

## Підсистеми температурного контролю кіберфізичних систем

### АНОТАЦІЯ

*Мідик А.-В.В.* Підсистеми температурного контролю кіберфізичних систем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти та науки України, Львів, 2022.

Дисертація присвячена дослідженню та подальшому розвитку кібер-фізичних систем, а саме їх температурних підсистем, для потреб сільського господарства та його переробної промисловості.

У *першому розділі* наведено області застосування кіберфізичних систем, розглянуто їх особливості, проаналізовано можливості систем, виходячи з поставленої задачі. Для цього, враховуючи новизну області досліджень, вивчено історію виникнення у контексті подальшого розвитку інформаційно-вимірювальних систем, теорії автоматичного керування та інших галузей, покладених в основу кіберфізичних систем. Дано сучасне визначення згаданих систем, встановлене у колективній монографії, опублікованій з участю дисертанта. Основний ухил досліджень стосується кіберфізичних систем, що розвиваються у сільськогосподарському секторі. Вивчено об'єкти щодо яких можуть найбільш ефективно застосовуватись підходи створення, розвитку та впровадження кіберфізичних систем. Коротко охарактеризовано зазначені об'єкти, обґрунтовано їх переваги та недоліки у зв'язку з темою, що розвивається. Показано збіжність поставлених завдань стосовно методів і засобів регулювання технологічних процесів у сільському господарстві та переробній промисловості. Так, сушіння сільськогосподарської сировини (деревини, тютюну, сухофруктів, тощо), багато-в-чому, за енергетичними підходами близьке до вирощування продукції у парниках та теплицях. При цьому, засоби метрологічного контролю на рівні смарт-сенсорів входять до складу кіберфізичних систем. Так формується метрологія 4.0, як фундамент, на якому розвиваються згадані системи. Уніфікація виготовлення будь-

яких розумних приладів, їх оснащеність USB-роз'ємами створила підстави для взаємозамінності різних типів засобів вимірювання та виконавчих елементів (смарт-актуаторів).

На основі проведеного огляду особливостей формування кіберфізичних систем встановлено, що найбільш ефективно дослідити та реалізувати для потреб сільського господарства України можна температурні підсистеми, враховуючи направленість та досягнення розвитку ІТ-інженерії та приладобудування, з одного боку, а потреби сільського господарства, з іншого боку. Адже температурні режими вирощування овочів та іншої продукції у теплицях, їх сушіння та переробка формують основу і водночас перспективу подальшого розвитку науково-технічного та виробничого потенціалу держави, досягнутого у попередні роки. При цьому, доведено, що наявні засоби потребують вдосконалення, зокрема щодо підвищення чутливості та швидкості керування роботою кіберфізичних систем в тому числі за рахунок оптимізації елементів систем температурного контролю.

У *другому розділі* вивчено низку методів вимірювання та контролю температури технологічних процесів, причому увагу зосереджено на потребах подальшого розвитку технологій сільського господарства, що включають як вирощування, так і переробку сільськогосподарської продукції. Відзначу, що методи вимірювання, які, в основному, розглядаються – це методи температурних вимірювань. До них відносять методи прямого або безпосереднього вимірювання температури та методи безконтактного вимірювання або ж пірометричні методи. Контактні методи включають ряд методів, що базуються на застосуванні термометрів опору, термопар та інших. Безконтактні методи, до яких відносяться різні методи вимірювання температури з використання енергетичної та яскравісної температур, відношення яскравостей тощо, охарактеризовані стосовно їх причетності до вимірювання кімнатних температур, за яких проростає та розвивається рослина. Показано доцільність використання енергетичної пірометрії або ж пірометрії повного випромінювання. Усі перелічені та досліджені методи вимірювання температури є достатньо автоматизованими та надаються для

формування температурних підсистем кіберфізичних систем. Проте, за метрологічно-експлуатаційними характеристиками, для уникнення істотних похибок методичного плану, зокрема, при регулюванні температурних режимів роботи проєктованих систем необхідно брати до уваги наступне. Стала температурної інерції сенсорів, що плануються використовувати, повинна бути принаймні, на 2 порядки нижчою від сталої контрольованого об'єкта. Якщо таким вважати теплицю, де стала температурної інерції становить десятки хвилин, то для мінімізації методичної похибки, зумовленої інерційністю сенсора, остання повинна не перевищувати декількох секунд. Вищеприведене стосується підсистеми вимірювання температури повітря. Вимірювання температури ґрунту характеризується власними труднощами: ґрунт характеризується значною теплоємністю та поганою теплопровідністю. Тому, щоб отримати його температурний розподіл по значній площі, слід використовувати значну кількість контактних сенсорів (термометрів). Виходячи з наведеного, при виборі сенсорів взяли до уваги можливість залучення безконтактного термометрів – пірометрів, в даному разі повного випромінювання. Такі пірометри, названі тепловізорами, призначені для термометрування значних площ об'єктів, що знаходяться за кімнатних температур. Проте, вони видають тільки якісне зображення, кожній точці якого приписують певне значення температури, оскільки невідомим є коефіцієнт випромінювання термометрованої поверхні. Його ще називають коефіцієнтом чорноти випромінювання. За умови, що даний коефіцієнт – відомий, термометрія перетворюється на кількісну.

Такий підхід дав змогу розробити методику оптимізації регулювання об'єкту сільськогосподарської технології, взявши за основу регулювання температурних режимів, причому за умови залучення контактних методів термометрування для регулювання температури повітря і безконтактних тепловізійних методів для регулювання температури ґрунту теплиці, враховуючи температуру води для зволоження та за результатами прямої дії сонячного випромінювання.

У розробленні методики оптимізації роботи температурної підсистеми кіберфізичної системи виходили з найпростішої методики регулювання тютюносушіння,

де оцінювання якості сушіння прямо характеризує якість виготовленої продукції – тютюну, а звідти і сигарет. Складнішою вважається методика регулювання на прикладі сушильної камери, де розглядається низка вхідних та вихідних характеристик, а модель розрахунку базується на досягненнях класичної теорії аналогового автоматичного керування.

У зв'язку з поширенням програмно-технічних засобів у дисертаційній роботі розвинуто підходи цифрового автоматичного керування, яскраво виражені у кіберфізичних системах. Таким чином, дійшли до методики оптимізації роботи температурної підсистеми кіберфізичної системи керування теплицею, основна модель якої включає взаємозв'язані контури регулювання для повітря, ґрунту й води для зволоження. Зв'язок реалізується, як через програмно-технічні засоби керування, так і через параметри контрольованого об'єкта.

У *третьому розділі* набули подальшого розвитку кіберфізичні системи для сільськогосподарського виробництва: по мірі складності вони включають кіберфізичну систему температурно-вологісного контролю теплиці, кіберфізичну систему для вирощування овочів з регулюванням тепло-вологісно-інсоляційного режиму, кіберфізичну систему для переробки сільськогосподарських продуктів,

Такий підхід дав змогу розробити методику оптимізації регулювання об'єкту сільськогосподарської технології, взявши за основу регулювання температурних режимів, причому в сукупності з режимами зволоження (температурний режим води для зволоження) та режимами інсоляції. Розроблено схеми керування, взявши за основу вхідні та вихідні чинники, моделі їх зв'язків: прямих і зворотніх, їх кореляцію з одночасною оцінкою якості отримуваних продуктів.

У *четвертому розділі* вивчено метрологічні аспекти автоматизації виробництва сільськогосподарської продукції. Засоби регулювання режимів роботи та керування роботою сільськогосподарського об'єкту здійснювалось у 3-х принципово різних виконаннях. Перший із них – на прикладі серійно випущеної науково-технічної продукції, включаючи смарт-сенсори, смарт-актуатори та програмовані ПД-регулятори. Друге виконання базувалось на спеціально розробленій конструкції, головним елементом якої стала апаратно-програмна

платформа Arduino; до неї підключались ті самі сенсори та актуатори, що й у першому випадку; платформа підлягала програмуванню на спрощеній мові C++. Третє виконання реалізовано, як віртуальний засіб регулювання. Його створено і реалізовано на основі апаратно-програмної платформи LabVIEW та з блоком NI USB 6009. Віртуальний прилад у складі ПК з програмним забезпеченням LabVIEW, блоку NI USB 6009, до якого під'єднано 4 цифрові сенсори температури/вологості та освітлення (інсоляції), вжито для керування процесом вирощування овочів.

У цілому, для всіх трьох виконань показано, що у виробничих умовах при незначних витратах можна з мінімальними затратами забезпечити високу якість продукції.

Окрім того, вивчено екологічно-економічні аспекти будівництва та використання теплиці, як споруди пасивного типу. При цьому, оскільки управління роботою теплиці одночасно реалізовувалось у 3-х взаємозв'язаних контурах – повітря, води та ґрунту, досліджувались саме зазначені аспекти, адже загальна ефективність сільськогосподарського виробництва та конкурентна спроможність його порівняно з південними регіонами визначається і енергетичними затратами на одиницю продукції.

**Ключові слова:** кібер-фізична система, смарт-сенсор, смарт-актуатор, температура, вологість, інсоляція, температурні підсистеми, віртуальний засіб вимірювання, апаратно-програмна платформа, сенсорні мережі, програмне забезпечення, регулювання параметрів.

## **Subsystems of temperature control of cyber-physical systems**

### **ABSTRACT**

Midyk A.-V.V. Subsystems of temperature control of cyber-physical systems. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the Doctor of Philosophy degree in specialty 152 "Metrology and information and measurement technology" - Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2022.

The dissertation is devoted to research and further development of cyber-physical systems, namely their temperature subsystems, for the needs of agriculture and its processing industry.

In the first chapter, the areas of application of cyber-physical systems are given, their features are considered, the capabilities of the systems are analyzed, based on the given task. For this, taking into account the novelty of the field of research, the history of its emergence in the context of the further development of information and measurement systems, the theory of automatic control and other fields based on cyber-physical systems was studied. The modern definition of the mentioned systems is given, established in a collective monograph published with the participation of the dissertation. The main research bias concerns cyber-physical systems developing in the agricultural sector. Objects for which the approaches of creation, development and implementation of cyber-physical systems can be most effectively applied have been studied. The mentioned objects are briefly characterized, their advantages and disadvantages are substantiated in connection with the developing topic. Convergence of the tasks in relation to the methods and means of regulation of technological processes in agriculture and processing industry is shown. Thus, the drying of agricultural raw materials (wood, tobacco, dried fruits, etc.) is, in many respects, close to growing products in greenhouses in terms of energy approaches. At the same time, the means of metrological control at the level of smart sensors are part of cyber-physical systems. This is how metrology 4.0 is formed, as the foundation on which the mentioned systems develop. The unification of the manufacture of any smart devices, their equipment with USB connectors created grounds for the

interchangeability of various types of measuring devices and executive elements (smart actuators).

Based on the review of the features of the formation of cyber-physical systems, it was established that temperature subsystems can be most effectively researched and implemented for the needs of agriculture in Ukraine, taking into account the direction and achievements of the development of IT engineering and instrumentation, on the one hand, and the needs of agriculture, on the other. After all, the temperature regimes of growing vegetables and other products in greenhouses, their drying and processing form the basis and at the same time the perspective of the further development of the scientific, technical and production potential of the state, achieved in previous years. At the same time, it has been proven that the existing means need improvement, in particular, in terms of increasing the sensitivity and speed of controlling the work of cyber-physical systems, including due to the optimization of elements of temperature control systems.

In the second chapter, a number of methods of measuring and controlling the temperature of technological processes are studied, and attention is focused on the needs of further development of agricultural technologies, which include both cultivation and processing of agricultural products. I would like to note that the measurement methods that are mainly considered are temperature measurement methods. These include methods of direct or immediate temperature measurement and methods of non-contact measurement or pyrometric methods. Contact methods include a number of methods based on the use of resistance thermometers, thermocouples, and others. Non-contact methods, which include various methods of temperature measurement using energy and brightness temperature, brightness ratio, etc., are characterized in relation to their involvement in measuring room temperatures at which a plant germinates and develops. The expediency of using energy pyrometry or total radiation pyrometry is shown. All the listed and investigated temperature measurement methods are sufficiently automated and are provided for the formation of temperature subsystems of cyber-physical systems. However, according to the metrological and operational characteristics, in order to avoid significant errors in the methodical plan, in particular, when adjusting the temperature regimes of the designed systems, the following should be taken into account. The

temperature inertia constant of the sensors planned to be used should be at least 2 orders of magnitude lower than the constant of the monitored object. If we consider a greenhouse as such, where the temperature inertia time is tens of minutes, then in order to minimize the methodical error caused by the inertia of the sensor, the latter should not exceed a few seconds. The above applies to the air temperature measurement subsystem. Measuring the soil temperature is characterized by its own difficulties: the soil is characterized by a significant heat capacity and poor thermal conductivity. Therefore, in order to obtain its temperature distribution over a large area, a significant number of contact sensors (thermometers) should be used. Based on the above, when choosing sensors, we took into account the possibility of involving non-contact thermometers - pyrometers, in this case full radiation. Such pyrometers, called thermal imagers, are designed for thermometry of large areas of objects that are at room temperature. However, they produce only a high-quality image, each point of which is assigned a certain temperature value, since the emissivity of the temperature-measured surface is unknown. It is also called the radiation blackness coefficient. Provided that this coefficient is known, thermometry is converted into quantitative.

This approach made it possible to develop a method of optimizing the regulation of the object of agricultural technology, taking as a basis the regulation of temperature regimes, and on the condition of involving contact methods of thermometry to regulate the air temperature and non-contact thermal imaging methods to regulate the temperature of the soil of the greenhouse, taking into account the temperature of water for humidification and according to the results direct exposure to solar radiation.

In the development of the method for optimizing the temperature subsystem of the cyber-physical system, we started from the simplest method of regulating tobacco drying, where the evaluation of the quality of drying directly characterizes the quality of the manufactured products - tobacco, and hence cigarettes. The regulation method using the example of a drying chamber is considered more complex, where a number of input and output characteristics are considered, and the calculation model is based on the achievements of the classical theory of analog automatic control.



In connection with the spread of software and technical tools, the approaches of digital automatic control, clearly expressed in cyber-physical systems, were developed in the dissertation work. Thus, we arrived at a methodology for optimizing the operation of the temperature subsystem of the cyber-physical greenhouse control system, the main model of which includes interconnected control loops for air, soil and water for humidification. Communication is implemented both through software and technical control tools and through the parameters of the controlled object.

In the third chapter, cyber-physical systems for agricultural production were further developed: in order of complexity, they include a cyber-physical system for temperature and humidity control of a greenhouse, a cyber-physical system for growing vegetables with regulation of the heat-humidity-insolation regime, a cyber-physical system for processing agricultural products,

This approach made it possible to develop a methodology for optimizing the regulation of the object of agricultural technology, taking as a basis the regulation of temperature regimes, and in combination with regimes of humidification (temperature regime of water for hydration) and regimes of insolation. Management schemes have been developed based on input and output factors, models of their relationships: direct and inverse, their correlation with the simultaneous assessment of the quality of the received products.

In the fourth chapter, the metrological aspects of the automation of the production of agricultural products are studied. The means of regulating work modes and managing the work of the agricultural facility were implemented in 3 fundamentally different versions. The first of them is based on the example of mass-produced scientific and technical products, including smart sensors, smart actuators and programmable PID controllers. The second implementation was based on a specially developed design, the main element of which was the Arduino hardware and software platform; the same sensors and actuators as in the first case were connected to it; the platform was subject to programming in the required C++ language. The third implementation is implemented as a virtual means of regulation. It was created and implemented on the basis of the LabVIEW hardware and software platform and with the NI USB 6009 unit. The virtual

device consists of a PC with LabVIEW software, the NI USB 6009 unit, to which 4 digital temperature/humidity and illumination (insolation) sensors are connected. used to control the process of growing vegetables.

In general, for all three versions, it is shown that in production conditions, with minimal costs, it is possible to ensure high quality products with minimal costs.

In addition, the ecological and economic aspects of the construction and use of the greenhouse as a passive structure were studied. At the same time, since the management of the greenhouse was simultaneously implemented in 3 interconnected circuits - air, water and soil, the specified aspects were studied, because the overall efficiency of agricultural production and its competitiveness compared to the southern regions is also determined by the energy costs per unit of production.

**Keywords:** cyber-physical system, smart sensor, smart actuator, temperature, humidity, insolation, temperature subsystems, virtual measurement tool, hardware and software platform, sensor networks, software, parameter adjustment.