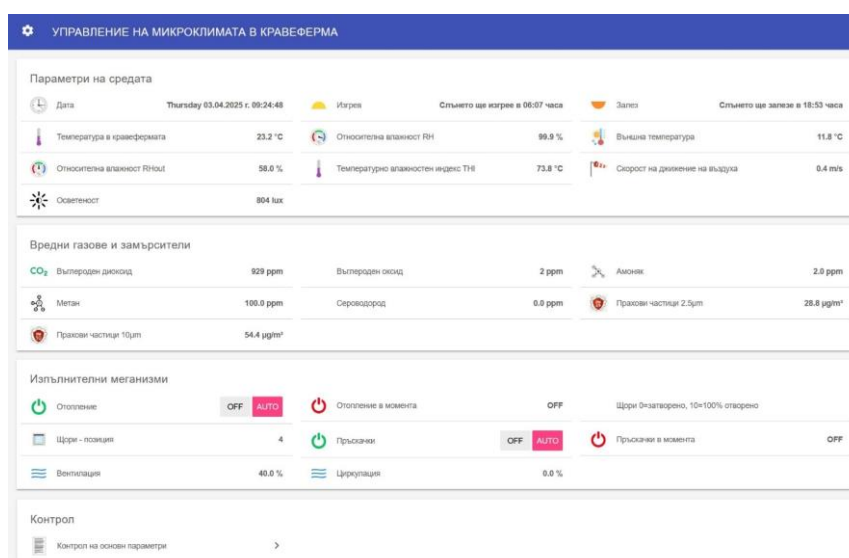


Figure 7.1. Main GUI of the CPS for dairy farm climate control based on Basic UI.

The fourth panel is configured to access a new page that separates control of basic parameters that do not require frequent adjustment, such as optimal temperature or maximum airspeed limits (Figure 7.2).

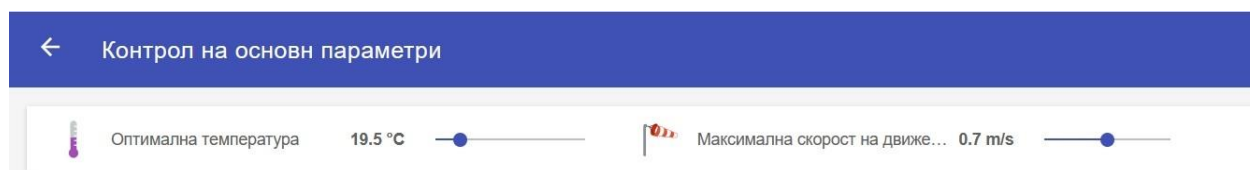


Figure 7.2. Control of basic parameters

This GUI is suitable for all types of devices—from large and small desktop monitors to tablets and even smartphones, since the page layout automatically adapts to the screen size and resolution.

7.1.1 Configuration of the GUI Based on Basic UI

Configuration of the main GUI page is performed by creating a text file with a .sitemap extension in the sitemap directory on the CPS server. Each panel, element, or subpage is described in text, with specific rules for each item. The elements include defining the page name, panel titles, variable names to be displayed, and so on. For each element, icons, units of measurement, value format, and display name are specified.

7.2 GUI development based on HABPanel

The GUI developed using HABPanel (Figure 7.6) has some advantages and disadvantages compared to the Basic UI. Multiple versions can be designed with different layouts for various use cases. HABPanel is better suited for large screens, though it can be configured for smaller ones as well. Besides displaying system parameter values, HABPanel allows setting up a color-coding scheme. For example, green for normal values, orange for elevated, and red for values exceeding safe limits.



Figure 7.6. Switching between views and settings in HABPanel.

Selecting “ACTUATORS” displays the same controls and data as in Basic UI, but with a different presentation (Figure 7.7).

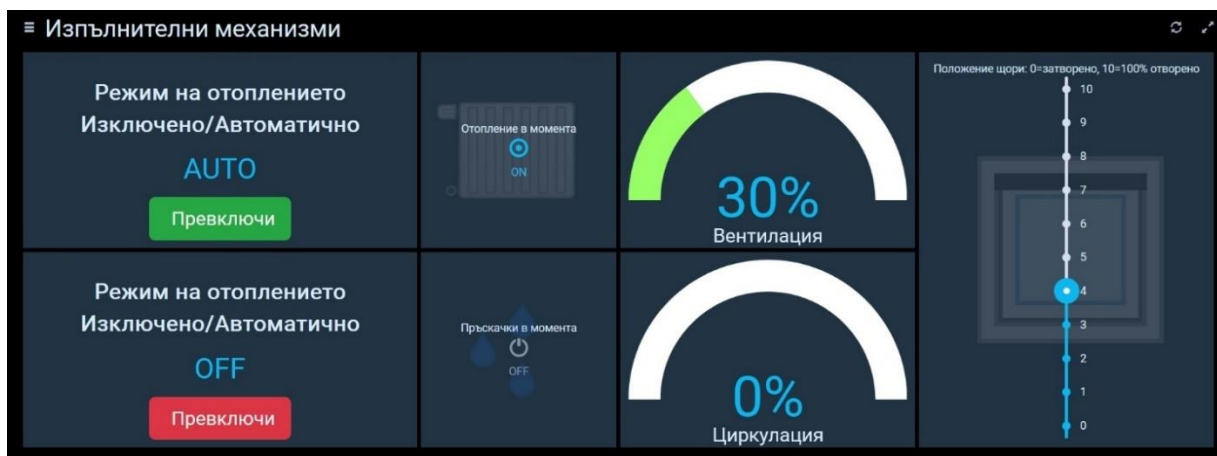


Figure 7.7. Actuator display in HABPanel.

7.2.1 Configuration of the GUI Based on HABPanel

HABPanel offers much greater flexibility in designing the interface. In addition to standard component selection options, users can create and customize templates through direct coding. This allows full control over each component—such as font, text size and color, button size, color and shape, sliders, and other components. Elements can also change color or appearance dynamically based on their status (e.g., on/off), making the interface more intuitive and interactive.

Conclusion

The dissertation work develops algorithms for microclimate management in various livestock farms, as well as for environmental control in an aquaponic system. Similar systems from world-renowned manufacturers and other innovative developments are examined, and a comparative analysis is made with advantages and disadvantages compared to the proposed system.

During the tests, components such as sensors, controllers and a control computer were selected that met the technical requirements for building the system. They were also tested for an extended period of time to establish their suitability and durability.

Different software was selected and tested to verify its suitability for creating the proposed CPS, and it was found that it can work in real time, without visible delays. It has been found that the system can be used for small or medium-sized livestock farms, and as such it is not suitable for very large farms.

Two types of graphical user interfaces have been developed that can work simultaneously without interfering with each other and allow for easy operation of the system from different devices such as a personal computer, tablet or smartphone. The graphical interface can be modified by adding or removing elements, depending on the equipment available on the livestock farm.

Major scientific contributions

- A new method for managing the microclimate in a poultry farm has been developed, which is based on calculating the birds' felt temperature, which is different from the room temperature and depends on the temperature, humidity and air velocity, as well as the age

of the chickens. Publication "Algorithm for Autonomous Management of a Poultry Farm by a Cyber-Physical System" in the journal *Animals* -IMPACT FACTOR - 2.7; CITISCORE – 4.9; SJR – Q1

- A new method for automatic control of nitrates, nitrites and ammonia in an aquaponic system has been developed by controlling the amount of food supplied to the automatic feeder. Publication "Concept of a Cyber-Physical System for Control of a Self-Cleaning Aquaponic Unit" in the journal *AgriEngineering* - IMPACT FACTOR - 3.0; CITISCORE – 4.7; SJR – Q1

Major scientific and applied contributions

- CPS have been developed for microclimate management in a cow farm, a pig farm and a poultry farm, built with cost-oriented components, with the final price being significantly lower than existing solutions on the market. This makes it easily accessible to small and medium-sized farms for which the initial investment for existing systems is prohibitive.
- The developed CPS for microclimate control in a poultry farm allows for fully autonomous control, in which the system independently changes the parameters of the environment according to the age of the chickens and switches between the three ventilation modes without the intervention of personnel. Existing similar systems only offer switching from minimum to transitional ventilation and vice versa. The proposed system also allows switching to tunnel ventilation mode, thanks to the introduced method for recording the temperature felt by the birds.
- A CPS has been developed for environmental management in an aquaponic system that offers autonomous control of a much wider range of parameters compared to existing similar systems, while at the same time being able to send recommendations to staff to regulate the amount of fish and plants to achieve and maintain its balance.

Major applied contributions

- The developed CPS for microclimate management in a poultry farm was implemented and tested in a poultry farm in collaboration with Thracian University in Stara Zagora, contributing to reducing electricity costs and improving the conditions for the birds being raised.

Acknowledgements

I thank my scientific supervisor, Prof. Dr. Nayden Shivarov, for his assistance and guidance throughout the period of my doctoral studies, as well as for his assistance in conducting research and preparing this dissertation.

Approbation of the results

Various parts of the results obtained have been reported at the following forums, conferences and workshops:

- „Third Interdisciplinary Doctoral Forum June 6-7, 2022. Park-Hotel "Kyustendil", Kyustendil", "Cyber-Physical System for Intelligent Management of a Cow Farm“
- IFAC Workshop on Control for Smart Cities., June 27-30, 2022, Sozopol, Bulgaria, “Algorithms for Cost Oriented Cyber Physical System (COCPS) for intelligent control of animal husbandry farms “

- IFAC International Conference on Technology, Culture and International Stability - 21st TECIS 2022, October 26-28, Prishtina (Kosovo) - Online „Cost Oriented Cyber-Physical System algorithm for pig farm microclimate and air quality control”
- 4th Interdisciplinary PhD Forum with International Participation, 16 – 19 May 2023, Sandanski, Bulgaria „Cyber-Physical System algorithm for pig farm microclimate “
- 5th Interdisciplinary PhD Forum with International Participation 16 – 19 April 2024 Kyustendil, Bulgaria “Poultry farm microclimate management by calculating felt temperature”
- XXXIII International Scientific and Technical Conference AUTOMATION OF DISCRETE PRODUCTION ENGINEERING “ADP – 2024” 27 - 30 2024” June 27 - 30, 2024, Sozopol Base of TU-Sofia “Cyber-physical system for microclimate management in livestock farms “
- Scientific seminar of IICT - BAS in the section "Cyber-Physical Systems", on 06.12.2024. 15:00 in hall 228 in block 2. Presentation on the topic: "Concept for a CFC for controlling a self-cleaning aquaponic module".

Publications on the dissertation topic

- Stefan Chivarov, Kristian Dimitrov, Nayden Chivarov „ Algorithms for Cost Oriented Cyber Physical System (COCPS) for intelligent control of animal husbandry farms“;; IFAC-PapersOnLine Volume 55, Issue 11, 2022, Pages 31-36, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.08.044>
- Kristian Dimitrov, Stefan Chivarov, Nayden Chivarov; „Cost Oriented Cyber-Physical System algorithm for pig farm microclimate and air quality control “, IFAC-PapersOnLine Volume 55, Issue 39, 2022, Pages 336-341, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.12.047>
- Nayden Chivarov, Stefan Chivarov, Kristian Dimitrov „Algorithm for Autonomous Management of a Poultry Farm by a Cyber-Physical System“ Special Issue Intelligent Animal Husbandry; Animals 2023, 13, 3252. <https://doi.org/10.3390/ani13203252> CiteScore-4.9, Impact factor 2.7, Quartile Rank Q1 – Animal Science and Zoology
- Kristiyan Dimitrov, Nayden Chivarov, Stefan Chivarov, Tsvetelina Paunova-Krasteva, Emil Filipov and Albena Daskalova “Concept of a Cyber–Physical System for Control of a Self-Cleaning Aquaponic Unit” AgriEngineering 2024, 6(4), 3843-3874; <https://doi.org/10.3390/agriengineering6040219> CiteScore-4.7, Impact factor 3.0, Quartile Rank Q1 – Horticulture
- Kristiyan Dimitrov "Cyber-Physical System for Microclimate Management in Livestock Farms", Automation of Discrete Production, Issue 6 July 2024, TU-Sofia Publishing House, ISSN: 2682-9584, <https://mf.tu-sofia.bg/mntkadp/includes/archive/2024.pdf>

Citations.

- Vatn, K.J.D., Kavallieratos, G., Katsikas, S. (2024). Threat Analysis in Dairy Farming 4.0. In: Katsikas, S., et al. Computer Security. ESORICS 2023 International Workshops. ESORICS 2023. Lecture Notes in Computer Science, vol 14398. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54204-6_3

- Ibrahimov, B.; Stapleton, L.; Technology, International Stability and Culture (TECIS) – TC9-5 Exploring the Alignment of Control and Automation Systems with the United Nations Sustainable Development Goals (UN SDGs). IFAC-PapersOnLine Volume 58, Issue 3, 2024, Pages 176-181, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.146>
- Tan, C.; Yu, Z. A Low-Carbon Emission Production Scheduling Algorithm of Intelligent Manufacturing based on Energy and Environmental Efficiency. Procedia Computer Science 2024, 247, 1215. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.10.146>
- Kistanova, E.; Yotov, S.; Zaimova, D. Intelligent Animal Husbandry: Present and Future. Animals 2024, 14, 1645. <https://doi.org/10.3390/ani14111645>
- Montalvo, A.; Camacho, O.; Chavez, D. Cyber-Physical Systems for Smart Farming: A Systematic Review. Sustainability 2025, 17, 6393. <https://doi.org/10.3390/su17146393>

References

- [1] Vale, W.G. (2007) Effects of environment on buffalo reproduction. Ital. J. Anim. Sci., 6(2): 130-142., 15 Mar 2016, <https://doi.org/10.4081/ijas.2007.s2.130>
- [2] Sunil Kumar, B.V., Kumar, A. and Kataria, M. (2011) Effect of heat stress in tropical livestock and different strategies for its amelioration. Journal of Stress Physiology Biochemistry., 7(1): 45-54., January 22, 2010
- [3] Leonel Avendaño-Reyes, Heat Stress Management for Milk Production in Arid Zones, Published: 26 September 2012, <http://dx.doi.org/10.5772/51299>
- [4] <https://www.nadis.org.uk/disease-a-z/cattle/managing-heat-stress-in-dairy-cows/> (accessed on August 2022)
- [5] J.W. West, B.G. Mullinix, J.K. Bernard, Effects of Hot, Humid Weather on Milk Temperature, Dry Matter Intake, and Milk Yield of Lactating Dairy Cows, Journal of Dairy Science, Volume 86, Issue 1, January 2003, Pages 232-242, [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73602-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73602-9)
- [6] Rachid BOURAOUI, Mondher LAHMAR, Abdessalem MAJDOUB, M'nouer DJEMALI, Ronald BELYEAD, The relationship of temperature-humidity index with milk production of dairy cows in a Mediterranean climate, November 2002 Animal Research 51(6):479-491, DOI: 10.1051/animres:2002036
- [7] Spiers, D.E., Spain, J.N., Sampson, J.D. and Rhoads, R.P. (2004) Use of physiological parameters to predict milk yield and feed intake in heat-stressed dairy cows. Journal of Thermal Biology, 29(7-8): 759-764.
- [8] Johnson H.D., Physiological responses and productivity of cattle, in: Yousef M.K. (Ed.), Stress physiology in livestock. Basic principles, Vol. 1, 4-19, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1985.
- [9] Mol G., Ogink N.W., 2004 - The effect of two ammonia - emission-reducing pig housing systems on odour emissions. Water Sci. Technol. 50, p. 334 – 340; (2004), <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0299>

- [10] Lopez J., Jesse J.W., Becker B.A., Ellersieck M. R., 1991 - Effects of temperature on the performance of finishing swine: II. J. Anim. Sci., 111, p 1850 – 1855; (May 1991) <https://doi.org/10.2527/1991.6951843x>
- [11] Kemp, B., Verstegen, M.W.A. (1987). The Influence of Climatic Environment on Sows. In: Verstegen, M.W.A., Henken, A.M. (eds) Energy Metabolism in Farm Animals. Current Topics in Veterinary Medicine and Animal Science, vol 44. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3363-7_8
- [12] Drăghici C., 1991, Microclimatul adăposturilor de animale și mijloacele de dirijare. Ed. Ceres;
- [13] Sergey Kostarev, Oksana Kochetova, Alfia Hamidullina, and Tatyana Sereda, Microclimate control system at poultry enterprises of closed type, E3S Web of Conferences 282, 07024 (2021), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128207024>
- [14] A.V. Trifanov, V.V. Kaluga, A.G. Trafimov, Technologies and technical means of mechanized production of horticulture and livestock, 87-92 (2004)
- [15] Livingston, M.L.; Pokoo-Aikins, A.; Frost, T.; Laprade, L.; Hoang, V.; Nogal, B.; Phillips, C.; Cowieson, A.J. Effect of heat stress, dietary electrolytes, and vitamins E and C on growth performance and blood biochemistry of the broiler chicken. Front. Anim. Sci. 2022, 3, 807267. <https://doi.org/10.3389/fanim.2022.807267>
- [16] Tsiouris, V.; Georgopoulou, I.; Batzios, C.; Pappaioannou, N.; Ducatelle, R.; Fortomaris, P. Heat stress as a predisposing factor for necrotic enteritis in broiler chicks. Avian Pathol. 2018, 47, 616–624. <https://doi.org/10.1080/03079457.2018.1524574>
- [17] Lara, L.J.; Rostagno, M.H. Impact of heat stress on poultry production. Animals 2013, 3, 356–369. <https://doi.org/10.3390/ani3020356>
- [18] Sohail, M.U.; Ijaz, A.; Yousaf, M.S.; Ashraf, K.; Zaneb, H.; Aleem, M.; Rehman, H. Alleviation of cyclic heat stress in broilers by dietary supplementation of mannan-oligosaccharide and Lactobacillus-based probiotic: Dynamics of cortisol, thyroid hormones, cholesterol, C-reactive protein, and humoral immunity. Poult. Sci. 2010, 89, 1934–1938. <https://doi.org/10.3382/ps.2010-00751>
- [19] Total production of fishery products (million tonnes of live weight, EU, 2000-2021) https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Aquaculture_statistics (accessed on 1.6.2024).
- [20] Jaap van Rijn, Waste treatment in recirculating aquaculture systems, Aquacultural Engineering 53 (2013) 49–56, <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.11.010>
- [21] S. Wahyuningsih, H. Effendi, and Y. Wardiatno, “Nitrogen removal of aquaculture wastewater in aquaponic recirculation system,” Aquaculture, Aquarium, Conservation Legislation, vol. 8, no. 4, pp. 491–499, 2015.
- [22] X. Li, J. Li, Y. Wang, L. Fu, Y. Fu, B. Li, and B. Jiao, “Aquaculture industry in China: Current state, challenges, and outlook,” Rev. Fisheries Sci., vol. 19, no. 3, pp. 187–200, 2011
- [23] Somerville, C.; Cohen, M.; Pantanella, E.; Stankus, A.; Lovatelli, A. Small-Scale Aquaponic Food Production: Integrated Fish and Plant Farming; FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper; FAO: Rome, Italy, 2014.

- [24] Gilbert Van Stappen, Khalid Salie, Henk Stander, Inoculating fish sludge from aquaponics with microbes to enhance mineralisation of phosphorus, Ghent University: 2019 – 2020
- [25] A. A. Steiner, “Soilless culture,” in Proc. 6th Colloq. Int. Potash Inst., no. 97. Bern, Switzerland: International Potash Institute, 1968, pp. 324–341.
- [26] B. Zhang, P. Luo, H. Pang, Y. Gao, Z. Zhang, and C. Li, “Nitrogen pollutants removal characteristics in aquaponic system,” Chin. J. Environ. Eng., vol. 12, no. 5, pp. 1501–1509, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.01.004>
- [27] N. Savidov, “Evaluation and development of aquaponics production and product market capabilities in Alberta,” Alberta Agricult., Food Rural Develop., Crop Diversification Centre South, Brooks, AB, Canada, Tech. Rep., 2004.
- [28] <https://www.bigdutchman.com/en/homepage/>; (accessed on 1 July 2024)
- [29] <https://www.fancom.com/>; (accessed on 1 July 2024)
- [30] <https://www.skov.com/en/home/>; (accessed on 1 July 2024)
- [31] <https://www.meier-brakenberg.de/en/>; (accessed on 5 July 2024)
- [32] <https://pentairaes.com> (accessed on 3 August 2024)
- [33] <https://aquaponics.com> (accessed on 1 August 2024)
- [34] <https://eheim.com> (accessed on 10 August 2024)
- [35] <https://milwaukeeinstruments.com> (accessed on 3 August 2024)
- [36] Lee, C.; Wang, Y. Development of a cloud-based IoT monitoring system for Fish metabolism and activity in aquaponics. Aquac. Eng. 2020, 90, 102067. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102067>
- [37] Khaoula, T.; Abdelouahid, R.A.; Ezzahoui, I.; Marzak, A. Architecture design of monitoring and controlling of IoT-based aquaponics system powered by solar energy. Procedia Comput. Sci. 2021, 191, 493–498. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.07.063>
- [38] Abd Al-Zahraa Naser, Baraa, Aajam Laith Saleem, Ali Hilal Ali, Salam Alabassi and Maher A.R. Sadiq Al-Baghdadi. (2019) “Design and construction of smart IoT-based aquaponics powered by PV cells.” International Journal of Energy and Environment (IJEE), Volume 10, Issue 3, 2019, pp.127-134.
- [39] Adrian K. Pasha; Edi Mulyana; Cecep Hidayat; Muhammad Ali Ramdhani; Opik T. Kurahman; M. Adhipradana, “System Design of Controlling and Monitoring on Aquaponic Based on Internet of Things”, in 4th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT). <https://doi.org/10.1109/icwt.2018.8527802>, IEEE.
- [40] Goran D. Putnik, Luis Ferreira, Nuno Lopes, Zlata Putnik, “What is a Cyber-Physical System: Definitions and Models Spectrum” Polytechnic Institute of Cávado and Ave, Vila Frescaíinha S. Martinho, Barcelos, Portugal, June 2019, doi: 10.5937/fmet1904663P
- [41] E. A. Lee, “Cyber Physical Systems: Design Challenges,” 2008 11th IEEE Int. Symp. Object Component-Oriented Real-Time Distrib. Comput., pp. 363–369, 2008 DOI: 10.1109/ISORC.2008.25

- [42] <https://www.openhab.org/>; (accessed on 3 June 2024)
- [43] R. A. Light, "Mosquitto: server and client implementation of the MQTT protocol," The Journal of Open Source Software, vol. 2, no. 13, May 2017, DOI: 10.21105/joss.00265
- [44] <https://www.influxdata.com/> (accessed on 7 March 2024)
- [45] <https://grafana.com/> (accessed on 7 March 2024)
- [46] <https://www.amanda.org/> (accessed on 6 March 2024)
- [47] <https://code.visualstudio.com/> (accessed on 11 March 2024)
- [48] <https://tasmota.github.io/docs/> (accessed on 12 March 2024)
- [49] <https://www.softblade.de/> (accessed on 12 March 2024)
- [50] <http://www.volison.com/> (accessed on 9 December 2023)
- [51] <https://www.analog.com/> (accessed on 14 March 2024)
- [52] <http://www.aosong.com/> (accessed on 15 March 2024)
- [53] <https://sensirion.com/> (accessed on 16 March 2024)
- [54] <https://www.winsen-sensor.com/> (accessed on 3 June 2024)
- [55] <https://senseair.com/> (accessed on 5 January 2024)
- [56] <http://www.klha.com/> (accessed on 9 February 2023)
- [57] <https://www.jxctiot.com/> (accessed on 9 December 2023)
- [58] <https://www.renkeer.com/> (accessed on 9 December 2023)
- [59] <https://www.wika.com/> (accessed on 3 June 2024)
- [60] <https://www.rohm.com/> (accessed on 5 June 2024)
- [61] <https://ams-osram.com/> (accessed on 5 January 2024)
- [62] <https://www.ysi.com/> (accessed on 3 January 2024)
- [63] <https://www.nnelectronic.com/> (accessed on 16 March 2024)
- [64] Hristev, H., 2007. Natural resistance of animals. Agrarian University, Plovdiv, 128 p. (Bg)
- [65] Ministry of Agriculture in Bulgaria. Regulation №44 from 20 April 2006 for Veterinary Medical Requirements for Livestock Facilities; Ministry of Agriculture in Bulgaria: Sofia, Bulgaria, 2006.
- [66] Ministry of Agriculture in Bulgaria. Regulation №14 from 3 February 2006. for Minimum Requirements for protection and human behavior when breeding calves, In power from 01.05.2006. Ministry of Agriculture in Bulgaria: Sofia, Bulgaria, 2006.
- [67] Ministry of Labor and Social Policy and the Ministry of Health in Bulgaria. Regulation № 13 from 30 December 2003, for Protection of workers from risks related to exposure of chemical agent at work, in power from 31.01.2005.
- [68] Santana, C. M., Gauger, P., Vetger, A., Magstadt, D., Kim, D. S., Shrestha, D., ... Rumbelha, W. K. (2021). Ambient hydrogen sulfide exposure increases the severity of influenza A virus infection in swine. Archives of Environmental & Occupational Health, 76(8), 526–538.
- [69] S.E. Curtis et al., Atmospheric ammonia affects swine health, Illinois Research (1977)

- [70] Donald, J.O. Environmental Management in the Broiler House; Auburn University: Auburn, AL, USA, 2010.
- [71] Bist, R.B.; Subedi, S.; Chai, L.; Yang, X. Ammonia emissions, impacts, and mitigation strategies for poultry production: A critical review. *J. Environ. Manag.* 2023, 328, 116919. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116919>
- [72] Olanrewaju, H.A.; Thaxton, J.P.; Dozier, W.A.; Purswell, J.; Roush, W.B.; Branton, S.L. A review of lighting programs for broiler production. *Int. J. Poult. Sci.* 2006, 5, 301–308. DOI: [10.3923/ijps.2006.301.308](https://doi.org/10.3923/ijps.2006.301.308)
- [73] Mendes, A.S.; Paixão, S.J.; Restelatto, R.; Morello, G.M.; de Moura, D.J.; Possenti, J.C. Performance and preference of broiler chickens exposed to different light sources. *J. Appl. Poult. Res.* 2013, 22, 62–70. <https://doi.org/10.3382/japr.2012-00580>
- [74] Farm Animal Welfare Council, Report on the Welfare of Broiler Chickens. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, London, UK (1992)
- [75] Riddell, C.; Classen, H.L. Effects of increasing photoperiod length and anticoccidials on performance and health of roaster chickens. *Avian Dis.* 1992, 36, 491–498. DOI: [10.2307/1591739](https://doi.org/10.2307/1591739)
- [76] Morris, M.P. National survey of leg problems. *Broiler Ind.* 1993, 93, 20–24.
- [77] Classen, H. L., Annett, C. B., Schwan-Lardner, K. V., Gonda, R., & Derow, D. (2004). 2004 SPRING MEETING OF THE WPSA UK BRANCH PAPERS: The effects of lighting programmes with twelve hours of darkness per day provided in one, six or twelve hour intervals on the productivity and health of broiler chickens. *British Poultry Science*, 45(sup1), S31–S32. <https://doi.org/10.1080/00071660410001698137>
- [78] Gordon, S.H. Effects of day length and increasing day length programs on broiler welfare and performance. *World's Poult. Sci. J.* 1994, 50, 269–282.
- [79] Rozenboim, I., Robinson, B., & Rosenstrauch, A. (1999). Effect of light source and regimen on growing broilers. *British Poultry Science*, 40(4), 452–457. <https://doi.org/10.1080/00071669987197>
- [80] Renden, J.A.; Bilgili, S.F.; Lien, R.J.; Kincaid, S.A. Live performance and yields of broilers provided various lighting schedules. *Poult. Sci.* 1991, 70, 2055–2062. <https://doi.org/10.3382/ps.0702055>
- [81] Leeson, S.; Caston, L.J.; Summers, J.D. Performance of layers given two-hour midnight lighting as growing pullets. *J. Appl. Poult. Res.* 2003, 12, 313–320. <https://doi.org/10.1093/japr/12.3.313>
- [82] Kritensen, H.H.; Aerts, J.M.; Leroy, T.; Berckmans, D.; Wathes, C.M. Using light to control broiler chickens. *Br. Poult. Sci.* 2004, 45, S30–S31.
- [83] Czarick, M.; Lacy, M.P.; Lott, B. Poultry Housing Tips, Recent Developments in Wind-Chill Charts; College of Agricultural and Environmental Science: Athens, GA, USA, 1999; Volume 11.
- [84] Wind Chill Effect. What It Is and How to Calculate It. Available online: <https://www.pericoli.com/en/Wind-chill-effect-What-it-is-and-how-to-calculate-it/> (accessed on 11 November 2022).
- [85] Publisher—Avigen, Ross Broiler Management Handbook 2018. 2018. Available online: www.avigen.com (accessed on 23 November 2022).
- [86] Donald, J.; Campbell, J.; Simpson, G.; Macklin, K. Poultry Engineering, Economics & Management, National Poultry Technology Center Produced in Cooperation with the U.S.

Poultry & Egg and Alabama Poultry & Egg Associations Issue No 67; Auburn University: Auburn, AL, USA, 2010.

[87] Sheikh, B. Hydroponics: Key to sustain agriculture in water stressed and urban environment. Pak. J. Agric. Agril. Eng. Vet. Sci. 2006, 22, 53–57.



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

АВТОРЕФЕРАТ НА ДИСЕРТАЦИЯ

за присъждане на образователна и научна степен “доктор” по докторска програма „Автоматизирани системи за обработка на информация и управление”

КИБЕР-ФИЗИЧНИ СИСТЕМИ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНО УПРАВЛЕНИЕ НА КОМПЛЕКСИТЕ ЗА ОТГЛЕЖДАНЕ НА ЖИВОТНИ

Кристиян Симеонов Димитров

Ръководител: Проф. Найден Шиваров

Научно жури:

Проф. Вера Ангелова-Димитрова
Доц. Стефан Билидеров
Проф. Николай Стоименов
Доц. Мартин Камбушев
Проф. Марин Маринов

**Институт по информационни и комуникационни
технологии**



Секция „Кибер-физични системи”

ГЛАВА 1. Обзор, анализ и систематизация на съществуващи изследвания и практики по темата

В наши дни управлението на микроклимата в животновъдните ферми придобива все по-голямо значение. Това се дължи не само на нарастващите изисквания за енергоефективност, повишаване на продуктивността и устойчивост, но и на хуманното отношение към животните. Микроклиматът е съвкупност от параметри като температура, влажност, скорост на движение на въздуха, осветеност и концентрация на вредни газове и др. които оказват пряко и косвено въздействие върху здравето, продуктивността и благосъстоянието на животните. Неподходящите условия могат да доведат до забавен растеж, намалена производителност на месо, мляко, яйца, повишена заболяемост и смъртност.

Темата е особено актуална и в контекста на климатичните промени и въвеждането на все по-строгите екологични регулации. Автоматизираните системи могат да помогнат за по-ефективно използване на ресурси като електроенергия, вода и време за управление на стопанството. Освен това, цифровизацията и използването на „умни“ технологии се вписват в тенденцията към изграждане на устойчиво и прецизно земеделие.

Въвеждането на автоматизирани системи за управление на микроклимата е ключово за модернизацията на фермите. Те позволяват прецизен контрол на вътрешната среда чрез сензори и алгоритми, които в реално време могат да управляват параметрите на средата. Като се има предвид цената на съществуващите системи за управление на микроклимата в животновъдните ферми е необходимо разработването на нови системи, които са достъпни за по-широк кръг потребители.

Целта на този труд е да се разработи Кибер-физична система (КФС) за управление на микроклимата в комплексите за отглеждане на животни и за управление на средата при отглеждане на риба на базата на openHAB.

Обект на изследването е не само проучването на възможността за реализиране на КФС с избрания софтуер, но и анализирането на влиянието на средата върху продуктивността и здравословното състояние на животните.

Предмета на изследването включва необходимостта да се разгледат различните параметри на микроклимата в животновъдните ферми и влиянието което оказват върху дадения вид животни директно и индиректно. Разглежда се и влиянието на параметрите и качеството на водата при отглеждане на риби или други водни животни в затворена екосистема или т.н. аквапонична система. Разглеждат се различни способи за контролирането на тези параметри, защото средата оказва влияние както на здравословното състояние на животните, така и на производителността им и не на последно място и на хуманното отношение към тях. Затова е много важно да се разработят системи които могат надеждно да контролират средата, като за целта се използват минимални ресурси.

1.1 Въведение

Основна цел на първите две глави е да се покаже нуждата от това изследване и да се дефинира проблемната област. Тук се разглежда мотивацията, представят се целите, методологията и разглежданите задачи на дисертацията.

1.1.1 Дефиниране на проблема

В първа и втора глава са разгледани основните проблеми които стоят на дневен ред в съвременното животновъдство и методи и практики за подобряването и развитието му. По конкретно е обърнато внимание на методите и средствата за подобряване на микроклимата в затворени животновъдни стопанства за отглеждане на дойни крави, прасета и бройлери. Разгледани са и някои основни проблеми при подобряване на средата за отглеждане на риби и растения в аквапонични системи. Разгледано е директното и косвеното влияние на микроклимата върху икономическите показатели на стопанства за отглеждане на животни. Показани са съществуващи системи за автоматизация на микроклимата с основните им подсистеми на водещи фирми в световен мащаб, както и са разгледани някои научни разработки от последните няколко години, с цел да се добие обща представа до къде е стигнало развитието в дадената област.

1.2 Влияние на средата върху продуктивността в животновъдни ферми

1.2.1 Влияние на микроклимата върху млеконадоя в кравеферма

Микроклимата влияе както директно, така и индиректно на производителността. Температурата е основния фактор който трябва да се контролира за да се поддържа термо неутралната зона TNZ. При температури над 28 °C, дори и при ниска относителна влажност кравите показват състояние на хипертония и топлинен стрес [1,2] при което приема на фураж, млеконадоя, производството на млечна мазнина и протеини, както и степента на плодовитост намаляват [3]. Влиянието което температурата оказва на животните е в пряка зависимост с относителната влажност RH. Това се определя от т.н. температурно - влажностен индекс THI (temperature-humidity index) [4]. Високите стойности на THI оказват най-голямо влияние на млеконадоя след два дни [5]. При стойност на THI около 68 имаме най-голям млеконадой, а повишаването на стойността на THI от 68 на 78 намалява DMI с 9,6% и производството на мляко с 21% [6] приемът на храна започва да намалява на следващия ден след започване на топлинния стрес HS, докато добивът на мляко намалява на втория ден след HS [7]. Според други изследвания [8], THI не оказва влияние на млеконадоя при стойности между 35 и 72. Топлинния стрес оказва влияние и на здравословното състояние на кравите.

1.2.2 Влияние на микроклимата върху производството на месо в свинеферми и птицеферми

Микроклиматът оказва сериозно влияние върху здравословното състояние и производството на всички възрастови категории свине [9,10]. Повишаването на температурата над зоната на комфорт води до намаляване приема на храна и от тава прогресивно намалява и производителността на прасето [11]. Тя влияе на репродуктивните способности, растежа и развитието на тялото, качеството и количеството на продукцията, развитието на нови заболявания и смъртността [12]. Отклонението от номиналните параметри на микроклимата в помещението води до

намаляване на среднодневното наддаване на тегло и влияе върху безопасността на птиците, особено през есенно-зимния период, както и върху продуктивната [13]. Оптималният микроклимат в птицефермите намалява цената на продуктите при птиците с 15-20%. В студени, влажни и лошо вентилирани птицеферми птиците са до 4 пъти по-податливи на заболявания, а тяхната продуктивност намалява с 10-50%, въпреки че консумацията на фураж се увеличава с 10-30% [14]. Топлинният стрес има отрицателно въздействие върху потреблението на фуражи, ефективността на фуражите, индекса на телесна маса, качеството на месото и смъртността [15]. Въпреки напредъка на технологиите и модернизациите сектора, птицевъдството в световен мащаб е значително засегнато от гледна точка на производителността, здравето и цялостното благосъстояние на пилетата от топлинния стрес [16]. При домашните птици, изложени на топлинен стрес се наблюдават отклонения в имунната система, хормонални нередности, дихателните затруднения и електролитния дисбаланс [17,18]. Вентилацията оказва сериозно влияние на всички параметри на микроклимата в сградата, като и контролира наличието на вредни газове в помещенията.

1.3 Влияние на средата върху производството на аквакултури в аквапонична система

Във връзка с повишената консумация на хранителни продукти през последните години отглеждането на аквакултури също се развива значително. През последните 20 години в ЕС аквакултурите имат устойчив темп на растеж като добива на риба чрез аквакултури от общия добив, е нараснал от около 15% през 2000г до около 20% през 2021г [19]. Обръща се внимание и на рецикулацията на отпадъчни води което има голямо въздействие върху намаляването на замърсяването в аквакултурите [20].

При отглеждане на аквакултури с висока плътност, замърсяването на водата от отпадъчни продукти като екскременти, остатъци от храна и други се превръща във вредни вещества като амоняк NH_3 , нитрити NO_2 и сероводород H_2S . Те могат да бъдат изключително опасни във високи концентрации за отглеждани аквакултури. Това може да доведе до големи икономически загуби, както и до отрицателни въздействия върху околната среда в глобален мащаб [21,22]. Едно от предимствата на аквапониката е затвореният цикъл, при който рибните отпадъци, освободени през хрилете и като урина, които са основно амоняк, се преобразуват чрез процесите на нитрификация [23] и минерализация [24]. Отделят се и твърди отпадъци, част от които се превръщат в амоняк чрез микробна активност [23]. Това намалява биологичното замърсяване на отпадъчните води. Аквапоничните системи могат да се разположат на открито или на закрито. Има много примери при които се комбинира аквапоника и оранжерии и този подход се развива непрекъснато [25,26,27].

1.4 Обобщение

След внимателен преглед и анализ на показаните по-горе факти относно влиянието на средата и микроклимата върху отглежданите животни, можем да заключим, че осъществяването на контрол на определени параметри на средата е от изключително значение за благосъстоянието им. Управлението на средата спомага както за увеличаване на продуктивността, така и за подобряване на здравословното състояние на животните и не на последно място осигурява хуманно отношение към тях.

Можем да обобщим, че в затворени животновъдни стопанства е необходимо да се контролират температурата, влажността и скоростта на движение на въздуха,

наличието на замърсители във въздуха като вредни газове, прахови частици и микробна контаминация, както и осветеността и околния шум. Във втория случай в една аквапонична система е необходимо да се контролира не само качеството на водата, но и други параметри на средата. Това са температура и рН на водата, разтворен кислород и въглероден диоксид, амоняк, нитрити, нитрати и други параметри, както и излагането на пряка слънчева светлина.

Затова е необходимо да се разгледат и сравнят съществуващите методи и средства за контрол на средата и микроклимата в животновъдните ферми и при аквапоничните системи. Това сравнение би дало възможност да се анализират някои пропуски и слабости, като се предложат нови методи или по-достъпни начини за управление.

ГЛАВА 2. Изследване на съществуващи методи и средства

2.1 Съществуващи методи за поддържане на микроклимата в животновъдни стопанства

Като примери за лидери в производството на системи за автоматизация и контрол на животновъдни ферми може да разгледаме фирми като Big Dutchman, Fancor, SKOV и др.

2.1.1 Изпълнителни механизми

Те предлагат разнообразие от оборудване за поддържане на микроклимата. Имат различни видове клапи за свеж въздух, жалузи, комини за свеж въздух или циркулация, вентилатори, отоплителни системи пръскачки за изпарително охлаждане и др. По-долу са разгледани някои основни компоненти за управляване на микроклимата в животновъдните стопанства.

Вентилационните клапи за стена [28,29,30] или за таван [28,29] позволяват лесно управление чрез сервомотор [28,29], като са оборудвани с пружина която ги държи плътно затворени, а сервомотора ги издърпва. Клапите тип комин [28,29] имат предимството пред другите таванни клапи, защото не се влияят от скоростта на вятъра.

Жалузите се използват когато е необходимо вентилационните отвори да са големи. Например при по-топъл климат, при естествена вентилация, при тунелна вентилация. Управлението им е подобно на това на клапите, но някои жалузи не са снабдени с пружина за затваряне [28,30].

За тунелна вентилация, освен жалузи, могат да се използват и клапи с вертикално отваряне [29] или големи панелни клапи [28]. И двете имат по-малко въздушно съпротивление спрямо жалузите [28,29]. В много случаи е по-удобно и евтино да се използват щори [28] вместо клапи или жалузи

Вентилаторите използвани в животновъдните стопанства могат да се разделят на няколко групи спрямо предназначението им. Това са вентилатори за свеж или отработен въздух (нагнетяващи или изсмукващи), циркулационни вентилатори или вентилатори от смесен тип [28,29,30]. Спрямо конструкцията на перките, вентилаторите могат да се разделят на аксиални или радиални (центробежни). Има вентилатори с или без клапи за затваряне на отвора. Те могат да бъдат без възможност за регулиране на скоростта, със стъпково регулиране или с възможност за безстепенно регулиране. В последните години се появиха и т.н. смарт вентилатори [29].

На пазара могат да се намерят различни системи за отопление. Освен конвенционалното парно отопление с радиатори или лири, има различни методи за газово отопление [28]. През последните години все по-често се използват системи за отопление с топлообменници [28] в животновъдните ферми. При тях разходите за отопление може да се намалят с над 50% [28].

Пръскачките [30,31] се използват за охлаждане на въздуха и контролиране на влажността в помещенията, за директно намокряне на животните с цел охлаждане, за разкисване на засъхнала мръсотия по стените и пода, както и за дезинфекция на помещенията [30,31]. Могат да се използват в птицеферми, свинеферми и кравеферми като основното им предимство спрямо други системи за охлаждане е по-ниската цена. Те са най-ефективни при сух климат и високи температури. Изпарителните охладителни пъти [28,30] намират широко приложение в различни видове стопанства, като се използват при тунелната вентилация. Те се монтират на тунелните входи като принципа им на работа е следния. В горния им край се обливат с вода, като така се умокрят целите пъти. При преминаване на въздуха през тях, водата се изпарява и се получава охлаждане на въздуха без в него да остават водни капки които могат да намокрят постелята и да влошат условията в помещението.

2.1.2 Сензори

Сензорите които масово се използват за контролиране на микроклимата в животновъдни ферми следят само някои от параметрите на средата. Това са сензори за температура и относителна влажност RH, като обикновено е един комбиниран сензор, сензор за амоняк NH_3 , за въглероден диоксид CO_2 , за налягане, за скорост на движение на въздуха и за осветеност. Дори световни лидери в автоматизацията не използват сензори за постоянно наблюдение на въглероден оксид CO, метан CH_4 , сероводород H_2S и фини прахови частици [28,29,30].

2.1.3 Компютри за управление на микроклимата в животновъдни ферми

На пазара съществуват разнообразни решения за управление на микроклимата в животновъдните ферми. В едната крайност управленията варират от системи за управление на 1 помещение с възможност за включване на няколко сензора за температура, при което спрямо нея може да се включва или изключва отопление и охлаждане, а мощността на вентилацията се настройва ръчно и не се коригира от измерената температура. В другата крайност са системи с многозонов контрол, възможност за включване на множество сензори, които могат да управляват всеки компонент на средата [28,29].

2.2 Съществуващи методи за поддържане на средата и управление на аквапонични системи

Когато става въпрос за автоматизация в съществуващите и предлагани на пазара в момента аквапоничните системи, можем да кажем, че тя е в началото на развитието си. Аквапоничните системи вече са обстойно изследвани, като е събрана достатъчна информация, която позволява да бъдат създадени системи за управление на основните параметри на средата, но на практика такива почти не съществуват. Системите за аквапоника които се предлагат от реномирани световни марки с дългогодишен опит предлагат минимална автоматизация като параметрите които се следят автоматизирано се изчерпват с измерване и регулиране на температурата на водата в резервоарите и температурата на въздуха в помещението и следене на pH. Останалите параметри на

средата като твърдост на водата, разтворен кислород, въглероден диоксид CO_2 , амониак NH_3 , амоний NH_4^+ , нитрити NO_2^- и нитрати NO_3^- се следят ръчно чрез тестови комплекти с реактиви и лакмус ленти.

2.2.1 Изпълнителни механизми

Много важно е въздушните помпи да се подберат правилно, за да осигурят необходимото количество разтворен кислород (Dissolved Oxygen – DO). Помпите основно се делят на два вида спрямо конструкцията им. Първите са бутални, а вторите са турбинни [32]. Използването на дифузери е необходимо за да може повече кислород да преминава от балончетата въздух във водата [23]. Дифузерите [32,33] могат да бъдат направени от различни порести материали като вулканичен камък например. Могат да бъдат изработени също от различни видове пластмаса, керамика или метал. Дифузерите с по-малки отвори са по-ефективни, но за тях е необходимо по-високо налягане на въздуха. Освен това се запущат по-лесно и е необходима по-честа профилактика [23]. За поддържане на температурата в аквапоничните системи основно се използват електрически нагреватели [32,33,34]. Често са изработени от титан, заради високата му корозионна устойчивост. Нагревателите могат да бъдат оборудвани със сензори за температура, а някои са оборудвани и с контролер. Може да се монтират потопени в резервоарите или на тръбния път на циркулиращата вода [32,33,34]. При по-студен климат е по-изгодно да се използват термо помпени инсталации което позволява разхода за отопление на вода да се намали значително, но при по-висока първоначална инвестиция. Термопомпите могат и да охлаждат водата, което е от съществено значение при отглеждане на студеноводни риби които не могат да се отглеждат ефективно при температури над 18°C [23]. За храненето на рибите се използват автоматични хранилки които могат много точно да дозират храната [32,33]. При съществуващите системи хранилките се управляват само по таймер който задава часовете от деня и продължителността на подаването на храна. Вибрационните хранилки са подходящи за всякакъв вид храна, като дори и по-мазни храни преминават без да запущат хранилката. Хранилките с ротационен валик имат много точно подаване на количеството храна, а хранилките с разпръсквач са подходящи за по-големи площи, защото не изсипват храната на едно място.

2.2.2 Сензори

За наблюдение на работата на въздушната помпа и на водната циркуляционна помпа се използват дебитомери [32]. В общия случай те са оборудвани с един брой нормално отворен или превключващ контакт, който сработва при преминаване съответно на въздух или вода през тях.

Предлагат се също и сензори за следене на pH [35] които имат възможност за подаване на аларма когато стойността превиши или падне под определена стойност.

2.2.3 Компютри за управление на аквапонични системи

Таймерите за управление на хранилките [32] които се използват са разновидни, като могат да бъдат обикновени таймери с възможност за настройка на времето и продължителността на включване, до специализирани таймери които могат да управляват една или няколко хранилки [32].

Като система за мониторинг и отдалечен достъп голяма част от доставчиците на оборудване за аквапониката използват контролер Sensaphone 800 [32,33] който има

възможност за следене на няколко температури и входи за различни аларми. При превишаване на настроения лимит или получаване на аларма от конкретен сензор, дебитомер или друго, контролера може да се обади по телефон на предварително настроени номера, като изпрати различни записани гласови съобщения, в зависимост от алармата която го е задействала.

През последните години с развитието на сензорите се появиха доста научни разработки които следят автоматизирано параметрите на средата в аквапоничните системи, но без да се прилага автоматичното им регулиране с изключение на температурата. По-долу са показани някои примери за съществуващи системи и разработки отнасящи се основно за DWC системите.

2.2.4 Примери за съществуващи научни разработки на системи за мониторинг и контрол в аквапониката

С развитието на интернет на вещите (IoT – Internet of Things) и появата на достъпни електронни сензори се появиха доста разработки за непрекъснат мониторинг и отдалечен достъп до информацията, които включват и частичен контрол върху аквапоничните системи.

Разработена е система за мониторинг на аквапонична система [36] в която е установено, че метаболизма на рибите е пряко свързан с количеството кислород което консумират. Активното движение на рибите е пиково за периода от преди, по време и след храненето, за около 15 до 30 минути [36]. Като се вземе това в предвид е необходимо новото на DO да се следи по време на активното движение, а не само когато рибите са в покой.

При друга система за контрол и мониторинг [37] се измерват pH, ниво, температура и електропроводимост EC на водата, общо количество разтворени соли TDS, амониев NH_4^+ , нитритни NO_2^- и нитратни NO_3^- йони. Системата също измерва и температура, относителна влажност RH и въглероден диоксид CO_2 на въздуха, както и осветеност. Тя използва NodeMCU контролер за отчитане и управление. Управлението се свежда до контрол на циркулационната помпа, контрол на електропроводимостта на водата, както и концентрацията на амоняка, като не е обяснено как е реализирано самото управление. Споменато е, че тази система може да контролира също температурата, относителната влажност RH, въглеродния диоксид CO_2 , както и осветеността в помещението.

При някои системи реализирани със същия контролер NodeMCU [38] се наблюдава единствено мониторинг на параметри като pH, температура на водата, разтворен кислород DO и концентрацията на амоняк NH_3 . Докато първите три параметъра се отчитат директно чрез сензори, амоняка се отчита посредством тестова лента потопена във водата като се наблюдава от сензор за определяне на цвета.

Друга система за контрол и мониторинг [39], освен че управлява водната помпа и осветеността има възможност и за автономно хранене на рибите. Тя отчита температурата, pH и нивото на водата, като данните могат да се преглеждат от уеб страница подържана от Raspberry Pi.

2.3 Обобщение

При обстойния преглед на използваните в животновъдните ферми различни типове крайни управляващи устройства и изпълнителни механизми за управление на

микроклимата, се установи, че на пазара се предлага голямо разнообразие от тях. Освен, че има много производители на такова оборудване, всеки един от тях предлага широка гама от номенклатури за изпълнение на различни проекти. Това включва различни видове стенни, таванни и коминни вентилационни клапи както и устройства за управлението им, вентилатори, системи за отопление и охлаждане, за дезинфекция и др. Има също и голямо разнообразие от сензори, като специализираните за използване в животновъдни ферми се предлагат на сравнително високи цени. От другата страна са компютърните системи за управление на микроклимата. Различните производители предлагат широка гама от такива, но при избора на повечето от тях е необходимо предварително да се предвидят всички канали за сензори и крайни устройства които ще са необходими. Системите нямат възможност за допълнително разширяване в бъдеще, а цената на многоканалните системи е твърде висока и е пречка за внедряването им в малки и средноголеми стопанства.

При прегледа на съществуващите системи за управление на средата в аквапонична система се установи, че на пазара не се предлагат такива които да предлагат пълен контрол, а се използват системи за следене на част от необходимите параметри. Останалите се следят не автоматизирано, чрез измерване най-често с лакмус ленти. Въпреки че има някои разработки за системи за частичен контрол на средата в аквапонични системи, те са далеч от желанния резултат за постигане на баланс и управление без да са необходими специализирани познания за аквапониката.

В тази насока би било добре да се разработят повече системи за управление на средата, които са модулни, могат лесно да се надграждат както с разширение броя и вида на управляваните параметри, така и с възможност за променяща се логика на управление. Това ще ги направи леснодостъпни и за по-широк кръг потребители. За тази цел е необходимо първо де се създаде концепция с необходимите изисквания за реализирането на такава система.

ГЛАВА 3. Разработване на концепция с изисквания за създаване на КФС за интелигентно управление на комплекси за отглеждане на животни

3.1 Дефиниции на Кибер физична система

Общата архитектура на Кибер-физичната система (КФС) включва модели на физически процеси, модели на софтуер, изчислителни платформи и мрежи. Веригата за обратна връзка между физическите процеси и изчисленията обхваща сензори, задвижващи механизми, физическа динамика, изчисления, софтуерно планиране и мрежи с конкуренция и забавяне на комуникацията [40]. Кибер-физичните системи са интеграции на изчислителни и физически процеси. Вградените компютри и мрежи наблюдават и контролират физическите процеси, обикновено с обратна връзка, където физическите процеси влияят на изчисленията и обратно [41]. Има много определения за това какво представлява една КФС. Тя включва множество компоненти и слоеве. В нея се преплитат физически и виртуални компоненти, като се започне със сензори, хардуерни компоненти, изпълнителни механизми, съответно и подходящ софтуер. Използват се различни видове телекомуникационни мрежи чрез които се осъществява връзка между компонентите. Включват се различни подходи от кибернетиката, мехатрониката и вградените системи. Но за разлика от тях една КФС обикновено

представлява мрежа от взаимосвързани взаимодействащи елементи с физически вход и изход.

3.2 Изисквания към КФС

За реализирането на КФС пригодна за управление на комплекси за отглеждане на животни е необходимо да се разгледат необходимите компоненти с конкретните изисквания към тях. Компонентите могат да бъдат физически или виртуални, като за целта трябва да бъдат внимателно анализирани всички фактори на външно и вътрешно влияние върху тях. За тази цел определяме ред при който можем да реализираме една КФС за нуждите на съответното животновъдно стопанство. По долу са описани необходимите стъпки.

3.3 Обобщение

Създаването на концепция за реализирането на КФС за управление на комплексите за отглеждане на животни ни дава по-ясни насоки какви стъпки трябва да се предприемат за реализирането на системата. След като вече са определени изискванията за всички елементи от системата остава само те да се подберат по зададените критерии и да се тестват за съвместимост.

След очертаване на основните изисквания и насоки за реализирането на КФС е необходимо да се подбере и тества както операционна система, така и съвместим с нея софтуер необходим за работата и. Освен това трябва да се избере и софтуер за първоначална инсталация и настройка който да има възможност дистанционен достъп до системата.

ГЛАВА 4. Изследване и анализ на софтуер и системи за управление на КФС. Разработка на концепция за софтуерна система за управление на КФС в комплекс за отглеждане на животни

4.1 Изисквания към операционната система и софтуера

Тук ще разгледаме по-подробно изискванията към софтуера, преди неговия избор. Операционната система, заедно с допълнителния софтуер, както и библиотеките и драйверите към него трябва да работят в симбиоза, като това трябва да се обследва обстойно преди внедряването на системата в реална среда.

На първо място, операционната система трябва да поддържа работа в реално време (Real Time Operating System - RTOS), протоколи за синхронизация NTP или PTP . Трябва да поддържа голям набор от комуникационни протоколи като например TCP, HTTP/HTTPS, FTP/SFTP, SSH, EtherNet/IP, WebSocket, MQTT, Modbus. Протоколи за реализирането на безжични мрежи като IEEE 802.11, Zigbee, BT/BLE, Z-Wave, 6LoWPAN, LPWAN, LoRa, SigFox. Целта на двете системи е да поддържат огромен брой безжични сензори и устройства с ултра ниска скорост и ултра ниска мощност.

4.2 Избор на операционна система

За целта на изследването е избрана Linux базираната система OpenHABian, която включва в себе си независимата платформа, базирана на java - OpenHAB.

4.2.1 OpenHAB

OpenHAB (Open Home Automation Bus) е платформа за интелигентна автоматизация на дома с отворен код. Тя позволява управление и интеграция на различни IoT устройства, като сензори, термостати, камери, умни крушки, алармени системи, контролери и други подобни устройства [42]. Тя поддържа следните комуникационни протоколи: Z-Wave, Zigbee, Wi-Fi, Bluetooth, Bluetooth Low Energy, Modbus, RS232, RS485, HTTP/HTTPS, MQTT, WebSocket Thread, KNX, DMX, REST, IFTTT, HomeKit, Hue, LIFX, Nest, Sonos, EnOcean, Xiaomi Mi Home, Open Weather Map, SolarEdge, SMA, Fronius, Kodi, MySensors, DLNA/UPnP и други [42].

4.2.2 OpenHABian

OpenHABian е Linux система базирана на операционната система Raspberry Pi OS Lite, която всъщност е олекотена версия на Debian, оптимизирана за различните версии на едноплатковия компютър Raspberry Pi. OpenHABian е специално адаптирана, за да осигури лесна настройка и оптимизация за работа с OpenHAB. Въпреки, че е предназначена за работа с устройства като Raspberry Pi, OpenHABian може да се използва и на други Linux-базирани системи, като и на компютри с x86 архитектура.

4.3 Избор на допълнителен софтуер

За реализиране на предложената КФС са използвани изброените по-долу софтуерни продукти. Въпреки, че някои от тях имат и лицензирани версии, всички притежават безплатни версии с отворен код.

4.3.1 Eclipse Mosquitto MQTT Broker

Eclipse Mosquitto е брокер на съобщения с отворен код, който изпълнява MQTT протокол версии 5.0, 3.1.1 и 3.1 [43]. За целите на изследването Eclipse Mosquitto MQTT Broker се инсталира на сървъра на КФС и се използва за жична или безжична комуникация между сензори, контролери и управляващи устройства от една страна и сървъра от друга.

4.3.2 InfluxDB

InfluxDB е база данни за времеви серии (TSDB - Time Series Database) с отворен код [42,44]. За целите на изследването InfluxDB се инсталира на сървъра на КФС и се използва за съхранение на измерените от сензорите стойности, за записване на текущото състояние на управляващи устройства и механизми, като информацията може да се използва освен от системата за извършване на автоматизираното управление, така и от потребителя при поискване.

4.3.3 Grafana

Grafana е мултиплатформено уеб приложение с отворен код. Предназначено е за интерактивна визуализация и анализи. То може да създава диаграми, графики и предупреждения за мрежата, когато е свързан към поддържани източници на данни [45]. За целите на изследването Grafana се инсталира на сървъра на КФС и служи за графична визуализация на параметрите на системата.

4.3.4 Samba

Samba е безплатен софтуер, който внедрява изпълнението на мрежовия протокол SMB (Server Message Block). Той позволява достъпа до файловата система на Linux

базирания сървър на предложената КФС, както от компютър с Windows, така и от устройство с Android, като смартфон или таблет. Така лесно може да се достъпи системата, и да се променят конфигурационните файлове при настройка или работа на системата.

4.3.5 Frontail

Frontail е Log viewer който е необходим както при пускането и настройката на сървъра, така и по време на работата на КФС. Той ни дава информация за текущите логове на системата, наличие на грешки, прекъснати връзки със сензори или други компоненти, като това улеснява отстраняването на проблеми по системата.

4.3.6 Amanda Backup

Amanda (Advanced Maryland Automatic Network Disk Archiver) Backup е софтуер с отворен код за архивиране на компютри, който е в състояние да архивира данни, намиращи се на множество компютри в мрежа [46]. Задължително е след реализирането на определена КФС да се направи резервно копие на данните, независимо от това дали се използва Amanda Backup или друг подобен софтуер, който да позволява коректно и лесно възстановяване на системата.

4.3.7 Visual Studio Code

Visual Studio Code е редактор на програмен код който може да работи под Windows, Linux и MacOS и е напълно безплатен[47]. Той заема основна роля в програмирането на предложената КФС. Инсталира се на външен за КФС компютър, като чрез него най-лесно и четимо могат да се създават и редактират файловете управляващи системата. За реализирането и са използвани разширения като OpenHAB и OpenHAB Alignment Tool.

4.3.8 Solar-PuTTY

Solar-PuTTY е самостоятелен безплатен мрежов терминален, който позволява и прехвърляне на файлове. Solar-PuTTY се инсталира на външен за КФС компютър. Той се използва за достъп до системата за инсталиране, update и upgrade както на инсталирания софтуер така и на операционната система. За настройки и редакции на конфигурационни файлове на сървъра. Чрез него могат да се създават и редактират файлове и директории и да се конфигурира самата система.

4.3.9 Tasmotizer

Tasmotizer се използва на външен за системата компютър. Това е софтуер с помощта на който може да се замени оригиналния фърмуер на контролери от типа на ESP32 и ESP8266, с фърмуер Tasmota [48]. Tasmota е фърмуер с отворен код, който позволява локален контрол на смарт устройства без нужда от облачни услуги [48]. За целите на предложената КФС Tasmotizer се използва при флашване и предварителна подготовка на контролери NodeMCU базирани на ESP8266, а Tasmota като фърмуер осъществява връзката между различни контролери чрез Wi-Fi мрежата към сървъра на КФС.

4.3.10 MQTT.fx

MQTT.fx е инструмент за тестване на IoT маршрути в разработването и производството [49]. Той се използва за създаването на предложената КФС, като

позволява да се видят изпращаните от сензорите и крайните устройства данни и формата им като отделна тема през MQTT протокола. Освен това чрез MQTT.fx могат да се подават данни през определена тема за която е абониран Mosquitto MQTT брокера и по този начин се тества работата на КФС, без да имаме реални сензори които са свързани към нея.

4.3.11 MG Configuration

MG Configuration (Modbus Gateway Administrator Configuration – VOLISON) е софтуер за конфигуриране на контролери като ADM-5850G , ADM-5832G и IDM-7842MG. [50]. За целите на изследването MG Configuration се използва за конфигуриране на контролера ADM-5832G използван за връзка на различни сензори (с интерфейс Modbus RS485) със сървъра на КФС.

4.4 Обобщение

Избора на софтуер е една от стъпките за реализирането на КФС. Избрания софтуер отговаря на изискванията заложи в концепцията за изграждане на системата. В същото време първоначално е частично тестван, като са проверени възможностите му за конфигуриране на системата. Но към реалното му тестване за съвместимост може да се пристъпи едва след като са подбрани всички хардуерни компоненти на системата и са реализирани предвидените в това изследване алгоритми за работа при отглеждане на различните видове животни. Затова следващата стъпка е избора на сензори и допълнителни контролери.

ГЛАВА 5. Изследване и избор на IoT изпълнителни устройства и сензори с необходимите параметри за използване в Кибер-физичната система за управление на комплекс за отглеждане на животни

На пазара има голям избор от производители на сензори, контролери, релета и други устройства, които са специализирани в изграждането на системи за контрол на животновъдни ферми. Основния проблем е във високата цена на тези материали. От друга страна е наличието на огромно разнообразие от сензори с ниска цена и съответно по-ниско качество. От значение е и средата в която се използват сензорите. За реализиране на предложената система са избрани изброените по-долу сензори.

5.1 Сензори

За целите на това изследване са разгледани характеристиките на различни сензори за измерване на температура, относителна влажност RH, амоняк NH_3 , амоний NH_4^+ , въглероден диоксид CO_2 , метан CH_4 , въглероден оксид CO, сероводород H_2S , фини прахови частици $2.5\mu\text{m}$ и $10\mu\text{m}$, скорост на движение на въздуха SAF, осветеност, диференциално налягане Δp , разтворен кислород, DO, нитрити, NO_2^- , нитрати, NO_3^- , водороден показател, pH, и за ниво на водата, като някои от сензорите са комбинирани за измерване на повече от една величина.

Сензор за температура DS18B20, Maxim Integrated – Analog Device [51], сензор за температура и относителна влажност AM2302, Aosong Electronics [52], сензори за температура и относителна влажност SHT31 и SHT35, Sensirion [53]. За целите на изследването горните сензори се използват основно чрез контролер NodeMCU за измерване на температура и относителна влажност RH както вътре в помещенията, така и отвън.

Сензор за въглероден диоксид MH-Z19B (MH-Z19C) - Winson [54], сензор за въглероден диоксид Senseair S88 LP, Senseair [55] и Сензор за въглероден диоксид SCD30, Sensirion [53]. За целите на изследването, сензорите са тествани с контролер NodeMCU, като се използва UART протокол.

Сензор за амониак KM21, KLHA [56], като за целите на изследването е избрана версията с Modbus, която се свързва със системата посредством Modbus gateway ADM-5832G.

Сензор за метан MH-Z1341B, Winson [54], който за връзка с системата използва контролер NodeMCU.

Сензор за въглероден оксид, температура и относителна влажност - JXBS-3001-CO/TH-RS, Jingxun [57] – използва Modbus gateway ADM-5832G за връзка със системата.

Сензор за сероводород JXBS-3001-H2S, Jingxun [57] - използва Modbus gateway ADM-5832G за връзка със системата.

Сензор за фини прахови частици (PM2.5 и PM10) RS-PM-2-EX, Renke [58]. За целите на изследването е избран варианта с Modbus RS485 като за връзка със системата отново се използва Modbus gateway ADM-5832G.

Ултразвуковият анемометър за скорост и посока на движение на въздуха RS-CFSFX-N01-3-EX, Renke [58], като за връзка със системата отново е необходим Modbus gateway ADM-5832G.

Сензор за диференциално налягане A2G-50, WIKA [59]. За целите на изследването е избран сензор Вариант 1 с обхват за измерване на диференциално налягане от -100 Pa до 2500 Pa с Modbus изходен сигнал през Modbus gateway ADM-5832G.

Сензор за осветеност BH1750, ROHM Semiconductor [60] и сензор за осветеност TSL2561, ams-OSRAM AG [61] За целите на изследването сензорите се използват посредством контролер NodeMCU.

Сензор за разтворен кислород и температура TriOxmatic 700 IQ, YSI Incorporated [62], сензор за амоний и калий AmmoLyt Plus 700 IQ, YSI Incorporated [62], сензор за нитрити и нитрати NiCaVis 701 IQ NI, YSI Incorporated [62] и сензор за pH (водороден показател) SensoLyt 700 IQ, YSI Incorporated [62]. За връзка с КФС на тези четири сензора е необходимо използването на допълнителен контролер IQ SensorNet 282 или 284.

Сензор за ниво на течности SL-M5, НН ЕЛЕКТРОНИК [63], който за връзка с системата използва контролер NodeMCU.

5.2 Контролери

5.2.1 Контролер NodeMCU

Контролерът NodeMCU първоначално разработен от NodeMCU Team е продукт с отворен код. Произвежда се от различни производители като Amica, Lolin, DOIT, Devkit и много други, като има няколко версии на NodeMCU като V0.9, V1, V2 и V3. Има и две разновидности с чип CP2102 или с CH340, като при тестовете на различните варианти не се установи разлика в производителността или функционалността им.

Другата разлика е в размерите на контролера като повечето са с размери близки до 48mm x 25mm, но някои платки с чип CH340 са по-широки с размери близки до 56mm x 31mm. За целите на изследването NodeMCU се използва за осъществяване на връзка между сензори, бутони за управление, релета за управление на крайни устройства, сигнални лампи и др. от една страна и сървър на КФС от друга.

5.2.2 Контролер Modbus gateway ADM-5832G

ADM-5832G [50] е индустриален Modbus gateway който може лесно да бъде използван за безпроблемно интегриране на устройства със сериен Modbus (MODBUS-RTU/ASCII) и устройства с Modbus Ethernet (MODBUS-TCP). За целите на изследването NodeMCU се използва за осъществяване на връзка между използваните сензори с интерфейс Modbus RS485 и системата. Двата порта RS-485/422 позволяват връзката на сензори с различен Baud rate като в общия случай един такъв контролер е достатъчен за да се свържат всички необходими сензори с които работят по Modbus протокол (общо до 32 броя на двата порта RS-485/422).

5.2.3 IQ SensorNet 282 и 284, YSI Incorporated

Контролерите IQ SensorNet 282 и 284 [62] осъществяват връзката между сензорите YSI, (като връзката е plug and play), и сървър на КФС. Тази връзка от своя страна може да бъде осъществена с почти всеки комуникационен протокол, включително Modbus TCP, Modbus RTU, PROFIBUS и PROFINET. YSI IQ SensorNet 282 има възможност за връзка с до 2 сензора, а 284 с до 4 сензора [62]. Те отговарят на всички изисквания на КФС и са подходящи за използване в предложената аквапонична система.

5.3 Обобщение

В тази глава са разгледани редица сензори които по характеристики отговарят както на изискванията за съвместимост на свързващия ги интерфейс, така и по обхват и резолюция спрямо функциите които се изисква да изпълняват в алгоритмите за управление на микроклимата в различните животновъдни стопанства. Избраните сензори са част от предлаганите на пазара ценово ориентирани сензори. Освен тях, на пазара се предлага голям избор на сензори на други производители, с подобни параметри и достъпна цена, които също могат да бъдат използвани за реализиране на системата.

Избраните допълнителни контролери за връзка на сензорите и крайните устройства със сървър на системата предлагат различни възможности за връзка. Броя им за изграждане на една или друга КФС зависи от броя и вида на сензорите и крайните устройства, а те от своя страна зависят и от алгоритъма за управление. При необходимост могат да бъдат използвани и други подобни контролери.

Като следваща стъпка в разработването и тестването на разглежданата КФС за управление на микроклимата в комплексите за отглеждане на животни е разработването на отделни алгоритми изразяващи спецификата и нуждите на различните видове животни.

ГЛАВА 6. Разработване на интелигентното управление на КФС за отглеждане на животни на базата на OpenHAB

Предложената КФС може да се използва за управление на микроклимата в животновъдни стопанства предназначени за отглеждане на различни по вид и предназначение домашни животни. За да бъде енергоефективна, да повишава продуктивността и подобрява здравословното им състояние, системата трябва да отговаря на строги критерии съобразени с нуждите на животните и целите на отглеждането. Много важно е да се проучи обстойно влиянието върху животните на всички параметри на средата, като е от значение дали се отглеждат за месо, мляко, яйца и т.н. Затова в това изследване са проучени условията за отглеждане и са разработени алгоритми за управление на най-масово отглежданите домашни животни. Това включва КФС за управление на микроклимата в животновъдни стопанства за отглеждане на дойни крави, за прасета отглеждани за месо, и за бройлери отглеждани за месо. Разработена е и КФС за управление на средата в аквапонична система за отглеждане на риба и растения. По-долу са разгледани изброените системи. В главата е разгледан и начина на инсталиране, конфигурация и настройка на системата като са показани основните възли и осъществяването на връзката между отделните компоненти.

6.1 Разработване на интелигентното управление на КФС за отглеждане на дойни крави

6.1.1 Специфики и изисквания към околната среда при отглеждането на дойни крави

Един от важните аспекти на функционирането на съвременните животновъдни ферми е осигуряването на оптимална и здравословна среда, както и повишаването на продуктивността на животните чрез прецизен контрол на микроклимата, постигане на по-ниска енергийна консумация на сградите и оптимални количества храна, приемана от животните. Основно изискване към всяка животновъдна сграда е тя да осигурява необходимите условия, съобразени с физиологичните нужди на настанените в нея животни чрез технологично моделиране на естествените микроклиматични фактори и постигане на желаната техногенна среда [64]. Трябва и да се наблюдава и контролира качеството на въздуха и нивата на вредни газове. Нормите са както следва: амоняк $\text{NH}_3 < 20\text{mg/m}^3$ (28ppm) [65] за млечни крави и 5mg/m^3 (7,2ppm) [66] за телета до 6 месеца; въглеродния диоксид $\text{CO}_2 < 3000\text{ppm}$ [65], при наличие на хора $< 2500\text{ppm}$ [67], при телета до 6 месеца $< 3600\text{mg/m}^3$ (2000ppm) [66]; метан $\text{CH}_4 < 500\text{mg/m}^3$ (762ppm) [67]; въглероден оксид $\text{CO} < 0,005\text{mg/l}$ (4,4ppm) [65]; сероводород $\text{H}_2\text{S} < 10\text{mg/m}^3$ (7,2ppm) [65]; температура $> 5^\circ\text{C}$, за телета $> 10^\circ\text{C}$ [65]. Фини прахови частици $< 3\text{mg/m}^3$ [65]; осветеността според мястото $> 30\text{lx}$ или $> 50\text{lx}$ на мястото на доене, $> 100\text{lx}$ за манипулационна зала [65]; шум $< 75\text{dB}$ [65]. Оптималните температури, относителна влажност и скоростта на движение на въздуха могат да се видят в [65]. При високи температури е по-важно средата да се управлява спрямо THI, а не спрямо температурата.

6.1.2 Сензори и системи за управление

В зависимост от наличното оборудване в кравефермата, по време на първоначалната инсталация на системата е възможно да се изберат параметрите, които да се наблюдават и записват. Системата може да управлява щори (жалузи), циркулационни вентилатори, вентилация, отопление, подгряване на водата за поилките, пръскачки и осветление. В зависимост от типа на системата за контрол на средата, КФС

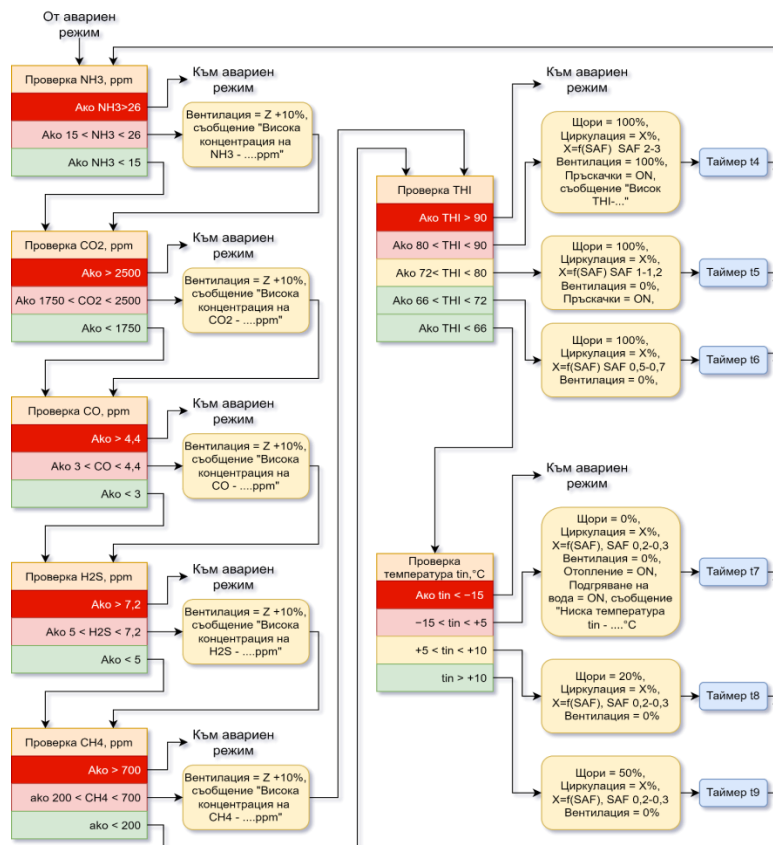
има възможност да я управлява директно, или в случай, че системата има собствен контролер, КФС може да зададе целеви контролни стойности (чрез комуникация чрез различни протоколи) или само да я включва и изключва за определено време, когато е необходимо. Въз основа на настоящите изследвания и проучвания в КФС са зададени стойности по подразбиране за параметрите, които трябва да се поддържат. Според конкретните нужди, параметрите могат да се променят, както при първоначалната инсталация на КФС, така и впоследствие за надграждане и оптимизиране на системата. Управлението на КФС взема предвид приоритизирането на конкретни действия, които трябва да бъдат предприети, за да се осигури безопасен и оптимален микроклимат в кравефермата. Разработения алгоритъм се състои от две части, като първата се отнася за аварийен режим.

6.1.3 Алгоритъм за управление на КФС за контрол на микроклимата в кравеферма при аварийен режим

Разработения алгоритъм следи за превишаване на максимално допустимите стойности на вредните газове, THI или падане на температурата под минималната. При установяване на такъв случай, се предприема промяна в положението на щорите, състоянието на вентилацията и отоплението, като във всеки случай системата изпраща съобщение до оператора със стойността превишила.

6.1.4 Алгоритъм за управление на КФС за контрол на микроклимата в кравеферма при нормален режим

Алгоритъма е показан на фигура 6.2, като при превишаване на дадена стойност над нормата преминава в аварийен режим.



Фигура 6.2 Алгоритъм за управление на КФС за контрол на микроклимата в помещение за дойни крави при нормален режим.

6.1.5 Проведени тестове на КФС за управление на микроклимата в кравеферма

Въз основа на предложените алгоритми беше разработен прототип на КФС. За сървър беше използван едноплатков компютър Raspberry PI 4, използвайки OpenHAB сървър с отворен код. Чрез конфигурация на текстови файлове се описват връзките към сензорите, управляващите устройства, правилата за автоматизация и др. Сензори от всички описани по-горе типове бяха свързани към системата с помощта на протоколи Modbus и MQTT, за да се тества съвместимостта и възможни проблеми в комуникациите. Показанията от сензорите бяха използвани за събиране на данни и наблюдение на графики. Бяха използвани, имитиращи устройства, подобни на истинските които трябва да се управляват в реална среда във ферма за млечни крави. Към системата бяха свързани електрически нагревател, вентилатор с ШИМ управление, вентилатор с възможност за включване и изключване, обикновени и димируеми (с ШИМ) LED лампи и малка щора, задвижвана от постояннотоков двигател. Когато се изискваше от тестовите, беше използван симулиран сензорен вход през MQTT Broker, например за симулиране на висока концентрация на вредни химически газове в системата.

Тествания сървър доказва, че може да се справи с натоварването от автоматизиране на малки до средно големи животновъдни ферми. За големите ферми с голям брой сензори, изпълнителни механизми и друго оборудване за автоматизация трябва да се използва по-мощен персонален компютър за сървър. Бяха симулирани и тествани различни сценарии за автоматизация които могат да възникнат в реална животновъдна ферма, приложими както към големи ферми за интензивно животновъдство, така и за малки семейни ферми.

Поради невъзможността работата на системата да се провери в реална обстановка бяха извършени следните тестове. За пробата беше използвана спалня в апартамент, който има рекуперационен модул, вкарващ чист въздух в стаята. Рекуператора беше свързан към системата чрез реле, така че тя да може да го включва и изключва. Системата беше настроена да поддържа нивото на CO₂ под 2000ppm. Системата успя да поддържа нивото на CO₂ в спалнята под предварително зададената стойност, в продължение на няколко дни докато траеха тестовите, докато намиращите се в стаята хора издишваха CO₂ и концентрацията му в стаята се повишаваше.

Контролът на температурата беше тестван в празна, не добре изолирана стая с прозорци с южно изложение, чрез управление на електрически нагревател и вентилатор който изсмуква въздуха от стаята, като по този начин в нея навлиза свеж въздух от вън. В този тест системата успя да поддържа успешно стайната температура в предварително зададения диапазон (между 18°C и 20°C), въпреки допринасящите фактори като променливи външни температура и допълнително отопление от слънцето през прозорците с южно изложение в някои части на деня.

За да тестваме реакцията на алгоритъма в аварийна ситуация (висока концентрация на вредни химически газове в обора), симулирахме входни стойности на сензора извън предварително зададените безопасни граници за различните сензори - NH₃, CO₂, CH₄, H₂S, CO с помощта на MQTT Broker. Системата всеки път реагираше съответно, чрез настройване на вентилацията и на циркулационните вентилатори (в случая на 2 броя тестови вентилатора) на максимална мощност, отваряше напълно завесите (1 брой електрическа щора) и незабавно информираше оператора за аварийна ситуация, като изпращаше имейл съобщение със концентрацията на съответния газ.

Подобен тест беше извършен за нивото на фини прахови частици с размери до $2.5\mu\text{m}$ и до $10\mu\text{m}$ (ФПЧ_{2.5} и ФПЧ₁₀). За да се изпробва системата нивото за предупреждение беше намалено като при отчитане на ниво над зададеното системата изпрати съобщение със стойността.

6.2 Разработване на интелигентното управление на КФС за отглеждане на свине

6.2.1 Специфики и изисквания към околната среда при отглеждането на свине

При отглеждане на свине е необходимо строгото съблюдаване на параметрите на околната среда като температура, относителна влажност RH, скорост на движение на въздуха, както и концентрацията на амоняк NH_3 , сероводород H_2S и въглероден диоксид CO_2 . Сероводорода може да причини самостоятелно респираторни заболявания, а дори и при много ниска концентрация спомага за отслабване на имунната система на прасетата при което по-лесно се разболяват от вирусни заболявания тип А (IAV - *Influenza A virus*) например [68]. Прасетата се отглеждат при различни условия в зависимост от възрастта им и предназначението им. Те се разделят на 14 категории [65]. Не трябва да се допуска висока концентрация на токсични газове както следва: амоняк $\text{NH}_3 < 5\text{ppm}$, въглероден диоксид $\text{CO}_2 < 2500\text{ppm}$ [65], а за сероводорода H_2S според някои източници е допустима концентрация до 5ppm или дори до 10ppm [69], а според други не трябва да се допуска въобще [65]. Относителната влажност според [65] е сравнително висока, затова в топлите дни за охлаждане може да се използват системи за охлаждане с пръскачки. Скоростта на движение на въздуха, фините прахови частици, околния шум и осветеността също могат да се проверят в съответните наредби [65].

6.2.2 Сензори и системи за управление

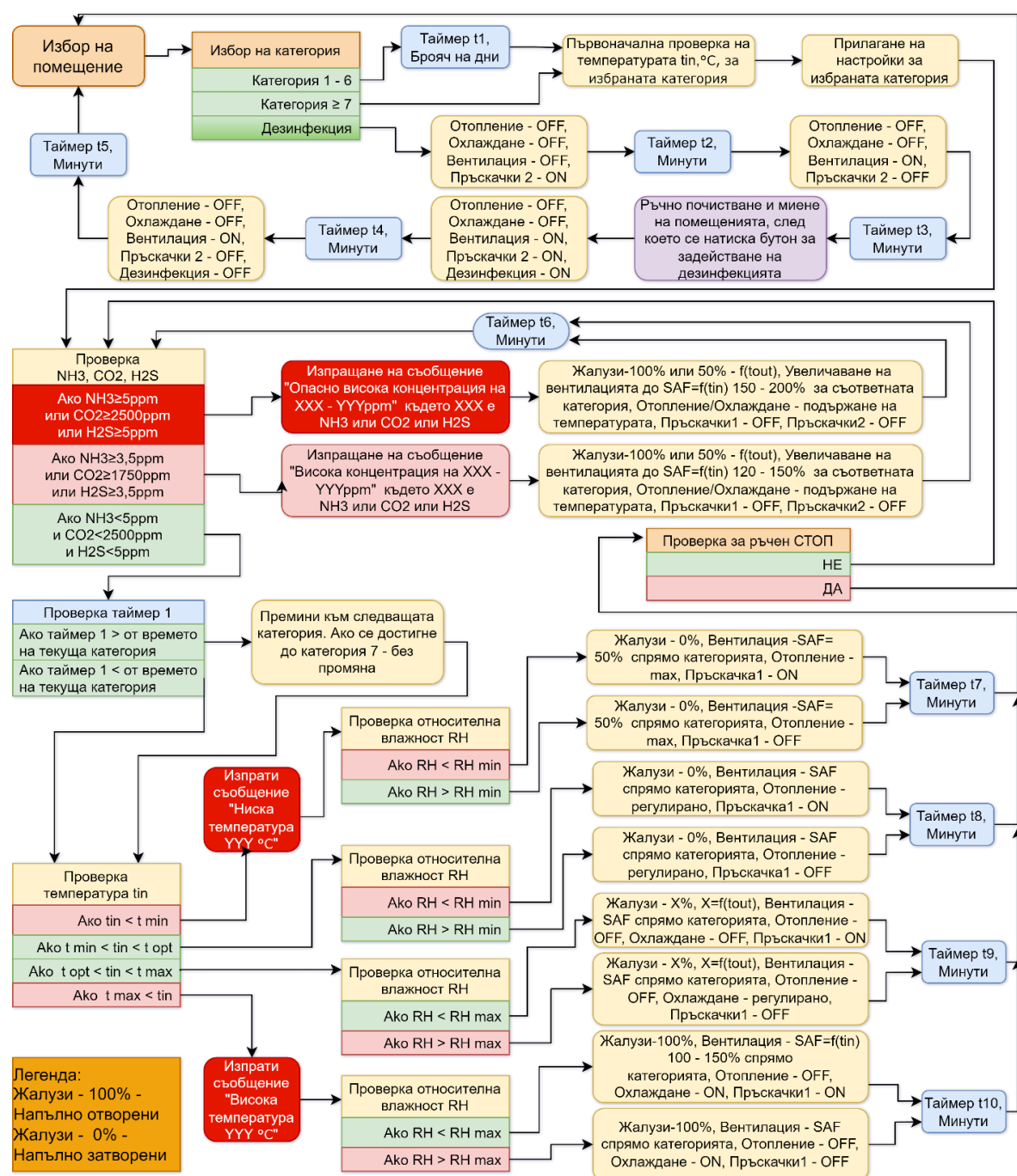
Предложената КФС има възможност за първоначален и последващ избор относно наличните системи за управление, както и на наличните сензори за измерване на необходимите параметри, като е възможно последващо разширение с нови системи и сензори. Сензорите могат да бъдат за вътрешна температура, относителна влажност в помещението, външна температура, амоняк NH_3 , въглероден диоксид CO_2 , сероводород H_2S , фини прахови частици, скорост на движение на въздуха SAF и осветеност, като първите два са задължителни. Системите които може да управлява са жалузи, вентилация за свеж въздух, отопление, охлаждане (климатична система), пръскачки за охлаждане и контрол на влажността, пръскачки за умокряне/разкисване и дезинфекция, задействане на дезинфектант и осветление, като първите три са задължителни за работата на системата.

Всички стойности за температура, влажност, скорост на движение на въздуха, максимално допустими концентрации на вредни газове могат да се променят по усмотрение на технолога в зависимост от породата и селекцията на свинете. Освен това могат да се създават допълнителни категории извън посочените 14 броя, в които да се настройват параметри подходящи за отглеждане на прасета от различни категории в едно помещение. Така могат да се ползват готови настройки без да е необходимо да се променя всеки параметър по отделно.

6.2.3 Алгоритъм за управление на КФС за контрол на микроклимата в свинеферма

Прасетата се отглеждат в различни помещения, спрямо категорията в която попадат. Преди всяко въвеждане на животни в дадено помещение, задължително се

извършва ръчно почистване и дезинфекция. Условно алгоритъма (Фигура 6.5) може да бъде разделен на две.



Фигура 6.5 Алгоритъм за управление на КФС за контрол на микроклимата в свинеферма.

В първата част се извършват началните настройки и се изпълнява цикъл за почистване и дезинфекция когато е избран. Във втората част се извършва автономното поддържане на средата докато не се промени категорията на прасетата или цикълът не бъде спряно ръчно.

6.2.4 Проведени тестове на КФС за управление на микроклимата в свинеферма

Бяха проведени тестове с изградена опитна постановка в лаборатория, като за целта беше изградена КФС включваща част от всички възможни компоненти изброени

по горе, а именно Raspberry Pi4 като сървър, сензори за температура и влажност AM2302 в помещението и отвън, сензор за CO₂ – SCD30. Системата имаше на разположение за управление електрически нагревател, рекуператор за свеж въздух които изпълнява ролята на вентилация, и ролетна щора (вместо жалюзи) която може да се позиционира в различно положение. Тестовите бяха направени при външна температура по-ниска с около 15 градуса от зададените стойности които трябва да се поддържат а именно за категория 5 – 20/23/25°C, като таймера за категорията беше намален от 7 дни на 7 часа за целите на изследването. При задаване на категорията и стартиране на системата, температурата в лабораторията беше 18°C. Системата изпрати съобщение по имейл за ниска температура, позиционира щората в затворено състояние, стартира отоплението и включи рекуператора, като при достигане на минималната температура от 20°C намали мощността на нагревателя на 50% чрез използване на ШИМ. При достигната оптимална температура от 23°C системата изключи нагревателя. Температурата спадна до 22,4°C при което нагревателя пак се включи на 50%. След 15 минути в помещението беше включен втори нагревател, който не е свързан със системата, за да симулира затопляне. След като температурата премина оптималната със зададена стъпка от 0,2°C а именно 23,2°C, щората се отвори на 30%. Когато температурата достигна 24°C, вторият нагревател беше изключен и температурата започна да спада. За по бързо охлаждане беше отворен прозорец, като температурата започна да спада по бързо. Междувременно системата беше преминала от категория 5 на категория 6. При достигане на 19.8°C системата затвори ролетната щора. Тогава беше затворен и прозореца за да се спре интензивното охлаждане. При достигане на 19.4°C, системата отново включи нагревателя.

Беше извършен и тест за аварийна ситуация с висока концентрация на CO₂. За целта максималната стойност беше намалена от 2500ppm на 1000ppm. Рекуператора беше заменен от вентилатор на който можем да управляваме оборотите. Беше зададена категория 5, като нагревателя поддържаше зададената температура, щората беше затворена, а вентилатора се въртеше с 1200rpm. При достигане на CO₂ над 1000ppm, оборотите на вентилатора се повишиха до 2500rpm, щората се отвори на 100% и системата изпрати имейл за висока концентрация на CO₂. За да постигнем понижаване на концентрацията CO₂, както и на температурата беше отворен прозорец. Докато течеше цикъла на проветряване, температурата се понижи, под минималната, при което щората се затвори на 50%, а нагревателя се включи на максимална стойност.

6.3 Разработване на интелигентното управление на КФС за отглеждане на бройлери

6.3.1 Специфики и изисквания към околната среда при отглеждането на бройлери

Отглеждането на бройлери изисква повече контрол върху околната среда, отколкото отглеждането на други месодайни животни като крави или овце, например. Всяко отклонение от оптималните параметри увеличава смъртността, особено в първите дни на брудинга, а в последствие намалява продуктивността [70].

При отглеждане на бройлери системата за контрол трябва да следи параметри като температура, относителна влажност RH, скорост на движение на въздуха SAF, диференциално налягане Δp и концентрации на вредни газове като амоняк NH₃ [71], въглероден диоксид CO₂, въглероден оксид CO и сероводород H₂S [65,70]. Прахът и микробното замърсяване също трябва да се наблюдават [70]. Важни фактори са интензитетът и продължителността на осветлението в помещенията и нивото на шум

[65,72,73,74]. Неправилната осветеност може да доведе до канибализъм, умора на пилетата, различни заболявания и дори смърт [75,76,77]. Някои автори препоръчват 16 часа светлина и 8 часа тъмнина [78,79], докато други съобщават за по-висока продуктивност с редуване на по-кратки светли и тъмни периоди [80,81,82]. Също така е важно да се отбележи, че най-важният параметър, който определя зоната на комфорт на пилетата, е усещаната температура [70,83,84,85]. Често е различна от температурата на въздуха в помещенията и зависи от много фактори: температура на въздуха, температура на пода в помещението, относителна влажност RH, скорост на въздушния поток SAF, възраст и оперение на пилетата. Когато температурата на въздуха, влажността и скоростта на вятъра са в допустими граници, усещаната температура съответства на температурата в помещенията. При по-високи температури, за да не се излиза от зоната на комфорт, трябва да се увеличи скоростта на движение на въздуха в помещението [70]. С предложените методи усещаната температура може да бъде изчислена и използвана за работа на системата. Когато температурната зона се поддържа правилно, енергийният излишък от храненето се използва за растеж и наддаване на тегло, а не за осигуряване на температурен комфорт на бройлера. Тази зона се определя от усещаната температура.

За да работи системата правилно, сензорите за вътрешна температура t_i , вътрешна относителна влажност RH, скоростта на движение на въздуха SAF, амоняк NH_3 , въглероден диоксид CO_2 , въглероден оксид CO, сероводород H_2S и фини прахови частици трябва да са монтирани в жизнената зона на пилетата, което значи до 20 сантиметра от пода. Изключение правят датчиците за измерване на температура под покрива на сградата t_{ih} , както и тези за външна температура t_o , външна относителна влажност RH_{out} и диференциално налягане Δp .

6.3.2 Видове вентилация в птицеферма

Вентилационната система трябва да съдържа определен брой вентилатори които изсмукват въздуха от вътрешността на сградата, при което свежия въздух постъпва през множество разпределени клапи с регулируемо отваряне или чрез големи тунелни отвори в единия край на сградата. Могат да се обособят три типа вентилация: минимална вентилация, преходна вентилация и тунелна вентилация [70].

6.3.3 Сензори и системи за управление

Необходимо е да се следят вътрешна температура на нивото на пилетата, вътрешна температура до тавана, относителна влажност в помещението, относителна влажност от вън, външна температура, амоняк NH_3 , въглероден диоксид CO_2 , въглероден оксид CO, сероводород H_2S , фини прахови частици, скорост на движение на въздуха SAF, диференциално налягане вън/вътре, осветеност в помещението. Сградата трябва да разполага и с необходимите системи за контрол на микроклимата. За географските ширини на България това са отопление, вентилатори за свеж въздух (наричани за краткост „Вентилация“), циркулационни вентилатори (наричани по долу „Циркулация“), тунелни вентилатори (наричани „Тунелна вентилация“) клапи за свеж въздух, тунелни вентилационни отвори (тунелни клапи) , изпарителни охладителни писти и осветление .

6.3.4 Алгоритъм за управление на КФС за контрол на микроклимата в птицеферма

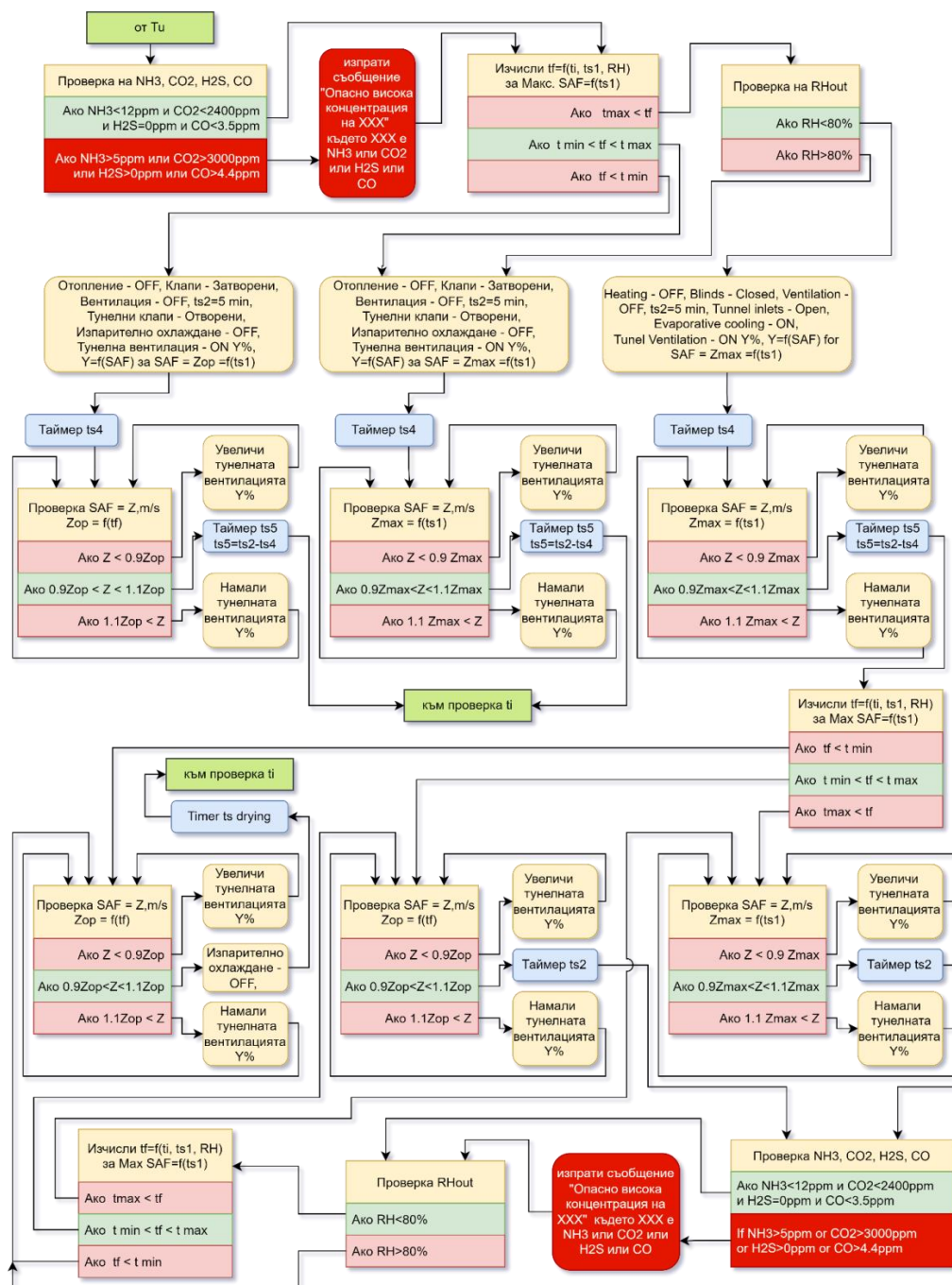
В така предложения алгоритъм за автономно управление в режим на тунелна вентилация се контролира не измерената температура t_i , а усещаната температура t_f .

Системата изчислява усежданата температура според предварително зададените зависимости, които са взети от различни източници [83,84,85,86], като данните са допълнени чрез интерполация и екстраполация. При стойности на относителна влажност RH, по-високи от $RH_{\max}$ за съответната възраст на бройлерите, усежданата температура t_f нараства с предварително изчислени стойности, определени чрез връзката им с THI. Можем да получим стойността на усежданата температура t_f по следната формула:

Формула 6.1

$$t_f = t_i - t_{cw} + t_{CRH}$$

Където t_{cw} е температурна корекция зависеща от скоростта на въздуха SAF, а t_{cRH} е температурна корекция зависеща от относителната влажност RH.



Фигура 6.11 Алгоритъм за управление - клон за тунелна вентилация T_u .

Разработени са два алгоритъма за управление на системата, като първият е за подготовка на помещението, преди настаняване на пилетата, който поддържа оптимална температура в сградата за адаптация на температурата на пода и стените. Работният алгоритъм може да бъде разделен на основна част и четири клона. Прямо установените условия в сградата, алгоритъма преминава в един от клоновете, като първите два съответстват на условия за минимална вентилация, третия за преходна вентилация и четвъртия за тунелна вентилация. В първите три клона системата поддържа оптималните условия за отглеждане, като температура, относителна влажност и скорост на движение на въздуха, като през предварително определено време се връща в началната част на алгоритъма. Ако системата премине в четвъртия клон (Фигура 6.11), тя започва да работи в нов затворен цикъл при който трябва да се изпълнят определени условия преди излизането от него. Освен това системата започва да се управлява спрямо усещаната температура t_f .

6.3.5 Проведени тестове на КФС за управление на микроклимата в птицеферма

Поради невъзможността да се създаде експериментална постановка включваща всички видове сензори и управляващи системи, както и това, че не е внедрена в работеща птицеферма, тестването на системата се проведе на два етапа. В първия етап всички сензори бяха свързани към системата и тествани за четене и запис на данни. Използвани са следните сензори: AM2302 сензори за температура и влажност, SCD30 сензор за CO_2 , Modbus версията на A2G-50 сензор за диференциално налягане и RS-CFSFX-3-EX за скорост на вятъра. Сензори за фини прахови частици и осветеност са тествани в предишни експериментални постановки на системите за управление на микроклимата в свинеферма.

Във втория етап, вместо реални данни от сензорите, бяха изпращани синтезирани данни за температура, влажност, диференциално налягане и наличие на вредни газове чрез MQTT Broker. Това позволи да се симулират различни условия за проверка на работата на системата.

По време на изпитването бяха зададени следните начални условия: t_{s1} -14 дни, и максимален брой на бройлерите - N. След това системата зададе $t_{\min}$ - 24 °C, $t_{\max}$ - 27 °C, t_{opt} - 25,5 °C. При стартиране на системата данните се изпращат към нея на всеки 30 секунди. Таблица 6.13 показва само част от редовете, където някои от данните са променени.

Минута	t_i , °C	t_o , °C	t_{ih} , °C	Δp , Pa	CO_2
0'	22	5	26	25	500
4'	22	15	22	25	500
8'	26	15	30	25	500
14'	25	15	30	25	500
19'	25	15	25	25	2500
24'	24.5	15	25	25	3500
27'	25	15	25	25	500

Таблица 6.13 Симулирани данни подавани чрез MQTT Broker.

Системата стартира по следния начин. Първо отвори свързаната щора, изпълняваща ролята на клапа, до обозначената позиция 2 от общо седем позиции. Стартира първия вентилатор, изпълняващ ролята на вентилатор за свеж въздух, на зададената скорост, съответстваща на позиция 2 на щората и включи нагревателя на 100%. След 30 секунди системата изключи вентилатора, затвори щората и включи втория вентилатор изпълняващ ролята на циркуляционен вентилатор.

На 5-та минута цикълът приключи и алгоритъмът стартира нов, а системата провери температурата t_i и предприе следните действия: изключи циркуляционния вентилатор, включи вентилатора за свеж въздух и отвори щората до позиция 3. Отоплението остана на пълна мощност. След 30 секунди щората беше затворена и вентилаторът спря.

На 10-та минута системата отново провери температура t_i и превключи от режим на минимална вентилация към режим на преходна вентилация, тъй като температурата t_i е по-висока от t_{opt} . Нагревателят беше изключен, щората беше отворена до позиция 4 и вентилаторът а свеж въздух беше включен на съответната мощност.

На 15-та минута системата измери температурата t_i и превключи от режим на преходна вентилация към режим на минимална вентилация. Нагревателят се включи с ШИМ на 10%, щората се премести от позиция 4 на позиция 3, а вентилаторът за свеж въздух превключи на съответната мощност за дадената позиция на щората. След 30 секунди вентилаторът спря, щората се затваря и циркуляционният вентилатор се включва отново.

На 20-та минута системата измери температура t_i и установи ниво на въглероден диоксид CO_2 над 80% от допустимата стойност. Последваха следните действия: щората се отвори до позиция 4 вместо 3, вентилаторът за свеж въздух беше включен на съответната мощност, нагревателя остана да работи на 10%, а циркуляционният вентилатор беше изключен. След 30 секунди вентилаторът за свеж въздух беше изключен и щората затворена.

На 25-та минута системата измери температура t_i и ниво на въглероден диоксид CO_2 над допустимата норма и влезе в аварийен режим за 3 минути. След което изпрати съобщение „Предупреждение: високо ниво на CO_2 - 3000ppm“. Щората се отвори до позиция 4, вентилаторът за свеж въздух се включи на съответната мощност и нагревателят увеличи мощността си до 50%.

На 28-та минута системата измери температура t_i и ниво на въглероден диоксид CO_2 под допустимата норма. Щората се отвори на позиция 3, вентилаторът за свеж въздух превключи на съответната мощност и нагревателят се включи на 10%.

Тестът по-горе показва, че системата (алгоритъмът) може успешно да превключва към различни режими на вентилация, както и да влиза и излиза от аварийен режим.

6.4 Разработване на интелигентното управление на КФС за отглеждане на риба и растения в аквапонична система по метода на дълбоководните култури

6.4.1 Специфики и изисквания към среда при отглеждането на аквакултури в аквапонична система

Има едно основно изискване за нормална работа на една аквапонична система, и това е постигане на баланс на средата. Един от най-важните показатели е качеството на

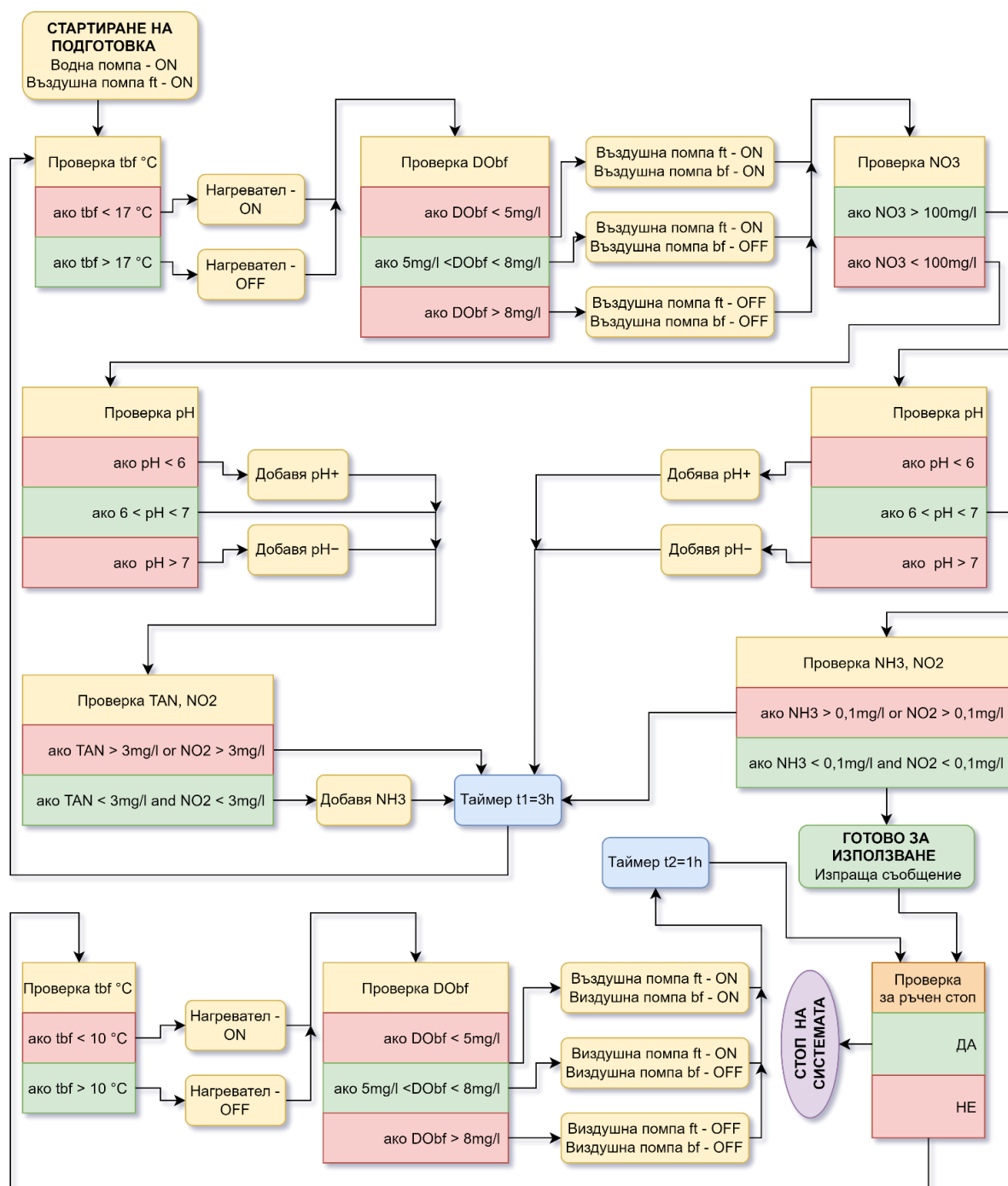
водата, което се изразява в нейната годност за определени приложения. В зависимост от предназначението на водата, има определени параметри, които трябва да бъдат достигнати, за да се определи качеството на водата. Тези параметри имат различни стойности за рибите, за растенията и за правилното развитие на бактериите. Следователно е необходимо да се намери златната среда, при което всички организми съжителстват в симбиоза [23,87]. В една аквапонична система за постигане на баланс е необходимо да се следи температурата на водата, водородния показател рН, твърдостта, разтвореният кислород (DO), разтвореният въглероден диоксид (CO_2), наличието на амониак (NH_3), нитрити (NO_2^-), нитрати (NO_3^-), алкалността, както и развитието на различни бактериални групи [23].

6.4.2 Компоненти на аквапоничната система

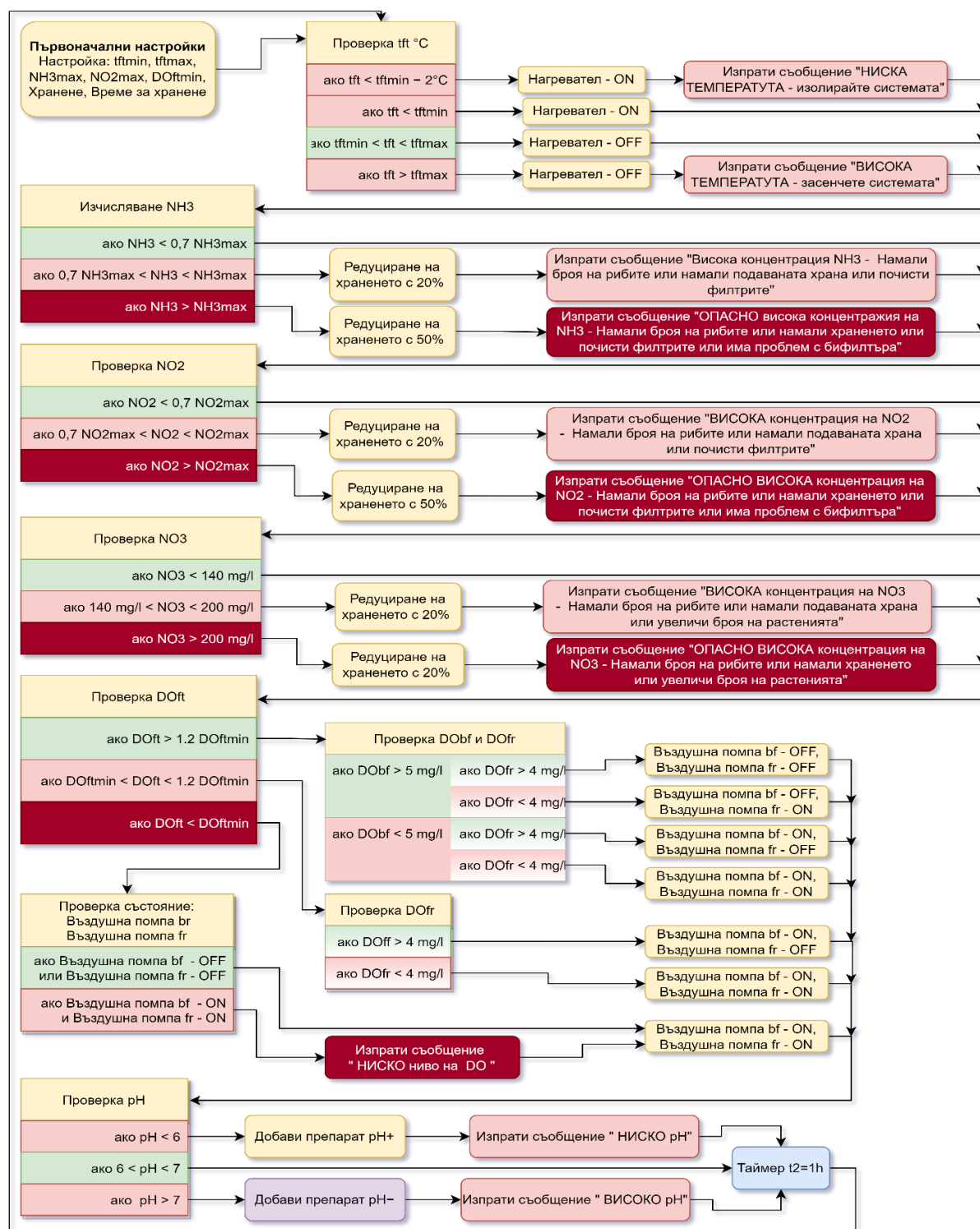
Аквапоничната система, базирана на метода на дълбоководните култури DWC, трябва да съдържа следните компоненти: резервоар за риба, механичен филтър, биофилтър, корита за отглеждане на растения (плаващи лехи), помпа за циркулация на водата, въздушни помпи с въздушни камъни (аератори) и тръбна мрежа. Освен това са необходими сензори и задвижващи механизми за внедряване на предложената Кибер-физична система за измерване и регулиране на параметрите на водата. Системата трябва да има сензори за измерване на температурата на водата (в резервоара за риба и биофилтъра), разтворения кислород DO (в резервоара за риба, биофилтъра и плаващите лехи), нитрити NO_2^- , нитрати NO_3^- , рН и амоний NH_4^+ (в резервоара за риба). За да се определи концентрацията на общия амониачен азот TAN и амониак NH_3 , в този случай е използван метод за изчисление, базиран на концентрацията на NH_4^+ , в зависимост от рН и температурата на водата. Измерването и контролирането на тези параметри в определени граници определя баланса, който трябва да се поддържа в аквапоничната система. Поддържането на този баланс чрез контролиране на горните параметри на свой ред определя изискванията към КФС. Необходимите изпълнителни механизми са както следва: водна помпа, шнек за добавяне на pH^- , шнек за добавяне на pH^+ и електромагнитен вентил за допълване с вода (в биофилтъра); нагревател и шнек за подаване на храна за рибите (в резервоара за риба); въздушна помпа (в резервоара за риба, биофилтъра и плаващите лехи).

6.4.3 Алгоритъм за управление на КФС за контрол на средата в аквапонична система

Разработени са два алгоритъма за управление на системата, като първия осигурява подготовката и бактериалното развитие преди заребяването и засаждане на растенията (Фигура 6.15), а втория поддържа баланса в аквапоничната система (Фигура 6.16).



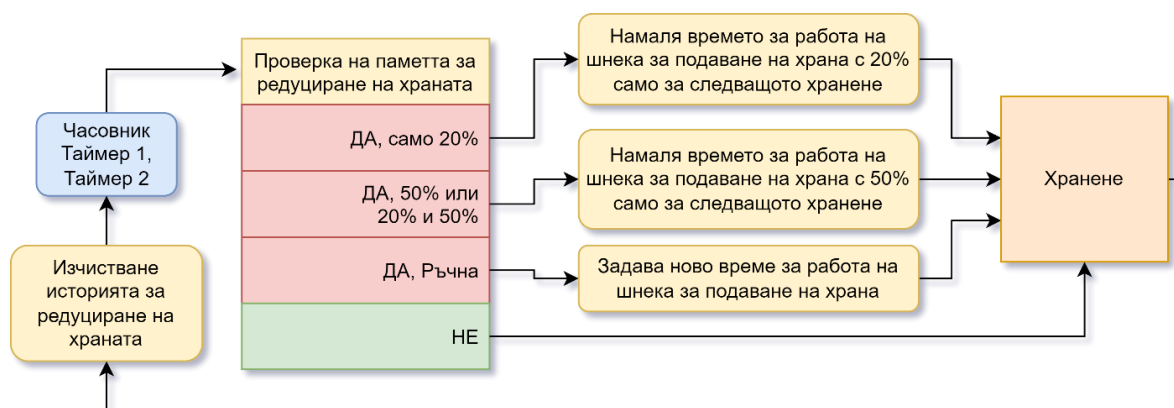
Фигура 6.15 Алгоритъм за стартиране и бактериално развитие на аквапонична система.



Фигура 6.16 Работен алгоритъм.

6.4.3.3 Цикъл на хранене

Цикълът на хранене е показан на Фигура 6.18. За постигане на баланс на системата, ако се установи превишаване на нормите на NH_3 , NO_2 или NO_3 системата ги контролира чрез промяна на количеството подавана храна и записва в паметта си корекции за следващото хранене.



Фигура 6.18 Алгоритъм за хранене в аквапонична система

6.4.4 Проведени тестове на КФС за управление на средата в аквапонична система

За тестовите на системата е реализирана опитна постановка със сървър Raspberry Pi 4, 8GB и операционна система OpenHAB 3.0. Разработен е софтуер за управление на аквапоничната система съгласно горните алгоритми. Тестването на КФС в реална аквапонична система би отнело много време, като тестовите трябва да се извършват на места с различна твърдост на водата. Затова бяха направени тестове за работата на системата в лабораторни условия. За тази цел софтуерът и хардуерът бяха тествани чрез предаване на синтезирани данни чрез MQTT Broker, вместо използване на сигнали от съответните сензори. Ефективността на системата беше анализирана с данни, които биха били измерени в реална ситуация, включващи получени синтезирани данни за отклонение на температурата в резервоара за риба и биофилтъра, степента на разтворен кислород в резервоара за риба, биофилтъра и плаващите лехи, както и нивата на нитрити, нитрати, рН и амоний NH_4^+ в резервоара за риба. Получените данни за амоний NH_4^+ се преобразуват в концентрация на амоняк NH_3 и общ амонячен азот TAN чрез изчисление. Управляващите механизми бяха заменени със сигнални лампи, отчитащи времето на работа на всяка от тях. Проверена е и коректността на изпратените съобщения до оператора. Когато данните бяха изпратени чрез MQTT брокера, те бяха записани в паметта и станаха достъпни за четене от системата. При подаване на нови данни чрез MQTT Broker, ако по някаква причина, те не достигнат до сървъра, системата отчита последните записани стойности като актуални. Това беше направено, защото времето за отчитане на точни стойности за някои от наблюдаваните параметри във водата може да достигне няколко минути или дори повече от 10 минути. Но това не представлява проблем, тъй като аквапоничната система е доста инертна.

През определен интервал от време данните се подават към системата. Системата е настроена на $t_{b\text{fmin}} = 17^\circ\text{C}$, $5\text{ mg/L} < \text{DO}_{\text{bf}} < 8\text{ mg/L}$, $6 < \text{pH} < 7$, TAN и NO_2^- по-големи от 3 mg/L , докато NO_3^- достигне стойности, по-големи от 100 mg/L , след което те трябва да бъдат намалени до стойности, по-малки или равни на $0,1\text{ mg/L}$, при което трябва да се отчете готовността на системата. При четене на записаните данни, системата включва нагревателя и въздушните помпи в резервоара за риба и биофилтъра, активира хранящия шнек (за подаване на амоняк) и шнека за намаляване на рН според зададените параметри. Изчислените стойности за TAN и NH_3 също могат да бъдат проверени. Чрез проследяване на следните стойности на параметрите беше установено, че системата работи правилно според зададените данни.

След прочитане на стойностите в последната колона до оператора беше изпратено съобщение по имейл, че цикълът на стартиране е завършен.

Работният цикъл на системата също може да бъде проследен със следните зададени начални условия за целите на изследването: $t_{fmin} = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{fmax} = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{NH}_{3max} = 0,4\text{ mg/L}$, $\text{NO}_{2max} = 0,4\text{ mg/L}$, $\text{DO}_{fmin} = 4\text{ mg/L}$, време на работа на шнека за подаване на препарати за регулиране на рН = 12 мин., време на работа на шнека подаване на храна = 18 мин., часове в които се подава храна 12:30 и 19:00 часа. Времето за работа на шнека е настроено да бъде много по-дълго от действителното, така че работата на системата да може да се следи по-лесно по време на тестовете. Тестът е стартиран в 10:00, с време на цикъл от 1 час. Системата контролира коректно въздушните помпи в биофилтъра и плаващите лехи, нагревателя и рН шнековете. В 12:30 шнека за подаване на храна се задейства в зададения час. В 13:00 часа, когато беше открито ниско ниво на рН, в допълнение към задействането на шнека, беше изпратено съобщение със стойността на рН. При следващия цикъл, когато се установи висока температура, системата също изпрати съобщение със стойността и. В 15:00 часа беше изпратено съобщение за високо ниво на NO_2^- над 70 процента от допустимата стойност със съвет за намаляването му.

Освен това беше записана корекция за намаляване на времето на работа на шнека за подаване на храна с 20%. В 17:00 часа бяха отчетени нивата на рН и NH_3 , които са по-високи от допустимите, и беше изпратено съобщение с техните стойности със съвет как да се коригират. Освен това беше записана 50% корекция на времето на работа на шнека за подаване на храна. Времето за следващото хранене беше намалено наполовина. Системата също така реагира както на високите стойности на NO_3^- , така и на ниската температура в последния цикъл на при проведените тестове.

6.5 Инсталиране и конфигуриране на системата

Първичната инсталация включва инсталиране на OpenHABian на сървър на КФС, след което е необходимо да се инсталира допълнителен софтуер и да се настрой системата за работа. Тези инсталации могат да бъдат направени през команден ред, например през Solar-PuTTY, или друг терминал, като част от допълнителния софтуер може да бъде инсталиран директно през меню. След това се редактират съществуващи текстови файлове и се създават нови такива за да се конфигурира системата. В директория `openhabin-conf` и поддиректории в нея са намират и създават файловете които конфигурират системата. Въпреки, че те са достъпни директно в сървър или през терминал, най-удобния начин за тяхното създаване и редакция е през Visual Studio Code. Основни файлове за конфигурация са „`addons.cfg`“, „`basicui.cfg`“, „`runtime.cfg`“ и други. За конфигуриране на системата е необходимо създаване на по един файл от вид или за по прегледно множество файлове, които са позиционирани в определени папки. Това са файлове с разширения `persist`, `things`, `items`, `rules` и други в които се извършва същинското дефиниране на системата. В тях се описва връзките между физическите и виртуалните компоненти и правилата за работа на системата.

6.6 Обобщение

Разработените алгоритми за управление на различните животновъдни стопанства имат високо ниво на автономност и позволяват управлението на средата да се извършва без намесата на персонала, след като се въведат първоначални настройки. КФС може да следи и управлява различни параметри на средата, като това зависи от

инсталираните различни видове сензори и крайни устройства за управление, като за най-голяма ефективност е необходимо тя да съдържа пълния набор компоненти изброени по-горе.

Системата има възможност зададените по подразбиране диапазони на подържаните параметри да бъдат променяни през графичния интерфейс, спрямо конкретните нужди. Това може да бъде продиктувано от изисквания към различните породи животни или по усмотрение на технолога. Диапазоните на промяна на параметрите се определят при конфигуриране на системата като винаги могат да се променят при нужда. Това може да бъде извършено и дистанционно през конзолата за достъп с Solar-PuTTY или друг терминал, или през Visual Studio Code който е свързан към системата.

За осъществяване на достъп на потребителя до системата е необходимо разработването на потребителски интерфейс, който да позволява удобно наблюдение на параметрите и управление системата. Това е разгледано в следващата глава.

ГЛАВА 7. Изследване и разработка на графичен интерфейс за КФС за интелигентно управление на комплексите за отглеждане на животни с възможност за дистанционно управление през Интернет, базиран на OpenHAB

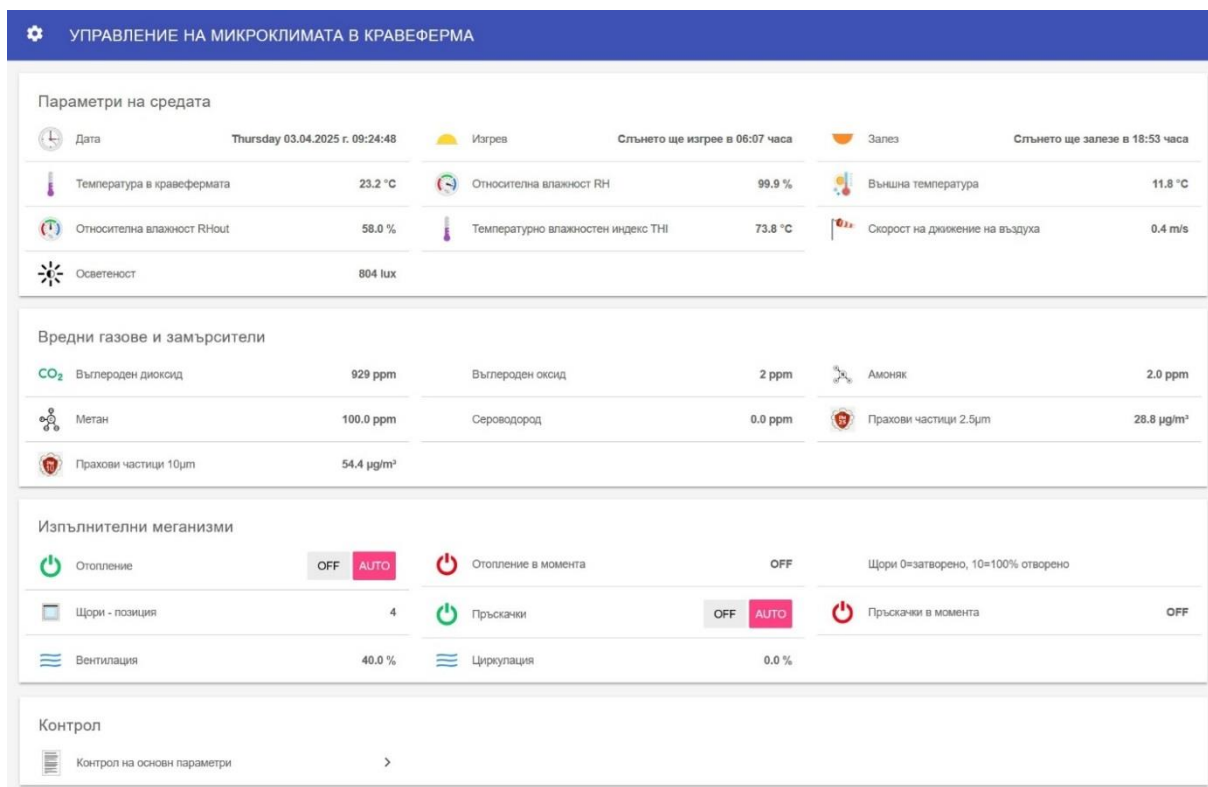
Графичният потребителски интерфейс (GUI - graphical user interface) или накратко графичния интерфейс е вид потребителски интерфейс, чрез който потребителите взаимодействат с електронни устройства, чрез представяне на визуални индикатори. В случая, разработения GUI за КФС за управление на комплексите за животни спомага за наблюдение на параметрите, контролиране и регулиране на средата.

За целите на изследването са разработени и тествани два вида GUI, които могат да работят едновременно на системата, без да си пречат. Те се базират на Basic UI и HABPanel в OpenHAB. Всеки от тях има различни предимства като те са разгледани по-долу. Освен това е разработен и конфигуриран панел за графично показване на параметрите на системата в Grafana. Всичките споменати елементи са базирани на уеб интерфейс.

7.1 Разработка на GUI на базата на Basic UI

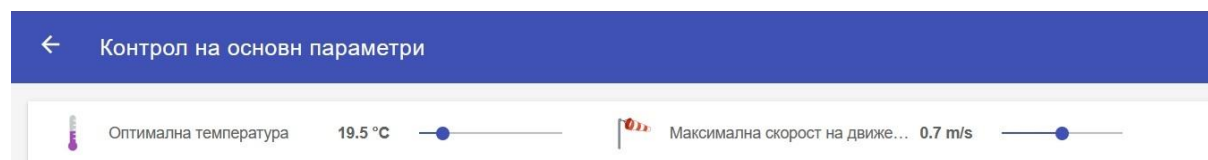
За пример разглеждаме основният графичен интерфейс на КФС за управление на микроклимата в кравеферма разработен на базата на Basic UI. На фигура 7.1 е показан примерен изглед на интерфейса свален от монитор на персонален компютър. В горния панел могат да се видят наблюдаваните параметри на средата в момента. Във втория панел е показана измерената концентрация на вредни газове. В зависимост от броя на сензорите в помещението, в панелите могат да се добавят и премахват сензори, броя на панелите може да се променя и т.н. При наличие на няколко сензора от един вид в едно помещение, например за температура, системата може да се конфигурира така, че да показва средната стойност и да се управлява спрямо нея.

В третия панел са показани изпълнителните механизми, тяхното състояние (включено, изключено, позиция, скорост и т.н.) и бутони за настройки на работата им в системата.



Фигура 7.1 Основен GUI на КФС за управление на микроклимата в кравеферма базиран на Basic UI.

Четвъртия панел е конфигуриран за вход в нова страница която отделя контрола на основни параметри които не е необходимо да се променят често, като оптималната температура или ограничаване на максималната скорост на движение на въздуха (Фигура 7.2).



Фигура 7.2 Контрол на основни параметри

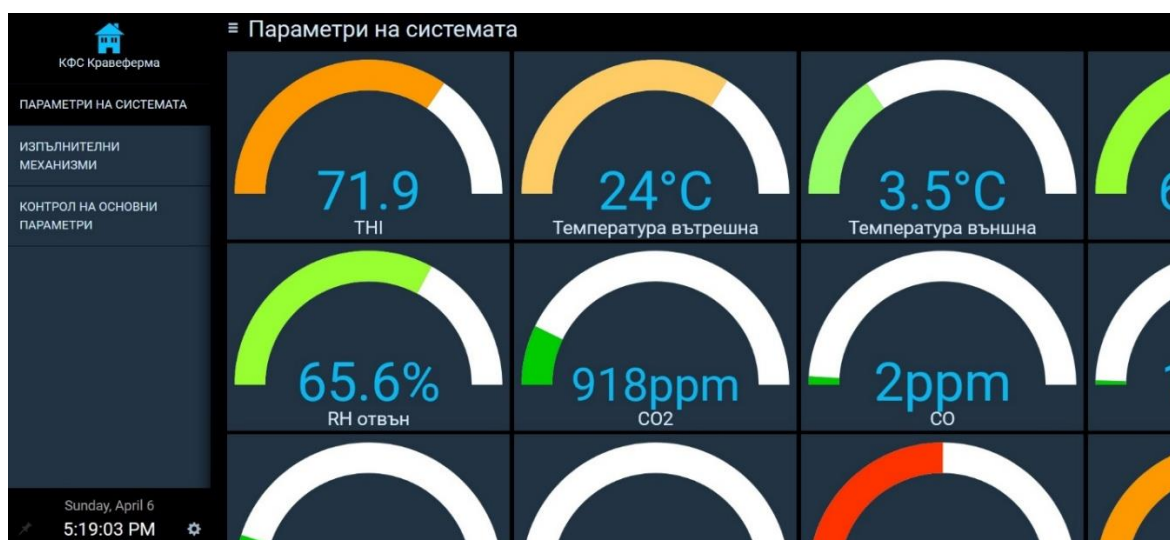
Този GUI е подходящ за всякакви устройства, от големи и малки монитори на персонални компютри, таблети или дори смартфони, като страницата се променя автоматично спрямо големината и резолюцията на екрана.

7. 1.1 Конфигуриране на GUI базиран на Basic UI

Конфигурацията на страницата на основния GUI се извършва чрез създаване на текстови файл с разширение .sitemar в папка sitemar на сървъра на КФС. При него чрез текст описваме всеки панел, елемент или под страница, като за всеки елемент има определени правила за описване. Елементите включват дефиниране на името на страницата, името на отделните панели, името на променливата която искаме да се показва и т.н. За всеки елемент са дефинирани икона, мерна единица, формат на показване на величината и име за показване.

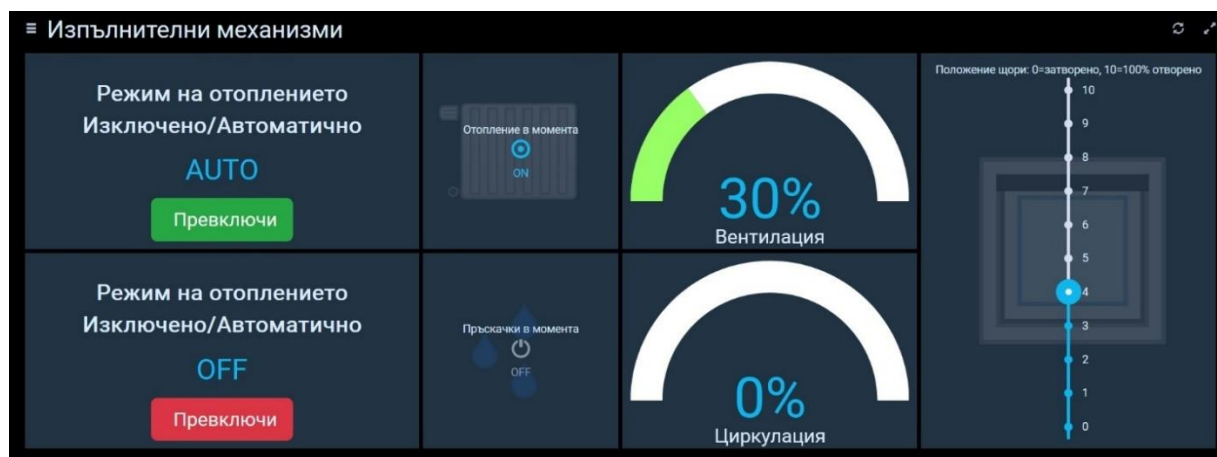
7.2 Разработка на GUI на базата на HABPanel

Графичния интерфейс, разработен на базата на HABPanel (Фигура 7.6) има някои предимства, но и недостатъци пред основния интерфейс разгледан по-горе. И при него може да се разработят няколко варианта с различен изглед и разположение, така че да е удобно използването за различни цели. GUI на базата на HABPanel е подходящ за големи екрани, но може да се конфигурира и за по малки. При него освен стойностите на параметрите на системата, може да бъде настроен и цветен код, като за стойности в норма цвета например да бъде зелен, при по-високи стойности да става оранжев, а при стойности над нормата да е червен.



Фигура 7.6 Превключване между прозорци с показания и настройки.

При избор на „ИЗПЪЛНИТЕЛНИ МЕХАНИЗМИ“ се показват същите контроли и данни както в Basic UI, но показани по различен начин (Фигура 7.7).



Фигура 7.7 Изпълнителни механизми HABPanel.

7.2.1 Конфигуриране на GUI базиран на HABPanel

При конфигурирането на HABPanel имаме много повече свобода при оформянето панела. Освен стандартните опции които предлага системата за избор на компоненти за показване, може да се избере и разработи шаблон, който се конфигурира чрез написване на код при който имаме пълна свобода на избор за всеки един компонент като шрифт, размер и цвят на текст, размер и цвят и форма на бутон,

плъзгач или друг компонент, променящ се цвят на текст, бутон или надпис в зависимост от състоянието му (например включено или изключено) и т.н.

Заклучение

В дисертационния труд са разработени алгоритми за управление на микроклимата в различни животновъдни ферми, както и за контрол на средата в аквапонична система. Разгледани са подобни системи на световноизвестни производители и други иновативни разработки, като е направен сравнителен анализ с предимства и недостатъци спрямо предложената система.

При проведените тестове бяха подбрани компоненти като сензори, контролери и управляващ компютър които отговарят на техническите изисквания за изграждане на системата. Освен това бяха тествани за продължителен период от време, в който да се установи тяхната пригодност и издръжливост.

Беше избран и тестван различен софтуер, за да се провери дали е подходящ за създаване на предложената КФС, като се установи, че с него тя може да работи в реално време, без видими забавяния. Беше установено, че системата може да бъде използвана за малки или средноголеми животновъдни ферми, като в този и вид не е подходящ за много големи ферми.

Разработени са два вида потребителски графични интерфейса, които могат да работят едновременно без да си пречат и дават възможност за лесна работа със системата от различни устройства като персонален компютър, таблет или смартфон. Графичния интерфейс може да се променя като се добавят или премахват елементи, спрямо наличното оборудване в животновъдната ферма.

Авторска справка

Основни научни приноси

- Разработен е нов метод за управление на микроклимата в птицеферма който се основава на изчисление на усещаната от птиците температура, която е различна от температурата в помещението и зависи от температурата, влажността и скоростта на движение на въздуха, както и от възрастта на пилетата. Публикация „Algorithm for Autonomous Management of a Poultry Farm by a Cyber-Physical System“ в списание Animals -IMPACT FACTOR - 2.7; CITIScore – 4.9; SJR – Q1
- Разработен е нов метод за автоматичен контрол на нитрати, нитрити и амоняк в аквапонична система, чрез управление на подаваното количество храна на автоматичната хранилка. Публикация „Concept of a Cyber-Physical System for Control of a Self-Cleaning Aquaponic Unit“ в списание AgriEngineering - IMPACT FACTOR - 3.0; CITIScore – 4.7; SJR – Q1

Основни научно-приложни приноси

- Разработени са КФС за управление на микроклимата в кравеферма, свинеферма и птицеферма, изградени с ценово ориентирани компоненти, като крайната цена е значително по-ниска спрямо съществуващите решения на пазара. Това я прави

лесно достъпна за малки и средно големи ферми, за които първоначалната инвестиция за съществуващите системи е непосилна.

- Разработената КФС за управление на микроклимата в птицеферма позволява напълно автономно управление, при което системата самостоятелно променя параметрите на средата спрямо възрастта на пилетата и превключва между трите режими на вентилация без намесата на персонала. Съществуващите подобни системи предлагат само преминаване от минимална към преходна вентилация и обратно. Предложената система позволява преминаване и в режим на тунелна вентилация, благодарение на въведения метод за отчитане на усещаната от птиците температура.
- Разработена е КФС за управление на средата в аквапонична система която предлага автономен контрол на много по-широка гама параметри сравнено със съществуващите подобни системи, като същевременно може да изпраща препоръки на персонала за регулиране количеството на рибата и растенията за осъществяване и поддържане на баланса и.

Основни приложни приноси

- Разработената КФС за управление на микроклимата в птицеферма беше внедрена и тествана в птицеферма съвместно с Тракийски университет гр. Стара Загора, като допринесе за намаляване разходите за електроенергия и подобряване на условията за отглежданите на птиците.

Благодарности

Благодаря на своя научен ръководител проф. д-р Найдено Шиваров, за съдействието и насоките през целия период на моята докторантура, както и за помощта при провеждане на изследванията и подготовката на тази дисертация.

Апробация на резултатите

Различни части от получените резултати са докладвани на следните форуми, конференции и семинари:

- „Трети интердисциплинарен докторантски форум 6-7 юни 2022г. Парк-хотел „Кюстендил“, гр. Кюстендил“, „Киберфизична система за интелигентно управление на кравеферма“
- IFAC Workshop on Control for Smart Cities., June 27-30, 2022, Sozopol, Bulgaria, “Algorithms for Cost Oriented Cyber Physical System (COCPS) for intelligent control of animal husbandry farms“
- IFAC International Conference on Technology, Culture and International Stability - 21st TECIS 2022, October 26-28, Prishtina (Kosovo) - Online „Cost Oriented Cyber-Physical System algorithm for pig farm microclimate and air quality control“
- 4th Interdisciplinary PhD Forum with International Participation, 16 – 19 May 2023, Sandanski, Bulgaria „Cyber-Physical System algorithm for pig farm microclimate“
- 5th Interdisciplinary PhD Forum with International Participation 16 – 19 April 2024 Kyustendil, Bulgaria “Poultry farm microclimate management by calculating felt temperature”
- XXXIII МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКА КОНФЕРЕНЦИЯ - АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ДИСКРЕТНОТО ПРОИЗВОДСТВО “АДП – 2024” 27 - 30

юни 2024 г., База Созопол на ТУ- София „Кибер физична система за управление на микроклимата в животновъдни ферми“

- Научен семинар на ИИКТ – БАН в секция “Кибер-физични системи”, на 06.12.2024г. 15:00 часа в зала 228 в бл. 2. Представена презентация на тема: „Концепция за КФС за контрол на самопочистващ се аквапоничен модул“.

Публикации по дисертационната тема

Научни публикации в издания реферирани и индексирани в световноизвестни бази данни (Web of Science, Scopus).

- Stefan Chivarov, Kristian Dimitrov, Nayden Chivarov; „Algorithms for Cost Oriented Cyber Physical System (COCPS) for intelligent control of animal husbandry farms“, IFAC-PapersOnLine Volume 55, Issue 11, 2022, Pages 31-36, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.08.044>
- Kristian Dimitrov, Stefan Chivarov, Nayden Chivarov; „Cost Oriented Cyber-Physical System algorithm for pig farm microclimate and air quality control “, IFAC-PapersOnLine Volume 55, Issue 39, 2022, Pages 336-341, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.12.047>
- Nayden Chivarov, Stefan Chivarov, Kristian Dimitrov; „Algorithm for Autonomous Management of a Poultry Farm by a Cyber-Physical System“ Special Issue Intelligent Animal Husbandry; Animals 2023, 13, 3252. <https://doi.org/10.3390/ani13203252> CiteScore-4.9, Impact factor 2.7, Quartile Rank Q1 – Animal Science and Zoology
- Kristiyan Dimitrov, Nayden Chivarov, Stefan Chivarov, Tsvetelina Paunova-Krasteva, Emil Filipov and Albena Daskalova, “Concept of a Cyber–Physical System for Control of a Self-Cleaning Aquaponic Unit” AgriEngineering 2024, 6(4), 3843-3874; <https://doi.org/10.3390/agriengineering6040219> CiteScore-4.7, Impact factor 3.0, Quartile Rank Q1 – Horticulture

Научна публикация в не реферирани списания с научно рецензиране.

- Кристиан Димитров „Кибер физична система за управление на микроклимата в животновъдни ферми“, Автоматизация на дискретното производство, Брой 6 юли 2024 г. Издателство на ТУ-София, ISSN: 2682-9584, <https://mf.tu-sofia.bg/mntkadp/includes/archive/2024.pdf>

Забелязани цитирания:

- Vatn, K.J.D., Kavallieratos, G., Katsikas, S. (2024). Threat Analysis in Dairy Farming 4.0. In: Katsikas, S., et al. Computer Security. ESORICS 2023 International Workshops. ESORICS 2023. Lecture Notes in Computer Science, vol 14398. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54204-6_3
- Ibrahimov, B.; Stapleton, L.; Technology, International Stability and Culture (TECIS) – TC9-5 Exploring the Alignment of Control and Automation Systems with the United Nations Sustainable Development Goals (UN SDGs). IFAC-PapersOnLine Volume 58, Issue 3, 2024, Pages 176-181, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.146>

- Tan, C.; Yu, Z. A Low-Carbon Emission Production Scheduling Algorithm of Intelligent Manufacturing based on Energy and Environmental Efficiency. *Procedia Computer Science* 2024, 247, 1215. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.10.146>
- Kistanova, E.; Yotov, S.; Zaimova, D. Intelligent Animal Husbandry: Present and Future. *Animals* 2024, 14, 1645. <https://doi.org/10.3390/ani14111645>
- Montalvo, A.; Camacho, O.; Chavez, D. Cyber-Physical Systems for Smart Farming: A Systematic Review. *Sustainability* 2025, 17, 6393. <https://doi.org/10.3390/su17146393>

Библиография

- [1] Vale, W.G. (2007) Effects of environment on buffalo reproduction. *Ital. J. Anim. Sci.*, 6(2): 130-142., 15 Mar 2016, <https://doi.org/10.4081/ijas.2007.s2.130>
- [2] Sunil Kumar, B.V., Kumar, A. and Kataria, M. (2011) Effect of heat stress in tropical livestock and different strategies for its amelioration. *Journal of Stress Physiology Biochemistry.*, 7(1): 45-54., January 22, 2010
- [3] Leonel Avendaño-Reyes, Heat Stress Management for Milk Production in Arid Zones, Published: 26 September 2012, <http://dx.doi.org/10.5772/51299>
- [4] <https://www.nadis.org.uk/disease-a-z/cattle/managing-heat-stress-in-dairy-cows/> (accessed on August 2022)
- [5] J.W. West, B.G. Mullinix, J.K. Bernard, Effects of Hot, Humid Weather on Milk Temperature, Dry Matter Intake, and Milk Yield of Lactating Dairy Cows, *Journal of Dairy Science*, Volume 86, Issue 1, January 2003, Pages 232-242, [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73602-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73602-9)
- [6] Rachid BOURAOUI, Mondher LAHMAR, Abdessalem MAJDOUB, M'nouer DJEMALI, Ronald BELYEAD, The relationship of temperature-humidity index with milk production of dairy cows in a Mediterranean climate, November 2002 *Animal Research* 51(6):479-491, DOI: 10.1051/animres:2002036
- [7] Spiers, D.E., Spain, J.N., Sampson, J.D. and Rhoads, R.P. (2004) Use of physiological parameters to predict milk yield and feed intake in heat-stressed dairy cows. *Journal of Thermal Biology*, 29(7-8): 759-764.
- [8] Johnson H.D., Physiological responses and productivity of cattle, in: Yousef M.K. (Ed.), *Stress physiology in livestock. Basic principles*, Vol. 1, 4-19, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1985.
- [9] Mol G., Ogink N.W., 2004 - The effect of two ammonia - emission-reducing pig housing systems on odour emissions. *Water Sci. Technol.* 50, p. 334 – 340; (2004), <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0299>
- [10] Lopez J., Jesse J.W., Becker B.A., Eilersieck M. R., 1991 - Effects of temperature on the performance of finishing swine: II. *J. Anim. Sci.*, 111, p 1850 – 1855; (May 1991) <https://doi.org/10.2527/1991.6951843x>
- [11] Kemp, B., Verstegen, M.W.A. (1987). The Influence of Climatic Environment on Sows. In: Verstegen, M.W.A., Henken, A.M. (eds) *Energy Metabolism in Farm Animals. Current*

Topics in Veterinary Medicine and Animal Science, vol 44. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3363-7_8

[12] Drăghici C., 1991, Microclimatul adăposturilor de animale și mijloacele de dirijare. Ed. Ceres;

[13] Sergey Kostarev, Oksana Kochetova, Alfia Hamidullina, and Tatyana Sereda, Microclimate control system at poultry enterprises of closed type, E3S Web of Conferences 282, 07024 (2021), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128207024>

[14] A.V. Trifanov, V.V. Kaluga, A.G. Trafimov, Technologies and technical means of mechanized production of horticulture and livestock, 87-92 (2004)

[15] Livingston, M.L.; Pokoo-Aikins, A.; Frost, T.; Laprade, L.; Hoang, V.; Nogal, B.; Phillips, C.; Cowieson, A.J. Effect of heat stress, dietary electrolytes, and vitamins E and C on growth performance and blood biochemistry of the broiler chicken. Front. Anim. Sci. 2022, 3, 807267. <https://doi.org/10.3389/fanim.2022.807267>

[16] Tsiouris, V.; Georgopoulou, I.; Batzios, C.; Pappaioannou, N.; Ducatelle, R.; Fortomaris, P. Heat stress as a predisposing factor for necrotic enteritis in broiler chicks. Avian Pathol. 2018, 47, 616–624. <https://doi.org/10.1080/03079457.2018.1524574>

[17] Lara, L.J.; Rostagno, M.H. Impact of heat stress on poultry production. Animals 2013, 3, 356–369. <https://doi.org/10.3390/ani3020356>

[18] Sohail, M.U.; Ijaz, A.; Yousaf, M.S.; Ashraf, K.; Zaneb, H.; Aleem, M.; Rehman, H. Alleviation of cyclic heat stress in broilers by dietary supplementation of mannan-oligosaccharide and Lactobacillus-based probiotic: Dynamics of cortisol, thyroid hormones, cholesterol, C-reactive protein, and humoral immunity. Poult. Sci. 2010, 89, 1934–1938. <https://doi.org/10.3382/ps.2010-00751>

[19] Total production of fishery products (million tonnes of live weight, EU, 2000-2021) https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Aquaculture_statistics (accessed on 1.6.2024).

[20] Jaap van Rijn, Waste treatment in recirculating aquaculture systems, Aquacultural Engineering 53 (2013) 49–56, <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.11.010>

[21] S. Wahyuningsih, H. Effendi, and Y. Wardiatno, “Nitrogen removal of aquaculture wastewater in aquaponic recirculation system,” Aquaculture, Aquarium, Conservation Legislation, vol. 8, no. 4, pp. 491–499, 2015.

[22] X. Li, J. Li, Y. Wang, L. Fu, Y. Fu, B. Li, and B. Jiao, “Aquaculture industry in China: Current state, challenges, and outlook,” Rev. Fisheries Sci., vol. 19, no. 3, pp. 187–200, 2011

[23] Somerville, C.; Cohen, M.; Pantanella, E.; Stankus, A.; Lovatelli, A. Small-Scale Aquaponic Food Production: Integrated Fish and Plant Farming; FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper; FAO: Rome, Italy, 2014.

[24] Gilbert Van Stappen, Khalid Salie, Henk Stander, Inoculating fish sludge from aquaponics with microbes to enhance mineralisation of phosphorus, Ghent University: 2019 – 2020

[25] A. A. Steiner, “Soilless culture,” in Proc. 6th Colloq. Int. Potash Inst., no. 97. Bern, Switzerland: International Potash Insitute, 1968, pp. 324–341.

- [26] B. Zhang, P. Luo, H. Pang, Y. Gao, Z. Zhang, and C. Li, "Nitrogen pollutants removal characteristics in aquaponic system," *Chin. J. Environ. Eng.*, vol. 12, no. 5, pp. 1501–1509, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.01.004>
- [27] N. Savidov, "Evaluation and development of aquaponics production and product market capabilities in Alberta," Alberta Agricult., Food Rural Develop., Crop Diversification Centre South, Brooks, AB, Canada, Tech. Rep., 2004.
- [28] <https://www.bigdutchman.com/en/homepage/>; (accessed on 1 July 2024)
- [29] <https://www.fancom.com/>; (accessed on 1 July 2024)
- [30] <https://www.skov.com/en/home/>; (accessed on 1 July 2024)
- [31] <https://www.meier-brakenberg.de/en/>; (accessed on 5 July 2024)
- [32] <https://pentairaes.com> (accessed on 3 August 2024)
- [33] <https://aquaponics.com> (accessed on 1 August 2024)
- [34] <https://eheim.com> (accessed on 10 August 2024)
- [35] <https://milwaukeeinstruments.com> (accessed on 3 August 2024)
- [36] Lee, C.; Wang, Y. Development of a cloud-based IoT monitoring system for Fish metabolism and activity in aquaponics. *Aquac. Eng.* 2020, 90, 102067. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102067>
- [37] Khaoula, T.; Abdelouahid, R.A.; Ezzahoui, I.; Marzak, A. Architecture design of monitoring and controlling of IoT-based aquaponics system powered by solar energy. *Procedia Comput. Sci.* 2021, 191, 493–498. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.07.063>
- [38] Abd Al-Zahraa Naser, Baraa, Aajam Laith Saleem, Ali Hilal Ali, Salam Alabassi and Maher A.R. Sadiq Al-Baghdadi. (2019) "Design and construction of smart IoT-based aquaponics powered by PV cells." *International Journal of Energy and Environment (IJEE)*, Volume 10, Issue 3, 2019, pp.127-134.
- [39] Adrian K. Pasha; Edi Mulyana; Cecep Hidayat; Muhammad Ali Ramdhani; Opik T. Kurahman; M. Adhipradana, "System Design of Controlling and Monitoring on Aquaponic Based on Internet of Things", in 4th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT). <https://doi.org/10.1109/icwt.2018.8527802>, IEEE.
- [40] Goran D. Putnik, Luis Ferreira, Nuno Lopes, Zlata Putnik, "What is a Cyber-Physical System: Definitions and Models Spectrum" Polytechnic Institute of Cávado and Ave, Vila Frescaíinha S. Martinho, Barcelos, Portugal, June 2019, doi: 10.5937/fmet1904663P
- [41] E. A. Lee, "Cyber Physical Systems: Design Challenges," 2008 11th IEEE Int. Symp. Object Component-Oriented Real-Time Distrib. Comput., pp. 363–369, 2008 DOI: 10.1109/ISORC.2008.25
- [42] <https://www.openhab.org/>; (accessed on 3 June 2024)
- [43] R. A. Light, "Mosquitto: server and client implementation of the MQTT protocol," *The Journal of Open Source Software*, vol. 2, no. 13, May 2017, DOI: 10.21105/joss.00265
- [44] <https://www.influxdata.com/> (accessed on 7 March 2024)
- [45] <https://grafana.com/> (accessed on 7 March 2024)

- [46] <https://www.amanda.org/> (accessed on 6 March 2024)
- [47] <https://code.visualstudio.com/> (accessed on 11 March 2024)
- [48] <https://tasmota.github.io/docs/> (accessed on 12 March 2024)
- [49] <https://www.softblade.de/> (accessed on 12 March 2024)
- [50] <http://www.volison.com/> (accessed on 9 December 2023)
- [51] <https://www.analog.com/> (accessed on 14 March 2024)
- [52] <http://www.aosong.com/> (accessed on 15 March 2024)
- [53] <https://sensirion.com/> (accessed on 16 March 2024)
- [54] <https://www.winsen-sensor.com/> (accessed on 3 June 2024)
- [55] <https://senseair.com/> (accessed on 5 January 2024)
- [56] <http://www.klha.com/> (accessed on 9 February 2023)
- [57] <https://www.jxctiot.com/> (accessed on 9 December 2023)
- [58] <https://www.renkeer.com/> (accessed on 9 December 2023)
- [59] <https://www.wika.com/> (accessed on 3 June 2024)
- [60] <https://www.rohm.com/> (accessed on 5 June 2024)
- [61] <https://ams-osram.com/> (accessed on 5 January 2024)
- [62] <https://www.ysi.com/> (accessed on 3 January 2024)
- [63] <https://www.nnelectronic.com/> (accessed on 16 March 2024)
- [64] Hristev, H., 2007. Natural resistance of animals. Agrarian University, Plovdiv, 128 p. (Bg)
- [65] Наредба №.44 от 20 април 2006г. За Ветеринарномедицинските изисквания към животновъдните обекти. Обн. ДВ. бр.41 от 19 Май 2006г., изм. ДВ. бр.102 от 19 Декември 2006г., изм. ДВ. бр.40 от 18 Април 2008г., изм. ДВ. бр.48 от 23 Май 2008г., изм. ДВ. бр.90 от 17 Октомври 2008г., изм. ДВ. бр.50 от 2 Юли 2010г., изм. ДВ. бр.10 от 3 Февруари 2012г.
- [66] Наредба № 14 от 3 Февруари 2006 Г. За минималните изисквания за защита и хуманно отношение при отглеждане на телета. В сила от 01.05.2006 г. Издадена от Министерството на земеделието и горите. Обн. ДВ. бр.17 от 24 Февруари 2006г., изм. ДВ. бр.6 от 19 Януари 2007г.
- [67] Наредба № 13 от 30 декември 2003 Г. За защита на работещите от рискове, свързани с експозиция на химични агенти при работа. В сила от 31.01.2005 г. Издадена от министъра на труда и социалната политика и министъра на здравеопазването. Обн. ДВ. бр.8 от 30 Януари 2004г., изм. ДВ. бр.71 от 1 Септември 2006г., изм. ДВ. бр.67 от 17 Август 2007г., изм. ДВ. бр.2 от 6 Януари 2012г., изм. и доп. ДВ. бр.46 от 23 Юни 2015г., изм. и доп. ДВ. бр.73 от 4 Септември 2018г., изм. ДВ. бр.5 от 17 Януари 2020г.
- [68] Santana, C. M., Gauger, P., Vetger, A., Magstadt, D., Kim, D. S., Shrestha, D., ... Rumbelha, W. K. (2021). Ambient hydrogen sulfide exposure increases the severity of influenza A virus infection in swine. Archives of Environmental & Occupational Health, 76(8), 526–538.
- [69] S.E. Curtis et al., Atmospheric ammonia affects swine health, Illinois Research (1977)

- [70] Donald, J.O. Environmental Management in the Broiler House; Auburn University: Auburn, AL, USA, 2010.
- [71] Bist, R.B.; Subedi, S.; Chai, L.; Yang, X. Ammonia emissions, impacts, and mitigation strategies for poultry production: A critical review. *J. Environ. Manag.* 2023, 328, 116919. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116919>
- [72] Olanrewaju, H.A.; Thaxton, J.P.; Dozier, W.A.; Purswell, J.; Roush, W.B.; Branton, S.L. A review of lighting programs for broiler production. *Int. J. Poult. Sci.* 2006, 5, 301–308. DOI: [10.3923/ijps.2006.301.308](https://doi.org/10.3923/ijps.2006.301.308)
- [73] Mendes, A.S.; Paixão, S.J.; Restelatto, R.; Morello, G.M.; de Moura, D.J.; Possenti, J.C. Performance and preference of broiler chickens exposed to different light sources. *J. Appl. Poult. Res.* 2013, 22, 62–70. <https://doi.org/10.3382/japr.2012-00580>
- [74] Farm Animal Welfare Council, Report on the Welfare of Broiler Chickens. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, London, UK (1992)
- [75] Riddell, C.; Classen, H.L. Effects of increasing photoperiod length and anticoccidials on performance and health of roaster chickens. *Avian Dis.* 1992, 36, 491–498. DOI: [10.2307/1591739](https://doi.org/10.2307/1591739)
- [76] Morris, M.P. National survey of leg problems. *Broiler Ind.* 1993, 93, 20–24.
- [77] Classen, H. L., Annett, C. B., Schwan-Lardner, K. V., Gonda, R., & Derow, D. (2004). 2004 SPRING MEETING OF THE WPSA UK BRANCH PAPERS: The effects of lighting programmes with twelve hours of darkness per day provided in one, six or twelve hour intervals on the productivity and health of broiler chickens. *British Poultry Science*, 45(sup1), S31–S32. <https://doi.org/10.1080/00071660410001698137>
- [78] Gordon, S.H. Effects of day length and increasing day length programs on broiler welfare and performance. *World's Poult. Sci. J.* 1994, 50, 269–282.
- [79] Rozenboim, I., Robinson, B., & Rosenstrauch, A. (1999). Effect of light source and regimen on growing broilers. *British Poultry Science*, 40(4), 452–457. <https://doi.org/10.1080/00071669987197>
- [80] Renden, J.A.; Bilgili, S.F.; Lien, R.J.; Kincaid, S.A. Live performance and yields of broilers provided various lighting schedules. *Poult. Sci.* 1991, 70, 2055–2062. <https://doi.org/10.3382/ps.0702055>
- [81] Leeson, S.; Caston, L.J.; Summers, J.D. Performance of layers given two-hour midnight lighting as growing pullets. *J. Appl. Poult. Res.* 2003, 12, 313–320. <https://doi.org/10.1093/japr/12.3.313>
- [82] Kritensen, H.H.; Aerts, J.M.; Leroy, T.; Berckmans, D.; Wathes, C.M. Using light to control broiler chickens. *Br. Poult. Sci.* 2004, 45, S30–S31.
- [83] Czarick, M.; Lacy, M.P.; Lott, B. Poultry Housing Tips, Recent Developments in Wind-Chill Charts; College of Agricultural and Environmental Science: Athens, GA, USA, 1999; Volume 11.
- [84] Wind Chill Effect. What It Is and How to Calculate It. Available online: <https://www.pericoli.com/en/Wind-chill-effect-What-it-is-and-how-to-calculate-it/> (accessed on 11 November 2022).
- [85] Publisher—Avigen, Ross Broiler Management Handbook 2018. 2018. Available online: www.avigen.com (accessed on 23 November 2022).
- [86] Donald, J.; Campbell, J.; Simpson, G.; Macklin, K. Poultry Engineering, Economics & Management, National Poultry Technology Center Produced in Cooperation with the U.S.

Poultry & Egg and Alabama Poultry & Egg Associations Issue No 67; Auburn University: Auburn, AL, USA, 2010.

[87] Sheikh, B. Hydroponics: Key to sustain agriculture in water stressed and urban environment. Pak. J. Agric. Agril. Eng. Vet. Sci. 2006, 22, 53–57.

Abstracts of Dissertations

Number 6, 2025

INSTITUTE OF INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES
BULGARIAN ACADEMY OF SCIENCES

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

ИНСТИТУТ ПО ИНФОРМАЦИОННИ И КОМУНИКАЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ

Брой 6, 2025

Автореферати на дисертации