

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

БОЛБОТ ІГОР МИХАЙЛОВИЧ

УДК 681.516.75:631.234

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ ТЕПЛИЧНИМИ  
КОМПЛЕКСАМИ З МОНІТОРИНГОМ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ

05.13.07 – Автоматизація процесів керування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
Дисертація містить результати власних досліджень

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають  
посилання на відповідне джерело \_\_\_\_\_ І. М. Болбот

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий консультант \_\_\_\_\_ В. П. Лисенко,

(підпис, ініціали та прізвище)

д.т.н., професор

Київ – 2020

## АНОТАЦІЯ

**Болбот І. М. Автоматизація процесів керування тепличними комплексами з моніторингом якості продукції. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація процесів керування. Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, 2020 р.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої і актуальної науково-прикладної проблеми, а саме розроблення наукових основ створення енергоефективної системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – тепличних комплексах, що функціонують в умовах невизначеності з моніторингом стану рослин та якості рослинної продукції.

Тепличні комплекси – це сучасні складні організаційно-технічні об'єкти з біологічною складовою, основним елементом котрих є промислові теплиці, де реалізуються технології виробництва рослинної продукції в спорудах закритого ґрунту. Впродовж календарного року вони постачають значну частку рослинної продукції на ринок продовольства України. Конкурентоздатність цієї продукції пов'язана з необхідністю пошуку балансу між витратами ресурсів на виробництво та її якістю. Проведений аналіз сучасних технологій виробництва рослинної продукції та систем їх автоматизації в промислових теплицях дав змогу зробити висновок, про виконання завдань щодо реалізації енергоефективного керування енергетичними потоками тепличних комплексів вимагає застосування принципово нових підходів в автоматизації, що зумовлено як самими об'єктами, так і більш жорсткими вимогами до ефективності керування ними. Автоматизація процесів керування на основі використання результатів моніторингу стану рослин і якості продукції забезпечує реалізацію заданої технології виробництва рослинної продукції в умовах тепличного комплексу з мінімальними витратами енергії.

Ключовим елементом досягнення компромісу між витратами ресурсів та якістю продукції є система керування мікрокліматом у теплиці, а основні обмеження ефективності вирощування рослинної продукції в тепличних комплексах виникають внаслідок: *по-перше*, невизначеності, що є наслідком впливу природних збурень, які мають випадковий характер (температура і вологість зовнішнього середовища, сонячна радіація), неповноти інформації про стани рослин, параметрів середовища навколо них та якості рослинної продукції; *по-друге*, обмеженої інформації про взаємозв'язки між споживанням енергетичних ресурсів та станами рослин у просторово-розподілених фітокліматичних умовах їх розвитку та якості рослинної продукції; *по-третє*, відсутності загальних технічних принципів побудови систем автоматизації керування енергетичними потоками в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – тепличних комплексах, із моніторингом якості цієї продукції. Зважаючи на зазначене, можна стверджувати, що на даний час вимоги до систем енергоефективного керування енергетичними потоками просторово-розподілених біотехнічних об'єктів – тепличних комплексів, постійно зростають, а наукові основи їх побудови відсутні. Усе зазначене вище зумовило вибір теми дисертації, встановлення її мети та завдань.

Розроблено інтелектуальний метод формування енергоефективних стратегій керування енергетичними потоками в біотехнічних об'єктах – промислових теплицях, який відрізняється використанням нового критерію енергоефективності та нейромережевого аналізу, що мінімізує енергетичні витрати на забезпечення технології вирощування в умовах дії зовнішніх природних збурень, неповної інформації про стани рослин та просторової розподіленості кліматичних умов. На основі генетичного алгоритму встановлено оптимальну кількість основних факторів життєзабезпечення рослин, на підтримку яких витрачається 70% енергетичних ресурсів – це світлозабезпечення, вологозабезпечення, теплозабезпечення, забезпечення поживними речовинами та газозабезпечення.

На основі математичного апарату вейвлет-перетворень розроблений новий метод безконтактного визначення фітометричних параметрів рослин, що дає змогу оцінювати якість розвитку рослини та використовувати зазначене в трьох основних фазах розвитку рослин (цвітіння, формування плоду, отримання врожаю) в загальному алгоритмі формування стратегій керування; на основі методу варіаційного числення створена математична модель переміщення мобільного робота, що дає можливість мінімізувати енерговитрати його акумуляторної батареї за рахунок вибору швидкості переміщення на різні відстані, адекватність моделі підтверджена критерієм Фішера та практичним використанням робота в промисловій теплиці. На застосуванні теорії імовірнісних автоматів та стимулюючого навчання заснований метод просторового орієнтування мобільного робота для фітомоніторингу в просторі промислової теплиці, що створює умови для самостійного переміщення робота в просторі теплиці, оминаючи перешкоди.

За результатами параметричного синтезу та методології оптимального проєктування і використання мобільних роботів винайдено раціональний варіант структури мобільного робота фітомоніторингу, який здійснює моніторинг фітостану і стану атмосфери, аналізує фітокліматичні дані та формує на цій основі рішення щодо оптимізації маршруту переміщення, планування послідовності дій, розпізнавання образів і перешкод, що забезпечує виконання поставлених завдань за мінімальних вартісних і часових витрат. Запропонований алгоритм функціонування мобільного робота реалізовано на основі програмних середовищ Processing/Wiring, Node-RED та LabVIEW. Доведено економічну доцільність використання мобільного робота на площі теплиці не менше 0,2 га.

Обґрунтовано архітектуру та концепцію побудови системи автоматизації процесів енергоефективного керування енергетичними потоками під час виробництва рослинної продукції заданої якості в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – промислових теплицях, яка функціонує на основі використання мобільного робота для фітомоніторингу,



а також обґрунтовано застосування результатів нейромережевого аналізу для формування стратегій керування.

Розроблено просторово-розподілену математичну модель промислової теплиці, засновану на розв'язанні рівнянь Нав'є-Стокса, що дає можливість оцінювати значення температури як основного технологічного параметра в просторі теплиці та використовувати ці результати для формування маршруту переміщення мобільного робота фітомоніторингу.

Запропоновано критерії: ефективного використання енергетичних ресурсів, суть якого полягає у мінімізації різниці між відносними показниками фітокліматичного життєзабезпечення та фіторозвитку рослин, що мінімізує енергетичні витрати, забезпечуючи задану якість рослин та продукції; оцінки станів розвитку рослин і рослинної продукції, а саме фітометричний та фітотемпературний критерії, використання яких системою автоматизації процесів керування енергетичними потоками під час виробництва рослинної продукції забезпечує задану якість рослин та продукції з урахуванням фаз розвитку рослин.

Для виробництва продукції заданої якості в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – промислових теплицях, розроблена нова концепція системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками, що функціонує на основі використання результатів фітомоніторингу, які надходять від мобільного робота, і нейромережевого аналізу.

Приведено структуру автоматичної системи керування енергоефективними потоками, основний алгоритм її функціонування, зручний відповідно до вимог ергономіки інтерфейс користувача та економічне обґрунтування її використання. Розроблено енергоефективну систему автоматизації процесів керування енергетичними потоками в просторово-розподіленому біотехнічному об'єкті – промисловій теплиці, для виробництва рослинної продукції, функціонування якої забезпечується інтелектуальним методом формування стратегій керування на основі неповної інформації про стани рослин, якість рослинної продукції, параметри

атмосфери теплиці, що надходять від мобільного робота, та використання нейромережевого аналізу для формування стратегій керування, що мінімізують енергетичні витрати на забезпечення технології вирощування в умовах невизначеності. Ексергетичний аналіз такої системи дає підстави стверджувати про її перспективність: на 8-й рік експлуатації системи значення коефіцієнта ефективності сягне 0,221 з подальшим його зростанням.

Реалізовано та проведено дослідно-промислові випробування розробленої системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками для виробництва рослинної продукції в просторово-розподіленому біотехнічному об'єкті – промисловій теплиці, з такими результатами: за рахунок підвищення енергоефективності частка енергетичних ресурсів у структурі собівартості виробленої продукції порівняно з діючою системою зменшилась на 4,2%; собівартість виробленої продукції порівняно з діючою системою зменшилась на 5,7%.

**Ключові слова:** енергоефективна система керування, мобільний робот, генетичні алгоритми, нейронні мережі, фітомоніторинг, математичне моделювання, вейвлет-перетворення, невизначеність, просторова розподіленість, тепличні комплекси, моніторинг якості продукції, моніторинг фітостану та стану атмосфери, стратегії керування.

## ABSTRACT

**I. M. Bolbot. Automation of greenhouse complex control processes and product quality monitoring. – Manuscript.**

The thesis on competing a scientific degree of a Doctor of Technical Sciences by the speciality 05.13.07 – Automation of Control Processes. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, 2020.

The thesis is devoted to the solution of an important topical scientific and applied problem, namely, the development of the scientific basis for the creation of an energy-efficient system of automation of the processes of energy flow control in spatially distributed biotechnical facilities and greenhouse complexes, operating under uncertainty while monitoring the quality of vegetable products.

Greenhouse complexes are modern complex organizational and technical facilities with a biological component, the main element of which are industrial greenhouses, where technologies for the production of plant products in indoor buildings are implemented. Throughout the calendar year, they supply a significant share of plant products to the food market of Ukraine. The competitiveness of these products is related to the need to find a balance between the cost of resources for production and its quality. The analysis of modern technologies of plant production and automation systems in industrial greenhouses allowed us to conclude that the implementation of tasks for the implementation of energy efficient management of energy flows of greenhouse complexes requires the use of fundamentally new approaches to automation, due to both facilities and more stringent requirements for the effectiveness of their management. Automation of control processes based on the use of results of monitoring a condition of plants and quality of production provides realization of the set technology of production of plant production in the conditions of a hothouse complex with the minimum energy expenditure.

The key element is to reach a compromise between the resource costs and product quality is the greenhouse microclimate control system. The main limitations of crops, growing efficiency in greenhouses, are due to several reasons:

*firstly*, uncertainties due to natural random disturbances (temperature and humidity of the outdoor environment, solar radiation), incomplete information about the condition of plants, environmental parameters around them and the quality of plant products; *secondly*, limited data on the correlation between energy consumption and plant conditions in terms of spatial distribution of phytoclimatic conditions of their development and quality of plant products; *thirdly*, the lack of general principles for the construction of automation systems for energy flow control in spatially distributed biotechnical facilities, greenhouses, for monitoring the quality of these products. Based on this, it can be argued that currently the requirements for energy efficient energy flow control systems of spatially distributed biological facilities, greenhouses, are constantly growing, and the scientific basis for their construction is absent. All the above led to the choice of the topic of the thesis and helped define its purpose and objectives.

The author developed an intelligent method for the formation of energy efficient strategies for managing energy flows in biotechnical facilities, industrial greenhouses, which differs in the use of a new criterion of energy efficiency and neural network analysis, which minimizes energy costs on growing technology under external natural disturbances, incomplete information about plants distribution and climatic conditions. The genetic algorithm allowed to establish the optimal number of basic plant life support factors, for the support of which 70% of energy resources are spent on light supply, moisture supply, heat supply, nutrient supply and gas supply.

Based on the mathematical apparatus of wavelet transform, a new method of non-contact determination of phytometric parameters of plants was offered, which allowed to assess the quality of plant development and use the above in the three main phases of plant development (flowering, fruit formation, harvest) in the general algorithm for the formation of management strategies; the method of variational calculus, a mathematical model of mobile robot movement, allowed to minimize the energy consumption of its battery by choosing the speed of movement at different distances. The adequacy of the model is confirmed by

Fisher's test and the practical use of robot in an industrial greenhouse. The method of spatial orientation of the mobile robot for phytomonitoring in the greenhouse space, which is based on the application of the probabilistic automata theory and stimulating learning, created conditions for its independent movement in the space of the industrial greenhouse, avoiding obstacles.

According to the results of the parametric synthesis and the methodology of the optimal design and use of mobile robots, a rational variant of the structure of the mobile robot of phytomonitoring is provided, which ensures the monitoring of phyto- and air conditions, analyzes phytoclimatic data and forms on this basis solutions for optimizing the route of movement, planning the sequence of actions, recognition of patterns and obstacles, which provides that the tasks are carried out at minimum cost and time. The proposed algorithm of mobile robot operation is implemented on the basis of Processing/Wiring, Node-RED and LabVIEW software environments. The economic feasibility of using a mobile robot in a greenhouse area of at least 0.2 ha has been proved.

The present research has substantiated the architecture and the concept of the construction of a system for automation of the processes of energy efficiency management of energy flows in the production of plant products of a given quality in spatially distributed biotechnical facilities, namely, industrial greenhouses, which operate using a mobile robot for phytomonitoring, and has justified the application of neuronetwork analysis to the formation of management strategies. The architecture and concept of the construction of a system for automation of the processes of energy efficiency management of energy flows in the production of plant products of a given quality in spatially distributed biotechnical facilities – industrial greenhouses, which operates using a mobile robot for phytomonitoring robot, industrial greenhouses, which operates using a mobile robot for phytomonitoring robot,

A spatially distributed mathematical model of an industrial greenhouse has been developed, which is based on solving the Navier-Stokes equations, which makes it possible to estimate the value of temperature as the main technological

parameter in its space and use these results to form a mobile phytomonitoring robot.

The following criteria are proposed: efficient use of energy resources, the essence of which is to minimize the difference between the relative indicators of phytoclimatic life and phytodevelopment of plants, which minimizes energy costs, ensuring a given high quality of plants and products; criteria for assessing the condition of plants and plant products development, namely phytometric and phytotemperature criteria, the use of which by the automation system of energy flow control processes in plant production ensures a given high quality of plants and products taking into account the phases of plant development.

In order to produce products of the required high quality in spatially distributed biotechnical facilities, industrial greenhouses, a new concept of the system of automation of energy flow control processes is offered, which operates on the basis of phytomonitoring results from the mobile robot and neural network analysis.

The structure of the automatic control system of energy efficient flows, the basic algorithm of its functioning, the user-friendly interface compliant with the requirements of ergonomics and the economic justification of its use are given. An energy efficient system for automating energy flow control processes in a spatially distributed biotechnical facility, an industrial greenhouse, has been developed, for the production of plant products, the operation of which is provided by an intelligent method of forming management strategies, based on incomplete information about plant conditions, plant quality, received from the mobile robot, and the use of neural network analysis to form management strategies, which minimize energy costs to ensure the technology of cultivation in conditions of uncertainty. The exergetic analysis of such a system gives grounds to assert its prospects: by the 8th year of operation of the system the value of the efficiency coefficient will reach 0.221 with its further growth.

The author realized and conducted the pilot testing of the developed system of automation of energy flow control processes for the production of

plant products in a spatially distributed biotechnical facility, an industrial greenhouse. The results are as follows: the share of energy resources in the cost structure of production as compared to the current system decreased by 4.2 per cent through energy efficiency improvements; the cost of production decreased by 5.7 per cent compared to the current system.

**Keywords:** energy efficient control system, mobile robot, genetic algorithms, neural networks, phytomonitoring, mathematical modeling, wavelet transform, uncertainty, spatial distribution, greenhouse complexes, product quality and atmospheric monitoring, control strategies.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Монографії:

1. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І. Мобільні роботи фітомоніторингу в теплиці. Київ, ЦП «Компринт», 2017. 255 с. *(Здобувачем досліджено особливості сучасних тепличних комбінатів та запропоновано новий спосіб здійснення фітомоніторингу із використанням робототехнічних комплексів, здатних самостійно переміщуватись площею теплиці).*

### Статті в наукових фахових виданнях України:

2. Шворов С. А., **Болбот І. М.**, Штепа В. М. Обґрунтування раціонального варіанту побудови інтелектуальної роботизованої системи спеціального призначення. Науковий журнал «Енергетика і автоматика». 2012. № 2. <http://dSPACE.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/4994> *(Здобувачем запропоновано підхід та методичний апарат параметричного синтезу, за допомогою яких визначається раціональний варіант побудови інтелектуальної роботизованої системи спеціального призначення).*

3. Шворов С. А., **Болбот І. М.**, Штепа В. М., Заєць Н. А., Дудник А. О. Багатокритеріальний синтез маршрутів пересування мобільних роботів з розпізнаванням перешкод. Науковий журнал «Енергетика і автоматика». 2012. № 1 (11). [http://www.nbu.gov.ua/e-journals/eia/2012\\_1/12ssadod.pdf](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/eia/2012_1/12ssadod.pdf). *(Здобувачем запропоновано розв'язок задачі синтезу компромісно-оптимальних маршрутів руху мобільних роботів з розпізнаванням перешкод в конфліктному середовищі).*

4. **Bolbot I.** Exergoeconomic optimization of power systems. From the journal «Energy and Automation». 2015. №3, P. 45–53. *(Здобувачем розроблено метод ексергоекономічної оптимізації енергетичних та економічних показників ефективності роботи системи керування).*

5. Шворов С. А., Штепа В. М., **Болбот І. М.**, Заєць Н. А., Дудник А. О. Методичні засади розпізнавання образів із використанням багатошарового персептрона. Збірник наукових праць Військового інституту Київського



національного університету імені Тараса Шевченка. 2012. Вип. 35. С. 66–72. *(Здобувачем розроблені методичні засади розпізнавання образів із використанням багаточарового перцептрона для системи розпізнавання образів).*

6. **Болбот І. М.** Математична модель теплозабезпечення рослини в системі рослина-грунт-повітря. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2013. №13 (5). С. 21–27. *(Здобувачем розроблено математичну модель впливу теплозабезпечення на ріст та розвиток рослини в системі рослина-грунт-повітря).*

7. Козирський В. В., **Болбот І. М.**, Мартинюк Л. В. Метод визначення сумарного термічного опору огорожуючої конструкції сонячного колектора. Енергетика і автоматика. 2012. № 2. С. 5–7. *(Здобувачем запропоновано метод визначення сумарного термічного опору огорожуючої конструкції сонячного колектора).*

8. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І. Інтелектуальний мобільний робот для теплиць. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2017. № 187. С. 58–60. *(Здобувачем розроблено алгоритми управління мобільним роботом моніторингу стану атмосфери та фітостану в спорудах закритого ґрунту для формування стратегій керування, що максимізують прибуток виробництва).*

9. **Болбот І. М.** Ергономічний аналіз систем диспетчерського управління і збору даних. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2011. №11 (4). С. 103–108. *(Здобувачем проаналізовано ергономічні аспекти систем диспетчерського управління і збору даних з використанням системного аналізу та ієрархічного підходу для отримання оптимального рішення).*

10. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І., Чернов І. І. Програмно-апаратне забезпечення системи фітомоніторингу в теплиці. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства

імені Петра Василенка. 2017. № 154. С. 42–45. *(Здобувачем розроблено програмно-апаратне забезпечення системи фітомоніторингу в теплиці).*

11. Опришко О. О., **Болбот І. М.**, Андріїшина М. В., Пасічник Н. А. Методичні підходи для керування вибіркоким внесенням добрив. Аграрна наука і освіта. Механізація, електрифікація, автоматизація. 2008. Том 9, № 3-4. С. 100–104. *(Здобувачем розроблено методичні підходи внесення мінеральних добрив системою керування).*

12. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І. Фітотемпературний критерій оцінки розвитку рослини. Науковий журнал «Енергетика і автоматика». 2013. № 3. С. 122–128. *(Здобувачем запропоновано спосіб оцінки температури рослин та температурного середовища за допомогою фітотемпературного критерію оцінки розвитку рослин).*

13. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Чернов І. І. Моделювання температурних полів у теплиці. Індуктивне моделювання складних систем. Збірник наукових праць. 2015. Вип. 7. С. 154–164. *(Здобувачем розроблено математичну модель, яка відображає зміну температурних полів із урахуванням зон подібності атмосфери в промисловій теплиці).*

14. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Чернов І. І. Орієнтація мобільного робота в просторі теплиці за допомогою імовірнісних автоматів та стимулюючого навчання. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2014. № 194 Частина 3. С. 166–172. *(Здобувачем розроблено метод вирішення задачі орієнтування мобільного робота за допомогою імовірнісних автоматів та стимулюючого навчання).*

15. Козирський В. В., **Болбот І. М.**, Батанов Ю. О. Математична модель оцінювання впливу світлозабезпечення на ріст і розвиток рослин у спорудах закритого ґрунту. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2014. № 194 Частина 1. С. 36–43. *(Здобувачем розроблено математичну модель впливу сонячної радіації на ріст та розвиток рослини в системі рослина-ґрунт-повітря).*

16. Козирський В. В., **Болбот І. М.**, Батанов Ю. О. Адаптивна

математична модель «Температура повітря – врожайність томатів». Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2013. № 184 Частина 2. С. 110–114. *(Здобувачем запропоновано адаптивний алгоритм уточнення параметрів математичної моделі).*

17. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Чернов І. І. Економічне обґрунтування впровадження робототехнічних систем у тепличні господарства. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2012. № 174 Частина 2. С. 53–59. *(Здобувачем запропоновано економічне обґрунтування впровадження робототехнічних систем у тепличному господарстві).*

18. Лисенко В. П., Козирський В. В., Болбот І. М., Болбот О. М., Чернов І. І., Батанов Ю. О. Робототехнічна система фітомоніторингу в тепличному господарстві. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2011. № 166 Частина 3. С. 93–98. *(Здобувачем запропоновано розробку робототехнічної системи фітомоніторингу рослин для отримання інформації про фітокліматичні та фітометричні показники розвитку рослини в просторі теплиці).*

19. Козирський В. В., **Болбот І. М.** Архітектура енергоефективної системи управління теплицею із застосуванням нейромережевого аналізу та робототехнічного комплексу. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2015. № 209 Частина 2. С. 75–80. *(Здобувачем запропоновано архітектуру енергоефективної системи управління теплицею із застосуванням нейромережевого аналізу та робототехнічного комплексу).*

20. **Болбот І. М.** Нестационарна нелінійна теплопередача через зовнішні захисні конструкції теплиць. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2011. № 161. С. 175–179. *(Здобувачем сформульовано завдання теплопередачі через огорожу споруд закритого ґрунту).*

21. **Болбот І. М.** Моделювання факторів життєзабезпечення рослини в системі рослина–ґрунт–повітря. Науковий вісник НУБіП України. Серія:

Техніка та енергетика АПК. 2014. № 194 Частина 2. С. 50–57. *(Здобувачем розроблено математичні моделі біотехнічних об'єктів з просторово-розподіленими параметрами).*

22. Лисенко В. П., Болбот І. М., Мірошник В. О., Лендел Т. І. Температура рослин як параметр для регулювання. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2015. № 209 Частина 1. С. 64–72.

23. Болбот І. М. Екзергоекономічна оптимізація енергетичних систем. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2011. № 166 Частина 4. С. 126–133. *(Здобувачем розроблено алгоритм оцінки енергетичних та економічних показників ефективності роботи системи керування).*

24. Лисенко В. П., Болбот І. М. Роботи та робототехнічні системи в агропромисловому комплексі. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2010. № 153. С. 105–111. *(Здобувачем обґрунтовано необхідність розробки та впровадження мобільних роботів та робототехнічних систем фітомоніторингу в промислових теплицях).*

25. Ленков С. В., Шворов С. А., Болбот І. М., Штепа В. М., Чирченко Д. В. Дискретна векторна оптимізація траєкторій руху мобільних роботів. Сучасна спеціальна техніка. Системи та методи обробки інформації. 2012. №1 (28). С. 13–19. *(Здобувачем вирішено задачу оптимізації траєкторій руху мобільних роботів у конфліктному середовищі з розпізнаванням образів).*

#### **Статті в міжнародних та наукових фахових виданнях України,**

##### **включених до міжнародних наукометричних баз даних:**

26. Лисенко В. П., Болбот І. М., Лендел Т. І. Енергоефективна система керування електротехнологічним комплексом промислових теплиць. Технічна електродинаміка. 2019. № 2. С. 78–81. *(Здобувачем запропоновано структуру енергоефективної системи керування в промислових теплицях).*

27. Лисенко В. П., Болбот І. М., Чернов І. І. Система керування електротехнічного роботизованого комплексу фітомоніторингу рослин в

теплиці. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2016. № 252. С. 25–33. *(Здобувачем запропонована багаторівнева ієрархічна структура системи керування мобільним роботом фітомоніторингу в теплиці).*

28. Лысенко В. Ф., **Болбот И. М.**, Лендел Т. И. Вейвлет-анализ в фитометрии растений. Актуальные вопросы современной науки. Новосибирск, Издательство ЦРНС. 2014. С. 163–173. *(Здобувачем розроблено безконтактний спосіб визначення стиглості плоду томата з використанням математичного апарату вейвлет-перетворень).*

29. Лысенко В. Ф., **Болбот И. М.**, Чернов И. И. Математическая модель динамики движения электротехнического роботизированного комплекса фитомониторинга в теплице. MOTROL. Lublin. 2015. Vol. 17 № 4. P. 19–24. *(Здобувачем розроблено математичну модель руху мобільного робота фітомоніторингу в теплиці та обґрунтовано його використання при створенні системи управління).*

30. **Болбот И. М.** Математическая модель влияния теплового режима на развитие и урожайность томатов в системе растение-почва-воздух. MOTROL. Lublin. 2013. Vol. 15 № 4. P. 153–158. *(Здобувачем розроблено математичну модель впливу теплового режиму на розвиток та врожайність томатів).*

31. Shvorov S., Reshetyuk V., **Bolbot I.**, Shtepa V., Chirchenko D. Theoretical issues construction and operation of agricultural mission robotic system. Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Agriculture No 60 (Agricultural and Forest Engineering), Warsaw 2012. P. 97-102. *(Здобувачем запропоновано вирішення проблеми оптимального проектування і використання інтелектуальних мобільних роботів).*

32. **Болбот И. М.** Критерий обеспечения урожайности растений – основа эффективного потребления энергетических ресурсов тепличными комплексами. Труды международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве», М., 2014.

Том-2. С. 157–162. *(Здобувачем запропоновано критерій врожайності рослин, який дає змогу оцінити загальний стан забезпечення рослини факторами, що сприяють розвитку та врожайності).*

33. Chochowski A., **Bolbot I.**, Lysenko V., Reshetiuk V. The optimization of energy efficiency of mobile robots. Annals of Warsaw University of Life Sciences– SGGW Agriculture No 70 (Agricultural and Forest Engineering), Warsaw 2017. P. 79-88. *(Здобувачем запропоновано метод оптимізації енергоспоживання мобільного робота фітомоніторингу при переміщенні у просторі теплиці за критерієм енергоефективного використання ресурсів акумуляторної батареї).*

34. Lysenko V. P., **Bolbot I. M.**, Romasevych Yu. O., Loveykin V. S., Voytiuk V. D., Algorithms of robotic electrotechnical complex management in agricultural production. River Publishers Series in Automation, Control and Robotics. Control systems: Theory and Applications. 2018. P. 271-289. *(Здобувачем запропоновано алгоритми керування мобільними роботами в аграрному виробництві).*

35. Lysenko V. P., Zhylytsov A. V., **Bolbot I. M.**, Lendiel T. I., Nalyvaiko V. A. Phytomonitoring in the phytometrics of the plants. E3S Web of Conferences 154, 07012 (2020) ICoRES 2019 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015407012> *Здобувачем запропоновано алгоритм визначення фітометричних параметрів, стану та фази розвитку рослин під час проведення фітомоніторингу рослин).*

### Патенти України на корисні моделі

36. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І., Чернов І. І. Патент 103274 UA, МПК G05B 13/00. Система управління біотехнічними об'єктами. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201505549; заявлено 05.06.2015; опубліковано 10.12.2015, Бюл. № 23. *(Здобувачем розроблено підсистему прийняття рішень, що містить блок оптимізації нейронної мережі).*

37. Лисенко В. П., Мірошник В. О., Штепа В. М., **Болбот І. М.**, Дудник А. О. Патент 88809 UA, МПК A01G 9/24 (2006.01). Пристрій штучного клімату. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № а201210803; заявлено 14.09.12; опубліковано 10.04.14, Бюл. № 7. *(Здобувачем запропоновано підсистему прийняття рішень, що містить блок фітомоніторингу).*

38. Лисенко В. П., Штепа В. М., Заєць Н. А., **Болбот І. М.**, Дудник А. О., Лендел Т. І. Патент 92971 UA, МПК G05B 13/00. Система управління біотехнічними об'єктами. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201404129; заявлено 17.04.2014; опубліковано 25.12.2014, Бюл. № 24. *(Здобувачем запропоновано підсистему прийняття рішень, що містить блок оптимізації нейронної мережі).*

39. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І., Чернов І. І. Патент 95283 UA, МПК A01B 51/00, A01G 3/00, A01D 45/00, A01G 25/00. Мобільний самохідний електротехнічний комплекс фітомоніторингу в теплиці. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № а201305341; заявлено 25.04.2013; опубліковано 25.12.2014, Бюл. № 24. *(Здобувачем запропоновано архітектуру та структуру управління мобільного робота).*

40. Лисенко В. П., Штепа В. М., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І., Чернов І. І. Патент 95612 UA, МПК G05B 13/0. Система управління біотехнічними об'єктами. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201408491; заявлено 25.07.2014; опубліковано 25.12.2014, Бюл. № 24. *(Здобувачем запропоновано підсистему прийняття рішень, що містить додатково мобільний роботизований блок фітомоніторингу).*

41. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І. Патент 115830 UA, МПК A01G 9/24 (2006.01). Спосіб регулювання мікроклімату в теплиці з урахуванням фітотемпературного критерію оцінки розвитку рослин. Заявник

і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201612202; заявлено 01.12.2016; опубліковано 25.04.2017, Бюл. № 8. *(Здобувачем запропоновано спосіб регулювання мікроклімату в теплиці з урахуванням фітотемпературного критерію оцінки розвитку рослин).*

42. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І., Чернов І. І. Патент 114191 UA, МПК G05B 19/24 (2006.01), B25J 9/18 (2006.01), B25J 9/16 (2006.01). Спосіб керування переміщенням мобільного робота в теплиці. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201611119; заявлено 04.11.2016; опубліковано 27.02.2017, Бюл. № 4. *(Здобувачем запропоновано спосіб керування переміщенням мобільного робота в теплиці).*

43. Лисенко В. П., Штепа В. М., Заєць Н. А., **Болбот І. М.**, Дудник А. О. Патент 76175 UA, МПК G05B 13/00. Система управління процесом утримання біологічних об'єктів. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201207133; заявлено 12.06.2012; опубліковано 25.12.2012, Бюл. № 24. *(Здобувачем розроблено блок оптимізації нейронної мережі).*

44. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І., Патент 124088 UA, МПК B25J 11/00, B25J 1/02 (2006.01). Маніпулятор для вимірювання стану атмосфери в біотехнічних об'єктах. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201708123; заявлено 04.08.2017; опубліковано 26.03.2018, Бюл. № 6. *(Здобувачем запропоновано використання маніпулятора для вимірювання стану атмосфери в біотехнічних об'єктах).*

#### Тези наукових доповідей:

45. Лисенко В. П., **Болбот І. М.** Алгоритм керування інтелектуальним роботизованим електротехнічним комплексом в промисловій теплиці. XXIV Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика 2017», Київ, 13–15 вересня 2017 року: тези доповіді. С. 176. *(Здобувачем*



*запропоновано алгоритм керування інтелектуальним мобільним роботом фітомоніторингу в промисловій теплиці).*

46. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Лендел Т. І. Використання фітотемпературного критерію оцінки розвитку рослин в системі автоматичного регулювання. Міжнародна науково-практична конференція з нагоди 115-річчя заснування НУБіП України, Київ, 5–6 листопада 2013 року: тези доповіді. С. 12–13. *(Здобувачем запропоновано використання фітотемпературного критерію оцінки розвитку рослин в системі автоматичного керування).*

47. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Штепа В. М., Заєць Н. А., Ряба О. І. Нейромережеве розпізнавання образів стану агротехнічних культур. IV Міжнародна науково-технічна конференція «Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи», Тернопіль, 24–26 квітня 2012 року: тези доповіді. С. 109–111. *(Здобувачем проаналізовано перспективність використання для оцінки стиглості агротехнічних культур нейромережових структур, синтезовано відповідний багатoshаровий персептрон).*

48. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Штепа В. М., Лендел Т. І. Підсистема фітомоніторингу в теплиці. II Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК», 15–16 жовтня 2014 року: тези доповіді. С. 73–74. *(Здобувачем запропоновано використання підсистеми фітомоніторингу як складової системи керування виробництвом в промисловій теплиці).*

49. Лисенко В. П., Штепа В. М., Голуб Б. Л., **Болбот І. М.**, Щербатюк В. Л. Система управління біотехнічними об'єктами із нейромережевими блоками. XIX Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика 2012», Київ, 26–28 вересня 2012 року: тези доповіді. С. 223–224. *(Здобувачем запропоновано метод керування виконанням технології виробництва рослинної продукції складного біотехнічного об'єкта).*

50. **Болбот І. М.** Комплексна оцінка рівня якості томатів. III Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК», Київ, 17–18 грудня 2015 року: тези доповіді. С. 49–50. *(Здобувачем розроблено метод комплексної оцінки якості томатів, враховуючи їх ступінь зрілості та кількість, діаметр плоду та стебла рослини).*

51. **Болбот І. М.** Особливості застосування інтелектуальних систем при керуванні електротехнічними комплексами в промисловій теплиці. IV Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК», Київ, 21–22 лютого 2016 року: тези доповіді. С. 51–53. *(Здобувачем проведено класифікацію основних показників розвитку рослини на всіх фазах її життєвого циклу, що впливають на якість врожаю).*

52. **Болбот І. М.** Підсистема комплексної оцінки рівня якості томатів системи керування електротехнічними комплексами в промисловій теплиці. Міжнародна науково-практична конференція з нагоди 120-річчя заснування НУБіП України. Проблеми розвитку систем енергетики і автоматики. Том 5, Київ, 23–25 травня 2018 року: тези доповіді. С. 32–33. *(Здобувачем розроблено підсистему комплексної оцінки якості розвитку рослини та томатів інтегральною залежністю, що дало змогу отримати новий фітометричний критерій).*

53. **Болбот І. М.** Архітектура енергоефективної системи управління теплицею із застосуванням нейромережевого аналізу та робототехнічного комплексу. II Міжнародна науково-практична конференція. Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні. Київ, 26–27 червня 2014 року: тези доповіді. С. 108–110. *(Здобувачем запропоновано архітектуру енергоефективної системи управління промисловою теплицею із застосуванням нейромережевого аналізу та робототехнічного комплексу).*

54. Лисенко В. П., **Болбот І. М.**, Чернов І. І. Структура та архітектура

електротехнічного роботизованого комплексу фітомоніторингу рослин в теплиці. III Міжнародна науково-практична конференція. Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні. Київ, 25–26 червня 2015 року: тези доповіді. С. 117–118. *(Здобувачем запропоновано структуру та архітектуру багаторівневої навігаційної системи мобільного робота фітомоніторингу в теплиці).*

55. Лисенко В. П., Штепа В. М., **Болбот І. М.**, Заєць Н. А., Ряба О. І. Підсистема прийняття рішень як функціональний елемент системи управління біотехнічними об'єктами. Міжнародна наукова конференція «Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту», Херсон, 2012 року: тези доповіді. С. 276–278. *(Здобувачем розроблено підсистему прийняття рішень, що містить блок оптимізації нейронної мережі).*

56. **Болбот І. М.** Енергоефективна нейромережева підсистема керування електротехнічним комплексом в промисловій теплиці. V Міжнародна науково-практична конференція. Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК. Київ, 19–20 грудня 2019 року: тези доповіді. С. 126–127. *(Здобувачем розроблено архітектуру нейронної мережі оцінки виробництва продукції заданої якості та витрати енергоносіїв).*

57. **Болбот І. М.**, Болбот А. І. Концептуальна модель системи управління енергетичними потоками тепличних комбінатів. IX Міжнародна науково-технічна конференція. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта). Київ, 19-22 травня 2020 року: тези доповіді. <http://econference.nubip.edu.ua/index.php/pmeas/pmeas2020/paper/view/2340> *(Здобувачем запропоновано нову концепцію функціонування системи керування виробництвом рослинної продукції в промисловій теплиці).*

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	277
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА РОСЛИННОЇ ПРОДУКЦІЇ ТА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПРОМИСЛОВИХ ТЕПЛИЦЯХ.....	36
1.1. Особливості технології виробництва рослинної продукції в промислових теплицях .....	377
1.2. Аналіз функціонування існуючих систем керування технологічним процесом виробництва рослинної продукції в промислових теплицях ...	511
1.3. Обґрунтування потреби створення системи керування тепличними комплексами з моніторингом якості продукції .....	69
Висновки до Розділу 1 .....	81
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ БІОТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ З ПРОСТОРОВО-РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ .....	83
2.1. Методика експериментальних досліджень.....	83
2.2. Вплив факторів життєзабезпечення на стан рослин та якість врожаю .....	85
2.3. Визначення основних факторів життєзабезпечення рослини та їх оптимізація за допомогою генетичних алгоритмів .....	90
2.4. Математичні моделі впливу факторів життєзабезпечення рослин на якість врожаю .....	101
2.5. Аналіз температурних станів повітря та рослин у теплиці.....	111
2.6. Адаптивний алгоритм уточнення параметрів математичної моделі .....	120
2.7. Використання вейвлет-перетворення для оцінки якості рослинної продукції .....	124
2.8. Чисельне моделювання теплиці з просторово-розподіленими параметрами.....	131
Висновки до Розділу 2 .....	146

РОЗДІЛ 3. КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПОТОКАМИ ТЕПЛИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ .....	149
3.1. Концептуальна модель системи керування енергетичними потоками просторово-розподілених об'єктів .....	149
3.2. Обґрунтування критеріїв оцінки якості розвитку рослин та продукції .....	152
3.2.1. Фітометричний критерій оцінки якості розвитку рослин .....	152
3.2.2. Фітотемпературний критерій оцінки якості розвитку рослин .....	156
3.3. Оцінка просторово-розподілених параметрів фітокліматичним показником життєзабезпечення рослин .....	164
3.4. Використання нейромережових структур енергоефективного керування енергетичними потоками .....	169
3.5. Ергономічні вимоги до систем керування енергетичними потоками тепличних комплексів .....	184
3.6. Архітектура системи керування енергетичними потоками тепличних комплексів .....	189
Висновки до Розділу 3 .....	196
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ МОБІЛЬНОГО РОБОТА МОНІТОРИНГУ ФІТОСТАНУ ТА СТАНУ АТМОСФЕРИ В ПРОСТОРІ ПРОМИСЛОВОЇ ТЕПЛИЦІ .....	199
4.1. Структурно-параметричний синтез раціонального варіанта побудови мобільного робота .....	200
4.2. Обґрунтування ієрархічної структури керування мобільним роботом .....	208
4.2.1. Структура мобільного робота фітомоніторингу .....	208
4.2.2. Система керування електротехнічним роботизованим комплексом фітомоніторингу рослин в теплиці .....	210
4.3. Математична модель руху мобільного робота фітомоніторингу з врахуванням просторово-розподілених параметрів об'єкта .....	223

4.4. Переміщення та орієнтація мобільного робота фітомоніторингу в теплиці .....	236
4.4.1. Багатокритеріальний синтез маршрутів переміщення мобільного робота з розпізнаванням перешкод .....	236
4.4.2. Орієнтація мобільного робота фітомоніторингу в теплиці .....	243
4.5. Оптимізація енергоспоживання під час переміщення мобільного робота .....	252
4.6. Програмно-апаратна реалізація мобільного робота фітомоніторингу .....	263
4.6.1. Алгоритми функціонування мобільного робота фітомоніторингу та їх програмна реалізація .....	263
4.6.2 Апаратне забезпечення та схемна реалізація мобільного робота .	275
Висновки до Розділу 4 .....	288
РОЗДІЛ 5. РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ПРОМИСЛОВЕ ВИПРОБУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПОТОКАМИ ПРОМИСЛОВОЇ ТЕПЛИЦІ .....	291
5.1. Розробка системи автоматичного керування енергетичними потоками промислової теплиці .....	291
5.2. Промислове випробування системи керування виробництвом рослинної продукції .....	309
5.3. Економічні розрахунки ефективності впровадження системи керування .....	318
5.3.1. Техніко-економічні показники впровадження системи керування .....	318
5.3.2. Ексергоекономічна оцінка ефективності впровадження системи керування енергетичними потоками .....	326
Висновки до Розділу 5 .....	333
ВИСНОВКИ.....	336
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	340
ДОДАТКИ.....	369

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Тепличні комплекси – це сучасні складні організаційно-технічні об'єкти з біологічною складовою, основним елементом котрих є промислові теплиці, де реалізуються технології виробництва рослинної продукції в спорудах закритого ґрунту. Впродовж календарного року вони постачають значну частку рослинної продукції на ринок продовольства України. Конкурентоздатність цієї продукції пов'язана з необхідністю пошуку балансу між витратами ресурсів на виробництво та її якістю.

Аналіз літературних джерел дав змогу зробити висновки, що ключовим елементом досягнення компромісу між витратами ресурсів та якістю продукції є система керування мікрокліматом у теплиці, а основні обмеження ефективності вирощування рослинної продукції в тепличних комплексах виникають внаслідок: *по-перше*, невизначеності, що є наслідком впливу природних збурень, які мають випадковий характер (температура і вологість зовнішнього середовища, сонячна радіація), неповноти інформації про стани рослин, параметрів середовища навколо них та якості рослинної продукції; *по-друге*, обмеженої інформації про взаємозв'язки між споживанням енергетичних ресурсів та станами рослин у просторово-розподілених фітокліматичних умовах їх розвитку та якості рослинної продукції; *по-третє*, відсутності загальних технічних принципів побудови систем автоматизації керування енергетичними потоками в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – тепличних комплексах, із моніторингом якості цієї продукції. Зважаючи на зазначене, можна стверджувати, що на даний час вимоги до систем енергоефективного керування енергетичними потоками просторово-розподілених біотехнічних об'єктів – тепличних комплексів, постійно зростають, а наукові основи їх побудови відсутні.

Таким чином, необхідність забезпечення конкурентоздатності вітчизняного виробництва рослинної продукції у спорудах закритого ґрунту зумовлює актуальність вирішення складної науково-прикладної проблеми, а саме розроблення наукових основ створення енергоефективної системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – тепличних комплексах, що функціонують в умовах невизначеності з моніторингом стану рослин та якості рослинної продукції. Усе вищезазначене зумовило вибір теми дисертації, встановлення її мети та завдань.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження проводились у Національному університеті біоресурсів і природокористування України відповідно до наукових тематик: «Математичне моделювання в агротехнологіях» (номер державної реєстрації 0101U000664); «Розробка робототехнічних систем для біотехнічних об'єктів» (номер державної реєстрації 0112U007168, 2012–2016 рр.); «Розробка інтелектуального роботизованого електротехнічного комплексу для моніторингу фітостану та повітря в спорудах закритого ґрунту» (номер державної реєстрації 0116U001589, 2016–2017 рр.); «Розроблення технології діагностики якості функціонування сільськогосподарських споживачів електричної енергії на основі використання ІР-технологій» (номер державної реєстрації 00493706 № 0119U100829, 2019–2020 рр.).

**Мета і завдання дослідження.** *Метою* є розроблення наукових основ створення системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – тепличних комплексах, що функціонують в умовах невизначеності, для підвищення енергоефективності виробництва рослинної продукції, забезпечуючи при цьому її задану якість.

Для досягнення мети вирішувалися такі основні *завдання*:

- проаналізувати сучасні системи автоматизації, що супроводжують технологію виробництва рослинної продукції в тепличних комплексах;



- дослідити особливості біотехнічного об'єкта – промислової теплиці, для вдосконалення математичної моделі впливу основних факторів життєзабезпечення рослин на їх стани;

- дослідити режими функціонування систем автоматизації процесів керування енергетичними потоками в промисловій теплиці та розробити нові критерії, враховуючи при цьому просторове розподілення фітокліматичних умов виробництва та якість рослинної продукції;

- обґрунтувати концепцію побудови системи автоматизації процесів енергоефективного керування енергетичними потоками під час виробництва рослинної продукції заданої якості в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – промислових теплицях;

- розробити мобільний робот для моніторингу та оцінки станів рослин, якості рослинної продукції та параметрів атмосфери в просторі промислової теплиці;

- розробити моделі та методи побудови енергоефективних систем автоматизації процесів керування енергетичними потоками під час виробництва рослинної продукції в просторово-розподіленому об'єкті – промисловій теплиці, що забезпечує задану якість рослинної продукції;

- реалізувати і провести дослідно-промислові випробування енергоефективної системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками під час виробництва рослинної продукції в просторово-розподіленому об'єкті – промисловій теплиці, що забезпечує задану якість рослинної продукції.

*Об'єктом дослідження є процеси керування енергетичними потоками в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – промислових комплексах, що функціонують в умовах невизначеності.*

*Предметом дослідження є закономірності, моделі та методи побудови систем автоматизації з метою енергоефективного керування енергетичними потоками в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – промислових*

теплицях, що функціонують в умовах невизначеності, для забезпечення виробництва рослинної продукції заданої якості.

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставленої проблеми використано методи системного аналізу (для аналізу технологічного процесу вирощування томатів у теплиці), імітаційного і математичного моделювання (у тому числі станів біологічної складової та руху мобільного робота фітомоніторингу з врахуванням просторово-розподілених параметрів об'єкта), нейронні мережі (для розробки стратегії керування енергетичними потоками тепличних комплексів), положення теорії автоматичного керування, експериментальний метод дослідження. Експериментальна перевірка теоретичних положень проводилася у виробничих умовах і показала високу збіжність результатів.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Вперше розроблено інтелектуальний метод формування енергоефективних стратегій керування енергетичними потоками в біотехнічних об'єктах – промислових теплицях, котрий відрізняється використанням нового критерію енергоефективності та нейромережевого аналізу, що мінімізує енергетичні витрати на забезпечення технології вирощування в умовах дії зовнішніх природних збурень, неповної інформації про стани рослин та просторової розподіленості кліматичних умов.

Вперше запропоновано новий критерій ефективного використання енергетичних ресурсів, суть якого полягає у мінімізації різниці між відносними показниками фітокліматичного життєзабезпечення та фіторозвитку рослин, що зменшить енергетичні витрати, забезпечуючи задану якість рослин та продукції.

Вперше запропоновано поєднання нових критеріїв оцінки станів розвитку рослин та рослинної продукції, а саме фітометричного та фітотемпературного критеріїв, використання яких в системі автоматизації процесів керування енергетичними потоками під час виробництва

рослинної продукції забезпечує задану якість рослин та продукції з урахуванням фаз розвитку рослин.

Вперше на основі використання рівняння Нав'є-Стокса розроблено просторово-розподілену математичну модель промислової теплиці, що дає можливість оцінювати значення температури як основного технологічного параметра в просторі теплиці та використовувати ці результати для формування оптимального маршруту переміщення мобільного робота фітомоніторингу.

Вперше розроблено на основі математичного апарату вейвлет-перетворень метод безконтактного визначення фітометричних параметрів рослин, що дало змогу оперативно оцінювати якість розвитку рослини.

Вперше розроблено на основі методу варіаційного числення математичну модель переміщення мобільного робота, використання якої дало можливість мінімізувати енерговитрати його акумуляторної батареї.

Вперше розроблено на основі теорії ймовірнісних автоматів та стимулюючого навчання метод просторового орієнтування мобільного робота, що створює умови для його оптимального переміщення та оминання перешкод.

Вперше розроблено за результатами параметричного синтезу та методології оптимального проєктування і використання мобільних роботів раціональний варіант структури мобільного робота, який здійснює моніторинг фітостану та стану атмосфери, аналізує фітокліматичні дані й формує на цій основі рішення щодо оптимізації маршруту переміщення, планування послідовності дій, розпізнавання образів та перешкод, що забезпечує виконання поставлених завдань за мінімальних вартісних і часових витрат.

Вперше запропоновано для виробництва продукції заданої якості в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – промислових теплицях, нову концепцію побудови системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками, що функціонує на основі використання

результатів фітомоніторингу, які надходять від мобільного робота, та нейромережевого аналізу.

Вперше встановлено на основі використання генетичного алгоритму оптимальну кількість основних факторів життєзабезпечення рослин, на підтримку яких витрачається 70% енергетичних ресурсів.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблено і впроваджено систему керування енергетичними потоками просторово-розподілених об'єктів тепличних комплексів для виробництва продукції заданої якості в ПрАТ «Комбінат «Тепличний» та Асоціації «Теплиці України», що засвідчується відповідними документами (акти впровадження наукової розробки від 11.10.2017 р. та 01.11.2017 р.). Оригінальність системи захищена патентами України (92971UA, МПК (2014.01) G05B13/00; 95283 UA, МПК (2014.01) A01G 25/00, A01D 45/00, A01G 3/00, A01B 51/00; 95612 UA, МПК (14/01) G05B 13/00; 88809UA, МПК (2006.01) A01G9/24; 103274UA, МПК (2015.01) G05B13/00; 114791UA, МПК (2006.01) B25J9/16, B25J9/18, G05B19/416; 76175UA, МПК (2012.01) G05B13/00); 76175 UA, МПК G05B 13/00; 124088 UA, МПК B25J 11/00, B25J 1/02 (2006.01). Її переваги над існуючими системами, що функціонують за принципом стабілізації технологічних параметрів вирощування, полягають у підвищенні виробництва якісної продукції в межах максимального свого значення за умов мінімізації енергетичних витрат як складової собівартості продукції.

Підготовлено рекомендації щодо розробки та використання мобільного робота в спорудах закритого ґрунту, які розглянуті та затверджені на технічній раді Міністерства аграрної політики та продовольства України.

Результати дисертаційного дослідження використовуються під час підготовки фахівців зі спеціальності 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» Національного університету біоресурсів і природокористування України.

**Особистий внесок здобувача.** До дисертації увійшли наукові результати, отримані здобувачем особисто. Здобувачу належить постановка

завдань і вибір методик дослідження, аналіз та узагальнення теоретичних і експериментальних результатів досліджень. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, в дисертації використано лише ті ідеї та положення, які є результатом особистої роботи здобувача. У докторській дисертації матеріали і висновки кандидатської дисертації відсутні.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і матеріали дисертаційних досліджень доповідалися та обговорювалися на таких науково-технічних конференціях: Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергозбереження в агропромисловій та природоохоронній сферах» (м. Київ, 14–15 жовтня 2010 р.); Міжнародній конференції з автоматичного керування «Автоматика 2012» (м. Київ, 26–28 вересня 2012 р.); Міжнародній науковій конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту» (м. Євпаторія, 27–30 травня 2012 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інформаційні технології: економіка, техніка, освіта» (м. Київ, 15–16 листопада 2012 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми розвитку систем енергетики і автоматики в АПК» (м. Київ, 25–26 жовтня 2012 р.); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи» (м. Тернопіль, 24–26 квітня 2012 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (м. Київ, 5–6 листопада 2013 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергетики і прикладної біофізики в АПК» (м. Мелітополь, 13–15 червня 2013 року); II Міжнародній науково-практичній конференції «Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні», (м. Київ, 26–27 червня 2014 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (м. Київ, 15–16 жовтня 2014 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Відновлювальна енергетика,

новітні автоматизовані електротехнології в біотехнічних системах АПК» (м. Київ, 16–17 жовтня 2014 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (м. Харків, 6–7 листопада 2014 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції «Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні» (м. Київ, 25–26 червня 2015 р.); VI Міжнародній науково-практичній конференції «Енергозабезпечення технологічних процесів в агропромисловому комплексі України» пам'яті І. І. Мартиненка (м. Мелітополь, 10–14 червня 2015 року); III Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (м. Київ, 17–18 грудня 2015 р.); Міжнародній конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (м. Київ, 11–15 вересня 2016 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (м. Київ, 21–22 листопада 2016 р.); VIII Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Інформаційні технології: економіка, техніка, освіта» (м. Київ, 14–15 листопада 2017 року); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (м. Харків, 2–3 листопада 2017 р.); Міжнародній конференції з автоматичного керування «Автоматика 2017» (м. Київ, 13–15 вересня 2017 р.); XV Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 4–8 червня 2018 р.); V Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (м. Київ, 18–20 грудня 2019 р.).

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 57 друкованих праць, у яких викладено основний зміст виконаних досліджень, із них 1 монографія, 24 статті у наукових фахових виданнях України, 10 статей у міжнародних та наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, 9 патентів України та 13 тез наукових

доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 295 найменувань і 19 додатків. Повний обсяг дисертації – 403 сторінки, у тому числі 320 сторінок основного тексту, 141 рисунок, 15 таблиць.

## **РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА РОСЛИННОЇ ПРОДУКЦІЇ ТА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПРОМИСЛОВИХ ТЕПЛИЦЯХ**

В останні роки вирощування продукції овочевих культур в захищеному ґрунті зазнало значних змін. За даними статистики, найбільші площі закритого ґрунту в світі мають Іспанія (52 тис. га), Туреччина (42 тис. га), Польща (36,3 тис. га), Італія (20 тис. га). В Україні функціонують понад 60 тепличних комплексів, із них найефективніші ПрАТ «Комбінат «Тепличний» (40 га закритого ґрунту), ЗАТ «Зміївська овочева фабрика» (23 га закритого ґрунту), загальна площа споруд закритого ґрунту становить понад 300 га. Рік у рік їхні площі збільшуються, що свідчить про доцільність вирощування в закритому ґрунті овочевих культур, особливо в північних районах та поблизу великих міст і промислових центрів [82, 105].

Проблема впливу сезонного чинника на забезпечення потреб населення у свіжих овочах вирішується за рахунок виробництва продукції в теплицях і парниках різних конструкцій із застосуванням відповідних технологій. Найбільш сучасні технології виробництва овочів закритого ґрунту дають змогу отримати з 1 м<sup>2</sup> теплиць 50–70 кг томатів, огірків або іншої овочевої продукції.

Головне завдання спеціалізованих тепличних господарств полягає в пошуку резервів скорочення витрат енергетичних та інших ресурсів [227, 252], які є основними у структурі собівартості продукції. Оскільки найбільш суттєві витрати природного газу та інших енергоносіїв спостерігаються в зимові місяці, існує нагальна потреба у моделюванні витрат ресурсів за періодами технологічного циклу. Для енергозбереження в умовах тепличних комплексів слід застосовувати найсучасніші технології, якими передбачено використання новітніх конструкційних матеріалів, насіння гібридних рослин, системи контролю виробничих параметрів та інших засобів зменшення витрат виробничих ресурсів на одиницю отриманої продукції.



Лише впровадження у цій галузі сучасних технологій дає можливість підприємствам витримати досить потужну конкуренцію з дешевою імпортною продукцією. Питомі витрати енергоносіїв на одиницю продукції можна зменшити двома способами: зростанням урожайності культур, коли провідна роль належить розробленню і впровадженню новітніх технологій і сучасної селекційної роботи; розробленням ефективної системи керування в теплиці з контролем за споживанням енергоносіїв та якістю продукції під час експлуатації теплиць.

### **1.1. Особливості технології виробництва рослинної продукції в промислових теплицях**

У промислових теплицях системи керування створюють відповідні технологічні умови для росту і розвитку рослин. При цьому в процесі регулювання впливу різноманітних факторів варто враховувати, що кожен із них діє не ізольовано, а в комплексі з іншими, відповідно до вимогливості кожної культури. Заміна одного фактора іншим неприпустима. Не можна замінити нестачу світла збільшенням тепла чи поліпшенням кореневого живлення рослин тощо. Тому для одержання високих врожаїв рослинних культур слід забезпечити відповідне співвідношення факторів, що впливають на їхню життєдіяльність [67, 93].

З усього розмаїття факторів, що впливають на долю врожаю, найбільш істотними є масо- і теплообмінні процеси. Аналіз літературних джерел [106, 135] свідчить про те, що перелік усіх чинників, які впливають на рослину, можна звести до світла, тепла, води, поживних речовин і вуглекислоти. Всі ці чинники рослина вбирає з навколишнього середовища, переробляє, частково засвоює, і потім формується урожай. Цілком природно, щоб весь цей потік енергії і маси, що надходить до рослини, засвоювався в оптимальних кількостях. Для рослини однаково погані і дуже малі, і дуже великі порції

води, поживних елементів, тепла тощо. Враховуємо, що кожен з цих чинників є досить складним і багатокомпонентним, а одночасне їх поєднання створює дуже складну систему, яка зумовлює формування врожаю в цілому [147, 163]. Щоб розібратися в цій системі, слід визначити, якими важливими і характерними параметрами для рослини і навколишнього середовища можна оцінювати кожен із цих чинників, скільки повинно бути таких параметрів і скільки з них необхідно обов'язково взяти до уваги.

Кожен із факторів урожайності – тепло, світло, поживні речовини, вода, вуглекислота, – впливаючи на рослину, що перебуває в динамічній взаємодії з ґрунтом і повітрям, являє собою досить складну комплексну систему, яка чисельно характеризується певною кількістю параметрів. Тому для того, щоб розібратися у всій складній взаємопов'язаній обстановці, а особливо для того, щоб кількісно оцінити її основні особливості, доводиться обмежитися вибором одного показника для кожного фактора врожайності. Цей показник характеризує стан і властивості лише одного, а не всіх зв'язків системи рослина–ґрунт–повітря.

Теплиця – найбільш досконалий стаціонарний вид культиваційних споруд закритого ґрунту [204]. До теплиці та систем керування, що в ній встановлюються, залежно від призначення і тривалості вирощування рослин існують різні вимоги щодо повітрообміну, опалення, освітлення, поливу тощо. На сьогодні використовуються блочні теплиці під склом. Їхня перевага перед іншими полягає у тому, що питомі витрати на опалення в них нижчі (на 1 м<sup>2</sup> площі припадає менше огорожуючої поверхні, що й обумовлює менші тепловтрати) [114]. Габаритні розміри теплиці блочного типу представлено на (рис. 1.1).

Культури, які вирощуються у теплиці, за своєю суттю є живими організмами. На рослину в теплиці діє складний комплекс факторів, які можна умовно поділити на чотири групи [58]:

- біотичні (залежать лише від рослини);
- абіотичні (не залежать від рослини);

- географічні;
- антропогенні (зумовлені діяльністю людини).

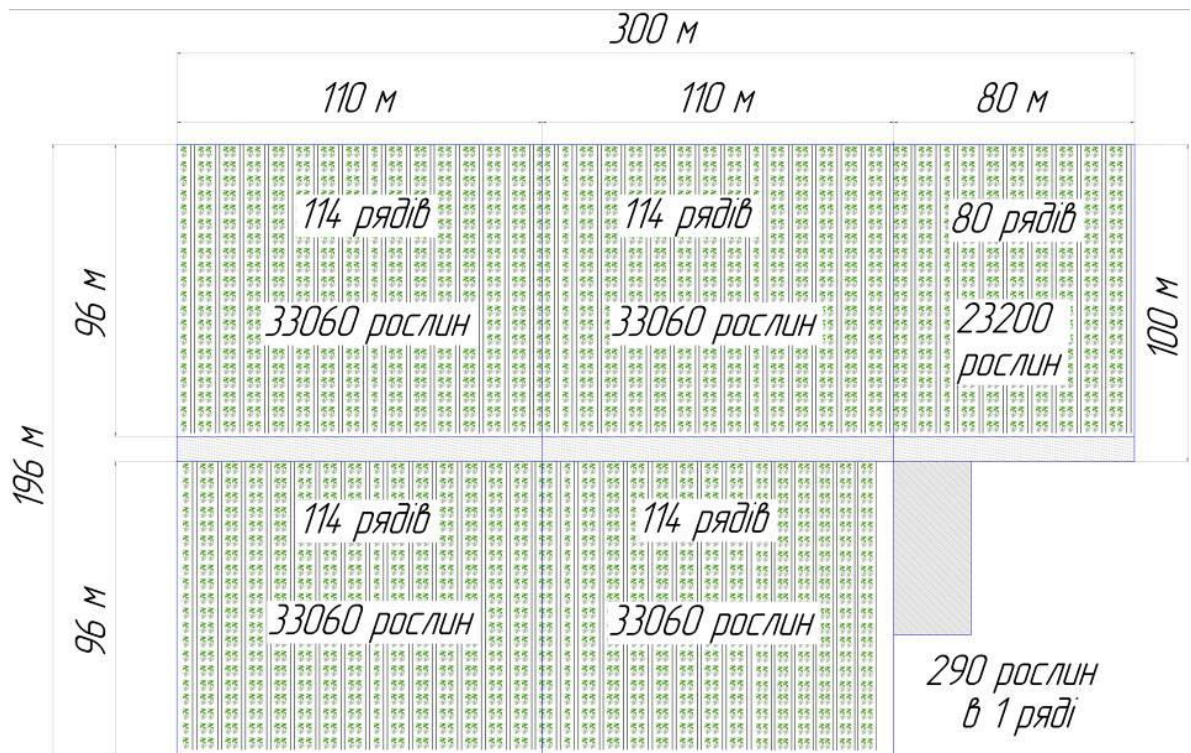


Рис. 1.1. Габаритні розміри теплиці блочного типу

Під впливом сонячних променів у клітинах рослин утворюється хлорофіл. У процесі фотосинтезу (асиміляції) хлорофіл поглинає вуглець, який під дією світла вступає в біохімічну реакцію, за результатом чого утворюються такі органічні сполуки, як крохмаль, цукор, білки, жири, органічні кислоти тощо [258]. При цьому рослини виділяють кисень.

Рослинам також властивий інший процес – дихання (дисиміляція), який полягає в постійному поглинанні рослинами кисню і виділенні вуглецю. Протягом доби співвідношення між фотосинтезом і диханням змінюється. Вдень засвоєння вуглецю іде приблизно в 10 разів швидше, ніж розпад органічних речовин під час дихання. На фотосинтез витрачається приблизно 2...5% сонячної енергії, що надходить [259]. В основному ця енергія використовується на випаровування вологи і теплообмін між повітрям та

грунтом. Температура, що діє на рослину в теплиці, належить до абіотичних факторів. При цьому розрізняють температуру ґрунту і повітря.

У значній мірі забезпечення технології вирощування овочевої продукції у спорудах закритого ґрунту зводиться до вирішення завдання якісного підтримання параметрів мікроклімату. Правильно вибрана технологія підтримання мікроклімату – одна з найважливіших складових, що дає змогу забезпечити відповідну врожайність та ефективність самого виробництва [225].

Мікроклімат – сукупність фізичних параметрів повітряного і прикореневого середовища в окремих культиваційних спорудах. Він створюється діяльністю усіх систем технологічного устаткування – опалювальною, вентиляційною, зрошувальною, системою живлення, підживлення вуглекислим газом, штучним освітленням; на нього справляють вплив також кліматичні фактори і фітоценоз. (Фітоценоз – рослинне співтовариство, що характеризується визначеним складом і взаєминами між рослинами та навколишнім середовищем).

До вирощування овочевої продукції у спорудах закритого ґрунту ставляться такі вимоги:

- поділ процесу на стадії (фази);
- системність (цілісність) процесу, тобто набір елементів, що забезпечують необхідну завершеність дій в досягненні поставленої мети;
- регулярність процесу і однозначність його фаз, що дають змогу застосовувати середні величини при охарактеризуванні цих фаз, а отже їх стандартизацію та уніфікацію;
- технологічні процеси і виробництво в цілому здійснюються у штучних системах.

З метою формування врожаю тепличних культур необхідно створити умови для оптимальної фотосинтезуючої діяльності рослин. Найважливішим завданням регулювання умов мікроклімату є забезпечення високого рівня чистої продуктивності фотосинтезу. Чиста продуктивність фотосинтезу – це

різниця між поглиненою і виділеною кількістю  $\text{CO}_2$  за одиницю часу з площі асиміляційної поверхні рослини. Чиста продуктивність фотосинтезу залежить від погодженості процесів фотосинтезу і дихання [50].

Інтенсивність фотосинтезу визначається як кількість отриманої за одиницю часу фотосинтетичної речовини – цукру і вимірюється кількістю грамів сухої речовини, отриманої на  $1 \text{ м}^2$  площі за добу. Фотосинтетичні процеси можна регулювати цілеспрямованим впливом на фактори, що безпосередньо беруть участь у процесах росту (інтенсивність світла, концентрація вуглекислого газу, водопостачання), і на параметри, що створюють умови для росту (температура повітря і ґрунту, інтенсивність повітрообміну в теплиці) [56].

Температура, як і світло, впливає на біохімічні процеси в клітинах (рис. 1.2). Вплив температури на процеси фотосинтезу і дихання різні. Але при температурах нижче  $10^\circ\text{C}$  припиняються обидва процеси [288].

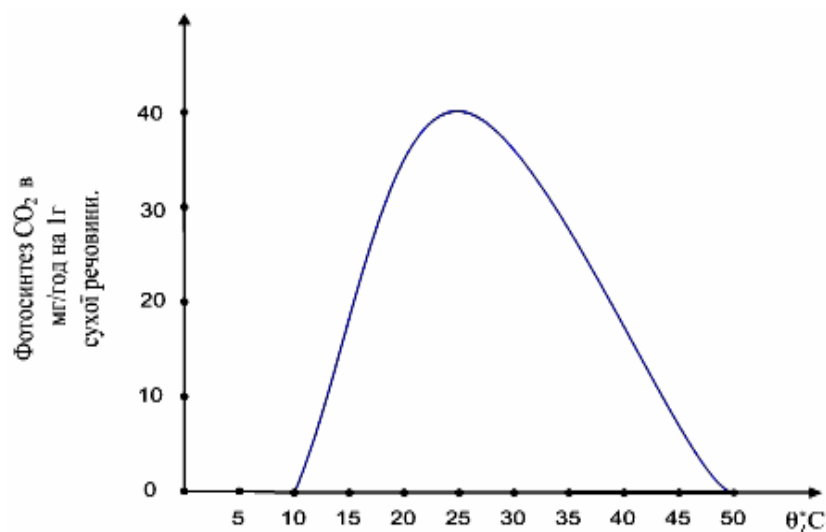


Рис.1.2. Залежність фотосинтезу рослин від їхньої температури при оптимальному постачанні  $\text{CO}_2$  (1,22%)

Кількість вуглекислого газу, що поглинається під час фотосинтезу, набагато більша, ніж виділення його під час дихання. Однак уночі фотосинтез припиняється через відсутність світла, тоді як процес дихання

триває. У результаті до ранку в закритому об'ємі теплиці спостерігається підвищення концентрації CO<sub>2</sub> до 0,05%. Удень, за рахунок фотосинтезу, концентрація вуглекислоти знижується до 0,01%, що викликає необхідність примусової подачі в теплицю вуглекислого газу в кількостях, що залежать від рівня освітленості і, відповідно, від інтенсивності фотосинтезу. При освітленості меншій 2 кЛк підживлення не проводять. При освітленості до 10 кЛк концентрацію підвищують до 0,1%. З підвищенням концентрації CO<sub>2</sub> підвищують відповідно і температуру – приблизно на 2°C порівняно з прийнятим без CO<sub>2</sub> режимом [80].

У процесі вирощування для оптимізації росту і розвитку рослин має дотримуватися визначене співвідношення між інтенсивністю світла, концентрацією CO<sub>2</sub>, температурою та вологістю ґрунту й повітря. При зниженні температури ґрунту нижче норми сповільнюється поглинання рослинами поживних речовин і води. При зміні сонячної погоди на похмуру виникає дефіцит вуглеводів і затримка росту рослин, оскільки в прогрітому ґрунті тривають активні процеси дихання коренів, а фотосинтез сповільнюється пропорційно зниженню освітленості. На процеси газового і теплового обміну навколишнього середовища з рослинами істотно впливає також швидкість руху повітря в теплиці [105].

Під час вирощування рослин у закритому ґрунті неможливо створювати і підтримувати оптимальні умови для їхнього розвитку протягом усього періоду вегетації, оскільки поки що не всі параметри мікроклімату піддаються керуванню за допомогою існуючих технологічних систем. Тому необхідно встановити, яким чином пов'язані між собою різні параметри мікроклімату і як вони в комплексі впливають на продуктивність культури, щоб залежно від зміни параметрів, які не піддаються впливу (наприклад, інтенсивність сонячної радіації), керувати тими, яких можна змінювати. З огляду на високу енергоємність тепличного рослинництва нераціонально витрачати енергію, наприклад, на обігрів, коли через обмеженість інших факторів неможливо домогтися підвищення темпів росту і розвитку рослин.

Виникає завдання з оптимізації: який кліматичний режим необхідно підтримувати, щоб одержати максимально можливий врожай за мінімальних затрат [116].

У похмуру погоду при низькому рівні інтенсивності світла швидкість споживання рослиною вуглекислого газу зменшується, і штучне підживлення вуглекислим газом не дасть виграшу в темпах фотосинтезу, тож оптимальною буде концентрація  $\text{CO}_2$  не вище 400 ррт. Навпаки, у сонячний день оптимальною буде концентрація  $\text{CO}_2$  на рівні 800 ррт. Залежність концентрації  $\text{CO}_2$  від інтенсивності світла, що визначає оптимальну відповідність даних факторів і сприяє максимально можливій продуктивності фотосинтезу, показано на (рис. 1.3).

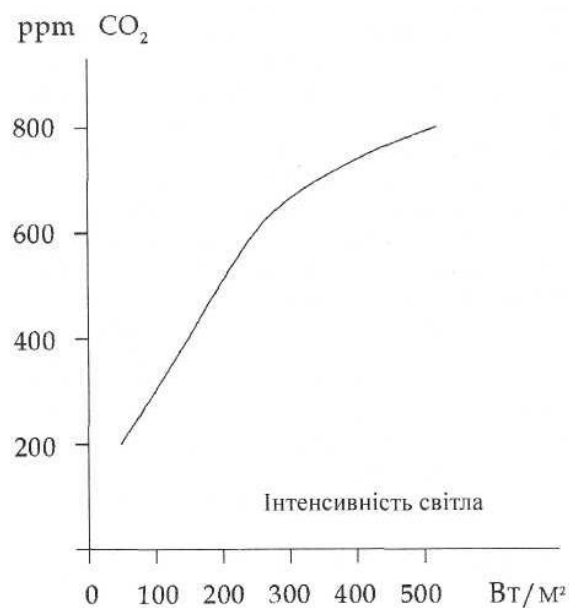


Рис. 1.3. Залежність оптимальної концентрації  $\text{CO}_2$  від інтенсивності світла

У теплицях, де використовується штучне освітлення, також варто аналізувати ситуацію з огляду на концентрацію вуглекислого газу, при нестачі якого ефективність додаткового освітлення знижується. В умовах високої природної освітленості й низької концентрації  $\text{CO}_2$  надлишок світла може призвести до перегрівання рослин та інтенсивного росту слабких

пагонів. Спостерігається чітка залежність інтенсивності фотосинтезу від температури й інтенсивності освітлення.

У сонячну погоду в теплиці доцільно підтримувати вищу температуру додатковим обігрівом чи зменшенням вентиляції. У похмурі дні температура має бути зниженою. У нічний час температуру підтримують на досить високому рівні – для підвищення інтенсивності життєвих процесів у рослинах.

Розглянемо вплив температурного режиму на врожайність томата – поширеної культури, що вирощується в закритому ґрунті. Однією з основних умов отримання раннього і гарного врожаю томата є підтримка оптимального для рослини температурного режиму. У різні періоди росту та розвитку рослина вимагає певної температури повітря і ґрунту [216].

Після появи перших бутонів на рослині температуру вдень піднімають до 17..18°C, а вночі знижують до 16°C. Температура повітря і ґрунту для томата значною мірою визначається освітленістю і вмістом у повітрі вуглекислого газу. У сонячну погоду влітку 22..25°C, в похмурий день 20..22°C, вночі 16..18°C. Нічну температуру завжди підтримують нижче денної. Особливо це важливо в період росту плодів. Різниця повинна становити не менше 5°C. Це необхідно для того, щоб асимільовані рослиною за день речовини інтенсивно не витрачалися вночі на дихання [97, 217].

Під час теплообміну промені сонця, проходячи через скло в середину теплиці, досягають ґрунту і нагрівають його поверхню. Частина тепла поглинається і відбивається рослинами. При цьому в теплицях спостерігаються значні втрати, які виникають через дію зовнішнього середовища [154]. Загальновідомо, що променева енергія Сонця вловлюється листом не цілком. Частина енергії проходить повз листок, природно гублячись для фотосинтезу. 15% енергії, що падає на листок, відбивається в навколишнє середовище, 10% проходить крізь листок, оскільки листок дуже тонкий, і поглинається листом 75%, з яких близько 5% променевої енергії



використовується для фотосинтезу, 20% і більше перетворюється в тепло, інші 50% використовуються на транспірацію (рис. 1.4.) [284].

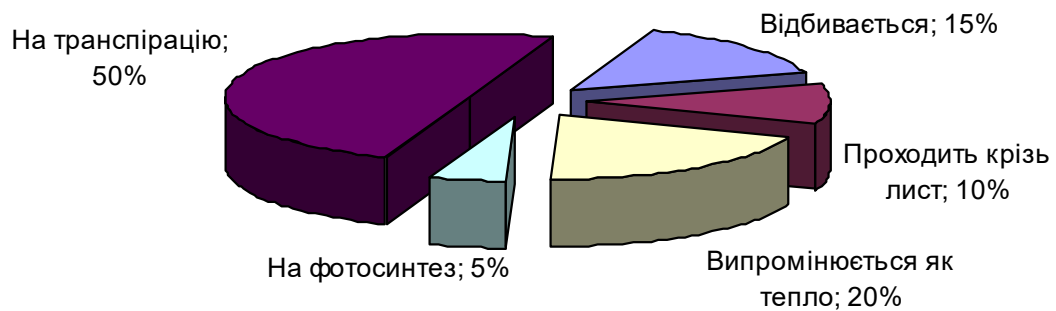


Рис. 1.4. Використання та розподіл світла листком

При достатній кількості сонячного випромінювання фотосинтез у рослинах відбувається набагато інтенсивніше, ніж дихання, тому в них накопичуються органічні речовини. В міру зменшення інтенсивності випромінювання процес фотосинтезу слабшає, і нарешті настає такий момент, коли інтенсивність фотосинтезу й дихання однакові. При подальшому зменшенні інтенсивності випромінювання починає переважати процес дихання над процесом фотосинтезу, і рослини замість накопичення органічних речовин витрачають їх, внаслідок чого припиняється ріст рослин і опадає листя, а потім вони гинуть [204].

Водний режим рослини визначається інтенсивністю поглинання і транспірації води та факторами середовища, що діють на дані процеси. Поглинання рослиною води з ґрунту залежить не тільки від вологості останнього, а й від вологості і структури, концентрації ґрунтового розчину, газового складу, особливо вмісту кисню, та від температури ґрунту. Необхідно забезпечити не тільки наявність у ньому води, а й надходження її до рослини, оптимальне водопоглинання корінням. Умови росту і життєдіяльності коренів мають важливе значення у процесі подачі води в рослину [7, 48].

У ґрунті чи малооб'ємному субстраті необхідно постійно підтримувати оптимальні умови для росту коренів, тобто стежити за доступністю повітря й води. Не можна допускати підвищення концентрації ґрунтового розчину вище припустимої межі [123]. При краплинному зрошенні вода подається безпосередньо в зону кореневої системи рослини без змочування всього обсягу ґрунту, як це відбувається при дощуванні, коли протягом кількох хвилин витрачається вся норма поливу і коливання між вологістю до і після зволоження ґрунту сягають 30-40% НВ.

Опалення та вентиляція проєктуються з урахуванням отриманої теплоти, акумульованої теплоти самою теплицею за весь день і в теплий період року від сонячної радіації. Температура теплоносія підтримується в межах 90°C. Труби опалення розміщуються рівномірно на всій площі теплиці відповідно до технологічного розрахунку [283]. Для водяного опалення (рис. 1.5) застосовуються різні опалювальні прилади, безпосередньо котли опалення (потужністю 500 кВт та ін.), насоси (потужністю 11 кВт та ін.) і залежно від температури теплоносія труби опалення: скляні, пластмасові, сталеві гладкі та сталеві ребристі з відповідним антикоризійним захистом [72]. В якості теплоносія використовується пом'якшена вода з розрахунковими значеннями температур. Нагрівання теплоносія відбувається на котельні в газових котлах і когенераційних установках. Для забезпечення необхідних значень температури теплоносія в контурах обігріву передбачаються вузли регулювання температур. Кожен вузол підключений до магістральних трубопроводів і обслуговує контур опалення в кожному відділенні теплиці, а також працює в автономному режимі керування. Труби системи верхнього обігріву приєднуються до розподільних трубопроводів за допомогою сталевих труб діаметром 15 мм без запірної арматури.



Рис. 1.5. Обігрівальні труби опалювальної системи в середовищі теплиці

Загальний вид системи обігріву теплиці представлений на (рис. 1.6). Вона складається із 132 регістрів, кожний з яких являє собою петлю з труби діаметром 50 мм, довжиною 150 м.

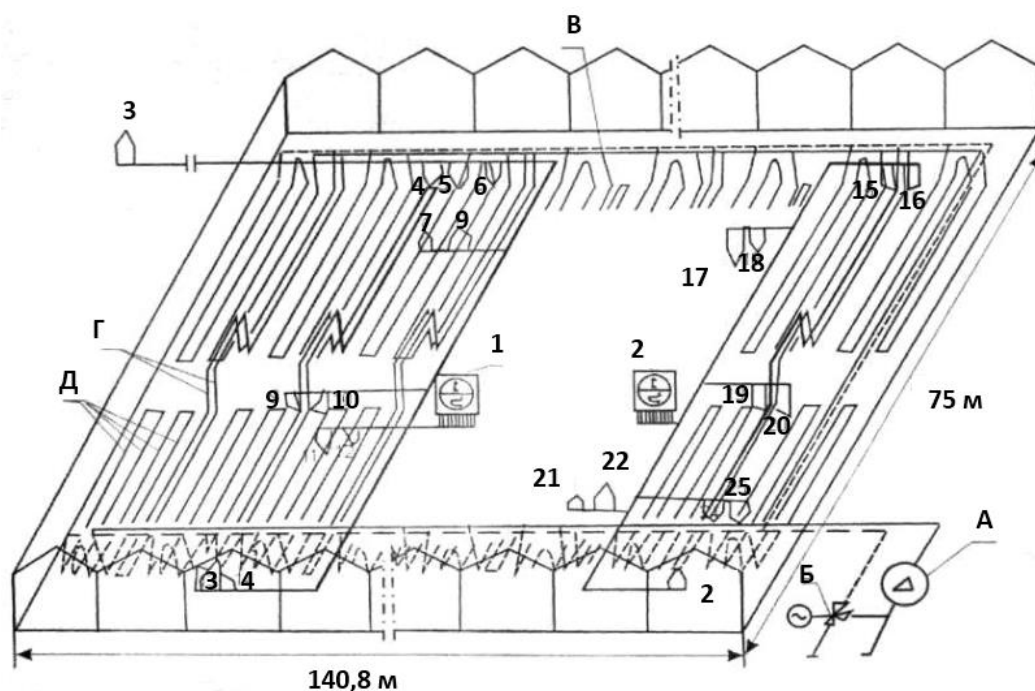


Рис. 1.6. Схема системи обігріву блочної теплиці з вказанням розташування вимірювальних приладів при її дослідженні: А – мережевий насос; Б-В – магістральні трубо-змішувальний вентиль, труби прямої і зворотної води; Г – реєстри повітряного обігріву; Д – реєстри обігріву; 1, 2 – багатоточкові електронні потенціометри ЗПП-09; 3-25 – терморезистори.

У теперішній час ведеться активна модернізація технології вирощування в теплицях, пов'язана з поділом контурів опалення, модернізацією вентиляції, встановленням зашторювання і додаткових вентиляторів. Зазначене забезпечує енергоефективне споживання ресурсів та отримання відповідної кількості продукції.

Значними енергетичними витратами в теплиці є витрати на опалення. В існуючих системах керування потужності на опалення розраховують за виразом[54, 100, 110, 121]:

$$Q = 1,1 K_{\text{огор.}} \cdot F \cdot K \cdot K_{\text{інф}} (t_{\text{вс}} - t_{\text{зов.}}), \text{ Вт}, \quad (1.1)$$

де  $K_{\text{огор.}}$  – коефіцієнт огороження  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $F$  – інвентарна площа,  $\text{м}^2$ ;  $K$  – коефіцієнт тепловіддачі заскленої поверхні,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $K_{\text{інф}}$  – коефіцієнт інфільтрації,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $t_{\text{вс}}$  – температура всередині теплиці,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{зов.}}$  – середня температура зовнішньої температури,  $^\circ\text{C}$ .

Потужність котельної установки на обігрів теплиці розраховують як [118, 122, 283]:

$$Q_{\text{кот.}} = 1,13 \sum_1^n Q, \quad (1.2)$$

де  $Q_{\text{кот.}}$  – розрахункова потужність котельної установки чи іншого джерела тепла,  $\text{Вт}$ ; 1,13 – коефіцієнт, що враховує витрати тепла в теплових мережах і власні потреби котельні;  $\sum_1^n Q$  – сумарна потужність тепла на опалення всіх споруд і технологічні потреби,  $\text{Вт}$ .

Погодинні витрати палива ( $\text{м}^3/\text{год}$ ) розраховують за співвідношенням [55, 101, 228]:

$$B = \frac{Q_{\text{кот.}}}{Q_n^p}; \quad (1.3)$$

при цьому для річних витрат палива [157]:

$$P_n = \frac{\beta \cdot Q_{\text{кот.}} (t_{\text{вн}} - t_{\text{ср.ом.}}) \cdot m}{(t_{\text{вн}} - t_{\text{ср.ом.}}) \cdot Q_n^p}, \quad (1.4)$$

де  $P_n$  – річні витрати палива, м<sup>3</sup>/рік;  $\beta$  – коефіцієнт запасу;  $t_{\text{вн}}$  – внутрішня температура, °С;  $t_{\text{ср.ом.}}$  – середня зовнішня температура за опалювальний період, °С;  $Q_n^p$  – теплотворна спроможність палива, кВт/м<sup>3</sup>;  $m$  – тривалість опалювального періоду, рік.

За результатами аналізу виразу (1.1) можна зробити висновок, що тепло витрачається на зрівнювання температури повітря всередині споруди через дію на неї зовнішнього середовища, при цьому враховується тільки температура повітря всієї атмосфери теплиці. Виходячи з наведеного, виникає пряма залежність між виразом (1.1) і співвідношеннями (1.2-1.4) через витрати палива на процес вирощування. Необхідно проаналізувати існуючі системи керування для того, щоб визначити їхні недоліки та коригувати складові витрат і досягати виходу якісної продукції.

Найчастіше у вітчизняній літературі використовуються поняття якості продукції. Якість продукції – це об’єктивна характеристика продукції, що формується внаслідок виготовлення продукції [108]. Найточніше сформульоване визначення поняття «якість» Європейською організацією з контролю якості: «Продукція вважається хорошої якості, якщо при мінімальних витратах протягом усього її життєвого циклу вона максимально сприяє здоров’ю і щастю людей, які залучені до її проєктування й відновлення (повторного використання) за умови мінімальних витрат енергії та інших ресурсів і при допустимій (прийнятній) дії на навколишнє середовище і суспільство» [58, 148].

Сучасна зимова теплиця, як об’єкт керування такими параметрами мікроклімату як температура та вологість, характеризується незадовільною динамікою та нестабільністю параметрів залежно від особливостей технології виробництва. Водночас агротехнічні норми потребують високої

точності стабілізації температури ( $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ), її своєчасної зміни залежно від рівня фотосинтетично активного випромінювання, фази розвитку рослини та часу доби. Всі ці обставини висувають високі вимоги до функціонування і технічної довершеності обладнання автоматизації управління мікрокліматом в теплицях [26, 215].

На сьогодні проведені певні дослідження щодо оцінки впливу факторів навколишнього середовища на врожайність рослин. Проте не вистачає результатів досліджень щодо оцінки якості розвитку рослин та овочів протягом усього циклу вирощування. Водночас для отримання якісної продукції потрібно контролювати і оцінювати значну кількість показників розвитку рослини на всіх фазах її росту (рис. 1.7).

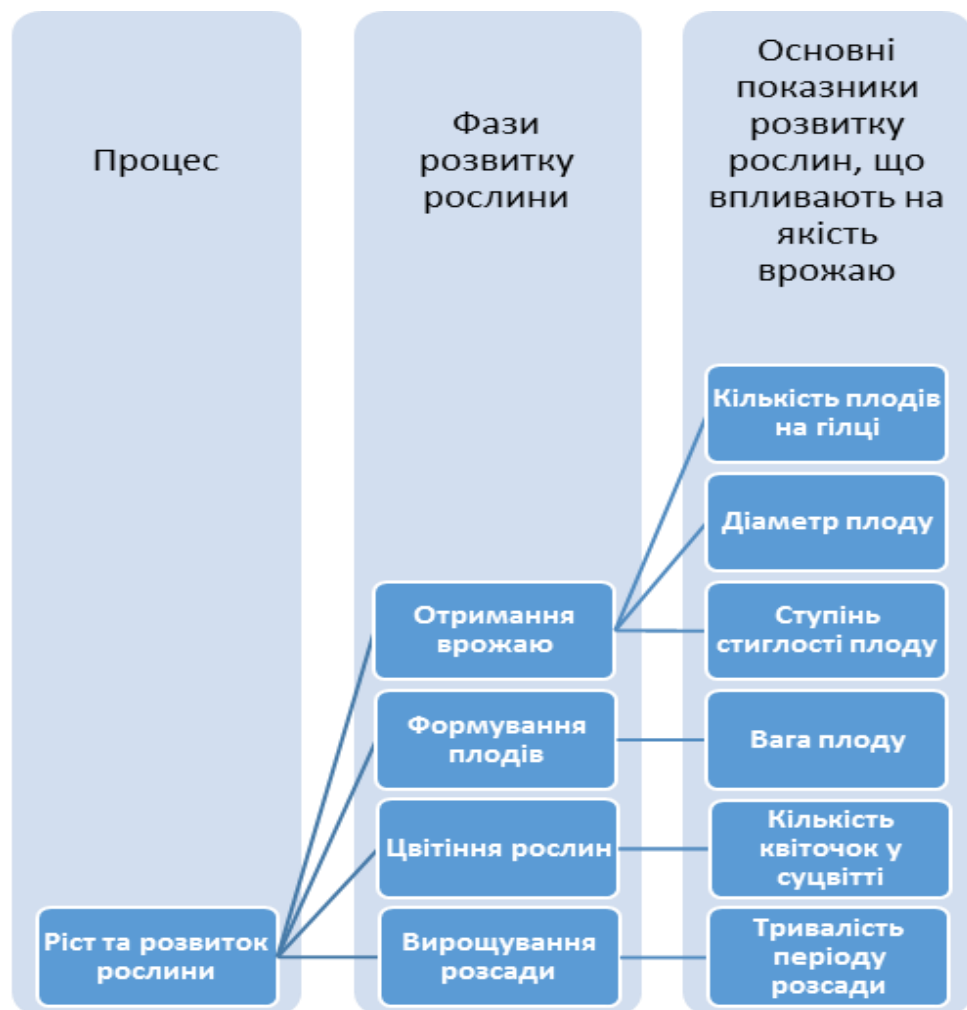


Рис. 1.7. Основні показники розвитку рослини в різних фазах розвитку

Оцінка якості розвитку рослин в період цвітіння характеризується кількістю квіточок у суцвітті. Оцінка якості розвитку рослин в період дозрівання плоду характеризується вагою плоду. Оцінка якості розвитку рослин в період збирання томатів характеризується кількістю плодів на гілці, їхнім діаметром і ступенем зрілості.

## **1.2. Аналіз функціонування існуючих систем керування технологічним процесом виробництва рослинної продукції в промислових теплицях**

До складу системи керування виробництвом рослинної продукції теплиці входять такі виконавчі механізми і технічні засоби: котли опалення з електричними засобами; вентилятори з електричними приводами; мотор-редуктори; лампи досвічування; електричні насоси; електроклапани; пускозахисна апаратура [189]. При цьому система керування виконанням технології виробництва рослинної продукції може використовуватися як для локального впливу, так і на всій площі теплиці.

Система керування виконанням технології виробництва рослинної продукції для локального обігріву теплиць складається з датчика температури, підсилювача і виконавчих пристроїв. До складу виконавчих пристроїв входять електромагнітне реле, електричний нагрівач і електровентилятор.

У промислових теплицях використовуються здебільшого системи керування технологічними параметрами на всій площі. Схему системи керування забезпеченням заданої температури повітря представлено на (рис. 1.8).

За наведеною схемою у процесі забезпечення температурного режиму повітря в теплиці водогрійний котел забезпечує нагрівання води. Нагріта до заданої температури вода надходить у простір теплиці за допомогою насоса

та через триходові клапани. Відповідно у просторі теплиці вимірюється температура повітря за допомогою розміщених первинних перетворювачів, що надсилають виміряну інформацію до системи керування. Дана система керування призначена для підтримання температурного режиму в об'ємі теплиці відповідно до технологічних вимог.

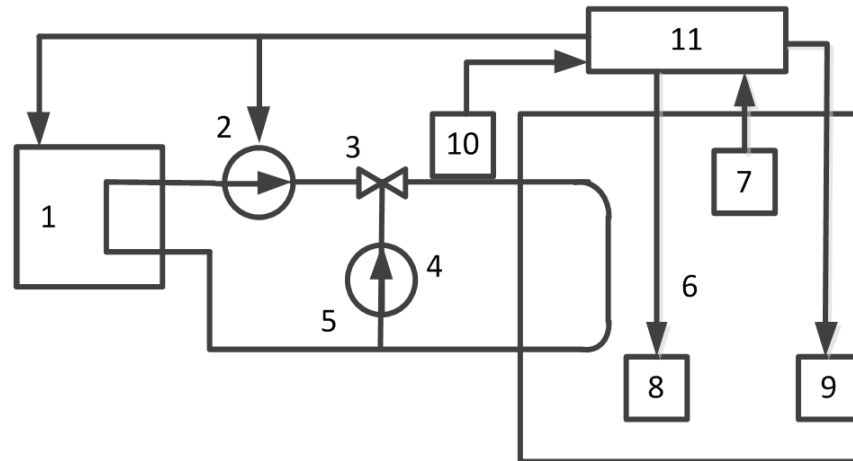


Рис. 1.8. Схема системи забезпечення температури повітря в теплиці:  
1 – водогрійний котел; 2 – насос; 3 – триходові клапани; 4 – змішувач гарячої і холодної води; 5 – контур гарячої і холодної води; 6 – промислова теплиця; 7 – датчики температури повітря; 8 – електричні двигуни вентиляторів; 9 – мотор-редуктори фрамуг; 10 – датчики температури трубопроводу; 11 – регулятор

Система керування вентиляцією призначена для провітрювання теплиці зовнішнім повітрям крізь вентиляційні отвори у покрівлі. Вентиляція теплиці проводиться через змішування повітря за допомогою вентиляторів та через фрамуги, розташовані на даху теплиці. Фрамуги розміщуються по обидві сторони даху (рис. 1.9 а), щоб можна було провітрювати теплицю за будь-якого напрямку вітру. Величина фрамуг, що відчиняються, повинна бути не менше 25% площі теплиці. Для управління режимом провітрювання теплиці, величиною розкриття фрамуг прийнята система механізмів вентиляції, що складається із мотор-редукторів (рис. 1.9 б), рейкових редукторів, зв'язків тощо.

Система керування зашторюванням призначена для зниження перегріву повітря у теплиці в періоди з надмірною сонячною радіацією



способом притінення, а також для зменшення теплових втрат з теплиці через огорожу в холодні періоди року. Система керування зашторюванням включає в себе приводи шторних екранів із системами механізмів. Зашторювання може бути двох типів: горизонтальним чи вертикальним. Екрани зашторювання відкриваються (закриваються) за необхідності дистанційно чи автоматично.



а)



б)

Рис. 1.9. а) фрамуги теплиці; б) мотор-редуктор системи зашторювання

Система керування опаленням промислових теплиць забезпечує ефективне використання джерел теплопостачання, зовнішньої та внутрішньої тепломережі і забезпечує підтримання температурного режиму в об'ємі теплиці відповідно до технологічних вимог. У системі опалення передбачені самостійні контури: підлтковий, верхній, зональний, нижній. В якості теплоносія використовується пом'якшена вода, нагрівання якої відбувається газовими котлами та когенераційними установками. Для забезпечення необхідних значень температури теплоносія в контурах обігріву передбачаються вузли регулювання температур. Кожен вузол підключається до магістральних трубопроводів теплотрас і обслуговує контур опалення в кожному відділенні теплиці [283]. Вузол керування, що складається зі змішувальних клапанів, циркуляційних насосів з електроприводами, трубопроводів та арматури, розміщується в сервісному відділенні. Труби системи підлткового обігріву приєднуються до розподільних трубопроводів

за допомогою гумових рукавів. На підводках встановлюється запірна арматура (кульові клапани) [58].

Система керування рециркуляцією повітря в теплиці призначена для промислового перемішування повітря з метою рівномірного розподілу температурних полів в об'ємі споруди, активізації фізіологічних процесів у рослинах, ліквідації зон з підвищеною вологістю, особливо в періоди, коли природна вентиляція через фрамуги неможлива або малоефективна [72]. До складу системи входять осьові з електроприводами вентилятори та електротехнічне обладнання керування.

Система керування водопостачанням для промислових теплиць містить такі системи інженерного устаткування: поливальний водопровід; господарсько-питний водопровід; крапельний полив рослин (або іншого); резервний полив зі шлангів; випарне охолодження; внутрішні водостоки; технологічний дренаж; виробнича каналізація.

Джерелом водопостачання теплиці поливальною водою є зовнішні мережі технічного водопроводу. На вводі в тепловому пункті передбачається установка водомірного вузла для обліку витрати води на полив [123]. Після водомірного вузла поливальна вода з прийнятою розрахунковою температурою надходить у водонагрівачі, де підігрівається до температури  $+25^{\circ}\text{C}$ . Від водопідігрівачів поливальна вода подається до вузла живильного розчину, системи резервного поливу і установки випарного охолодження повітря. Система поливального водопроводу запроектована зі сталевих оцинкованих труб.

Система господарсько-питного водопроводу передбачає підведення води питної якості до умивальника. Джерелом водопостачання є господарсько-питний водопровід.

Система крапельного поливу рослин забезпечує подачу в кореневу зону дозованих обсягів води або розчинів мінеральних добрив. Містить розчинний вузол, трубопроводи з крапельницями, необхідну запірну арматуру. Один розчинний вузол обслуговує декілька теплиць загальною площею до 2-3 га.

Продуктивність кожного відділу для приготування живильного розчину залежить від площі поливу. Системи крапельного поливу рослин виконуються таким чином, що можна легко демонтувати будь-яку ділянку системи через роз'ємні з'єднання, а також промивати систему за необхідності [123].

Система резервного поливу передбачена для дозволення, за необхідності, окремих ділянок теплиць, а також для миття підлоги доріжки, проходів, технологічного обладнання та інвентаря. Джерелом системи резервного поливу є поливальний водопровід з підігрітою водою [123].

Система випарного охолодження і зволоження повітря призначена для штучного зниження температури повітря в теплиці на 5..7°C нижче температури зовнішнього повітря за рахунок адіабатичного поглинання тепла під час випаровування дрібнодисперсної вологи, яка подається в теплиці [123].

Система технологічного дренажу. Щоб запобігти потраплянню дренажних стоків у ґрунтові води, передбачається пристрій системи дренажу закритого типу з організованим збиранням і відведенням стоків у каналізацію. Система відведення дренажних стоків містить різне обладнання: бетонні підстави зі стічними каналами, полімерні лотки, підземні колектори та інше. Існує система повторного використання дренажних стоків. Дренажні стоки від поливу рослин мінеральними розчинами збираються в накопичувальні ємності, фільтруються в механічних фільтрах, знезаражуються і повертаються в накопичувальні резервуари [123].

Система керування мікрокліматом використовується для підтримання заданих кліматичних режимів окремо для кожної теплиці шляхом впливу на системи [215]:

- нижнього обігріву повітря;
- верхнього обігріву повітря;
- підлоткового обігріву;
- обігріву субстрату;

- вентиляції;
- зашторювання;
- випарного охолодження і зволоження;
- регулювання перепадів тиску систем тепловодопостачання;
- рециркуляції повітря;
- крапельного поливу рослин.

Система керування електродосвічуванням та електроосвітленням. Електродосвічування рослин є невід'ємною частиною комплексу інженерно-технологічних систем при веденні світлокультури. Керування досвічуванням здійснюється в автоматичному режимі центральним кліматичним комп'ютером відповідно до заданих агротехнологічних параметрів, з урахуванням рівня зовнішньої сонячної радіації і часу доби [251].

Система керування підживленням рослин вуглекислим газом. Для забезпечення потреби теплиць у подачі  $\text{CO}_2$  і підтримання його концентрації на рівні 400-1000 ppm передбачають використання відхідних (димових) газів котельні. Система відбору вуглекислого газу від димової труби газової котельні виконується відповідно до діючих нормативних документів. Традиційна схема використання  $\text{CO}_2$  з продуктів згорання котельних в денний час у весняно-літній період викликає необхідність використання акумулюючих ємностей [109].

Вода в теплоізованих ємностях у денний час нагрівається під час роботи котла або когенераційних установок для вироблення  $\text{CO}_2$ , а в нічний час гаряча вода використовується як теплоносій – для обігріву теплиці [109]. Газ котельні містить 10-11%  $\text{CO}_2$ , який потрібний для збільшення врожайності овочів. Частина системи  $\text{CO}_2$  всередині теплиці служить для транспортування, розподілу газів, що відходять, і подачі  $\text{CO}_2$  в зону росту рослин. У кожному прольоті теплиць встановлюються під кожним рядом рослин труби ПВХ з мікроотворами. У тих випадках, коли складно отримати відхідні гази з допустимим рівнем чадного газу або отримати тепло від міських котелень, використовують рідку вуглекислоту. Така система

підживлення рослин  $\text{CO}_2$  містить ємності для зберігання рідкої вуглекислоти, газифікатор для нагрівання та випаровування  $\text{CO}_2$ , автоматику, систему підведення і розподілу  $\text{CO}_2$  в теплиці. Контроль вмісту  $\text{CO}_2$  в повітрі теплиць здійснюється автоматично приладами контролю [148].

Основними енергоспоживачами в теплицях є: насосні групи з електроприводами вузлів обігріву, системи керування зрошенням рослин, випарного охолодження і зволоження повітря, технологічне обладнання вузла приготування мінеральних добрив, електродвигуни системи зашторювання та вентиляції, система електродосвічування рослин. Енерговитрати здійснюються також за рахунок використання природного газу для обігріву та забезпечення вуглекислого газу [130].

На рис. (1.10) наведено щомісячне відсоткове співвідношення споживання енергетичних ресурсів системами керування для забезпечення відповідних факторів життєзабезпечення рослин, враховуючи вплив природних збурень на біотехнічний об'єкт. До основних факторів, які суттєво впливають на якісний розвиток і врожайність рослин, належать: світлозабезпечення, вологозабезпечення, теплозабезпечення, забезпечення поживними речовинами та газозабезпечення.

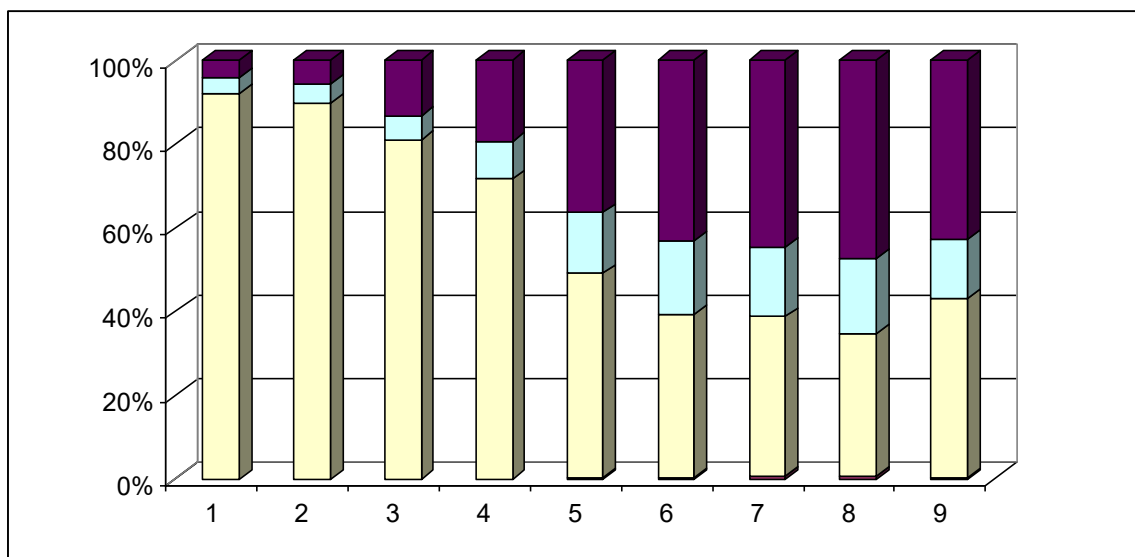


Рис. 1.10. Відсоткове співвідношення споживання електричної енергії системами керування по місяцях факторів життєзабезпечення рослин: забезпечення поживними речовинами; газозабезпечення; теплозабезпечення; вологозабезпечення; світлозабезпечення.

Технологічні параметри мікроклімату, що створюють умови для вирощування рослин, підтримуються відповідними системами, функціонування яких супроводжується значними витратами енергетичних ресурсів, а це, у свою чергу, суттєво впливає на собівартість виробленої продукції. Так, під час вирощування томатів частка енергетичних ресурсів у структурі собівартості продукції при її виробництві за голландськими технологіями іноді сягає 70% (споживання енергоносіїв для одного блока теплиць № 9 ПрАТ «Комбінат «Тепличний» Київської області протягом року: природного газу – 56 % (рис. 1.11), електричної енергії – 14 % (рис. 1.12)).

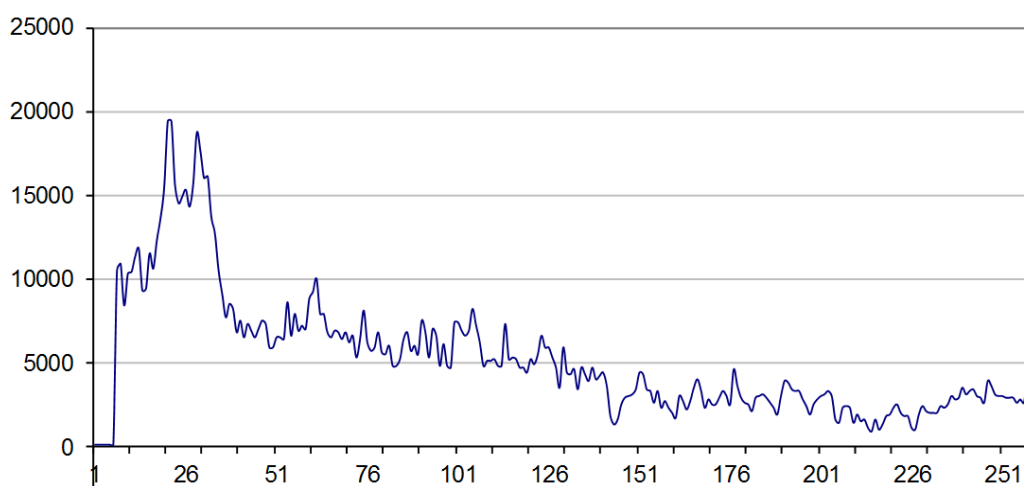


Рис. 1.11. Річне споживання природного газу системами керування в теплиці

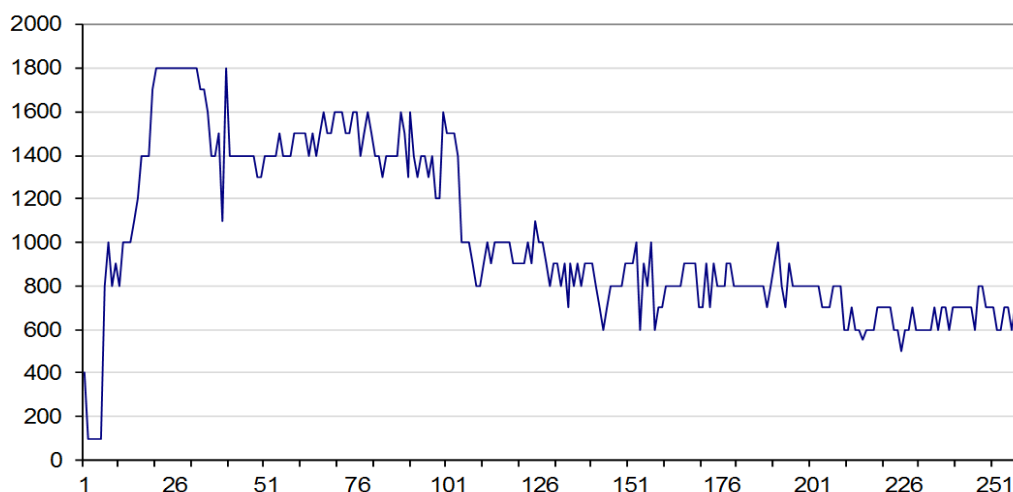


Рис. 1.12. Річне споживання електроенергії в теплиці

У процесі функціонування автоматизована система, яка має в основі елементи комп'ютерно-інтегрованих технологій, підтримує температурний режим у теплиці, надсилаючи керуючу дію до електричних двигунів приводу регулюючих органів. У промислових теплицях функцію керування можуть виконувати промислові комп'ютери та програмно-логічні контролери.

У кожній системі керування має існувати можливість оперативно задати критерій керування, причому методи його задання повинні в повній формі відображати агрономічні, економічні й теплотехнічні вимоги, запропоновані до системи. Тому сучасна система керування повинна передбачати можливість задати не тільки один із зазначених вище критеріїв керування або їх комбінацію, а й будь-який інший, що виникає в процесі вирощування, і таким чином надавати технологу широкі можливості підтримання режиму вирощування в теплиці.

Система керування – систематизований набір засобів впливу на підконтрольний об'єкт для досягнення цим об'єктом певної мети. Об'єкт системи керування може складатися з інших об'єктів, які можуть мати постійну структуру взаємозв'язків [216]. При цьому автоматизована система керування – це сукупність керованого об'єкта й автоматичних вимірювальних та керуючих пристроїв, у якій частину функцій виконує людина (ДСТУ 2941-94) [114, 214].

Автоматизована система керування мікрокліматом призначена для автоматизованого контролю параметрів і керування мікрокліматом у тепличному блоці. Використання автоматизованої системи керування мікрокліматом забезпечує високу точність підтримання заданих кліматичних режимів окремо для кожної теплиці [215]:

- системи керування нижнього обігріву повітря;
- системи керування верхнього обігріву повітря;
- системи керування обігріву субстрату;
- системи керування вентиляцією;
- системи керування зашторюванням;

- системи керування зволоженням;
- керування перепадів тиску систем тепловодопостачання;
- системи керування циркуляції повітря;
- системи керування крапельного поливу рослин.

Комплекс технічних засобів автоматизованої системи керування мікрокліматом містить:

- центральну станцію керування;
- мікропроцесорні контролери;
- метеостанцію з датчиками;
- аналогові вимірювальні канали;
- дискретні канали контролю;
- канали керування.

Застосування автоматизованої системи керування забезпечує: підвищення врожайності за рахунок гнучкої автоматичної підтримки необхідних параметрів мікроклімату; підвищення рівня надійності та ефективності роботи обладнання; визначення та видачу сигналів про аварійні (передаварійні) ситуації.

Як було зазначено, основну роль у підтриманні технології вирощування рослин відіграють системи керування опаленням, вентиляцією та освітленням. Опалення та вентиляція теплиць проєктується відповідно до вказівок БніП 2.04.05-91 та з урахуванням нормативів розділу 4 ДБН В.2.2-2-95. Відповідно системи автоматичного керування повинні забезпечувати такі вказані вимоги [114, 138]:

1. Система автоматичного керування повинна забезпечувати формування керуючих дій на виконавчі механізми відповідних технологічних систем при:

- автоматичному підтриманні заданих температур повітря всередині теплиці в діапазоні  $+5...+35^{\circ}\text{C}$  з похибкою не більше  $1^{\circ}\text{C}$  в місці розташування датчика температури;



- автоматичному підтриманні заданої температури повітря тепличних модулів за допомогою природної вентиляції з похибкою не більше 2°C в місці розташування датчика температури;

- автоматичному підтриманні заданої відносної вологості повітря в теплиці в діапазоні 60..90% з похибкою не більше 5% в місці розташування датчика вологості;

- автоматичному регулюванні температури ґрунту (субстрату) в діапазоні 10..30°C з похибкою 1°C.

2. Система автоматичного керування повинна забезпечувати закриття вентиляційних рам під час опадів, зниження зовнішньої температури повітря і збільшення швидкості вітру.

3. Система автоматичного керування повинна забезпечувати перехід по температурі повітря всередині теплиці з режиму «день» в режим «ніч» та навпаки зі швидкістю не більше 6°C/год. Максимальний перепад температури – 15°C. Конкретна величина швидкості задається агрономічною службою.

4. Система автоматичного керування повинна забезпечувати програмне по часу регулювання вологості ґрунту (субстрату) за рахунок послідовного включення групи електромагнітних клапанів системи поливу [62].

5. Система автоматичного керування повинна забезпечувати автоматичне регулювання температури поливної води в діапазоні +15..+35°C за рахунок кількісної зміни подачі теплоносія в нагрівач з похибкою не більше 2°C. Повинен бути передбачений захист від поливу рослин гарячою (наприклад, вище +35°C) і холодною (наприклад, нижче +15°C) водою.

6. Система автоматичного керування повинна забезпечувати необхідну концентрацію мінеральних добрив по електропровідності в діапазоні 0..10 мСм і кислотності в діапазоні 4..8 рН. Має бути передбачене блокування подачі розчинів при перевищенні заданих граничних значень концентрації мінеральних добрив.

7. Система автоматичного керування повинна забезпечувати програмне за часом керування концентрацією вуглекислого газу. Під час подачі CO<sub>2</sub> функціонування системи вентиляції має бути вимкнено.

8. Система автоматичного керування повинна забезпечувати увімкнення-вимкнення трьох ступенів освітлювальних засобів: 30, 60, 100%. Інтервал часу між включеннями окремих груп освітлювальних засобів повинен становити 300..600 с.

9. Система автоматичного керування повинна забезпечувати автоматичне розгортання і згортання теплозахисного екрана. Процес розгортання теплозахисного екрана із повністю згорнутого положення, прийнятого за 100%, має здійснюватися за багатопозиційним законом з витримкою часу на кожному етапі трансформації: згортання 10% – пауза 60 с. – згортання 15% – пауза 50 с. – згортання 20% – пауза 40 с. – згортання 25% – пауза 70 с. – згортання 30%.

10. Система автоматичного керування повинна забезпечувати автоматичне керування електромагнітними клапанами системи випарного охолодження і зволоження для зниження температури повітря всередині теплиці.

11. Система автоматичного керування повинна забезпечувати [89]:

- відображення інформації про основні технологічні параметри і стани виконавчих механізмів;
- відображення значень зовнішніх метеорологічних параметрів;
- коректування й відображення реального часу і дати;
- відображення відхилення поточного технологічного параметра за межі аварійної норми і сигналізацію про початок аварійної ситуації;
- введення і корекцію технологічних уставок;
- реєстрацію всіх параметрів;
- можливість роботи будь-якого виконавчого механізму в автоматичному, «дистанційному» (керування з пульта керування) і

«ручному» режимах (від кнопок пульта керування за наявності таких у виконавчого механізму);

- збір і первинну обробку інформації з датчиків;
- реалізацію алгоритмів керування і формування керуючих дій відповідно за комплексним алгоритмом;
- реалізацію тестових алгоритмів (у режимі налагодження);
- можливість роботи в режимі аварійного керування (зі зниженням вимог до точності) за спрощеним алгоритмом з використанням обмеженої кількості датчиків.

Для керування процесом вирощування рослин у теплиці застосовується мікрокліматичний комп'ютер, що має три завдання: вимірювання, обчислення і регулювання. Мікрокліматичний комп'ютер складається з різних компонентів, які можна поділити на апаратні засоби і програмне забезпечення [215].

Програмне забезпечення містить всю інформацію, що знаходиться в комп'ютері: програму керування, вимірювання, установки і т.д. Зміни програмного забезпечення часто можуть проводитися за допомогою клавіатури [192]. На (рис. 1.13) показано два мікрокліматичних комп'ютери цеху №9 ПрАТ «Комбінат «Тепличний» фірм SERKOM і NETAFIM, який є процесорним комп'ютером. Це означає, що комп'ютер може керувати такими процесами, як температура, відносна вологість, світло, CO<sub>2</sub> і циркуляція повітря.

При керуванні температурним режимом у теплиці, на забезпечення якого під час вирощування продукції припадає значна частка затрат, необхідно застосовувати енергоефективні стратегії, адже динаміка ціни на енергоресурси з кожним роком підвищується. Витрати на енергоресурси виникають здебільшого через низьку швидкодію системи керування та неврахування збурень в окремих ділянках атмосфери теплиці [95]. В умовах ринкової економіки, зважаючи на зміну вартості енергоресурсів, тепличним

підприємствам слід застосовувати нові підходи керування процесом вирощування.



а)



б)

Рис. 1.13. Блоки мікрокліматичного комп'ютера і плати вимірювання та контролю за мікрокліматом: а) фірми SERKOM; б) фірми NETAFIM

Основні витрати відбуваються під час опалення за рахунок споживання електричної енергії, води, газу. За результатами аналізу літературних джерел, застосування передових технологій сприяє зменшенню використання природного газу на одиницю продукції, кг у скляних теплицях (огірки до 1,79 м<sup>3</sup>, помідори – 1,7 м<sup>3</sup>, перець – 2,45 м<sup>3</sup>, баклажани – 2,87 м<sup>3</sup>, зелень – 1,25 м<sup>3</sup>) і плівкових (огірки – 1 м<sup>3</sup>, помідори – 1,28 м<sup>3</sup>, перець – 3,82 м<sup>3</sup>, баклажани – 3,44 м<sup>3</sup>, зелень – 0,68 м<sup>3</sup>).

Сучасне виробництво сільськогосподарської продукції в умовах закритого ґрунту здійснюється за технологіями, реалізованими із застосуванням відповідних технічних засобів та систем керування. Технологічні процеси у рослинництві під час вирощування овочів



Як уже зазначалось, такий алгоритм функціонування біотехнічного об'єкта (теплиці і рослини), хоча й спрямований на забезпечення найвищої продуктивності біооб'єкта, не є найефективнішим. Конструкції і потужності виконавчих механізмів не завжди здатні компенсувати збурення, які з'являються впродовж усього періоду утримання біооб'єкта, що призводить до енергетичних перевитрат.

Аналіз структури енерговитрат при функціонуванні систем керування виробництвом томатів в умовах тепличного господарства дав змогу встановити, що на обігрів шатра теплиці використовується близько 80% тепла, на обігрів ґрунту – 9%, води для підживлення рослин – 4%, на інші затрати – 7%. Згідно з даними Діпросільпрому у 80-і роки витрати на обігрів зимових теплиць досягали 40% всіх експлуатаційних витрат, нині витрати на обігрів сягають 65..70% [139], що також підтверджується в ПрАТ «Комбінат «Тепличний».

Основними споживачами енергії в біотехнічному об'єкті (теплиці) є системи, що формують стратегії керування відповідним технологічним процесом. Формування стратегій керування відбувається шляхом стабілізації заданих технологічних параметрів [125]. Однак у таких стратегіях не враховується просторове розподілення фітокліматичних умов виробництва рослинної продукції, її якість та власні реакції на такі природні збурення, як сонячна радіація, температура, рівень вуглецю, вологість навколишнього середовища.

Стрімке зростання комп'ютерної індустрії спричинило появу нової індустрії роботів та робототехнічних систем, що використовуються у будівельній, промисловій, побутовій, авіаційній, військовій, космічній, підводній і науково-дослідницькій діяльності людини [42, 210]. Використання роботів дає змогу полегшити або зовсім замінити людську працю. У галузі АПК за різним призначенням використовують всі типи управління робототехнічними системами – біотехнічні, автоматичні та

інтерактивні. Використання певного типу управління залежить від ступеня роботизації процесу [69].

Тепличне господарство є перспективним виробництвом для впровадження робототехнічних систем. Компанія Harvest Automation. Harvest Automation створює роботів-помічників, які вирощують рослини в горщиках, – це роботи-садівники HV-100. До завдань робота входить перенесення горшкових рослин – відповідно до вимог технологічного процесу (поливання, обробка, простір для зростання, підрізування, сортування, продаж) їх необхідно переміщати по теплиці. Створений в Нідерландах робот RoBoPlant висаджує квіти і пересаджує рослини. Іспанська компанія Agrobot розробила робота SW6010, що допомагає збирати урожай полуниці, є також роботи для збору чорниці [221].

Науково-дослідним центром Wageningen UR Greenhouse Horticulture створені робот для збирання врожаю солодкого перцю (рис. 1.15 а) і автономний робот для збору врожаю огірків, що вирощуються на шпалері (рис. 1.15 б), здатний визначити місцезнаходження рослини, підійти до неї, утримати гілку, відокремити і зібрати стиглі плоди. Практичні показники успішності і швидкості збору плодів поки ще недостатні для комерційного застосування цих роботів [9, 221].



а)



б)

Рис. 1.15 а) робот для збирання врожаю солодкого перцю; б) робот для збирання врожаю огірків

Широко використовується в тепличному господарстві самохідний роботизований обприскувач «Мікотон Амазон» (рис. 1.16), який застосовується при вирощуванні томатів, огірків і перців в теплиці. «Мікотон» використовує технологію синхронізованої подачі повітря, що дає можливість підвищити ефективність обробки в теплиці на 79% порівняно зі стандартними обприскувачами [231].



Рис. 1.16. Самохідний роботизований обприскувач «Мікотон Амазон»

До переваг від впровадження робіт та робототехнічних систем в агропромисловому комплексі належать: досить швидка окупність; виключення впливу людського фактора на конвеєрних виробництвах, а також під час монотонних робіт, що вимагають високої точності; підвищення точності виконання технологічних операцій і, як наслідок, поліпшення якості; можливість використання технологічного устаткування у три зміни, 24 години на добу; раціональність використання виробничих приміщень; усунення шкідливого впливу на персонал, що працює на виробництві [36, 61].

Впровадження робіт та робототехнічних систем в тепличному господарстві належить до перспективних, інноваційних, високотехнологічних розробок і має важливе значення для агропромислового комплексу, оскільки дає змогу підвищити контроль, удосконалити керування та отримати високу якість продукції [203].



Розглянуті робототехнічні комплекси та системи, що використовуються в тепличному господарстві, мають ряд недоліків: самохідні роботи не забезпечені програмно-апаратними засобами для проведення фітомоніторингу; не розроблені алгоритми керування такими роботами; не розроблено програмно-апаратний зв'язок зазначених роботів із системою автоматичного керування мікрокліматом у промисловій теплиці.

### **1.3. Обґрунтування потреби створення системи керування тепличними комплексами з моніторингом якості продукції**

Обмежена кількість датчиків температури в промисловій теплиці призводить до визначення і використання для керування опосередкованого значення температури існуючою системою керування мікрокліматом, яка не спроможна підтримати необхідне значення температури в найсприятливішій зоні для розвитку всіх рослин, що знаходяться в теплиці. При цьому в теплиці з'являються зони з підвищеним та пониженим значенням температури [171].

Було проведено дослідження розподілу температурного поля за площею теплиці на різних її рівнях. Дослідження проводились в теплиці № 9 ПрАТ «Комбінат Тепличний», Київської обл., Броварського р-ну, смт. Калинівка. У цій теплиці подача теплоносія від котельні здійснюється магістральним трубопроводом через вузли керування подачею теплоносія. Системи трубопроводів технологічного обігріву, керування електроприводами циркуляційних насосів, датчиків температури забезпечують регулювання температури безпосередньо в теплиці.

До складу існуючої системи автоматичного керування мікрокліматом входять 3 датчики температури, розташовані в різних місцях теплиці на висоті 1,5 м (рис. 1.17). За умов, що температура установки була рівною 20°C, виміри температури у місцях розташування датчиків становили відповідно 20.4°C, 19.7°C, 19.2°C.

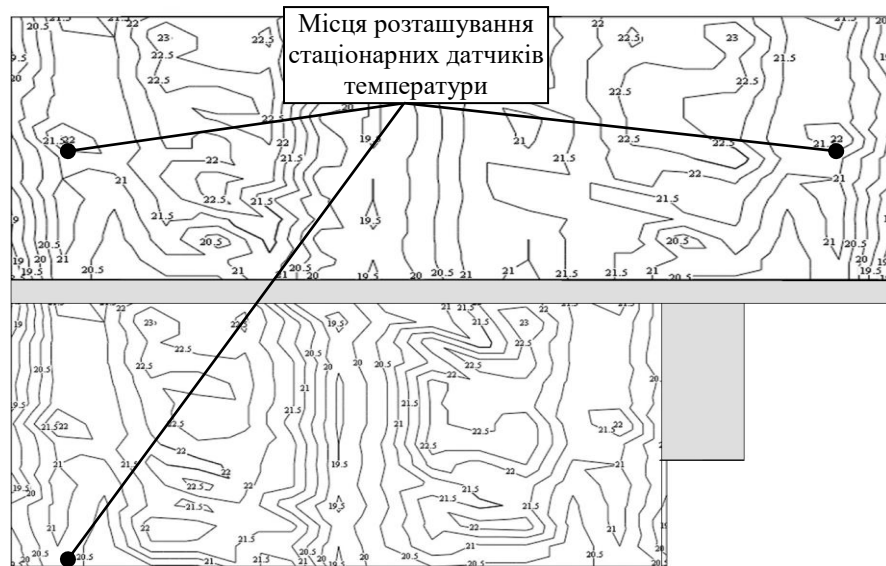


Рис. 1.17. Температурне поле в теплиці на рівні 1,5 м від підлоги

За результатами вимірювання температури встановлено, що її значення на висоті 1,5 м по площі теплиці змінюється від 18,4°C до 23,1°C, а відхилення від установки не перевищує 3,5°C. Тобто значення температури повітря над кроною рослини перебуває в межах зони її комфортного розвитку (забезпечується системою рециркуляції повітря). Водночас значення температури повітря нижче крони не завжди в межах норми.

Були проведені вимірювання температури на рівні розвитку рослин на висоті 0,5 м від підлоги при висоті рослин в теплиці від 0,7 м до 1,1 м. Результати показали, що температура при цьому змінюється від 13,5°C до 26,2°C, а відхилення від заданого значення становить 6,5°C. Аналіз температурного поля (рис. 1.18) дає змогу зробити висновок, що температура повітря біля рослин у деяких зонах виходить за межі зони комфорту розвитку рослин, що спричинює їх повільний розвиток і, як наслідок, – затримка у збиранні врожаю та його зменшення. Отже, існуюча система рециркуляції повітря не забезпечує підтримку комфортних значень температури повітря у кроні рослин.

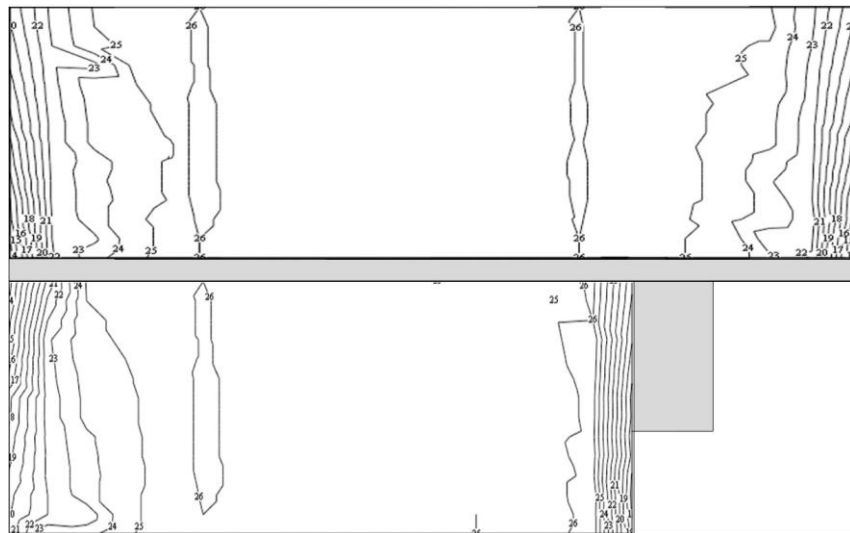


Рис. 1.18. Температурне поле в теплиці на рівні 0,5 м від підлоги

Аналіз температурного поля також дав можливість встановити, що зони з пониженими температурами з'являються повздовж системи приземного підігріву повітря. Ліквідувати ці зони з підвищеними та пониженими температурами можна за допомогою диференційованого подавання теплоносія саме в цих зонах у систему приземного підігріву.

Споруди захищеного ґрунту відділені від зовнішнього клімату скляним чи полімерним покриттям, мікроклімат споруд значною мірою залежить від впливів зовнішнього середовища. Фактори зовнішнього середовища – оптичне випромінювання, сила і напрямок вітру, температура і відносна вологість повітря, а також опади – впливають на мікроклімат у теплиці. Середньодобове значення зміни зовнішньої температури повітря наведено на (рис. 1.19).

Оптичне випромінювання впливає на тепловий режим споруд і є важливим джерелом енергії в закритому ґрунті, що необхідно враховувати в тепловому балансі споруд і рослин. Можна сказати, що основним фактором мікроклімату є оптичне випромінювання (сонячна радіація). Усі режими мікроклімату – температурно-вологісний, зрошувальний, вуглекислотний і живильний – визначаються значною мірою радіаційним режимом [212]. Середньодобове значення зміни сумарної освітленості наведено на (рис. 1.20).

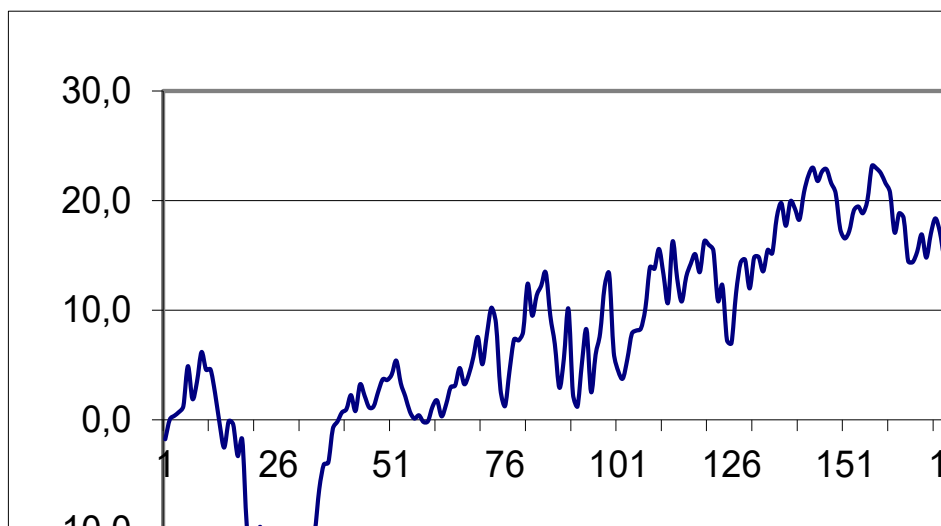


Рис. 1.19. Середньодобове значення зміни температури повітря

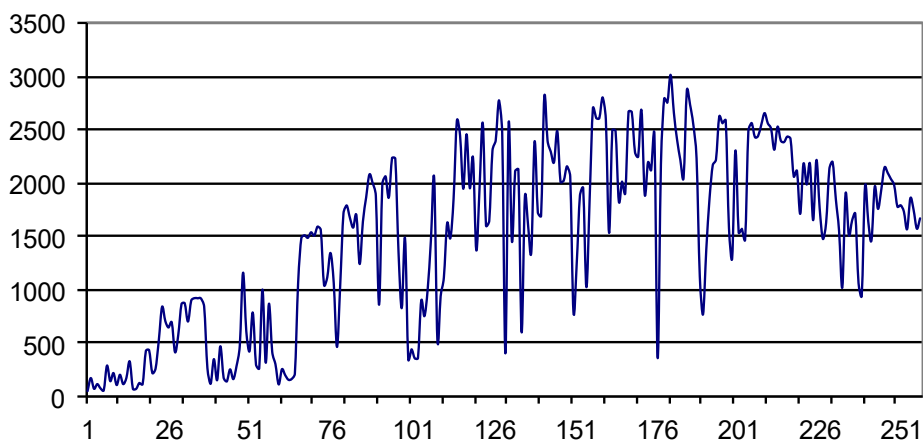


Рис. 1.20. Середньодобове значення зміни сумарної освітленості

Отже, створення і регулювання мікроклімату теплиць неможливі без врахування впливу факторів зовнішнього клімату і погодних умов. Сучасні системи управління мікрокліматом працюють з урахуванням параметрів метеорологічних (погодних) умов, тому команди для зміни заданих параметрів у теплицях виконуються набагато швидше, ніж у старих системах, де сигнали одержували тільки після появи порушень мікроклімату в культивативній споруді [179].

Значно впливають на мікроклімат у теплиці й самі рослини. В об'ємі повітря і ґрунту, зайнятому тепличною культурою, створюється мікроклімат зони існування рослин – фітоклімат. Закономірності зміни фітоклімату мають

свої особливості [180]. Чим більша площа теплиці і маса рослини, тим більш значні ці особливості. Рівень освітленості, температура, вологість, концентрація CO<sub>2</sub> змінюються по ярусах усередині рослинного ценозу.

Виробники сільгосппродукції всього світу все частіше застосовують нову технологію для досягнення більш високої врожайності. Фітомоніторинг дає змогу скоротити використання природних ресурсів і забезпечити тим самим охорону навколишнього середовища [200]. Фітомоніторинг спрямований на удосконалення керованих факторів врожайності.

Щоб створити оптимальні умови для нормального росту і розвитку рослин, необхідно, у першу чергу, підсилити фактор, що перебуває в мінімумі і від якого залежить підвищення ефективності інших умов життя [200]. Реакція рослини на підвищення інтенсивності факторів зростає доти, доки якийсь із них не опиниться в мінімумі – закон мінімуму.

Оцінювання розвитку рослини неможливе без її візуального аналізу. Одним із успішних рішень завдання візуального огляду є використання математичного апарату, який дає можливість реалізувати візуальний контроль рослин на всій площі теплиці.

Спостереження за розвитком рослин та їхньою реакцією на дію мікрокліматичних збурень дає можливість накопичувати знання про рослину і прогнозувати подальший її розвиток і врожайність. Необхідно постійно проводити контроль за розвитком рослин з одночасним керуванням параметрами мікроклімату [225]. Вже сьогодні фітомоніторинг стає новим стандартом розвиненого тепличного господарства, який у найближчі десятиліття змінить підхід рослинників до вирощування продукції. Але зазначений підхід має ряд недоліків, такі як прив'язаність до однієї рослини та неможливість визначити стиглість плодів, оскільки існуючі системи не мають засобів для такого визначення.

Потрібно проводити спостереження за допомогою фотокамери для візуального огляду рослини з можливістю визначення стиглості плодів за кольором, значення розмірів плоду і стебла рослини, а також виявлення

хвороб, що уразили рослину. Відповідні виміри можна реалізувати не тільки для однієї, а й для всіх рослин у теплиці.

Реалізація такого безконтактного фітомоніторингу можлива завдяки комплексу, який візуально обстежує рослини на певній ділянці та представляє свої обстеження у вигляді зображень, що є відповідно новим підходом до вирішення завдання, адже існуючі системи фітомоніторингу визначають стан рослин безпосередньо контактним способом.

Отримані зображення рослин будуть збережені у вигляді фотозображень. Аналіз і обробка відповідних даних відбуватиметься за допомогою вейвлет-перетворень. Кожне фотозображення проходитиме вейвлет-аналіз, під час якого воно розкладатиметься на хвильові функції (вейвлети). Вейвлет-аналіз можна охарактеризувати як локалізований спектральний аналіз або спектральний аналіз локальних збурень. Основним завданням є розпізнавання образів зображень, на яких буде знайдено контур суцвіття та плоду рослини для визначення його стиглості. Вейвлети дають можливість використовувати різні підходи щодо очищення зображень від шуму та розпізнавання образів.

Збережені зображення рослин підлягають розпізнаванню, і на основі аналізу ухвалюються висновки про стан рослин, а також прогнозується їхній розвиток з урахуванням закладеної бази знань про технологію вирощування рослини в теплиці [53]. Суттєвим недоліком такої системи є прив'язка до однієї рослини, а проводити фітомоніторинг необхідно на всій площі теплиці.

Сучасні високотехнологічні методи вирощування овочів у теплицях дають змогу істотно підняти врожайність культур і, відповідно, підвищити економічну ефективність виробництва. На сьогоднішній день тепличні комплекси досягли певних позитивних результатів, завдяки яким теплична галузь є найбільш рентабельною в сільському господарстві.

Всі системи керування технологічними процесами в теплицях спрямовані на створення оптимальних параметрів для росту і розвитку рослин з урахуванням їхньої фізіології. На сьогоднішній день прийоми

обробітку рослин науково обґрунтовані й розроблені. І завдання фахівців – використовуючи сучасні засоби автоматики, створити для рослин у теплицях умови, максимально наближені до їхніх фізіологічних потреб з тим, щоб отримати високий урожай. Іншими словами, умови, що необхідні для росту рослин у теплиці, повинні відповідати оптимальним умовам перебігу основного процесу в рослинній клітині – процесу фотосинтезу [207].

У наш час високотехнологічну теплицю вже неможливо уявити без наявності систем контролю за станом рослин, субстрату, мікроклімату і т.д. До класичних систем контролю параметрів теплиці належать [262]:

- система контролю параметрів мікроклімату – передбачає комплекс датчиків, що фіксують такі параметри, як температура, вологість повітря, кількість CO<sub>2</sub>, рівень освітленості (інтенсивність світла, сумарну сонячну радіацію, в т.ч. фотосинтетичну активну радіацію);
- система контролю параметрів субстрату – включає в себе такі параметри, як електропровідність, рН і вологість субстрату;
- система електронного зважування субстрату – дає змогу отримувати інформацію про втрату вологи за певний період часу;
- система контролю параметрів дренажу – аналізує параметри рН дренажного розчину, фіксує час появи дренажу і час його закінчення, а також проводить розрахунок фактичної кількості залежно від загальної дози поливу.

Крім вищезазначених параметрів, у сучасній теплиці на передній план виходить контроль якості життєзабезпечення окремої рослини, що у свою чергу дає можливість [1]:

- забезпечувати захист рослин від хвороб шляхом раннього виявлення та ізолювання інфікованих рослин;
- спостерігати за розвитком рослин і здійснювати корекцію температуро-вологісного та харчового режимів в оптимальних діапазонах, що є економічно обґрунтовано;

- прогнозувати з високою точністю майбутню врожайність за рахунок різноманітної кількості даних.

До складу подібної індивідуальної системи входять [76]:

- контроль температури стебла рослини. Один із найважливіших параметрів, оскільки дає змогу оцінити оптимальність умов для процесу фотосинтезу у рослин. Фізіологами доведено, що для успішного перебігу фотосинтезу температура поверхні листа повинна бути в межах 25°C залежно від виду рослини. Знаючи фактичну температуру, фахівець може оцінити правильність підтримки параметрів мікроклімату, а в разі необхідності – скорегувати їх, щоб відрегулювати умови для процесу фотосинтезу;

- інтенсивність руху соку в рослині. Датчик вимірює рух соку в стеблі рослин і, відповідно, водоспоживання рослин. Датчик фактично вимірює кількість тепла, яке переносить сік рослини. Кількість тепла перераховується безпосередньо в одиниці виміру потоку – грами або кілограми за годину.

- вимірювання діаметра плодів та діаметра стебла дає змогу визначити відносну транспірацію рослини. Адже припинення транспірації негативно позначається на фотосинтезі, оскільки під час дифузії і випаровування води в навколишнє середовище відбувається надходження в рослину вуглекислого газу; припинення надходження вуглекислого газу в рослину призводить до припинення фотосинтезу;

- система візуального розпізнавання захворювання рослин дає можливість за явними ознаками виявити хворобу та вчасно її локалізувати.

Інформація про стани атмосфери та рослин (фітостан) у спорудах закритого ґрунту є надзвичайно важливою для забезпечення гарантованої врожайності [177]. Практично всі існуючі системи обмежені наявними одним-двома первинними перетворювачами, інформація від яких певною мірою характеризує значні об'єми теплиці, що є суттєвим недоліком.

З 2003 року в Україні компанія «Логрус» виробляє комп'ютеризований фітомонітор «Ампеломонітор Крим-1» (конструктор Г. Шидловський), що дає можливість проводити вимірювання температури листа, різниці



температур лист-повітря, швидкості протікання води у пагонах (відносна швидкість ксилемного потоку), об'ємної швидкості протікання води, зміни діаметра пагона (коренів, плодів), зміни товщини листа. Основним недоліком цієї розробки є неспроможність здійснювати вимірювання зазначених параметрів більше ніж для однієї рослини, що призводить до недостовірної інформації про стан розвитку рослин на всій площі промислової теплиці, розміри якої зазвичай сягають понад 1 га.

Розроблений фітомонітор LPS-03 (Local Phytomonitoring Station) компанії PhyTech (Ізраїль), який нині є найбільш поширеним у рослинництві. Однак цей виріб призначений для стаціонарного встановлення і оцінює стан атмосфери для обмеженого простору теплиці та обмеженої кількості рослин. Прогноз розвитку рослини при цьому не здійснюється і якість продукції не оцінюється [21, 37].

Проведені дослідження реакції рослини на зміну режимів освітлення та подачі живильного розчину авторами Abderzak Kichah, Pierre-Emmanuel Bournet, Christophe Migeon, Thierry Boulard [25]. Результати досліджень можуть бути використані для уточнення технологій вирощування рослин.

Розроблено бездротовий інтелектуальний датчик на основі ПЛІС для моніторингу фотосинтезу в режимі реального часу [33]. Основним недоліком розробки є те, що такий виріб використовується для дослідження лише однієї рослини.

Використання фітомоніторингу як основного методу для забезпечення технологічними параметрами розвитку рослин у спорудах закритого ґрунту показано в праці Camilla Baratto, Guido Faglia, Matteo Pardo, Marco Vezzolia, Luca Boarin, Massimo Maffei, Simone Bossic [34]. Основою розробки є сенсори для спостереження за розвитком рослин. Проте недоліком такого підходу є те, що економічно недоцільно підводити до кожної рослини велику кількість датчиків. Ця проблема знаходить вирішення завдяки робототехніці. При впровадженні робототехнічної системи фітомоніторингу не потрібно купувати велику кількість дорогих датчиків.

Для того, щоб провести фітомоніторинг значної кількості рослин, ми можемо обійтись одним мобільним роботом фітомоніторингу, який сам обиратиме об'єкти для вимірювання та оброблятиме отримані дані.

Розробка робототехнічної системи фітомоніторингу дає нам змогу проводити постійну комплексну діагностику стану рослин, безпосередній і безперервний контроль за процесами їхнього росту й розвитку [203]. Потрібно розробити мобільний робот фітомоніторингу, який, переміщуючись площею теплиці, буде використовувати технологічні направляючі. Такий комплекс забезпечить моніторинг основних параметрів атмосфери теплиці, фітомоніторинг, у тому числі якість продукції, ідентифікуючи при цьому її зони. Стратегії керування системи виконання технології виробництва рослинної продукції, що забезпечують технологію вирощування, будуть формуватись із урахуванням інформації, що надходить від мобільного робота фітомоніторингу, максимізуючи прибуток виробництва на поточний момент. Такий комплекс повинен володіти окремими ознаками інтелекту: оцінювати якість продукції, переміщуватись площею, мінімізуючи пройдений шлях, обминати перешкоди тощо.

Концепція зазначеної робототехнічної системи полягає в такому: на рухомій платформі, що здатна наблизитися до кожної рослини, встановлена система датчиків для вимірювання параметрів рослини, близького навколишнього середовища та візуального спостереження. Це обладнання приєднується до обчислювальної системи робота, що здійснює обробку отриманих даних, веде статистичний облік, виконує ідентифікацію характерних ознак захворювання рослини або неправильного догляду за нею. Крім того, обчислювальний механізм керує переміщенням платформи та підтримує зв'язок із диспетчерським пультом теплиці [197].

Впровадження робототехнічного комплексу фітомоніторингу дасть змогу існуючим системам керування якісно виконувати такі функції:

- керування параметрами мікроклімату;
- збір і відображення інформації про біотехнічні параметри теплиці;

- автоматичне керування виконавчими механізмами;
- підтримка заданих режимів мікроклімату та фітоклімату;
- керування в ручному, дистанційному ручному і автоматичному режимах;
- створення архівів даних і робота з ними.

У загальному випадку вирішення завдання впровадження робототехнічних систем зводиться до необхідності знайти з множини можливих варіантів  $X$  такий варіант побудови робототехнічної системи  $x$ , при якому забезпечується контроль максимально можливої кількості технологічних параметрів з мінімальними фінансовими  $C$  і часовими  $T$  витратами [279]. Формальна постановка вирішення завдання може бути представлена у вигляді рішення трикритеріальної задачі:

$$G \rightarrow \max_{x \in X}, C \rightarrow \min_{x \in X}, T \rightarrow \min_{x \in X}. \quad (1.5)$$

Як видно з (1.5), усі критерії мають суперечливий характер і знайти оптимальний варіант впровадження робототехнічної системи, що задовольняє всі зазначені вище умови, вкрай складно. Без розробки теоретико-концептуальних основ побудови таких систем, що включають створення методів оптимізації структури і параметрів робототехнічних систем, вирішення зазначеної проблеми неможливе [279].

Сучасні системи керування реалізують алгоритми стабілізації, орієнтовані на максимальну продуктивність рослини, не враховуючи при цьому якість розвитку біологічної складової (рослини) в просторі теплиці, на яку впливає нерівномірне розподілення мікроклімату. За результатами аналізу функціонування існуючих систем керування виявлено ряд недоліків, основними з яких є такі:

- відсутність можливості відстежувати реакцію рослин у теплиці на дію керуючих та збурюючих впливів;

- нерівномірність розподілу температури повітря в просторі промислової теплиці;
- низька швидкодія системи керування та відсутність можливості компенсовувати збурення в окремих ділянках атмосфери теплиці;
- відсутність можливості оцінювати якісну складову рослинної продукції та використовувати цю інформацію як зворотній зв'язок в системах автоматизації;
- значні витрати на енергетичні ресурси для забезпечення вимог технології вирощування рослинної продукції.

Розроблення наукових основ створення енергоефективної системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – тепличних комплексів, що функціонують в умовах невизначеності із моніторингом якості рослинної продукції, є важливою науково-прикладною проблемою.

Основною метою є розроблення наукових основ створення системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками в просторово-розподілених багатозв'язних біотехнічних об'єктах – промислових теплицях, що функціонують в умовах невизначеності, для підвищення енергоефективності виробництва рослинної продукції із забезпеченням при цьому її необхідної якості.

Для досягнення мети вирішувалися такі основні завдання:

- проаналізувати сучасні системи автоматизації, що супроводжують технологію виробництва рослинної продукції в промислових теплицях;
- дослідити особливості біотехнічного об'єкта – промислової теплиці, для вдосконалення математичної моделі впливу основних факторів життєзабезпечення рослин на їх стани;
- дослідити режими функціонування систем автоматизації процесів керування енергетичними потоками в промисловій теплиці, враховуючи при цьому просторове розподілення фітокліматичних умов виробництва та якість рослинної продукції;

- обґрунтувати концепцію побудови системи автоматизації процесів енергоефективного керування енергетичними потоками під час виробництва рослинної продукції заданої якості в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – промислових теплицях;

- розробити мобільний робот для моніторингу і оцінки станів рослин, якості рослинної продукції та параметрів атмосфери в просторі промислової теплиці;

- розробити енергоефективну систему автоматизації процесів керування енергетичними потоками під час виробництва рослинної продукції в просторово-розподіленому об'єкті – промисловій теплиці, що забезпечує високу якість рослинної продукції;

- реалізувати і провести дослідно-промислові випробування енергоефективної системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками під час виробництва рослинної продукції в просторово-розподіленому об'єкті – промисловій теплиці, що забезпечує задану високу якість рослинної продукції.

У розділі використані матеріали власних досліджень [154, 180, 200, 203, 214].

## **Висновки до Розділу 1**

1. На основі проведеного аналізу витрат енергетичних ресурсів встановлено, що частка енергетичних ресурсів у собівартості продукції сягає 70%, тому ефективне використання енергоресурсів дає змогу додатково зменшити собівартість виробленої продукції.

2. У результаті проведеного аналізу існуючих систем керування виявлено ряд недоліків, у яких простежується:

- відсутність можливості відстежувати реакцію рослин у теплиці на дію керуючих та збурюючих впливів;

- нерівномірність розподілу температури повітря в просторі промислової теплиці;
- низька швидкодія системи керування та відсутність можливості компенсувати збурення в окремих ділянках атмосфери теплиці;
- відсутність можливості оцінювати якісну складову рослинної продукції та використовувати цю інформацію як зворотній зв'язок в системах автоматизації;
- значні витрати на енергетичні ресурси для забезпечення вимог технології вирощування рослинної продукції.

3. Визначено основні завдання, вирішення яких дасть змогу підвищити енергоефективність виробництва рослинної продукції в тепличних комплексах шляхом розроблення системи керування виробництвом рослинної продукції в теплиці.

## **РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ БІОТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ З ПРОСТОРОВО-РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ**

Для побудови системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками просторово-розподілених об'єктів – тепличних комплексів, з метою виробництва продукції заданої якості, як уже зазначалось раніше, слід враховувати біологічну складову, яка в силу своїх особливостей змінюється протягом певного часу під дією як природних, так і внутрішніх збурень та перебуває у різних фазах розвитку. Це впливає на кількість і якість виробництва продукції, а значить, і на споживання енергетичних носіїв (природного газу, електричної енергії) технологічним процесом виробництва.

Таким чином, важливою є оцінка якості розвитку та врожайності рослин за допомогою математичного апарату для врахування цієї особливості під час формування алгоритмів керування.

### **2.1. Методика експериментальних досліджень**

Під час вивчення таких об'єктів, як промислова теплиця, виникає необхідність встановлення найбільш ймовірних взаємозв'язків і взаємозалежностей між двома або більше змінними (має місце під час виробництва продукції заданої якості). Виявлення зв'язків між різними показниками, чинниками, ознаками – складне завдання. Для пошуку таких математичних функціональних або структурних залежностей між двома або більше змінними (за накопиченими експериментальними даними) дуже корисні методи кореляційного аналізу [160].

Кореляційний аналіз дає відповідь на статистичну гіпотезу про відсутність або наявність зв'язку між змінними з деякою наперед заданою довірчою ймовірністю.

Для кількісної оцінки щільності зв'язку широко застосовують лінійний коефіцієнт кореляції. Якщо задані значення змінних  $X$  та  $Y$ , то він розраховується за формулою [254]:

$$r_{XY} = r_{YX} = \frac{\overline{XY} - \bar{X} \cdot \bar{Y}}{\sigma_X \cdot \sigma_Y}. \quad (2.1)$$

Коефіцієнт кореляції набуває значення від  $-1$  до  $+1$  ( $\sigma$  – дисперсія) [289]:

- якщо  $|r| < 0,30$ , то зв'язок між ознаками слабкий;  $0,30 \leq |r| \leq 0,70$  – помірний зв'язок;  $|r| > 0,70$  – сильний або щільний зв'язок;
- коли  $|r| = 1$  – зв'язок функціональний;
- якщо  $|r| \approx 0$ , то лінійний зв'язок між  $X$  та  $Y$  відсутній. Але можлива нелінійна взаємодія, а це потребує додаткової перевірки.

Під час оцінки лінійного множинного зв'язку розраховують коефіцієнт множинної кореляції. Він відображає щільність зв'язку між залежною змінною та варіаціями всіх незалежних змінних, що включені до аналізу:

$$R = \sqrt{\frac{\sigma_{Y \text{ теор}}^2}{\sigma_Y^2}}, \quad (2.2)$$

де  $\sigma_{Y \text{ теор}}^2 = \frac{\sum (y_{i \text{ теор}} - \bar{y})^2}{n}$  – факторна дисперсія;  $\sigma_Y^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n} = \overline{y^2} - \bar{y}^2$  – загальна дисперсія.

Коли оцінюється щільність зв'язку між результативною  $Y$  та двома факторними ознаками  $X_1, X_2$ , то множинний коефіцієнт кореляції можна визначити за формулою:

$$R = \sqrt{\frac{r_{YX_1}^2 + r_{YX_2}^2 - 2r_{YX_1}r_{YX_2}r_{X_1X_2}}{1 - r_{X_1X_2}^2}}, \quad (2.3)$$



де  $r$  – парні коефіцієнти кореляції між ознаками.

Множинний коефіцієнт кореляції змінюється в межах від 0 до 1 і є позитивною величиною:  $0 < R < 1$  [289]:

$R \leq 0,3$  – зв'язок практично відсутній (або не всі важливі фактори взаємозв'язку враховані, або вибрано невірну форму рівняння регресії; необхідно переглянути змінні, що ввійшли в модель, і, можливо, її вид);

$0,3 < R \leq 0,5$  – слабкий зв'язок;

$0,5 < R \leq 0,7$  – помірний зв'язок;

$R > 0,7$  – сильний зв'язок.

Кінцевим результатом пасивного експерименту є оцінка кореляційного зв'язку між змінними з метою визначення можливих шляхів дослідження проблеми підвищення енергоефективності.

## **2.2. Вплив факторів життєзабезпечення на стан рослин та якість врожаю**

Розглянемо загальну модель, яка відображає залежність врожаю рослини від процесів тепломасопереносу, що відбуваються в об'єкті закритого ґрунту [238]. Мова йде про отримання оптимального врожаю певної культури завдяки найбільш сприятливому поєднанню складного комплексу різних властивостей і стану зовнішнього середовища, ґрунту й повітря, що оточує рослину [263]. Модель повинна бути призначена для якісного та кількісного опису росту і розвитку рослини, що перебуває в найтіснішій взаємодії з динамікою параметрів навколишнього середовища в теплиці. Загальне уявлення щодо процесу теплообміну дає (рис. 2.1) [85].

Використовуючи експериментальні дані [237], отримані протягом сезону вирощування рослин, проведено опис впливу факторів життєзабезпечення на основні показники якості розвитку рослин із застосуванням стандартної методики, в основу якої покладено метод

найменших квадратів. Таким чином були отримані у явному вигляді такі рівняння регресії впливу температури повітря та інтенсивності світла на:

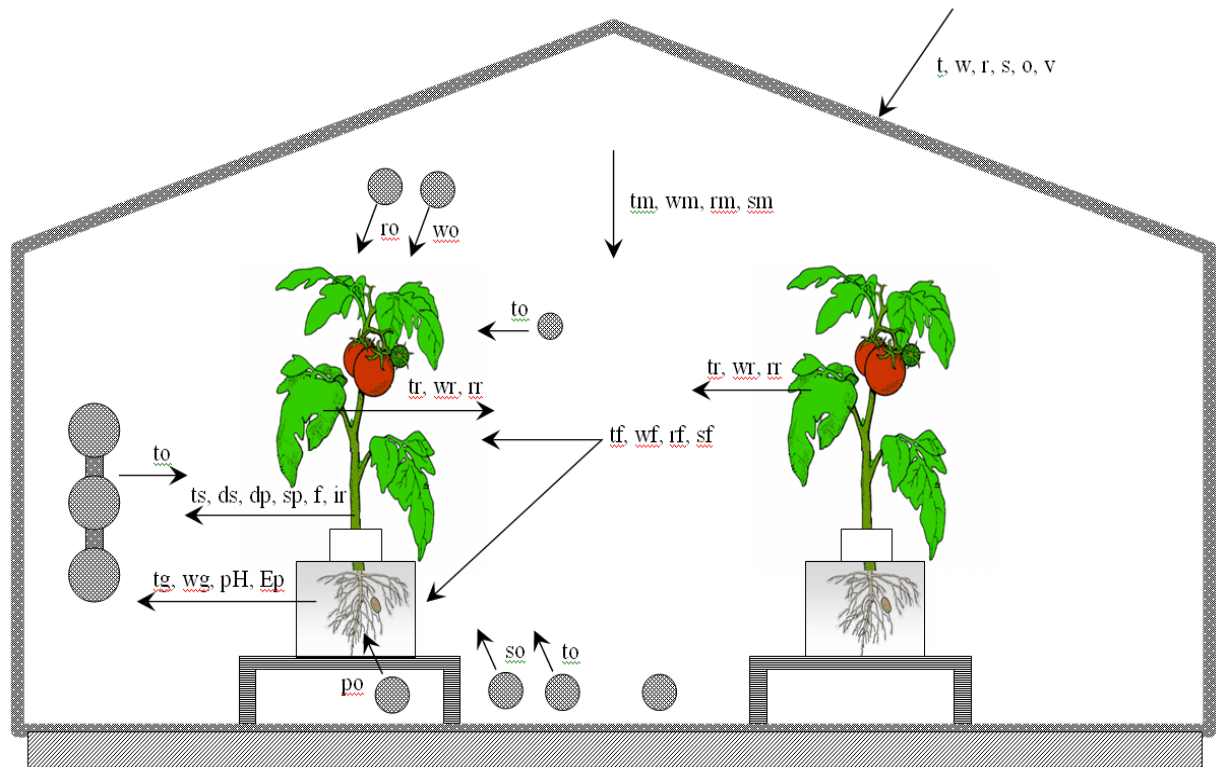


Рис. 2.1. Схема потоків параметрів атмосфери в теплиці: - кліматичні показники:

t – температура, w – вологість, r – сонячна радіація, s – вуглекислий газ, o – опади, v – швидкість вітру; - мікрокліматичні показники: tm – температура, wm – вологість, rm – сонячна радіація, sm – вуглекислий газ; - фітокліматичні показники: tf – температура, wf – вологість, rf – сонячна радіація, sf – вуглекислий газ; - фітотетричні показники: ts – температура листа рослини, ds – діаметр стебла рослини, dp – розміри плоду рослини, sp – стиглість плоду рослини, f – фотосинтез рослини, ir – інтенсивність руху соку рослини, tg – температура ґрунту, wg – вологість ґрунту, pH – рівень pH в розчині, Ep – електропровідність розчину, po – живильний розчин; - параметри, що впливають на розвиток рослини: tr – температура, яку випромінює рослина, wr – вологість, яку виділяє рослина, rr – радіаційне випромінювання від рослини, tr – температура повітря від системи опалення, wo – вологість від системи зволоження повітря, ro – електродосвічування і електроосвітлення, so – вуглекислий газ від системи підживлення рослин.

- формування рослиною кількості квіточок у суцвітті:

$$K1(L \cdot \Theta) = 11,875 - 0,125 \cdot \Theta - 5,2643 \cdot L - 0,01234 \cdot L \cdot \Theta^2 + 0,48125 \cdot L \cdot \Theta + 0,786184 L^2 - 0,07 \cdot L^2 \cdot \Theta + 0,001711 \cdot L^2 \cdot \Theta^2; \quad (2.4)$$

- кількість плодів на гілці:

$$K2(L \cdot \Theta) = 5,94375 - 0,08125 \cdot \Theta + 0,258117 \cdot L - 0,00057 \cdot L \cdot \Theta^2 + 0,035313 \cdot L \cdot \Theta + 0,040352 \cdot L^2 - 0,00388 \cdot L^2 \cdot \Theta + 0,000362 \cdot L^2 \cdot \Theta^2; \quad (2.5)$$

- середню вагу плоду:

$$K3(L \cdot \Theta) = 136,667 - 5 \cdot \Theta - 62,058 \cdot L - 0,06743 \cdot L \cdot \Theta^2 + 4,7375 \cdot L \cdot \Theta + 5,72281 \cdot L^2 - 0,35 \cdot \Theta \cdot L^2 + 0,003684 \cdot L^2 \cdot \Theta^2; \quad (2.6)$$

- приріст ваги плоду:

$$K5(L \cdot \Theta) = 17,5 + 2,5 \cdot \Theta - 45,821 \cdot L - 0,06456 \cdot L \cdot \Theta^2 + 2,76562 \cdot L \cdot \Theta + 2,88207 \cdot L^2 + 0,00625 L^2 \cdot \Theta + 0,000493 \cdot L^2 \cdot \Theta^2, \quad (2.7)$$

де  $\Theta$  – середньодобова температура повітря в теплиці,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $L$  – інтенсивність сонячної радіації,  $\text{мДж}/\text{м}^2$  за добу.

Оцінка якості розвитку рослин у період цвітіння характеризується кількістю квіточок у суцвітті. Оцінка якості розвитку рослин у період дозрівання плоду характеризується вагою плоду. Оцінка якості розвитку рослин у період збирання томатів характеризується кількістю плодів на гілці, діаметром плодів та ступенем їхньої зрілості. На (рис. 2.2–2.5) представлено змодельовані залежності впливу середньодобової температури повітря та інтенсивності світла на формування рослиною кількості квіточок у суцвітті; кількість плодів на гілці; середню вагу плоду; приріст ваги плоду.

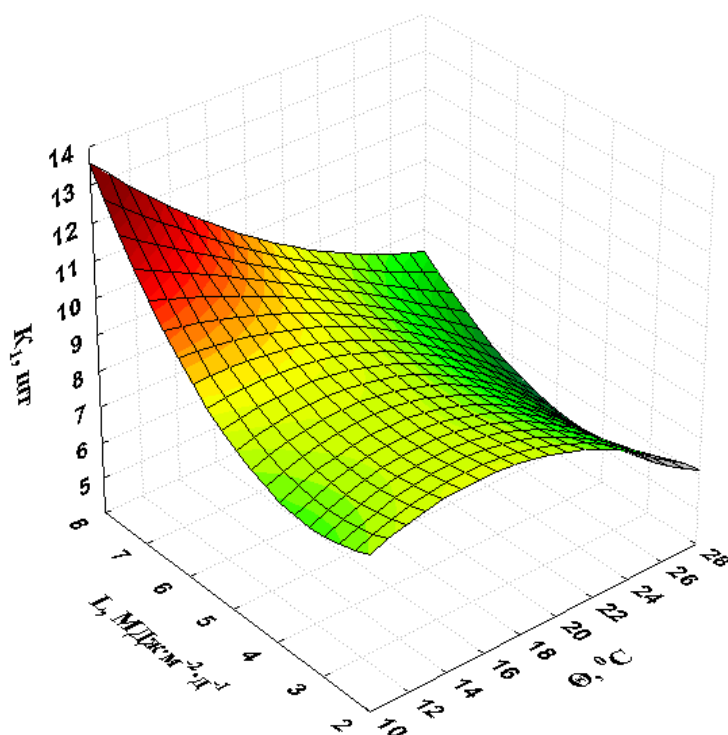


Рис. 2.2. Залежності впливу середньодобової температури повітря та інтенсивності світла на формування рослиною кількості квіточок у суцвітті

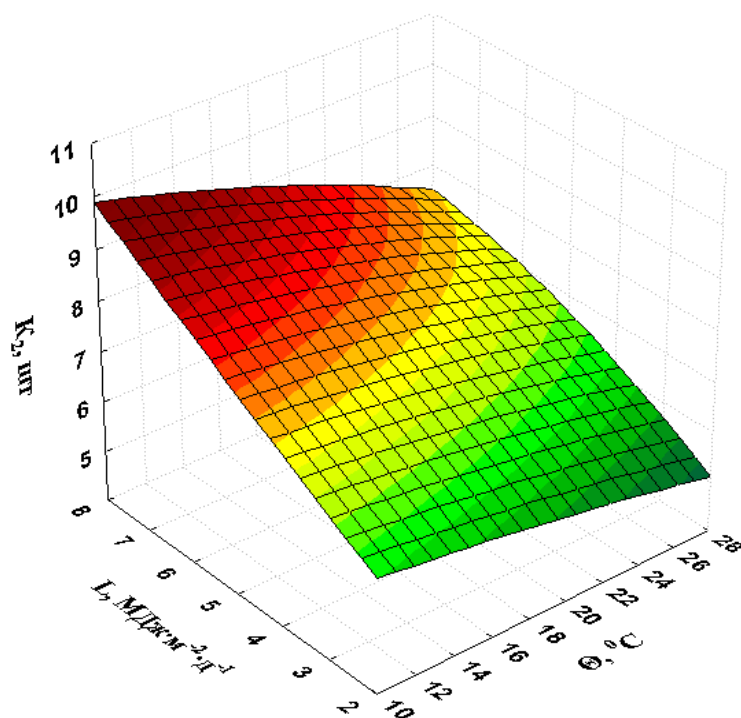


Рис. 2.3. Залежності впливу середньодобової температури повітря та інтенсивності світла на кількість плодів на гілці

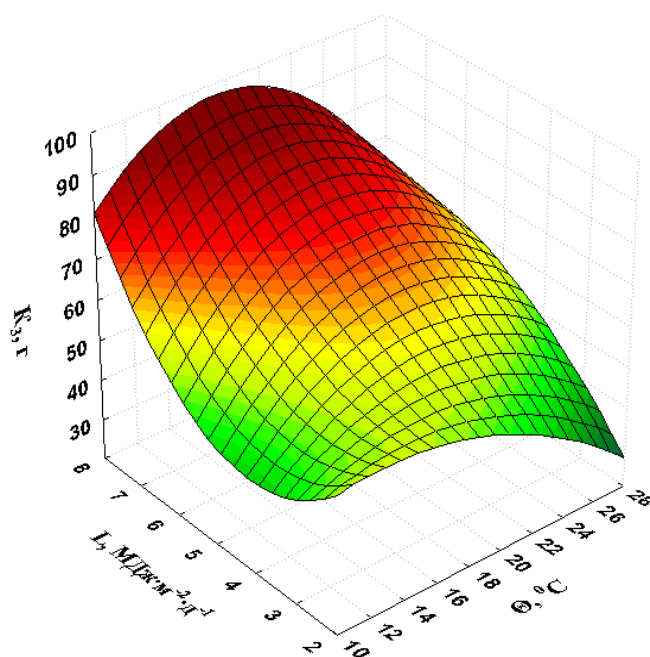


Рис. 2.4. Залежності впливу середньодобової температури повітря та інтенсивності світла на середню вагу плоду

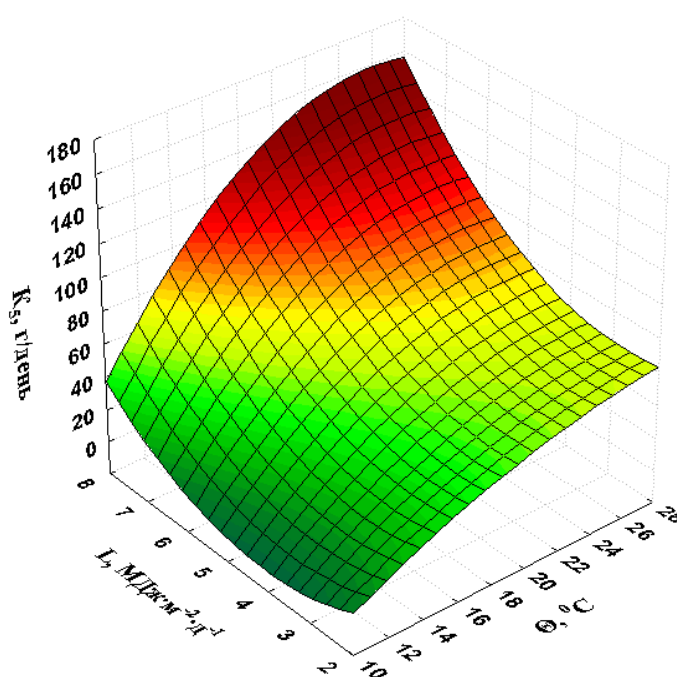


Рис. 2.5. Залежності впливу середньодобової температури повітря та інтенсивності світла на приріст ваги плоду

Отримані рівняння регресії дають змогу прогнозувати врожайність та якість розвитку рослини, враховуючи рівень впливу факторів навколишнього

середовища. При цьому коефіцієнти моделі постійно треба корегувати під час кожної зміни характеристик біологічного об'єкта (для томатів це сорт).

### **2.3. Визначення основних факторів життєзабезпечення рослини та їх оптимізація за допомогою генетичних алгоритмів**

У процесі формування врожаю відповідної якості на рослину впливає низка абіотичних факторів, на забезпечення яких витрачаються енергетичні ресурси. Це фактори екологічні, не спричинені діяльністю живих організмів: температура та вологість повітря; сонячна радіація; рівень вуглекислого газу; забезпеченість поживними речовинами; температура й вологість ґрунту; швидкість руху повітря. Враховуємо, що кожен із цих факторів є досить складним і багатокомпонентним, а одночасне їх поєднання утворює дуже складну систему, що зумовлює формування врожаю в цілому [85]. Для того, щоб встановити значимість енергетичного забезпечення головних і другорядних факторів відносно загального споживання енергетичних ресурсів, слід визначити, скільки з них необхідно обов'язково прийняти в розрахунок для подальшого їх врахування системою керування з метою реалізації відповідних стратегій.

Для визначення основних абіотичних факторів, що впливають на якісний розвиток рослин, у промисловій теплиці протягом 250 діб проводився пасивний експеримент, також опрацьовувалися журнали обліку природних збурень (потік сонячної радіації і температура повітря) та споживання енергетичних ресурсів. Дані, отримані на виробництві, записувались у базу даних та були представлені у вигляді статистичного набору образів, що описують поточний стан абіотичних факторів за виділеними вхідними параметрами. Вихідним параметром обрано енергетичний рівень забезпечення фактора на загальне споживання енергетичних ресурсів.

Оскільки прогноуюча модель містить декілька змінних на вході, прогнозування слід проводити методом часових рядів декількох змінних. Донедавна основними методами прогнозування часових рядів залишалися статистичні методи. Однак вони не можуть прогнозувати складні процеси впливу за наявності багатьох чинників у зв'язку з нелінійністю моделі даних. Водночас доведено, що фактично всі моделі класичного статистичного аналізу даних можуть бути реалізовані за допомогою нейронних мереж, оскільки певна залежність із безперервною нелінійною функцією може бути відтворена багатошаровою мережею [133, 277]. Тобто, замість того, щоб відображати поверхню у вхідному просторі, утворену даними за допомогою однієї або декількох гіперплощин, нейронна мережа може здійснити її довільне нелінійне відображення.

Отже, для визначення основних факторів, що впливають на якість розвитку рослини та врожаю, використаємо нейронні мережі (НМ). Об'єкт досліджень – багатопараметричний, тобто характеризується великим числом змінних, як наслідок, великим простором пошуку, що не дає можливості перебрати всі рішення за короткий час. Відомо, що через величезну розмірність іноді краще просто знехтувати деякими вхідними параметрами НМ, у тому числі й тими, що несуть незначущу інформацію системі керування, аби хоч якось зменшити кількість вхідних змінних, а значить і складність завдання та розмір НМ. У результаті виникає завдання зменшити розмірність вхідних даних так, щоб інформація описувалася меншою кількістю змінних.

У програмному середовищі ST Neural Networks провели статистичний аналіз даних [88], отриманих на виробництві для визначення чутливості прогнозованої вагомості фактора від вхідних параметрів (рис. 2.6).

Ранг вхідних параметрів має такий вигляд:

- 1 – температура повітря (Var8);
- 2 – поживні речовини (Var6);
- 3 – вологість повітря (Var5);

- 4 – вуглекислий газ (Var7);
- 5 – сонячна радіація (Var4);
- 6 – вологість ґрунту (Var1);
- 7 – температура ґрунту (Var2);
- 8 – швидкість руху повітря (Var3).

Анализ чувствительности - 1-5 (Оптим.простору.sta)								
	Var1	Var2	Var3	Var4	Var5	Var6	Var7	Var8
Отношение.1					12,79382		3,913336	28,5330
Ранг.1					2,00000		3,000000	1,0000
Отношение.2	1,034606			15,79252	65,99232	1,005392	1,637374	229,9658
Ранг.2	5,000000			3,00000	2,00000	6,000000	4,000000	1,0000
Отношение.3	1,190829	1,014482	1,036563	15,88640	65,98194	1,037872	1,447548	230,7405
Ранг.3	5,000000	8,000000	7,000000	3,00000	2,00000	6,000000	4,000000	1,0000
Отношение.4	1,120568	1,098569	1,099146	1,16539	1,11433	2,301631	1,102847	6,3684
Ранг.4	4,000000	8,000000	7,000000	3,00000	5,00000	2,000000	6,000000	1,0000
Отношение.5	1,250042	1,211633	1,138338	1,45600	1,66125	2,655918	1,659940	11,3586
Ранг.5	6,000000	7,000000	8,000000	5,00000	3,00000	2,000000	4,000000	1,0000

Рис. 2.6. Аналіз чутливості вхідних параметрів моделі прогнозування

За аналізом чутливості вхідних параметрів неможливо чітко визначити чутливість вхідних параметрів моделі прогнозування, тому скористаємося генетичним алгоритмом. Для встановлення рівня забезпечення енергетичними ресурсами головних і другорядних факторів повною гарантією того, що вхідні дані вибрані найкращим чином, є перебір всіх можливих варіантів обраних вхідних наборів даних. Оскільки генетичні алгоритми виконують велику кількість експериментів із різними комбінаціями вхідних даних, це зумовило можливість їх застосування під час вирішення оптимізаційної задачі простору вхідних параметрів [71, 181].

Особливістю генетичних алгоритмів є те, що вони моделюють природну еволюцію в просторі параметрів, що оптимізуються, а не в просторі параметрів алгоритму пошуку [132]. Задача оптимізації виникає тоді, коли існує набір внутрішніх параметрів  $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , що може приймати безліч різних значень  $x \in D$ , де  $D$  – область пошуку. Водночас вихідні параметри



$\bar{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ , що характеризують якісні показники роботи об'єкта, є залежними змінними від допустимих рішень  $\bar{x} \in D$  [142, 155].

Задача оптимізації формулюється на основі використання критерію:

$$Q^* = Q(\bar{x}^*) = \max_{x \in D}(\min)Q(\bar{x})^*, \quad (2.8)$$

де  $Q$  – критерій оптимальності;  $\bar{x}^*$  – оптимальний розв'язок;  $Q^* = Q(\bar{x}^*)$  – найменше значення критерію оптимальності (контрольної похибки) серед усіх його значень в області  $D$ .

Найменшою неподільною одиницею генетичного алгоритму є особа  $a_k^t$ , де  $k$  – номер особи,  $t$  – момент часу процесу еволюції. Оскільки вектор керуючих змінних  $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – це найменша неподільна одиниця, що характеризує в екстремальній задачі однокритеріального пошуку (2.8) внутрішні параметри на кожному  $t$ -му кроці пошуку оптимального рішення, то як аналог особи  $a_k^t$  приймемо довільний допустимий розв'язок  $\bar{x} \in D$ . Кожна особа характеризується  $n$  генами, а структура – строками [249]:

$$s(\bar{x}) = (s_1, s_2, \dots, s_n) \quad (2.9)$$

Рівняння (2.9) можна вважати хромосомою, що має  $n$  з'єднаних між собою генів, які йдуть один за одним у строго визначеній послідовності. Хромосома особи  $a_k^t$  позначається як  $x_k^t$ , тобто:

$$x_k^t = x(a_k^t) = (x_1(a_k^t), x_2(a_k^t), \dots, x_n(a_k^t)) = s(\bar{x}) = (s_1, s_2, \dots, s_n). \quad (2.10)$$

Місце розташування певного гена в хромосомі називається локусом, альтернативні форми одного й того ж гена, які розташовані в однакових локусах хромосоми, називаються алелями, тобто алелі є аналогами множини значень керуючих змінних. У завданні пошуку  $i$ -й локус відповідає  $i$ -й позиції у строковому кодуванні  $s(\bar{x})$ , а вираз  $s(\bar{x}) \in S$  відповідає розв'язку

початкової задачі оптимізації  $\bar{x} \in D$ , водночас кінцева множина всіх можливих генотипів утворює генофонд, що в завданні пошуку співпадає з простором пошуку  $S$  [70].

Використовуючи критерій оптимальності  $Q$ , одержимо функцію належності  $\mu(a_k^t)$  особи  $a_k^t$ , між тим величина  $\mu(a_k^t)$  прямо пропорційна величині критерію  $Q$ . Отже, мета еволюційного розвитку особин зводиться до визначення такого генотипа, що належить генофонду  $S$ , який забезпечує найбільшу пристосованість до зовнішнього середовища [70].

Сукупність особин  $(a_1^t, a_2^t, \dots, a_n^t)$ , що належить області пошуку  $D$ , утворює популяцію  $P^t$ , де  $v$  – число, що характеризує кількість особин, які утворюють популяцію.

У часі популяції  $P^t$  складаються з дискретних, що не перекриваються між собою, віддалених у родинному відношенні від загальних предків поколінь, тобто кожне наступне покоління  $P^{t+1}$  є сукупністю з  $n$  особин, які відбираються тільки з особин попереднього  $t$ -го покоління. Тобто під еволюцією розуміється чергування поколінь, у процесі якого особи змінюють свої варіабельні ознаки так, щоб кожна наступна популяція забезпечувала більше середнє значення функції належності до популяції  $P^t$  [70]:

$$\mu_{cp}(t) = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^v \mu(a_i^t). \quad (2.11)$$

Сукупність із  $v$  генотипів всіх особин  $(a_1^t, a_2^t, \dots, a_n^t)$ , що утворюють популяцію  $P^t$ , складає хромосомний набір  $(x_1^t, x_2^t, \dots, x_n^t)$ , що містить генетичну інформацію про популяцію  $P^t$  у цілому.

Як вже зазначалося, у процесі еволюції хромосомний набір популяції змінюється, що забезпечується природними механізмами спадковості, мінливості та природного відбору. Метою генетичного пошуку є пошук особини з найбільшою функцією належності. Генетичний алгоритм, моделюючи природні механізми, забезпечує еволюцію популяції від покоління до покоління, а його робота являє собою ітераційний процес, що

продовжується доти, доки не виконаються задане число поколінь або будь-який інший критерій зупинки [133, 202].

Від традиційних методів оптимізації генетичні алгоритми відрізняються тим, що [132]:

- працюють не зі значеннями параметрів задачі, а з їх закодованою формою;
- здійснюють пошук рішення не з єдиної вихідної точки, а відштовхуючись від деякої популяції (операції на популяції);
- використовують лише цільову функцію, а не її похідні або іншу допоміжну інформацію (використання мінімальної інформації про задачу – це непотрібна інформація про поведінку функції);
- застосовують ймовірнісні, а не детерміновані правила вибору (рандомізація операцій);
- генетичні алгоритми можна застосовувати до задач, які раніше розв’язувалися лише повним комбінаторним перебором або лише за допомогою нейронних мереж, а також до раніше нерозв’язних задач.

Генетичний алгоритм відбору входних даних (Genetic Algorithm Input Selection) пакету ST Neural Networks реалізує автоматизований підхід до вибору вагомих входних даних [45, 88]. Кожен можливий варіант набору входних змінних можна подати у вигляді бітової маски, де нуль у відповідній позиції означає, що входна змінна не включена до входного набору, а одиниця – що включена. Таким чином, маска являє собою рядок бітів, по одному на кожну можливу входну змінну, і генетичний алгоритм оптимізує такий бітовий рядок. Алгоритм оцінює кожний із рядків бітової маски за контрольною похибкою, за значенням якої відбувається відбір кращих варіантів, що комбінуються один з одним за допомогою штучних генетичних операцій: схрещування та мутації (випадкових змін окремих бітів) [181].

Оскільки в поставленій задачі бажано мати якомога менше входних змінних, навіть внаслідок деякого збільшення похибки, в алгоритм пропонується включити штраф, що буде добавлятися до похибки у разі появи

кожної нової змінної. За використання методу головних компонент для зменшення розмірності виникла проблема в тому, що він може відстежувати лише лінійні напрями максимальної варіації, тому було обрано нелінійний підхід до аналізу головних компонент за допомогою асоціативних мереж. Також була обрана елітна стратегія зміни поколінь, яка відрізняється від звичайної тим, що гарантує збереження на кожному  $t$ -му кроці єдиної найкращої особи (рис. 2.7).

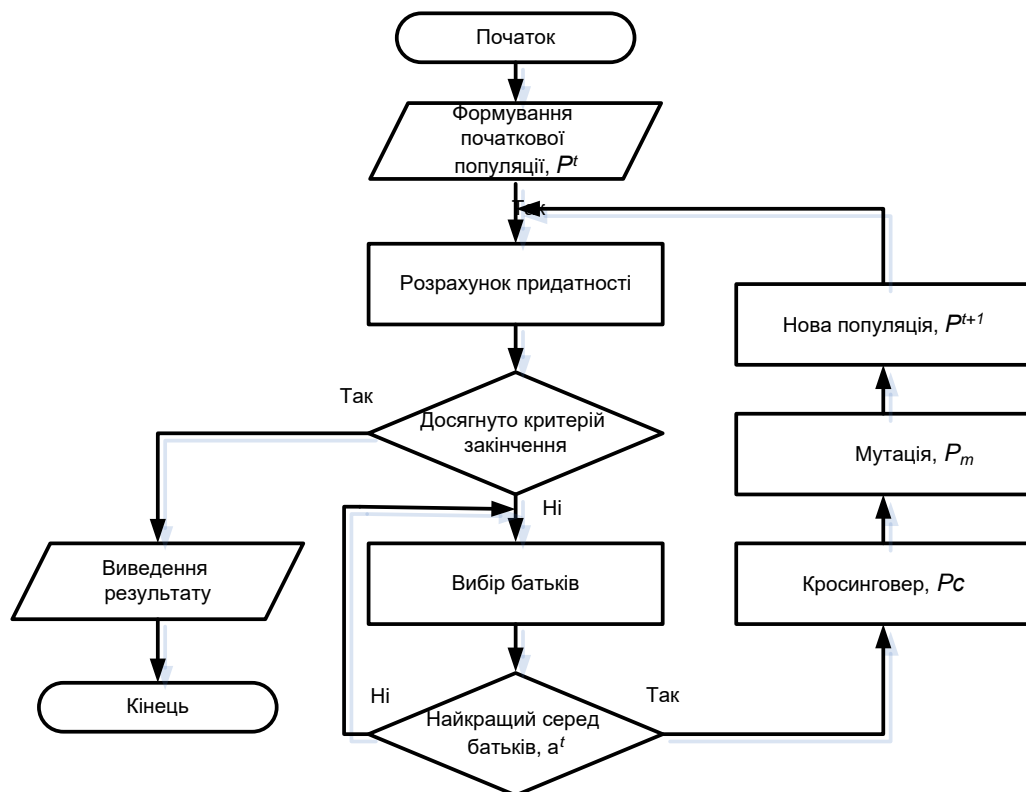


Рис. 2.7. Алгоритм роботи генетичного алгоритму з елітною стратегією зміни поколінь

Схема роботи алгоритму така: обирається випадковий набір бітів (рядок), що відповідає кожному входу та показує, чи враховувати відповідну вхідну змінну, оцінюється ступінь належності (якість отриманого розв'язку). Потім за допомогою штучних генетичних операцій з рядків із більшою функцією належності формується нова популяція і весь процес



Опрацювання експериментальних даних проводили в Genetic Algorithm Input Selection пакету ST Neural Networks, що реалізує автоматизований підхід до вибору вагомих вхідних даних за аналогією, встановивши вісім входів та один вихід (рис. 2.8) [88], де Var1 – швидкість руху повітря; Var2 – температура ґрунту; Var3 – вологість ґрунту; Var4 – сонячна радіація; Var5 – вуглекислий газ; Var6 – вологість повітря; Var7 – поживні речовини; Var8 – температура повітря.

	Исчерпывающее оценивание (Оптим.простору.sta)								
	Ошибка	Var1	Var2	Var3	Var4	Var5	Var6	Var7	Var8
1.230	0,229693	Да	Да	Да	-	-	Да	-	Да
1.231	0,230258	Да	Да	Да	-	-	Да	Да	-
1.232	0,229404	Да	Да	Да	-	-	Да	Да	Да
1.233	0,230449	Да	Да	Да	-	Да	-	-	-
1.234	0,229581	Да	Да	Да	-	Да	-	-	Да
1.235	0,230161	Да	Да	Да	-	Да	-	Да	-
1.236	0,229322	Да	Да	Да	-	Да	-	Да	Да
1.237	0,230256	Да	Да	Да	-	Да	Да	-	-
1.238	0,229402	Да	Да	Да	-	Да	Да	-	Да
1.239	0,229972	Да	Да	Да	-	Да	Да	Да	-
1.240	0,229147	Да	Да	Да	-	Да	Да	Да	Да
1.241	0,230472	Да	Да	Да	Да	-	-	-	-
1.242	0,229587	Да	Да	Да	Да	-	-	-	Да
1.243	0,230166	Да	Да	Да	Да	-	-	Да	-
1.244	0,229310	Да	Да	Да	Да	-	-	Да	Да
1.245	0,230277	Да	Да	Да	Да	-	Да	-	-
1.246	0,229405	Да	Да	Да	Да	-	Да	-	Да
1.247	0,229975	Да	Да	Да	Да	-	Да	Да	-
1.248	0,229132	Да	Да	Да	Да	-	Да	Да	Да
1.249	0,230164	Да	Да	Да	Да	Да	-	-	-
1.250	0,229308	Да	Да	Да	Да	Да	-	-	Да
1.251	0,229892	Да	Да	Да	Да	Да	-	Да	-
1.252	0,229065	Да	Да	Да	Да	Да	-	Да	Да
1.253	0,229973	Да	Да	Да	Да	Да	Да	-	-
1.254	0,229130	Да	Да	Да	Да	Да	Да	-	Да
1.255	0,229706	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	-
1.256	0,228890	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да
Конечный	0,228765	-	-	-	Да	Да	Да	Да	Да

Рис. 2.8. Результат оптимізації простору входів (Statistica Neural Networks)

Алгоритм оцінює кожний із наборів вхідних даних за контрольною похибкою, за значенням якої відбувається вибір найкращих варіантів, що комбінуються між собою за допомогою штучних генетичних операцій: схрещування та мутації. З отриманих результатів (рис. 2.8) можна зробити висновок, що не всі вхідні параметри, вибрані для оцінки рівня якості розвитку рослин, значимі щодо оптимізації простору входів. Водночас значущість чинників, виходячи з робочої похибки за подачі на вхід усіх параметрів, перевищує похибки оптимізованого простору входів Var4 – Var8.

Отже, для побудови нейронної мережі доцільним є використання дослідних даних Var4 – Var8 із рангом чутливості споживання енергетичних ресурсів від вхідних параметрів 1–5.

З рисунків поверхні відгуку між вхідними параметрами та вихідним (рис. 2.9 – 2.11) впливає очевидний нелінійний взаємозв'язок між параметрами.

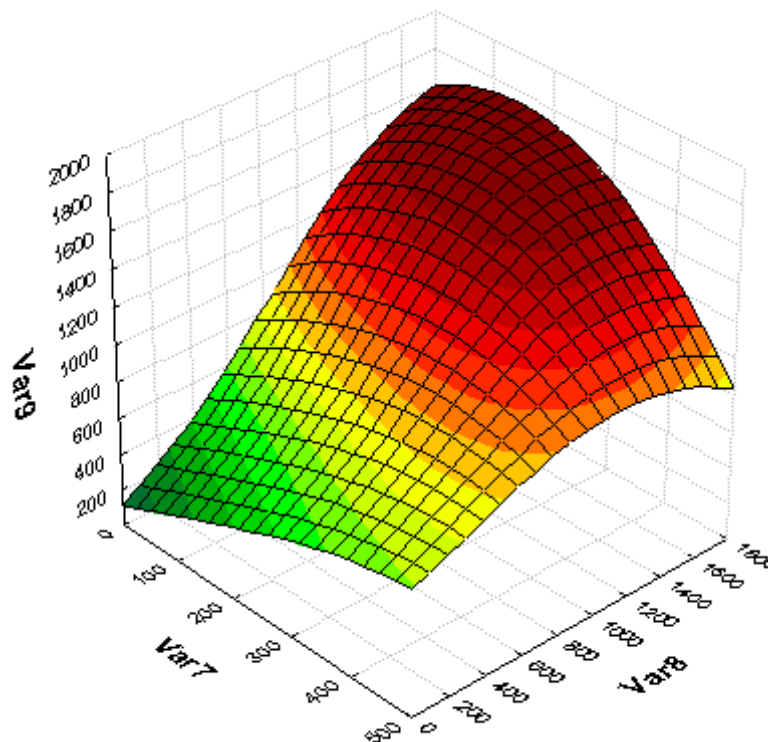


Рис. 2.9. Поверхні відгуку загального споживання енергетичних ресурсів на забезпечення технології виробництва рослинної продукції і споживанням енергетичних ресурсів відповідними системами керування поживними речовинами і температурою повітря

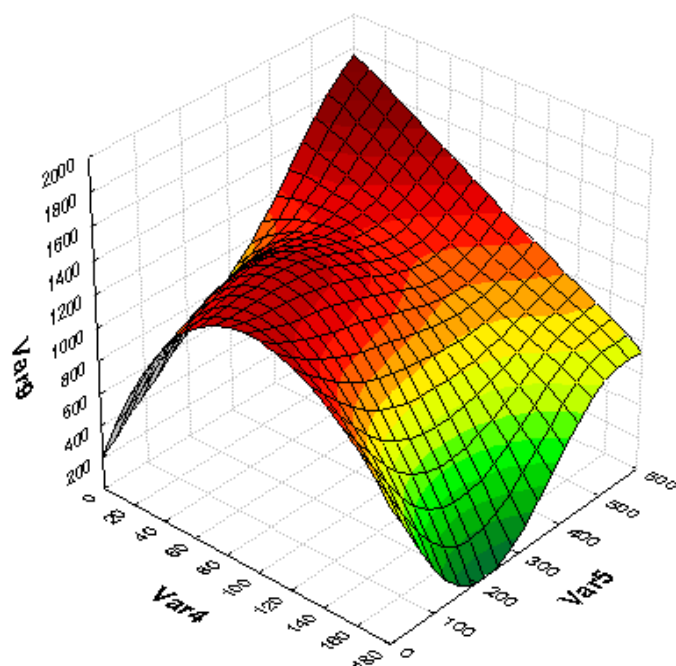


Рис. 2.10. Поверхні відгуку загального споживання енергетичних ресурсів на забезпечення технології виробництва рослинної продукції і споживанням енергетичних ресурсів відповідними системами керування світлом і вуглекислим газом

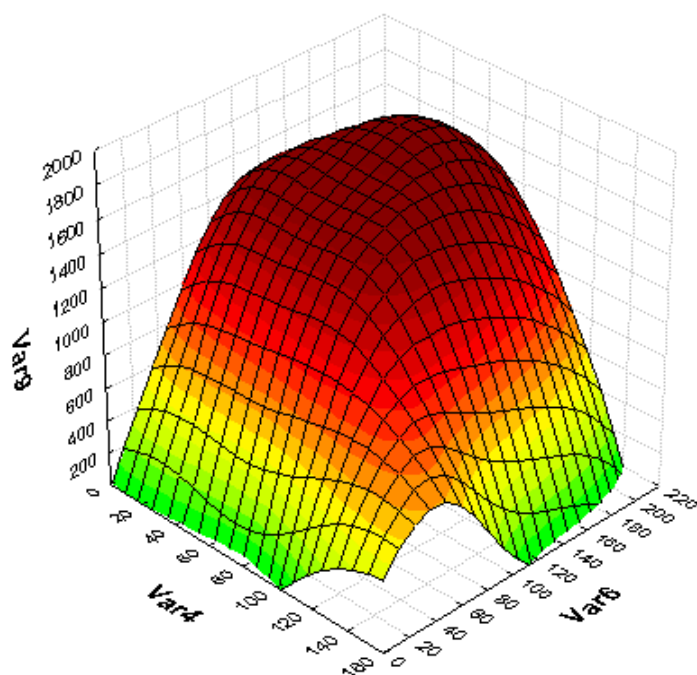


Рис. 2.11. Поверхні відгуку загального споживання енергетичних ресурсів на забезпечення технології виробництва рослинної продукції і споживанням енергетичних ресурсів відповідними системами керування світлом і вологістю повітря



## 2.4. Математичні моделі впливу факторів життєзабезпечення рослин на якість врожаю

Розглядаючи поняття врожай  $Y$ , не можна випускати з уваги принцип лімітуючих факторів, оскільки він полегшує реалізацію фізичного або комбінованого методу дослідження вирощування рослини. Виходячи з конкретних обставин, що впливають на врожайність, способу вирощування, виду рослини, погодно-кліматичного впливу, необхідно провести оцінку співвідношення значимості головних і другорядних чинників врожайності [85].

Оцінка врожайності культури з заданими генетичними якостями зводиться до вирішення рівняння виду:

$$Y = f(m, \beta, p, r, s), \quad (2.12)$$

де  $m$  – світлозабезпечення,  $\beta$  – вологозабезпечення,  $p$  – теплозабезпечення,  $r$  – забезпечення поживними речовинами,  $s$  – газозабезпечення.

Кожен із названих факторів являє собою дріб, у знаменнику якого значиться все надходження до теплиці означеного виду фактора, а в чисельнику – та його частина, яка за вирахуванням всіх витрат, тобто незасвоєна частина фактора, залишається в системі, використовується нею та йде на формування режимів тепла, вологи, світла, поживних речовин і вуглекислоти, тобто режимів зовнішнього середовища, що визначають характер і стан сільськогосподарської культури на кожній стадії її розвитку [85, 263]. Структура всіх факторів така, що вони змінюються в межах від нуля до одиниці, і зменшення одного з факторів спричинює зменшення врожайності в цілому, за принципом дії закону мінімуму.

Закон мінімуму свідчить про те, що всі фактори врожайності однаково потрібні рослинам і не можуть замінити один одного [85]. За відсутності або

нестачі одного з них різко знижується врожайність. Тому необхідно забезпечити рослини усіма без винятку умовами для росту і врожайності, враховуючи також їх взаємодію. Тільки створенням для рослин необхідних умов можна забезпечити зростання врожайності.

Для оцінки того, скільки кожний зв'язок системи рослина-субстрат-повітря отримує вологи, тепла, вуглекислого газу тощо, потрібно ввести і дослідити баланси – теплові, радіаційні, водні, вуглекислотні, сольові. Однак поняття балансу часто застосовується неоднозначно. Вивчають баланс радіаційний, тепловий, водний на поверхні однієї з двох складових (субстрат або рослина) трискладової системи. Кожен із цих балансів занадто складний і формується з низки компонентів, що ускладнює аналіз факторів врожайності. Тому, якщо потрібно використовувати поняття балансу, то в такій формі, яка дала б змогу одним параметром характеризувати найважливішу сторону обмінних процесів і притому віднести його до всієї системи в цілому. Таким параметром може стати акумулятивна частина всіх факторів, тобто частина, що утилізована системою рослина-субстрат-повітря. У цьому розумінні такий параметр являє собою відношення тієї частини чинників, яка використовується системою, до всієї величини чинників, які до неї надходять [85]. Це відношення назовемо рівнем життєзабезпечення рослини в системі рослина-субстрат-повітря.

Світлозабезпечення – неодмінна умова існування рослин, під її впливом відбувається процес фотосинтезу, в ході якого рослини з вуглекислого газу, води і мінеральних речовин ґрунту синтезують первинні органічні речовини, виділяючи в атмосферу кисень. Сонячне світло створює освітленість, яка характеризується сумарною дією прямої, розсіяної і відбитої радіації. Розподіл сонячного світла в теплиці представлено на (рис. 2.12). Освітленість пропорційна інтенсивності сонячної радіації, світлозабезпечення  $m$  може бути записано як [153]:

$$m = \frac{R^{(n)}}{R}, \quad (2.13)$$

де  $R^{(n)}$  – частина радіації, що досягає поверхні ґрунту за наявності рослинного шару;  $R$  – вся радіація, що може досягти поверхні ґрунту.

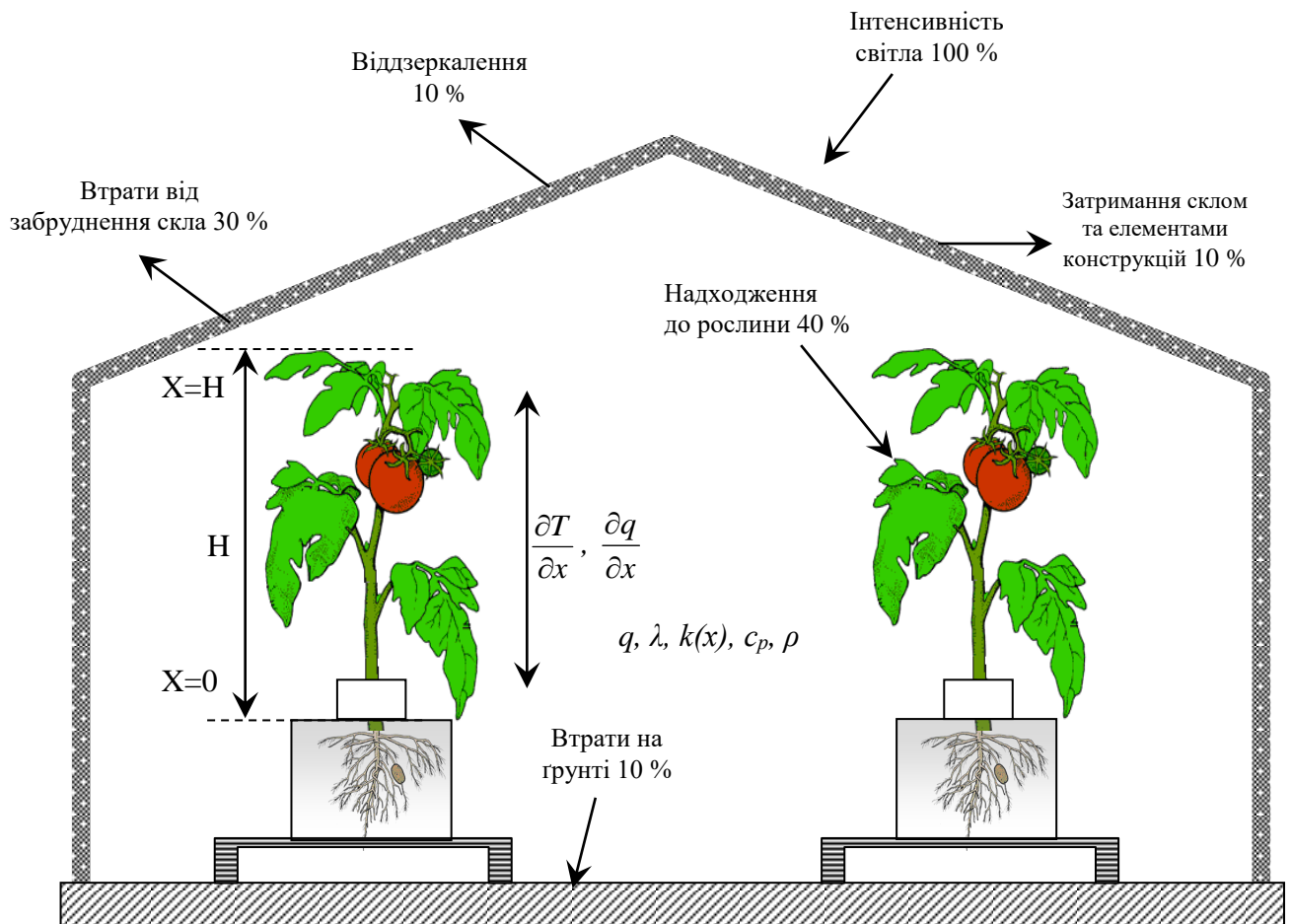


Рис. 2.12. Розподіл сонячного світла в теплиці

З усього впливу сумарної радіації, що потрапляє на поверхню ґрунту, частина її в кількості  $R^{(n)}$  досягає поверхні ґрунту за наявності рослинного шару. Таким чином, на частку рослин та міжрослинного шару повітря, висотою від верхівок рослин  $H$  до поверхні ґрунту, надходить  $R^{(H)} = R - R^{(n)}$  або частина її від величини  $R$ , що дорівнює  $m$ . Значення величини  $R^{(n)}$ , що утилізується ґрунтом, змінюється в межах  $m=0..1$ . Якщо  $m = 0$ , то рослини

настільки розвинені, що своєю суцільною масою не пропускають жодної частини променевої енергії, яка дійшла б до поверхні ґрунту. І навпаки, при  $m = 1$  через рідку і малорозвинену рослинність вся величина  $R$  досягає ґрунту [153].

Запишемо величину  $m$  інакше:

$$m = \frac{R^{(n)}}{R^{(H)} + R^{(n)}}. \quad (2.14)$$

Оскільки весь радіаційний баланс  $R$  складається з частини радіації, що досягає поверхні ґрунту, і залишку, то  $R^{(H)}$  формується на висоті крон рослин  $H$  [49, 153]. Введемо інший коефіцієнт  $m_1 = 1 - m$ , який, навпаки, показує своїм зростанням від 0 до 1 збільшення густини рослинності від повної розрідженості до повної загущеності рослин, отримаємо :

$$m_1 = \frac{R^{(H)}}{R}. \quad (2.15)$$

Запишемо кожен елемент  $R$  (як  $R^{(n)}$ , так і  $R^{(H)}$ ) у розгорнутому вигляді [153, 206]:

$$R^{(n)} = \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} + c_p \rho \kappa(x) \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} + L \rho \kappa(x) \left. \frac{\partial q}{\partial x} \right|_{x=0}; \quad (2.16)$$

$$R^{(H)} = -c_p \rho \kappa(x) \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=H-0} + c_p \rho \kappa(x) \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=H+0} - L \rho \kappa(x) \left. \frac{\partial q}{\partial x} \right|_{x=H-0} + L \rho \kappa(x) \left. \frac{\partial q}{\partial x} \right|_{x=H+0} + R^{(n)}, \quad (2.17)$$

де  $T$  – температура системи ґрунт–повітря поздовж координати  $x$ , додатні значення якої направлені в сторону повітря  $x > 0$ , а від’ємні в сторону ґрунту  $x < 0$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $q$  – абсолютна вологість повітря,  $\text{г/м}^3$ ;  $\frac{\partial T}{\partial x}$  і  $\frac{\partial q}{\partial x}$  – вертикальні градієнти температури і вологості повітря;  $H$  – висота рослин,  $\text{м}$ ;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності ґрунту;  $k(x)$  – коефіцієнт турбулентності;  $c_p$ , – теплоємність повітря,  $\text{Дж/кг}\cdot^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho$  – щільність повітря,  $\text{кг/м}^3$ .

(2.16) – рівняння рівня радіації на поверхні ґрунту  $X = 0$ , (2.17) – рівняння теплового балансу на висоті крон рослин  $X = H$ . Рівняння відображає той факт, що значення величини радіації на рівні  $H$  являє собою алгебраїчну суму стрибків потоків тепла турбулентності і випаровування [44]. Рослина немовби обумовлює виникнення розриву у величинах потоків турбулентного тепла і вологи, викликаного випаровуванням. Ефект від цього розриву, як показує досвід, буде максимальним на верхньому рівні крон рослин [17, 153].

Другий фактор – вологозабезпечення, являє собою дріб, знаменник якого становить весь приплив вологи до рослини, що складається з поливу  $O$ , вертикального фільтраційного потоку  $F \uparrow$  (знизу вгору) і початкового запасу вологи в ґрунті  $W$ . Чисельник цього дробу – це сума параметрів: всієї вологи, яка, проходячи через систему, витрачається на сумарне випаровування  $U$ ; горизонтального скидання  $C$  і вертикальної фільтрації  $F \downarrow$  (зверху вниз), таким чином [85]:

$$n = \frac{U + C + F \downarrow}{W + O + F \uparrow}, \quad (2.18)$$

Загальноприйнято як коефіцієнт вологозабезпечення вважати [85]:

$$\beta = \frac{U}{U_0}, \quad (2.19)$$

де  $U$  – фактичне випаровування від рослини,  $\text{кг/м}^2 \text{ с}$ ;  $U_0$  – максимально можливе випаровування в умовах максимального надходження вологи з ґрунту в рослину,  $\text{кг/м}^2 \text{ с}$ . Встановлено, що величина  $LU_0$  (величина, виражена в теплових одиницях) з урахуванням теплового потоку в ґрунті дорівнює:

$$\beta = \frac{U}{(R - B)}, \quad (2.20)$$

де  $B$  – тепловий потік в ґрунті,  $\text{Вт/м}^2$ ;  $L$  – прихована теплота пароутворення води,  $\text{Дж/кг}$ .

Фактор  $\beta$  знаходиться набагато простіше, тому що для його визначення може бути застосований будь-який із багатьох надійних способів вимірювання сумарного випаровування, заснований або на градієнтному принципі, або на використанні рівняння теплового балансу. Поєднуючи обидва ці підходи, для величини сумарного випаровування запишемо вираз [85]:

$$U = \frac{(R - B)\Delta q}{(\Delta q + 0,48\Delta T)L}, \quad (2.21)$$

де  $\Delta q$  і  $\Delta T$  – різниці вологості й температури повітря.

При цьому коефіцієнт вологозабезпечення  $\beta$  дорівнює:

$$\beta = \frac{\Delta q}{\Delta q + 0,48\Delta T} \quad (2.22)$$

Для умов, коли випаровування  $LU_0$  (в теплових одиницях) можна вважати рівним різниці  $R - B$ .

Надходження тепла до системи рослина-субстрат-повітря зображено на (рис. 2.13).

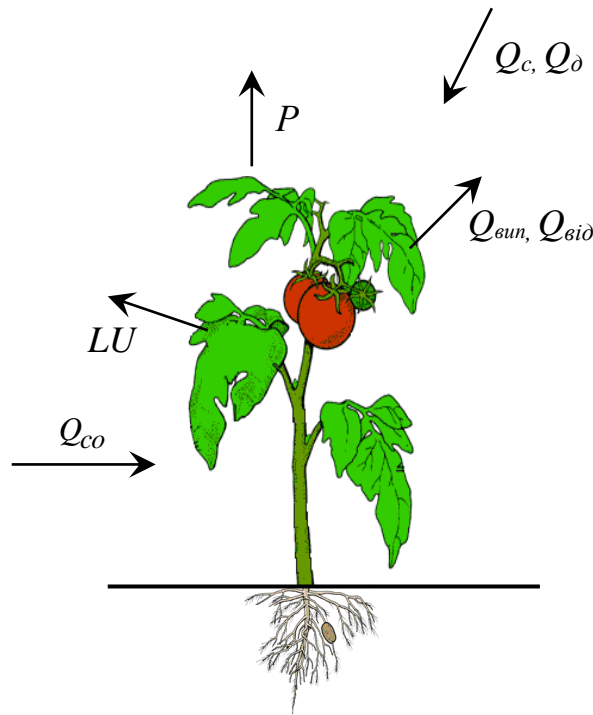


Рис. 2.13. Надходження тепла до системи рослина-грунт-повітря.

Визначимо теплозабезпечення рослин [80]:

$$p = \frac{\alpha}{\gamma} = \frac{Q_c + Q_d + Q_{co} - (LU + P + Q_{\text{вип}} + Q_{\text{від}})}{Q_c + Q_d + Q_{co}}, \quad (2.23)$$

де  $\gamma$  – весь приплив тепла до системи рослина-грунт-повітря, кВт, який складається із сумарної короткохвильової радіації  $Q_c$  і довгохвильового випромінювання атмосфери  $Q_d$ , надходження тепла від системи опалення  $Q_{co}$ ;  $\alpha$  – все тепло, що поглинається ґрунтом, рослиною і проміжним шаром повітря, що заповнює проміжки між рослинами, кВт, який складається з  $LU$  – тепла, що витрачено на сумарне випаровування від рослини,  $P$  – турбулентного потоку тепла від поверхні, за яку прийнято рівень крон рослин,  $Q_{\text{вип}}$  і  $Q_{\text{від}}$  – радіаційних потоків, обумовлених випромінюванням і віддзеркаленням тієї ж поверхні.

Розглянемо детальніше критерій  $p$ , для цього введемо поняття: теплоаккумуляція в шарі проростання рослин, що являє собою величину  $(c_v \Delta T)_v$ , де  $c_v$  – теплоємність повітряного шару між рослинами, Дж/кг·°С;  $\Delta T$

– зміна температури за період спостережень, °C;  $(c_p^p \Delta T)_p$  – теплоаккумуляція самих рослин, тому що  $c_p^p$  – теплоємність рослинної маси, Дж/кг·°C, а  $\Delta T$  у цій комбінації  $(c_p^p \Delta T)_p$  являє собою зміну температури рослин (середня температура листя різного ярусу, стебла;  $\frac{\lambda \Delta T}{\Delta x} \Big|_{x=a}$  – потік тепла в ґрунті, Вт/м², починаючи з глибини  $x=a$ ;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності ґрунту в шарі  $(a-\infty)$ . Шар ґрунту глибиною  $(0-a)$ , в якому мають місце добові коливання температури і встановлюються помітні вертикальні перепади, назвемо активним шаром ґрунту. Крім того, нехай  $(c_n \Delta T)_n$  означає зміну вмісту теплоти у верхньому шарі кореня  $(0-a)$ , що містить ґрунт і коріння рослин [80].

Таким чином, чисельник критерію  $p$  містить суму  $(c_e \Delta T)_e + (c_p^p \Delta T)_p + \frac{\lambda \Delta T}{\Delta x} \Big|_{x=a} + (c_n \Delta T)_n$ , що являє собою при відніманні з усього надходження тепла  $Q_c^{(H)} + Q_o^{(H)} + Q_{co}$  величину енергії, яка акумулюється системою рослина-ґрунт-повітря. Знаменник складається з надходження тепла до системи від різних джерел – із сумарної коротко- і довгохвильової  $Q_c^{(H)} + Q_o^{(H)}$  радіації, що надходить із атмосфери та системи опалення  $Q_{co}$  до верхнього рівня рослин [80]. Отже,

$$p = \frac{(c_p^p \Delta T)_p + (c_e \Delta T)_e + \frac{\lambda \Delta T}{\Delta x} \Big|_{x=a} + (c_n \Delta T)_n}{Q_c^{(H)} + Q_o^{(H)} + Q_{co}} \quad (2.24)$$

Наступний фактор врожайності рослини – забезпечення поживними речовинами [85]:

$$r = \frac{N + P + K + C_a}{\Pi} \quad (2.25)$$



де  $N, P, K, C_a$  – засвоєна корінням рослин у вагових одиницях кількість основних поживних елементів: азоту, фосфору, калію і кальцію, а  $\Pi$  – загальна кількість внесених добрив у всіх видах.

Звичайно, тут не враховано інші елементи, менш важливі, і це може ввести деяку невелику похибку. Однак слід мати на увазі, що коефіцієнт  $r$  є характеристикою всієї системи рослина-ґрунт-повітря, а не тільки її ґрунтової ланки, оскільки через  $\Pi$  позначена сума всього живлення – і кореневого, і позакореневого [85].

Коефіцієнт забезпечення поживними речовинами слід розкрити, оскільки в знаменнику цієї величини буде фігурувати сума початкового вмісту кожного елемента живлення  $M_i^I - \sum M_i^I$  ( $I = 1, 2, 3 \dots$ ) і сума всієї кількості живлення, що вноситься в ґрунт, може відрізнятися за типом ( $j = 1, 2, 3 \dots$ ) і формою ( $v = 1, 2, 3, \dots$ ) –  $\sum M_{j,v}^{II}$ . Серед типів цих елементів присутні азот, фосфор, калій, кальцій. Крім того, слід розрізняти мінеральні добрива, внесені під основний обробіток під час посіву, підживлення тощо [230]. Необхідно також врахувати, що коріння рослин може використовувати не всю суму  $\sum M_{j,v}^{II}$ , а лише ту її частку, яка залишається в ґрунті після переходу частини живлення у форму, що важко засвоюється рослиною  $\sum M_k^{III}$ , вивітрювання іншої її частини  $\sum M_g^{IV}$  [85].

Якщо додатково взяти до уваги, що рослина може отримувати живлення через листя в кількості  $\sum M_l^V$ , весь приплив поживних речовин до системи, тобто знаменник величини  $r$ , являє собою величину [85]:

$$\Pi = \sum M_i^I + \left( \sum M_{j,v}^{II} - \sum M_k^{III} - \sum M_g^{IV} \right) + \sum M_l^V. \quad (2.26)$$

Чисельник виразу  $r$  означає освоєну системою частину живлення за всіма елементами  $\sum M_{i,j,v,k,g,l}$ . Таким чином:

$$r = \frac{\sum M_{i,j,v,k,g,l}}{\sum M_j^I + (\sum M_j^{II} - \sum M_k^{III} - \sum M_g^{IV}) + \sum M_l^V}. \quad (2.27)$$

Останній із факторів – це газозабезпечення  $s$ :

$$s = \frac{q_n + q_a}{q}, \quad (2.28)$$

де  $q_n$  і  $q_a$  – вуглекислота, що поглинається рослиною з ґрунту й атмосфери;  $q$  – загальна існуюча величина  $CO_2$  в теплиці.

Величина засвоєння вуглекислоти являє собою відношення суми потоку вуглекислоти  $S_a$ , що надходить до системи від атмосфери, і потоку  $S_n$ , що надходить від ґрунту, до всієї кількості вуглекислоти  $C$ , яка надходить до рослини на рівні її зростання – середньому рівні зеленої маси. Потоки  $S_a$  та  $S_n$  виражаються через коефіцієнти турбулентного обміну  $A = rk(x)$  і вертикальні градієнти вмісту вуглекислоти так: з боку атмосфери  $\left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)_{x=H-0}$ , з боку ґрунту

$\rho K(x) \left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)_{x=H+0}$ , тому [85]:

$$s = \frac{\rho K(x) \left[ \left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)_{x=H+0} + \left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)_{x=H-0} \right]}{C}. \quad (2.29)$$

Важливо зазначити, що всі величини, які входять до коефіцієнтів  $m$ ,  $\beta$ ,  $p$ ,  $r$ ,  $s$ , можуть бути виміряні існуючими технічними засобами автоматики. Жодних допоміжних невідомих емпіричних індексів, констант, параметрів для знаходження п'яти критеріїв забезпеченості факторів урожаю не потрібно.

Наступним кроком є оцінка кількісних показників впливу кожного чинника на врожайність рослини. Метою цих емпіричних даних є

використання регресійних рівнянь, що зв'язують врожай з даним чинником за типом:

$$Y = Y_0 \left[ 1 - e^{-F(m, \beta, p, r, s)} \right] \quad (2.30)$$

Рівняння (2.30) означає, що в міру збільшення тепла, світла, вологи, вуглекислоти і живильного розчину відбувається ріст врожаю, але до певної межі, після чого всіяке зростання будь-якого чинника вже не дає жодного збільшення врожаю (в кількісному, якісному, вартісному виразах).

## 2.5. Аналіз температурних станів повітря та рослин у теплиці

Фітомоніторинг дав змогу встановити, що температура повітря і рослини також різняться між собою. Таким чином, приходимо до висновку, що існуючі системи керування параметрами мікроклімату, які отримують інформацію від обмеженої кількості первинних перетворювачів, неспроможні забезпечити технологічно необхідні параметри на всій площі теплиці.

Наявність біологічного об'єкта у споруді штучного клімату суттєво впливає на формування мікроклімату. Рослини поглинають сонячну радіацію, знижуючи освітленість у нижніх ярусах. Маючи значну теплоємність, вони беруть активну участь у створенні фітокліматичного режиму, тобто мікроклімату з урахуванням впливу рослинної маси. Також постає необхідність контролю розвитку рослин за умов дії всіх збурень [131, 182], що впливають на їх ріст і розвиток, адже правильне керування процесом вирощування сприятиме збільшенню врожаю.

У результаті аналізу [175] технології вирощування і систем забезпечення технології вирощування помідорів визначено, що кожен параметр мікроклімату відіграє важливу роль для рослини. Керуючи комплексом цих факторів, можна керувати ростом біологічного об'єкта (рис. 2.14).

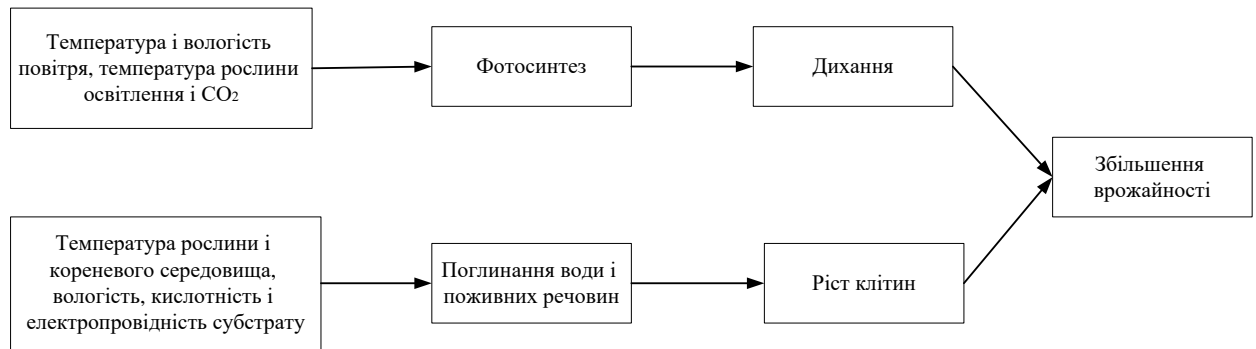


Рис. 2.14. Базовий принцип керування ростом тепличних рослин

Як бачимо, разом із обігрівом, освітленням теплиці, вентиляцією через відкриття фрамуг і за допомогою вентиляторів, на що витрачається частка енергії, велике значення мають природні фактори – сонячна радіація і температура навколишнього повітря, що слід враховувати в процесі керування мікрокліматом у теплиці.

Керування процесом вирощування у теплиці плодів рослин (томатів) здійснюватиметься в такій послідовності: до системи керування надходять сигнали значень зовнішньої і внутрішньої температури, вологості повітря теплиці і вмісту в ньому CO<sub>2</sub>, інтенсивності сонячної радіації, температури рослини та розпізнаного зображення її стану, дані про витрати теплоносіїв і електроенергії, відкриття фрамуг теплиці, витрати води і поживних речовин. Проте значну роль при цьому відіграє температура рослини і температурне середовище біля неї.

Температура рослини залежить від співвідношення енергії, що нею поглинається і віддається. Означене залежить від багатьох параметрів як навколишнього середовища (рівня радіації, температури повітря, швидкості його переміщення), так і стану самих рослин (оптичних властивостей рослини, розміру і розташування листя і т. д.). Унаслідок дії всіх зазначених факторів температура рослини, зазвичай, відрізняється від температури навколишнього повітря. Зокрема, вона може бути вищою за температуру

повітря; нижчою за температуру повітря; рівною температурі повітря або дуже близькою до неї [175].

Перше можливе лише в разі нагрівання плодів томата, стебла і листя сонячним промінням, що може призвести до перегріву рослин, і ці обставини слід враховувати у процесі вирощування томатів [175]. Частіше під час вирощування томатів у теплиці температура рослин нижча або близька до температури повітря теплиці.

Нами було проведено дослідження температури фітомаси в просторі однієї з теплиць у ПрАТ «Комбінат «Тепличний». Зокрема, вимірювалися температура стебла, листка і плоду рослини, освітленість і температура повітря у теплиці й такий фітометричний параметр рослини, як діаметр стебла [178].

Вимірювання освітленості й температури рослин і повітря в теплиці проводилося протягом дня в різних рядах теплиці. Освітленість при цьому змінювалася від 2500 до 11000 люкс. Результати вимірювання, а саме середні значення параметрів, що досліджувалися (температури стебла, плоду, листка рослини, повітря та освітленості біля рослини), представлені у табл. 2.2 [178].

Таблиця 2.2 Результати вимірювань у теплиці освітленості, температури стебла, плоду, листа томатів та повітря біля рослини

№ ряду	Освітленість в теплиці, люкс	Температура стебла рослини, °C	Температура плоду, °C	Температура листка, °C	Температура повітря біля рослини, °C
1	3060	24,68	24,68	24,66	29,2
2	2607	25,85	25,69	24,34	33,5
3	4058	24,83	25,83	23,17	32
4	4148	25,08	25,73	23,23	30,7
5	5285	23,47	25,04	21,59	29,7
6	6705	25,92	26,51	25,1	30,9
7	6900	25,3	26,5	24,2	30,75

Усереднені результати вимірювань представлені на (рис. 2.15).

Аналіз матеріалів, представлених на (рис. 2.7), дає змогу використати для їх опису лінійну регресію, коефіцієнти якої визначаються методом найменших квадратів (застосовують при нормальному розподілі):

$$y = a + b \cdot x, \quad (2.31)$$

де  $a$  і  $b$  – коефіцієнти лінійного рівняння.

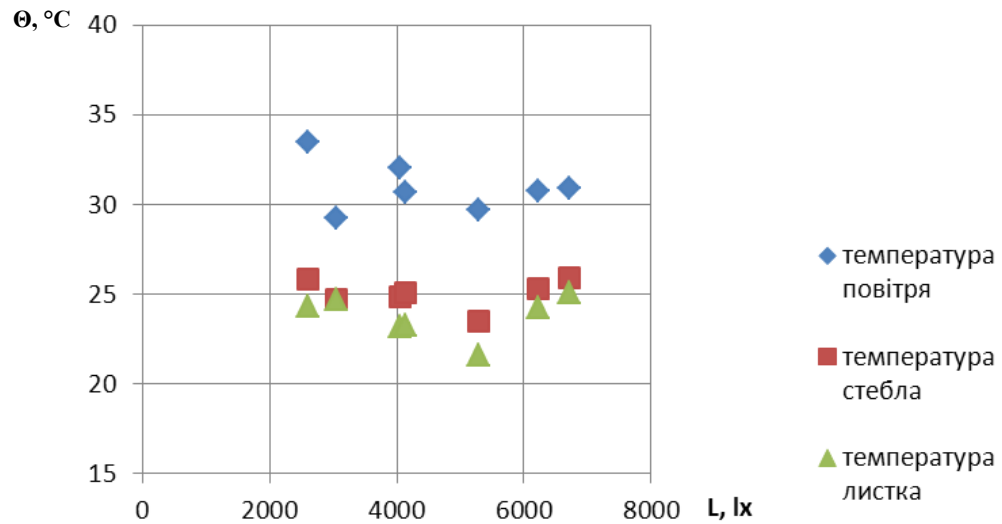


Рис. 2.15. Залежність температур рослини та повітря біля рослини від освітленості

Визначимо коефіцієнти рівняння (2.31) та похибки вимірювання за методикою, що приведена в [199]. Розрахунки коефіцієнтів лінійного рівняння проводимо в математичному пакеті MathCAD. Матриці параметрів, що досліджуються, матимуть вигляд:

$$AA = \begin{pmatrix} n & \sum xa \\ \sum xa & \sum xa^2 \end{pmatrix}, \quad BA = \begin{pmatrix} \sum ya \\ \sum (xa_{ii} ya_{ii}) \end{pmatrix}, \quad BB = \begin{pmatrix} \sum yb \\ \sum (xa_{ii} yb_{ii}) \end{pmatrix}, \quad BC = \begin{pmatrix} \sum yc \\ \sum (xa_{ii} yc_{ii}) \end{pmatrix},$$

$$BD = \begin{pmatrix} \sum yd \\ \sum (xa_{ii} yd_{ii}) \end{pmatrix}, \quad (2.32)$$

де  $xa$  – виміряні значення освітленості;  $ya$  – виміряні значення температури стебла рослини;  $yb$  – виміряні значення температури листа рослини;  $yc$  – виміряні значення температури плоду рослини;  $yd$  – виміряні значення

температури біля рослини;  $AA$  – матриця коефіцієнтів освітленості у теплиці;  $BA$  – матриця коефіцієнтів стебла рослини;  $BB$  – матриця коефіцієнтів температури плоду;  $BC$  – матриця коефіцієнтів температури листка;  $BD$  – матриця коефіцієнтів повітря біля рослини;  $n$  – обсяг вибірки.

Загальний вираз для визначення коефіцієнтів рівняння [175]:

$$k = A^{-1} \cdot B = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}, \quad (2.33)$$

де  $k$  – матриця коефіцієнтів  $a$  та  $b$ ;  $A^{-1}$  – обернена матриця значень аргументу (для нашого випадку – освітленість);  $B$  – матриця залежної величини (для нашого випадку – це температури стебла, плоду, листа і повітря біля рослини).

Із (2.33) визначимо коефіцієнти для рівнянь стосовно [175]:

- температури стебла

$$aa1 = AA^{-1} \cdot BA = \begin{pmatrix} 24.902 \\ 2.489 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix}, \quad (2.34)$$

- температури плоду

$$aa2 = AA^{-1} \cdot BB = \begin{pmatrix} 24.443 \\ 2.707 \cdot 10^{-4} \end{pmatrix}, \quad (2.35)$$

- температури листка

$$aa3 = AA^{-1} \cdot BD = \begin{pmatrix} 23.655 \\ 2.155 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix}, \quad (2.36)$$

- температури повітря біля рослини

$$aa4 = AA^{-1} \cdot BC = \begin{pmatrix} 32.142 \\ -2.515 \cdot 10^{-4} \end{pmatrix}. \quad (2.37)$$

Результати розрахунку за (2.34-2.37) дадуть можливість у явному вигляді побудувати залежності температур рослини та повітря біля рослини від величини освітленості у теплиці.

Визначимо точність розрахунку параметрів за прийнятими лінійними моделями [175]:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i - y_{pi}}{n-1}}, \quad (2.38)$$

де  $\delta$  – середньоквадратичне відхилення розрахунку від результатів вимірювань;  $y_i$  – результат вимірювання параметра, що досліджувався (табл. 2.3.);  $y_{pi}$  – середнє розраховане значення функції;  $n$  – кількість вимірювань.

Таким чином, рівняння регресії у явному вигляді та середньоквадратичне відхилення будуть [175]:

- для температури стебла:

$$\begin{aligned} y1(x) &= 24.902 + 2.489 \cdot 10^{-5}x, \\ \delta_1 &= 0,829^{\circ}\text{C}, \end{aligned} \quad (2.39)$$

- для температури плоду:

$$\begin{aligned} y2(x) &= 24,443 + 2,707 \cdot 10^{-4}x, \\ \delta_2 &= 0,507^{\circ}\text{C}, \end{aligned} \quad (2.40)$$

- для температури листка:

$$\begin{aligned} y3(x) &= 23,665 + 2,155 \cdot 10^{-5}x, \\ \delta_3 &= 1,188^{\circ}\text{C}, \end{aligned} \quad (2.41)$$

- для температури повітря біля рослини:

$$\begin{aligned} y4(x) &= 32,142 - 2,515 \cdot 10^{-4}x, \\ \delta_4 &= 1,37^{\circ}\text{C}. \end{aligned} \quad (2.42)$$



Графічні зображення залежностей температур від освітленості представлені на (рис. 2.16) (розраховані та за результатами вимірювань).

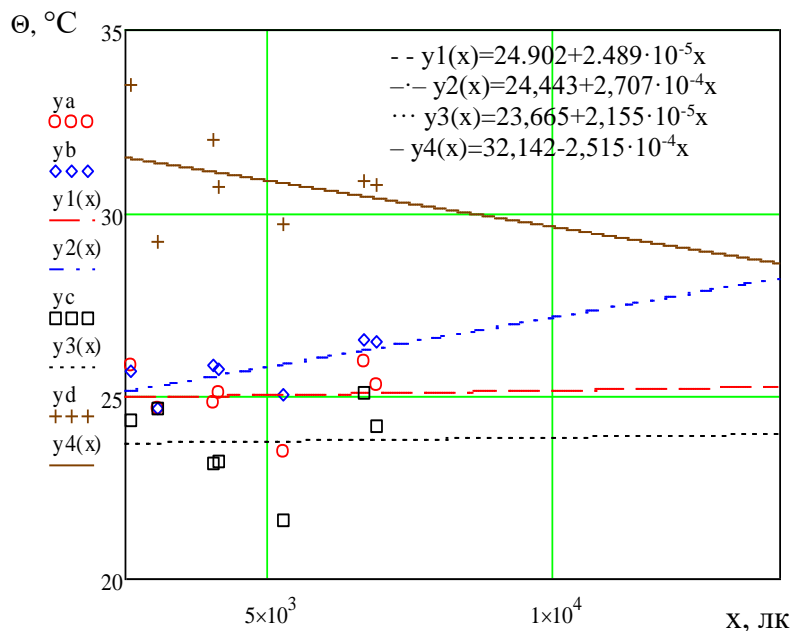


Рис. 2.16. Залежності температур рослини та повітря біля рослини від освітленості: температури стебла:  $y_a$  (°) — результати вимірювань,  $y_1$  (—) — результати розрахунків; температури плоду:  $y_b$  (◇) — результати вимірювань,  $y_2$  (---) — результати розрахунків; температури листка:  $y_c$  (□) — результати вимірювань,  $y_3$  (···) — результати розрахунків; температури повітря біля рослини:  $y_d$  (+) — результати вимірювань,  $y_4$  (—) — результати розрахунків.

Із графіків видно, що в денний період часу температура рослини збільшується за рахунок зростання освітленості попри те, що температура повітря в теплиці зменшувалась. Цю обставину слід враховувати (відстежувати температури фітомаси), оскільки перегрів рослин може негативно вплинути на їх подальший розвиток [175].

Для встановлення залежності температури рослини від її фітометричних параметрів вимірювався діаметр стебла рослини. Результати вимірювань температури стебла і його діаметра представлені в табл. 2.4.

Для опису залежностей, що представлені в табл. 2.3, використаємо нелінійне рівняння регресії [175]:

$$y=ax^2+bx+c, \quad (2.43)$$

де  $a, b$  і  $c$  – коефіцієнти рівняння;  $x$  – змінна.

Таблиця 2.3 Результати вимірювань температури стебла і його діаметра

№ виміру	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Діаметр стебла, мм	12,1	12,2	11,7	11,7	12,3	13,1	12,6	12,9	10,9	12,6
Температура стебла, °С	19	24,5	24,9	24	24,4	24,7	26	25,7	26	27,6
№ виміру	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Діаметр стебла, мм	11,6	12,1	13,5	11,5	12,6	11,8	12,9	14,2	12	12,8
Температура стебла, °С	24,6	24,9	25,3	25,3	25,5	24,5	25,5	26,6	26,6	27,5
№ виміру	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Діаметр стебла, мм	11,8	13,8	13,3	12,4	13,1	12	13	12,5	15	14
Температура стебла, °С	27,5	23	23,8	23,6	24,5	25	24,6	25,1	25,2	26
№ виміру	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Діаметр стебла, мм	11,7	12,8	12	11,8	15,8	13,1	13	13,2	16,7	13
Температура стебла, °С	27,5	21,6	22,5	23,5	25	25,1	24,8	26	26,5	27

Виміряні значення діаметра стебла записано у вигляді матриці  $D$  із розмірністю  $40 \times 1$ , а виміряні значення температури стебла у вигляді матриці  $S1$  із такою ж самою розмірністю. Розрахунки коефіцієнтів рівняння проводимо в математичному пакеті MathCAD [175]:

$$A = \begin{pmatrix} N & \sum D & \sum D^2 \\ \sum D & \sum D^2 & \sum D^3 \\ \sum D^2 & \sum D^3 & \sum D^4 \end{pmatrix}, \quad B1 = \begin{bmatrix} \sum S1 \\ \sum_i (S1_i D_i) \\ \sum_i S1_i (D_i)^2 \end{bmatrix}, \quad (2.44)$$

де  $A$  – матриця коефіцієнтів діаметра стебла рослини;  $B1$  – матриця коефіцієнтів температури стебла рослини;  $N$  – обсяг вибірки.

Для визначення коефіцієнтів моделі (2.43) використовуємо алгоритм [175]:

$$a1 = A^{-1} \cdot B1 = \begin{pmatrix} 33,82 \\ -1,401 \\ 0,054 \end{pmatrix}. \quad (2.45)$$

Відповідно, залежність між температурою стебла і його діаметром представлено рівнянням на (рис. 2.17), середньоквадратична похибка при цьому дорівнює:  $\delta_4 = 1,981 \text{ } ^\circ\text{C}$ :

$$y5(x) = 33,82 - 1,401 \cdot x + 0,054 \cdot x^2; \quad (2.46)$$

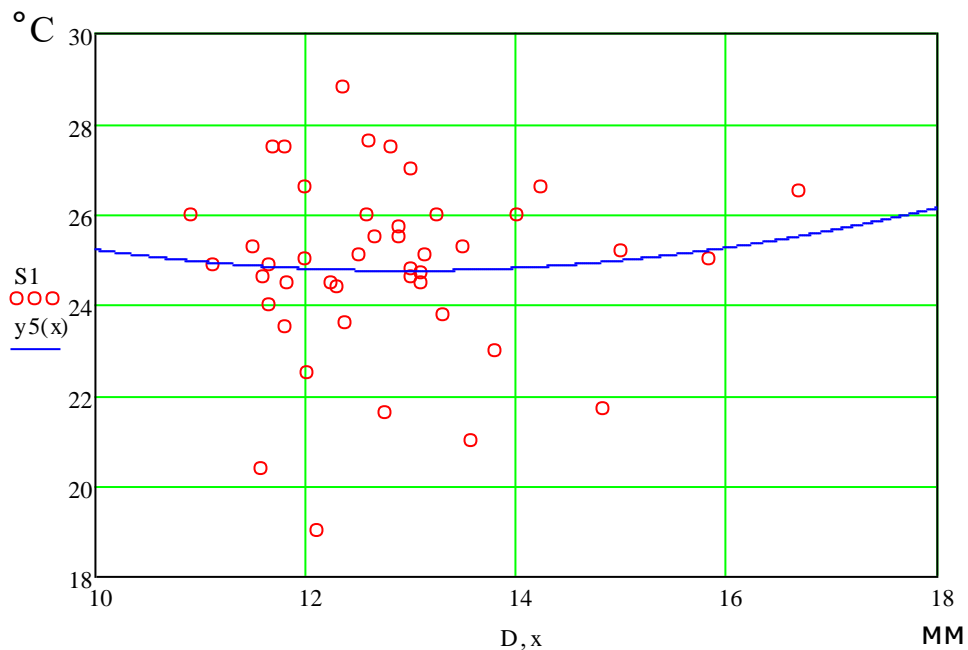


Рис. 2.17. Залежність температури стебла від його діаметра:  
температура стебла: S1 (°) – результати вимірювань, y5 (–) – результати  
розрахунків.

Для встановлення зв'язку між двома параметрами визначимо коефіцієнт кореляції за методикою, наведеною в підрозділі 2.1. Визначено,

що коефіцієнт кореляції рівний  $r_{xy}=0,19$ . Це вказує на низький зв'язок між двома параметрами, що вимірювалися.

З досвіду експлуатації різноманітних систем автоматичного керування [63,251] зроблено висновок про неможливість одноразового налагодження обладнання на постійний оптимальний режим. Параметри таких систем змінюються в часі, що обумовлено зміною параметрів об'єкта, тому потрібно розглянути адаптивний алгоритм уточнення параметрів моделі на кожному кроці одержання інформації про об'єкт.

## **2.6. Адаптивний алгоритм уточнення параметрів математичної моделі**

Керування біотехнічними об'єктами в наш час вимагає від існуючих автоматичних систем керування в тепличних господарствах використання нових алгоритмів роботи, які б давали змогу враховувати особливості біологічної складової. Використання адаптивного алгоритму уточнення параметрів математичної моделі дає можливість враховувати зміни параметрів біологічного об'єкта. Тим самим математична модель процесу виробництва буде більш чітко наближена до своїх реальних значень.

Розглянемо адаптивний алгоритм визначення та уточнення параметрів моделі на кожному кроці одержання інформації про об'єкт для нелінійної функції відносно невідомих параметрів моделі, один із способів визначення параметрів математичної моделі, в основі якого лежить МНК [152, 223].

Аналіз матеріалів, наведених у літературних джерелах [67, 264, 268], дає змогу зробити висновок, що залежність температури стебла від його діаметра визначається у вигляді отриманої нами залежності:

$$y_5 = a_1 \cdot e^{a_2 \cdot x} + a_3 \cdot e^{a_4 \cdot x}, \quad (2.47)$$

де  $a_1, a_2, a_3, a_4$  – коефіцієнти моделі.

Рівняння (2.48), як правило, задовільно описують процес тільки поблизу тієї області значень змінних і збурень, для якої вони одержані. Ці рівняння слід коригувати (шляхом перераховування коефіцієнтів  $a_i$ ) після того, як буде отримана нова інформація про об'єкт.

У матричному вигляді систему умовних рівнянь (2.47) можна записати як [152]:

$$Xa = y, \quad (2.48)$$

де  $X$  – матриця розміру  $m \times n$ ,

$a$  – невідомий  $m$  - вимірний вектор,

$y$  – відомий  $n$  - вимірний вектор вимірювань  $y_i$ .

Якщо  $n=m$  і визначник матриці  $X$  не дорівнює нулю, вектор  $a$  визначається однозначно [271]:

$$a = X^{-1}y. \quad (2.49)$$

Потрібно відшукати найкращу в певному змісті апроксимацію, у цьому випадку одним із шляхів знаходження невідомих параметрів  $a_i$  є визначення коефіцієнтів регресії  $a_i$  шляхом розв'язку системи рівнянь, одержаної з врахуванням (2.48).

Коли кількість рівнянь менша ніж кількість невідомих та існує нескінченне число розв'язків, то візьмемо розв'язок:

$$a = X^* y, \quad (2.50)$$

де  $X^*$  – узагальнена обернена матриця до  $X$ .

Доводиться [67, 272], що:

$$X^* = X'(X X')^{-1}, \quad (2.51)$$

де  $X'$  – транспонована до  $X$  матриця, тобто:

$$a = X'(X X')^{-1} y, \quad (2.52)$$

Знайдемо невідомі параметри  $a1$ ,  $a2$ ,  $a3$ ,  $a4$ . Функція (2.47) є нелінійною по  $a2$  і  $a4$ . Задамося довільними початковими значеннями  $a1_0$ ,  $a2_0$ ,  $a3_0$ ,  $a4_0$ :

$$a1 = a1_0 + z1; \quad a2 = a2_0 + z2; \quad a3 = a3_0 + z3; \quad a4 = a4_0 + z4. \quad (2.53)$$

Підставимо ці вирази в рівняння, розкладемо функції  $y_k$  в ряди Тейлора за степенями  $z1$ ,  $z2$ ,  $z3$ ,  $z4$  і обмежимося першими степенями:

$$y_k(a1_0, a2_0, a3_0, a4_0) - y_k + \left(\frac{\partial y_k}{\partial a1}\right)_0 \cdot z1 + \left(\frac{\partial y_k}{\partial a2}\right)_0 \cdot z2 + \left(\frac{\partial y_k}{\partial a3}\right)_0 \cdot z3 + \left(\frac{\partial y_k}{\partial a4}\right)_0 \cdot z4 = 0, \quad (2.54)$$

де

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial y_k}{\partial a1}\right)_0 &= e^{-a2_0 x_k}; \\ \left(\frac{\partial y_k}{\partial a2}\right)_0 &= a1_0 e^{-a2_0 x_k} \cdot \left(-x_k\right); \\ \left(\frac{\partial y_k}{\partial a3}\right)_0 &= e^{-a4_0 x_k}; \\ \left(\frac{\partial y_k}{\partial a4}\right)_0 &= a3_0 e^{-a4_0 x_k} \cdot \left(-x_k\right). \end{aligned} \quad (2.55)$$

Систему умовних рівнянь (2.54) зводимо до нормальної системи (2.48), де матриці  $y$  та  $X$  на основі рівнянь (2.48) (2.49) та інформації, що наведена в табл. 2.3, мають вигляд:

$$y = \begin{pmatrix} y_1 - \left( a1_o e^{-a2_o x_1} + a3_o e^{-a4_o x_1} \right) \\ y_2 - \left( a1_o e^{-a2_o x_2} + a3_o e^{-a4_o x_2} \right) \\ y_3 - \left( a1_o e^{-a2_o x_3} + a3_o e^{-a4_o x_3} \right) \\ y_4 - \left( a1_o e^{-a2_o x_4} + a3_o e^{-a4_o x_4} \right) \end{pmatrix}; \quad (2.56)$$

Як зазначалось раніше, розв'язок системи умовних рівнянь (2.48) має вид (2.49). Розв'язавши систему (2.49) за умов врахування виразів (2.55), (2.56), знайдемо  $z1, z2, z3, z4$ :

$$z = \begin{pmatrix} z1 \\ z2 \\ z3 \\ z4 \end{pmatrix}. \quad (2.57)$$

Знайшовши  $a1, a2, a3, a4$ , позначимо їх через  $a1_o, a2_o, a3_o, a4_o$ , робимо другу ітерацію, розв'язавши систему (2.49) при (2.55) та (2.56), отримаємо нове наближення невідомих  $a1, a2, a3, a4$ .

Питання про збіжність послідовних наближень повинно розглядатися для кожної моделі окремо. Зважаючи на те, що дослідження збіжності досить складне, як правило, обмежуються з'ясуванням практичної збіжності, тобто процес наближення триває доти, доки вектор  $y$  не буде в межах заданої точності від  $y_i$  (наприклад, 5%):

$$|y| \leq y_i \cdot 0,05. \quad (2.58)$$

Процес наближення триває відповідно до рівняння (2.57). Кінцевим результатом є одержання коефіцієнтів моделі:  $a1, a2, a3, a4$ . Знаючи ці коефіцієнти, підставляємо їх у рівняння (2.47) і одержуємо необхідну математичну залежність температури стебла від його діаметра.

## 2.7. Використання вейвлет-перетворення для оцінки якості рослинної продукції

Окрім температури рослини, вимірюванню підлягають інші фітометричні параметри (формування рослиною кількості квіточок у суцвітті; кількість плодів на гілці; середня вага та стиглість плоду; приріст ваги плоду), які також формуватимуть матриці даних.

Отримання таких даних безконтактним способом можливе за умови одержання відповідних зображень рослин. Зображення рослин зберігаються у вигляді фотозображень. Аналіз і обробка відповідних даних здійснюється за допомогою вейвлет-перетворень, під час яких кожне фотозображення розкладається на хвильові функції (вейвлети). Розрахунки проводились у середовищі MathCAD [32].

Основним завданням при цьому є розпізнавання образів зображень, на яких буде знайдено контур плоду рослини для визначення його стиглості. У результаті обробки отриманих зображень роздільної здатності 600х600 пікселів (рис. 2.18) отримаємо матрицю  $T$  (2.59), яка матиме вигляд (2.60) [32, 207]:

$$T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}, \quad (2.59)$$

де  $a_{mn}$  – коефіцієнти зображення.





а)



б)

Рис. 2.18. Зображення помідора та його суцвіття в теплиці

а) плід томата; б) суцвіття томата.

Завданням виділення об'єкта із зображення є знаходження меж необхідного об'єкта. У нашому випадку знаходження контурів об'єкта виконується знаходженням граничних точок різкого переходу яскравості.

$$T =$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	140	128	123	129	122	134	140	107	198	221
1	124	125	120	118	124	130	123	90	161	226
2	117	123	124	114	123	125	107	97	111	184
3	100	119	114	110	120	132	119	106	94	125
4	94	113	89	124	129	128	122	104	91	139
5	180	159	90	131	133	131	119	110	88	189
6	210	196	83	100	114	138	134	119	112	167
7	162	212	92	108	109	112	127	103	98	129
8	96	169	125	169	122	115	124	119	99	119
9	91	113	98	134	117	117	121	119	104	107
10	89	98	108	121	116	112	101	101	103	115
11	97	94	106	116	104	109	103	104	106	121
12	106	99	89	104	88	82	95	113	108	123
13	117	94	122	193	192	142	108	96	113	124
14	125	99	69	113	112	112	167	119	103	125
15	116	107	84	102	116	125	136	95	99	...

(2.60)

Одним із відомих методів, що працюють в рамках геометричних перетворень, є нормалізація [65, 124]. Вона полягає в автоматичному визначенні невідомих параметрів перетворення, якому піддано вхідне зображення, і в подальшому приведенні його до еталонного вигляду. У

процесі нормалізації зображення заміщається еквівалентним йому зображенням.

Таке зображення можна представити сукупністю хвильових пакетів – вейвлетів, утворених на основі певної базової функції. Ця сукупність коригується множниками, що мають вигляд досить складних функцій і представляють зображення з тим або іншим ступенем деталізації. Число вейвлетів, які використовуються під час розкладання, задає рівень декомпозиції, а наступні рівні декомпозиції утворюють спадаюче вейвлет-дерево.

Завдання розпізнавання зображень полягає у порівнянні коефіцієнтів, одержаних за результатом вейвлет-розкладу тестового зображення, з коефіцієнтами, отриманими під час розкладу декількох еталонних зображень. За аналізу максимального числа коефіцієнтів тестове зображення вважається ідентичним одному з еталонів.

Обробляючи зображення, маємо справу з двовірними масивами  $S(x, y)$ , які задаються в просторі  $V = \{x, y\} \in R^2$  [158, 209, 213]. Даний вейвлет матиме вигляд:

$$\frac{1}{\sqrt{a_1 a_2}} \psi\left(\frac{x - b_1}{a_1}, \frac{x - b_2}{a_2}\right), \quad (2.61)$$

де  $a_1$  і  $a_2$ ,  $b_1$  і  $b_2$  – значення для кожного вимірювання.

Для двовірного вейвлет-перетворення:

$$a = 2^m, b = k 2^m; \\ \varphi_{m,k} = 2^{-m/2} \varphi(2^{-m} V - k), \psi_{m,k} = 2^{-m/2} \psi(2^{-m} V - k); \quad (2.62)$$

$$\varphi(x, y) = \varphi(x) \varphi(y);$$

$$\psi_{LH}(x, y) = \varphi(x) \psi(y); \psi_{HL}(x, y) = \psi(x) \varphi(y); \psi_{HH}(x, y) = \psi(x) \psi(y),$$

де  $L$  та  $H$  – складові низькочастотних та високочастотних фільтрів вейвлет-перетворення.

Двомірні вейвлети матимуть вигляд:

$$\begin{cases} 2^{-m} \varphi(2^{-m} x - k) \varphi(2^{-m} y - l), 2^{-m} \varphi(2^{-m} x - k) \psi(2^{-m} y - l), \\ 2^{-m} \psi(2^{-m} x - k) \varphi(2^{-m} y - l), 2^{-m} \psi(2^{-m} x - k) \psi(2^{-m} y - l). \end{cases} \quad (2.63)$$

де  $m$  – параметр масштабу,  $k$  і  $l$  – числа, що характеризують зсуви по осі.

Отже, аналіз проходить по горизонталі, вертикалі та діагоналі.

Проведемо вейвлет-перетворення зображення. На (рис. 2.19) представлено розкладання вхідного зображення та синтезованого зображення «а», що розкладається за допомогою вейвлет-аналізу в базисі Хаара 3-го порядку, як зображення «б», «в», «г».

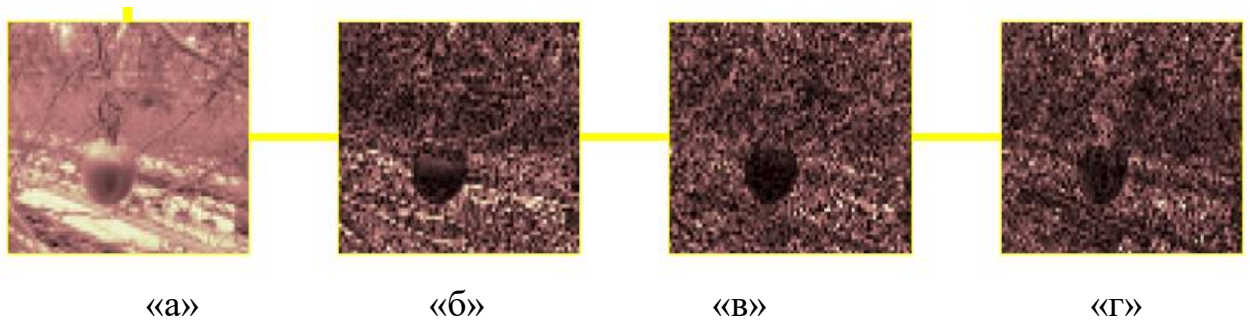


Рис. 2.19. Розкладання вхідного зображення в базисі Хаара

Розпізнавання рослини помідора за фотозображеннями її плодів відбувається згідно з таким алгоритмом. Для вхідного зображення  $f(x, y)$  виконуються вейвлет-перетворення для знаходження вейвлет-коефіцієнтів:

$$\begin{aligned} f(x, y) = & \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \lambda_{r,i,j}^{HH} \varphi_{k,i}(x) \varphi_{r,j}(y) + \sum_{y=r}^{\infty} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} (\lambda_{y,i,j}^{HV} \varphi_{y,i}(x) \psi_{y,j}(y) + \\ & + \lambda_{y,i,j}^{VH} \psi_{y,i}(y) \varphi_{y,j}(x) + \lambda_{y,i,j}^{VV} \psi_{y,i}(y) \psi_{y,j}(x)), \end{aligned} \quad (2.64)$$

де  $\varphi_{y,i}(x) = 2^{\frac{y}{2}} \varphi(2^y x - i)$ ,  $\psi_{y,j}(x) = 2^{\frac{y}{2}} \varphi(2^y x - j)$ ,  $r$  – глибина вейвлет-розкладу функції;  $\lambda_{y,i,j}^{HV}$ ,  $\lambda_{y,i,j}^{VH}$ ,  $\lambda_{y,i,j}^{VV}$  – коефіцієнти перетворення вейвлет.

Схематично вейвлет-перетворення зображення представлено на (рис. 2.20) [158]:

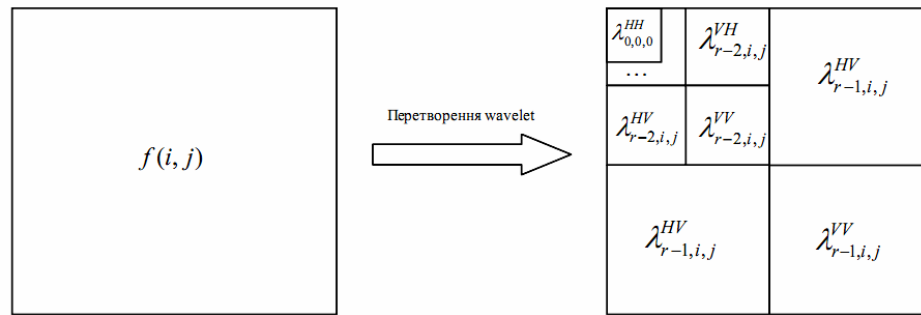


Рис. 2.20. Схема вейвлет-перетворення

Проведено розкладання зображення плоду помідора в базисі Хаара 3-го порядку (рис. 2.21):

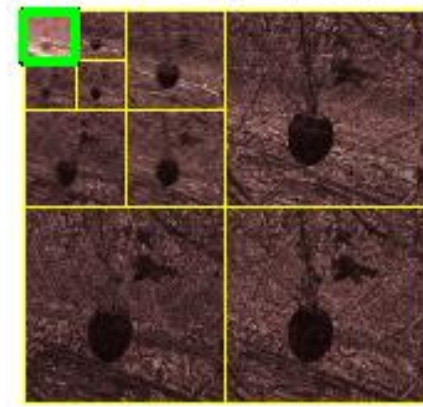


Рис. 2.21. Вейвлет-розклад зображення томата в базисі Хаара 3-го порядку

Матриця розкладеного зображення матиме вигляд:

$$H1 = \begin{bmatrix} \lambda_k a_{11} & \lambda_k a_{12} & \dots & \lambda_k a_{1n} \\ \lambda_k a_{21} & \lambda_k a_{22} & \dots & \lambda_k a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_k a_{m1} & \lambda_k a_{m2} & \dots & \lambda_k a_{mn} \end{bmatrix}, \quad (2.65)$$

де  $H1$  – матриця розкладеного зображення та представленого у формі вейвлетів.

	0	1	2	3	4
0	235.863	8.55	243.094	26.717	228.668
1	-33.646	12.543	-64.963	22.911	-62.216
2	233.095	26.417	258.045	27.131	257.251
3	-32.332	-5.326	-25.98	-5.05	-17.525
4	227.817	27.54	252.296	15.512	257.855
5	-28.385	-34.593	-8.03	-9.221	7.095
6	224.982	14.971	234.098	27.231	223.068
7	-43.322	-36.552	14.02	-25.607	39.475
8	205.21	8.601	231.116	-44.804	242.879
9	2.163	-0.421	61.328	-30.533	61.214
10	275.676	-50.053	309.959	-94.156	268.143
11	77.338	3.896	100.533	-30.892	52.652
12	285.764	-61.077	341.269	-85.91	267.027
13	78.546	-0.789	123.453	-19.987	56.868
14	257.556	-72.625	354.131	-81.523	268.065
15	43.692	-18.004	124.323	-19.137	...

(2.66)

Знайдені вейвлет-коефіцієнти розкладаються у просторі власних векторів:

$$\tilde{a}_j = \sum_{k=1}^S \lambda_k x_{jk} y_k + \Delta_{js}, s < r, \Delta_{js} = \sum_{k=s+1}^r \lambda_k x_{jk} y_k. \quad (2.67)$$

Таким чином, отримуємо вектор ознак для вхідної фотографії  $w$ .

Власний вектор матриці буде рівний:

	0
0	$7.014 \cdot 10^4$
1	$902.55 + 2.521i \cdot 10^3$
2	$902.55 - 2.521i \cdot 10^3$
3	$-957.352 + 2.201i \cdot 10^3$
4	$-957.352 - 2.201i \cdot 10^3$
5	$2.254 \cdot 10^3$
6	$-1.865 \cdot 10^3 + 118.87i$
7	$-1.865 \cdot 10^3 - 118.87i$
8	$-1.121 \cdot 10^3 + 1.462i \cdot 10^3$
9	$-1.121 \cdot 10^3 - 1.462i \cdot 10^3$
10	$1.227 \cdot 10^3 + 962.241i$
11	$1.227 \cdot 10^3 - 962.241i$
12	$-29.28 + 1.531i \cdot 10^3$
13	$-29.28 - 1.531i \cdot 10^3$
14	$1.457 \cdot 10^3 + 406.889i$
15	...

(2.68)

Далі знаходимо відстані між отриманим вектором ознак і кожним із векторів навчальної вибірки, використовуючи Евклідову метрику [270]:

$$d^i = \sqrt{\sum_{j=1}^s (w_i - w_i^j)^2}, i = \overline{1, M}. \quad (2.69)$$

Нормалізовані вектори матриці за Евклідовою метрикою мають вигляд:

	0	1	2
0	0.039	$-5.444 \cdot 10^{-3} - 0.018i$	$-5.444 \cdot 10^{-3} + 0.018i$
1	0.039	$-0.01 - 6.861i \cdot 10^{-3}$	$-0.01 + 6.861i \cdot 10^{-3}$
2	0.039	$4.035 \cdot 10^{-3} - 4.164i \cdot 10^{-3}$	$4.035 \cdot 10^{-3} + 4.164i \cdot 10^{-3}$
3	0.039	$0.012 - 1.662i \cdot 10^{-3}$	$0.012 + 1.662i \cdot 10^{-3}$
4	0.039	$-3.989 \cdot 10^{-3} - 1.714i \cdot 10^{-3}$	$-3.989 \cdot 10^{-3} + 1.714i \cdot 10^{-3}$
5	0.039	$-0.012 + 5.514i \cdot 10^{-3}$	$-0.012 - 5.514i \cdot 10^{-3}$
6	0.04	$5.033 \cdot 10^{-3} + 0.023i$	$5.033 \cdot 10^{-3} - 0.023i$
7	0.04	$-0.015 + 0.025i$	$-0.015 - 0.025i$
8	0.041	$-0.022 + 0.013i$	$-0.022 - 0.013i$
9	0.04	$-7.513 \cdot 10^{-3} + 0.02i$	$-7.513 \cdot 10^{-3} - 0.02i$
10	0.039	$-3.318 \cdot 10^{-3} + 9.773i \cdot 10^{-3}$	$-3.318 \cdot 10^{-3} - 9.773i \cdot 10^{-3}$
11	0.041	$-0.012 + 5.696i \cdot 10^{-3}$	$-0.012 - 5.696i \cdot 10^{-3}$
12	0.04	$-0.022 + 0.03i$	$-0.022 - 0.03i$
13	0.041	$-0.035 + 0.037i$	$-0.035 - 0.037i$
14	0.04	$-0.03 + 0.038i$	$-0.03 - 0.038i$
15	0.039	$-0.021 + 0.039i$	...

eigenvecs (T) =

Об'єкт, що відповідає вектору  $w^m$  (такому, що для відстані  $d^m$  виконується умова:  $d^m = \min\{d^i\}, i = \overline{1, M}$ ), буде називатися розпізнаним об'єктом.

Були проведені дослідження розпізнавання плоду та суцвіття за зображеннями (рис. 2.22).





а)



б)

Рис. 2.22. Розпізнаний плід та суцвіття помідора

а) плід помідора; б) суцвіття помідора

Провівши розпізнавання плоду рослини, виділяємо такі ознаки: колір плоду та суцвіття, структура і контури. Відповідні дані використовуються із застосуванням створених математичних моделей для подальшої оцінки якості розвитку рослини за фітометричними параметрами, такими як формування рослиною кількості квіточок у суцвітті; кількість плодів на гілці; середня вага та стиглість плоду; приріст ваги плоду.

## 2.8. Чисельне моделювання теплиці з просторово-розподіленими параметрами

Тривале дослідження атмосфери промислової теплиці дало можливість зробити висновки, що параметри мікроклімату в різних місцях об'єму теплиці суттєво відрізняються від вимог технології. Пояснюється це великою кількістю поверхонь теплообміну, які сприяють тепловтратам, а значить і нерівномірному розвитку рослин, як зазначалося в розділі 1. Цю особливість, а саме, що теплиця являє собою об'єкт із просторово-розподіленими параметрами, і було враховано для оцінки станів рослин та формування керуючих впливів.

Чисельне моделювання є ефективним методом для аналізу розподілу швидкості потоку й температури в часі та просторі і може використовуватись для моделювання тепло- і масообміну під час проектування в сільськогосподарському виробництві [51]. Цей метод є відносно новим і використовується для моделювання та проектування з метою енергозбереження і поліпшення температурних режимів та підвищення продуктивності в тепличних комплексах лише в останні десятиліття. В основі математичної моделі лежать рівняння Нав'є-Стокса [24, 285] і рівняння переносу енергії для конвективних течій. Проведені оцінки умов природної конвекції повітря і визначені характерні числа Релея  $Ra$  в приміщеннях теплиці.

Число Релея є критеріальною величиною, що характеризує відношення потоку тепла в рідині або газі за рахунок архімедових сил до теплопровідності середовища, яке виникає при нерівномірності температурного поля і пов'язане з природною конвекцією у великому замкненому просторі [195]:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T_p \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha}, \quad (2.70)$$

де  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості,  $m^2/s$ ;  $\alpha$  – коефіцієнт температуропровідності середовища,  $m^2/s$ ;  $L$  – характеристичний розмір теплиці,  $m$ ;  $\Delta T_p$  – різниця температур між системою опалення та середовища теплиці,  $m$ ;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $m/s^2$ ;  $\beta$  – коефіцієнт теплового розширення повітря в теплиці,  $^{\circ}C^{-1}$ .

Значення числа Релея менше ніж  $10^8$  свідчить про ламінарний режим потоку, з переходом до турбулентного потоку в діапазоні від  $10^8$  до  $10^{10}$  і вище [29, 73]. Оцінки показують, що значення числа Релея для температурних режимів у теплиці не перевищують  $Ra < 10^8$ . Тому під час моделювання було прийнято ламінарний режим течії, що обумовлено низькими значеннями чисел Релея і відсутністю збурень у повітряному



потоці. Крім того, для розрахунку передачі тепла сонячною радіацією і теплообміну між рослиною та середовищем використовується модель Discrete Ordinates (DO) [2].

Для моделювання температурного розподілу в теплиці необхідно діяти в такій послідовності [195]:

- 1) підготовка розрахункової моделі:
  - створення геометричної моделі, яка відображає область розрахунку;
  - вибір початкових умов та граничних умов, вибір фізичної моделі розрахунку;
  - генерація сіткової моделі на основі створеної геометрії та системи рівнянь;
- 2) розрахунок моделі в програмному середовищі;
- 3) перегляд і оцінка результатів моделювання.

На етапі генерації сіткової моделі для подальшого обчислення проходить дискретизація – диференційні рівняння, що описують неперервний процес, а також допоміжні (граничні і початкові) умови, перетворюються у систему дискретних алгебраїчних рівнянь за допомогою різницевих методів. При застосуванні таких методів алгебраїчні рівняння пов'язують між собою значення змінних, що шукаються в групі сусідніх вузлових точок (сіткових вузлів). Також мається на увазі, що сітка, яка складається з дискретних точок, розподілена по всій обчислювальній області в часі і просторі [265]. Процес побудови чисельного рішення зазвичай ведеться за допомогою ітерацій, рішення для кожної шуканої змінної, що знаходиться в кожній вузловій точці, послідовно коригується за допомогою звернення до дискретизованого рівняння (за методом спряжених градієнтів Якобі).

Побудова сітки проводилася в сіткогенераторі ANSYS Meshing на базі платформи Workbench. Під час побудови сітки для теплиці використано метод локального керування сіткою. Показник якості сітки Orthogonal Quality [265] – близько 0,245. Мінімальний розмір грані становив  $4,7232 \cdot 10^{-3}$  м.

У таблиці 2.4. наведено параметри налаштування сітки в ANSYS Meshing для подальшого розрахунку тепло- і масообміну в Ansys Fluent. Геометрія побудована в реальних розмірах. При побудові сітки кількість елементів та граней достатньо велика. Враховуючи великі розміри приміщення, розмір елемента і грані збільшені незначно через обмеження продуктивної та розрахункової потужності комп'ютера.

На (рис. 2.23.) зображено побудовану сітку теплиці з фронтальної сторони. Сітка дещо зменшена поблизу отворів припливного повітря відносно решти площі стінки. В розрізі (рис. 2.24.) чітко видно побудовану сітку для системи опалення. На поверхні труби та зсередини на поверхнях теплиці побудовано пограничний шар, що складається з 5 шарів та 3 шарів відповідно. Дані заходи застосовані для поліпшеного розрахунку гідродинаміки.

Таблиця 2.4. Параметри побудови сітки для теплиці

Параметри налаштування	Теплиця
Показник якості сітки (orthogonal quality)	0,245
Кількість елементів, шт.	6524395
Кількість вузлів, шт.	1576108
Кривизна кута, град.	45
Метод	тетрагональна
Максимальний розмір елемента, м	0,2
Максимальний розмір грані, м	$9,4465 \cdot 10^{-3}$
Мінімальний розмір грані, м	$4,7232 \cdot 10^{-3}$

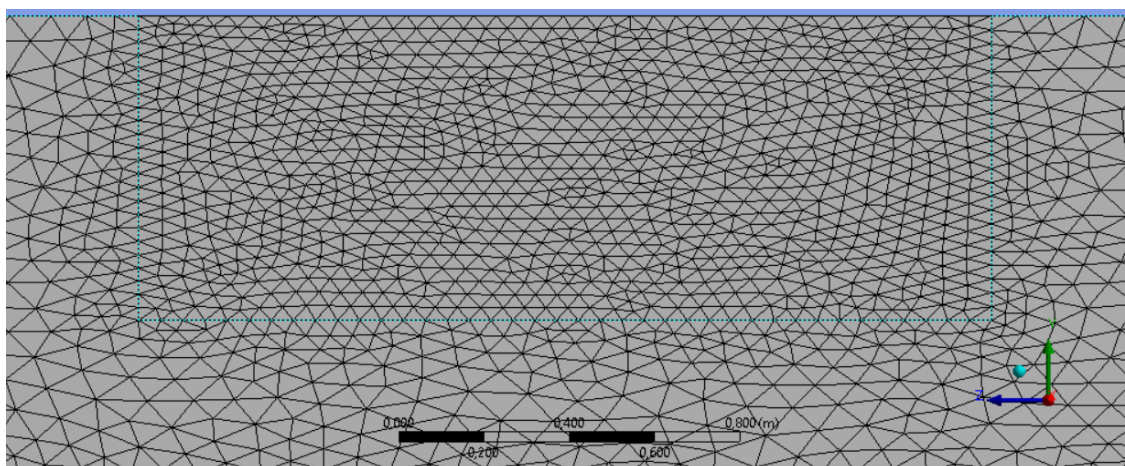


Рис. 2.23. Фронтальна сторона теплиці із зображенням фразути

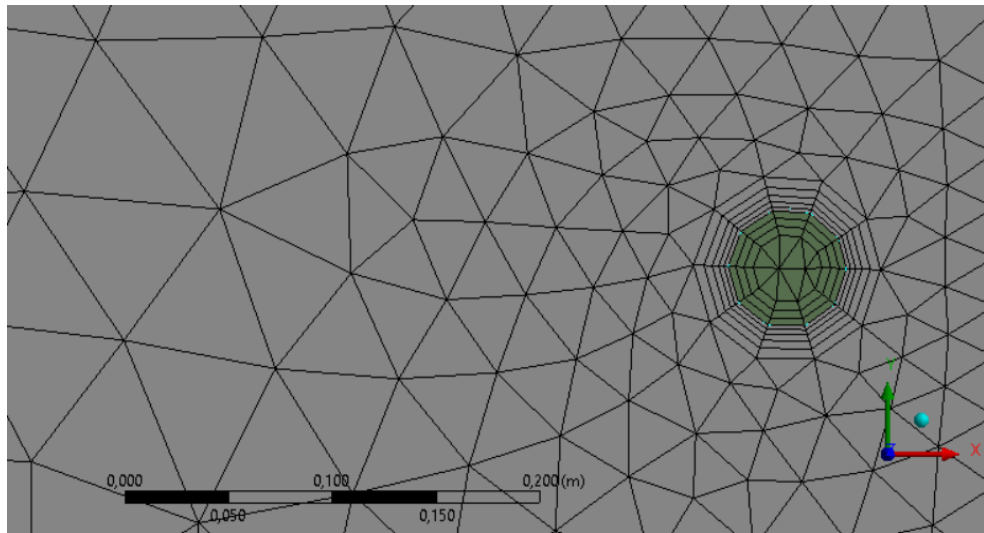


Рис. 2.24. Розріз сітки з системою опалення

Для побудови просторової моделі розподілення температур в теплиці визначимо фактори, що мають найбільшу вагу під час формування температурного поля [195]. Температура повітря в теплиці є результатом тепло- і масообміну між внутрішнім повітрям, певними елементами всередині теплиці (система опалення, вентиляції, рослини) та зовнішніми чинниками (повітря за межами теплиці, сонячна радіація) (рис. 2.25).

Процеси теплообміну в теплиці досліджено за допомогою чисельного моделювання, вони включають такі фактори: сонячна радіація, конвекція, природна вентиляція і система опалення. Переміщення потоків повітря в теплиці з природною вентиляцією представлено на основі рівнянь Нав'є-Стокса для ламінарного режиму течії:

$$\left. \begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \right\} \quad (2.71)$$

де  $\rho$  – густина середовища,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\mu$  – динамічна в'язкість середовища,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  
 $p$  – тиск,  $\text{Па}$ ;  $u, v, w$  – векторне поле швидкостей;  $t$  – час,  $\text{с}$ .

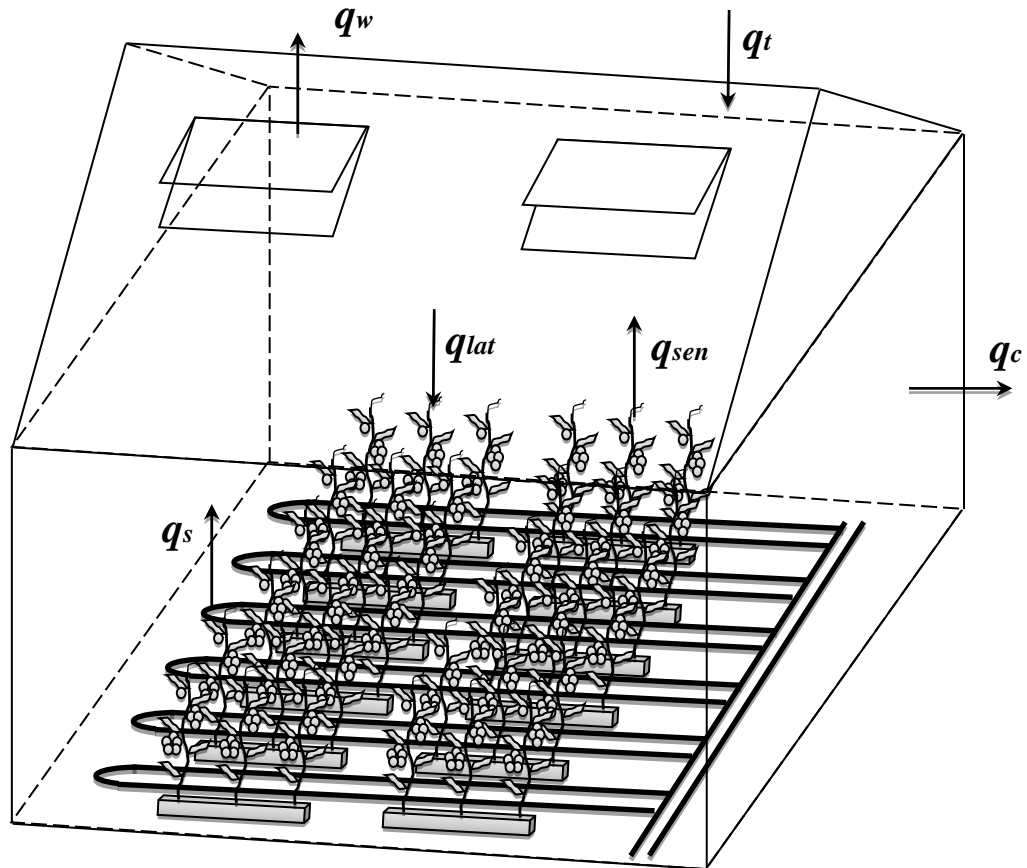


Рис. 2.25. Теплообмін в середовищі теплиці:  $q_t$  – тепловий потік в результаті дії сонячної радіації,  $q_s$  – тепловий потік системи опалення,  $q_w$  – тепловий потік через систему вентиляції,  $q_{lat}$ ,  $q_{sen}$  – теплообмін між поверхнею листа рослин та навколишнім середовищем,  $q_c$  – тепловтрати через зовнішні огорожі.

Рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial (u\rho)}{\partial x} + \frac{\partial (v\rho)}{\partial y} + \frac{\partial (w\rho)}{\partial z} = 0, \quad (2.72)$$

Рівняння збереження енергії:

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(\tau, x, y, z). \quad (2.73)$$

де  $T$  – температура в деякій точці,  $K^0$ ;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності середовища,  $Вт/м \cdot K^0$ ;  $C_p$  – питома теплоємність середовища,  $Дж/кг \cdot K^0$ .

Теплові джерела  $Q(\tau, x, y, z)$  враховують теплообмін між рослиною і зовнішнім повітрям в теплиці.

Під час моделювання задаються початкові й граничні умови для швидкостей і температур.

Початкові умови:

$$u=w=v=0 \text{ і } T=T_0, p=p_{\text{out}} \text{ при } t=0, \quad (2.74)$$

де  $T_0$  – температура повітря в початковий момент часу, яку вибираємо рівною  $10^\circ\text{C}$ ;  $p_{\text{out}}$  – тиск в зовнішньому середовищі за межами теплиці.

Граничні умови:

$$\begin{aligned} u \parallel_{s=v} \parallel_{s=w} \parallel_{s=0}, \quad \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_s = \frac{\partial v}{\partial n} \Big|_s = \frac{\partial w}{\partial n} \Big|_s = 0, \quad p \parallel_{tr} = p_{\text{out}}, \\ T \parallel_{s,\text{wal}} = T_{0s,\text{wal}}, \quad T \parallel_{sf} = T_{0s,f}, \quad T \parallel_{s,q} = T_{0sq}, \quad q \parallel_{s,\text{wal}} = \varepsilon q_{\text{out,rad}}, \end{aligned} \quad (2.75)$$

де індекси  $s$  і  $tr$  позначають відповідно поверхню різних елементів теплиці й фрамуг, індекси  $q$ ,  $f$  і  $wal$  – відповідно труби системи опалення, ґрунт на підлозі та огороження стінок, а  $T_{0s}$ ,  $T_{q0s}$  – відповідно температуру поверхні стінок теплиць і поверхні труб опалення, які визначаються експериментальним шляхом у процесі вимірювань. У граничних умовах враховано надходження в теплицю тепла сонячного випромінювання через скляні стінки огороження, де  $q_{\text{out,rad}}$  – густина сонячного теплового випромінювання,  $\varepsilon$  – ступінь прозорості для теплового випромінювання скляного огороження.

Для моделювання надходження потоку сонячної радіації до простору теплиці використовується модель випромінювання DO, що ґрунтується на передачі тепла через прозорі поверхні, якими в нашому конкретному випадку є скляна поверхня купола теплиці.

Модель випромінювання DO. Рівняння передачі випромінювання для поглинаючого, випромінюючого та розсіюючого середовища в положенні  $\vec{r}$  у напрямку  $\vec{s}$  є:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (2.76)$$

де  $\vec{r}$  – вектор положення;  $\vec{s}$  – вектор напрямку;  $\vec{s}'$  – вектор напрямку розсіювання;  $s$  – довжина шляху;  $a$  – коефіцієнт поглинання;  $n$  – показник заломлення;  $\sigma_s$  – коефіцієнт розсіювання;  $\sigma$  – константа Стефана-Больцмана ( $5,669 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $I$  – інтенсивність випромінювання, що залежить від положення ( $\vec{r}$ ) і напрямку ( $\vec{s}$ );  $T$  – місцева температура;  $\Phi$  – фазова функція;  $\Omega'$  – суцільний кут;  $(a + \sigma_s)s$  – оптична товщина або непрозорість середовища. Показник заломлення  $n$  важливий під час розгляду випромінювання в напівпрозорих середовищах.

Дискретна ординатна модель випромінювання вирішує рівняння передачі випромінювання (РПВ) для кінцевої кількості дискретних твердих кутів, кожен з яких пов'язаний з векторним напрямком, зафіксованим у глобальній декартовій системі  $(x, y, z)$ . Нероз'єднана реалізація має послідовний характер і використовує консервативний варіант моделі DO, який називається кінцево-об'ємною схемою [11, 19], та її поширення на неструктуровані сітки [41]. У нерозв'язному випадку рівняння енергії та інтенсивності випромінювання вирішуються по черзі, припускаючи переважні значення для інших змінних.

Дискретна модель ординат розглядає рівняння передачі випромінювання у напрямку як рівняння поля. Таким чином, рівняння (2.76) записується так:

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (2.77)$$

ANSYS Fluent також дає змогу моделювати не сіре випромінювання за допомогою моделі сірої смуги. РПВ для спектральної інтенсивності  $I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})$  можна записати, як [40]:

$$\nabla \cdot (I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) + (a_\lambda + \sigma_s)I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) = a_\lambda I_{b\lambda} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (2.78)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі,  $a_\lambda$  – коефіцієнт спектрального поглинання, а  $I_{b\lambda}$  – інтенсивність чорного тіла, задана функцією Планка. Коефіцієнт розсіювання, функція фази розсіювання та показник заломлення  $n$  приймаються незалежними від довжини хвилі.

Реалізація DO розділяє спектр випромінювання на  $N$  діапазонів довжин хвиль, які не повинні бути суміжними або рівними за ступенем. Інтервали довжин хвиль надаються і відповідають значенням у вакуумі ( $n = 1$ ). РПВ інтегрується протягом кожного інтервалу довжини хвилі, в результаті чого формуються транспортні рівняння для величини  $I_\lambda \Delta\lambda$ , енергії випромінювання, що міститься в діапазоні довжини хвилі  $\Delta\lambda$ . Поведінка в кожній смугі вважається сірою. Випромінювання чорного тіла в смугі довжини хвилі на одиницю твердого кута записується так:

$$[F(0 \rightarrow n\lambda_2 T) - F(0 \rightarrow n\lambda_1 T)] n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} \quad (2.79)$$

де  $F(0 \rightarrow n\lambda T)$  – частка променевої енергії, що випромінюється чорним тілом [40] в інтервалі довжини хвилі від 0 до  $\lambda$  при температурі  $T$  в середовищі показника заломлення  $n$ .  $\lambda_2$  і  $\lambda_1$  – межі довжини хвилі смуги.

Загальна інтенсивність  $I(\vec{r}, \vec{s})$  у кожному напрямку  $\vec{s}$  в положенні  $\vec{r}$  обчислюється з використанням:

$$I(\vec{r}, \vec{s}) = \sum_k I_{\lambda_k}(\vec{r}, \vec{s}) \Delta\lambda_k \quad (2.80)$$

де підсумовування перебуває над діапазонами довжин хвиль.

Граничні умови для не сірої моделі DO застосовуються на смужкових засадах. Обробка в діапазоні така ж, як і для сірої моделі DO.

Згідно з експериментальними даними (див. табл. 2.5) температура рослини відрізняється від температури повітря у теплиці. У різний момент часу доби температура рослини може бути більшою або меншою за температуру навколишнього середовища. Залежно від цього теплові джерела  $Q(\tau, x, y, z)$  можуть приймати додатне (виділення теплоти) або від'ємні (стоки теплоти) значення [48]. Тобто транспірація рослин та їхній теплообмін з навколишнім середовищем діє як приховане джерело або сток теплоти.

Таблиця 2.5 Температура на поверхні листа в різні моменти часу

Година доби	Температура листка, °C	Температура повітря в теплиці, °C
2	15	17
3	14	16
4	15	16
5	17,5	18
6	19	21
7	22	22
8	24	23
9	26	24
10	28	26
11	29	28
12	31	29
13	32	30
14	31	29
15	31,5	29
16	28	27
17	23	25

У процес теплообміну входить два взаємопов'язаних процеси – теплообмін між поверхнею листа і навколишнім середовищем  $q_{sen}$  та приховане тепло під час процесу транспірації в рослині  $q_{lat}$ .

$$Q = q_{sen} + q_{lat}. \quad (2.81)$$

де  $Q$  є додатковим джерелом (стоком) теплоти, який має об'ємний характер, оскільки рослини розташовані по всьому об'єму теплиці.

Ці процеси можна представити у вигляді виразу [115]:



$$q_{sen} = 0,53 \frac{\lambda}{l} Ra_l^{0,25}, \quad (2.82)$$

де  $l$  – середній розмір листка,  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності повітря,  $Ra_l$  – число Релея, що розраховується за формулою (2.70), в якій  $\Delta T_p = T_{leaf} - T_i$ , а  $T_{leaf}$  та  $T_i$  – температура листа рослини і навколишнього повітря відповідно.

Температура поверхні рослин визначається експериментально в процесі вимірювань, які представлено в табл. 2.5.

Модель теплогенерації під час транспірації в рослині також може ґрунтуватися на рівнянні Пенмана-Монтейта, що має такий вигляд [41]:

$$q_{lat} = \frac{R_n \Delta + 2 L_{ai} \left( \frac{\rho c_a}{r_a} \right) (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + r_a)}, \quad (2.83)$$

де  $e_s$  – тиск насиченої водяної пари,  $e_a$  – реальний тиск водяної пари у повітрі,  $\gamma$  – психометрична постійна,  $\Delta$  – змінна розподілення водяної пари у повітрі.

Безпосередньо чисельне моделювання проводилось у середовищі Ansys Fluent 14. Вхідні показники для моделювання приведені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6. Вхідні параметри моделювання

Назва параметра	Величина
Щільність повітря	$1,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$
Питома теплоємність	$1008 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$
Коефіцієнт теплопередачі скла	$6 \text{ Вт м}^2 \text{ К}$
Коефіцієнт прозорості скла	0,86
Коефіцієнт випромінювання скла	0,9
Зовнішня температура	$10 \text{ }^\circ\text{C}$
Температура ґрунту	$+20 \text{ }^\circ\text{C}$
Температура теплоносія в системі опалення	$+30 \text{ }^\circ\text{C}$

Була створена фізична модель одного блока теплиці, фрагмент інтерфейсу наведено на (рис. 2.26) згідно із її геометричними розмірами, та отримана просторово-розподілена модель температурного поля (рис. 2.27).

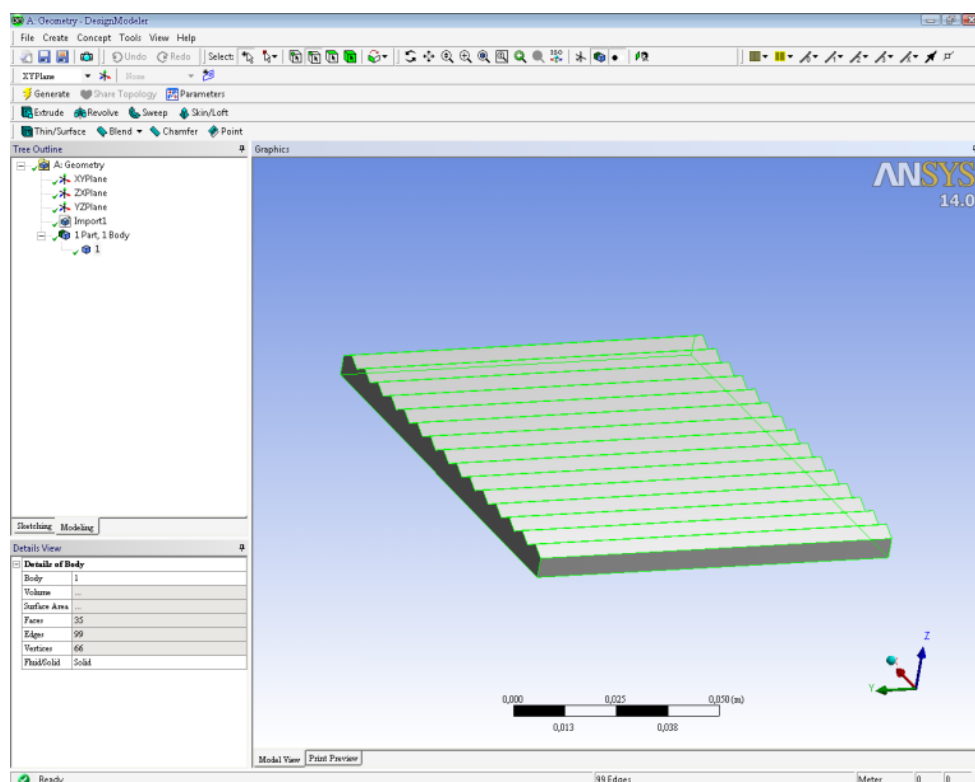


Рис. 2.26. Фізична модель блоків теплиці

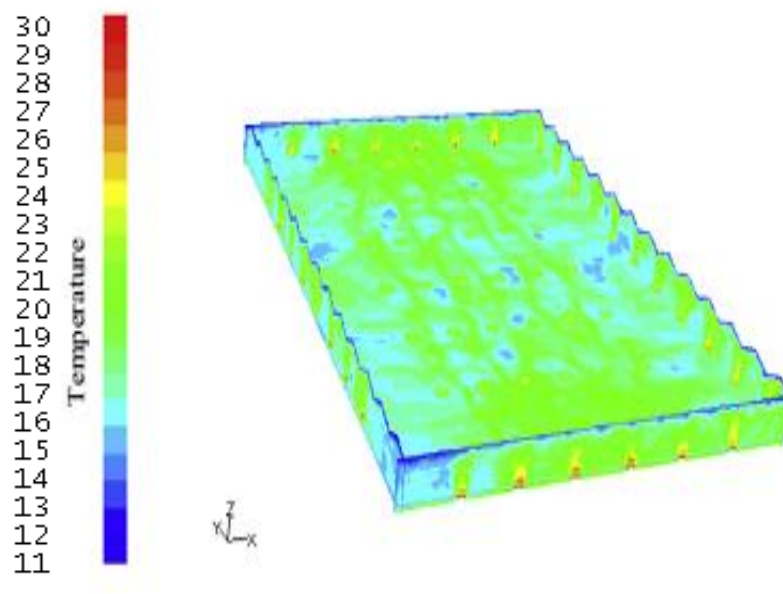


Рис. 2.27. Просторово-розподілена модель температурного поля повітряного середовища і зовнішніх стін теплиці

Розглядаючи процес формування температурного поля, можна дослідити його як в динаміці, так і при впливі тих чи інших зовнішніх факторів. На (рис. 2.28-2.29) показано зміну температурного поля у динаміці: в першому випадку без урахування природної вентиляції (при зачинених фрамугах), а в другому із урахуванням цього фактора (при відчинених фрамугах). Виведення результатів чисельного моделювання відбувалось по усіх секціях теплиці на висоті 0,5 м (рис. 2.28-2.29). Розподіл температур приміщення теплиці із зачиненими фрамугами відбувається поступово. З моменту запуску системи опалення стаціонарний режим настає (рис. 2.28) за 40-41 хв. Максимальна температура в деяких зонах теплиці за 45 хв. досягає  $+26,3^{\circ}\text{C}$ , середня температура повітря становить  $+23,1^{\circ}\text{C}$ .

Результати чисельного моделювання розподілу температур при відчинених фрамугах (рис. 2.29) дещо інші. Стаціонарний режим настає на 47-48 хв. Середня температура від 5 до 45 хв змінювалась в межах від  $+12,4$  до  $+22,1^{\circ}\text{C}$ . За 45 хв. при нагріванні повітря в теплиці спостерігаємо в деяких зонах падіння температури до  $+16,6^{\circ}\text{C}$ . У більшості зон теплиці температура повітря стабілізується на позначці  $+24,1^{\circ}\text{C}$ .

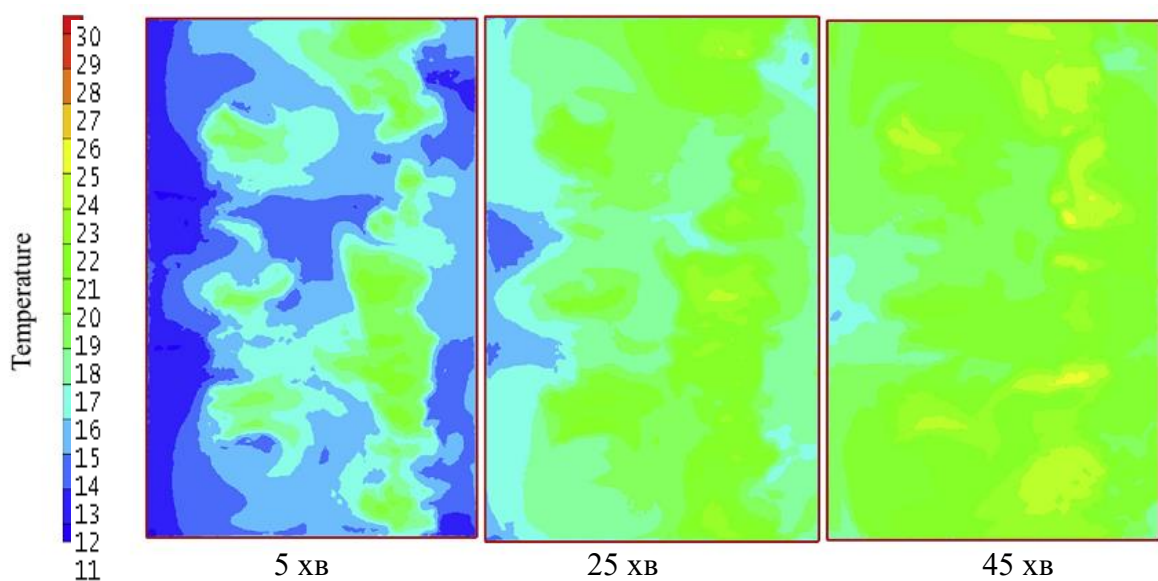


Рис. 2.28. Розподіл температурного поля при зачинених фрамугах

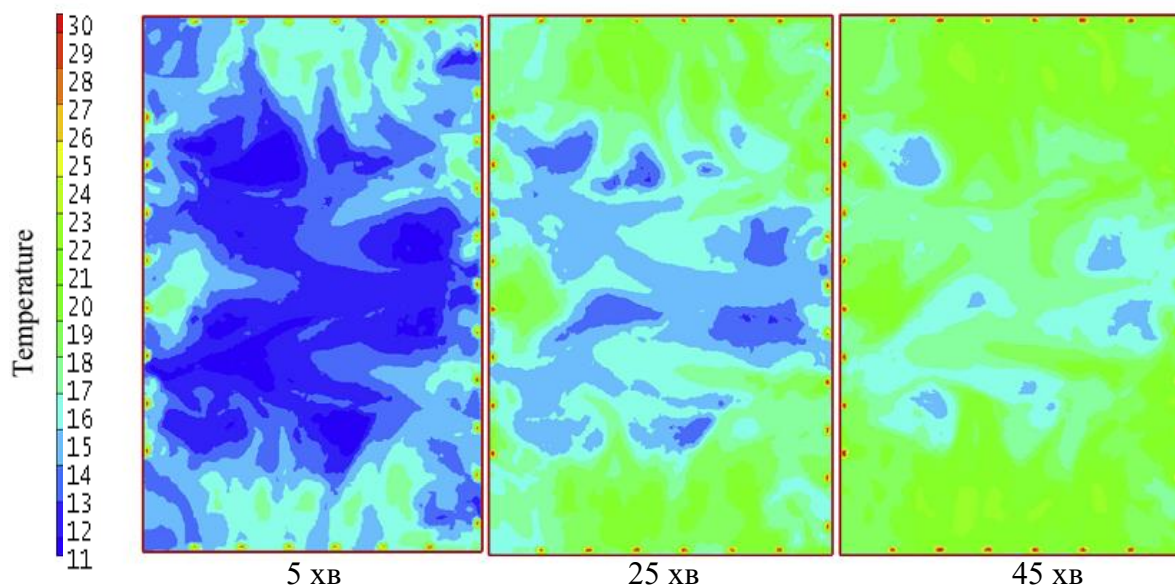


Рис. 2.29. Розподіл температурного поля при відчинених фрамугах

У зв'язку зі значними затратами на проведення експериментальних досліджень чисельне моделювання є ефективним і простим методом отримання необхідних результатів. Завдяки йому вдалось одержати більш детальну картину температурних полів у теплиці, що надалі дає змогу вдосконалити систему опалення без значних затрат.

Для перевірки моделі на адекватність в ПрАТ «Комбінат «Тепличний» в теплиці № 9 проводилися вимірювання температури у контрольних точках для співставлення з результатами моделювання. Зовнішня температура становила  $10^{\circ}\text{C}$ , потік сонячної радіації –  $500 \text{ Вт}\cdot\text{м}^2$ , фрамуги системи вентиляції були відчинені в шаховому порядку. Експериментальні вимірювання проводилися по середині кожної секції теплиці на висоті 0,5 м. Усього було проведено вимірювання у 15 контрольних точках. Співставлення експериментальних даних із результатами чисельного моделювання показано на (рис. 2.30).

Для оцінки адекватності розробленої математичної моделі застосовувались такі показники:

середнє значення всіх вимірів у досліді:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=15}^{20} Y_i}{n}, \quad (2.84)$$

де  $n$  – кількість спостережень;  $i$  – номер спостереження;  $Y$  – дисперсія відтворення:

$$S_{vid} = \frac{\sum_{i=15}^{20} (Y_i - \bar{Y})^2}{n_0 - 1}, \quad (2.85)$$

де  $n-1$  – число ступенів вільності, що дорівнює кількості дослідів мінус одиниця.

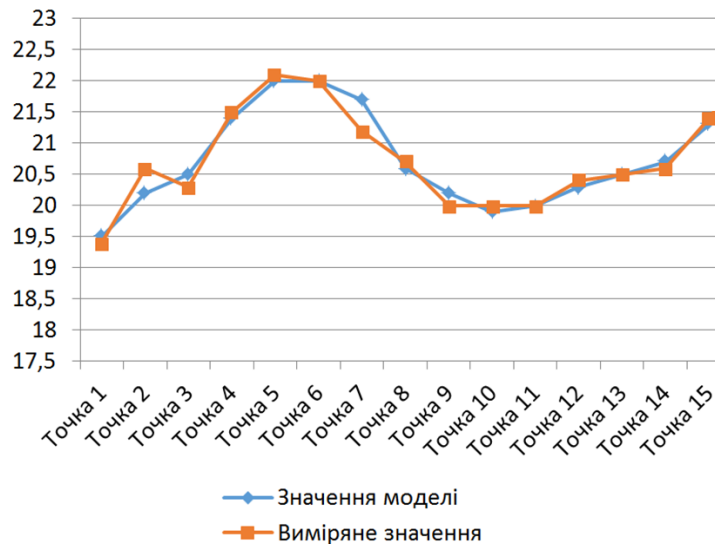


Рис. 2.30. Співставлення результатів чисельного моделювання із експериментальними дослідженнями

У розрахунках величину довірчої ймовірності приймали  $P=0.95$ , відповідає помилка в межах  $\pm 3S$ . Розроблену математичну модель перевіряли на адекватність за критерієм Фішера, для цього визначали дисперсію адекватності:

$$S_{Ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_{iE} - Y_T)^2}{f}, \quad (2.86)$$

де  $f$  – число ступенів вільності дисперсії адекватності;  $\bar{Y}_{iE}$  – середнє значення відгуку в  $i$ -му досліді;  $Y_T$  – значення відгуку в  $i$ -й точці, обчислене за моделлю;

$$F = S_{ad}^2 / S_{vid}^2. \quad (2.87)$$

Розраховане за виразом (2.87) значення критерію Фішера менше критичного  $F_p < F_m = 5$ , що свідчить про адекватність моделі. Похибка моделі становить не більше ніж 5% від загального показника температури повітря в теплиці, які визначені експериментальним шляхом.

Результати чисельного дослідження були використані для виявлення зон подібності температурних полів, які застосовуються надалі для навігації мобільних роботів.

У розділі використані матеріали власних досліджень [32, 80, 85, 152, 153, 175, 182, 195, 202, 207, 230, 277].

## Висновки до Розділу 2

1. Розглядаючи поняття врожай, враховано принцип лімітуючих факторів, оскільки він полегшує реалізацію фізичного або комбінованого методу дослідження вирощування рослини. Закон мінімуму свідчить про те, що всі фактори врожайності однаково потрібні рослинам і не можуть замінити один одного. За відсутності або нестачі одного з них різко знижується врожайність. Тому необхідно забезпечити рослини усіма без винятку умовами для росту і врожайності, враховуючи також їхню взаємодію. Тільки створенням для рослин необхідних умов можна забезпечити зростання врожайності.

2. Вирішено оптимізаційне завдання визначення рівня впливу та кількості основних факторів, що впливають на якість продукції, ріст і розвиток рослини, під час забезпечення яких системами керування тепличних комплексів витрачається природний газ, електроенергія, враховуючи вплив природних збурень (температури і сонячної радіації) на біотехнічний об'єкт. Встановлено оптимальну кількість основних факторів життєзабезпечення рослин, на підтримку яких витрачаються енергетичні ресурси, враховуючи вплив природних збурень на біотехнічний об'єкт. До основних факторів, які суттєво впливають на ріст і врожайність рослин і на підтримання яких витрачається природний газ та електроенергія, належать: світлозабезпечення, вологозабезпечення, теплозабезпечення, забезпечення поживними речовинами та газозабезпечення.

3. Проведено дослідження кількісних показників впливу кожного фактора на врожайність рослини з використанням поняття балансу, але в формі, яка дає змогу одним параметром характеризувати найважливішу сторону обмінних процесів і відносить його до всієї системи в цілому. Такий параметр являє собою відношення тієї частини чинників, яка використовується системою, до всієї величини чинників, які до неї надходять. Отримано математичні моделі основних факторів навколишнього середовища рослин у вигляді коефіцієнтів їх життєзабезпечення в системі рослина–субстрат–повітря, що дає можливість встановити закономірність формування врожаю рослиною: при збільшенні факторів життєзабезпечення відбувається зростання врожаю, але до певної межі, після чого всіляке зростання фактора вже не дає жодного збільшення врожаю як в кількісному, так і в якісному виразах, більше того, відбувається його згасання.

4. За результатами натурних досліджень встановлено, що температура рослин суттєво відрізняється від температури повітря в теплиці (до 7°C), що слід враховувати для реалізації відповідних алгоритмів системами керування. Розроблені математичні моделі для використання під час налагодження системи керування на визначені технологічні параметри. При цьому похибки

розрахунку за моделями не перевищували  $0,82^{\circ}\text{C}$  – для розрахунку температури стебла;  $0,507^{\circ}\text{C}$  – для розрахунку температури плоду;  $1,188^{\circ}\text{C}$  – для розрахунку температури листка;  $1,37^{\circ}\text{C}$  – для розрахунку температури повітря біля рослини. За результатами досліджень визначено коефіцієнт кореляції між температурою стебла і його діаметром, який становить  $r_{xy}=0,19$ , що вказує на слабкий зв'язок між цими параметрами. Використано метод найменших квадратів для адаптивного алгоритму уточнення параметрів математичної моделі, що змінюються в процесі експлуатації. Відносна похибка не перевищує 5%.

5. Для оцінки безконтактним способом якості розвитку рослини та плоду томата розроблено метод з використанням математичного апарату вейвлет-перетворення. Розроблено схему проведення вейвлет-аналізу зображення рослин під час визначення їхніх фітотричних параметрів, а також оцінки стану і фази розвитку рослини. Проведено розкладання зображення плоду помідора на вейвлет-коефіцієнти, що дає нам можливість розпізнавати плід помідора, виділяючи такі ознаки: колір плоду та суцвіття, структура і контури. Відповідні дані використовуються для подальшої оцінки якості розвитку рослини за фітотричними параметрами, такими як формування рослиною кількості квіточок у суцвітті; кількість плодів на гілці; середня вага та стиглість плоду; приріст ваги плоду за створеними математичними моделями.

6. Розроблено модель розподілення температурних полів у теплиці та проведено порівняння отриманих даних із результатами натуральних вимірів у теплиці. Аналізуючи результати моделювання, виявлено зони подібності температурних полів, які можливо використовувати в подальшому для навігації мобільних роботів. Модель пройшла перевірку на адекватність шляхом порівняння отриманих даних із експериментальними за методом Фішера. Значення розрахованої похибки не перевищує 5%, що дає можливість використовувати модель для автоматизованого переміщення роботизованих комплексів у теплиці.



### **РОЗДІЛ 3. КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПОТОКАМИ ТЕПЛИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ**

#### **3.1. Концептуальна модель системи керування енергетичними потоками просторово-розподілених об'єктів**

Для тепличних комплексів під час виробництва овочевої продукції найважливішим завданням є отримання максимально можливого прибутку, величина якого визначається обсягами продукції, її якістю та витратами, що супроводжують виробництво. Зазначене досягається шляхом створення систем, що формують стратегії керування технологією виробництва рослинної продукції, які, із врахуванням біологічних особливостей рослин, природних збурень та якості рослинної продукції, забезпечують вирішення такого завдання.

Основним завданням під час формування стратегії керування є створення підсистеми керування процесом вирощування овочевої продукції відповідної якості. Особливість діяльності цієї підсистеми полягає у функціонуванні збільшення якості продукції, що виробляється, із можливістю зміни параметрів біотехнічного об'єкта внаслідок дії збурюючих впливів, що даватиме змогу максимізувати прибуток виробництва та мінімізувати споживання енергетичних ресурсів [87, 179].

Для представлення структури системи керування, властивостей її елементів і причинно-наслідкових зв'язків, що властиві системі, була розроблена концептуальна модель системи керування енергетичними потоками просторово-розподілених об'єктів – тепличних комплексів, для виробництва продукції заданої якості (рис. 3.1).



збирання та обробки інформації побудована на таких основних принципах [87]:

- наявність комплексів, що використовуються як АРМ і об'єднані однією мережею, яка виходить на глобальні мережі;
- наявність сервера з умовно-постійною інформацією і розподіленими базами даних;
- збирання у ритмі виробництва первинної (фактичної) інформації в мінімально необхідному складі, яка характеризує всі операції і процеси, що відбуваються на об'єкті керування;
- системна обробка первинної інформації разом з умовно-постійною здійснюється так, щоб вихідна інформація видавалася в максимально необхідному складі й забезпечувала всі потреби керування об'єктом, включаючи облік, звітність, аналіз, вироблення та прийняття рішень;
- вироблення та прийняття управлінських рішень базується на інформації, яка є об'єктивною, вірогідною та всебічно характеризує виробничо-господарську та іншу діяльність об'єкта керування на кожен даний момент.

Концептуальна модель системи керування енергетичними потоками просторово-розподілених об'єктів – тепличних комплексів, для виробництва продукції заданої якості складається з наступних основних блоків:

- промислова теплиця, до складу якої входять технологічний та біологічний об'єкт;
- блок аналізу просторово-розподілених біотехнічних параметрів;
- блок визначення критеріїв ефективного використання енергетичних ресурсів, якості врожаю та розвитку рослин;
- блок математичних моделей виробництва продукції;
- блок формування оптимальних стратегій системи керування виробництвом рослинної продукції.

Як бачимо, концептуальна структура системи керування має замкнений цикл, який полягає в тому, що система керування здійснює свій вплив на

біотехнічний об'єкт завдяки прийняттю відповідних оптимальних стратегій керування для виробництва продукції заданої якості і зворотному зв'язку у вигляді критеріїв оцінки якості розвитку рослин та продукції.

### **3.2. Обґрунтування критеріїв оцінки якості розвитку рослин та продукції**

#### **3.2.1. Фітометричний критерій оцінки якості розвитку рослин**

Оцінка якості на основі диференційного і комплексного методів оцінки рівня якості томатів не дає змоги успішно вирішити поставлене завдання комплексної оцінки рівня якості томатів, оскільки необхідно враховувати показники розвитку рослини в різних її фазах, а саме: цвітіння, формування плоду та отримання врожаю, а також показники якості – ступінь зрілості, діаметр томата. За допомогою диференційного методу практично неможливо зробити конкретний висновок, а застосування тільки одного комплексного методу не дає можливості врахувати всі властивості томатів. Для оцінки рівня якості томатів використано змішаний метод, який дає можливість комплексно оцінити рівень розвитку якості томатів за допомогою фітометричного критерію [79].

Запропоновано алгоритм визначення фітометричних параметрів розвитку рослини безконтактним способом. Після того як зображення надіслано до системи розпізнавання, воно проходить обробку і потрапляє до банку даних зазначеної системи. Зображення зберігається в блоці керування базами даних, де піддається вейвлет-аналізу, визначенню та порівнянню коефіцієнтів математичного розкладання з базою даних пакета прикладних програм для визначення фітометричних параметрів рослини (рис.3.2) [32].

Проведено оцінку рівня якості розвитку рослин з використанням методу, що базується на основі використання фітометричного критерію. Оцінка якості розвитку рослин зазначеним методом полягає в такому[79]: 1)

показники якості об'єднуємо в групи, для кожної визначаємо груповий комплексний показник, найбільш значимі одиничні показники не включаємо в групи, а розглядаємо окремо; для якісної оцінки показники групуємо за характерними властивостями; 2) знайдені величини згрупованих комплексних і окремо виділених найбільш важливих одиничних показників порівнюємо з відповідними значеннями базових показників, тобто застосовуємо принцип диференціального методу; 3) всі обрані показники і групи зводимо в комплексний визначальний показник, на підставі якого здійснюємо остаточну оцінку рівня якості томатів.

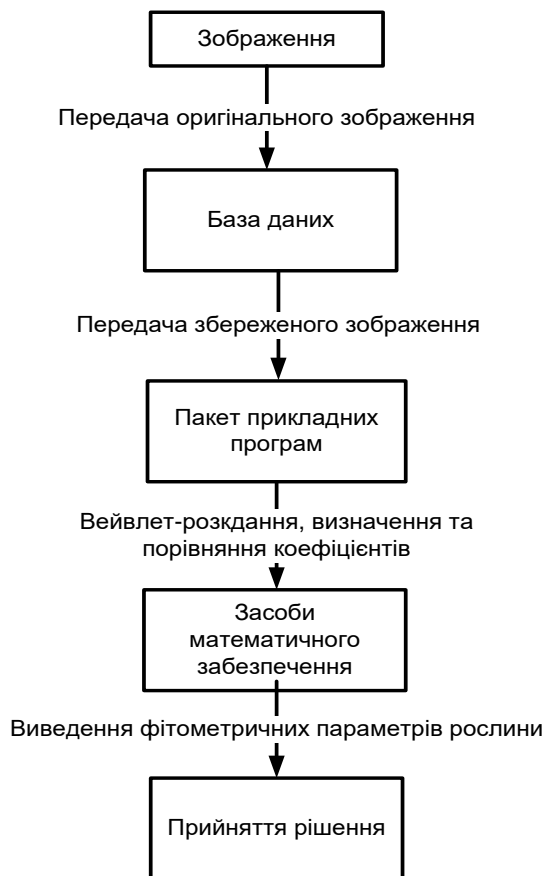


Рис. 3.2. Схема вейвлет-аналізу зображення

Фітометричний критерій  $\Phi_m$  характеризується значною кількістю показників розвитку рослини в різних її фазах, а саме: цвітіння, формування плоду та отримання врожаю, які мають різні вимірювальні шкали. Для приведення їх до однієї шкали оцінювання якості розвитку рослин була

використана залежність:

$$\Phi_M = f(K_1, K_2, \dots, K_n), \quad (3.1)$$

де  $K_1, K_2, \dots, K_n$  – окремі показники якості розвитку рослини в різних фазах.

У загальному вигляді на основі комплексного середньозваженого арифметичного і геометричного визначення показників якості розвитку рослини вираз для оцінки якості томатів представимо як [76, 79]:

$$K = \sum_{j=1}^T \left( A_j \cdot \sum_{i=1}^{H_j} (a_i \cdot k_i) \right) = \sum_{j=1}^T (A_j \cdot G_{jg}) , \quad (3.2)$$

де  $T$  – кількість груп показників якості томатів;  $H$  – число показників якості в  $j$ -й групі;  $a_i$  – коефіцієнт вагомості  $i$ -ї властивості;  $k_i$  – відносний  $i$ -й показник якості;  $G_{jg}$  – рівень якості  $j$ -ї групи показників ( $0 \leq G_{jg} \leq 1$ );  $A_j$  – параметр вагомості  $j$ -ї групи показників якості томатів.

З використанням принципів кваліметрії [98] були отримані комплексні показники оцінки якості розвитку рослини ( $K_1-K_n$ ) від температури повітря  $\Theta$  та сонячної радіації  $L$ , були отримані рівняння регресії:

- формування рослиною кількості квіточок у суцвітті:

$$K_1(\Theta, L) = -0,05417 + 0,0375 \cdot \Theta - 0,55843 \cdot L - 0,00225 \cdot L \cdot \Theta^2 + 0,066563 \cdot L \cdot \Theta + 0,11419 \cdot L^2 - 0,01188 \cdot L^2 \cdot \Theta + 0,000339 \cdot L^2 \cdot \Theta^2; \quad (3.3)$$

- формування рослиною кількості плодів на гілці:

$$K_2(\Theta, L) = 0,24375 - 0,03125 \cdot \Theta - 0,00203 \cdot L - 0,00013 \cdot L \cdot \Theta^2 + 0,014219 \cdot L \cdot \Theta + 0,020176 \cdot L^2 - 0,00194 \cdot L^2 \cdot \Theta + 0,0000181 \cdot L^2 \cdot \Theta^2; \quad (3.4)$$

- середня вага плоду:

$$K_3(\Theta, L)=1,79762-0,08929\cdot\Theta-1,1082\cdot L-0,0012\cdot L\cdot\Theta^2+0,084598\cdot L\cdot\Theta+ \\ +0,102193\cdot L^2-0,00625\cdot L^2\cdot\Theta+0,0000658\cdot L^2\cdot\Theta^2; \quad (3.5)$$

- приріст ваги плоду:

$$K_4(\Theta, L)=0,211504+0,01404\cdot\Theta-0,39973\cdot L-0,00051\cdot L\cdot\Theta^2+0,023981\cdot L\cdot\Theta+ \\ +0,027996\cdot L^2-0,00039\cdot L^2\cdot\Theta+0,0000093\cdot L^2\cdot\Theta^2. \quad (3.6)$$

Оцінка якості розвитку рослини за інтегральною залежністю показників з однаковим ваговим коефіцієнтом 0,25 дала змогу отримати залежність фітометричного критерію якості розвитку рослини від впливу середньодобової температури повітря та інтенсивності світла (рис. 3.3):

$$\Phi_M(\Theta, L)=0,517645-0,01491\cdot\Theta-0,49627\cdot L-0,00099\cdot L\cdot\Theta^2+0,045348\cdot L\cdot\Theta+ \\ +0,063845\cdot L^2-0,00488\cdot L^2\cdot\Theta+0,000103\cdot L^2\cdot\Theta^2. \quad (3.7)$$

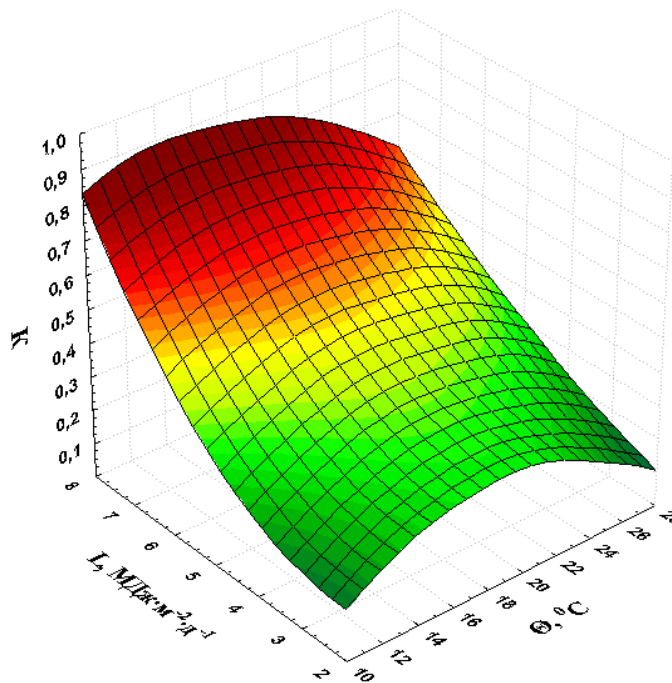


Рис. 3.3. Залежність фітометричного критерію від середньодобової температури повітря та інтенсивності світла

За допомогою фітометричного критерію визначаємо рівень розвитку рослини в період її вегетації. Підтримання максимального рівня розвитку дасть можливість на початковій стадії сформувати у рослини максимальну врожайність. У теплиці при температурах 15..24°C відбувається найкраще формування рослиною врожаю (кількості квіточок у суцвітті, кількості плодів на гілці, середньої ваги плоду, приросту ваги плоду).

### **3.2.2. Фітотемпературний критерій оцінки якості розвитку рослин**

Встановлено, що раціональне регулювання мікроклімату в теплиці забезпечує 90% урожаю [93]. Як зазначалося раніше, основними складовими мікроклімату є температура, освітленість, рівень CO<sub>2</sub> у теплиці та відносна вологість. Максимальний рівень урожайності досягається зниженням стресів і забезпеченням оптимального балансу всіх факторів. Про стан рослини та правильний розвиток свідчать рівномірне цвітіння, плодоношення (генеративність) та утворення листків і розвиток кореневої системи (вегетативність) [166, 177].

Для кожного виду овочів характерна біологічна особливість технології вирощування. Рослини помідора є теплолюбною культурою, і за технологією вирощування температура повітря у теплиці різна залежно від фази розвитку рослини протягом вирощування.

Для кращого розвитку рослин необхідне підтримання технологічних умов вирощування, під час якого здійснюватиметься оцінка та порівняння параметрів температури, що вимірюються в різних місцях теплиці. Керування технологічними параметрами мікроклімату під час вирощування рослин базується на вимірених фітометричних параметрах рослини, що дає змогу оцінити розвиток рослин шляхом введення фітотемпературного критерію для оцінки стану рослини [171].



Фітотемпературний критерій  $\Phi_r$  оцінки розвитку рослини та її температурного середовища оцінює ту частину тепла, що надходить від теплоносія системи опалення теплиці для нагрівання рослини та середовища навколо неї [191]:

$$\Phi_r = \frac{\Theta_p - \Theta_z}{\Theta_0 - \Theta_z}, \quad (3.8)$$

де,  $\Theta_p$  – температура рослини;  $\Theta_0$  – температура повітря в теплиці;  $\Theta_z$  – температура зовнішнього повітря.

Розповсюдження тепла в теплиці проходить відповідно до розміщення труб опалення. У теплицях з водяним опаленням, яке є найбільш ефективним, труби опалення прокладено поздовж кожного ряду, тому доцільно говорити про те, що тепло надходить до рослин окремо для кожного ряду, але нерівномірно через вплив збурюючих факторів, інерційність системи опалення та розподілу тепла за площею теплиці. Через ці особливості обігрівання рослин вимірювання фітометричних параметрів доцільно проводити для кожного ряду, замінивши значення  $\Theta_p$  на усереднене значення температури рослин в ряді, яке визначається за виразом [171]:

$$\Theta_m = \frac{\sum_{i=1}^n \Theta_{mi}}{n}, \quad (3.9)$$

де  $\Theta_{mi}$  – температура  $i$ -ї рослини в ряді  $m$ ;  $n$  – кількість вимірів у ряді.

Схематично місця фітомоніторингу мають такий вигляд (рис. 3.4).

Для визначення фітотемпературного критерію групи рослин отримане усереднене значення відповідного ряду підставимо у вираз (3.8) і отримаємо [178]:

$$\Phi_m = \frac{\Theta_m - \Theta_z}{\Theta_0 - \Theta_z}. \quad (3.10)$$

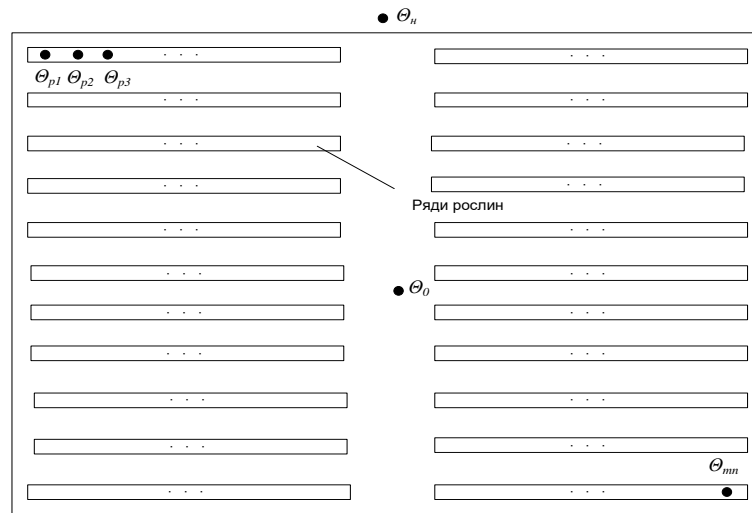


Рис. 3.4. Схематичне розташування рядів для фітомоніторингу на всій площі теплиці

Критерій  $\Phi t$  буде рівним 1 у випадку, коли температура рослин буде рівна температурі повітря в теплиці. Однак досягнути цього дуже важко та неможливо, якщо враховувати дію збурень, розподіл тепла від теплоносія в теплиці та інерційність системи опалення, тому базуючись на дослідженнях Є. С. Сігаєва [225], виведемо межі оцінки критерію  $r_m$ , оскільки температура рослини протягом дня може бути меншою до  $2^{\circ}\text{C}$  та більшою до  $3^{\circ}\text{C}$  порівняно з температурою повітря теплиці, про що свідчать дослідження, наведені в табл. 3.1.

Для підтримання необхідного мікроклімату визначимо межі фітотемпературного критерію рослини. Він перебуватиме в межах від 0,9 до 1,1 з урахуванням, що температура рослини повинна бути в межах  $21..25^{\circ}\text{C}$  вдень та  $18..22^{\circ}\text{C}$  вночі відповідно до технології вирощування [178].

Опис експериментальних даних, що представлені в табл. 3.1, проведено з використанням стандартної методики [261], в основу якої покладено метод найменших квадратів. Таким чином було отримане у явному вигляді рівняння регресії:

$$\Phi t(\Theta_p, \Theta) = -4,96 + 0,059 \cdot \Theta_p - 0,243 \cdot \Theta + 0,027 \cdot \Theta_p \cdot \Theta + 0,0031 \cdot \Theta_p^2 - 0,0091 \cdot \Theta^2 - 0,0175 \cdot \Theta_p^2 - 0,0175 \cdot \Theta^2. \quad (3.11)$$

Таблиця 3.1 Значення фітотемпературного критерію  $\Phi t$  оцінки температури рослини та її температурного середовища

Година доби	Температура листка, °C	Температура повітря в теплиці, °C	Температура зовнішнього середовища, °C	Фітотемпературний критерій $\Phi t$
2	15	17	8	0,77
3	14	16	8	0,75
4	15	16	8	0,875
5	17,5	18	8	0,95
6	19	21	8	0,84
7	22	22	9	1
8	24	23	10	1,08
9	26	24	12	1,16
10	28	26	13	1,15
11	29	28	14	1,07
12	31	29	14	1,06
13	32	30	15	1,06
14	31	29	15	1,01
15	31,5	29	15	1,17
16	28	27	14	1,08
17	23	25	14	0,81

Для забезпечення технологічних вимог вирощування якісної рослинної продукції в теплиці запропоновано оцінку температур рослин ( $\Theta_p$ ) і атмосфери теплиці ( $\Theta$ ) проводити на основі використання фітотемпературного критерію оцінки розвитку рослин (рис. 3.5).

Для визначення потреби використання фітотемпературного критерію виведемо інтегральну функцію нормального розподілу значень температур рослини та повітря, значення якої ми порівнюємо з експериментальними даними температури повітря та рослини (табл. 3.1) [171].

За достатньо великої кількості вимірювань випадкової величини ймовірність появи її значень підпорядковується нормальному закону розподілу (закону Гаусса) [188]:

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.12)$$

де  $f(x, \mu, \sigma)$  – щільність імовірності випадкової величини  $x$ ;  $\mu$  – математичне сподівання випадкової величини (центр групування її значень);  $\sigma^2$  – дисперсія випадкової величини (міра розсіювання значень випадкової величини відносно центра групування);  $\sigma$  – середнє квадратичне відхилення випадкової величини (характеристика розсіювання значень випадкової величини відносно центра групування, яка дорівнює кореню квадратному з дисперсії);  $e$  – основа натуральних логарифмів. Прийнято нормальний закон розподілу випадкової величини характеризувати лише двома параметрами:  $\mu$  – математичним сподіванням і  $\sigma$  – середнім квадратичним відхиленням.

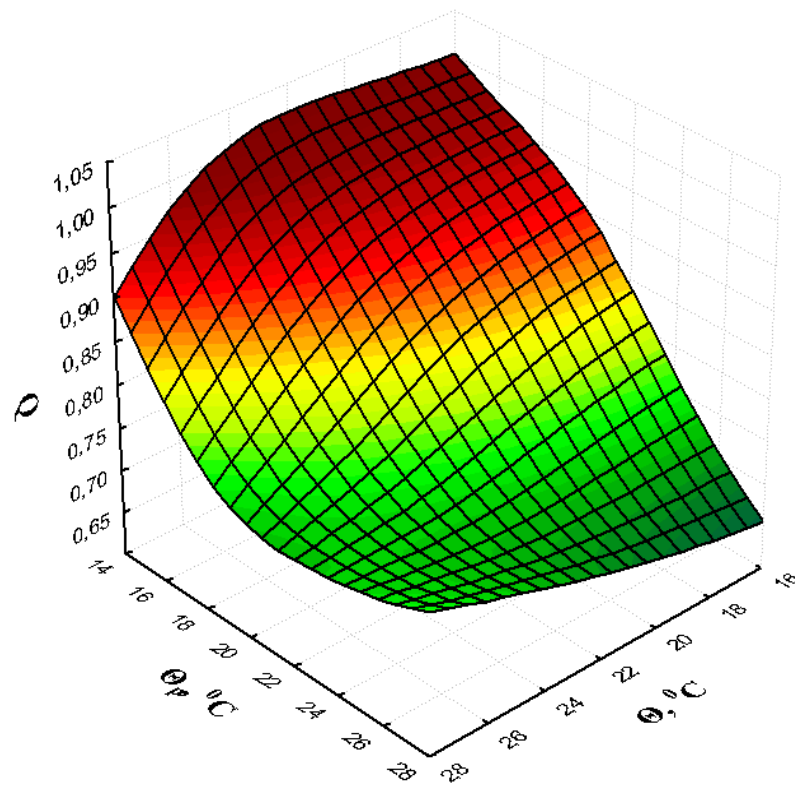


Рис. 3.5. Залежність фітотемпературного критерію від температур повітря та рослини

Вибіркове середнє квадратичне відхилення  $\sigma$  визначається за відомим алгоритмом:

$$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_e)^2}{n}}, \quad (3.13)$$

де  $x_i$  – значення температури  $i$ -ї рослини;  $x_{\bar{e}}$  – середнє значення температури рослин;  $n$  – кількість вимірювань.

Результати вимірювань (табл. 3.1) дали змогу встановити, що вибіркове середнє квадратичне відхилення для температури повітря  $\sigma = 4,79$  і для температури рослини  $\sigma = 6,58$ .

Для розподілу відносних частот виміряних даних проводимо сортування вихідних (дослідних) даних за збільшенням, яке виконуємо, виокремивши діапазон комірок з вихідними даними від найменшого до найбільшого, та визначимо за допомогою прогресії класові інтервали [171].

Кількість класів ( $k$ ) визначаємо за формулою Стерждеса [128, 201]:

$$k = 1 + 3,32 \cdot \log(n), \quad (3.14)$$

де  $n$  – кількість спостережень.

За результатами розрахунків встановлено, що для температури повітря і температури рослини  $k = 16$ .

Інтегральні функції розподілу представлені на рис. 3.6, 3.7.

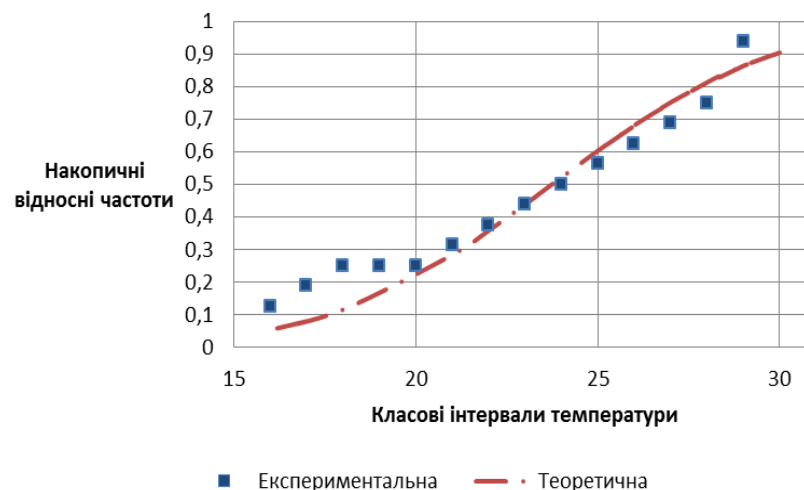


Рис. 3.6. Інтегральні функції нормального розподілу температури повітря



Рис. 3.7. Інтегральні функції нормального розподілу температури рослини

Для виведення експериментальної кривої досліджень слід розрахувати накопичену відносну частоту, що є відношенням накопиченої частоти до загального числа спостережень  $n$  [178]:

$$w_i = \frac{n_i}{n}, \quad (3.15)$$

де  $n_i$  – накопичена частота;  $n$  – кількість вимірювань.

Накопичені частоти для кожного інтервалу знаходяться послідовним додаванням частот всіх попередніх інтервалів.

Із (рис. 3.6) та (рис. 3.7) видно, що експериментальні значення температури повітря в теплиці з використанням системи автоматичного регулювання температури повітря наближені до виведених її теоретичних параметрів, однак відрізняються для температури рослини, що розміщена в теплиці, де не використовуються фітотемричні виміри рослин для забезпечення температурного режиму. Для кращого розвитку рослини фітотемпературний критерій повинен перебувати у зазначених межах. На рівень фітотемпературного критерію впливає мікроклімат теплиці, який досягається за рахунок доповнення існуючої системи опалення додатковим

обладнанням, що забезпечуватиме диференційований розподіл кількості тепла із врахуванням зовнішніх збурень [178].

Використання такого критерію під час регулювання температурного режиму дасть можливість забезпечувати належний рівень температури рослин відповідно до технологічних вимог. Потребу у використанні критерію підтверджує факт отримання нерівномірного врожаю з кожного ряду теплиці в тепличних господарствах [166]. Використання цього критерію в регулюванні температурного режиму дає можливість отримати більше продукції порівняно з існуючим алгоритмом регулювання, який базується на отриманій інформації про температуру повітря, а не рослин.

З літературних джерел [58] та рівняння (3.6) залежності впливу середньодобової температури повітря та інтенсивності світла на приріст ваги плоду можна визначити погодинний приріст урожаю при зазначених температурних режимах повітря:

$$m_{cp} = \frac{m_t}{24}, \quad (3.16)$$

де  $m_{cp}$  – середня маса приросту урожайності за годину;  $m_t$  – маса приросту при температурі повітря  $\Theta$ .

Розраховані дані наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 Вплив температури повітря на приріст врожайності помідорів погодинно

Температура повітря $\Theta$ , °C	10	11,5	13	14,5	16	17,5	19	20,5	22	23,5	25	26,5	28
Врожайність томатів, грам.	1.6	2.5	3.4	4.1	4.7	5.2	5.6	5.8	6	6.2	6.3	6.2	6.1

За аналізом досліджень встановлено, що використання фітотемпературного критерію дає можливість отримати від рослини максимальну кількість врожаю. У теплиці з існуючою системою регулювання температури повітря найбільший приріст продукції був з 8-ї по

9-ту годину при температурах 23..24°C та становив 6,2..6,3 г за годину. Як наслідок, з одного куща одержимо менше ніж 160 грамів приросту за добу, оскільки при температурних режимах 17..22°C рослина отримує недостатню енергію для кращого розвитку і приріст становить 5,2..6 г, а при температурах понад 25°C приріст врожаю буде менше ніж 6 г за годину.

### 3.3. Оцінка просторово-розподілених параметрів фітокліматичним показником життєзабезпечення рослин

На даний час не встановлено взаємозв'язків між споживанням енергетичних ресурсів системами керування в теплиці та біологічним об'єктом, враховуючи просторово-розподілену інформацію про фітокліматичні умови розвитку та якість рослинної продукції. Не розроблені принципи побудови і функціонування системи керування енергетичними потоками просторово-розподілених об'єктів – тепличних комплексів, для виробництва продукції заданої якості.

Для визначення показника життєзабезпечення рослини ( $\Phi_k$ ) на всій площі теплиці застосовуємо такий алгоритм. Нехай  $\tilde{v}_{ij}(\tilde{t}_{jk})$  – значення показника життєзабезпечення рослини, визначеного в  $i$ -му ряду  $j$ -го місця за відповідної сумарної інтенсивності сонячної радіації ( $\tilde{t}_{jk}$ ), де  $i = \overline{1, n}$ ;  $j = \overline{1, n}$ ;  $n$  – кількість рядів;  $k$  – номер вимірювання в ряду ( $k = \overline{1, K_j}$ );  $K_j$  – кількість вимірюваних факторів життєзабезпечення рослини в  $j$ -му місці; ( $j = \overline{1, m}$ );  $m$  – кількість вимірів

Інтерполюємо дискретні залежності  $\tilde{v}_{ij}(\tilde{t}_{jk})$  сплайнами:

$$V_{ij}(t) \quad (i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}), \quad (3.17)$$

де  $t \in [t_{\min}, t_{\max}]$ ;  $t_{\min} = \max_{j=1, m} t_{j1}$ ;  $t_{\max} = \min_{j=1, m} t_{jK_j}$  відповідно найменше і найбільше значення сумарної інтенсивності сонячної радіації, для якої був визначений показник життєзабезпечення рослини за період вимірювання.



Виберемо на проміжку  $t \in [t_{\min}, t_{\max}]$   $N$  рівномірно розміщених вузлів  $t_k$  ( $k = \overline{1, N}$ ). Вирахуємо значення сплайнів (3.17) у цих точках:

$$v_{ij}(t_k) \quad (i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}; k = \overline{1, N}) \quad (3.18)$$

Ці значення описують  $\Phi_k$  для усіх рядів та місць при однаковій сумарній інтенсивності сонячної радіації.

Значення показника по всій площі теплиці (3.18) представлено на (рис. 3.8).

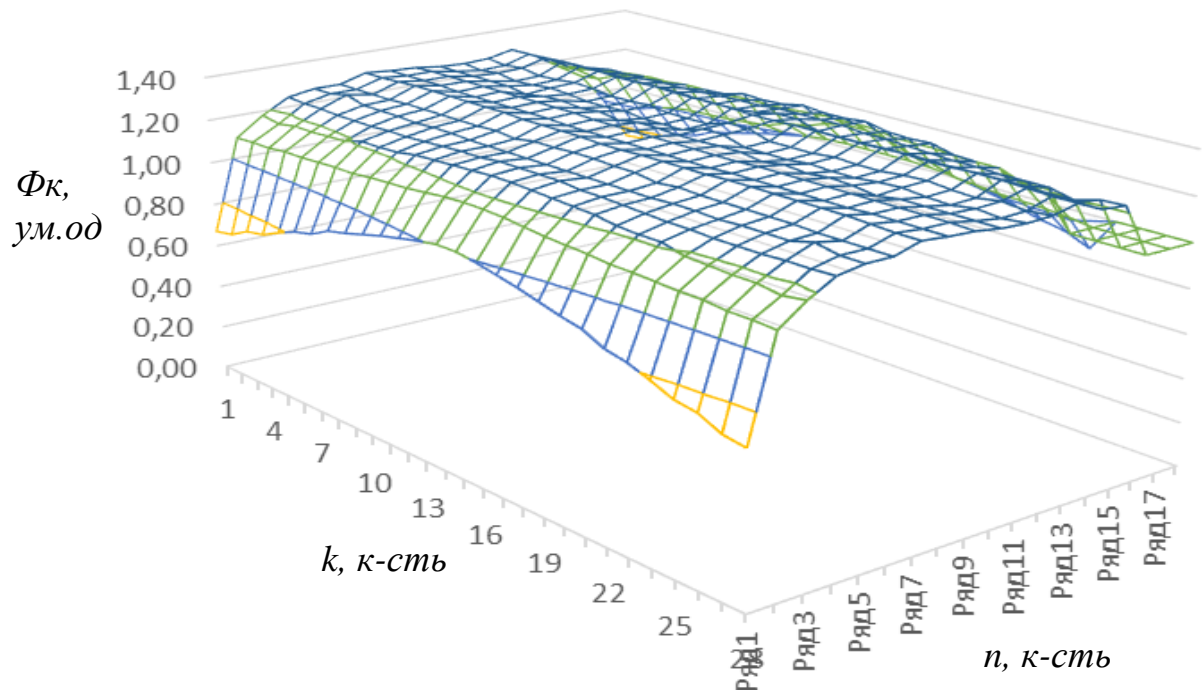


Рис. 3.8. Значення фітокліматичного показника життєзабезпечення рослини на всій площі теплиці

Нехай  $\varphi_i, \lambda_i$  – координати  $i$ -го ряду, визначимо координати центра усіх рядів:

$$\bar{\varphi} = n^{-1} \sum_{i=1}^n \varphi_i, \quad \bar{\lambda} = n^{-1} \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (3.19)$$

Враховуючи зони подібності розподілу параметрів мікроклімату, визначимо відстані між рядами відносно їх центрального ряду, що описують просторову густоту рядів, у яких проводилися виміри:

$$r_i = \sqrt{(\bar{\varphi} - \varphi_i)^2 + (\bar{\lambda} - \lambda_i)^2} \quad (i = \overline{1, n}). \quad (3.20)$$

Величини, обернені до відстаней  $r_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ), мають сенс вагомих коефіцієнтів зваженого усереднення  $\tilde{w}_i = 1/r_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ).

Визначимо середнє значення  $\tilde{v}_{ij}(\tilde{t}_{jk})$  в рядах:

$$\bar{v}_j(t_k) = \sum_{i=1}^n w_j v_{ij}(t_k) \quad (j = \overline{1, m}; k = \overline{1, N}). \quad (3.21)$$

Графіки середнього значення фітокліматичного показника життєзабезпечення рослини по рядах (3.21) показано на (рис. 3.9).

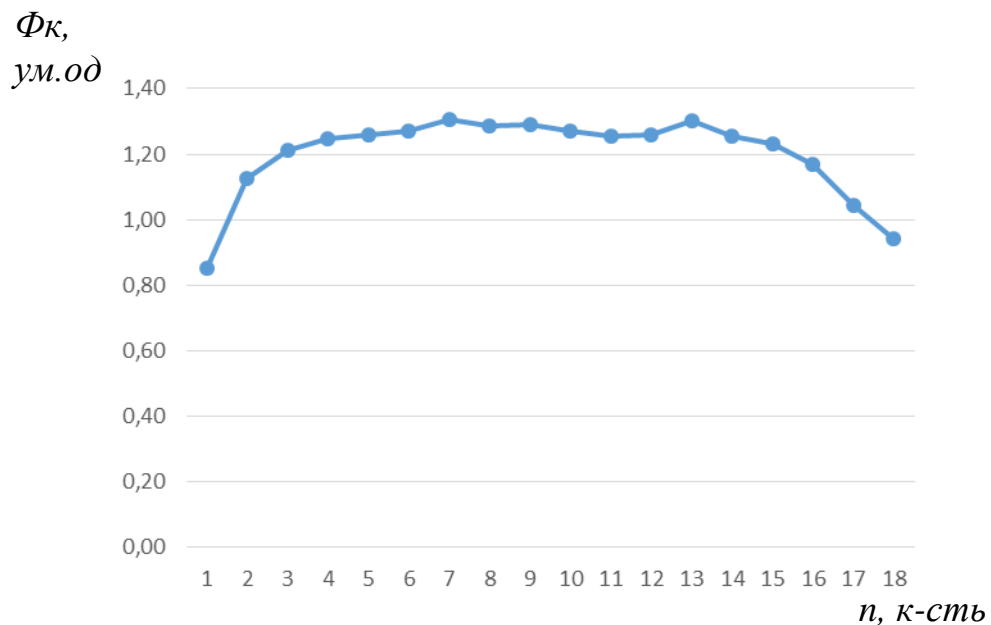


Рис. 3.9. Середнє значення фітокліматичного показника життєзабезпечення рослини по рядах

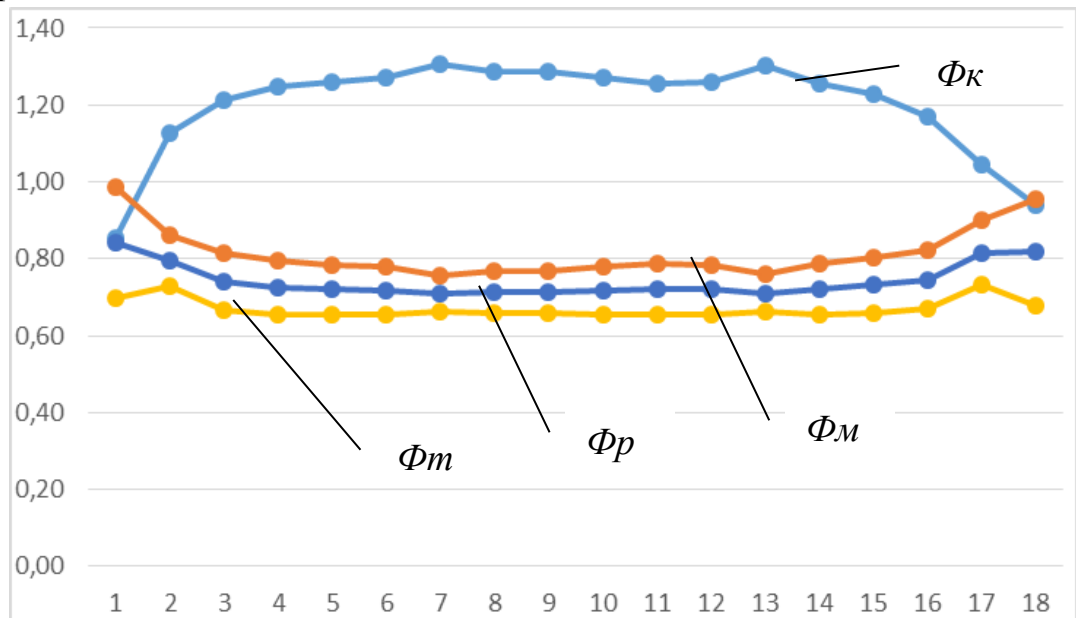
Середнє значення показника життєзабезпечення рослини на всій площі теплиці визначимо за виразом:

$$\bar{v}(t_k) = n^{-1} \sum_{i=1}^n \bar{v}_i(t_k) \quad (k = \overline{1, N}). \quad (3.22)$$

Середнє значення показника життєзабезпечення рослини на всій площі  $\Phi_K=1,2$  свідчить про надмірний рівень параметрів життєзабезпечення рослини.

За розглянутим алгоритмом визначимо значення фітометричного критерію ( $\Phi_M$ ), фітотемпературного критерію ( $\Phi_T$ ) та їх усередненого значення – показника фіторозвитку ( $\Phi_P$ ) по рядах (рис. 3.10), що дасть можливість встановити рівень розвитку рослин та якості врожаю [75].

Критерії,  
ум.од



n, к-сть

Рис. 3.10. Залежність зміни середнього значення показника життєзабезпечення рослини, фітометричного та фітотемпературного критеріїв на всій площі в рядах

Встановлено, що середнє значення фітокліматичного показника  $\Phi_K=1,2$ , фітометричного критерію  $\Phi_M=0,82$ , фітотемпературного критерію  $\Phi_T=0,67$  та їх усередненого значення показника фіторозвитку  $\Phi_P=0,74$  на всій площі теплиці.

Перевищення значення показника  $\Phi_k > 1$  говорить про надмірний рівень встановлених агротехнологією параметрів життєзабезпечення рослини, відповідно і про перевитрати енергетичних носіїв на їх забезпечення. Значення показника  $\Phi_p < 1$  свідчить про недостатній рівень розвитку рослин та якісної рослинної продукції в теплиці. Отримання якісної продукції при мінімальному споживанні енергетичних ресурсів можливе за умови мінімізації критерію ефективного використання енергетичних ресурсів під час виробництва рослинної продукції заданої якості (рис. 3.11):

$$R = \Phi_k - \Phi_p \rightarrow \min. \quad (3.23)$$

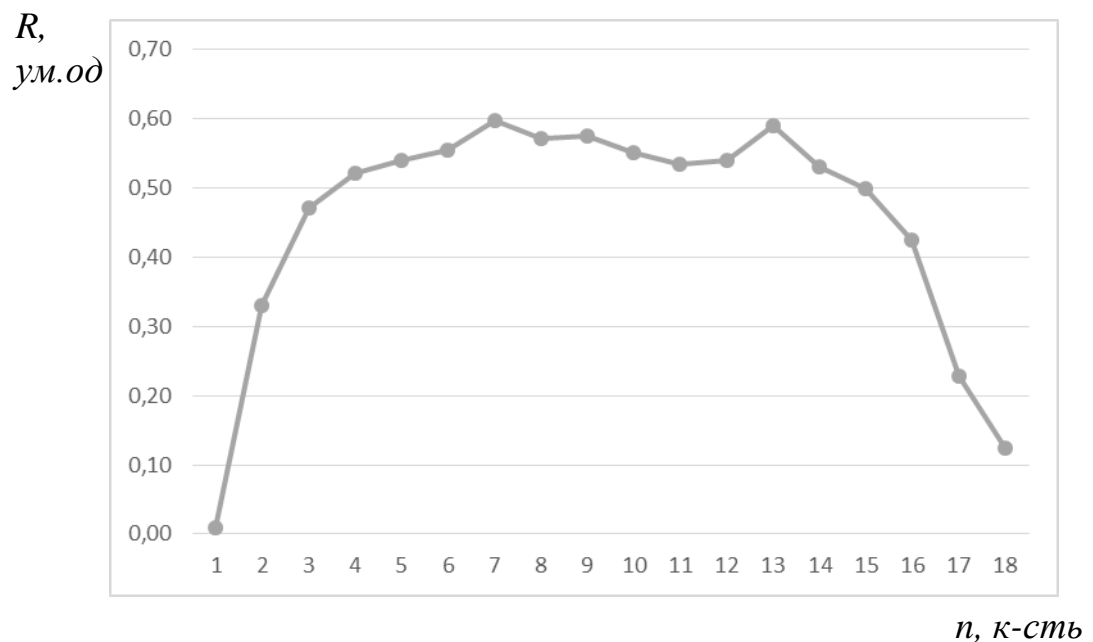


Рис. 3.11. Критерій ефективного використання енергетичних ресурсів під час виробництва рослинної продукції заданої якості

Стратегія ефективного керування полягає у зменшенні середньоквадратичного відхилення між фітокліматичним показником життєзабезпечення рослин та значенням показника фіторозвитку, коли його зростання говорить про неефективне споживання енергоносіїв існуючою системою керування технологією виробництва рослинної продукції заданої якості.

### **3.4. Використання нейромережевих структур енергоефективного керування енергетичними потоками**

Методика створення енергоефективної нейромережевої підсистеми керування влючила в себе: оцінку результатів пасивного експерименту на виробничому об'єкті (створення відповідних математичних моделей); створення енергоефективної вибірки навчальних даних; синтез енергоефективної інтелектуальної підсистеми керування вирощуванням томатів та її програмно-апаратної реалізації [84, 164].

У результаті аналізу технологічних процесів, що відбуваються в теплиці, виникла необхідність встановлення найбільш імовірних взаємозв'язків і взаємозалежностей. За методикою, що наведена в Розділі 2, було проведено кореляційний аналіз показників виробництва та отримано оцінку щільності зв'язку за значенням лінійного коефіцієнта кореляції між критерієм ефективного використання енергетичних ресурсів та енергоефективністю (по електроенергії 0,28 та газу 0,26). Отримані результати свідчать про відсутність лінійного зв'язку між цими важливими показниками виробничих процесів, оскільки всі коефіцієнти кореляції менші 0,3 (рис. 3.12) [59].

Отже, встановлено нелінійність та нестационарність процесів, відсутність можливості формалізувати зв'язки між виробничими параметрами з використанням класичних підходів (кореляційного аналізу), зокрема між якістю розвитку рослини, якістю продукції та енергоефективністю, враховуючи наявність збурень. Тому для розроблення концепції функціонування системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками та моделювання використано математичний апарат нейронних мереж, що рекомендується для використання в умовах стохастичності, нелінійності, розмитості інформаційної складової [86].

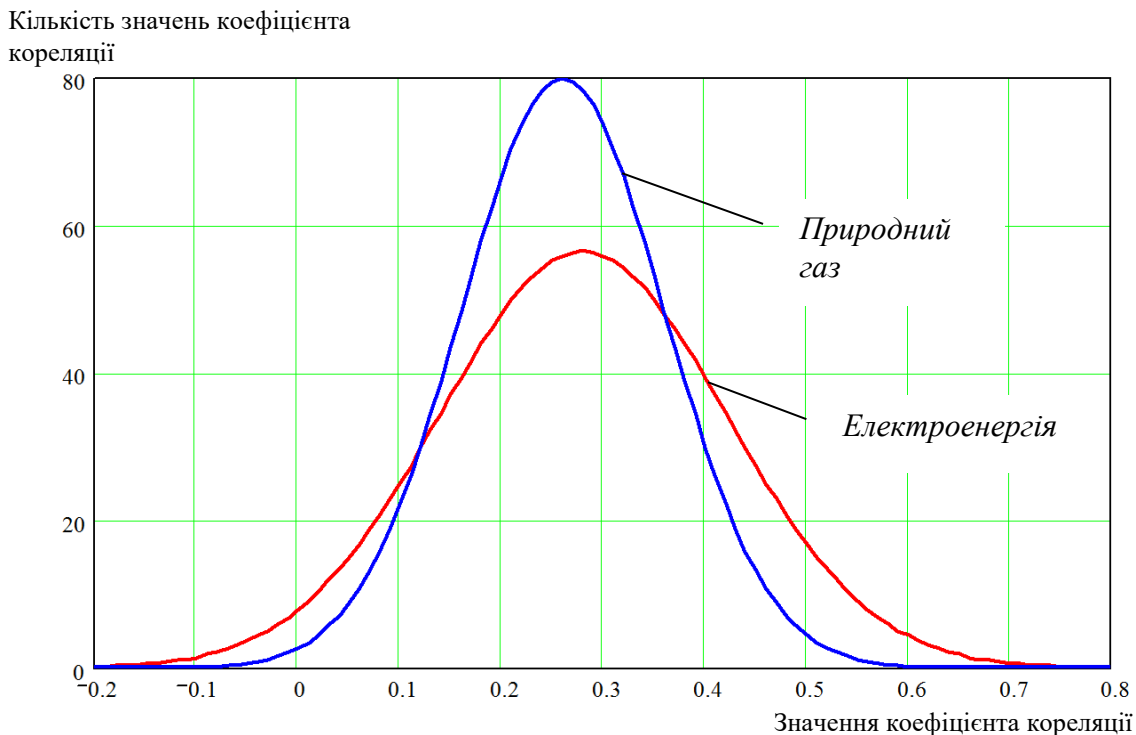


Рис. 3.12. Оцінка результатів лінійного кореляційного аналізу між критерієм ефективного використання енергетичних ресурсів та енергоефективністю його виконання (за витратами електроенергії та природного газу)

Для формування енергоефективної стратегії керування системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками з використанням інформації про стан біологічної складової були використані, як уже зазначалось, штучні нейронні мережі, оскільки вирішення означеного завдання здійснювалося в умовах невизначеності, що формуються природними збуреннями та особливостями біологічної складової. [183, 186, 187].

Нейронні мережі, які використовуються для оцінки виробництва продукції та витрати енергоносіїв, мають вигляд математичної моделі паралельних обчислень, що містить прості процесорні елементи, які взаємодіють між собою, – штучні нейрони. Вони є розпаралеленими системами, здатними до навчання шляхом аналізу позитивних і негативних дій. Як правило, активаційні функції всіх нейронів у мережі фіксовані, а вага

є параметрами мережі і може змінюватися. Деякі входи нейронів помічені як зовнішні входи мережі, а деякі виходи – як зовнішні виходи мережі. Порівняно з класичними методами аналізу даних НМ володіють певними перевагами [27, 226, 232]:

- постійна оптимізація власної структури з метою мінімізації прогностичної помилки в режимі реального часу;
- більш високі потенційні можливості під час аналізу складних динамічних систем та закономірностей;
- здатність успішно вирішувати завдання, спираючись на неповну, викривлену і внутрішньо суперечливу вхідну інформацію.

Робота нейромережі полягає в перетворенні вхідного вектора  $X$  у вихідний вектор  $Y$ , причому це перетворення задається вагами мережі [99]. Отже, для оцінки виробництва продукції та витрати енергоносіїв у комплексі експертної системи підтримки прийняття рішень доцільно використати нейронні мережі. Традиційна для такого підходу мережа щодо вирішення задач прогнозування часових рядів – багатошаровий персептрон.

Для синтезу та дослідження відповідних НМ використано демоверсію програмного пакету Statistica Neural Networks. Критерій навчання – мінімізація помилки НМ. У контексті нашого завдання перевага такого пакета над аналогічними розробками полягає у реалізації функціонального блока оптимізації архітектури нейромоделей, що використовує лінійні підходи та метод «відпалювання» на основі розподілу ймовірностей Гіббса [30, 68, 247]:

$$P(\bar{x}^* \rightarrow \bar{x}_{i+1} | \bar{x}_i) = \begin{cases} 1, & F(\bar{x}^*) - F(\bar{x}_i) < 0 \\ \exp\left(-\frac{F(\bar{x}^*) - F(\bar{x}_i)}{Q_i}\right), & F(\bar{x}^*) - F(\bar{x}_i) \geq 0 \end{cases}. \quad (3.24)$$

де  $F(x)$  – мінімум числової функції;  $Q_i > 0$  – елементи довільно спадаючої до нуля послідовності.

Для визначення впливу технологічних параметрів, якості та кількості рослинної продукції на споживання енергетичних носіїв у спорудах закритого ґрунту були проведені дослідження з використанням нейронної мережі:

- за результатами використання пасивного експерименту синтезується нейромережева модель (НМ1) впливу природних збурень (температури і сонячної радіації), показників фітокліматичного та фіторозвитку рослини на виробничі показники (прибуток, обсяги виробництва якісної продукції, витрати природного газу та електроенергії) та кількості виробленої продукції заданої якості;

- за результатами використання пасивного експерименту синтезується нейромережева модель (НМ2) впливу природних збурень (температури і сонячної радіації), мінімальних витрат електроенергії на забезпечення потреби в енергетичних ресурсах кожного з факторів життєзабезпечення рослин [84, 189];

- із використанням попередньо створеної нейромережі (НМ1) формується енергоефективна вибірка: вибираються такі комбінації вхідних змінних, коли виробництво продукції максимально можливе; отримані при цьому значення витрат природного газу на забезпечення технології виробництва рослинної продукції та електроенергії будуть мінімальними для вирощування якісної рослинної продукції, а прибуток максимальним; такий набір даних зберігається у базі знань для подальшого синтезу відповідної нейромережі.

Стратегії системи керування виробництвом рослинної продукції, що супроводжують виробництво томатів, розраховувалися із використанням двох послідовно з'єднаних нейронних мереж (рис. 3.13) [81].

Сучасне виробництво у спорудах закритого ґрунту стандартизоване, тому якість рослинної продукції на певному технологічному етапі має бути у визначених межах. З метою визначення рівня споживання системою



керування енергетичних ресурсів на забезпечення необхідних абіотичних факторів у період плодоношення залежно від якості томатів у теплиці ПрАТ «Комбінат «Тепличний» були проведені дослідження (для томатів сорту Раїса F1). При цьому показники якості плодів розрізнялись у відповідності до шкали, представленої в табл. 3.3.



Рис. 3.13. Нейронні мережі для оцінки виробництва продукції та витрати енергоносіїв

Таблиця 3.3 Шкала якості томатів

Оцінка якості	Значення показника якості за шкалою	Індекс якості Я
Дуже добра	1,00 – 0,80	5
Добра	менше 0,80 – 0,64	4
Задовільна	менше 0,63 – 0,38	3
Погана	менше 0,37 – 0,21	2
Дуже погана	менше 0,20 – 0,01	1

Як впливає з табл. 3.3, показник якості перебуває в межах від 0,01 до 1, а відповідним діапазнам показника якості присвоюється індекс від 1 до 5, що буде використано в процесі побудови математичних моделей та розрахунків за цими моделями [148].

Під час виробництва томатів у спорудах закритого ґрунту в якості критерію ефективності виробництва доцільно використати прибуток [81]:

$$\Pi = \sum_{j=1}^5 C_j \cdot N_j - (C_g \cdot E_g + C_e \cdot E_e) \rightarrow \max, \quad (3.25)$$

де  $C_j$ ,  $C_g$ ,  $C_e$  – вартість одиниці продукції відповідної якості, природного газу та електроенергії, *грн.*;  $N_j$  – кількість виробленої продукції відповідної якості, *кг*;  $E_g$  – величина витраченого природного газу, *м³*;  $E_e$  – величина витраченої електричної енергії, *кВт*.

Оскільки вартість продукції та енергетичних носіїв змінюється, що впливає на рівень прибутку, а даний виробничий показник є одним із основних під час побудови нейронної мережі, проведемо попереднє нормування вихідних даних прибутку  $\Pi$  згідно з лінійною залежністю [132, 159]:

$$x_i = \frac{\tilde{o}_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (3.26)$$

де:  $x_i$  – реальне значення прибутку;  $x_{\min}$  – прибуток, який має мінімальне значення;  $x_{\max}$  – прибуток, який має максимальне значення.

Для переходу в реальні фізичні величини необхідно провести денормування згідно зі статистичними даними реального підприємства та залежністю:

$$x_i = x_n \cdot (x_{\max} - x_{\min}) + x_{\min}. \quad (3.27)$$

Під час вибору архітектури нейронної мережі перевагу віддали структурі – двошаровий перцептрон. Оцінку якості функціонування мереж здійснювали в середовищі Statistica 6.0 за похибками на етапах навчання, контрольному і тестовому. Найвищу точність при цьому показали нейронні мережі зі структурою «багатошаровий перцептрон» (рис. 14). Для зменшення величини похибки шляхом використання «Конструктора мереж» у програмному пакеті Statistica Neural Networks проведено додаткове навчання,

за рахунок чого нейронна мережа забезпечила похибку навчання 2,8%, а контрольну – 1,9%. Така точність дає змогу зробити висновок про можливість практичного використання нейронної мережі зазначеної структури (рис. 3.14).

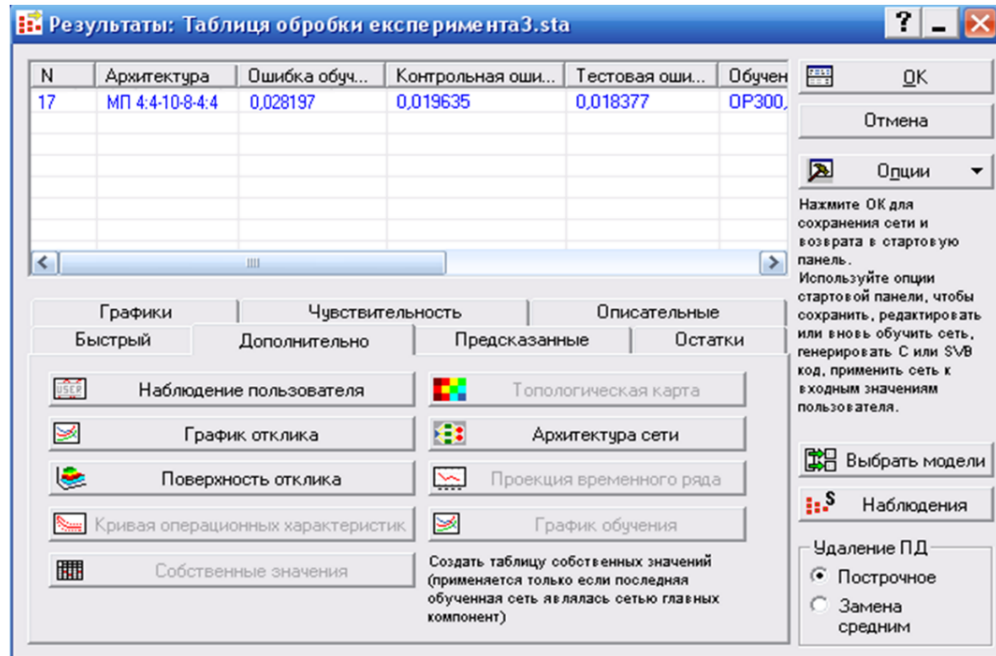


Рис. 3.14. Аналіз структури нейронної мережі НМ1 в середовищі Statistica 6.0

На (рис. 3.15) показано архітектуру нейронної мережі НМ1 оцінки споживання енергетичних носіїв технологічними процесами – двошаровий персептрон.

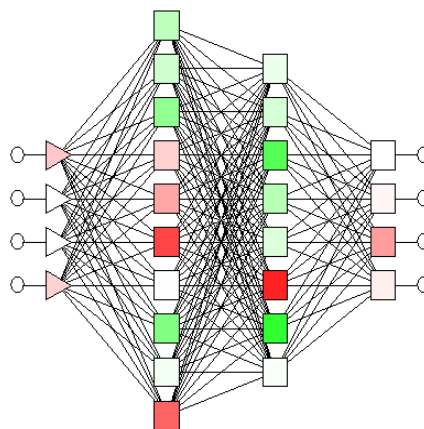


Рис. 3.15. Архітектура нейронної мережі НМ1 оцінки кількості виробленої продукції, витрати природного газу та електроенергії

Для етапу навчання нейронної мережі кожна неперервна функція від  $n$  змінних, що задана в одиничному кубі  $n$ -вимірного простору, може бути представлена у вигляді [102, 156]:

$$f(x) = \sum_{q=1}^{2n+1} h_q \left[ \sum_{p=1}^n \varphi_q^p(x_p) \right], \quad (3.28)$$

де  $f(x)$  – функція якості;  $h_q(x)$  – неперервні функції зміни вхідних параметрів, що формують функцію якості;  $\varphi_q^p(x_p)$  – функція, що не залежить від функції  $h_q(x)$ , формується з вхідних даних.

Під час вирішення завдань класифікації виходи мережі можна з користю інтерпретувати як оцінки ймовірності чи елемент, що належить деякому класу. Мережа фактично вчиться оцінювати функцію щільності ймовірності [64, 266].

У всіх випадках виробничого застосування нейронні мережі накопичуватимуть технологічну інформацію (базу знань) та періодично здійснюватимуть «донавчання» на нових даних (рис. 3.16).

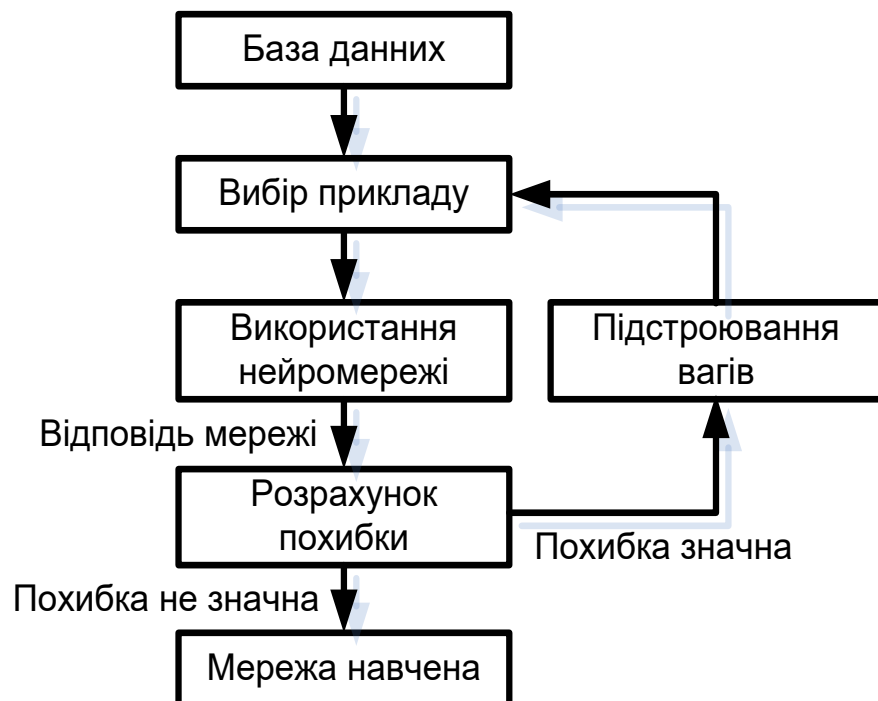


Рис. 3.16. Процесу навчання НМ

Для навчання нейронної мережі НМ1 використано результати досліджень, що проводились в ПрАТ «Комбінат «Тепличний» (табл. 3.4).

Таблиця 3.4. Вибірка вимірювань для навчання нейронної мережі НМ1

№ п/п	Температура повітря, °C	Сонячна радіація, Мдж/м <sup>2</sup>	Показник фіторозвитку	Фітокліматичний показник	Витрати природного газу, м <sup>3</sup>	Витрати електроенергії, кВт	Приріст продукції, г	Дохід, грн
1.	-9,7	4,2	0,9	1	0,01	0,02	5,6	0,1149
2.	-12,2	4,28	0,9	0,9	0,01	0,02	5,6	0,1100
3.	-11,0	2,13	1	1,2	0,01	0,02	5,6	0,1149
4.	-9,8	2,55	1	1,1	0,01	0,02	5,6	0,1194
5	-12,0	5,21	1	1	0,02	0,03	5,7	0,1194
6	-16,8	8,35	0,8	1,1	0,02	0,05	5,8	0,1254
7	-17,3	7,02	0,9	0,9	0,01	0,02	5,8	0,1256
8	-16,4	6,41	0,8	1,2	0,01	0,05	5,8	0,1201
9	-16,3	6,89	1	1,1	0,01	0,02	6,1	0,1546
...	...	...	...	...	...	...	...	...
6210	25,5	10,71	1	1	0,001	0,01	6,3	0,1646

Для забезпечення виробництва рослинної продукції заданої якості при ефективному споживанні енергоносіїв існуючими системи керування за результатами використання нейронних мереж отримано залежності споживання природного газу (рис. 3.17) та електроенергії (рис. 3.18) системами керування виконанням технології виробництва рослинної продукції для забезпечення технологічних вимог вирощування якісної рослинної продукції в теплиці, враховуючи природні збурення.

Залежність прибутку від кількості продукції та її якості з урахуванням витрат на забезпечення вимог технології, що формують дохід від виробництва овочевої продукції, показано на (рис. 3.19). Похибка при цьому не перевищує 2,4%.

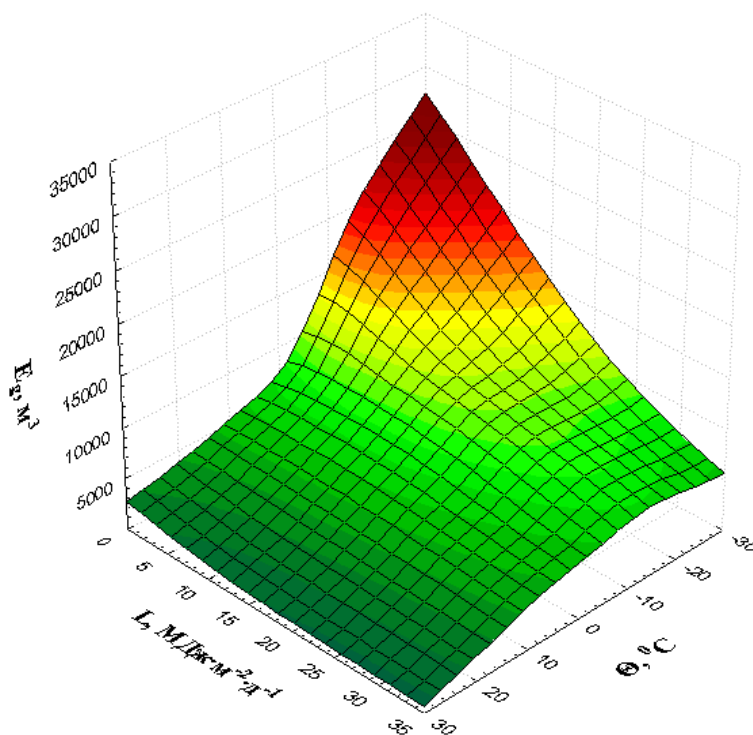


Рис. 3.17. Витрати природного газу системою керування на забезпечення технологічних вимог вирощування якісної рослинної продукції в теплиці

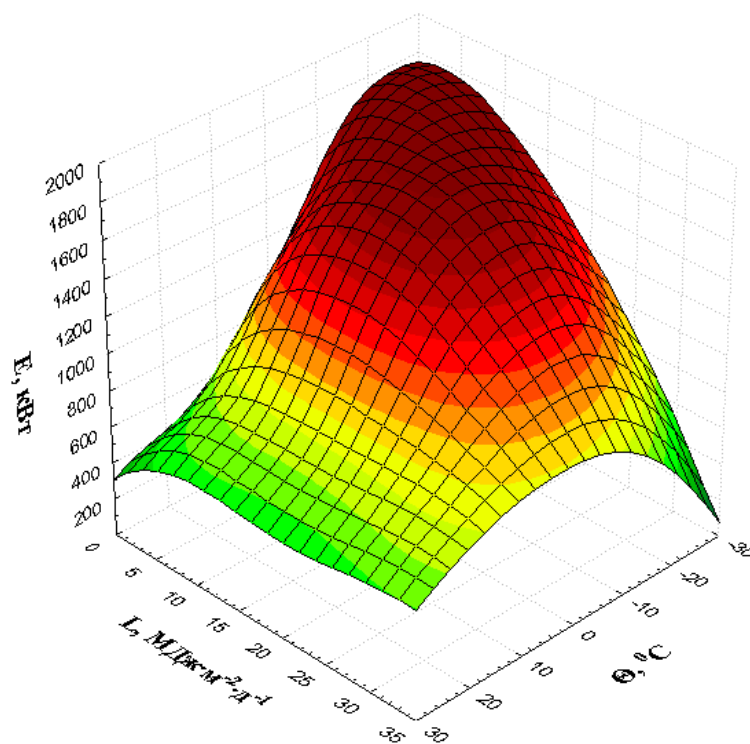


Рис. 3.18. Витрати електроенергії системою керування виконанням технології виробництва рослинної продукції в теплиці

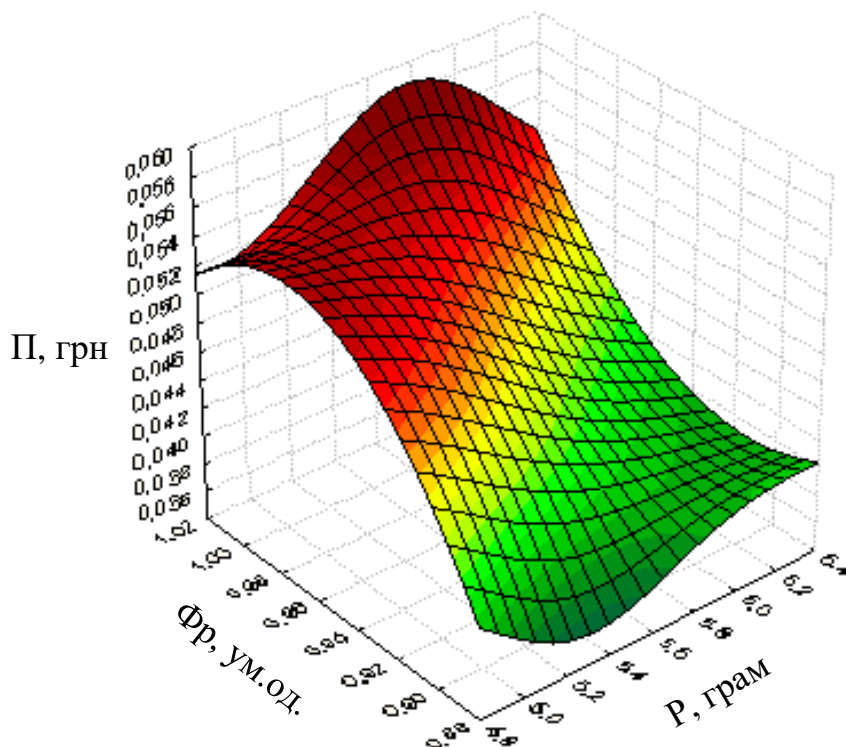


Рис. 3.19. Залежність прибутку від кількості продукції та показника фіторозвитку

Використання фітокліматичного показника та показника фіторозвитку рослин під час регулювання параметрів мікроклімату в теплиці дає можливість отримувати до 160 г приросту якісного урожаю з одного куща за добу.

Аналіз матеріалів (рис. 3.19) дає змогу зробити висновок, що під час фази плодоношення максимальний прибуток становитиме 0,06 грн з одного куща на добу, якщо приріст якісної продукції становить 6 грамів на годину. З цього випливає, що за добу один кущ томата може дати прибуток в 1,44 грн. Оскільки в промислових теплицях на 1 м<sup>2</sup> висаджують 3 рослини, то прибуток з 1 м<sup>2</sup> за добу становитиме 4,32 грн.

З урахуванням прогнозів прибутку, споживання енергетичних носіїв та кількості продукції відповідної якості вибирається стратегія щодо

керування подачею теплоносіїв для підігріву повітря в теплиці або його охолодження за допомогою відчинення фрамуг, примусової вентиляції і поливу, подачі вуглекислого газу в повітря теплиці та підживлення рослин.

Прибуток підприємства залежить від якості рослинної продукції та видатків на забезпечення технологічних режимів. Максимізацію прибутку можна забезпечити шляхом формування відповідних стратегій керування виконанням технології виробництва рослинної продукції, що супроводжують вирощування якісної рослинної продукції відповідно до агротехнології, підтримуючи на необхідному рівні фактори життєзабезпечення рослини. Для цього використали нейромережу НМ2, структуру якої показано на (рис. 3.20).

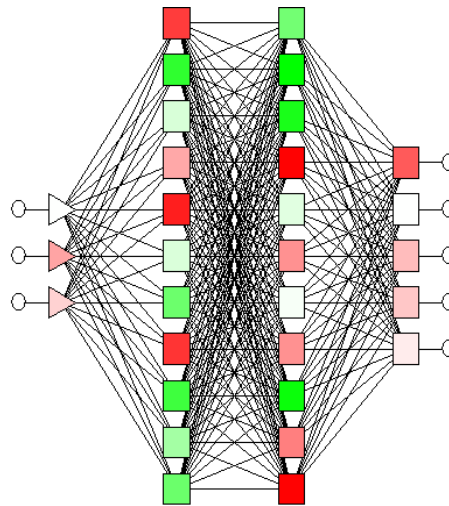


Рис. 3.20. Архітектура нейронної мережі НМ2 оцінки споживання енергетичних носіїв технологічними процесами

Для навчання нейронної мережі НМ2 використано результати досліджень, що проводились в ПрАТ «Комбінат «Тепличний» (табл. 3.5).

За результатами використання нейронної мережі НМ2 отримано поверхні відгуку споживання електричної енергії системами керування виконанням технології виробництва рослинної продукції для реалізації відповідних стратегій керування при критерії ефективного використання енергетичних ресурсів  $R=0$ , які забезпечують в оптимальній кількості рівень факторів, що впливають на рослину: теплозабезпечення ( $E_p$ ) (рис. 3.21), газозабезпечення ( $E_s$ ) (рис. 3.22), забезпечення поживними речовинами ( $E_r$ )



(рис. 3.23), вологозабезпечення ( $E_n$ ) (рис. 3.24), світлозабезпечення ( $E_m$ ) (рис. 3.25). Похибка при цьому не перевищує 3,5%.

Таблиця 3.5. Вибірка вимірювань для навчання нейронної мережі НМ2

№ п/п	Температура повітря, °C	Сонячна радіація, Мдж/м <sup>2</sup>	Загальні витрати електроенергії, кВт	Світлозабезпечення, кВт	Вологозабезпечення, кВт	Теплозабезпечення, кВт	Газозабезпечення, кВт	Забезпечення поживними речовинами, кВт
1.	-9,7	4,2	1400	9,9	0	1267,5	55	67,6
2.	-12,2	4,28	1700	9,9	0	1566,2	55	68,9
3.	-11,0	2,13	1800	9,9	0	1700,8	55	34,3
4.	-9,8	2,55	1800,1	9,9	0	1694,1	55	41,1
5	-12,0	5,21	1799,9	9,8	0	1651,2	55	83,9
6	-16,8	8,35	1799,9	9,8	0	1600,7	55	134,4
7	-17,3	7,02	1799,9	9,8	0	1622,1	55	113
8	-16,4	6,41	1799,9	9,8	0	1631,9	55	103,2
9	-16,3	6,89	1800	9,8	0,1	1624,2	55	110,9
...	...	...	...	...	...	...	...	...
6210	25,5	10,71	499,9	7,8	6,6	7,8	121	356,7

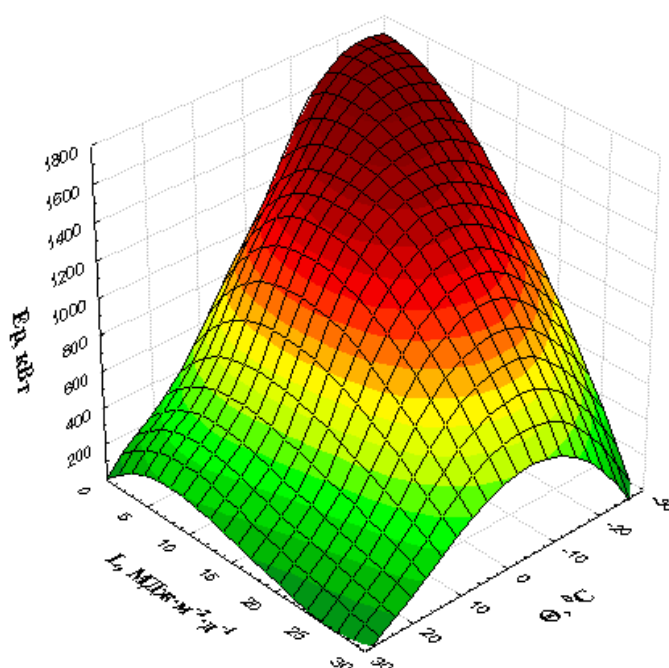


Рис. 3.21. Поверхня відгуку споживання в оптимальній кількості електричної енергії системою керування для теплозабезпечення ( $E_p$ )

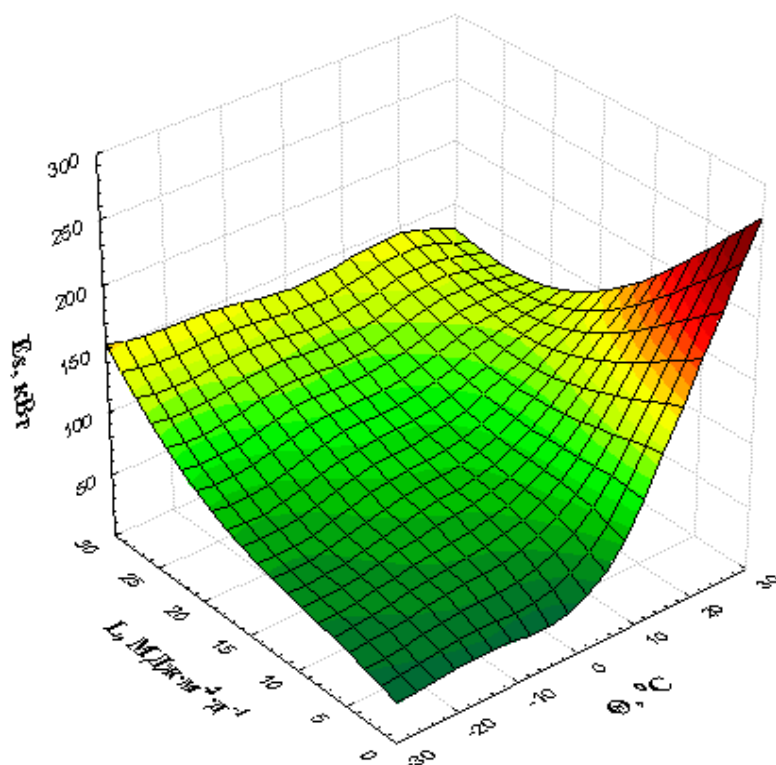


Рис. 3.22. Поверхня відгуку споживання в оптимальній кількості електричної енергії системою керування для газозабезпечення ( $E_s$ )

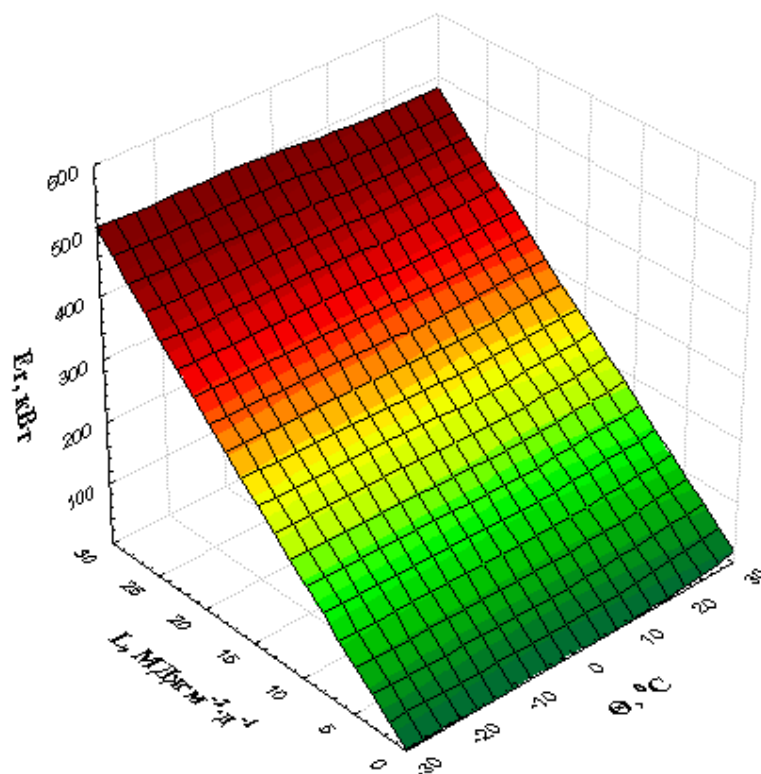


Рис. 3.23. Поверхня відгуку споживання в оптимальній кількості електричної енергії системою керування для забезпечення поживними речовинами ( $E_r$ )

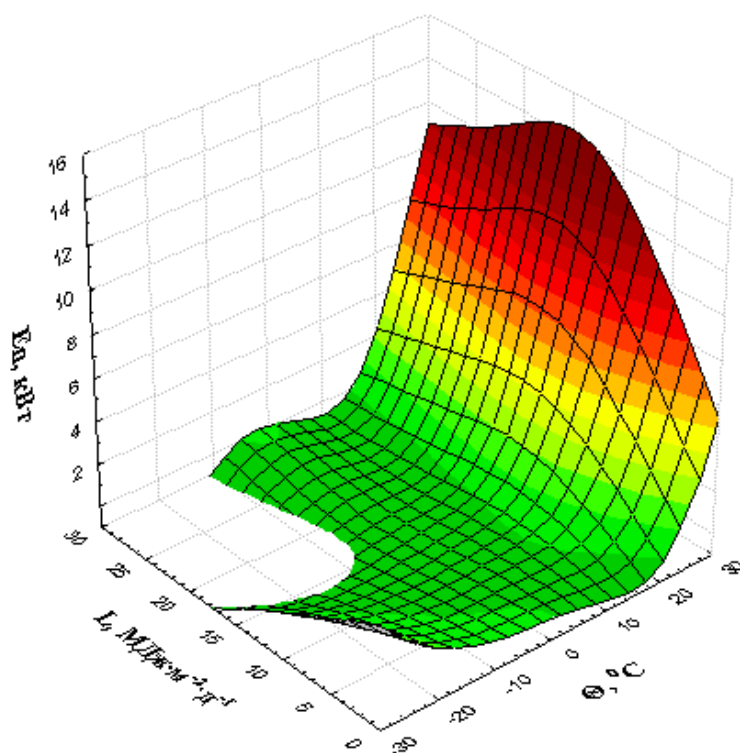


Рис. 3.24. Поверхня відгуку споживання в оптимальній кількості електричної енергії системою керування для вологозабезпечення ( $E_n$ )

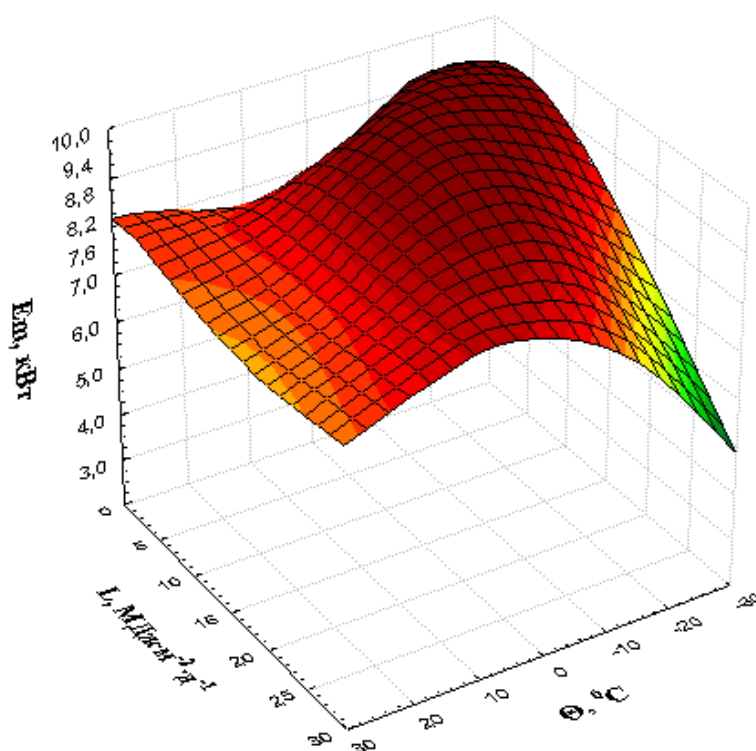


Рис. 3.25. Поверхня відгуку споживання в оптимальній кількості електричної енергії системою керування для світлозабезпечення ( $E_m$ )

Враховуючи встановлену достатню якість функціонування НМ-класифікатора образів та можливість генерування відповідного програмного коду мовою «C++» для використання у системах реального часу [103, 107, 145], апарат нейронних мереж, а саме багатошаровий персептрон, доцільно використовувати для реалізації відповідних стратегій керування.

Підвищення енергоефективності виробництва рослинної продукції відбувається за рахунок дотримання необхідного агротехнічного рівня фітокліматичних умов і врахування якості розвитку рослин та продукції під час формування відповідних стратегій керування виконанням технології виробництва рослинної продукції.

### **3.5. Ергономічні вимоги до систем керування енергетичними потоками тепличних комплексів**

Під час дослідження аналізувалися теоретичні джерела з проблем ергономічного проектування автоматизованих систем, інноваційних високотехнологічних розробок, вивчався та узагальнювався передовий досвід впровадження SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*)-систем, використовувалися статистичний матеріал та метод статистичного аналізу.

Ергономічний підхід під час проектування технічного пристрою включає вирішення наступних питань:

- визначення структури алгоритмів можливої діяльності оператора в різних режимах експлуатації установки (об'єкта);
- визначення рівня автоматизації та розподіл функцій між оператором і автоматизованими системами з виконання операцій керування і контролю;
- побудова матриці взаємозв'язків користування органами керування і визначення взаємозв'язків органів керування (ОК) і засобів відображення інформації (ЗВІ);

- розробка методами математичного моделювання наочно-функціональної моделі діяльності (НФ-моделі);
- аналітичні розрахунки стереотипності робочого процесу, логічної складності, швидкості переробки інформації, інтенсивності і загальної складності виконання алгоритму, емоційної напруженості, складності огляду інформаційного поля, досяжності органів керування, сумарної довжини маршруту оперативних дій, математичного очікування часу безпомилковості виконання операцій алгоритму, ергономічності поста керування;
- ергономічні рекомендації щодо організації діяльності та інтерфейсу керування.

Аналіз, синтез і оптимізацію технічних систем слід засновувати на методі системного аналізу. Теорія систем характеризується такими особливостями [3, 129]:

- система є сукупністю елементів, які у свою чергу можуть розглядатися як системи, залежно від структури технічного об'єкта;
- для системи характерним є наявність інтегральних властивостей, тобто таких, що властиві лише системі в цілому, але не властиві жодному з її елементів окремо;
- для будь-яких систем характерним є наявність істотних зв'язків між елементами, що дає можливість виділити систему у вигляді цілісного самостійного об'єкта дослідження.

Системний аналіз включає такі етапи [134, 224]:

- побудову моделі, тобто формалізацію досліджуваного явища або процесу. Цей етап припускає опис процесу за допомогою математичної моделі;
- постановку завдання, тобто опис операції. При цьому слід сформулювати оптимізаційне завдання:

$$f(x) \rightarrow \max, x \in E, \quad (3.29)$$

де  $x$  – елемент деякого нормованого простору  $E$ , що визначається природою моделі.

Завдання дослідження трактується як деяка оптимізаційна проблема, яку необхідно вирішити.

Слід підкреслити, що особливістю поступового розвитку, тобто еволюції всіх процесів, зокрема технічних, є їхня ієрархічність [119, 234]. Новий рівень синтезу системи виникає на основі обліку властивостей елементів попереднього рівня ієрархії. При цьому спостерігається закономірність: чим складніше система, тим більша вірогідність збільшення числа шляхів її розвитку [113].

Для більшості явищ характерне те, що мінливість, випадковість і невизначеність з'являються в контексті необхідності, тобто законів, що керують рухом матерії і розвитком її організаційних форм. Під час переходу через нестійкість і нерівнозначність умов формується нова структура, що замінює попередню. Причому для кожного досліджуваного ступеня ієрархії синтезуються нові умови, відмінні від умов на попередніх ступенях. Це є предметом вивчення синергетики, в центрі уваги якої – якісні зміни як у статичній, так і в динамічній поведінці системи, зокрема при біфуркації [119, 120].

Цілком обґрунтованим слід вважати метод оптимального рішення, заснований на аналізі ієрархічних структур із заданими параметрами на базі критерію впорядкування інваріантів. При цьому з'являється можливість формалізувати оцінку топологічної складності таких структур і помітно скоротити число зв'язків, що спрощує алгоритм моделювання і керування. Інваріантний критерій включає в узагальненій формі комплекс параметрів даної структури.

При ієрархічному підході виділяються об'єкти керування у вигляді технічної і людської ланок. Остання складова забезпечує не тільки функції програмно-інформаційного забезпечення, але й організаційну саморегуляцію комутативної системи та її ланок. Це дає змогу зберегти задані динамічні

властивості системи людина-машина-середовище і забезпечувати надійність її функціонування.

Для ефективного вирішення подібних завдань передбачається [119] застосовувати формальну модель ієрархічної багаторівневої системи. Система  $\dot{S}$  розбивається на  $\dot{S}_s$  зв'язані підсистеми. Послідовність узгоджених змін структури або параметрів підсистем  $\dot{S}_s$  викликає зміну всієї системи  $\dot{S}$ , що приводить до системи більш високого рівня  $\dot{S}$ . Система аналізується аналогічним чином.

Ефективність функціонування людини в системах автоматизації є істотною умовою забезпечення продуктивності і надійності ергономічних систем (ЕС). Зокрема, ставиться конкретне завдання: забезпечити необхідний рівень готовності, кваліфікованість та ефективність діяльності оператора ЕС (на прикладі користувачів SCADA-систем) і контролювані параметри процесу підготовки: тривалість підготовки і ресурси (програмні засоби підготовки, методична і технічна підтримка).

Способом вирішення завдання є оптимізація рівня готовності  $\Phi(G(t), R, T)$  операторів ЕС у вигляді гарантованої оцінки [78, 90]:

$$Y^* = \min_R \max_{G(t)} (G(t), R, T), \quad (3.30)$$

де  $G(t)$  – функція розподілу часу безпомилкового виконання завдання оператором у стані готовності;  $R$  – ресурс, необхідний для забезпечення необхідного рівня готовності;  $T$  – час досягнення рівня готовності.

Необхідно відзначити, що кожна властивість якості структурної складової технічної системи, як і системи в цілому, визначається двома числовими параметрами – відносним показником і вагомністю. Ґрунтуючись на такій вихідній позиції, можна виробити загальний алгоритм комплексної оцінки якості досліджуваного пристрою або системи.

Для цієї мети необхідно сформулювати стратегію керування підготовкою фахівців, запропонувати відповідні методи, алгоритми, структуру програмно-методичного комплексу, фахівців з підготовки в даній галузі.

Необхідно вирішити ще одну важливу проблему – адаптивність ланок соціотехнічної системи (людина-людина, людина-машина, людина-середовище). Критеріями рішення такої задачі є час, стабільність, зв'язність. Пропонується такий методичний підхід.

Виділяються об'єкти керування у вигляді машинної і людської ланок. Останній здійснює не тільки функції програмно-інформаційного забезпечення, але й організаційну саморегуляцію комутативної системи та її ланок. Це дає змогу зберегти задані динамічні властивості системи людина-машина-середовище і забезпечувати надійність її функціонування в умовах даного середовища.

Методом керування таких систем є переорієнтація цільових функцій, що дають можливість вести розбиття впорядкованих неоднорідностей шляхом обриву зв'язків інтегральної підмножини через певні проміжки часу.

Способом вирішення завдань є досягнення рівня зростання незалежної змінної введенням прогностичних функцій у вигляді покрокової гарантованої стратегії керування [78, 239]:

$$S_u = \sum_{k \in N} [f(z_p) - f(z_{np})] - \min, \quad (3.31)$$

де  $f(z_p), f(z_{np})$  – відповідно значення функцій зростання незалежної змінної і стратегії керування.

При цьому функція зростання незалежної змінної і функції досягнення мети визначають покрокові втрати системи за відсутності керування і стратегію керування.



### **3.6. Архітектура системи керування енергетичними потоками тепличних комплексів**

Забезпечення умов росту й розвитку рослин у промислових теплицях відбувається шляхом створення мікроклімату, який охоплює результуючу дію системи технологічного устаткування: вентиляційну, опалювальну, підживлюючу, а також штучного досвічування.

Попередні дослідження показують, що низькі або занадто високі параметри мікроклімату негативно впливають на розвиток рослини, а також на інтенсивність процесів транспірації і респірації. Існуючі системи мікроклімату підтримують технологічні параметри вирощування рослин, але жодна з них не відстежує фізіологію рослини за дії природних збурень. Спостереження за розвитком рослин та їхньою реакцією на дію мікрокліматичних збурень дає змогу уточнити знання про саму рослину, що створює передумови для прогнозування її подальшого розвитку та врожайності. При цьому важливу роль набуває відстеження в промислових теплицях показника якості розвитку рослини та урожаю.

Однак, навіть із врахуванням переваг нейромережевого аналізу, для досягнення енергоефективного керування тепличним комплексом необхідно усунути ряд недоліків [77, 184]:

- технологічна інформація на систему керування потрапляє від незначної кількості локальних стаціонарно встановлених датчиків, тому, за умов дії на об'єкт збурюючих впливів техногенного та природного походження, на блок керування може не надійти достовірна інформація щодо реального відхилення технологічних параметрів від нормативних вимог утримання біологічних об'єктів;

- для отримання даних із усієї виробничої площі потрібна значна кількість стаціонарно встановлених датчиків (розрахунок ведеться залежно

від типу виробництва), що спричиняє значні капіталовкладення, затрати на експлуатацію та зниження надійності системи керування в цілому.

Вирішуються такі недоліки за рахунок того, що технологічні параметри стану біологічного об'єкта (температура, вологість, загазованість тощо) надходять від датчиків, сприймаючі елементи яких встановлені на базі мобільного робототехнічного комплексу, який горизонтально переміщується по всій виробничій площі. Дані у режимі реального часу передаються на блок керування, об'єктивно забезпечуючи режим реального часу [185].

Створено структуру системи керування виробництвом рослинної продукції, яка складається із таких складових:

- мобільного робота фітомоніторингу (МРФ), який переміщуючись площею теплиці, вимірює безпосередньо фітокліматичні та фітометричні параметри рослини;
- інтелектуальної системи керування, яка отримує дані від МРФ і на базі яких система формує керуючу дію для підтримання оптимальних параметрів мікроклімату;
- системи мікроклімату, що безпосередньо регулює мікроклімат у теплиці.

Принцип роботи МРФ у теплиці полягає в такому: мобільний робот фітомоніторингу вимірює фітометричні та фітокліматичні параметри рослини і надсилає дані до системи керування. Система керування порівнює отриману інформацію з розробленою моделлю розвитку рослини, визначає оптимальні параметри своєї роботи і керуючу дію, яка надсилається до системи керування мікрокліматом, що безпосередньо діє на фітоклімат рослини та якість її розвитку (рис. 3.26).

Окрім температури рослини, вимірюванню підлягають інші фітометричні параметри (кількість квіточок у суцвітті та плодів на гілці, вага та колір плоду), які також формуватимуть матриці даних.

За результатами досліджень розроблено структуру системи керування виробництвом рослинної продукції в промисловій теплиці, до складу якої,

окрім традиційних складових, входить МРФ, який переміщуючись площею теплиці технологічними направляючими, моніторить параметри атмосфери та фітостан рослин із прив'язкою до місця дислокації, передає отриману інформацію системі для формування стратегій керування виконанням технології виробництва рослинної продукції (рис. 3.27).



Рис. 3.26. Структурна схема керування фітометричними параметрами рослини системи керування виробництвом рослинної продукції

У процесі підтримання мікроклімату МРФ дає змогу оцінити стан рослин на всій площі теплиці, обробити інформацію і миттєво сформувати керуючу дію для підтримання мікроклімату, оскільки всі виміряні фітометричні параметри можна обробити по відповідних рядах рослин та оцінити розвиток рослин у тому чи іншому ряді.

МРФ оснащений комплексом фітометричних датчиків, вимірює фітометричні параметри рослини і через блок передачі даних передає їх до блока отримання та аналізу даних промислового комп'ютера. Блок надсилає сигнал до системи керування базами даних, яка взаємопов'язана із засобами

математичного забезпечення і пакетом прикладних програм. Останні чотири блоки утворюють базу даних, за якою приймається рішення у блоці прийняття та виведення рішень, що у свою чергу формує керуючу дію і надсилає її до існуючої системи мікроклімату. Система мікроклімату безпосередньо діє на підтримання мікрокліматичних умов теплиці, що впливає на якість розвитку рослин [151].



Рис. 3.27. Ієрархічна структура системи керування виробництвом рослинної продукції тепличних комбінатів

Із вимірювань ІРЕКФ можна вивести відповідні фітометричні залежності та спрогнозувати розвиток рослини. З останнього можливо також спрогнозувати і споживання енергетичних ресурсів теплиці.

Наведена структура дасть можливість проводити вимірювання фітометричних та фітокліматичних параметрів рослин по всій площі теплиці; датчики для проведення фітокліматичних, фітометричних вимірювань температури, вологості, загазованості повітря, освітленості, пірометричних вимірювань температури рослин та відеокамера обстеження рослини на предмет пошкодження дадуть змогу оперативно надсилати інформацію про фітометричні та фітокліматичні вимірювання рослин і виконувати керуючу дію відповідним системам керування.

За результатами досліджень розроблено структуру системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками в промисловій теплиці, до складу якої, окрім традиційних складових, входить інтелектуальний мобільний робот, який, переміщуючись площею теплиці технологічними направляючими, відстежує параметри атмосфери та фітостан рослин із прив'язкою до місця дислокації, передає отриману інформацію системі для формування стратегій керування (рис. 3.28) [151].

Запропонована підсистема керування функціонує таким чином: сигнал із сприймаючих елементів ( $\Theta_{\text{тех}}$ ) потрапляє у блок фільтрації вхідного сигналу. Особливість роботи такого блока полягає у необхідності адекватного представлення інформації про ступінь якості продукції і стан біотехнічного об'єкта. Інформація про якість розвитку рослини, враховуючи просторове розподілення параметрів фітоклімату ( $Y_p$ ), потрапляє у блок аналізу просторово-розподілених біотехнічних параметрів. Розраховані критерії ефективного використання енергетичних ресурсів ( $R$ ) під час виробництва рослинної продукції заданої якості потрапляють у блок нейромережевого прогнозування для визначення оптимальних виробничих параметрів ( $B_p$ ). До виробничих параметрів належить прогнозування прибутку, що визначає прибуток залежно від якості продукції і видатків на

споживання природного газу та електроенергії системою керування виконанням технології виробництва рослинної продукції для забезпечення необхідних технологічних параметрів. Як базові використовуються нейронні мережі з логістичними функціями активації [82].

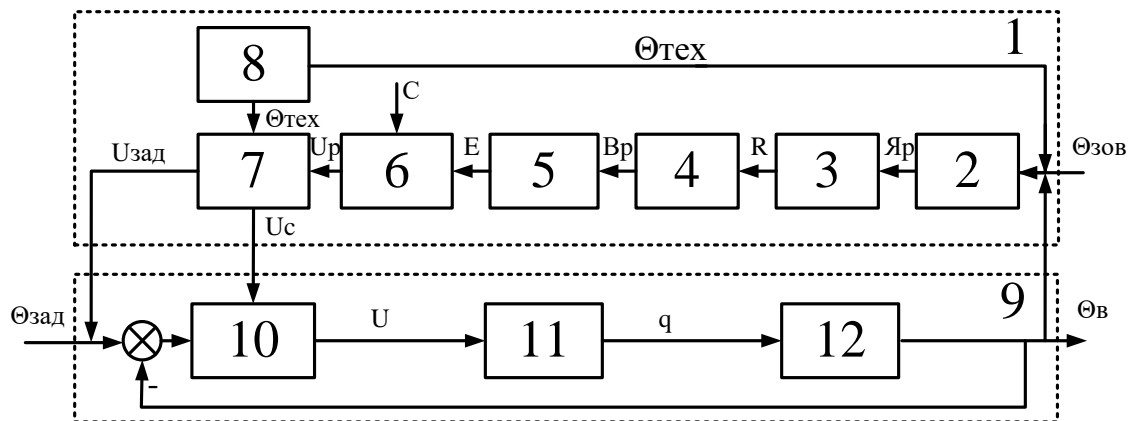


Рис. 3.28. Архітектура системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками тепличних комплексів із застосуванням нейромережевого аналізу та робототехнічного комплексу:  $\Theta_{\text{тех}}$  – технологічні параметри стану біотехнічного об’єкта;  $\Theta_{\text{зов}}$  – сигнал із сприймаючих елементів (природні збурення);  $Y_p$  – інформація про якість розвитку рослини, враховуючи просторове розподілення параметрів мікроклімату;  $R$  – критерій ефективного використання енергетичних ресурсів під час виробництва рослинної продукції заданої якості;  $E$  – споживання енергії;  $V_p$  – виробничі параметри;  $C$  – вартості виробничих параметрів;  $U_p$  – вибір стратегії керування;  $U_{\text{зад}}$  – задана керуюча дія;  $U_c$  – створена стратегія керування;  $U$  – стратегія керування;  $q$  – керуюча дія;  $\Theta_{\text{зад}}$  – задане значення сигналу;  $\Theta_{\text{в}}$  – вихідний сигнал; підсистеми прийняття рішень 1 (блок фільтрації вхідного сигналу 2, блок аналізу просторово-розподілених біотехнічних параметрів 3, нейромережевий блок визначення впливу зовнішніх природних збурень, критеріїв якості розвитку рослин та продукції на енергетичні складові 4, нейромережевий блок визначення впливу енергетичних характеристик на виробничі параметри 5, блок прийняття рішень 6, блок керування 7, мобільний робототехнічний комплекс моніторингу фітостану 8; локальної системи керування 9 (локального автоматичного керуючого пристрою 10, виконавчих елементів 11, об’єкта керування 12)

Прогнозоване значення споживання енергії системою керування та природних збурень передається в нейромережевий блок визначення витрат електроенергії відповідними підсистемами ( $E$ ) для забезпечення необхідних фітокліматичних умов розвитку рослини, за яких будуть мінімальні енергозатрати при максимальному прибутку. Прогнозоване значення прибутку ( $Pr$ ) та витрат електроенергії підсистемами ( $E$ ) забезпечення фітокліматичних умов розвитку рослини подається на вхід блока прийняття

рішень, де вводяться дані вартості складових прибутку  $C$ , а саме поточна ціна на продукцію та ціна вартості енергетичних ресурсів, з урахуванням яких методами статистичних рішень здійснюється вибір стратегії системи керування ( $U_p$ ) або зміна заданої дії ( $U_{зад}$ ). Технологічні параметри станів технічного об'єкта  $\Theta_{тех}$  (температура, вологість, загазованість, освітленість тощо) та біологічного об'єкта (температура, візуальне зображення) надходять від датчиків, сприймаючі елементи яких встановлені на базі МРФ, що горизонтально переміщується по всій виробничій площі.

Дані у режимі реального часу передаються на блок керування. За допомогою блока керування 7 проводиться зміна заданої дії  $U_{зад}$  або зміна оптимальної дії – для нового образу стратегії керування  $U_c$  у локальному автоматичному керуючому пристрої.

Технічним рішенням є, у свою чергу, доповнення підсистеми прийняття рішень блоками нейромережевого прогнозування впливу [146] енергетичних характеристик на виробничі параметри і нейромережевим блоком оцінки прибутку, що дає змогу зменшити споживання енергетичних ресурсів та підвищити вихід якісної продукції з врахуванням впливу збурень і при цьому збільшує прибуток виробництва. У блоці прийняття рішень для кожного прогнозу зберігаються можливі варіанти стратегій керування та показники якості для кожної дії за продуктивністю виробництва.

Важливою особливістю такої системи є те, що вона як зворотній зв'язок використовує інформацію про якість розвитку рослини від МРФ, який забезпечує систему необхідною інформацією про параметри атмосфери, стани рослин з ідентифікацією відповідних зон, а система керування визначає необхідні стратегії керування, що максимізують прибуток виробництва (із врахуванням біологічних особливостей рослин та споживання енергоносіїв).

У розділі використані матеріали власних досліджень [75, 76, 77, 78, 81, 82, 84, 86, 87, 151, 171, 177, 178, 179, 184, 185, 186, 188, 189, 191].

### Висновки до Розділу 3

1. Для представлення структури системи керування, властивостей її елементів і причинно-наслідкових зв'язків, властивих системі, розроблена концептуальна модель системи керування енергетичними потоками просторово-розподілених об'єктів – тепличних комплексів, для виробництва продукції заданої якості. Концептуальна модель системи керування має замкнений цикл, який полягає в тому, що система керування здійснює свій вплив на біотехнічний об'єкт завдяки прийняттю відповідних оптимальних стратегій системи керування виробництвом рослинної продукції для виробництва продукції заданої якості та у зворотному зв'язку у вигляді критеріїв оцінки якості розвитку рослин і продукції.

2. Запропоновано алгоритм визначення фітометричних параметрів розвитку рослини безконтактним способом, що дає змогу ввести в алгоритм керування фітометричний критерій, який характеризується значною кількістю показників розвитку рослини в різних її фазах, а саме цвітіння, формування плоду та отримання врожаю. Оцінка якості розвитку рослини була проведена інтегральною залежністю показників. За допомогою фітометричного критерію визначаємо рівень розвитку рослини в період її вегетації, а його дотримання на максимальному рівні дасть змогу на початковій стадії сформувати у рослини максимальну врожайність. У теплиці при температурах 15..24°C відбувається найкраще формування рослиною врожаю (кількості квіточок у суцвітті, кількості плодів на гілці, середньої ваги плоду, приросту ваги плоду).

3. Запропоновано ввести в алгоритм регулювання температурного режиму теплиці фітотемпературний критерій оцінки стану розвитку рослини, що дає можливість отримати від рослини максимальну врожайність. Аналіз зміни параметрів температури рослин і температури повітря в теплиці, що облаштована системою автоматичного регулювання температури повітря, доводить потребу у використанні запропонованого критерію. Встановлено



межі критерію, в яких повинні перебувати його значення, а саме від 0,9 до 1,1, з урахуванням, що температура рослини має бути в межах 21..25°C вдень та 18..22°C уночі відповідно до агротехнології вирощування. Такий підхід сприятиме збільшенню врожайності рослин.

4. Для оцінки просторово-розподілених умов розвитку рослин в теплиці пропонується ввести фітокліматичний показник життєзабезпечення рослин та оцінки самої рослини – показник фіторозвитку, який дасть змогу визначити рівень розвитку рослин та якості врожаю. Встановлено, що перевищення фітокліматичного показника більше 1 говорить про надмірний рівень параметрів життєзабезпечення рослини від встановлених агротехнологією, відповідно і про перевитрати енергетичних носіїв, що витрачаються на їх забезпечення. Значення показника фіторозвитку менше 1 свідчить про недостатньо можливий рівень розвитку рослин та якісної рослинної продукції. Встановлено, що отримання якісної продукції при мінімальному споживанні енергетичних ресурсів можливе за умови мінімізації критерію ефективного використання енергетичних ресурсів (середньоквадратичне відхилення між зазначеними показниками), коли його зростання в середньому по всій теплиці до 46% говорить про неефективне споживання енергоносіїв існуючими системами керування.

5. Встановлено нелінійність та нестаціонарність (по електроенергії 0,28 та газу 0,26) між якістю розвитку рослини, якістю продукції та споживанням енергії, враховуючи збурюючі фактори, фактично неможливість формалізувати взаємозв'язки між виробничими параметрами із використанням класичних підходів (кореляційного аналізу). Для моделювання і розробки концепції функціонування системи керування виробництва продукції заданої якості використано математичний апарат нейронних мереж. Стратегії керування виконанням технології виробництва рослинної продукції, що супроводжують виробництво томатів, розраховувалися із використанням двох послідовно з'єднаних нейронних мереж. Найвищу точність показує мережа із структурою – багатошаровий

персептрон. Для зменшення величини похибок, користуючись вікном «Конструктор мереж» у програмному пакеті Statistica 6.0, було проведено додаткове навчання нейронної мережі вибраної структури. Зазначене дало змогу зменшити похибку навчання до 2,8%, а контрольну – до 1,9%. При цьому точність оцінок не перевищує 3,5%.

6. Запропоновано архітектуру системи керування енергетичними потоками просторово-розподілених об'єктів – тепличних комплексів, для виробництва продукції заданої якості із застосуванням нейромережевого аналізу та системи керування енергетичними потоками просторово-розподілених об'єктів – тепличних комплексів, до складу якої входить мобільний робот фітомоніторингу. Важливою особливістю такої системи є те, що вона як зворотній зв'язок використовує інформацію про якість розвитку рослини від мобільного робота фітомоніторингу, який забезпечує систему необхідною інформацією про параметри атмосфери, стани рослин з ідентифікацією відповідних зон, а система керування визначає необхідні стратегії керування, що максимізують прибуток виробництва (із врахуванням біологічних особливостей рослин та споживання енергоносіїв).

#### **РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ МОБІЛЬНОГО РОБОТА МОНІТОРИНГУ ФІТОСТАНУ ТА СТАНУ АТМОСФЕРИ В ПРОСТОРІ ПРОМИСЛОВОЇ ТЕПЛИЦІ**

Недоліком індивідуального підходу до контролю за станами рослин є суттєві капіталовкладення в технічні засоби і системи, що, безумовно, вплине на собівартість виробленої продукції. Але ця проблема знаходить вирішення завдяки використанню мобільного робота фітомоніторингу (МРФ). На рухомій платформі, що здатна переміщуватись технологічними направляючими, встановлені датчики для оцінки станів рослини, у тому числі шляхом візуального спостереження за рослинами, технологічних параметрів атмосфери, ґрунту теплиці. Отримана комп'ютерними засобами робота інформація обробляється, у тому числі з ідентифікацією місця проведення вимірів, а результати використовуються для подальшого переміщення платформи за певним алгоритмом і для формування відповідних стратегій керування центральною системою керування технологічними процесами в теплиці.

Поява промислових роботів і створення на їх основі автоматизованих технологічних систем або робототехнологічних комплексів (РТК) по суті означає новий якісний стрибок у автоматизації виробничих процесів і накладає додаткові вимоги до якості проєктування, тобто веде до необхідності удосконалення методів та методик проєктування. Проєктування та впровадження сучасних роботизованих систем (РС) спеціального призначення пов'язано з великими капітальними вкладеннями як у розробку проєктів та виконання експериментальних робіт, так і в придбання техніки [38, 279]. Тому доцільності впровадження МРФ спеціального призначення має передувати всебічне обґрунтування. Важливим завданням початкового етапу проєктування МРФ є формування завдань, що підлягають виконанню роботами-маніпуляторами [136] (РМ), та оптимізація технічного обліку

системи. При цьому виникає необхідність в обґрунтуванні параметрів МРФ на основі вирішення завдання багатокритеріального параметричного синтезу.

#### **4.1. Структурно-параметричний синтез раціонального варіанта побудови мобільного робота**

Для всебічного обґрунтування вимог до МРФ виникає необхідність у вирішенні таких груп наукових завдань:

1. Формулювання концептуальних основ побудови та організації функціонування МРФ.
2. Розробка методичних основ структурного і параметричного синтезу МРФ.

Під час вирішення наукових завдань першої групи визначаються: мета функціонування МРФ і завдання, що ним вирішуються; умови функціонування.

Основні поняття теорії побудови РС базуються на категоріях загальної теорії систем [104]. При цьому спільність понять теорії систем виявляється в конкретній предметній сфері, у тому числі й стосовно РС. У якості основних елементів РС будуть виступати РМ. При цьому РС являє собою сукупність РМ, об'єднаних ієрархічними, інформаційними, керуючими зв'язками, де кожний елемент спрямований на досягнення загальної мети, що поставлена перед РС.

Для завдань першої групи характерні такі два етапи проведення досліджень. На першому етапі необхідно побудувати концептуальну модель функціонування РС, на другому етапі, на базі прийнятої концептуальної моделі – математичну модель динамічного дискретно-керованого процесу, в якому об'єктом керування є РМ; керованими параметрами – показники якості діяльності РМ; керуючими впливами – оперативні завдання РМ. Розробляється також система показників і методика оцінки ефективності функціонування РС. Результатом аналізу, проведеного в рамках теорії

побудови РС, є моделі процесів їхнього функціонування і закономірності, що властиві цим процесам та системі загалом. У цьому і є пізнавальна цінність аналізу, що обумовлена використанням результатів для постановки завдання синтезу [52, 66].

У другій групі завдань теорії побудови РС одним із основних є завдання їх оптимального синтезу, спрямоване на вибір раціонального варіанта побудови системи, що найкраще пристосована для виконання заданих функцій. Вихідними в завданні синтезу є такі дані: функції та завдання системи; перелік обмежень на характеристики системи; критерії ефективності, що встановлюють спосіб оцінки якості системи в цілому. Виходячи з цих відомостей, необхідно визначити структуру системи, параметри елементів і стратегію керування процесами, які повинні задовольняти задані обмеження і бути оптимальними щодо змісту критеріїв ефективності. Процедура синтезу РС поділяється на процедури структурного і параметричного синтезу. Метою структурного синтезу є визначення структури побудови системи: типу підсистем, складу елементів і зв'язків між ними [167, 219]. Параметричний синтез полягає у визначенні раціонального варіанта побудови РС, технічних характеристик його підсистем та основних елементів при фіксованій структурній схемі системи. Завдання синтезу оптимальної структури розглядається як завдання визначення оптимального відображення множини виконуваних функцій РС на множину її взаємозалежних елементів. Відповідно розробляються методи оптимального планування та керування РМ як процесу організації оптимального функціонування динамічної дискретно-керованої системи [279].

Методика вирішення завдання параметричного синтезу РС включає такі основні етапи. По-перше, визначаються показники ефективності кожного із варіантів побудови РС на множині умов функціонування системи для вибору найкращих із них. На другому етапі методики вирішується завдання класифікації ситуацій за ознакою задоволення прийнятих обмежень [46]. Під ситуацією в багатомірному факторному просторі розуміється

варіант рішення, а також варіант умов його реалізації. Для кожної точки ситуації проводиться розрахунок показників ефективності і порівняння отриманих значень з припустимими. Для звуження множини варіантів рішень на третьому етапі застосовується принцип оптимізації по Парето, що виділяє припустиму Парето-ефективну множину рішень [278]. Подальше звуження множини варіантів рішень пов'язане з концептуальним вибором такого варіанта побудови РС із всієї множини, який забезпечує достатньо високий (необхідний) рівень показників цільової та економічної ефективності. При цьому оптимальне рішення дає змогу визначити діапазон припустимих значень параметрів РС з виконання поставлених завдань [267].

Енциклопедичний словник визначає робота як автоматичну систему, оснащену сенсорами, які сприймають інформацію про навколишнє середовище, та виконавчими механізмами, здатну за допомогою блока керування цілеспрямовано поводити себе в обстановці, що змінюється [143, 282]. Характерною особливістю робота є антропоморфізм – здатність частково або повністю виконувати функції людини.

До основних інтелектуальних характеристик РС належать: автономність (рішення приймається роботом автономно); адаптивність – наявність експертної системи, реагування на ситуаційні зміни; обробка та розпізнавання мовних і зорових образів; створення маршрутів пересування та ін. Основними технічними характеристиками РС є мобільність, навігація та ін [143, 282].

У практиці досліджень з обґрунтування перспектив розвитку складних систем набула широкого поширення тріада критеріїв [242]:

- імовірність виконання поставлених перед РС завдань ( $P$ );
- вартість системи ( $f_1$ );
- час виконання завдань ( $f_2$ ).

У процесі вибору раціонального варіанта МРФ перевага надається такому варіанту побудови системи, який має мінімальну вартість ( $f_1$ ) та

забезпечує виконання поставлених завдань ( $P$ ) у повному обсязі ( $P_n$ ) за мінімальних часових витрат ( $f_2$ ) [280]:

$$\begin{aligned} P &\geq P_n; \\ f_1 &\rightarrow \min; \\ f_2 &\rightarrow \min. \end{aligned} \quad (4.1)$$

На початковому етапі проєктування роботизованих систем, як правило, користуються обмеженим набором основних технічних характеристик (параметрів) РС. Розширення цього переліку здійснюється з урахуванням специфіки концепції, що розробляється, а також з урахуванням характеристик, які істотно впливають на критеріальні показники. Для кількісної оцінки ступеня задоволення вимог, що ставляться до РС, доцільно виділити показники, які характеризують повноту та якість виконання операцій, пов'язаних з навігацією та застосуванням РМ ( $y_1$ ), а також повноту і якість реалізації у РМ інтелектуальних функцій ( $y_2$ ) [91, 161].

Показник  $y_1$  розраховується за формулою [91, 278]:

$$y_1 = \sum_{i=1}^s \alpha_i \cdot k_i \cdot \frac{m_i}{M_i}, \quad (4.2)$$

де  $\alpha_i$  – коефіцієнт, що характеризує значимість операцій  $i$ -го типу (у більшості випадків це очікувана частота появи операцій  $i$ -го типу),

$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ ;  $k_i$  – коефіцієнт, що характеризує якість виконання операцій  $i$ -го типу;  $m_i$  – число реалізованих РМ операцій  $i$ -го типу досліджуваної РС за період виконання поставленого завдання;  $M_i$  – потрібне число операцій  $i$ -го типу, яке повинно бути реалізовано РМ у процесі виконання поставленого завдання;  $s$  – кількість типів операцій, необхідних для виконання поставлених завдань.

Для розрахунку показника (4.2) складається перелік усіх типів операцій, які підлягають виконанню. Цей перелік має враховувати повний діапазон усіх можливих подій, що прогнозуються в ході роботи РС.

Показник повноти і якості виконання РС інтелектуальних функцій (реагування на ситуаційні зміни, обробка та розпізнавання мовних і зорових образів, визначення оптимальних траєкторій руху РМ, розпізнавання (виявлення) та вирішення завдань розподілу робіт між РМ і т.п.) розраховується за формулою [111, 278]:

$$y_2 = \sum_{i=1}^r q_i l_i \frac{n_j}{N_j}, \quad (4.3)$$

де  $r$  – кількість типів інтелектуальних функцій, які повинні виконуватись РМ;  $q_i$  – коефіцієнт, що характеризує ступінь відповідностей функцій  $i$ -го типу необхідним;  $l_i$  – коефіцієнт, що характеризує вагу функції  $i$ -го типу (у більшості випадків це очікувана частота використання  $i$ -ої функції),  $\sum_{i=1}^n l_i = 1$ ;  $n_i$  – число реалізованих інтелектуальних функцій  $i$ -го типу за певний час;  $N_i$  – загальна кількість реалізацій функцій  $i$ -го типу, що необхідна для виконання поставлених завдань.

Для обґрунтування вимог до вищевказаних показників на основі рішення багатокритеріальної задачі оптимізації (4.1) скористаємося наступним підходом [280]. Усі можливі варіанти побудови РС формально описуються координатами точки в багатовимірному просторі параметрів. Кожній точці цієї області (тобто варіанту РС) ставляться відповідно чисельні значення зазначених показників ефективності. Визначення показників ефективності здійснюється за допомогою теоретико-експериментального методу на основі використання експериментальних макетів системи, спеціальних методик оцінки ефективності та моделей функціонування РС. Знайдені критеріальні функції відображають залежність  $i$ -го показника ефективності від досліджуваних параметрів системи ( $y_1, y_2$ ). Аналіз впливу



різних параметрів на показники ефективності та виявлення основних закономірностей і прихованих чинників, що впливають на ефективність варіантів РС, проводяться методами прикладного статистичного аналізу.

У результаті обчислювальних експериментів формується сукупність чисельних значень параметрів і показників ефективності, яка утворює базу даних для пошуку і вибору раціональної концепції побудови перспективної РС. Основна ідея пошуку такої концепції полягає у використанні такого принципу: раціональний варіант побудови РС слід шукати поблизу точок вибіркової множини, що мають досить високий рівень показників цільової та економічної ефективності. Таким чином, задані критеріальні функції мають чітко виражений вартісний (часовий) характер і визначаються в класі квадратичних поліномів, методи дослідження яких добре відомі [279].

Нехай РС описується двома параметрами  $y_1$  і  $y_2$ , а порівняння можливих варіантів РС здійснюється за двома критеріями  $f_1$  і  $f_2$ , які правомірно застосовувати в усьому діапазоні зміни параметрів  $y_1$  і  $y_2$  [279]:

$$\begin{aligned} f_1 &= A_0^1 + 2A_1^1 y + y^T A_2^1 y, \\ f_2 &= A_0^2 + 2A_1^2 y + y^T A_2^2 y, \end{aligned} \quad (4.4)$$

де  $A_0^1 = [\alpha_{00}^1]$ ;  $A_0^2 = [\alpha_{00}^2]$ ;  $A_1^1 = [\alpha_{01}^1 \alpha_{02}^1]$ ;  $A_1^2 = [\alpha_{01}^2 \alpha_{02}^2]$  – вільні члени апроксимуючого полінома, а також вектора апроксимуючих коефіцієнтів при перших ступенях параметрів;  $A_2^1 = \begin{bmatrix} \alpha_{11}^1 & \alpha_{12}^1 \\ \alpha_{12}^1 & \alpha_{22}^1 \end{bmatrix}$ ;  $A_2^2 = \begin{bmatrix} \alpha_{11}^2 & \alpha_{12}^2 \\ \alpha_{12}^2 & \alpha_{22}^2 \end{bmatrix}$  – симетричні позитивно визначені матриці квадратичної форми, які складаються з апроксимуючих коефіцієнтів при других ступенях параметрів РС;  $y = [y_1 \ y_2]^T$  – вектор параметрів системи.

Тут і надалі верхні індекси коефіцієнтів відповідають порядковому номеру приватного критерію, а нижні – номеру параметра РС.

Використовуючи правила матричного диференціювання, маємо:

$$\begin{aligned}\frac{df_1}{dy} &= \left[ \frac{df_1}{dy_1} \frac{df_2}{dy_2} \right] = 2A_1^1 + y^T A_2^1; \\ \frac{df_2}{dy} &= \left[ \frac{df_1}{dy_1} \frac{df_2}{dy_2} \right] = 2A_1^2 + y^T A_2^2.\end{aligned}\quad (4.5)$$

Координати безумовних екстремумів критеріальних функцій  $f_1$  та  $f_2$  визначаються таким чином:

$$\begin{aligned}\frac{df_1}{dy} = 0 &\Leftrightarrow 2A_1^1 + y^T A_2^1 = 0 \Rightarrow \text{opt } y_1^T = -2A_1^1 (A_2^1)^{-1}; \\ \frac{df_2}{dy} = 0 &\Leftrightarrow 2A_1^2 + y^T A_2^2 = 0 \Rightarrow \text{opt } y_2^T = -2A_1^2 (A_2^2)^{-1}.\end{aligned}\quad (4.6)$$

Відповідно до критерію Сильвестра з позитивної визначеності симетричних матриць  $A_1^2$  та  $A_2^2$  виходить, що  $a_{11}^1 > 0$ ,  $a_{22}^2 > 0$ . Отже  $\frac{d^2 f_i}{dy_i^2} > 0$  і безумовні екстремуми критеріальних функцій  $f_i$  є мінімумами. Причому, відповідно до цього ж критерію матриці  $A_1^2$  та  $A_2^2$  невироджені, тобто існує єдине рішення (4.6) [236].

Таким чином, варіанти РС зі знайденими характеристиками, які відповідають точці А ( $\text{opt } y_1^1$ ;  $\text{opt } y_2^1$ ) і точці В ( $\text{opt } y_1^2$ ;  $\text{opt } y_2^2$ ) є оптимальними за критеріями  $f_1$  та  $f_2$  відповідно, якщо вони належать області допустимих рішень. У тому випадку, коли точки А або В не належать області допустимих рішень, необхідно провести пошук раціонального варіанта системи в області існування Парето-оптимальних РС. Для нашого випадку Парето-оптимальна лінія АВ (між т. А і т. В) перебуває всередині області, обмеженої головними осями невироджених сімейств ліній другого порядку  $f_1$  і  $f_2$ . При повороті координатних осей завжди можна добитися їх паралельності головним осям сімейства  $f_2$ . Тому в повернутій системі координат чисельне значення змінної

$y_l$  завжди буде перебувати в діапазоні  $[opt\ y_1^l, opt\ y_2^l]$ . Крім того, при використанні ще й перетворень системи координат, що «розтягуються», чисельні значення усіх Парето-оптимальних змінних  $Z_j$  перебувають всередині багатовимірного паралелепіпеда  $[opt\ Z_j^1, opt\ Z_j^2]$ ,  $\forall j = [1, q]$ . Будь-якому значенню  $Z_1$  (що перебуває в діапазоні  $[opt\ Z_1^1, opt\ Z_2^1]$  відповідає цілком конкретне значення  $Z_2$  (яке перебуває в діапазоні  $[opt\ Z_1^1, opt\ Z_2^1]$ ), що забезпечує точці з координатами  $(Z_1, Z_2)$  властивість належати області рішень, ефективних по Парето [279]:

$$\forall \{Z_1 \mid Z_1 \in [opt\ Z_1^1, opt\ Z_1^2]\} \exists \{Z_2 \mid Z_2 \in [opt\ Z_2^1, opt\ Z_2^2]\} \Rightarrow (Z_1, Z_2) \in \Pi(Y), \quad (4.7)$$

де  $\Pi(Y) \in H$  – область Парето-оптимальних рішень.

При цьому чисельне значення критеріїв у будь-якій точці допустимого перетвореного простору параметрів визначається за формулами [111, 278]:

$$\begin{aligned} f_1 &= \sum_{j=1}^2 (Z_j - Z_{0j})^2 + k_1, \\ f_2 &= \sum_{j=1}^2 \lambda_j Z_j^2 + k_2, \end{aligned} \quad (4.8)$$

де  $Z_j$  – змінні в новій системі координат;  $Z_{0j}$  – координати центра критеріальної гіперсфери;  $\lambda_j$  – власні значення квадратичної форми  $f_2$ ;  $k_1$  – екстремальне значення критерію  $f_1$  в центрі гіперсфери;  $k_2$  – екстремальне значення критерію  $f_2$  в центрі гіпереліпсоїда ( $Z_{0j}=0$ ).

Знаючи координати центра сімейства гіперсфери ( $Z_{0j}$ ), власні значення квадратичної форми  $f_2(\lambda_j)$  і варіюючи значеннями координати  $Z_1$  в діапазоні  $[0, Z_{01}]$ , можна знайти інші координати точок, що належать лінії Парето. Застосування зворотних перетворень системи координат дає змогу визначити Парето-оптимальні параметри РС у вихідній системі координат.

## **4.2. Обґрунтування ієрархічної структури керування мобільним роботом**

### **4.2.1. Структура мобільного робота фітомоніторингу**

З метою забезпечення автономної роботи мобільного робота для фітомоніторингу рослин в теплиці необхідно одночасно аналізувати велику кількість факторів: зовнішні перешкоди, власна швидкість, поточне розташування. Але крім цього у зв'язку із великою площею приміщень закритого ґрунту та обмеженим зарядом акумулятора мобільного комплексу необхідно здійснювати побудову маршруту, ґрунтуючись як на доцільності доїзду до тих чи інших точок теплиці, так і на можливостях самого мобільного комплексу. Для вирішення цього завдання використовуються результати моделювання щодо розподілення температурних полів теплиці та інформація про поточну локалізацію робота і його картографування [170].

Будуючи систему керування МРФ у теплиці, за основу взяли багаторівневу організацію за ієрархічним принципом побудови [12, 137, 290], що має можливість аналізу фітокліматичних даних та прийняття на цій підставі рішень щодо оптимізації маршруту переміщення, планування послідовності дій мобільного робота, розпізнавання образів та перешкод [281]. Структура такої системи керування містить у своєму складі стратегічний, тактичний та виконавчий рівні, взаємозв'язок яких представлено на (рис 4.1).

Багаторівневу ієрархічну структуру керування МРФ у теплиці представлено на (рис. 4.2). Система керування функціонує таким чином. Для планування маршруту на стратегічному рівні система повинна отримати координати контрольних точок, через які робот має прокласти свій маршрут і провести в них виміри. Передбачено два можливі шляхи визначення таких контрольних точок: в ручному режимі оператором та в автоматичному відповідно до результатів аналізу прогнозу розподілу температури за чисельним методом оцінки повітряних потоків у теплиці, розглянутим в Розділі 2. Перелік контрольних точок потрапляє до контролера стратегічного

рівня, що призначений для вирішення завдання побудови найкращого маршруту, який охоплює максимальну кількість контрольних точок, виходячи із можливостей мобільного робота та обмежень конструкції теплиці [173].

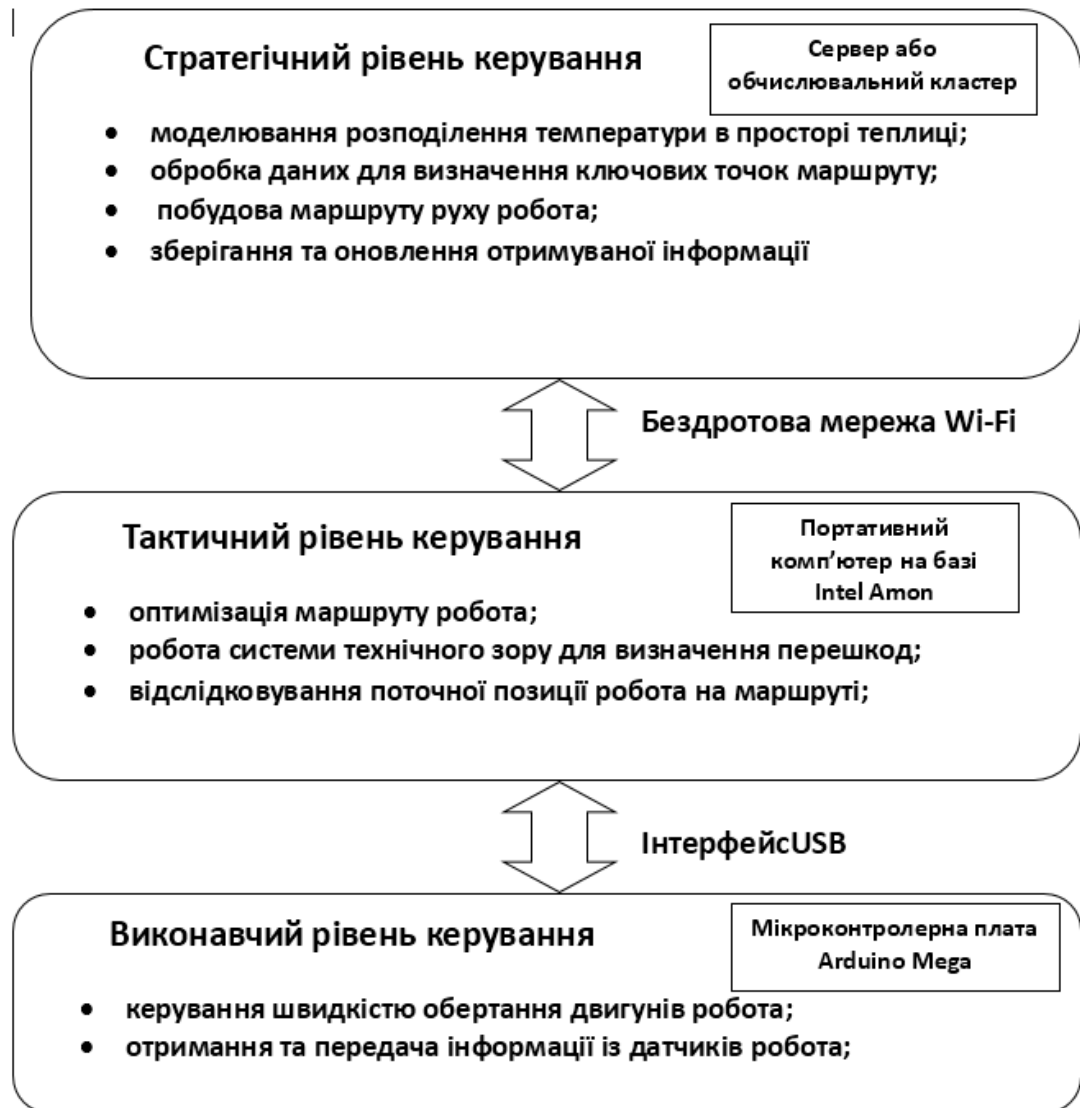


Рис. 4.1. Структурна схема керування системи мобільного робота

Навігаційний контролер тактичного рівня призначений для вирішення завдання щодо обробки поточних даних, які надходять від вимірювальної системи мобільного робота, визначення поточного місцезнаходження робота, уточнення карти навколишнього середовища і можливих перешкод на шляху переміщення, а також безпосередньо здійснює керування переміщенням від однієї контрольної точки до іншої. Сформований вектор переміщення

передається на контролер виконавчого рівня, що керує швидкостями обертання ведучих коліс, розузгодженням між ними під час поворотів.



Рис. 4.2. Багаторівнева ієрархічна структура керування мобільного робота

#### 4.2.2. Система керування електротехнічним роботизованим комплексом фітомоніторингу рослин в теплиці

За основу для побудови інформаційної системи мобільного робота було взято безкоштовну та відкриту програмну оболонку ROS (Robot Operating System) [176]. ROS – це розподілена система процесів (вузлів), що можуть бути згруповані в пакети та стеки. Така система надає функціонал операційної системи для обладнання робота: апаратна абстракція,

низькорівневий контроль обладнання, передача повідомлень між процесами, керування пакетами.

У цьому інформаційному середовищі використовуються такі поняття:

- вузли (nodes): вузол – це файл, що використовує ROS для зв'язку з іншими вузлами;
- теми (topics): вузли можуть публікувати повідомлення за темою, а також підписатися на тему для прийому повідомлень;
- повідомлення (messages): тип даних ROS, що використовується при підписці або публікації на тему.

Виходячи із цієї концепції, можна представити взаємодію апаратно-програмного комплексу мобільного робота у вигляді блок-схеми (рис. 4.3).

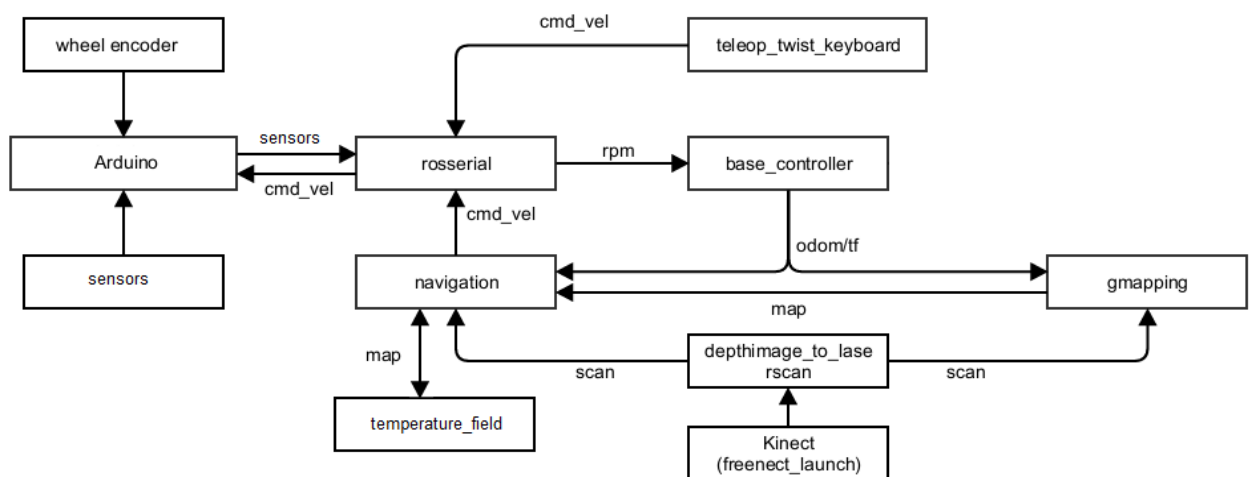


Рис. 4.3. Загальна блок-схема метавузлів інформаційної системи робота і взаємозв'язків між ними

На (рис. 4.3) показано метавузли у вигляді прямокутників, теми, якими вони пов'язані один з одним, показано лініями, і публікуються безпосередньо повідомлення з інформацією, що передається. Типи даних, що публікуються у відповідних темах, стандартизовано. Наприклад, в темі `cmd_vel` інформація передається у вигляді масиву двох векторів лінійної та кутової швидкості за трьома координатами (`linear: x: 2.0 y: 0.0 z: 0.0 angular: x: 0.0 y: 0.0 z: 0.0`). Окрім того, тема може містити підтеми із окремими каналами даних, так

тема `sensors` включає в себе `sensors/encoder` із даними про обертання колес, `sensors/temperature` з інформацією про вимірювану температуру, `sensors/power` з інформацією про поточні витрати електричної енергії тощо.

Звичайно, приведена схема є узагальненою, тому що для забезпечення роботи кожного метавузла необхідна співпраця декількох вузлів. Це можна показати на прикладі метавузла `navigation` (рис. 4.4).

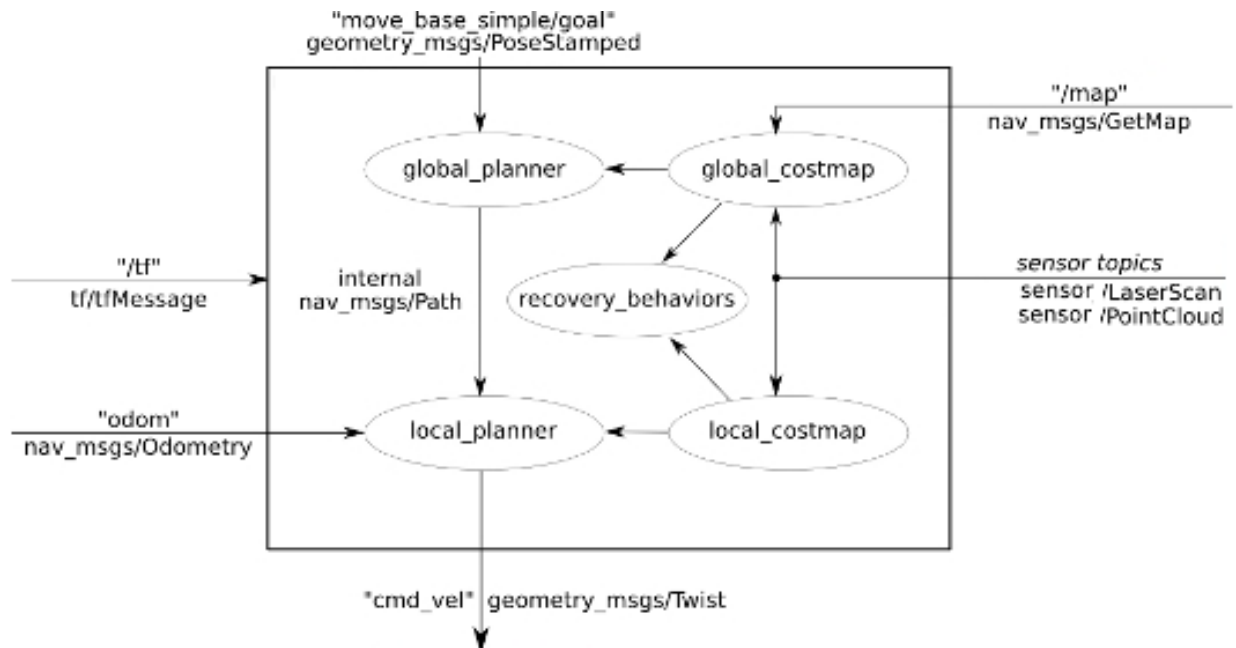


Рис. 4.4. Метавузол `navigation` при детальнішому розгляді

Як бачимо, у метавузол приходять дані у вигляді завчасно створеної мапи (тема `nav_msgs/map`), поточні дані, що розпізнаються із камери (теми `sensor/laserscan`), дані одометрії про поточне положення робота (тема `nav_msgs/odometry`), дані про переміщення, які потрібно виконати (тема `tf/tfmessage`). Метавузол здійснює побудову локальних та глобальних матриць переміщень за алгоритмом стимулюючого навчання, оцінюючи доцільність від тієї чи іншої дії та створюючи маршрут переміщення, враховуючи обмеження та формуючи вектор переміщення, що публікується у відповідну тему. Процес відбувається безперервно до отримання команди на



скасування подальшого переміщення від оператора або відповідних внутрішніх діагностичних попереджень.

Інформаційна оболонка ROS здатна виконувати розподілені обчислювання, що поліпшує її використання у випадках обмеженого енергетичного та обчислювального ресурсу. Тому в концепції побудови мобільного робота для фітомоніторингу рослин в теплиці використано принцип «клієнт-сервер», де перший відповідає за збір, передачу інформації та керування виконавчими механізмами робота, а другий за обробку масивів даних та прийняття керуючих рішень, поєднаних єдиним інформаційним середовищем, що функціонує одночасно і на рухомому мобільному роботі, і на стаціонарному сервері (рис. 4.5) [197].

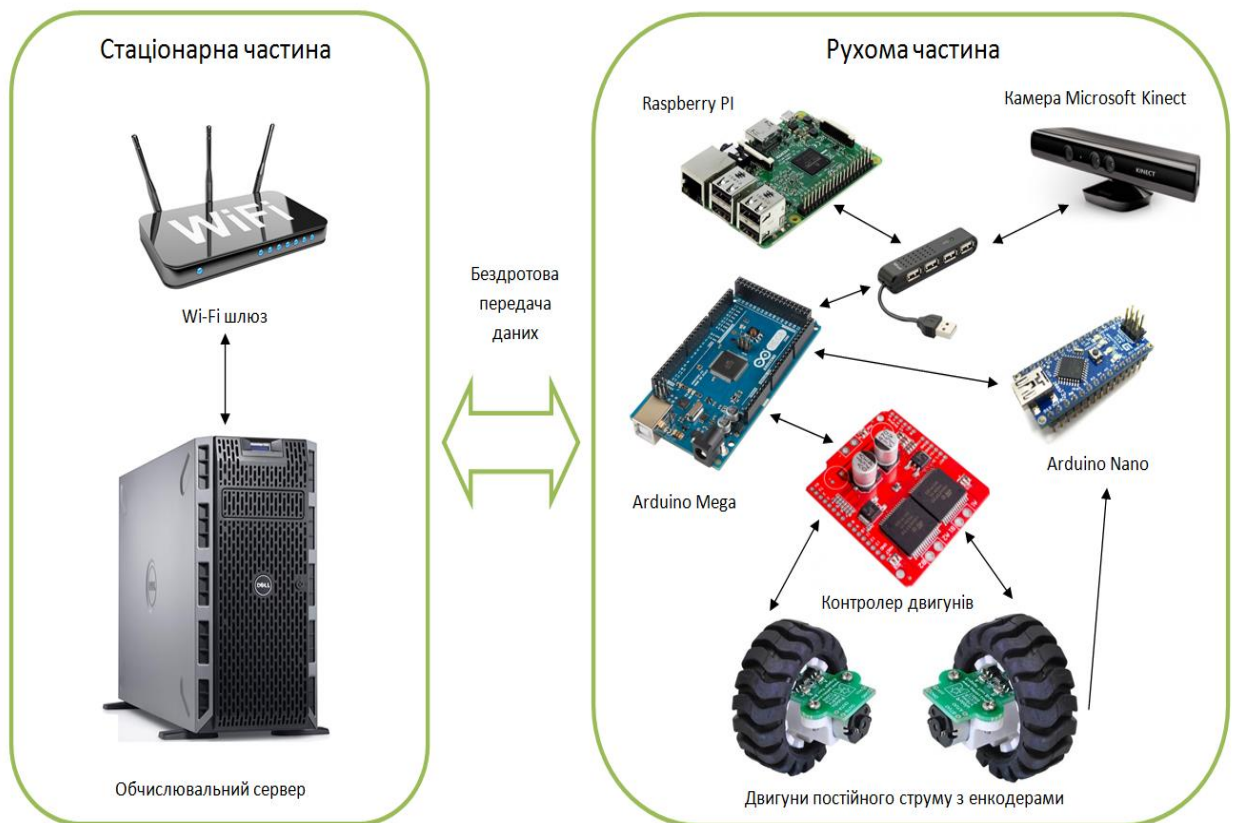


Рис. 4.5. Взаємодія окремих апаратних частин в єдиному інформаційному середовищі

Якщо перейти безпосередньо на виконавчий рівень, що відповідає за перетворення команд тактичного і стратегічного рівнів керування, то останньою ланкою, що безпосередньо взаємодіє з інформаційним середовищем ROS, є контролер Arduino Mega. Він під'єднується до мікрокомп'ютера Raspberry Pi, на якому запущено клієнтську частину ROS і який підтримує зв'язок із серверною частиною комплексу. Контролер Arduino Mega працює безпосередньо із протоколами кінцевих пристроїв, наприклад із платою Arduino Nano через протокол SPI, звідки отримує дані про обертання коліс. Також він формує аналогову керуючу дію для плати керування двигунами.

Для планування маршруту на стратегічному рівні система повинна отримати координати контрольних точок, через які робот повинен прокласти свій маршрут і провести в них виміри. Передбачено два можливі шляхи визначення таких контрольних точок: в ручному режимі оператором та в автоматичному на основі аналізу моделі прогнозу розподілу температури за методом обчислювальної гідрогазодинаміки повітряних потоків у теплиці. Перелік контрольних точок потрапляє до контролера стратегічного рівня, який вирішує завдання побудови найкращого маршруту, що охоплює максимальну кількість контрольних точок, виходячи із можливостей мобільного робота й обмежень конструкції теплиці. Навігаційний контролер тактичного рівня вирішує завдання обробки поточних даних, що надходять від вимірювальної системи мобільного робота, визначення поточного місцезнаходження робота, уточнення карти навколишнього середовища і можливих перешкод на шляху переміщення та безпосередньо здійснює керування переміщенням від однієї контрольної точки до іншої. Сформований вектор переміщення передається на контролер виконавчого рівня, який керує швидкостями обертання ведучих коліс, розузгодженням між ними під час поворотів [172].

Для побудови стратегічного рівня керування пропонується використовувати технологію експертних систем реального часу, тобто

систем, що працюють із змінними у часі даними та знаннями. Використання цієї технології дасть змогу інтегрувати систему керування стратегічного рівня мобільного робота з іншими системами керування тепличним комплексом.

На (рис. 4.6) представлена структура стратегічного рівня керування, що містить експертну систему та модель температурного поля теплиці. Архітектура, що пропонується, є модульною, і за необхідності аналізу додаткових факторів можливе розширення структури. За формування переліку контрольних точок для наступного рівня керування відповідає блок «Аналіз ситуації і опрацювання стратегій», сутність якого висвітлено нижче.



Рис. 4.6. Блок-схема стратегічного рівня керування

Для вибору контрольних точок МРФ у теплиці в автоматичному режимі необхідно враховувати великий обсяг даних (рис. 4.7), таких як початкове положення робота, розподілення температури в просторі теплиці по зонах, можливість обстеження тієї чи іншої точки простору теплиці.

Великий обсяг даних необхідно структурувати тим чи іншим способом для подальшої обробки, з цією метою доцільно використовувати методи кластерного аналізу.

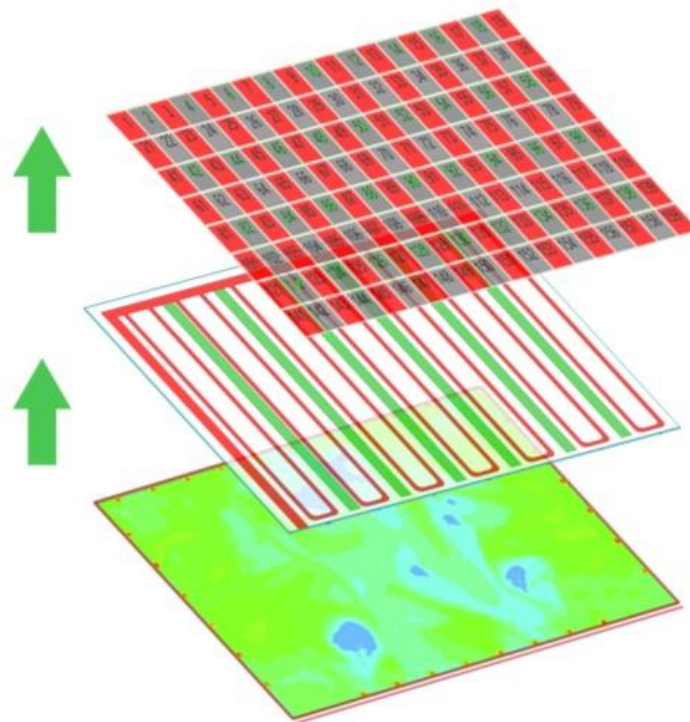


Рис. 4.7. Накладання різних шарів даних, що підлягають аналізу

Кластерний аналіз – багатовимірна статистична процедура, що виконує збір даних, які містять інформацію про вибірку об'єктів, і впорядковує об'єкти в порівняно однорідні групи [245, 250]. Завдання кластеризації належить до статистичної обробки, а також до широкого класу завдань навчання без вчителя. Застосування кластерного аналізу припускає такі етапи [165]:

- відбір вибірки для кластеризації;
- визначення змінних, за якими будуть оцінюватися об'єкти у вибірці, тобто простору ознак;
- обчислення значень тієї чи іншої міри подібності (або відмінності) між об'єктами;
- застосування методу кластерного аналізу для створення груп схожих об'єктів;

- перевірка достовірності результатів кластерного рішення.

Використання методів кластеризації обумовлюється відсутністю апіорних гіпотез щодо кількості та змісту класів, які необхідно отримати в результаті. За об'єкт кластеризації приймаємо ділянку простору теплиці  $s_i^R \in S^R$ . У результаті проведення кластеризації кожна ділянка  $s_i^R$  перетворюється в деякий кластер  $k_i \in K$  у відповідності із його параметрами.

Сформулюємо задачу кластеризації ділянок простору теплиці: нехай є безліч об'єктів  $S^R = \{s_1^R, \dots, s_N^R\}$  і функція відстані між ними  $p(s_i, s_j')$ . Необхідно розділити вибірку  $\{s_1^R, \dots, s_N^R\}$  на множини, що не перетинаються (кластери)  $K = \{k_1, \dots, k_M\}$ , таким чином, щоб кожен кластер  $k_i \in K$  складався із об'єктів, близьких за метричним значенням  $p$ , при цьому об'єкти різних кластерів істотно відрізняються. Разом із цим кожному об'єкту  $s_N^R$  ставиться у відповідність номер кластера  $n_k$ . За алгоритм кластеризації приймається функція  $f: S^R \rightarrow K$ , яка будь-якому елементу  $s_i^R \in S^R$  ставить у відповідність номер кластера  $n_k$ . У якості функції відстані  $p(s_i, s_j')$  для визначення близькості об'єктів вибрано класичну евклідову метрику:

$$p(s_i^R, s_j^R) = \sum_{p=1}^{n_p} (\mu_k(s_i^R) - \mu_k(s_j^R))^2, \quad (4.9)$$

де  $\mu_k(s_i^R)$ ,  $\mu_k(s_j^R)$  – ступінь (міра) володіння  $p$ -м параметром  $i$ -ї та  $j$ -ї ділянки простору теплиці відповідно.

Оскільки кількість кластерів  $n_k$  для задачі аналізу ділянок простору теплиці невизначена, то для проведення кластерного аналізу обираємо ієрархічний агломеративний метод Ворда. На відміну від інших методів кластерного аналізу, для оцінки відстаней між кластерами тут використовуються методи дисперсійного аналізу. На кожному кроці алгоритму об'єднуються такі два кластери, які ведуть до мінімального збільшення цільової функції, тобто внутрішньогрупової суми квадратів [176]. Максимальна кількість кластерів  $n_k^{max} = 5$ .

Алгоритм кластеризації на основі ієрархічного агломеративного методу Ворда складається з таких кроків:

1. Створення первинного набору кластерів, кожен з яких містить один елемент набору кластеризації  $K_t = \{\{s_i^R\}, \dots, \{s_N^R\}\}$ ,  $t = 1$ , де  $s_i^R$  – об'єкт кластеризації,  $t$  – номер ітерації;
2. Знаходження найближчих кластерів: для всіх  $t = 2, \dots, n$ , знайти  $K_{t-1}$  два найближчих кластери  $U, V$ :  $(U, V) := \arg \min \rho(U, V)$ ,  $\rho_t = \rho(U, V)$ , де  $\rho(U, V)$  – відстань між кластерами  $U, V$ ;
3. Вилучення кластерів  $U, V$  і додавання об'єднаного кластера  $W = U \cup V$ ,  $K_t = K_{t-1} \cup \{W\} \setminus \{U, V\}$ ;
4. Обчислення відстані  $\rho(W, S)$  для всіх  $s_i^R \in K_t$ .

Емпіричним шляхом виявлено, що поява надмірної кількості параметрів кластеризації (більше за п'ять) дає некоректні результати, які не враховують повною мірою всі характеристики ділянок.

Маршрут переміщення  $c_i^k(t)$  визначаємо як множину контрольних точок, в яких необхідно перебувати у визначені моменти часу мобільному роботу, що розпочинає свій рух із початкової позиції  $p_i^{\text{поч}}$ :

$$c_i^k(t) = \left\{ (p_i^{\text{поч}}, t_i^{\text{поч}}), (p_{i1}^k, t_{i1}^k), \dots, (p_{iN_k^k}^k, t_{iN_k^k}^k), (p_i^{\text{поч}}, t_i^{\text{поч}}) \right\}, \quad (4.10)$$

де  $p_i^{\text{поч}}$  – початкова точка маршруту,  $p_{ij}^k \in P^k$ ,  $j = \overline{1, N_k^k}$  – контрольні точки маршруту проходження,  $t_{ij}^k$  – визначений час відвідування роботом контрольних точок,  $t_i^{\text{поч}}$  – визначений час повернення в початкову точку маршруту,  $N_k^k$  – кількість контрольних точок маршруту.

Для узгодження даних, отриманих моделюванням температурного поля, і мапи, одержаної за допомогою візуального обстеження теплиці роботом, використовуємо нейронну мережу Ворда. Ця мережа здатна проводити якісний аналіз вхідних даних за рахунок виділення у них різних аспектів, що досягається особливим видом архітектури нейронної мережі, яка



має прихований шар, розбитий на декілька блоків. Кожен блок має свою власну передаточну функцію, що дає можливість здійснювати паралельну обробку сигналів, отриманих із зовнішнього шару. Використання різноманітних методів обробки даних для одного і того ж набору даних дає можливість казати, що нейронна мережа аналізує дані з різних аспектів. Архітектуру нейронної мережі Ворда, що використовується, показано на (рис. 4.8).

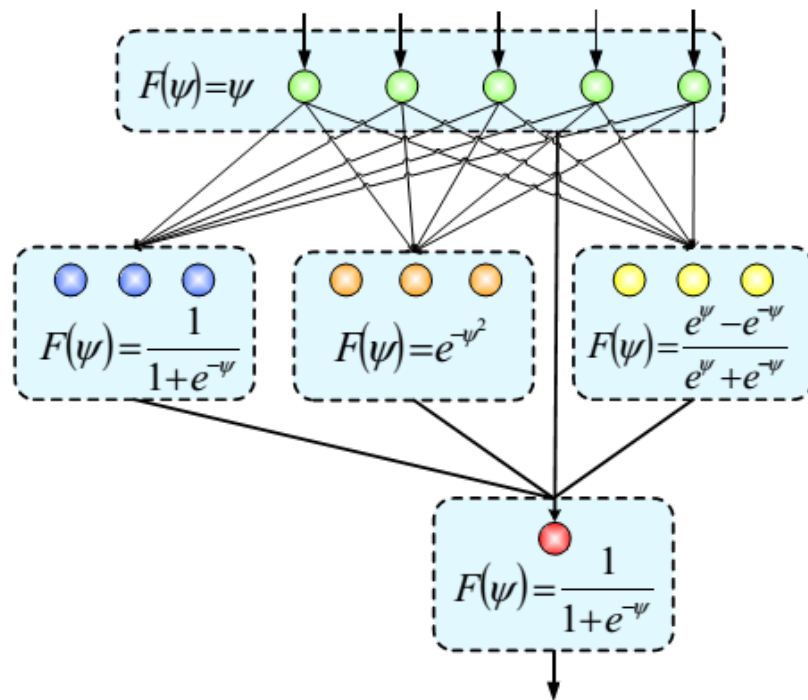


Рис. 4.8. Архітектура нейронної мережі Ворда

Вхідний шар нейронної мережі складається із наступних параметрів:  $(p_i^{\text{поч}})$  – початкова та кінцева позиція робота,  $(P^k)$  – масив точок, в яких може перебувати робот під час переміщення теплицею,  $(S^R)$  – масив точок температурного поля із відповідними значеннями моделювання,  $(p(s_i, s'_i))$  – функція відстані між точками моделювання,  $(t_{ij}^k)$  – визначений час відвідування роботом контрольних точок,  $(t_i^{\text{поч}})$  – визначений час повернення в початкову точку маршруту.

Для вхідного шару в мережі Ворда використана лінійна функція активації  $F(\psi) = \psi$ . Кількість нейронів вхідного шару визначається кількістю

параметрів, що надходять на вхід. Прихований шар представлено трьома блоками. Для блоків прихованого шару обрано наступні функції активації:

- сигмоїдальна з областю значень  $[0,1]$ :  $F(\psi) = \frac{1}{1+e^{-\psi}}$ ;
- гіперболічний тангенс з областю значень  $[-1,1]$ :  $F(\psi) = \frac{e^{\psi} - e^{-\psi}}{e^{\psi} + e^{-\psi}}$ ;
- радіальна базисна з областю значень  $[0,1]$ :  $F(\psi) = e^{-\psi^2}$ .

Для навчання нейронної мережі Ворда можна застосовувати метод зворотного поширення помилки. В основу навчального алгоритму зворотного поширення помилки покладено метод градієнтного спуску, що призводить до зміни вагових коефіцієнтів нейронної мережі. Будь-якої зміни параметрів передатних функцій даний метод навчання не передбачає. Тому для вирішення цього завдання в якості алгоритму навчання був обраний стохастичний метод – метод випадкової зміни ваг зі збереженням тенденції позитивних змін. Однак наявність великої кількості зв'язків у нейронній мережі робить даний алгоритм малоефективним на початкових етапах навчання. Тому для поліпшення якості і швидкості навчання було вирішено застосувати змінений генетичний алгоритм [155].

Створюється популяція нейронних мереж, кожна з яких кілька разів навчається стохастичним методом, а потім оцінюється [246, 248]. Список ранжується, і кращі екземпляри нейронних мереж переходять в наступне покоління. Цей ітераційний процес повторюється. Після декількох ітерацій отримана мережа доучується класичним стохастичним методом.

Щоб вирішити завдання щодо визначення характеристик нейронної мережі, було проведено 40 обчислювальних експериментів тривалістю 200 епох навчання для кожної комбінації мережі. Максимальну кількість шарів прийнято за 5, нейронів у шарі – 10. В якості критерію оптимальності використана відносна помилка прогнозування.

Результати обчислювальних експериментів для топології Ворда наведені в таблиці 4.1 і графічно представлені на (рис. 4.9).



Таблиця 4.1. Відносна похибка навчання для нейронної мережі Ворда

Нейронів у шарі	Кількість шарів				
	1	2	3	4	5
1	0,167	0,131	0,13	0,132	0,133
2	0,140	0,108	0,122	0,119	0,125
3	0,135	0,107	0,11	0,115	0,121
4	0,126	0,105	0,102	0,106	0,116
5	0,113	0,098	0,108	0,118	0,133
6	0,110	0,094	0,104	0,145	0,18
7	0,106	0,096	0,102	0,143	0,157
8	0,116	0,106	0,154	0,232	0,361
9	0,111	0,1	0,169	0,302	0,444
10	0,112	0,105	0,181	0,364	0,527

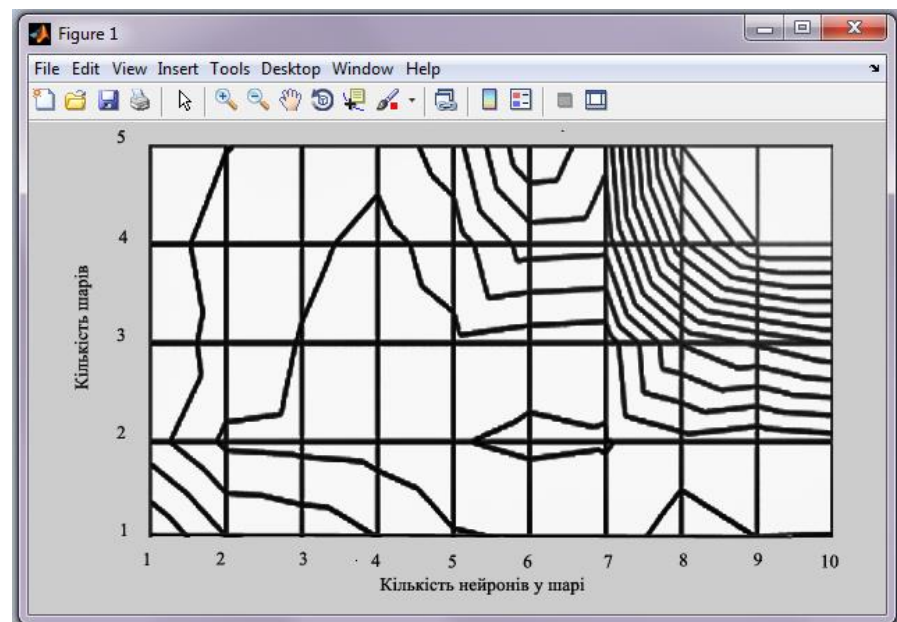


Рис. 4.9. Графічна інтерпретація відносної похибки навчання нейронної мережі Ворда

Виходячи із отриманих даних, для подальшого використання буде застосовуватись нейронна мережа топології Ворда розміром 2 шари по 6 нейронів у кожному шарі. Дану конфігурацію використовуємо у пакеті моделювання Matlab Neural Networks, зовнішній вигляд якого представлено на (рис. 4.10).

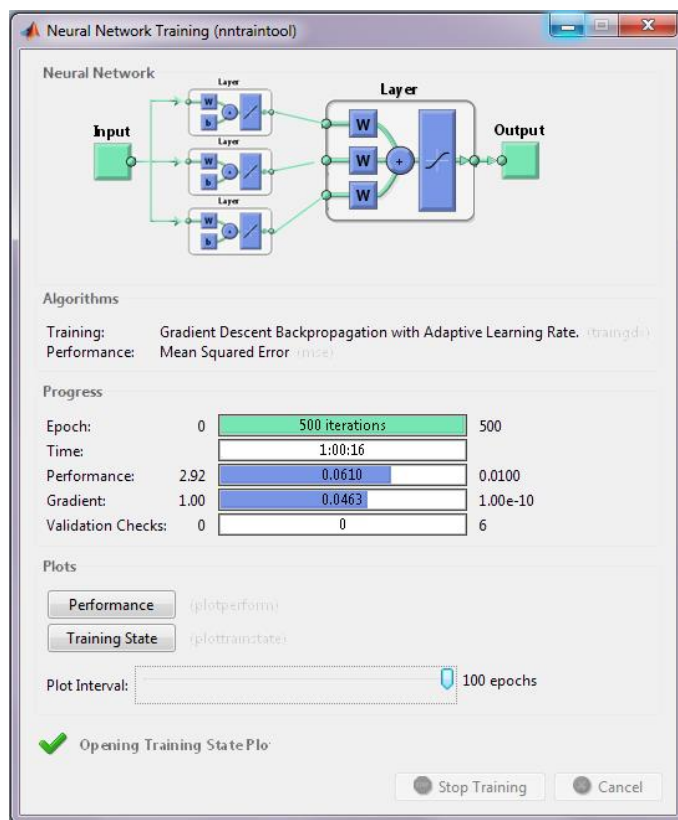


Рис. 4.10. Налаштування моделювання нейронної мережі Ворда

За результатами навчання нейронної мережі усталену середньоквадратичну похибку було отримано на 485 ітерації (рис. 4.11).

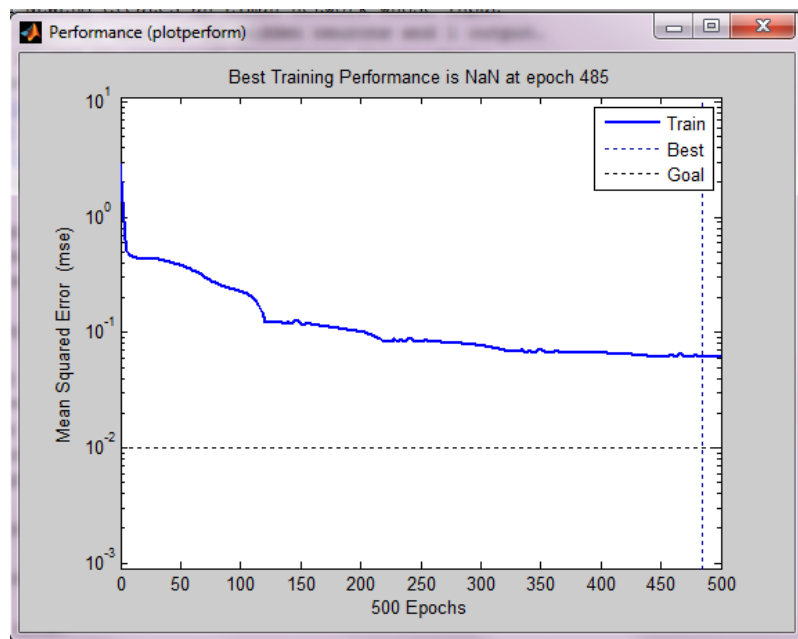


Рис. 4.11. Залежність середньоквадратичної похибки за результатами навчання нейронної мережі

#### **4.3. Математична модель руху мобільного робота фітомоніторингу з врахуванням просторово-розподілених параметрів об'єкта**

Для навігації МРФ у просторі теплиці поза технологічними направляючими необхідно враховувати вплив різних збурень на кутову швидкість (властивості покриття підлоги, перешкоди). Вивчення характеру руху МРФ у теплиці в моменти маневрування і заїзду на міжрядні технологічні направляючі вимагає постійного настроювання регулятора кутової швидкості за наявності різних збурень. Виходячи з цих вимог, доцільним є створення моделі руху робота, яка зможе врахувати лінійну і кутову швидкості й так само моменти опору поворотам під час маневрування. Модель реалізовано у середовищі Mathlab Simulink, отримано перехідні характеристики по каналах лінійної та кутової швидкостей за різних керуючих впливів. Виявлено нелінійний характер впливу моменту опору повороту на перехідні процеси. Значення, отримані за допомогою моделі, порівнюються з реальними, які виміряні на прототипі робота за допомогою інкрементальних енкодерів. Порівняння цих даних дає можливість говорити про адекватності отриманої моделі.

Практичний досвід експлуатації мехатронних систем дає змогу зробити висновок, що привідні колеса робототехнічних платформ мають різну частоту обертань навіть за ідентичності використовуваних двигунів, що ускладнює забезпечення руху робота навіть по прямій траєкторії та локалізацію його в просторі [208]. Ця особливість не дає можливості здійснити одноразове налаштування обладнання на постійний оптимальний режим. Тому для забезпечення стабілізації швидкості обертання коліс необхідно визначити всі фактори, що впливають на рух робота, і провести моделювання змін швидкості з урахуванням цих факторів.

Досліджуючи характер руху робота в просторі теплиці, приймемо такі припущення. Будемо розглядати робот з колісним типом шасі, найбільш

характерним для технологічних візків, що використовуються в тепличному господарстві для перевезення продукції як по міжрядних направляючих, так і рештою простору тепличного комплексу. Будемо також вважати, що рух робота під час вимірювання фітометричних і фітокліматичних параметрів відбувається в горизонтальній площині з постійною швидкістю  $v$ . Механізм робота абсолютно жорсткий, і відсутнє поздовжнє проковзування його коліс. Привідну систему робота побудовано на базі двигунів постійного струму. Допущення щодо руху в горизонтальній площині справедливо для даного робота, оскільки поверхня підлоги не має серйозних нерівностей, які могли б спричинити істотний вплив на рух робота. Допущення про відсутність проковзування є більш істотним, і тому під час моделювання воно буде враховуватися в моделі у вигляді обурення по каналах лінійної та кутової швидкостей.

Рівняння руху робота класного типу (з різницево-моментним принципом повороту) з урахуванням його динамічних властивостей, що містять фазовий вектор, але без розгляду моменту опору повороту, представлені в таких роботах [94, 218, 242].

Необхідно проаналізувати фактори, що впливають на переміщення робота в теплиці, скласти імітаційну математичну модель динаміки робота і провести перевірку її на адекватність шляхом порівняння отриманих даних з даними реального прототипу.

Положення платформи робота в абсолютній декартовій системі координат  $OXY$  визначається вектором  $\vec{d}$  координат центра мас  $C$  і кутом орієнтації  $\alpha$  (рис. 4.12) [4, 18, 22, 220].

Кінематичні рівняння руху робота в системі координат  $OXY$  мають вигляд:

$$\begin{cases} x = v \cdot \cos \alpha \\ y = v \cdot \sin \alpha \\ \omega = \dot{\alpha} \end{cases} \quad (4.11)$$

де  $v$  – швидкість лінійного переміщення центра мас робота.

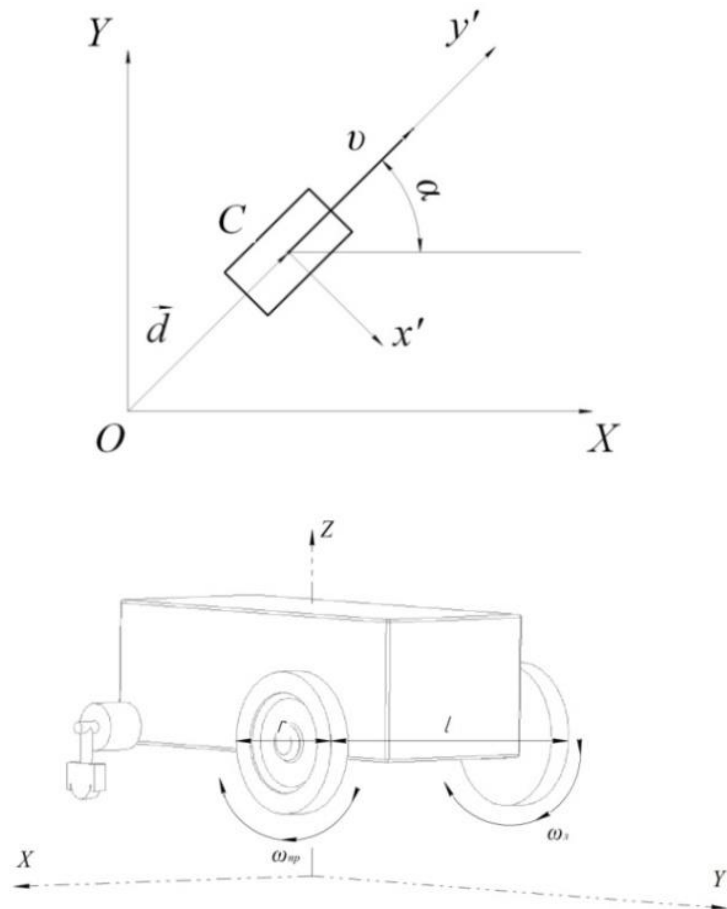


Рис. 4.12. Платформа робота в абсолютній системі координат OXY

За відсутності проковзування швидкість лінійного переміщення центра мас робота  $v$  визначається із співвідношення:

$$v = \frac{\omega_l + \omega_{np}}{2} \cdot r, \quad (4.12)$$

де  $\omega_l$ ,  $\omega_{np}$  – кутові швидкості обертання лівого і правого ведучого колеса,  $r$  – радіус колеса.

Кутова швидкість робота  $\omega$  у свою чергу визначається виразом 3 (вважаємо, що праве колесо є забігаючим, а ліве – відстаючим, в цьому

випадку додатнім напрямом кутової швидкості вважається напрям проти годинникової стрілки):

$$v = \frac{\omega_l + \omega_{np}}{2 \cdot l} \cdot r, \quad (4.13)$$

де  $2 \cdot l$  – колія робота (відстань між колесами робота).

Врахуємо також, що виконавча система робота являє собою два електромеханічних приводи на базі двигунів постійного струму, кожен з яких через редуктор надає руху ведучим лівому і правому колесам, і робот пересувається без проковзування.

Рівняння руху робота колісного типу із різницево-моментним принципом повороту [39, 260] з урахуванням його динамічних властивостей, що містять фазовий вектор  $(v, \omega)$ , враховують неголономний зв'язок [16, 47] та додатковий момент опору повороту, мають вигляд:

$$\begin{cases} m \cdot \dot{v} - m \cdot a \cdot \omega^2 = F_{\partial\theta} - F_{ck} \\ J \cdot \dot{\omega} + m \cdot a \cdot v \cdot \omega = M_{дв} - M_c \end{cases}, \quad (4.14)$$

де  $m$  – маса робота,  $a$  – координата центра маси робота, що лежить на осі симетрії робота відносно початку рухомої системи координат,  $F_{\partial\theta}$  – рушійна сила,  $F_{ck}$  – сила протидії коченню,  $M_{\partial\theta}$  – обертовий момент,  $M_c$  – момент опору повороту,  $J$  – момент інерції робота.

Пов'яжемо рухому систему координат із центром мас робота і використаємо припущення, що рух робота відбувається без проковзування, тоді  $a = 0$ , і система (4.14) набирає такого вигляду:

$$\begin{cases} m \cdot \dot{v} = F_{\partial\theta} - F_{ck} \\ J \cdot \dot{\omega} = M_{дв} - M_c \end{cases} \quad (4.15)$$

Визначаємо  $F_{\partial\epsilon}$  та  $M_{\partial\epsilon}$  із рівняння математичної моделі, що описує зв'язок між струмом, напругою і частотою обертання для двигуна постійного струму:

$$L \frac{dl}{dt} + R \cdot I = U - K_{\omega} \cdot \omega_k \cdot i, \quad (4.16)$$

де  $U$  – напруга живлення (керуюча дія),  $I$  – струм якоря,  $\omega_k$  – кутова швидкість обертання ведучого колеса (рад/с),  $i$  – передатне число редуктора,  $K_{\omega}$  – коефіцієнт проти-ЕРС,  $L, R$  – індуктивність якоря двигуна і його активний опір відповідно.

Із виразів (4.12) та (4.13) визначимо  $\omega_k$  і підставимо його у вираз (4.16). Тоді для лівого ведучого колеса (відстаючого) рівняння (4.16) приводиться до вигляду:

$$L \frac{dl_l}{dt} + R \cdot I_l = U_l - \frac{K_{\omega} \cdot i}{r} \cdot (v \cdot l \cdot \omega), \quad (4.17)$$

а для правого:

$$L \frac{dl_{np}}{dt} + R \cdot I_{np} = U_{np} - \frac{K_{\omega} \cdot i}{r} \cdot (v \cdot l \cdot \omega). \quad (4.18)$$

Прийmemo припущення [39], що зміна моменту як керуючої дії є незначною  $\frac{dI}{dt} = 0$ , і з виразів (4.17) та (4.18) виведемо значення струму для кожного з двигунів:

$$I_l = \frac{U_l}{R} - \frac{K_{\omega} \cdot i}{r \cdot R} \cdot (v \cdot l \cdot \omega), \quad (4.19)$$

$$I_{np} = \frac{U_{np}}{R} - \frac{K_{\omega} \cdot i}{r \cdot R} \cdot (v \cdot l \cdot \omega).$$

Тоді  $F_{\partial \varepsilon} = I_{л} + I_{np} \cdot \frac{K_M \cdot i}{r}$ , а  $M_{\partial \varepsilon} = (I_{np} - I_{л}) \cdot \frac{K_M \cdot i}{r} \cdot l$ , де  $K_M = \frac{M_{\partial \varepsilon}}{I}$  – коефіцієнт пропорційності струму якоря та моменту двигуна. Із урахуванням виразу (4.19) система рівнянь (4.15) набирає вигляду:

$$\begin{cases} \frac{m \cdot r^2 \cdot R}{2 \cdot K_{\omega} \cdot K_M \cdot i^2} \cdot \dot{v} + v = \frac{r}{2 \cdot K_{\omega} \cdot i} \cdot (U_{np} + U_{л}) - \frac{r^2 \cdot R}{2 \cdot K_{\omega} \cdot K_M \cdot i^2} \cdot F_{ск} \\ \frac{1 \cdot r^2 \cdot R}{2 \cdot K_{\omega} \cdot K_M \cdot i^2 \cdot l^2} \cdot \dot{\omega} + \omega = \frac{r}{2 \cdot K_{\omega} \cdot i \cdot l} \cdot (U_{np} - U_{л}) - \frac{r^2 \cdot R}{2 \cdot K_{\omega} \cdot K_M \cdot i^2 \cdot l^2} \cdot M_c \end{cases} \quad (4.20)$$

Вводимо позначення  $2 \cdot l = B$ ,  $T_v = \frac{m \cdot r^2 \cdot R}{2 \cdot K_{\omega} \cdot K_M \cdot i^2}$ ,  $K'_v = \frac{r}{2 \cdot K_{\omega} \cdot i}$ ,  $T_{\Omega} = \frac{2 \cdot J \cdot r^2 \cdot R}{K_{\omega} \cdot K_M \cdot i^2 \cdot B^2}$ ,  $K'_{\Omega} = \frac{r}{K_{\omega} \cdot i \cdot B}$ ,  $K_{fv} = \frac{r^2 \cdot R}{2 \cdot K_{\omega} \cdot K_M \cdot i^2}$ ,  $K_{f\Omega} = \frac{2 \cdot r^2 \cdot R}{2 \cdot K_M \cdot i^2 \cdot B^2}$ . Із врахуванням зазначеного систему рівнянь (4.20) можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} T_v \cdot \dot{v} + v = K'_v \cdot (U_{np} + U_{л}) - K_{fv} \cdot F_{ск} \\ T_{\Omega} \cdot \dot{\omega} + \omega = K'_{\Omega} \cdot (U_{np} - U_{л}) - K_{f\Omega} \cdot M_c \end{cases} \quad (4.21)$$

Керуючі напруги  $U_{np}$  та  $U_{л}$ , що подаються на приводи ведучих коліс (правого та лівого відповідно), формуються як:

$$\begin{cases} U_{np} = U_{лін} + U_{\omega} \\ U_{л} = U_{лін} - U_{\omega} \end{cases}, \quad (4.22)$$

де  $U_{лін}$  – напруга, що забезпечує лінійну швидкість переміщення робота,  $U_{\omega}$  – напруга, що керує кутовою швидкістю руху робота.

Враховуючи (4.22), система (4.21) набирає вигляду:



$$\begin{cases} T_v \cdot \dot{v} + v = K_v \cdot U_{\text{ліні}} - K_{fv} \cdot F_{\text{ск}} \\ T_{\Omega} \cdot \dot{\omega} + \omega = K_{\Omega} \cdot U_{\omega} - K_{f\Omega} \cdot M_c, \end{cases} \quad (4.23)$$

де  $K_v = 2 \cdot K'_v$ ,  $K_{\Omega} = 2 \cdot K'_{\Omega}$ .

В отриманій системі рівнянь силу опору коченню  $F_{\text{ск}}$  і момент опору повороту  $M_c$  можна розглядати як збурюючі дії, а коефіцієнти  $K_{fv}$  та  $K_{f\Omega}$  як коефіцієнти передачі щодо збурюючої дії [3].

Сила опору коченню визначається як:

$$F_{\text{ск}} = f \cdot m \cdot g, \quad (4.24)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя кочення,  $g$  – прискорення вільного падіння. У більшості випадків під час моделювання руху робота значенням сили опору коченню можна знехтувати через малі значення  $f$  та  $K_{fv}$ .

Під час виконання маневрів для об'їзду перешкод в умовах обмеженого простору більш істотний вплив має збурююча дія  $M_c$  (особливо під час руху робота по нелінійних траєкторіях). Для роботів з неповоротними ведучими колесами використовують вираз для гусеничних платформ [8]:

$$M_c = \frac{\mu \cdot m \cdot g \cdot L}{4}, \quad (4.25)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт опору повороту, що залежить від радіуса повороту,  $L$  – довжина сліду колеса.

Коефіцієнт опору повороту  $\mu$  розраховується за емпіричною формулою, яку отримав О. О. Нікітін, ґрунтуючись на великій кількості дослідів [208]:

$$\mu = \frac{\mu_{\text{max}}}{c + (1 - c) \cdot \frac{R_n}{2 \cdot l}}, \quad (4.26)$$

де  $R_{\Pi}$  – радіус повороту для забігаючого колеса;  $c$  – емпіричний коефіцієнт, що приймається в розрахунках рівним в середньому 0,85;  $\mu_{max}$  – максимальний коефіцієнт опору повороту, що залежить від властивостей поверхні.

Із збільшенням радіуса повороту  $R_{\Pi}$  момент опору повороту значно зменшується, про що свідчить вираз (4.25). Таким чином отримано опис основних сил і моментів, що впливають на рух платформи робота.

Замінюючи у виразі (4.23) похідні оператором Лапласа  $s$  та враховуючи характер впливу  $F_{cx}$  та  $M_c$ , математичну модель динаміки руху платформи робота можна виразити у вигляді імітаційної моделі (рис. 4.13), що виконана в середовищі Matlab Simulink [126, 127].

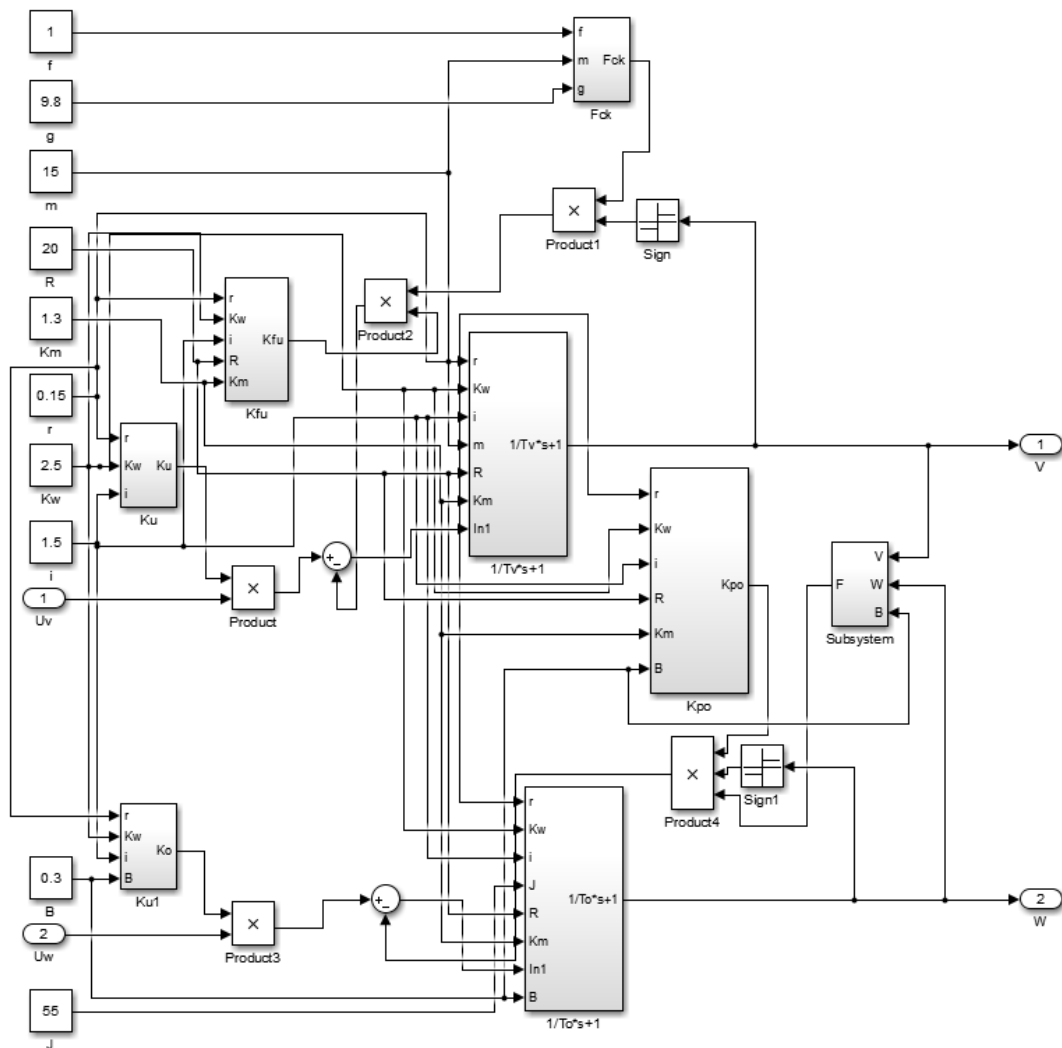


Рис. 4.13. Імітаційна модель динаміки руху робота

Модель динаміки руху є двоканальною лінійною (канал лінійної швидкості та канал кутової швидкості) з нелінійною залежністю збурення (моменту опору повороту), що діє для каналу кутової швидкості. Коефіцієнти моделі відповідають реальним виміряним показникам робота, а їх позначення – позначенням у виразах (4.19, 4.20, 4.22, 4.23).

Для оцінки якості керування використаємо час перехідного процесу  $t_{н.л.}$  і перерегулювання  $\sigma$ . Для вибору типу регулятора та його налаштувань можуть бути використані різноманітні алгоритми із визначенням критеріїв максимальної стійкості, інтегральної квадратичної якості тощо.

Для отримання заданого характеру перехідного процесу в каналі керування кутовою швидкістю обрано ПІ-закон керування. Тоді структурну схему цифрової керуючої підсистеми виконавчого рівня можна представити на (рис. 4.14). На рисунку представлено підключення імітаційної моделі динаміки руху до цифрових ПІ-регуляторів лінійної та кутової швидкостей відповідно і зворотні зв'язки за допомогою передатних функцій інкрементальних енкодерів.

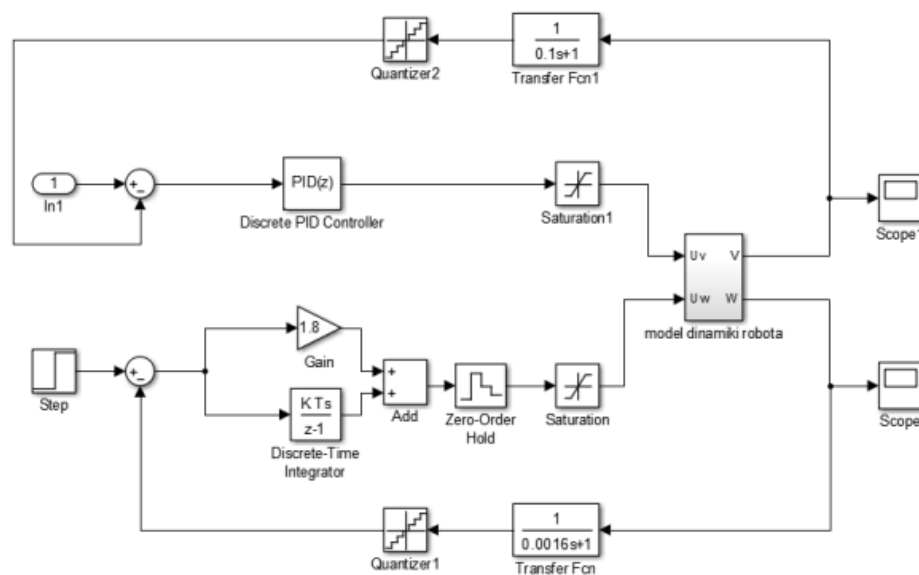


Рис. 4.14. Імітаційна модель цифрової підсистеми керування виконавчого рівня, виконана в середовищі Matlab Simulink

На (рис. 4.15) та (рис. 4.16) представлено графіки перехідного процесу для каналу керування кутовою швидкістю при зміні керуючої дії для подолання  $M_c$ , який визначається за виразом (4.23).

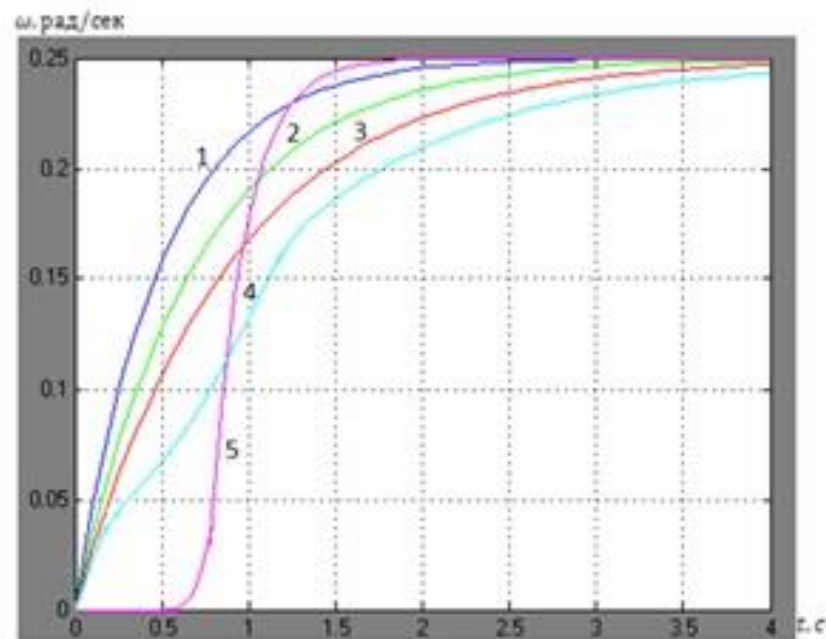


Рис. 4.15. Перехідний процес для каналу керування кутовою швидкістю повороту при різних лінійних швидкостях руху центра мас робота

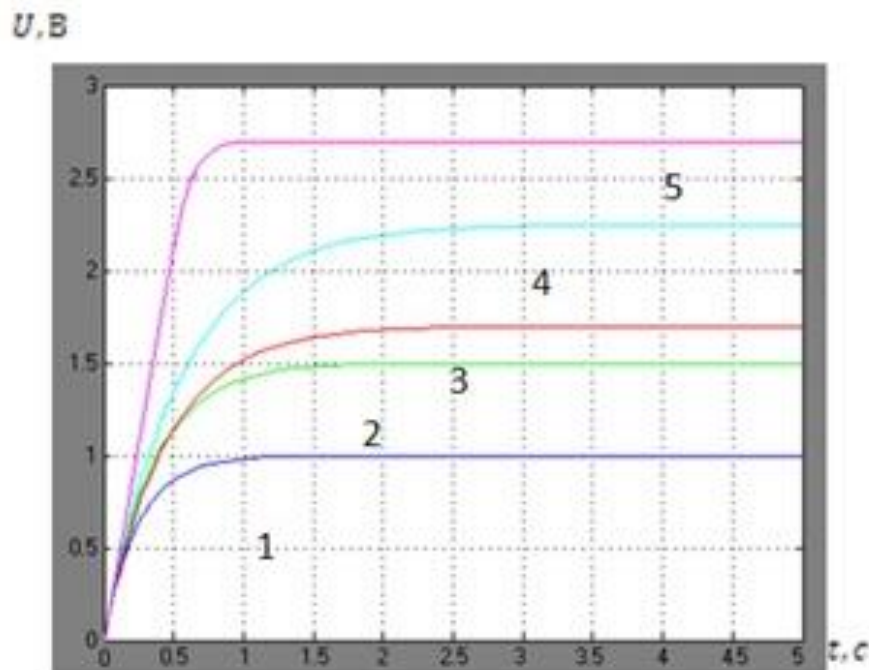


Рис. 4.16. Керуюча дія для каналу керування кутовою швидкістю повороту робота при різних лінійних швидкостях руху центра мас робота (1.  $v=0.5$  м/с (радіус повороту – 1.3 м), 2.  $v=0.25$  м/с (радіус повороту – 0.8 м), 3.  $v=0.1$  м/с (радіус повороту – 0.4 м), 4.  $v=0.05$  м/с (радіус повороту – 0.2 м), 5.  $v=0$  м/с, (розворот))

З наведеного графіка видно, що час перехідного процесу при зміні радіуса повороту змінюється несуттєво. Але зі зменшенням радіуса повороту або зі збільшенням лінійної швидкості (графіки 1-3) виникає відхилення перехідного процесу від бажаного, що викликано необхідністю подолання моменту опору повороту. Для радіуса розвороту менше ніж 0.2 м (графік 4) характерним є виникнення точки перегину, після якої перехідний процес відповідає бажаному. Під час розвороту на місці (графік 5), коли момент опору повороту досягає піку, спостерігається запізнення перехідного процесу, після якого – швидкий вихід на задане значення кутової швидкості.

З (рис. 4.15) 5 (1.  $v=0.5$  м/с (радіус повороту – 1.3 м), 2.  $v=0.25$  м/с (радіус повороту – 0.8 м), 3.  $v=0.1$  м/с (радіус повороту – 0.4 м), 4.  $v=0.05$  м/с (радіус повороту – 0.2 м), 5.  $v=0$  м/с, (розворот) бачимо накопичення лінійної складової сигналу керування швидкістю до точки, поки не подолано момент опору повороту (графік 5 – прямий відрізок). Коли момент опору подолано, графік зміни керуючої дії стає близьким до бажаного, як і у випадках 1-4.

Для подальшого використання побудованої моделі у створенні програмного забезпечення робота необхідно провести перевірку її на адекватність. При цьому необхідно порівняти результати розрахунку за моделлю та експериментальні виміри кутової швидкості робота під час його руху на реальній поверхні. Оскільки зміна кутової швидкості залежить від режиму руху робота, необхідно випробувати модель як мінімум у двох режимах: при значенні  $v=0.5$  м/с (радіус повороту – 1.3 м), що є основним режимом руху під час переміщення у теплиці за відсутності перешкод, та при значенні  $v=0$  м/с – розворот робота на місці при появі перешкоди попереду.

Для вимірювання швидкості обертання коліс робота використані інкрементальні енкодери, що фіксують зміну положення колеса відносно зафіксованого датчика (рис. 4.17).

Вимірявши реальну зміну кутової швидкості робота в часі, у двох режимах лінійної швидкості порівнюємо отримані значення із відповідними значеннями, отриманими шляхом розрахунку за моделлю (табл. 4.2).

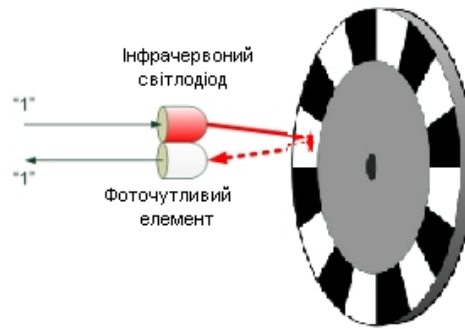


Рис. 4.17. Вимірювання кутової швидкості за допомогою інкрементального енкодера

Таблиця 4.2. Порівняння значень кутової швидкості робота, отриманої експериментально та за моделлю

Час вимірювання, с.	Перший дослід (при $v=0.5$ м/с)		Другий дослід (при $v=0$ м/с)	
	Експериментальні дані, рад/с	Дані за моделлю, рад/с	Експериментальні дані, рад/с	Дані за моделлю, рад/с
0	0	0	0	0
0.13	0.027	0.0295	0	0
0.325	0.064	0.695	0	0
0.525	0.095	0.102	0.035	0.03
0.725	0.121	0.129	0.170	0.159
0.925	0.142	0.152	0.219	0.208
1.125	0.16	0.168	0.244	0.238
1.325	0.175	0.183	0.246	0.240
1.525	0.188	0.195	0.248	0.246
1.725	0.198	0.205	0.249	0.249
...	...	...	...	...
6.54	0.25	0.25	0.25	0.25

Ґрунтуючись на даних таблиці, можна побудувати графіки зміни кутової швидкості у часі (рис. 4.18).

Для оцінки адекватності розробленої математичної моделі застосовані такі показники:

- середнє значення всіх вимірів у досліді [208]:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=15}^{20} Y_i}{n}, \quad (4.27)$$

де  $n$  – кількість спостережень;  $i$  – номер спостереження;  $Y$  – дисперсія відтворення:

$$S_{vid} = \frac{\sum_{i=15}^{20} (Y_i - \bar{Y})^2}{n_0 - 1}, \quad (4.28)$$

де  $n-1$  – число ступенів вільності, що дорівнює кількості дослідів мінус одиниця.

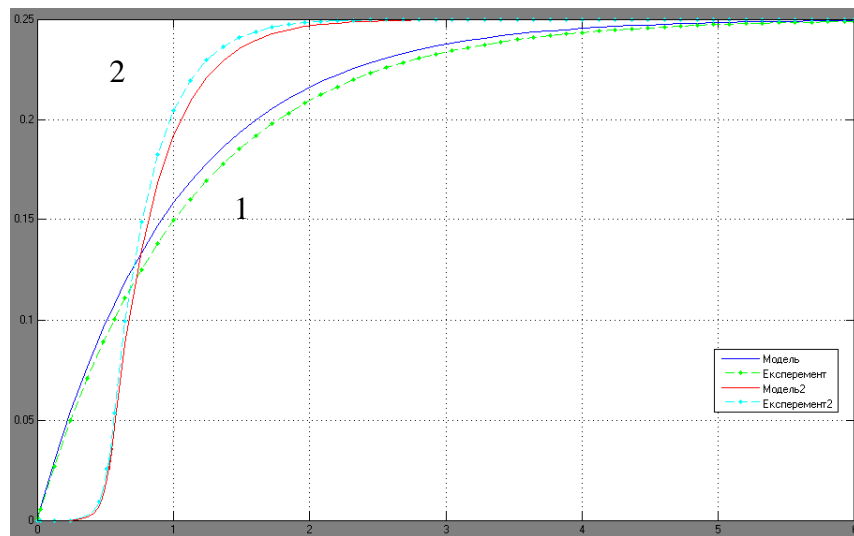


Рис. 4.18. Порівняння результатів розрахунків кутової швидкості за моделлю та експериментальних даних у двох режимах: 1)  $v=0.5$  м/с (радіус повороту – 1.3 м); 2)  $v=0$  м/с (розворот).

У розрахунках величину довірчої ймовірності приймали  $P = 0.95$ , відповідає помилка в межах  $\pm 3S$ . Розроблену математичну модель перевіряли на адекватність за критерієм Фішера, для цього визначали дисперсію адекватності:

$$S_{Ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_{iE} - Y_T)^2}{f}, \quad (4.29)$$

де  $f$  – число ступенів вільності дисперсії адекватності;  $\bar{Y}_{ie}$  – середнє значення відгуку в  $i$ -му досліді;  $Y_T$  – значення відгуку в  $i$ -й точці, обчислене за моделлю.

Проведемо розрахунок значення критерію Фішера за виразом:

$$F = S_{ad}^2 / S_{vid}^2 \quad (4.30)$$

Розраховане за виразом (4.30) значення критерію Фішера менше критичного  $F_p < F_m = 5$ , що говорить про адекватність моделі. Похибка моделі становить не більше ніж 5% від загального показника кутової швидкості робота.

#### **4.4. Переміщення та орієнтація мобільного робота фітомоніторингу в теплиці**

##### **4.4.1. Багатокритеріальний синтез маршрутів переміщення мобільного робота з розпізнаванням перешкод**

Розробка нових засобів та систем у робототехніці ставить підвищені вимоги до мобільності пересування роботів під час виконання ними різноманітних завдань. Підвищення ефективності їх пересування може бути досягнуто за допомогою використання спеціальних методів розпізнавання перешкод, які необхідно враховувати під час визначення оптимальних маршрутів руху мобільних роботів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що існуючим методам синтезу маршрутів властиві такі основні недоліки: низький рівень точності розпізнавання перешкод в умовах динамічної невизначеності, відсутність можливостей одночасного врахування різних видів перешкод, значні витрати на створення та застосування обладнання [23, 233]. Одним із напрямків усунення зазначених недоліків є широке застосування нейронних мереж для визначення перешкод та методів оптимізації маршрутів руху



мобільних роботів. Однак у зв'язку з великими обсягами початкових даних і відсутністю ефективних інженерних методик вирішення даного завдання виникає необхідність у проведенні цілеспрямованих досліджень в цьому напрямку.

Під час пошуку оптимальних маршрутів мобільних роботів необхідно враховувати, що пересування робота перебуває під впливом конфліктного середовища. Під конфліктним середовищем будемо розуміти сукупність різноманітних предметів (рухомих та нерухомих), розташованих в зоні пошуку, наближення мобільного робота до яких небажано [280]. Предмети, що складають конфліктне середовище, будемо називати конфліктуючими. Як правило, конфліктне середовище складається з конфліктуючих предметів (перешкод), наявність яких в зоні пошуку оптимальної траєкторії зумовлена процесами, не пов'язаними з проходженням через цю зону мобільного робота. Конфліктуючі предмети даного класу будемо називати пасивними. Однак інколи, під час розв'язання деяких специфічних задач синтезу компромісно-оптимальних траєкторій, доводиться мати справу з конфліктуючими іншими мобільними роботами, що також перебувають та рухаються в зоні пошуку для просування мобільного робота до кінцевої цільової точки. Конфліктуючі предмети цього класу будемо називати активними.

Таким чином, для правильного розв'язання задачі синтезу компромісно-оптимальних маршрутів пересування роботів, що рухаються у конфліктному середовищі, необхідно, щоб методика розрахунку цих маршрутів давала змогу врахувати вид перешкод та на підставі його властивостей кількісно оцінити вплив конфліктного середовища на траєкторію пересування мобільного робота.

Розпізнавання перешкод включає у себе ряд кроків [280]:

- сприйняття образу (технічне вимірювання);
- попереднє опрацювання отриманого сигналу (фільтрація);
- виділення потрібних характеристик (індексація);

- класифікація перешкоди та прийняття рішення.

Стосовно першого кроку, то для сприйняття образу можна використати сприймаючий елемент HiTechnic. Він може працювати у трьох режимах: відрізняти шість кольорів чи розподіляти сприйнятий колір на три кольори режиму RGB (червоний, зелений, синій); фіксувати зовнішнє освітлення і видавати результат в умовних одиницях; фіксувати відбите світло, створене власним випромінювачем і видавати результат в умовних одиницях. Для попереднього опрацювання (фільтрації) вхідних образів доцільно використати математичний апарат вейвлет-аналізу, представленого в Розділі 2, який базується на використанні вейвлетів, що являють собою математичні функції та дають змогу аналізувати різні частотні компоненти [280]. У загальному випадку такий аналіз відбувається в площині: вейвлет-коефіцієнт–час–рівень. Самі вейвлет-коефіцієнти визначаються інтегральним перетворенням сигналу. Отримані вейвлет-спектрограми принципово відрізняються від рядів Фур'є тим, що дають чітку прив'язку спектра особливостей сигналу до часу.

Третій та четвертий кроки розпізнавання образів, як правило, об'єднуються у системі розпізнавання образів (СРО), яка і є головним елементом такого інтелектуального комплексу. Алгоритм синтезу СРО є достатньо відпрацьованим: отримання тренувальної вибірки; вибір способу представлення даних та значимих характеристик; розробка класифікуючого критерію; навчання СРО; перевірка якості роботи із можливістю повернення до кроку 2 (або навіть і 1); оптимізація СРО [219, 253].

Як відомо, протягом дослідження проблем розпізнавання образів виокремились два основні підходи – детерміністичний і статистичний. Перший включає в себе математичні формалізовані емпіричні та евристичні методи, другий базується на фундаментальних результатах математичної статистики [20]. Однак під час практичної реалізації відповідних інтелектуальних систем строго розподілити їх досить складно, а інколи і неможливо.

До проміжного класу СРО можна віднести і нейронні мережі. Традиційна для такого підходу щодо вирішення завдань розпізнавання образів нейромережева архітектура – багатошаровий персептрон. Враховуючи налагодженість програмних засобів та здатність до адаптивного підлаштування в умовах динамічної розмитості технологічної інформації, саме цей математичний апарат доцільно використовувати для створення СРО [198].

Після визначення виду перешкоди вирішується задача синтезу компромісно-оптимальних траєкторій мобільного об'єкта в конфліктному середовищі. Для розв'язання даної задачі запропоновано метод багатокритеріального динамічного програмування, суть якого полягає в такому [96].

Відправна задача приводиться до дискретного виду. Для цього область простору станів, що нас цікавить, накривається  $n$ -арною мережею  $N^{(1)} \times N^{(2)} \times \dots \times N^{(n)}$ , при цьому вважається, що зображуючі точки можуть переміщуватися тільки з одного вузла цієї мережі до іншого. Вузли мережі, розташовані в заборонених областях, будемо називати забороненими точками. Шукана траєкторія не може проходити через ці точки за жодних обставин.

У вузлах мережі, розташованих безпосередньо близько від конфліктуючих предметів та меж заборонених зон (в тому випадку, якщо наближення до заборонених зон небажано), розміщують  $(y^*, x^*)$  – точки-носії потенціалу небезпеки. Усі інші вузли мережі є точками допустимої області, в якій і виконується пошук оптимальної траєкторії.

Для кількісної оцінки небезпеки наближення «свого» об'єкта до конфліктуючих предметів застосовується метод потенційних функцій [96]. В якості потенційної функції обрана функція такого виду:

$$P(\rho) = K \cdot e^{-\alpha\rho}, \quad (4.31)$$

де  $\rho = \sqrt{(x - x^*)^2 + (y - y^*)^2}$ ;  $(x^*, y^*)$  – координати точок-носіїв потенціалу небезпеки (пасивних конфліктуючих предметів);  $(x, y)$  – координати мобільного об'єкта;  $\alpha$  та  $K$  – позитивні коефіцієнти, що визначають ступінь небезпеки наближення до тих або інших конфліктуючих предметів (задаються евристично). Далі для кожної точки з допустимої області визначається сумарний потенціал близькості до конфліктуючих предметів.

Довжина шляху характеризується довжиною переходу з рівня  $j-1$  по координаті  $y$  на рівень  $j$ . При цьому вважається, що «свій» об'єкт, перебуваючи в одній із допустимих точок на  $j-1$ -му рівні мережі, може переходити лише в одну з допустимих точок на  $j$ -му рівні.

Довжина переходу визначається за формулою:

$$l_{j-1,i}^{j,m} = \sqrt{(x_m - x_i)^2 + (y_j - y_{j-1})^2}, \quad (4.32)$$

де  $(x_i, y_{j-1})$  – координати мобільного об'єкта на  $j-1$ -му рівні мережі;  $(x_m, y_j)$  – координати допустимої точки на  $j$ -му рівні мережі.

Враховуючи те, що критерій, який оцінює небезпеку від зближення «свого» та «чужого» об'єктів, повинен мінімізуватися, вибрана функція  $\psi = \psi(R_{\min})$ , яка спадає при зростанні відстані між ними:

$$\psi = \exp(\mu R_{\min}), \quad (4.33)$$

де  $\mu$  – позитивний коефіцієнт;  $R_{\min}$  – відстань між об'єктами (методика розрахунку  $R_{\min}$  наведена в [96]).

Задача синтезу оптимальної траєкторії руху в заданих умовах розв'язується методом динамічного програмування з узагальненим критерієм

оптимальності за нелінійною схемою компромісів. При цьому для визначення оптимального шляху в кожному  $m$ -у допустимому точці по координаті  $x$   $j$ -го рівня по  $y$  на кожному кроці розв'язується функціональне рівняння Беллмана:

$$\Phi(j, m) = \min_{i \in I_{j-1}} [\Delta\Phi_{j-1,i}^{j,m} + \Phi(j-1, i)], \quad j \in [1, J], \quad (4.34)$$

з граничною умовою  $\Phi(0, s) = 0$ , де  $j$  – кількість рівнів переходу по координаті  $y$  на мережі;  $I_{j-1}$  – кількість допустимих точок на  $j-1$ -му рівні мережі;  $s$  – номер початкової точки по координаті  $x$  на нульовому рівні мережі;  $\Phi(j, m)$  – сумарні втрати по узагальненому критерію оптимальності під час переходу з початкової точки  $(0, s)$  в точку  $(j, m)$  мережі;  $\Delta\Phi_{j-1,i}^{j,m}$  – прирощення узагальненого критерію під час переходу з точки  $(j-1, i)$  в точку  $(j, m)$  мережі.

В узагальнений критерій якості входять три приватних критерії. Перший кількісно визначає ступінь небезпеки наближення до конфліктуючих предметів. Другий характеризує довжину переходу з точки  $(j-1, i)$  в точку  $(j, m)$  мережі. Третій приватний критерій визначає ступінь небезпеки наближення до рухомого «чужого» об'єкта під час переходу з точки  $(j-1, i)$  в точку  $(j, m)$  мережі.

Структура узагальненого критерію будується відповідно до методології нелінійної схеми компромісів та визначається виразом [96]:

$$\Delta\Phi_{j-1,i}^{j,m} = \frac{P_{\max}}{P_{\max} - P_{j,m}} + \frac{l_{\max}}{l_{\max} - l_{j-1,i}^{j,m}} + \frac{\psi_{\max}}{\psi_{\max} - \psi_{j-1,i}^{j,m}}. \quad (4.35)$$

В якості оптимальної на рівні  $j$  вибирається така допустима точка даного рівня, якій відповідає мінімум сумарних втрат за узагальненим критерієм оптимальності.

Для розв'язання задачі синтезу компромісно-оптимальних траєкторій мобільного об'єкта в конфліктному середовищі, що складається з активних конфліктуючих предметів (активне конфліктне середовище), пропонується також застосувати метод багатокритеріального динамічного програмування. Основна складність під час розв'язання задач з активними конфліктуючими предметами – це кількісна оцінка ступеня небезпеки наближення до них, яка визначається, як вже було сказано вище, значеннями коефіцієнтів  $K$  та  $\alpha$  у виразі (4.31). Існують різні підходи до вирішення даної проблеми. Так, наприклад, для з'ясування значень коефіцієнтів  $K$  та  $\alpha$  може бути використаний метод експертних оцінок. Згідно з цим методом група експертів у галузі, для якої виконується даний розрахунок, з'ясовує значення коефіцієнтів на підставі власного досвіду та наявної об'єктивної інформації про активні конфліктуючі предмети. Але даний підхід досить суб'єктивний. З нашої точки зору більш ефективно зв'язати математичними виразами значення коефіцієнтів  $K$  та  $\alpha$  з характеристиками, притаманними даним активним конфліктуючим предметам. При цьому ступінь небезпеки наближення мобільного об'єкта до активних конфліктуючих предметів функціонально залежатиме від конкретних типів предметів, що застосовуються. Іншими словами, чим більш високі характеристики має даний тип активних конфліктуючих предметів, тим більш високий ступінь небезпеки він створює для мобільного об'єкта.

Для вирішення завдання щодо орієнтування інтелектуального МРФ у просторі теплиці з урахуванням імовірних перешкод використаємо теорію імовірнісних автоматів та стимулюючого навчання, що дає змогу мобільному роботу самостійно пересуватись у просторі блочної теплиці, оминаючи перешкоди.

#### **4.4.2. Орієнтація мобільного робота фітомоніторингу в теплиці**

Питання щодо керування роботами розглядається в рамках так званої інтелектуальної робототехніки. Саме поняття є сьогодні не цілком визначеним. Більшість визначень інтелектуального робота зводяться до переліку інтелектуальних властивостей, якими він повинен володіти («зір», «слух», «планування» і т.д., аж до вказівки конкретних механізмів штучного інтелекту). Менш формальним визначенням є здатність системи вирішувати завдання, сформульовані в загальному вигляді [143, 144].

Оскільки теплиця є зоною роботи не тільки робота, але й людей, що обслуговують її та доглядають за рослинами, роботу недостатньо пересуватись лише по визначеному маршруту, заданому оператором. Він повинен шляхом накопичення досвіду вчитись оминати перешкоди на своєму шляху, брати до уваги імовірність тієї чи іншої події та відповідно вибудовувати свій маршрут згідно з цими прогнозами.

Тому, коли є необхідність проектування системи керування роботом, що буде переміщуватись у середовищі зі змінними параметрами та ймовірністю виникнення перешкод і пересуванням людей [150, 294], недостатньо користуватись простими методами керування.

Для побудови керуючих імовірнісних автоматів використовуються методи, які оцінюють реакцію автомата і певним чином перерозподіляють ймовірності, пов'язані з даною реакцією. У загальному випадку це зводиться до перевірки певної умови, на підставі чого робиться висновок про те, була реакція гарною чи поганою. При цьому результуючий автомат буде більшою мірою дотримуватись бажаної стратегії, оскільки алгоритм навчання не враховує, що «добра» реакція на даному кроці може призвести до поганого результату на наступних кроках.

Очевидно, що цю проблему можна вирішити за допомогою використання більш потужних алгоритмів, наприклад, машинного навчання. Однак ці алгоритми не пристосовані для роботи безпосередньо з імовірнісним автоматом. Тому пропонується підхід, заснований на використанні алгоритмів стимулюючого навчання [149, 196].

Мобільний робот взаємодіє з навколишнім середовищем, робить певні дії. Середовище реагує на дії робота і певним чином стимулює або карає його. Для того, щоб робот зміг вибрати правильну тактику поведінки, йому слід стежити за стимулами (покараннями) від навколишнього середовища. Такий вид навчання називається стимулюючим (рис. 4.19).



Рис. 4.19. Цикл навчання

Поведінка робота щодо означеної задачі характеризується:  $S$  – множина станів, у яких може перебувати мобільний робот;  $A$  – множина доступних роботу дій;  $t$  – дискретний крок за часом. На кожному кроці робот розпізнає поточний стан  $s_t \in S$  і вибирає дію  $a_t \in A$ , після цього навколишнє середовище повертає мобільному роботу стимул  $r_t = (s_t, a_t)$  і переносить його в новий стан  $s_{t+1} = \delta(s_t, a_t)$ .

Для розглянутого випадку функції  $\delta$  і  $r$  є частиною навколишнього середовища і роботу невідомі. Також розглядаються лише кінцеві множини  $S$  і  $A$ .



Завдання робота полягає в тому, щоб знайти оптимальну стратегію вибору наступної дії щодо поточного стану  $\pi: S \rightarrow A$ . Для оцінки оптимальності знайдених стратегій використовуються різні моделі, але на практиці перевага віддається моделі нескінченного горизонту. Відповідно до цієї моделі, оптимальною називається стратегія, що максимізує стимул робота у відповідності [196]:

$$V^\pi(s_t) \equiv r_t + \gamma r_{t+1} + \gamma^2 r_{t+2} + \dots \equiv \sum_{i=0}^{\infty} \gamma^i r_{t+i}, \quad (4.36)$$

де  $0 \leq \gamma \leq 1$  – деяка константа, яка дає змогу більшою мірою враховувати нагороду, отриману від навколишнього середовища тут і зараз, ніж в найближчому майбутньому. Це справедливо для більшості реальних завдань, оскільки чим раніше робот отримає нагороду, тим краще. Нагорода, яку робот теоретично має отримати через двадцять кроків, може і не дістатися йому, якщо у нього в запасі залишилося всього десять кроків.

Оптимальну стратегію поведінки робота виразимо таким співвідношенням:

$$\pi^* \equiv \arg_{\pi} \max V^\pi(s), \quad (\forall s). \quad (4.37)$$

Для зручності позначимо  $V^*(s)$  функцію прибутку, що відповідає оптимальній стратегії. Тоді попередню тотожність (4.37) запишемо у вигляді:

$$\pi^*(s) \equiv \arg_{\pi} \max [r(s, a) + \gamma V^*(\vartheta(s, a))]. \quad (4.38)$$

Головне завдання робота – знайти оптимальну стратегію  $\pi^*$ . Однак безпосередньо обчислити функцію  $\pi: S \rightarrow A$  йому досить важко, адже вся інформація, доступна роботу, – це послідовність заохочень від навколишнього середовища  $r(s_i, a_i)$ , де  $i = 0, 1, 2, \dots$

Цю проблему можна обійти за допомогою введення так званої  $Q$ -функції:

$$Q(s, a) \equiv r(s, a) + \gamma V^*(\vartheta(s, a)). \quad (4.39)$$

Вираз (4.39) для кожної пари стан-дія  $(s, a)$  повертає максимальний стимул, який отримає робот, якщо перебуваючи в стані  $s$ , вибере дію  $a$ . Цю тотожність для оптимальної стратегії можна переписати у вигляді:

$$\pi^*(s) \equiv \arg \pi \max Q(s, a). \quad (4.40)$$

Ця формула показує, що для знаходження оптимальної стратегії роботу замість функції  $V^*$  достатньо обчислити функцію  $Q$ .  $Q$ -функція дає змогу вибрати оптимальну дію для поточного стану без будь-яких знань про функції  $\delta$  і  $r$ .

Таким чином, для одержання оптимальної стратегії потрібно знайти значення  $Q$ -функції, яка обчислюється безпосередньо через взаємодію робота з навколишнім середовищем (через послідовність  $r(s_i, a_i)$ , де  $i = 0, 1, 2, \dots$ ).

Основним завданням робота є максимізація стимулу, тому він частіше використовує найкращі із знайдених стратегій. Таким чином, кращі стратегії стабілізуються, а отримані значення  $Q$ -функції використовуються під час пошуку більш вигідних стратегій. При цьому робот не повинен дотримуватись стратегії локального максимуму, інакше він не зможе вибратися із знайденого на перших кроках навчання алгоритму. Щоб цього уникнути, роботу слід час від часу вибрати не найкращі на поточний момент дії. З іншого боку, займатися тільки пошуком нових стратегій роботу теж не можна, оскільки при цьому значно зросте час навчання. Тому алгоритм шукає компроміс між використанням знайдених стратегій і дослідженням нових. Наприкінці процесу навчання, коли роботу вже

доступна певна інформація, на основі якої він може робити вибір на користь тієї чи іншої дії, можливе переведення внутрішньої моделі навчання в автоматну.

Внутрішньою моделлю для даного методу є  $Q$ -функція, яка показує потенційний стимул робота для всіх пар стан-дія. На основі цієї моделі для кожного стану робота логічно зіставити ймовірності переходів вихідного автомата з кожною із можливих дій робота пропорційно очікуваному прибутку для цієї дії. Таким чином, перебуваючи в стані  $s_i$ , робот повинен вибирати дію  $a_j$  ( $0 \leq j \leq n_{ij}$ ) з імовірністю [196]:

$$p_j = \frac{R(s_i, a_j)}{\sum_{k=0}^{n_i} R(s_i, a_k)}, \quad (4.41)$$

де  $n_i$  – число доступних робота дій у стані  $s_i$  (при цьому  $a_0$  означає, що робот не виконує жодних дій і залишається в поточному стані),

$$R(s_i, a_k) = \begin{cases} Q(s_i, a_k) & \text{при } Q(s_i, a_k) \geq 0 \\ 0 & \text{при } Q(s_i, a_k) < 0 \end{cases}. \quad (4.42)$$

Вираз (4.42) задає нульові ймовірності діям з від'ємним значенням  $Q$ -функції. Таким чином, виключається можливість здійснення роботом заздалегідь не вигідної для нього дії. Прикладом заздалегідь не вигідної дії може бути спроба мобільного робота вчинити дію «йти вперед», коли перед ним стоїть стіна. У цьому випадку робот залишається на місці і отримує негативне число при «неправильній» дії. За традиційного підходу, коли робот дотримується оптимальної стратегії  $\pi^*$ , така дія виключається в силу того, що потенційний стимул для нього буде в будь-якому випадку менше, ніж для будь-якої осмисленої дії.

З метою реалізації алгоритму враховано деякі умови для його успішного виконання [196]:

- мобільний робот рухається в просторі теплиці та повинен пройти під час свого руху певні контрольні точки, що задаються оператором перед запуском робота;
- оскільки робот під час руху між рядами рослин перебуває на направляючих, кількість його дій в цей момент обмежена рухом вперед чи назад;
- заїзд на направляючі здійснюється за допомогою кольорової розмітки, нанесеної на підлогу теплиці (рис. 4.20);

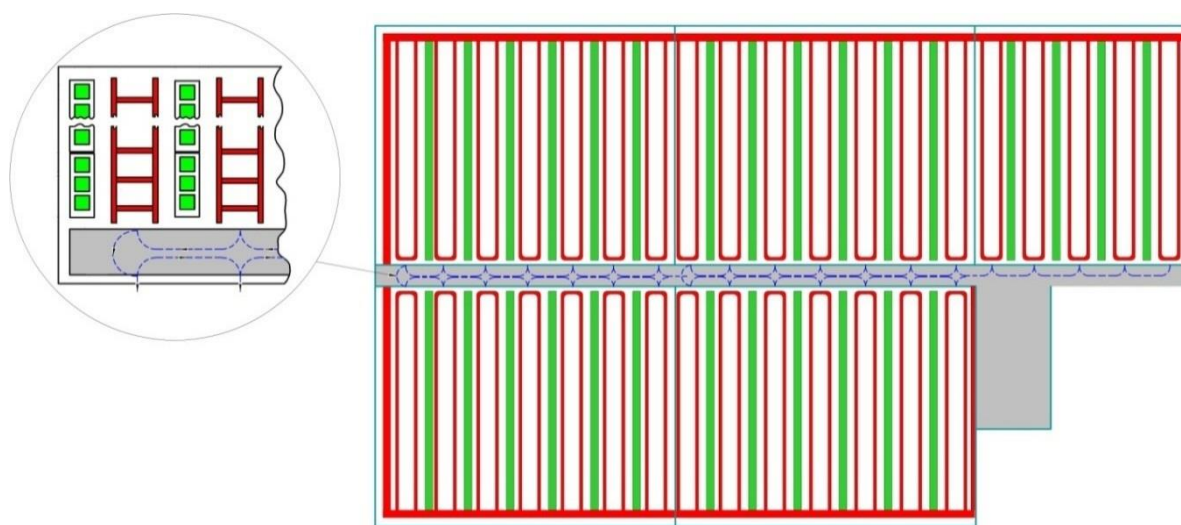


Рис. 4.20. Візуальний план теплиці та розмітка для спрощення орієнтування робота

- за наявності перешкоди на маршруті робот визначає її ультразвуковим датчиком, якщо є можливість перешкоду обминути – здійснюється маневрування, якщо дістатись до певної цілі неможливо, робот подає звуковий сигнал, відправляє повідомлення оператору і переходить до наступної цілі.
- для спрощення орієнтування робота умовно простір теплиці розбито на сектори; зміну сектора робот відстежує за допомогою кольорових міток на горщиках рослин.

Для демонстрації роботи алгоритму розраховується рух робота по лівому блоку теплиці (рис. 4.21). На рисунку червоним показано клітинки, на які робот не може заїхати, зеленим – клітинки-цілі, які визначені оператором.

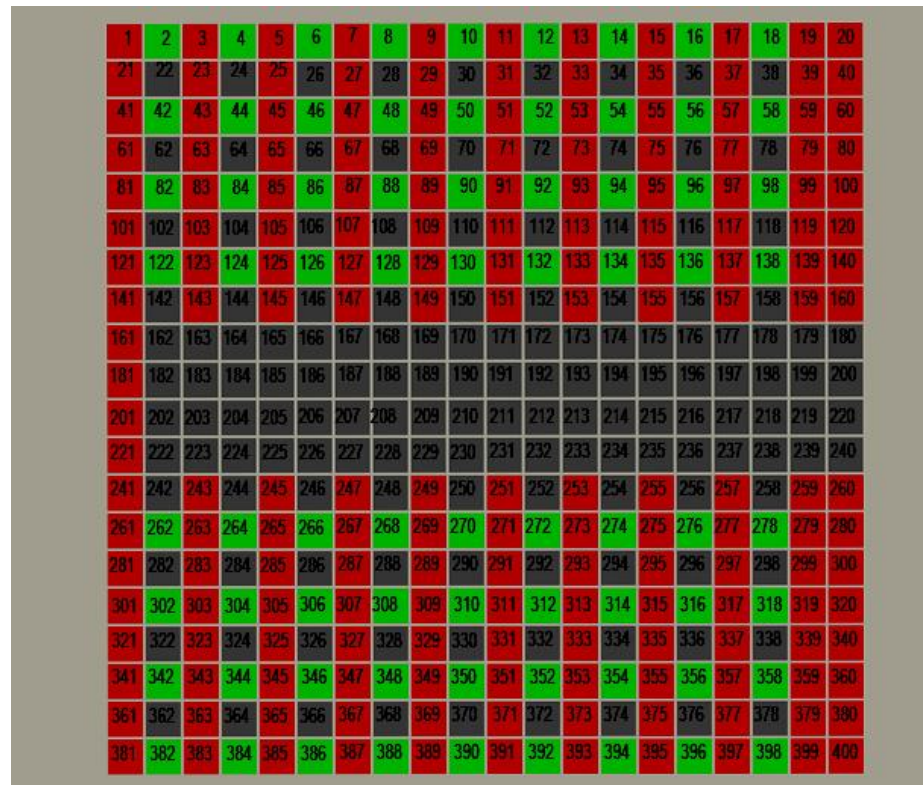


Рис. 4.21. Поле переміщень робота відповідно лівому блоку теплиці

Клітинки-стани нумеруються рядками, починаючи від 1 для верхньої лівої клітинки і закінчуючи 400 для нижньої правої. Дії робота теж нумеруються, починаючи з 1: 1-рух вгору, 2-рух вправо, 3-рух вниз, 4-рух вліво.

Виконуючи навчання мобільного робота згідно з описаними алгоритмами, отримуємо автоматну модель поставленого завдання, що являє собою стохастичну матрицю переходів (Додаток А). Рядки цієї матриці відповідають клітинкам-станам мобільного робота, стовбці – можливим діям. Таким чином, стохастична матриця переходів співставляє з кожною парою стан-дія значення імовірності даної дії [74]. Значення відповідних ймовірностей стохастичної матриці переходів розраховуються за виразом (4.41).

Нульові імовірності вибору дії в таблиці говорять про спробу робота вийти за межі поля, що призводить до негативної оцінки сумарного прибутку. Із таблиці виключені клітинки червоного кольору, тому що робот не може на них перебувати.

Для отримання цих даних створено програмну реалізацію алгоритму Q-learning для простору теплиці мовою програмування Java. У Додатку Б представлено код програмної реалізації алгоритму Q-learning, що розраховує значення вигоди та генерує наступний крок робота.

Інтерфейс користувача представлений на (рис. 4.22). Розмір поля задається користувачем. Також користувач визначає: цілі – лівий клік мишею (зелений колір) та перешкоди – правий клік (червоний колір).

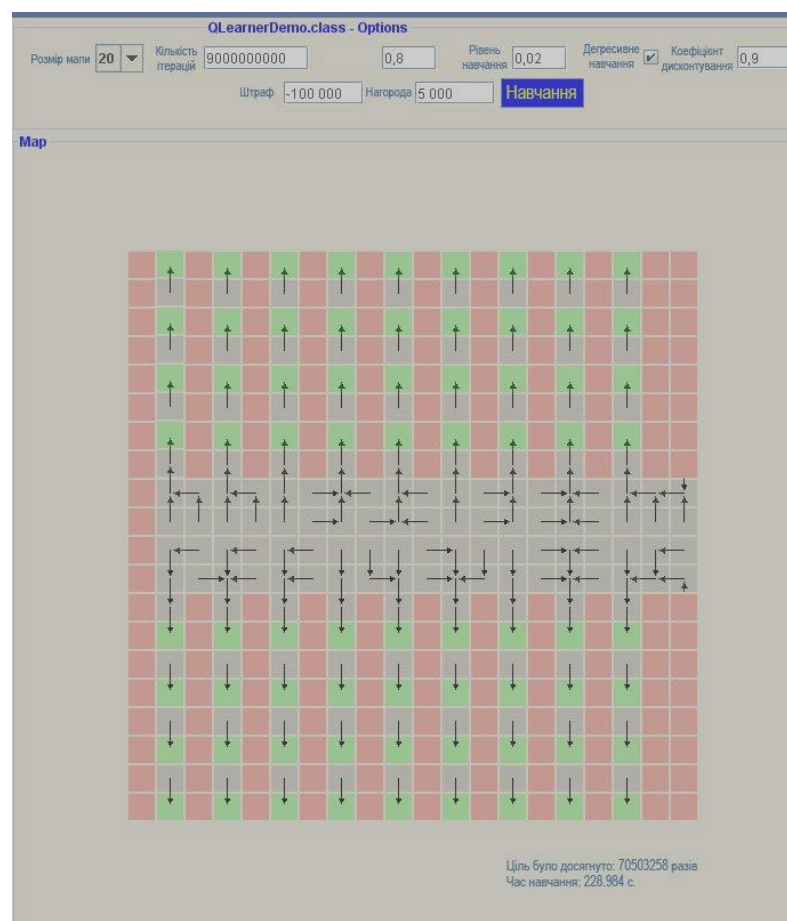


Рис. 4.22. Інтерфейс програмної реалізації алгоритму



Значення «кількість ітерацій» визначає кількість циклів навчання, параметр «рівень навчання» позначає, як добре робот вивчає успішні маршрути (не рекомендується виставляти цей параметр занадто високим). Значення «штраф» та «нагорода» визначають, яку вигоду робот отримує у разі знаходження цілі або спроби виходу з поля відповідно, та встановлюються експериментально.

Для успішного проходження маршруту алгоритму потрібно пройти період навчання з накопичення досвіду спроб та помилок. Із накопиченням досвіду кількість невдалих спроб і час проходження маршруту зменшується, а кількість отриманих стимулів, навпаки, зростає (рис. 4.23).

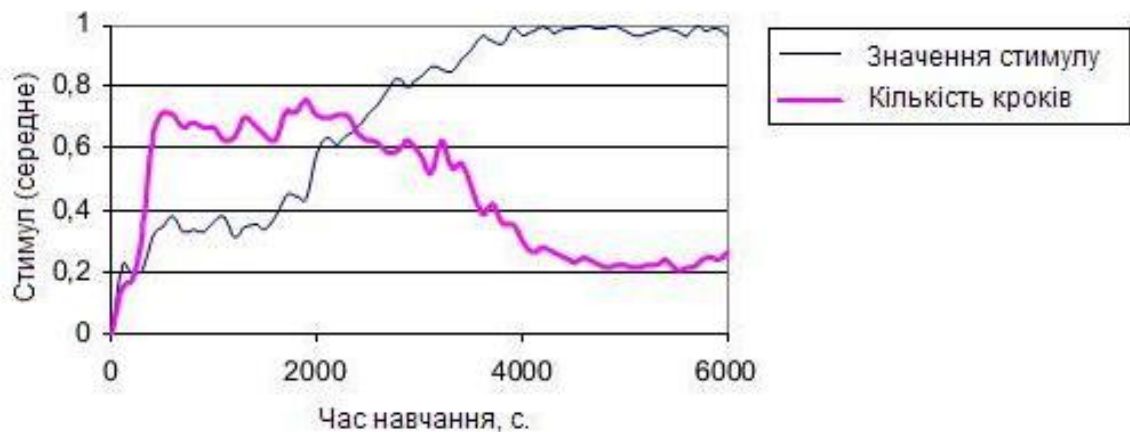


Рис. 4.23. Графік залежності часу навчання та отриманих стимулів

Враховуючи стохастичну природу можливих перешкод у теплиці, доцільно для орієнтації мобільного робота в просторі блочної теплиці використовувати імовірнісні алгоритми машинного навчання. Після періоду навчання ефективність роботи алгоритму стимулюючого навчання значно збільшується і дає змогу МРФ самостійно пересуватись у просторі блочної теплиці, обминаючи перешкоди.

#### 4.5. Оптимізація енергоспоживання під час переміщення мобільного робота

Сучасні робототехнічні системи мають суттєві переваги перед традиційними: високий коефіцієнт корисної дії, зменшені витрати на людські ресурси, можливість модернізації. Основним їх недоліком, особливо мобільних систем, є обмежений енергетичний ресурс, що пояснюється порівняно незначною ємністю акумулятора. Зазначену проблему можна вирішити за рахунок збільшення ресурсу батареї або зменшення обсягів споживання енергії. Наші дослідження спрямовані на зменшення енергоспоживання роботом під час його переміщення [10, 39].

Економія енергії досягається, якщо робот переміщується з оптимальною швидкістю (швидкість з постійним прискоренням, нечасті зміни швидкості за умов руху робота прямою лінією).

Для формування задачі оптимізації приймаємо, що МРФ являє собою негологомну систему із симетричною структурою, що приводиться у рух двома однаковими двигунами постійного струму [1, 218]. Позначимо положення робота (координати та кут) як  $P(t) = [x(t) \ y(t) \ \theta(t)]^T$ , лінійну швидкість –  $v$ , кутову швидкість –  $w$ . Тоді кінематичне рівняння для опису являтиме собою вираз:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = T_p \cdot \begin{pmatrix} v \\ w \end{pmatrix}, T_p = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T. \quad (4.43)$$

Для спрощення розрахунків будемо вважати, що обидва двигуни мають однакові: опір якоря –  $R_a$ , проти-ЕРС –  $K_b$ , крутний момент –  $K_t$  та передатне число –  $n$ . Якщо напругу акумуляторної батареї позначити  $V_s$ , то рівняння балансу для двигунів матиме вигляд:

$$R_a \cdot i = V_s \cdot u - K_b \cdot n \cdot w, \quad (4.44)$$



де  $i = [i^R i^L]^T$  – вектор струму якоря,  $w = [w^R w^L]^T$  – вектор кутової швидкості коліс і  $u = [u^R u^L]^T$  – вхідний нормалізований вектор керування. Індокси  $R$  та  $L$  відповідають лівому і правому двигуну відповідно.

Динамічну залежність між кутовою швидкістю і струмом двигуна, враховуючи інерцію і тертя для двигуна, можна записати як:

$$J \frac{dw}{dt} + F_v \cdot w = K_t \cdot n \cdot i, \quad (4.45)$$

де  $F_v$  – коефіцієнт тертя,  $J$  – матриця моментів інерції двигунів.

Із виразів (4.44) і (4.45) можна отримати таке диференціальне рівняння:

$$\dot{w} + A \cdot w = B \cdot u, \quad (4.46)$$

$$\text{де } A = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ a_2 & a_1 \end{pmatrix} = J^{-1} \cdot (F_v + \frac{K_t \cdot K_b \cdot n^2}{R_a}), B = \begin{pmatrix} b_1 & b_2 \\ b_2 & b_1 \end{pmatrix} = J^{-1} \cdot \frac{V_s \cdot K_t \cdot n}{R_a}.$$

Визначаємо вектор стану як  $z = [v \ w]^T$ , пов'язуємо  $w$  та  $v$  із  $w^R$  та  $w^L$  у виразі:

$$z = \begin{pmatrix} v \\ w \end{pmatrix} = T_q \cdot \begin{pmatrix} w^R \\ w^L \end{pmatrix} = T_q \cdot w, T_q = \begin{pmatrix} r/2 & r/2 \\ r/2 \cdot b & -r/2 \cdot b \end{pmatrix}. \quad (4.47)$$

Використовуючи перетворення подібності, із виразів (4.46) та (4.47) отримуємо:

$$\dot{z} + \bar{A} \cdot z = \bar{B} \cdot u, \quad (4.48)$$

де

$$\bar{A} = T_q \cdot A \cdot T_q^{-1} = \begin{pmatrix} \pi_v & 0 \\ 0 & \pi_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 + a_2 & 0 \\ 0 & a_1 - a_2 \end{pmatrix}; \quad (4.49)$$

$$\bar{B} = T_q \cdot B = \begin{pmatrix} \beta_1 & \beta_1 \\ \beta_2 & -\beta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{r \cdot (b_1 + b_2)}{2} & \frac{r \cdot (b_1 + b_2)}{2} \\ \frac{r \cdot (b_1 - b_2)}{2} & -\frac{r \cdot (b_1 + b_2)}{2} \end{pmatrix}. \quad (4.50)$$

Енергія, що надходить від батарей живлення, перетворюється в механічну енергію руху і теплові втрати. Теплові втрати спричиняють внутрішній опір акумуляторної батареї, опори керуючого пристрою (драйвера) двигуна, опір якоря двигуна та в'язке тертя під час руху [15].

На (рис. 4.24) показана спрощена схема електричної системи мобільного робота. Для зменшення втрат тепла в керуючому пристрої двигунів використовується контролер ШІМ, оскільки він має менше енергоспоживання і виділяє менше тепла ніж лінійний регулятор напруги. Виходячи з цього, можна визначити опір підсилювача  $R_{amp}$  і скважність ШІМ  $u^R, u^L$ . Для спрощення розрахунків будемо вважати, що теплові втрати через внутрішній опір акумуляторної батареї і опір підсилювача керуючого пристрою двигуна незначні, а тому не враховуються.

Таким чином енергія, що подається від акумуляторної батареї у схему приводної частини мобільного робота, є функцією для мінімізації, і її можна представити як [4]:

$$E_w = \int_{t_0}^{t_f} i^T \cdot V \cdot dt = V_s \int_{t_0}^{t_f} i^T \cdot u \cdot dt, \quad (4.51)$$

де  $V = [V^R V^L]^T$  – вхідна напруга, що надходить на двигуни із акумуляторної батареї ( $V_s$  – напруга батареї),

$$u = \frac{V}{V_s} = [u^R u^L]^T. \quad (4.52)$$

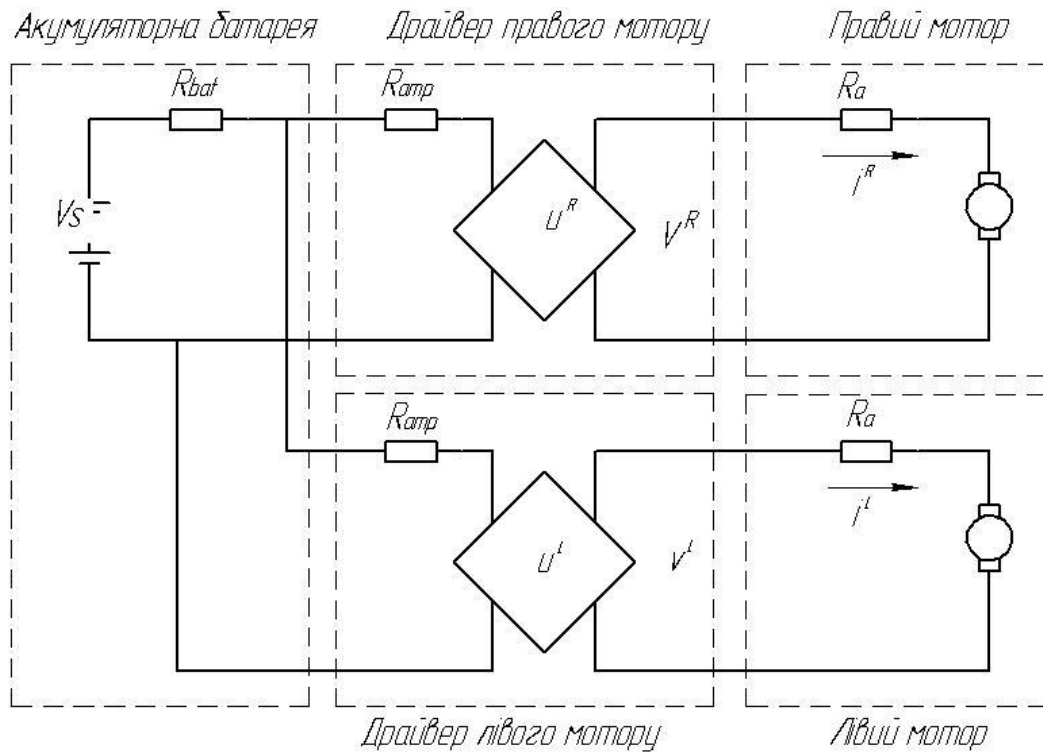


Рис. 4.24. Спрощена схема електричної частини мобільного робота

Оскільки ємність батареї обмежена, то обмеженою буде і напруга:

$$-u^{max} \leq u^R, u^L \leq u^{max}. \quad (4.53)$$

Із виразів (4.44), (4.47) функцію оптимізації  $E_w$  через швидкість можна записати як:

$$E_w = \int_{t_0}^{t_f} (k_1 \cdot u^T \cdot u - k_2 \cdot z^T \cdot T^{-T} \cdot u) dt, \quad (4.54)$$

$$\text{де } k_1 = \frac{V_s^2}{R_a}, k_2 = \frac{K_b \cdot n \cdot V_s}{R_a}, z = [v \ w]^T.$$

Таким чином, із урахуванням виразів (4.44), (4.45) загальну функцію оптимізації можна представити у такому вигляді:

$$E_w = R_a \cdot \int_{t_0}^{t_f} i^T \cdot i \cdot dt + F_v \frac{K_b}{K_t} \int_{t_0}^{t_f} z^T \cdot T_q^{-T} \cdot T_q^{-1} \cdot z \cdot dt + \\ + \frac{K_b}{K_t} \int_{t_0}^{t_f} \dot{z}^T \cdot T_q^{-T} \cdot J^T \cdot T_q^{-1} \cdot z \cdot dt. \quad (4.55)$$

У виразі (5.10) перший член ( $E_r = R_a \cdot \int_{t_0}^{t_f} i^T \cdot i \cdot dt$ ) – це енергія, що розсіюється опором якоря в двигуні [28]; другий член ( $E_F = F_v \frac{K_b}{K_t} \int_{t_0}^{t_f} z^T \cdot T_q^{-T} \cdot T_q^{-1} \cdot z \cdot dt$ ) відповідає втраті енергії на подолання тертя; останній член ( $E_K = \frac{K_b}{K_t} \int_{t_0}^{t_f} \dot{z}^T \cdot T_q^{-T} \cdot J^T \cdot T_q^{-1} \cdot z \cdot dt$ ) – кінетична енергія мобільного робота, що має нульове середнє значення, коли швидкість постійна або кінцева швидкість дорівнює початковій. Це означає, що внесок останнього члена в споживання енергії дорівнює нулю.

Оскільки робот рухається переважно прямолінійно, розглядаємо лише такий варіант. При цьому швидкість обертання робота –  $w$  у цей період дорівнює нулю, а  $P(t) = [x(t) \ 0 \ 0]^T$  – положення,  $z(t) = [v(t) \ 0]^T$  – швидкість в момент часу  $t$ . Тоді задачу мінімізації витрат енергії можна сформулювати таким чином: знайти значення лінійної швидкості  $v(t)$  та керуючої величини  $u(t)$ , що зведуть до мінімуму функцію:

$$E_w = \int_{t_0}^{t_f} (k_1 \cdot u^T \cdot u - k_2 \cdot z^T \cdot T_q^{-T} \cdot u) dt \quad (4.56)$$

за таких умов:

- 1) початкова і кінцева позиція:  $P(t_0) = [x_0 \ 0 \ 0]^T$  та  $P(t_f) = [x_f \ 0 \ 0]^T$ ;
- 2) початкова і кінцева швидкості:  $z(t_0) = [v_0 \ 0]^T$  та  $z(t_f) = [v_f \ 0]^T$ ;
- 3) задовільне значення заряду батареї, де  $t_0$  і  $t_f$  – початковий та кінцевий момент часу руху робота.

Будемо вважати, що початкові і кінцеві швидкості робота дорівнюють нулю, а його рух розпочинається із початкової позиції. Тоді завдання мінімізації енергії може бути записано як [13]:

$$\min E_w = \int_{t_0}^{t_f} (k_1 \cdot u^T \cdot u - k_2 \cdot z^T \cdot T_q^{-T} \cdot u) dt, \quad (4.57)$$

$$\dot{z} = -\bar{A}z + \bar{B}u, \quad (4.58)$$

$$z(0) = z(t_f) = [0 \ 0]^T, \quad (4.59)$$

$$P_f = \int_0^{t_f} T_p \cdot z \cdot dt = [x_f \ 0 \ 0]^T, \quad (4.60)$$

$$-\begin{pmatrix} u^{max} \\ u^{max} \end{pmatrix} \leq u = \begin{pmatrix} u^R \\ u^L \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} u^{max} \\ u^{max} \end{pmatrix}. \quad (4.61)$$

Пошук оптимальної швидкості з урахуванням витрат енергії, що зводить до мінімуму рівняння (4.57), задовольняючи обмеження (4.59)-(4.61) для системи рівнянь (4.58), будемо здійснювати із використанням методу варіаційного числення [241]. Ґрунтуючись на дослідженнях, що приведені в [39], множник Лагранжа для виразу (4.60) буде  $a = [a_x a_y a_\theta]^T$ . Визначено множник функції для виразу (4.58)  $\lambda = [\lambda_v \lambda_w]^T$ , при якому функція Гамільтона матиме такий вигляд:

$$H = k_1 \cdot u^T \cdot u - k_2 \cdot z^T \cdot T_q^{-T} - a^T \cdot T_p \cdot z + \frac{a^T \cdot P_f}{t_f} + \lambda^T (-\bar{A}z + \bar{B}u). \quad (4.62)$$

Необхідні умови для оптимальної швидкості  $z^*$  і вхідного сигналу  $u^*$ :

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 2k_1 \cdot u - k_2 \cdot T_q^{-1} \cdot z + \bar{B}^T \cdot \lambda = 0, \quad (4.63)$$

$$\frac{\partial H}{\partial z} = -k_2 \cdot T_q^{-T} \cdot u - T_p^T \cdot a + \bar{A}^T \cdot \lambda = -\lambda, \quad (4.64)$$

$$\dot{z} = -\dot{\bar{A}}z + \bar{B}u. \quad (4.65)$$

Із виразів (4.63)-(4.65) отримуємо таке диференційне рівняння:

$$\ddot{z} - \left( \bar{B} \cdot \bar{B}^T \cdot \bar{A}^T \cdot \bar{B}^{-T} \cdot \bar{B}^{-1} \cdot \bar{A} - \frac{k_2}{k_1} \cdot \bar{B} \cdot \bar{B}^T \cdot T_q^{-T} \cdot \bar{B}^{-1} \right) z + \frac{1}{2 \cdot k_1} \cdot \bar{B} \cdot \bar{B}^T \cdot T_p^T \cdot a = 0 \quad (4.66)$$

Оскільки  $\bar{B} \cdot \bar{B}^T$  та  $\bar{A}$  – діагональні матриці, рівняння (4.66) зводяться до:

$$\ddot{z} - Q^T \cdot Q \cdot z + R \cdot T_p^T \cdot a = 0, \quad (4.67)$$

де

$$Q^T \cdot Q = \bar{A}^T \cdot \bar{A} - \frac{k_2}{k_1} \cdot \bar{B} \cdot \bar{B}^T \cdot T_q^{-T} \cdot \bar{B}^{-1} \cdot \bar{A}, \quad (4.68)$$

$$R = \frac{\bar{B} \cdot \bar{B}^T}{2 \cdot k_1} = \begin{pmatrix} n_v & 0 \\ 0 & n_w \end{pmatrix}. \quad (4.69)$$

$$Q = \begin{pmatrix} \frac{1}{\tau_v} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau_w} \end{pmatrix}, \quad (4.70)$$

де  $\tau_v$  – електромеханічна постійна часу для переміщення:

$$\tau_v = \frac{J_1 + J_2}{\sqrt{F_v \cdot (F_v + K_t \cdot K_b \cdot n^2 / R_a)}}, \quad (4.71)$$

$\tau_w$  – електромеханічна постійна часу для повертання мобільного робота:

$$\tau_w = \frac{J_1 - J_2}{\sqrt{F_v \cdot (F_v + K_t \cdot K_b \cdot n^2 / R_a)}}. \quad (4.72)$$

Оскільки втрати енергії через повертання мобільного робота не враховуються (вважаємо, що рухається за прямою лінією), оптимальну лінійну швидкість  $z^*$  можна виразити як:

$$z^*(t) = \begin{pmatrix} v^*(t) \\ w^*(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1 \cdot e^{t/\tau_v} + C_2 \cdot e^{-t/\tau_v} + K_v \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (4.73)$$

де

$$C_1 = \frac{e^{-t_f/\tau_v} - 1}{e^{t_f/\tau_v} - e^{-t_f/\tau_v}} \cdot K_v, \quad (4.74)$$

$$C_2 = \frac{1 - e^{t_f/\tau_v}}{e^{t_f/\tau_v} - e^{-t_f/\tau_v}} \cdot K_v, \quad (4.75)$$

$$K_v = \frac{x_f \cdot (e^{t_f/\tau_v} - e^{-t_f/\tau_v})}{2 \cdot \tau_v \cdot \left( 2 - e^{\frac{t_f}{\tau_v}} - e^{-\frac{t_f}{\tau_v}} \right) + t_f \cdot (e^{t_f/\tau_v} - e^{-t_f/\tau_v})}. \quad (4.76)$$

Тоді рівняння (4.58) дає рівняння оптимального сигналу керування  $u^*$ :

$$\begin{aligned} u^*(t) &= \bar{B}^{-1} \cdot (\dot{z}^* + \bar{A} \cdot z^*) = \\ &= \frac{1}{2 \cdot \beta_1 \cdot \tau_v} \cdot \begin{pmatrix} C_1 \cdot (1 + \tau_v \cdot \pi_v) \cdot e^{\frac{t}{\tau_v}} - C_2 \cdot (1 - \tau_v \cdot \pi_v) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_v}} + \tau_v \cdot \pi_v \cdot K_v \\ C_1 \cdot (1 + \tau_v \cdot \pi_v) \cdot e^{\frac{t}{\tau_v}} - C_2 \cdot (1 - \tau_v \cdot \pi_v) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_v}} + \tau_v \cdot \pi_v \cdot K_v \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (4.77)$$

Для побудови залежностей оптимальної швидкості від відносного часу (від початку руху до його завершення) (рис. 4.25) використовувались технічні характеристики мобільного робота, що надані в таблиці 4.3.

Результати аналізу матеріалів, приведені на (рис. 4.25), дають можливість зробити такі висновки:

- графік швидкості мінімального енергоспоживання має симетричну форму, при цьому:

○ якщо  $k \approx 0$  ( $k = \tau_v/t_f$ ) – графік оптимальної швидкості є трапецевидним;

- якщо  $k > 0,2$  – графік швидкості набуває форми параболи.

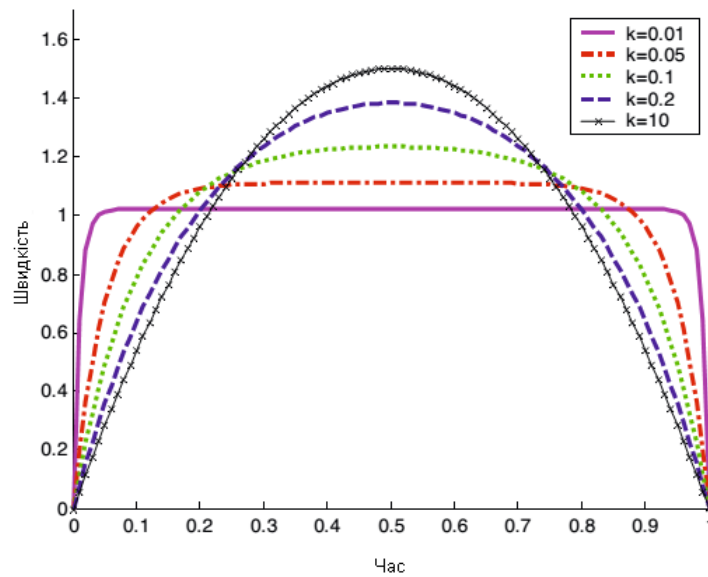


Рис. 4.25. Графіки швидкостей при різних значеннях  $k$  (механічна постійна часу до часу переміщення  $k = \tau_v / t_f$ )

Таблиця 4.3. Технічні характеристики мобільного робота

Параметр	Значення	Параметр	Значення
Опір якоря, $R_a$	0,71 Ом	Напруга батареї, $v_b$	12 В
Крутний момент, $K_t$	0,0230 Н·м/А	Обмеження напруги, $U_{max}$	1
Проти-ЕРС, $K_b$	0,0230 В/(рад/с)	Коефіцієнт тертя, $F_v$	0,054 Н·м/(рад/с)
Радіус колеса, $r$	0,15 м	Передатне число, $n$	49,8
База	0,206 м	Інерція двигунів, $J = \begin{pmatrix} J_1 & J_2 \\ J_2 & J_1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.1241 & 0.0098 \\ 0.0098 & 0.1241 \end{pmatrix}$

На основі виразів (4.57)–(4.60) отримуємо :

$$v^*(t) = \frac{x_f}{\tau_v} \cdot \frac{\sin h \cdot \left( \frac{t_f}{\tau_v} \right) - \sin h \cdot \left( \frac{(t_f - t)}{\tau_v} \right) - \sin h \cdot \left( \frac{t_f}{\tau_v} \right)}{2 \cdot \left( 1 - \cos h \cdot \left( \frac{t_f}{\tau_v} \right) \right) + \frac{t_f}{\tau_v} \cdot \sin h \cdot \left( \frac{t_f}{\tau_v} \right)}. \quad (4.78)$$

Досліджувались енерговитрати, що визначаються: втратами через опір якоря (перша складова виразу (4.55)) – мінімізація енергії якоря; втратами



через опір якоря та втратами на тертя (перша і друга частини виразу (4.55)) – мінімізація витрат енергії.

При параболічному графіку швидкості витрати енергії в деякій мірі компенсуються за рахунок часткової роботи двигуна в режимі генератора [10]. Для порівняння двох режимів економії енергії представлено графіки імітаційного експерименту по оптимальній швидкості (рис. 4.26), по споживанню заряду батареї (рис. 4.27), по струму якоря (рис. 4.28) для таких даних:  $t_f = 10\text{с}$ ,  $x_f = 5\text{м}$ .

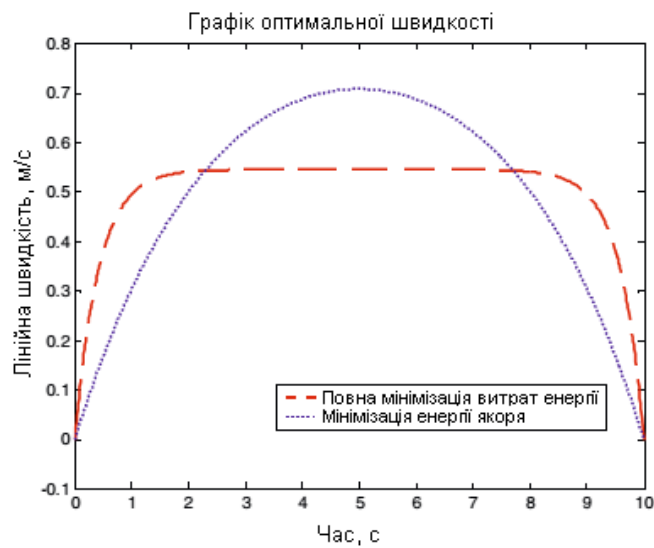


Рис. 4.26. Графіки порівняння двох режимів економії енергії по оптимальній швидкості

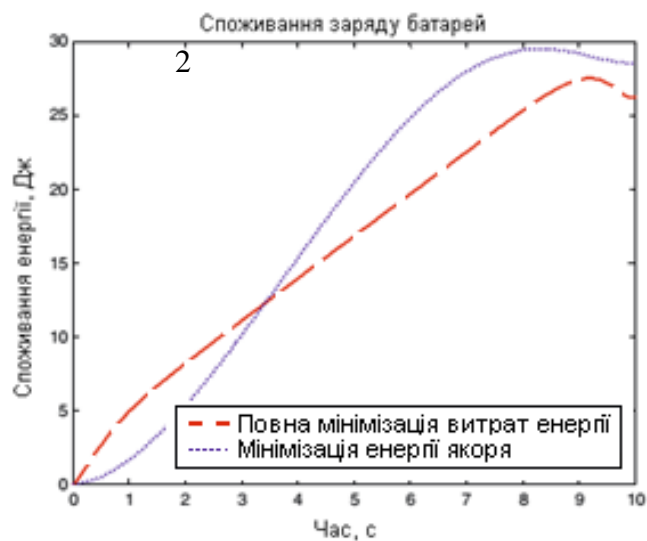


Рис. 4.27. Графіки порівняння двох режимів економії енергії по споживанню заряду батареї

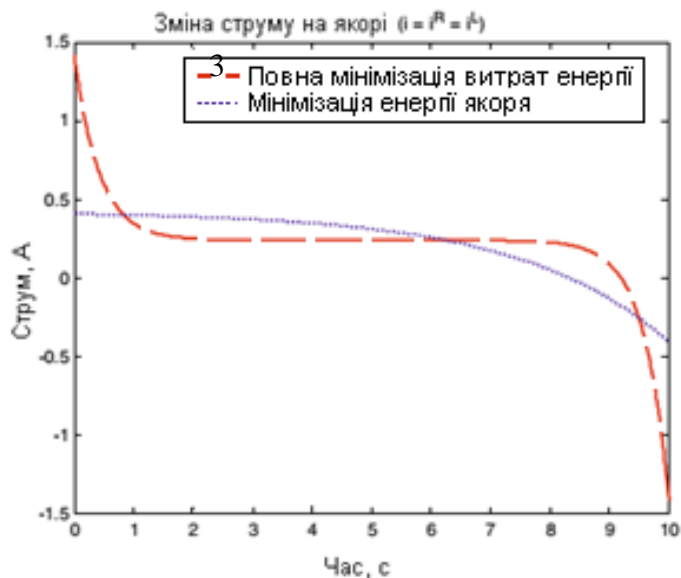


Рис. 4.28. Графіки порівняння двох режимів економії енергії по струму якоря

На (рис. 4.29) наведено співставлення даних моделювання із даними, отриманими під час експерименту.

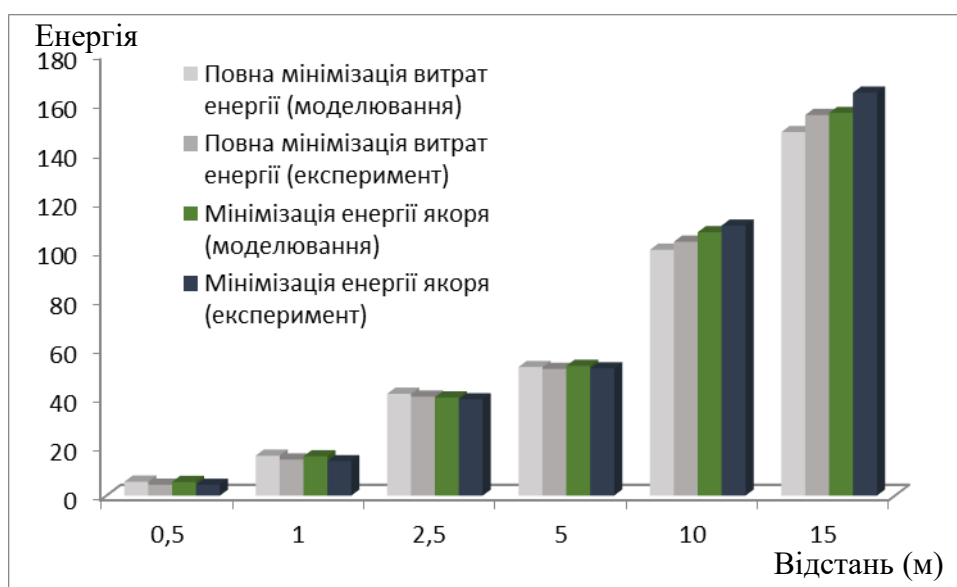


Рис. 4.29. Співставлення даних моделювання із даними, отриманими під час експерименту

Порівнюючи два шляхи оптимізації витрат енергії, робимо висновок, що мінімізація витрат енергії якоря доцільна в разі переміщення робота на

відстань до 5 метрів (тертя на це переміщення істотно не впливає). В іншому разі доцільнішою є повна мінімізація енергії.

#### **4.6. Програмно-апаратна реалізація мобільного робота фітомоніторингу**

##### **4.6.1. Алгоритми функціонування мобільного робота фітомоніторингу та їх програмна реалізація**

Локалізація та побудова карти місцевості є ключовим питанням, яке необхідно розглянути під час розробки МРФ. Основним способом вирішення даного завдання є використання алгоритмів SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Використаємо саме цей тип алгоритмів, оскільки він має високу точність локалізації і достатню швидкість для роботи в реальному часі.

На даний момент існують різні алгоритми SLAM, що відрізняються як за типом вхідної інформації, поданням навколишнього простору у вигляді карти, так і за методами обробки цієї інформації. За розмірністю простору, що підлягає картографуванню, алгоритми локалізації класифікуються [190]:

- 1) двовимірна локалізація на площині 2D-SLAM;
- 2) тривимірна локалізація в просторі 3D-SLAM;
- 3) кольорова локалізація по R, G, B компонентах зображення Colour-SLAM;
- 4) кольорова тривимірна локалізація в просторі 6D-SLAM.

Ці характеристики залежать безпосередньо від сенсора, що використовується. Під час використання найбільш простих лазерних далекомірів вхідною інформацією для алгоритму є двовимірний горизонтальний переріз рельєфу навколишніх об'єктів, відповідно для обробки нами застосовується 2D-SLAM. Слід зазначити, що використаний нами алгоритм локалізації поєднує в собі 2D-SLAM та Colour-SLAM, тобто він розширений до кольорової тривимірної локалізації в просторі 6D-SLAM.

Сенсорна система мобільного робота збирає інформацію про координати його перебування, вона включає в себе дві підсистеми датчиків переміщення і систему технічного зору. На (рис. 4.30) представлено алгоритм пересування МРФ у теплиці при використанні 6D-SLAM.

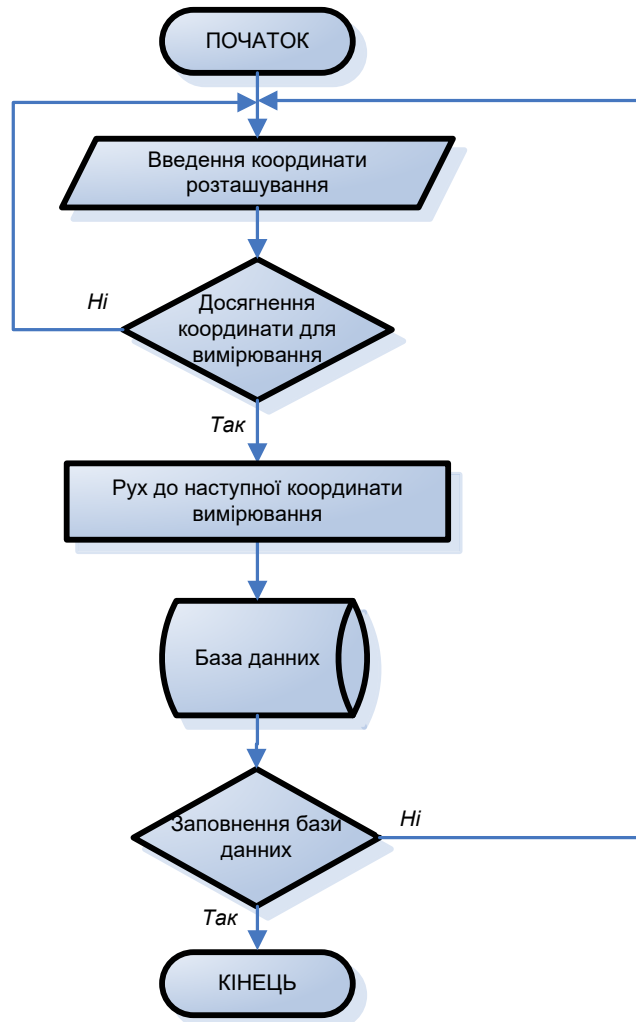


Рис. 4.30. Алгоритм пересування МРФ у теплиці при використанні 6D-SLAM

Ще одна особливість алгоритмів SLAM даного типу – це можливість замикання циклів, тобто розпізнавання вже пройденої ділянки карти з подальшою релаксацією всієї карти вздовж траєкторії руху робота [274]. Послідовна локалізація визначає зміну положення робота між двома послідовними сканами. Алгоритми цього типу, як правило, дають більш точний результат визначення положення мобільного робота порівняно з глобальними алгоритмами SLAM, але повинні виконуватися в реальному часі. Однак, якщо даний алгоритм не зійшовся хоча б один раз, подальше

його використання неможливо без додаткового корегування. Для досягнення найкоротшого результату за точністю і надійністю локалізації необхідно використовувати обидва алгоритми спільно.

Крім параметрів фітоклімату, які отримуємо від датчиків, розташованих на борту робота, також знімається та передається зображення з відеокамери для визначення ступеня стиглості томатів та їх кількості.

Зір мобільного робота можна визначити як процес виділення, ідентифікації і перетворення інформації, отриманої з тривимірних зображень [162, 240, 273]. Візуальна інформація перетворюється в сигнали за допомогою відеодатчика, в ролі якого виступає відеокамера. Після просторової дискретизації і квантування за амплітудою ці сигнали дають цифрове зображення. Зображення розпізнається програмним забезпеченням, встановленим на сервер, що відповідає за стратегічний рівень. Алгоритм вимірювання параметрів фітостану та стану атмосфери приведено на (рис. 4.31).

Особлива роль відводиться обчислювальній системі робота, на яку покладається обробка сигналів, що надходять від сенсорної системи, розпізнавання стану навколишнього середовища, визначення бажаної траєкторії руху робота, обчислення відхилень поточної конфігурації і швидкості робота від бажаних значень і перерахунок відхилень в управлінський вплив. Для вирішення завдань такого роду стає проблематичним використання традиційних методів і алгоритмів керування, виникає необхідність використання спеціальних стратегій керування траєкторним рухом з використанням принципів адаптації і самонавчання [192].

Таким альтернативним методом вирішення завдання може слугувати ситуаційний підхід. Даний метод заснований на виявленні ситуацій із заздалегідь визначеного числа й прийнятті управлінських рішень, асоційованих із ситуаціями. Для опису переходів ситуацій використовуються дискретно-подієві моделі різних видів, зокрема, імовірнісні автомати, як

зазначалось раніше. Імовірнісні автомати в даний час все ширше застосовуються в різних галузях програмування. Їх основними перевагами є простота і наочність. Найбільш розробленим питанням застосування імовірнісних автоматів є синтаксичний аналіз в різного роду трансляторах алгоритмічних мов, також вони застосовуються в галузі логічного керування і в об'єктно-орієнтованому програмуванні, під час програмування протоколів, ігор та схем програмованої логіки. При використанні даного підходу мобільний робот розглядається як самостійна система. Такі системи реагують на потік подій зміною станів і виконанням дій під час переходів зі стану в стан або дій у станах [31].

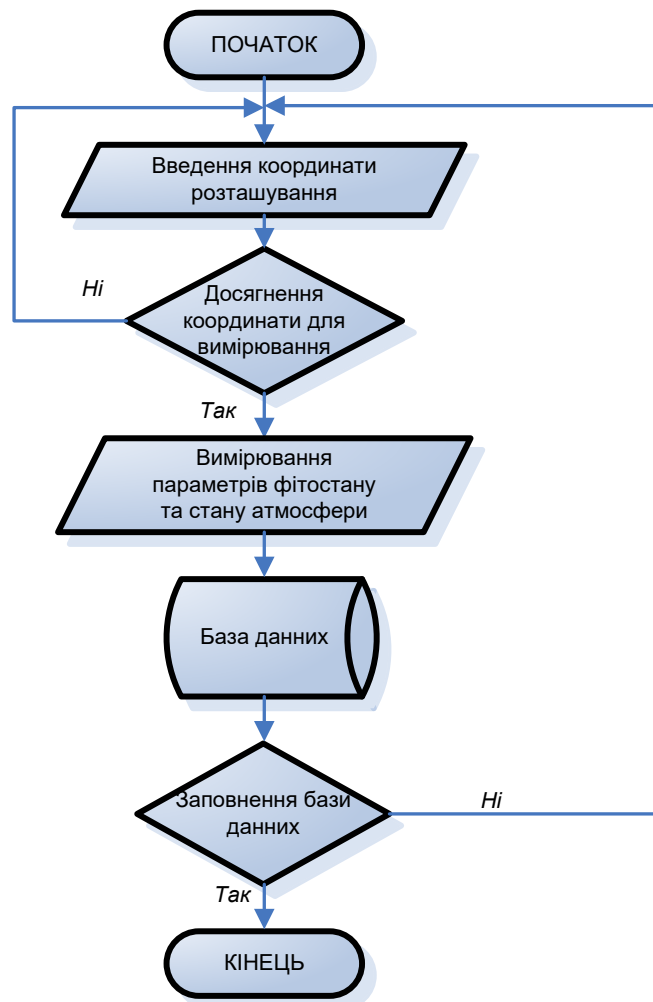


Рис. 4.31. Алгоритм вимірювання параметрів фітостану та стану атмосфери

Загальний алгоритм керування мобільного робота моніторингу фітостану та стану атмосфери в спорудах закритого ґрунту представлений на (рис. 4.32). Реалізація багаторівневої ієрархічної структури керування МРФ, до складу якої входять стратегічний, тактичний та виконавчий рівні, потребує використання не однотипного програмного забезпечення [31].

Реалізацію системи керування мобільним роботом здійснено на основі інтегрованого середовища Arduino з відповідним комплексом технічних засобів. Інтегроване середовище Arduino – це багатоплатформовий додаток на мові Java, що включає редактор коду, компілятор і модуль передачі «прошивки» плати. Середовище розробки передбачає використання мови програмування Processing, що є аналогічною мові Wiring. Програми обробляються за допомогою препроцесора, а потім компілюються за допомогою AVR-GCC.

Програма керування інтелектуальним мобільним роботом для моніторингу фітостану та стану атмосфери в спорудах закритого ґрунту написана мовою програмування C або C++. Середовище розробки Arduino включає бібліотеку програм «Wiring», яка дає змогу просто здійснювати багато стандартних операцій введення/виведення. Скріншот інтерфейсу програми для реалізації тактичного та виконавчого рівнів керування роботом представлено на (рис. 4.33), код програми наведено в Додатку Й.

Програмування проведено через власну програмну оболонку (IDE), яка доступна безкоштовно на сайті Arduino і не потребує придбання ліцензії. У цій оболонці є текстовий редактор, менеджер проєктів, препроцесор, компілятор та інструменти для завантаження програми в мікроконтролер. Оболонка написана мовою Java на основі проєкту Processing, функціонує на основі Windows, Mac OS X і Linux. Текст основної програми роботи мобільного робота наведено в Додатку Й.

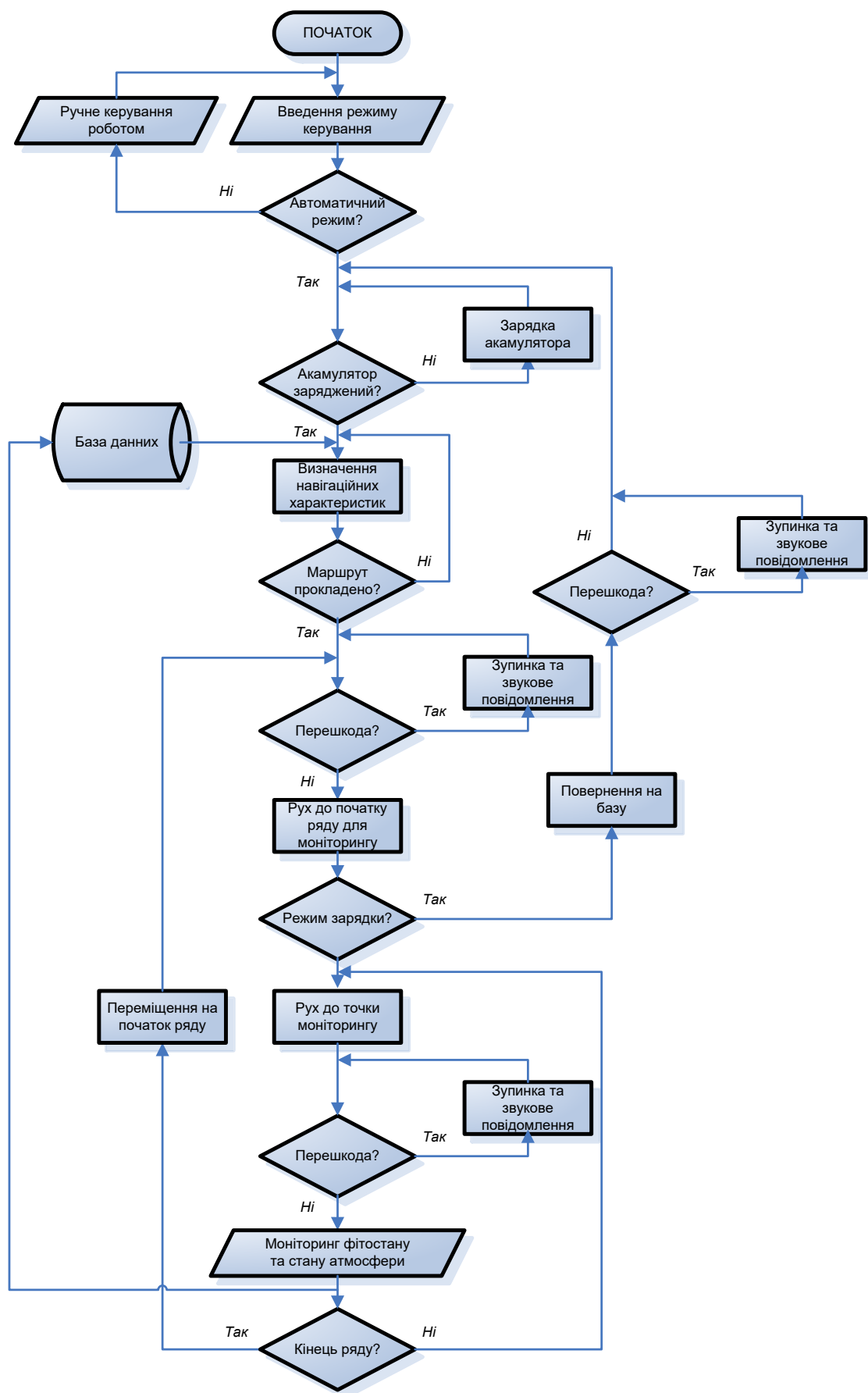


Рис. 4.32. Блок-схема алгоритму керування МРФ у спорудах закритого ґрунту



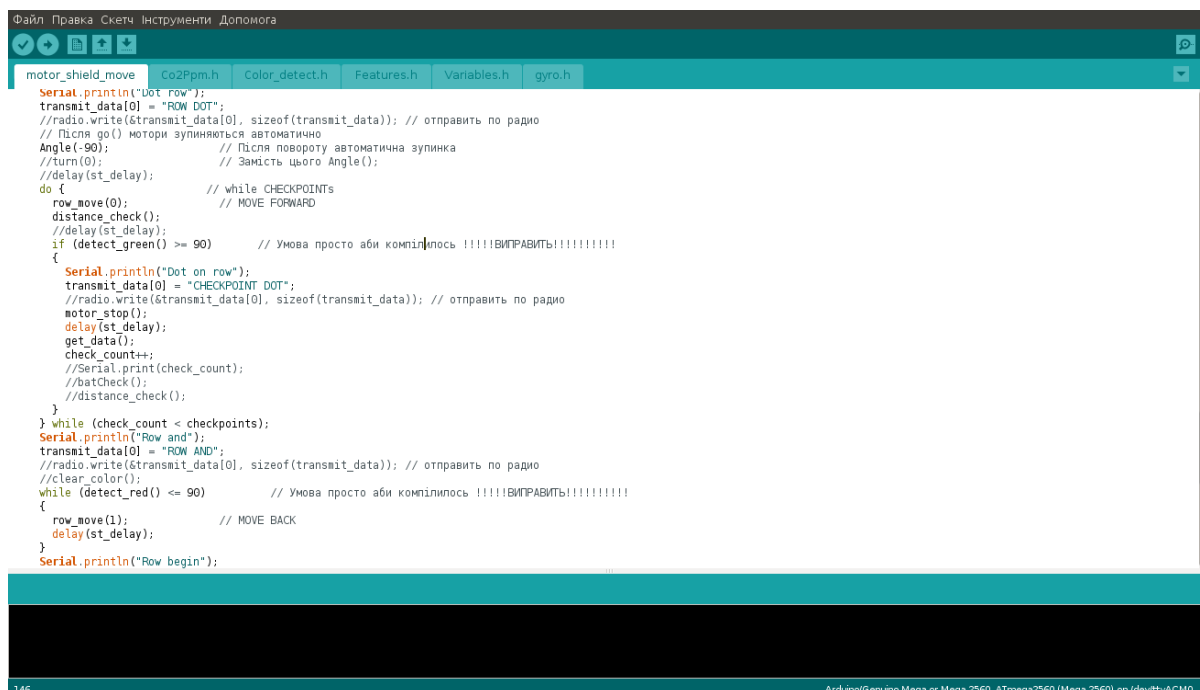


Рис. 4.33. Скріншот інтерфейсу програми реалізації тактичного та виконавчого рівнів

Менеджер проекту Arduino IDE має нестандартний механізм додавання бібліотек, які у вигляді вихідних текстів на стандартній мові C++ додаються у спеціальну папку в робочому каталозі IDE. При цьому назва бібліотеки буде додана до списку бібліотек в меню IDE. Вибираються лише потрібні бібліотеки і вносяться до списку компіляції.

Зачакування програми в мікроконтролер Arduino відбувається через попередньо запрограмований спеціальний завантажувач (всі мікроконтролери від Arduino йдуть базово з цим завантажувачем). Завантажувач створений на основі Atmel AVR ApplicationNote AN109 і здатний функціонувати, використовуючи інтерфейси RS-232, USB або Ethernet залежно від складу периферії конкретної процесорної плати. У деяких випадках для програмування потрібен окремий перехідник [286].

Оскільки платформа Arduino не може обробляти інформацію і обмежена у своїх технічних характеристиках, перед нами постала проблема зібрати дані, обробити їх та відобразити для подальшої обробки даних. Використання ноутбука на борту робота було б найкращим рішенням. Але

тут виникали технічні проблеми із збільшенням маси робота та його енергозатратності. Тому було використано raspberry pi 3 – мініатюрний портативний комп'ютер. Невеликі розміри та енергозатратність цього комп'ютера дають змогу розмістити його на борту робота. Також наявний функціонал, а саме можливість встановити повноцінну операційну систему, доступність GPIO та можливість дистанційно проводити налаштування у програмному коді, не вносячи значних конструкційних змін, дали змогу більш широко підійти до даного питання.

Було встановлено операційну систему Raspberry – аналог Linux, розроблену саме для даного мобільного робота. Дана ОС має програмне забезпечення, призначене для програмної та комп'ютерної інженерії.

Для роботи використано програмне середовище Node-RED, яке має відкриту ліцензію. Інтерфейс програмного середовища представлено на (рис. 4.34). Зазначена програма дає можливість створювати складні програмні продукти у вигляді блок-схем. Це пришвидшує час розробки програмного забезпечення не тільки для зв'язку безпосередньо із пристроями типу Arduino, але й дає можливість розробити WEB-інтерфейс для коректної роботи з ними.

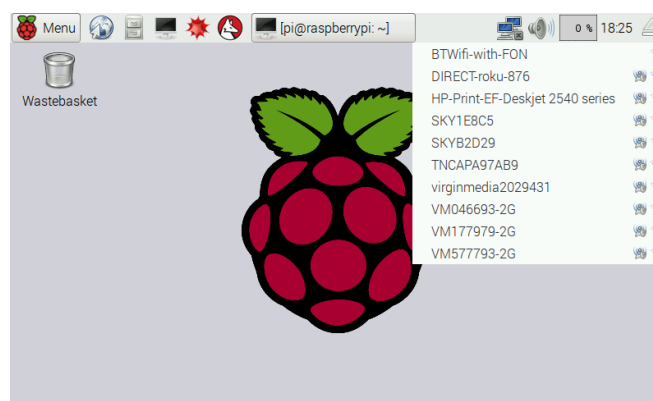


Рис. 4.34. Інтерфейс програмного середовища Node-RED

Складність розробки програмного забезпечення полягала у використанні декількох мов програмування. Так для наступного етапу

необхідно було використати JavaScript. Ця мова програмування є основною для роботи у Node-Red.

Для повної роботи нами було встановлено NPM – систему керування пакетами. Даний програмний пакет встановлюється поверх Node-Red для розширення його функціоналу. Блок-схему керування контентом наведено на (рис. 4.35).

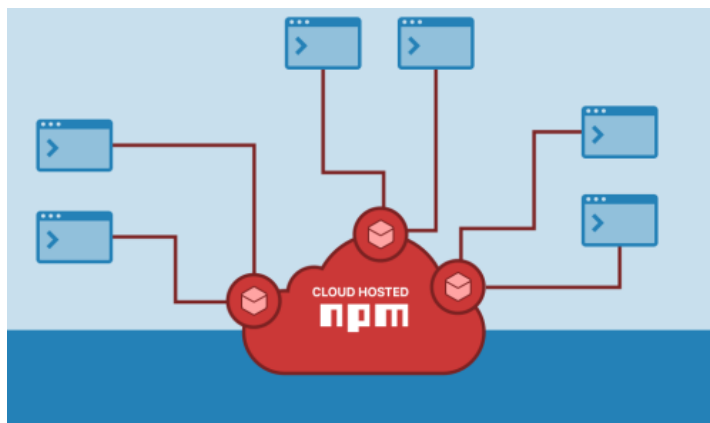


Рис. 4.35. Блок-схема керування контентом

Розроблена блок-схема для виведення даних на екран та зберігання інформації у файл наводиться на (рис. 4.36).

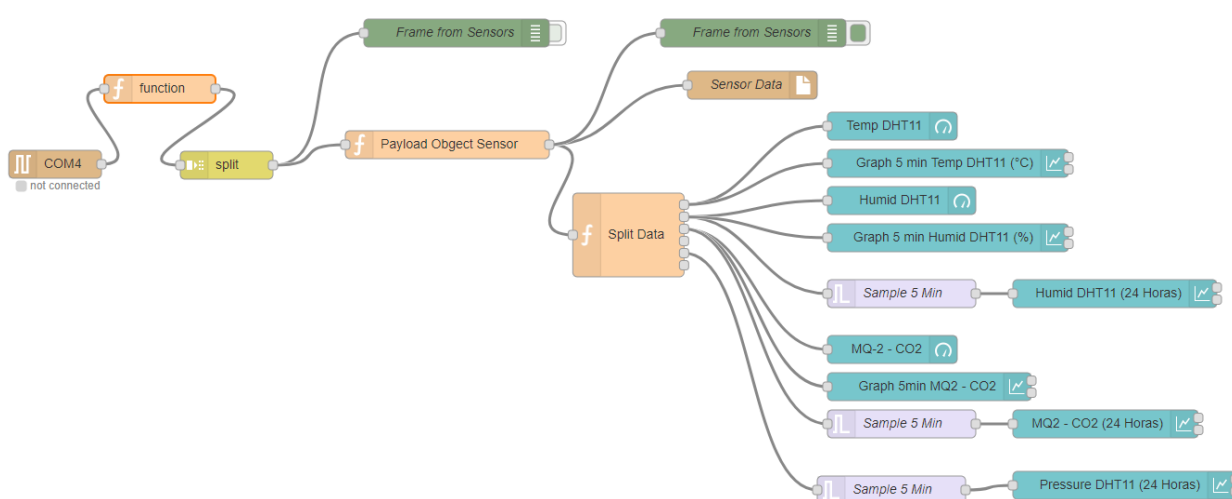


Рис. 4.36. Блок-схема для виведення даних на екран та зберігання інформації у файл

Варто зазначити, що дані блоки – це вже готовий програмний код на мові JavaScript, до якого вносяться корективи для роботоздатності цілої програми.

Перший блок відповідає за виведення інформації з COM-порта. Arduino Mega підключається до Raspberry через USB, і даний блок відповідає за технічну сторону передачі інформації. Далі йде блок функцій із кодом, який розшифровує отриману інформацію. Для коректної роботи даної схеми ще на початку програмування Arduino ми внесли відповідні корективи у її програмний код. Дана блок-схема має важливе значення, оскільки вона є функцією у цій програмі і розбиває інформацію із потоку даних на окремі складові та виводить її далі (код програми наведено в Додатку Н).

І вже на завершальному етапі розбитий потік даних виводиться на спеціально розроблений WEB-інтерфейс та зберігається у файл для використання в розрахунках. WEB-інтерфейс системи керування МРФ у теплиці стратегічного рівня представлений на (рис. 4.37).

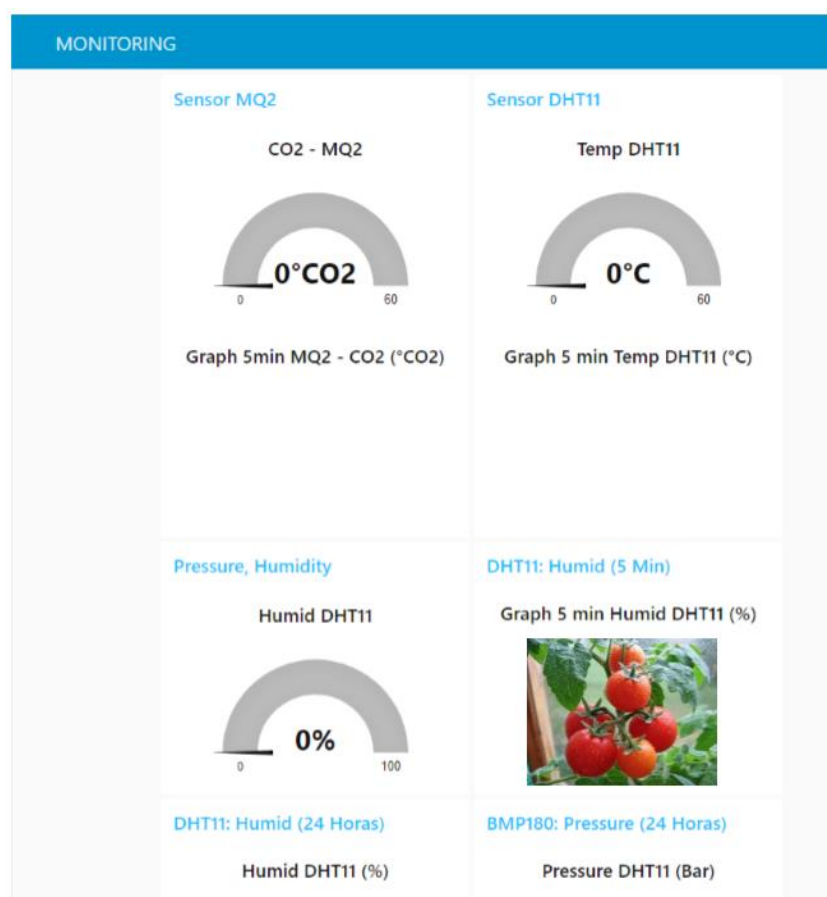


Рис. 4.37. Інтерфейс системи керування МРФ стратегічного рівня

Отримання фітометричних даних безконтактним способом відбувається за умови одержання відповідних зображень рослин фотокамерою, встановленою на МРФ. Аналіз і обробка відповідних даних проходить за допомогою вейвлет-перетворень, під час яких кожне фотозображення розкладається на хвильові функції (вейвлети). Блок-діаграма програми для розпізнавання плоду помідора наведена в Додатку Є.

Для отримання доступу до МРФ та керування ним розроблено графічний інтерфейс оператора, до складу якого увійшли:

- інтерфейс системи керування роботом (рис. 4.38);
- інтерфейс фітометричних і фітокліматичних показників рослин (рис. 4.39);
- інтерфейс налаштувань робота (рис. 4.40).

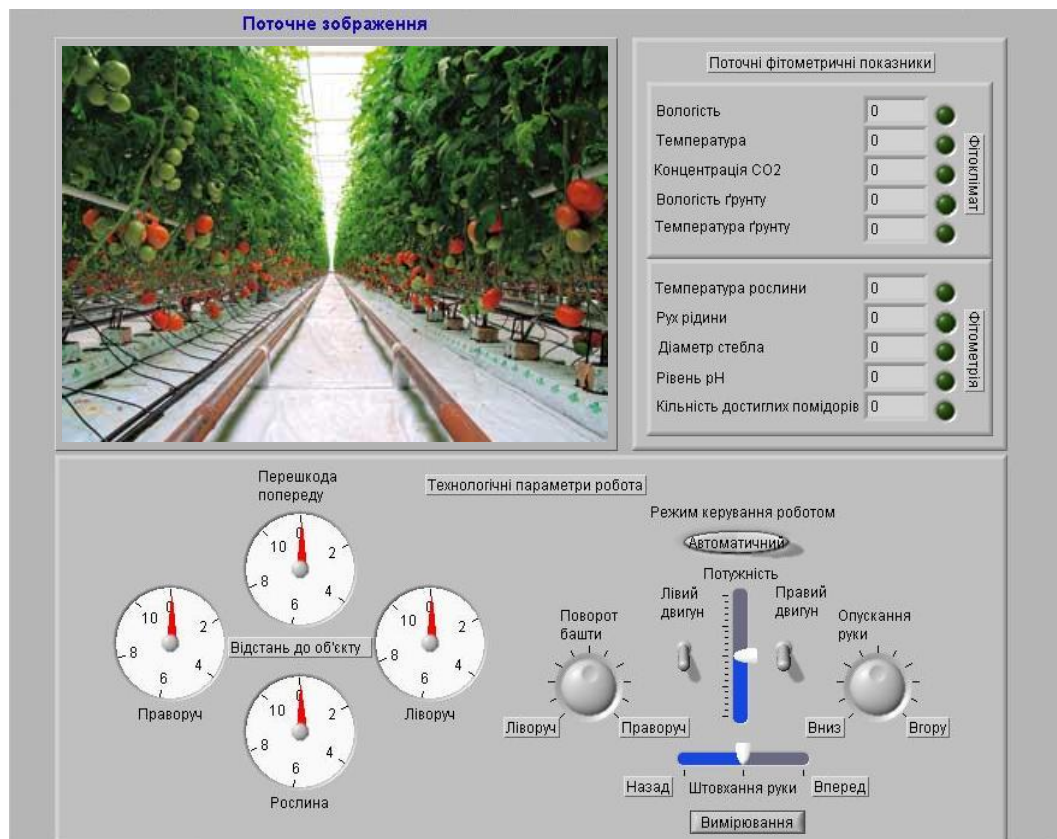


Рис. 4.38. Інтерфейс системи керування роботом

**Загальна статистика**

Середні значення параметрів обробовані на базі проведених вимірів

Середня вологість	Середня температура	Середня концентрація CO <sub>2</sub>	Середня вологість ґрунту	Середня температура ґрунту	Виміряно рослин
0	0	0	0	0	0
Середня температура рослин	Середня швидкість руху рідини в рослинах	Середній діаметр стебла	Середній рівень pH	Середня кількість стиглих плодів на рослину	Робот зараз знаходиться на ряду
0	0	0	0	0	0

**Вибіркова статистика рослин**

Номер ряду рослини

1

Порядковий номер рослини в ряду

1

**Відобразити**

Дані о обраній рослині

Схема проходу роботом теплиці та розташування рядів в ній

Рис. 4.39. Інтерфейс фітометричних і фітокліматичних показників рослин

**Налаштування датчиків робота**

Передатне число датчика

Температура ґрунту	0	▶
Вологість ґрунту	0	▶
Вологість повітря	0	▶
Температура повітря	0	▶
Діаметр рослини	0	▶
Передній датчик відстані	0	▶
Лівий датчик відстані	0	▶
Правий датчик відстані	0	▶
Температура рослини	0	▶

**Налаштування розпізнавання зображення**

Ім'я камери: Cam1

Мінімальний розмір помідора: 0

Максимальний розмір помідора: 0

**Налаштування двигунів робота**

Максимальна потужність лівого двигуна: 0

Максимальна потужність правого двигуна: 0

Частота широтньо-імпульсної модуляції: 0

**Параметри теплиці**

Довжина ряду: 0 мм.

Відстань між рослинами: 0 мм.

1 2 3 4 5 6 7 8

**Зберегти налаштування**

Рис. 4.40. Інтерфейс налаштувань робота

Для передачі даних МРФ використовує технологію Wi-Fi, оскільки вона забезпечує високу швидкість передачі даних, досить великий радіус дії, передачу великого обсягу даних за короткий проміжок часу та досить високий рівень безпеки. Застосування даної технології можливе у більшості сучасних середовищ розробки.

#### **4.6.2 Апаратне забезпечення та схемна реалізація мобільного робота**

Для збору та передачі інформації використано стандартні датчики DHT-11 (температура та вологість) і MQ-2 (показник CO<sub>2</sub>). Для центрального контролера використано Arduino Mega 2650, оскільки для даної функції його достатньо. Розроблено спеціальний програмний код на мові C для подальшої інтерпретації (див. Додаток Ж).

Також для коректної роботи було використано стандартні бібліотеки для сприймаючих елементів, які використовуються в мобільному роботі. Для реалізації апаратного забезпечення мобільного робота використано обладнання компанії Arduino.

Arduino (Ардуіно) – апаратна обчислювальна платформа для конструювання, основними компонентами якої є плата мікроконтролера з елементами введення/виведення та середовище розробки Processing/Wiring на мові програмування, що є підмножиною C/C++. Arduino може використовуватися як для створення автономних інтерактивних об'єктів, так і підключатися до програмного забезпечення, яке виконується на комп'ютері (наприклад: Processing, Adobe Flash, Pure Data, Max/MSP, SuperCollider) [141].

Для здійснення зв'язку з комп'ютером іншими пристроями Arduino або мікроконтролерами на платформі Arduino встановлено кілька пристроїв ATmega328, які підтримують послідовний інтерфейс UART TTL. Встановлена на платі мікросхема ATmega8U2 направляє даний інтерфейс



через USB, програми комп'ютера «спілкуються» з платою через віртуальний COM порт. Прошивка ATmega8U2 використовує стандартні драйвери USB COM, жодних сторонніх драйверів не потрібно, але на Windows для підключення треба використовувати файл Arduino.inf. Моніторинг послідовної шини (SerialMonitor) програми Arduino дає змогу надсилати і отримувати текстові дані при підключенні до платформи [35].

Для технічної реалізації використано Arduino Mega 2560 Rev3 – це остання версія мікроконтролерної плати від Arduino. Базується на потужному чіпі ATmega2560, що працює на частоті 16 МГц. Має 54 цифрових входи/виходи, 14 з яких можуть працювати в режимі ШІМ (PWM), 16 аналогових входів, 4 апаратних послідовних порти UART для зв'язку з комп'ютером та іншими пристроями, роз'єм USB, роз'єм для зовнішнього живлення, ICSP Хідер і кнопку Скидання. Нова версія Rev3 включає в себе чіп Atmega16U2 (у версіях Rev1 і Rev2 Atmega8U2) з програмною прошивкою конвертера «USB-послідовний порт» замість використовуваних в більш ранніх версіях мікросхем FTDI, що дає можливість підвищити швидкість під час передачі даних.

Оскільки платформа Arduino не може обробляти інформацію і обмежена у своїх технічних характеристиках, перед нами постала проблема зібрати дані, обробити їх та відобразити для подальшої обробки даних. Використання ноутбука на борту робота було б найкращим рішенням. Але тут виникали технічні проблеми із збільшенням маси робота і його енергозатратності. Тому було використано raspberry pi 3 – мініатюрний портативний комп'ютер (рис. 4.41). Невеликі розміри та енергозатратність комп'ютера дають змогу розмістити його на борту робота. Також наявний функціонал, а саме можливість встановлення повноцінної операційної системи, доступність GPIO та можливість дистанційно проводити налаштування у програмному коді, не вносячи значних конструкційних змін, дали змогу більш широко підійти до даного питання. Технічні характеристики Raspberry Pi 3 наведено [141, 193].



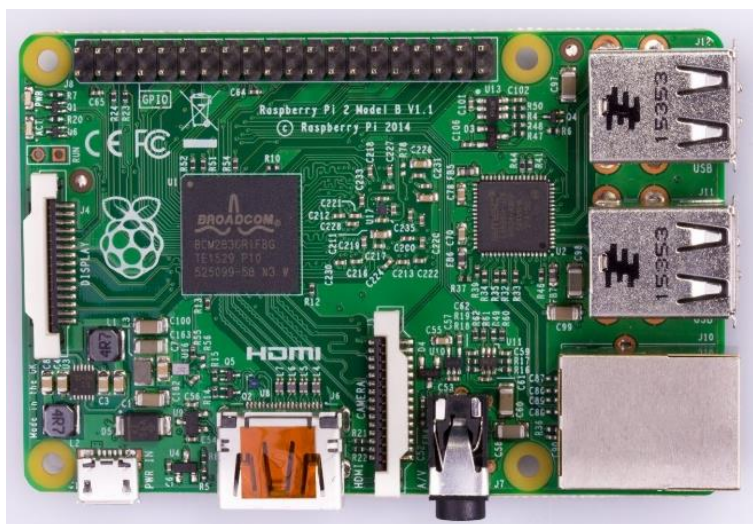


Рис. 4.41 Зовнішній вигляд мініатюрного портативного комп'ютера Raspberry Pi 3

Було здійснено вибір комплексу технічних засобів мобільного робота, призначених для його навігації та проведення оцінки фітостану в промисловій теплиці. Програмний код основної програми роботи МРФ наведено в Додатку І.

Для визначення міток та направляючих ліній нами використано датчик TCS230, що використовується для визначення кольору об'єкта на відстані від 10 мм до 15 см. Датчик розпізнає 4 кольори: червоний, синій, зелений, білий.

Як чутливий елемент використовується мікросхема TCS230, яка перетворює інтенсивність колірного спектра у вихідний меандр (50%) різної частоти. Чим вище частота вихідного сигналу, тим нижче інтенсивність колірного спектра. Схему будови датчика TCS230 зображено на (рис. 4.42).

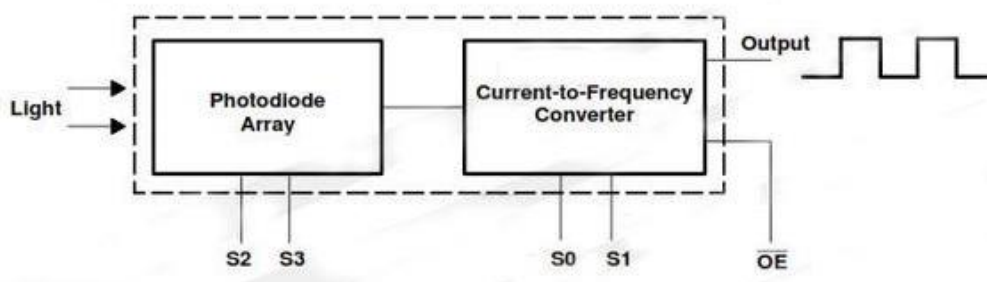


Рис. 4.42. Схема будови датчика TCS230

У колірній моделі RGB кожен колір можна представити у вигляді комбінації трьох кольорів: R (червоний), G (зелений), B (синій). Тому для визначення кольору об'єкта необхідно вимірювати три спектри: червоний, синій, зелений. Мікросхема TCS230 (рис 4.43) складається з масиву фотодіодів 8x8, 16 фотодіодів мають блакитний фільтр, 16 фотодіодів - зелений фільтр, 16 фотодіодів - червоний фільтр і 16 фотодіодів без фільтра. Датчик дає змогу встановлювати фільтр (подачею комбінації цифрових сигналів) для вимірювання кожного компонента спектра R, G, B. Текст програми зчитування інформації з датчиків кольору наведено в Додатку М. [193].



Рис. 4.43. Зовнішній вигляд датчика TCS230

На корпусі датчика розташовано чотири світлодіоди, вони використовуються для підсвічування місця вимірювання. Щоб вимірювання були коректні, датчик потрібно ставити на світлодіоди паралельно до об'єкта вимірювання. Технічні характеристики датчика TCS230 наведено [141, 193]. Схему підключення датчика до плати Arduino наведено на (рис. 4.44).

Для визначення кольору об'єкта датчик TCS230 необхідно підключити до мікроконтролера. Подачею сигналів на контакти S0, S1 встановлюємо масштабування частоти імпульсів на виході OUT датчика (див. таблицю 4.4) [193].

Подачею сигналів на контакти S2, S3 встановлюємо фільтр вимірювання спектра (див. таблицю 4.5).

Для позиціонування мобільного робота в теплиці було вибрано датчик GY-86 – модуль датчиків для інерційної навігаційної системи (IMU) +

барометр. Даний модуль включає в себе модуль MPU6050 (трьохосьовий гіроскоп + трьохосьовий акселерометр), HMC5883L (електронний трьохосьовий компас), MS5611 (прецизійний датчик абсолютного атмосферного тиску) (рис. 4.45) [193].

Таблиця 4.4. Сигнали для масштабування частоти імпульсів на виході OUT датчика

S0	S1	OUTPUT FREQUENCY SCALING ( $f_o$ )
L	L	Power down
L	H	2%
H	L	20%
H	H	100%

Таблиця 4.5 Сигнали для встановлення фільтра вимірювання спектра

S2	S3	PHOTODIODE TYPE
L	L	Red
L	H	Blue
H	L	Clear (no filter)
H	H	Green

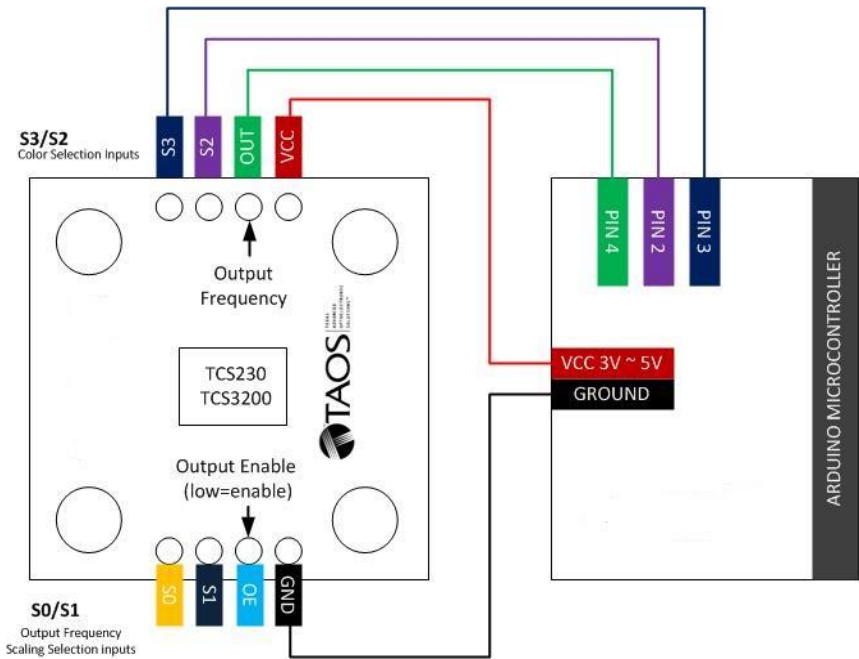


Рис. 4.44. Схема підключення датчика до плати Arduino



Рис. 4.45. Зовнішній вигляд датчика GY-86

Зазначений модуль підключається до мікроконтролера за допомогою шини I2C. Напруга живлення 3-5 В, також є вбудований конвертор логічних рівнів (сумісний з 3-5 В логікою). Технічні характеристики GY-86 наведено [141, 193].

Акселерометр і гіроскоп MPU-6050 – компактний і легкий модуль трьохосового акселерометра і трьохосовий гіроскоп, керований по протоколу I2C (TWI). Цей модуль використовується для контролю напрямку руху і кута повороту мобільного робота. Технічну характеристику MPU-6050 наведено [141, 193].

Оскільки дані акселерометра доволі неточні і мають велику похибку, для початку роботи було проведено калібрування. Також для збільшення точності буде використовуватись гіроскоп, дані з якого накладатимуться на дані акселерометра. На початку калібрування проведено кілька сотень вимірів з невеликим проміжком часу для визначення середнього відхилення. Накладання показників потрібно у зв'язку з тим, що акселерометр дуже чутливий до зовнішніх дій і його координати не залишаються постійно в одному положенні. Текст програми дистанційного керування мобільного робота наведено в Додатку К.

Використано компас HMC5883L, трьохосовий GY-282 I2C/SPI модуль магнітометра, який вимірює магнітне поле, причому робить це в трьох осях. Це дає можливість отримувати тривимірну картину

спрямованості магнітного поля і його величину. Керується як по шині I2C, так і по шині SPI, живлення мікросхеми 3.3 В, але шина толерантна до 5 В рівнів, отже до Arduino можна підключати безпосередньо. На платі встановлений параметричний стабілізатор на 3.3 В.

Для безконтактного визначення параметрів температури вибрали модуль безконтактного вимірювача температури MLX90614 (рис. 4.46), призначений для безконтактного вимірювання абсолютної температури об'єктів. Дані температури можна зчитувати як через цифровий інтерфейс SMBus (аналогічний I2C), так і через ШІМ-вихід з частотою ШІМ 10Гц або 1000Гц. Використовуваний датчик MLX90614 має широкі можливості з програмування, калібрування і конфігурації. Модуль має внутрішній стабілізатор, конденсатори фільтра з живлення і підтягуючі резистори на цифровій шині. Технічні характеристики датчика MLX90614 наведено [141, 193].



Рис. 4.46. Зовнішній вигляд датчика MLX90614

Для визначення температури та вологості повітря в теплиці вибрали датчик DHT11 – цифровий датчик температури і вологості, що дає змогу калібрувати цифровий сигнал на виході (рис. 4.47). Складається з ємнісного датчика вологості й термістора. Датчик також містить в собі АЦП для перетворення аналогових значень вологості і температури. Технічні характеристики датчика DHT11 наведено [141, 193].



Рис. 4.47. Зовнішній вигляд датчика DHT11

Для встановлення рівня вуглекислого газу в теплиці вибрано датчик CO<sub>2</sub> MG811 (Arduino-сумісний) від DFRobot, який розпізнає наявність у повітрі вуглекислого газу (рис. 4.48). Сенсор MG811 використовується для контролю якості повітря. Він відзначається високою чутливістю до вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) і низькою до парів води і алкоголю, стабільністю та відтворюваністю показів. Датчик віддає два вихідних сигнали – дискретний (низький рівень – висока концентрація) і аналоговий – поточна концентрація. Технічні характеристики датчика MG811 наведено [141, 193].



Рис. 4.48. Зовнішній вигляд датчика MG811

Датчик MG811 використовується для контролю якості повітря у теплиці на вміст CO<sub>2</sub> та інших шкідливих газів. Текст програми зчитування інформації з датчика CO<sub>2</sub> наведено в Додатку Л.

Для визначення перешкод на шляху мобільного робота вибрано ультразвуковий датчик HC-SR04 – це стабільний і точний ultrasonic sonar (сонар) відстані (рис. 4.49). Може вимірювати відстань від 2 см до 4,50 м, точність сягає 1 см. Використовується для контролю відстані до перешкоди, і у разі виявлення перешкоди – для зупинки системи та сигналізації про перешкоду [14]. Технічні характеристики датчика HC-SR04 наведено [141, 193].



Рис. 4.49. Зовнішній вигляд датчика HC-SR04

Для керування виконавчими механізмами мобільного робота, які відповідають за пересування теплицею та обертання відеокамери, використано Ardumoto Monster Moto Shield (рис. 4.50). Для збільшення потужності H-міст був замінений з L298 на два повномостових драйвери VNH2SP30. Шилд може керувати двома високострумowymi моторами. Живлення VIN і виходи мають потовщену контактну поверхню – на випадок пайки товстих дротів. Використовується з метою керування колекторними двигунами для руху, підйому штатива з датчиками і повороту башти. Технічні характеристики Ardumoto Monster Moto Shield наведено [141, 193].

Для пересування мобільного робота теплицею та обертання бортової відеокамери, яка визначатиме стиглість та кількість томатів, вибрали моторедуктор ZD13433 (рис. 4.51). Технічні характеристики моторедуктора ZD13433 наведено [193].



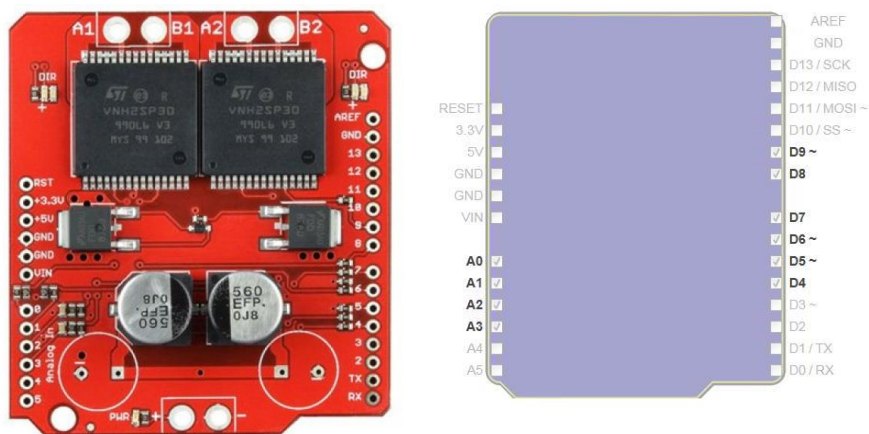


Рис. 4.50. Зовнішній вигляд датчика Arduimono Monster Moto Shield



Рис. 4.51. Зовнішній вигляд моторедуктора ZD13433

Текст програми керування двигунами мобільного робота наведено в додатку К.

Для реалізації завдань керування МРФ у спорудах закритого ґрунту розроблено такі принципові електричні схеми:

- схема приєднання бортового комп'ютера до контролера (Додаток В);
- схема керування електричними двигунами робота (Додаток Г);
- схема керування електричними двигунами робота, що відповідають за його пересування (Додаток Г);
- схема приєднання сприймаючих елементів робота (Додаток Д);
- схема електрична принципова силового контролера двигунів (Додаток Е).



Принципові електричні схеми призначені для повного відображення взаємозв'язків елементів МРФ у спорудах закритого ґрунту з урахуванням принципів їх дії і послідовності роботи.

Для використання МРФ у теплиці необхідне також обладнання трубо-водяного опалення, оскільки труби опалення у міжряддях використовуються як направляючі для мобільного робота. На (рис. 4.52) показані направляючі для МРФ та місця проведення фітомоніторингу.

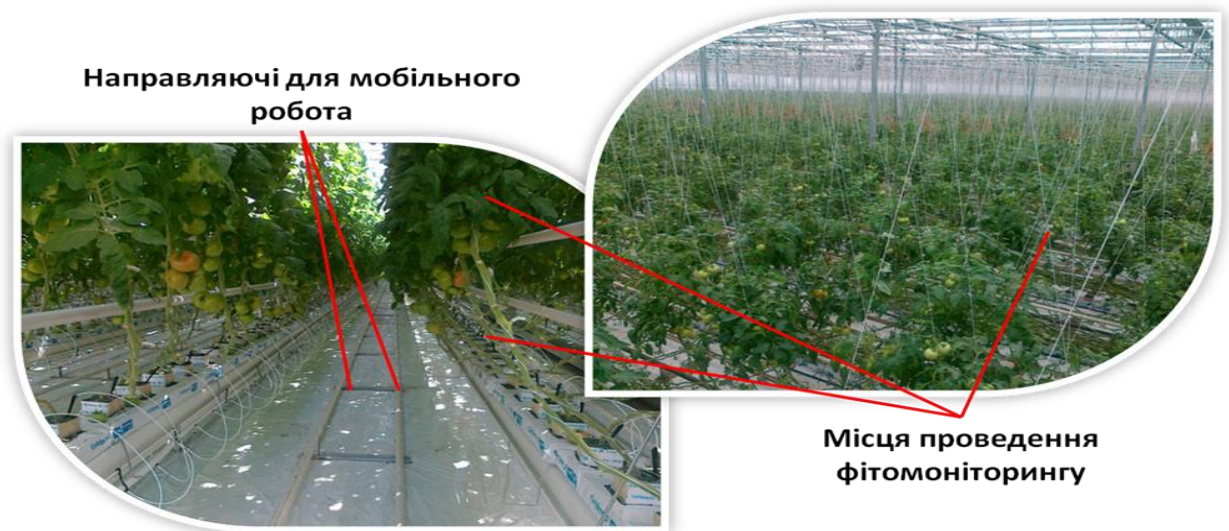


Рис. 4.52. Внутрішній вигляд теплиці

Реалізація завдання щодо вимірювання фітометричних та фітокліматичних параметрів тепличних культур здійснюється мобільним роботом фітомоніторингу, що містить раму, на якій змонтована ходова частина і механізм фіксації візка. Мобільний робот додатково має поворотну башту, відеокамеру, висувні механізми, елементи вимірювання фітометричних і фітокліматичних параметрів, блок керування та пару подвійних коліс з різним діаметром – передні зовнішні з діаметром 19 см, внутрішні – 8 см, задні внутрішні – 8 см, задні опорні – 5 см, кожна пара з яких служить для переміщення різними поверхнями направляючих. Зовнішній вигляд розробленого МРФ показано на (рис.4.53) [174].



Рис. 4.53. Зовнішній вигляд мобільного робота

Для проведення вимірювання мобільний робот переміщується по направляючих, які призначені для руху між рядами насаджень. Направляючі – це труби для опалення теплиці, які одночасно є платформою для пересування візка робота. Під час руху задіяні внутрішні колеса робота, що знаходяться на одній осі із зовнішніми. Зовнішні колеса використовуються для переміщення основною поверхнею споруди штучного клімату. Повертання пристрою здійснюється завдяки передачі різних зусиль на передні ведучі колеса, а задні зовнішні колеса у цей час є направляючими та можуть змінювати свій напрям руху в площині [174].

Рухи висувних механізмів здійснюються поступово у двох площинах – по вертикалі через піднімання по висоті і по горизонталі через горизонтальний рух висувного механізму шляхом повертання обертової башти та переміщення основної рухомої частини пристрою. Висувні механізми приводяться до руху шляхом подавання команд від блоку керування пристрою до крокових двигунів.

Структура МПЕКФ представлена на (рис. 4.54) і функціонує таким чином: керуючий блок 1 визначає місце для вимірювання фітометричних параметрів та надсилає команди через цифро-аналоговий перетворювач 2 до виконавчого механізму 3 рухомої платформи, що переміщує рухому платформу 4 пристрою до заданого місця по направляючих, які служать для руху між рядами насаджень та є одночасно трубами опалення теплиці і платформою для пересування візка-драбини. Після зупинки пристрою блок керування керує виконавчими механізмами башти, що приводять до руху горизонтальні висувні механізми 5 та забезпечують обертання башти 6, роботою камери спостереження 7 та рухами вертикальних висувних механізмів 8, оснащених групою фітокліматичних і фітометричних датчиків 9 для проведення фітокліматичних, фітометричних вимірювань та обстеження рослини на предмет захворювання і шкідників. Виміряні значення через аналогово-цифровий перетворювач 10 надсилаються до блока керування, що оброблює їх та відсилає до блока передачі даних 11 [174]. Після вимірювання процес повторюється у зворотному порядку, і МРФ рухається до наступної точки виміру. Провівши виміри в усіх необхідних точках, МРФ повертається до початкової точки або до пункту зарядження блока живлення 12.

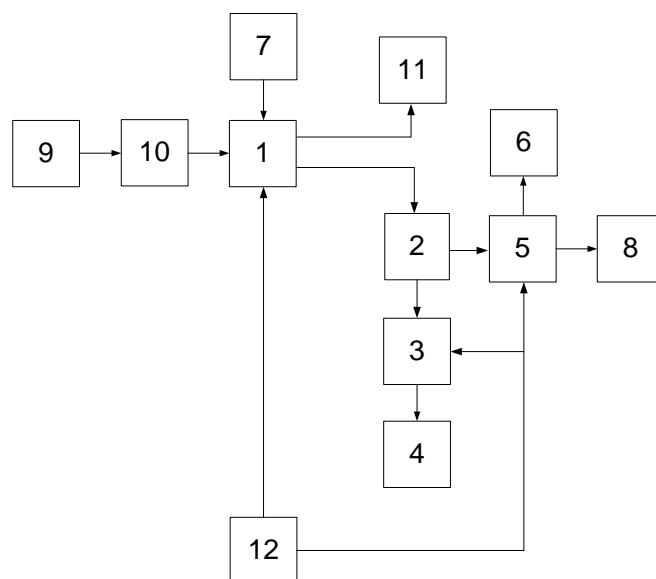


Рис. 4.54. Схема зв'язків складових мобільного робота

Зазначені характеристики технічних засобів та гнучке програмне середовище свідчать про переваги обладнання, використаного нами для МРФ у спорудах закритого ґрунту.

Апаратна реалізація системи керування мобільним роботом забезпечує:

- швидкодію, яка відповідає вимогам щодо переміщення МРФ у реальному часі;
- типові вимоги до бортових систем (є компактною, надійною і споживає мало енергії).

МРФ у спорудах закритого ґрунту використовується спільно з інтелектуальною системою керування енергетичними потоками промислової теплиці, що дає змогу існуючій системі керування під час побудови стратегій керування електротехнічними комплексами враховувати просторову розподіленість фітометричних параметрів, а також якісно контролювати й виконувати низку додаткових функцій: контролювати параметри мікроклімату і здійснювати фітомоніторинг рослин; проводити збір та обробку інформації зазначених параметрів у теплиці; створювати архіви даних для подальшого їх опрацювання; функціонувати в ручному, автоматичному і дистанційному режимах керування.

У розділі використані матеріали власних досліджень [10, 31, 46, 167, 170, 172, 173, 174, 176, 190, 192, 193, 196, 197, 198, 208, 279, 280].

#### **Висновки до Розділу 4**

1. За допомогою запропонованого методичного апарату параметричного синтезу робототехнічних систем, визначаються оптимальні параметри і здійснюється вибір раціонального варіанта побудови мобільного робота фітомоніторингу, що забезпечить гарантоване виконання поставлених завдань.

2. Для забезпечення взаємодії багатьох різнорідних апаратних засобів мобільного робота фітомоніторингу використано середовище ROS, яке забезпечує функціонування окремих вузлів, дає користувачу можливість оперувати високорівневими абстракціями, незважаючи на джерела отримання інформації, та забезпечує клієнт-серверну архітектуру мобільного робота, що, у свою чергу, дає змогу не концентрувати обчислювальні потужності в самому роботі, а зробити їх рівномірно розподіленими. Розроблено загальний алгоритм і програмне забезпечення щодо використання мобільного робота фітомоніторингу в спорудах закритого ґрунту на основі використання програмних середовищ Processing/Wiring, Node-RED та LabVIEW.

3. Розроблено структуру архітектури навігаційної системи мобільного робота фітомоніторингу, що дає можливість реалізовувати формування стратегій керування його переміщенням на стратегічному, тактичному та виконавчому рівнях. Досліджено розподіл температур у просторі споруди закритого ґрунту із використанням методів чисельного моделювання для створення, збереження та уточнення температурного поля, що дає змогу побудувати маршрут переміщення мобільного робота фітомоніторингу. Оптимізовано переміщення мобільного робота фітомоніторингу в теплиці із використанням системи технічного зору для подолання перешкод; відстеження поточної позиції мобільного робота фітомоніторингу на маршруті. Розроблено систему керування, що дає можливість отримувати і передавати інформацію із використанням датчиків інтелектуального електротехнічного комплексу.

4. Враховуючи стохастичну природу можливих перешкод в теплиці, доцільно для орієнтування мобільного робота в просторі блочної теплиці використовувати імовірнісні алгоритми машинного навчання. Після періоду навчання ефективність роботи алгоритму стимулюючого навчання значно збільшується і дає змогу мобільному роботу фітомоніторингу самостійно пересуватись у просторі блочної теплиці, оминаючи перешкоди.

5. Розроблено математичну модель робота і обґрунтовано можливість її використання під час створення системи керування таким роботом. При цьому зроблено такі припущення: рух робота здійснюється в горизонтальній площині; механізм робота є абсолютно жорстким; відсутнє проковзування. Аналізуючи результати моделювання, виявлено нелінійний характер впливу моменту опору повороту на перехідний процес зміни кутової швидкості робота, враховуючи, що зі збільшенням радіуса повороту вплив моменту опору зменшується, тому модель не можна апроксимувати аперіодичною ланкою першого порядку, не втративши при цьому необхідну для практичного використання точність моделювання. Модель пройшла перевірку на адекватність шляхом порівняння отриманих даних із експериментальними за методом Фішера. Значення розрахованої похибки не перевищує 5% від загальної кутової швидкості робота, що підтверджує адекватність моделі та задовольняє технологічні вимоги.

6. За результатами аналітичного конструювання регуляторів отримано вираз оптимальної лінійної швидкості переміщення мобільного робота, що мінімізує енергетичні витрати акумуляторних батарей мобільного робота фітомоніторингу. Вибір швидкості пересування та параметрів оптимізації залежить від відстані, на яку робот повинен переміститись: при відстані до 5 метрів використовується параболічний графік швидкості, а при більшій – трапецієвидний.

7. Виготовлено зразок мобільного робота моніторингу фітостану та повітря в спорудах закритого ґрунту, який пройшов виробниче випробування в ПрАТ «Комбінат «Тепличний» і отримав схвальну оцінку виробничників (акти про впровадження результатів науково-дослідних робіт додаються). У реалізації системи керування використано кілька мікроконтролерів, а саме: Raspberry Pi 3, Arduino Nano, Arduino Mega 2650 та PIC-контролер.

## РОЗДІЛ 5. РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ПРОМИСЛОВЕ ВИПРОБУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПОТОКАМИ ПРОМИСЛОВОЇ ТЕПЛИЦІ

### 5.1. Розробка системи автоматичного керування енергетичними потоками промислової теплиці

Для визначення основних функціональних частин, взаємозв'язків та призначення системи автоматизованого керування енергетичними потоками промислової теплиці (САКЕППТ) заданої якості розроблено структурну схему. На схемі відображені загальна структура системи, її основні блоки та зв'язки між ними. Структурну схему САКЕППТ для виробництва продукції заданої якості представлено на (рис. 5.1).



Рис. 5.1. Структурна схема системи автоматизованого керування енергетичними потоками промислової теплиці

На (рис. 5.2) показана інформаційна структура САКЕППТ. Вона включає шість підсистем:

- автоматизована система керування виробництвом тепличного комплексу;
- мобільного робота фітомоніторингу (МРФ);
- автоматизоване робоче місце оператора (АРМ);
- АРМ диспетчерського керування і збору даних (ДКЗД);
- технологічний сервер обробки даних (ТСОД);
- підсистема підтримки прийняття рішень системи автоматизованого керування енергетичними потоками промислової теплиці (ППР САКЕПІТ).

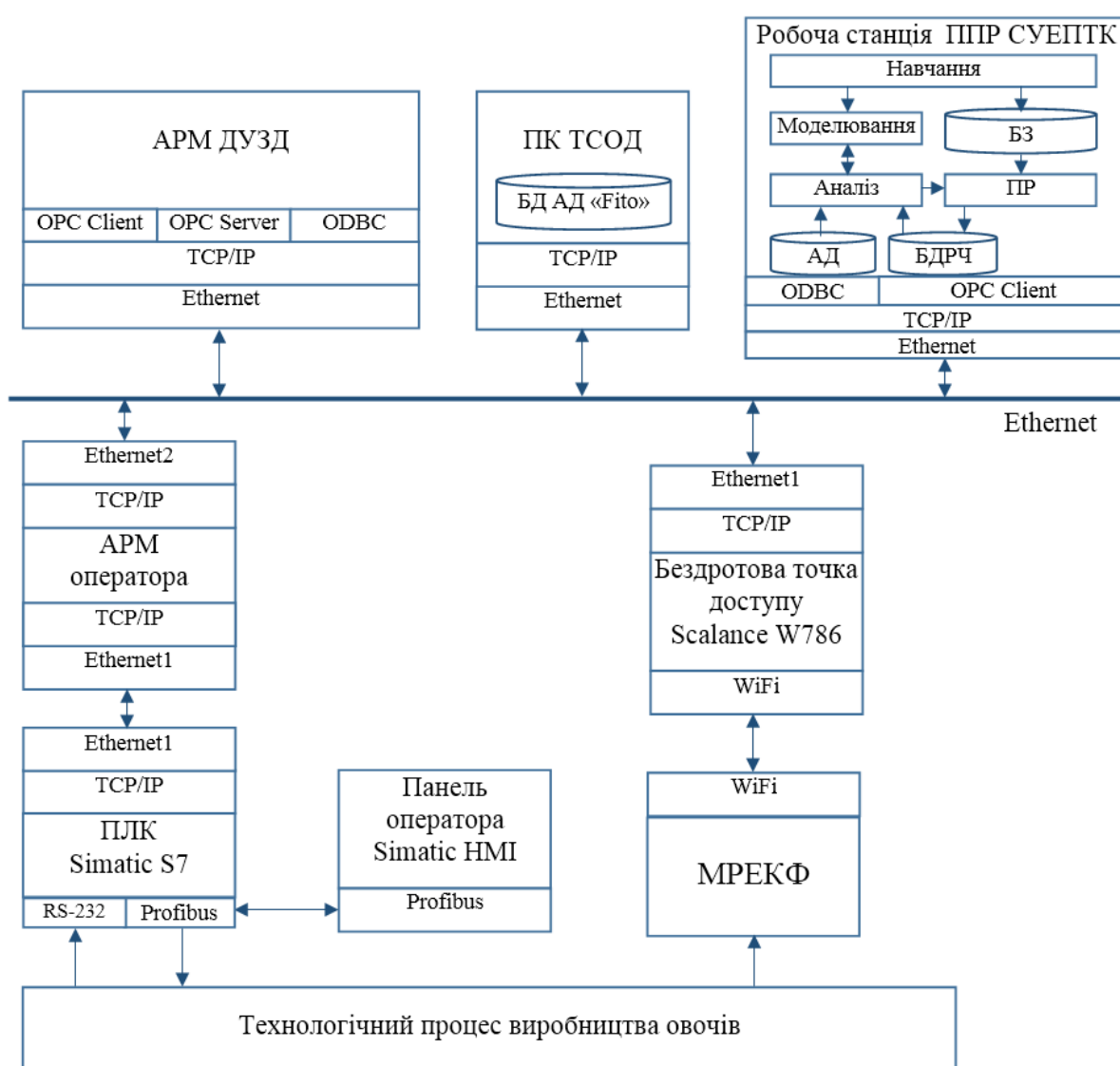


Рис. 5.2 Структура системи автоматичного керування енергетичними потоками промислової теплиці та зв'язки між її складовими:



Всі підсистеми можуть працювати в локальному режимі, що підвищує надійність роботи всієї системи.

Інтегрована САКЕППТ – це багаторівнева автоматизована система керування, яка призначена для комплексної автоматизації функцій керування інженерно-технічною, адміністративно-господарською, виробничо-технологічною і соціальною діяльністю промислових підприємств і забезпечує найефективніше вирішення завдань з керування виробництвом тепличних комплексів. Інтеграцію системи розглянемо в кількох аспектах: технічному, функціональному, інформаційному, програмному та економічному.

Технічна інтеграція, це по суті використання єдиного комплексу спільних обчислювальних засобів, автоматизованих робочих місць спеціалістів і локальних мереж, об'єднаних в одну розподільну обчислювальну систему, яка забезпечує автоматизовану реалізацію всіх функцій компонентів САКЕППТ.

Функціональна інтеграція САКЕППТ забезпечує єдність цілей та узгодженість критеріїв і процедур виконання виробничо-господарських і технологічних функцій, пов'язаних із досягненням поставлених цілей. Основою функціональної інтеграції є: оптимізація функціональної структури всієї системи, декомпозиція системи на локальні підсистеми, формалізований опис функцій кожної підсистеми і протоколів взаємодії підсистем.

Інформаційна інтеграція полягає в єдиному комплексному підході до створення і ведення інформаційної бази всієї системи та її компонентів на основі єдиного технологічного процесу збору, зберігання, передачі й обробки інформації, який забезпечує узгоджену інформаційну взаємодію усіх підсистем САКЕППТ.

Програмна інтеграція означає використання узгодженого і взаємопов'язаного комплексу моделей, алгоритмів і програм для забезпечення спільного функціонування всіх компонентів із САКЕППТ.

Економічна інтеграція є узагальненим комплексним показником інтеграції системи і полягає в забезпеченні цілеспрямованого і узгодженого функціонування всіх компонентів САКЕППТ для досягнення найвищого економічного ефекту функціонування всієї системи.

Розглянемо технічне забезпечення САКЕППТ. На рівні керування процесом система представлена програмованим логічним контролером (ПЛК), який взаємодіє з технологічним процесом, використовуючи датчики та виконавчі механізми. Більшість технологічних процесів виробництва керуються одним ПЛК, для зв'язку з об'єктом керування використовують розподілені засоби введення/виведення. У системі керування в якості центрального вузла керування використовується ПЛК Simatic S7, центральний процесор якого з'єднується з розподіленою периферією (панель оператора Simatic HMI), використовуючи мережу Profibus.

Локальне супервізорне керування не досягається лише за рахунок SCADA-програми, встановленої на АРМ оператора. Інтеграція ПК АРМів з рівнем контролерів досягається з використанням промислових мереж.

Для збору просторово-розподіленої інформації в теплиці використовується МРФ. Передача даних відбувається по безпроводному каналу передачі вимірювальної інформації у мережу Ethernet за стандартом IEEE 802.11 (Wi-Fi) через бездротову точку доступу Scalance W786. Для реалізації такого варіанту передачі цифрових потоків даних МРФ був укомплектований Wi-Fi модулем, що підтримує три основні редакції необхідного стандарту – 802.11a, 802.11b, 802.11g та є сумісним із керуючим пристроєм.

Верхній рівень керування (керування виробництвом) реалізований АРМом ПК ДКЗД (диспетчерського керування і збору даних), технологічний сервер обробки даних (ПК ТСОД). З технічної точки зору ці вузли являють собою комп'ютери зі встановленим спеціалізованим програмним забезпеченням (рис. 5.2.). Всі вузли верхнього рівня об'єднані в єдину мережу Ethernet.

Наступним кроком розглянуто функціональну структуру САКЕППТ. Засоби промислової АСКТП (датчики і виконавчі механізми) забезпечують збір та обробку даних процесу, а також реалізацію керуючої дії. МРФ забезпечують збір просторово-розподіленої інформації в теплиці. Крім первинної обробки даних вони включають функції перетворення в уніфікований сигнал. Використання додаткових інтелектуальних функцій в цій системі не передбачено.

ПЛК забезпечує функціонування контурів регулювання, програмного керування, аварійного блокування та інших алгоритмів у реальному часі. Програмне забезпечення контролерів також дає можливість переводити контури та виконавчі механізми в дистанційний режим, по якому можливе супервізорне керування іззовні через інтерфейсні канали. Також через ці канали надається можливість налаштування параметрів регуляторів та формування уставок. Така структура робить систему надійною при різноманітних збоях в роботі рівня SCADA/HMI, оскільки може функціонувати в автоматичному режимі [244].

Рівень *SCADA/HMI* дає такі можливості:

- збір, обробка та супервізорне керування змінними рівня ПЛК – функціонування та наповнення бази даних реального часу;
- доступ іззовні до власної бази даних реального часу для читання/запису;
- відображення технологічних змінних на екрані оператора в зручному для нього текстовому та графічному вигляді;
- втручання в технологічний процес по мірі необхідності, а саме: можливість змінювати уставки регуляторам; переводити контури регулювання в автономний, каскадний та ручний режими; формувати завдання виконавчим механізмам в ручному режимі; перемикає завдання на дистанційний режим формування (завдання задається з верхнього рівня);
- відображення аварійних повідомлень з можливістю їх квітування, фіксацією часу виникнення/квітування/зникнення;

- відображення повідомлень від верхнього рівня керування з можливістю їх квітування, фіксацією часу виникнення/квітування;
- ведення журналу повідомлень, алармів, дій оператора з можливістю їх відображення;
- ведення архіву технологічних змінних з можливістю його перегляду у вигляді графіка;
- формування звітів за зміну по основних технологічних параметрах.

Таким чином, взаємодія засобів SCADA/HMI із засобами рівня ПЛК та МРФ побудована на основі бази даних реального часу SCADA (**БДРЧ**), яка має свою локальну копію цих даних. Взаємодія з верхнім рівнем керування забезпечується через цю ж БДРЧ. Формування завдань може проводитись локально (оператором) або дистанційно (з верхнього рівня керування). Таким чином, зміна режимів керування може проводитись як в дорадчому режимі (через повідомлення), так і в прямому режимі (через зміну завдання з верхнього рівня) [140].

Верхній рівень керування представлений АРМом диспетчерського керування і збору даних (ДКЗД), технологічним сервером обробки даних (ТСОД) та ППР САКЕППТ.

ДКЗД надає такі можливості:

- збір, обробка (пакетами прикладних програм і засобами математичного забезпечення) та супервізорне керування змінними рівня SCADA/HMI – функціонування бази даних реального часу;
- доступ іззовні до власної бази даних реального часу для читання/запису;
- відображення виробничих змінних на екрані оператора в зручному для нього текстовому та графічному вигляді;
- формування уставки регуляторам підсистем в дистанційному або дорадчому режимі;

- відображення аварійних повідомлень за основними виробничими параметрами з можливістю їх квітування, фіксацією часу виникнення/квітування/зникнення;
- відображення повідомлень від підсистеми підтримки прийняття рішень;
- ведення журналу повідомлень, алармів, дій оператора з можливістю їх відображення;
- ведення архіву виробничих змінних з можливістю його перегляду у вигляді графіка;
- формування звітів за зміну за основними виробничими параметрами.

Таким чином, ДКЗД призначене для координації роботи підсистем САКЕППТ шляхом формування завдання як в дорадчому режимі (завдання формується як повідомлення оператору), так і прямої зміни (завдання автоматично записується в контролери). Завдання може змінити оператор ДКЗД або підсистема підтримки прийняття рішень САКЕППТ шляхом запису його в БДРЧ SCADA ДКЗД.

Технологічний сервер обробки даних (ТСОД) призначений для ведення архіву основної виробничої інформації. По суті ТСОД є, з одного боку, сервером архіву, з іншого – базою даних реального часу рівня виробництва. Під реальним часом тут розуміється м'який реальний час, де дані оновлюються кожні 5-10 с. Архів також зберігає фітометричні та фітокліматичні дані від МРФ. АРМ оператора призначене для локального керування САКЕППТ. Дані записуються в ТСОД у потрібному форматі.

ППР САКЕППТ призначена для формування повідомлень оператору рекомендованих дій та завдання у випадку нештатних ситуацій та зміни технологічного режиму керування для забезпечення заданої якості рослинної продукції. Система включає наступні функціональні модулі:

- базу даних реального часу, яка забезпечує взаємодію з виробничим процесом через МРФ;

- модуль вибірки архівних даних (АД), який забезпечує періодичну або на запит вибірку архівних даних за певними критеріями (фітотемпературним, фітометричним, критерієм ефективного використання енергетичних ресурсів під час виробництва рослинної продукції заданої якості);
- модуль аналізу, призначений для ситуаційного аналізу стану САКЕППТ за даними реального часу через пакети прикладних програм і засоби математичного забезпечення, вибірки архівних даних та моделі об'єкта (виробничого процесу);
- модуль прийняття рішень, який на основі бази знань і стану системи формує завдання та повідомлення оператору ДКЗД;
- модель об'єкта, який здатний прогнозувати поведінку системи та розраховувати відповідні параметри моделі;
- модуль навчання, який забезпечує корекцію моделі та бази знань;
- модуль визначення оптимальних параметрів мікроклімату, який забезпечує людино-машинний інтерфейс для ППР САКЕППТ.

Таким чином, модулі БДРЧ та вибірки АД призначені для зв'язку з об'єктом керування і включають всю інформацію про його поточний та минулий стан, модулі аналізу, моделі, бази знань та прийняття рішень і забезпечують основу функціонування ситуаційної поведінки системи.

Функціонування всієї САКЕППТ забезпечується взаємодією функцій підсистем. Режим загальносистемних функцій (локальний, дорадчий, дистанційний) визначається оператором і станом системи. У разі виходу з ладу ПК АРМ ДКЗД формування завдання для регуляторів проводиться на АРМ оператора. Така функціональна структура робить систему стійкою до збоїв у роботі ПК.

Розглянемо інформаційну структуру САКЕППТ. МРФ розроблений на основі мініатюрного портативного комп'ютера Raspberry Pi 3 з відповідним програмним середовищем. Передача даних відбувається безпроводним

каналом передачі інформації у мережу Ethernet за стандартом IEEE 802.11 (Wi-Fi).

Технологічний процес автоматизований з використанням ПЛК Simatic S7 (Siemens). АРМ оператора реалізоване на SCADA-пакеті Siemens TIA Portal. База даних реального часу SCADA (БДРЧ) забезпечує збір і обробку даних процесу з ПЛК в реальному часі, використовуючи мережі Profibus, Ethernet та інтерфейс TCP/IP. Для цього SCADA має власний драйвер S7 TCP/IP, який підтримує неконфігуровані з'єднання з лінійкою контролерів Simatic Step7.

Зв'язок між ПК оператора проводиться з використанням Ethernet і стеку протоколів TCP/IP. ПК оператора має дві мережні карти, що забезпечує розв'язання мереж рівня керування процесом та виробництвом. Таке рішення диктується умовами функціональної та виробничої безпеки і надійності системи. Тобто весь зв'язок верхнього рівня з рівнем контролерів забезпечується тільки через БДРЧ SCADA.

Для обміну даними реального часу використовується технологія OPC DA. АРМ ДКЗД побудоване на TIA Portal, розроблено програмне забезпечення для реалізації даної системи в SCADA-системі користувача, яка через драйвер OPC-клієнта обмінюється даними із SCADA-підсистемами АСКТП, що надають доступ до своїх даних реального часу через драйвер OPC-сервера. Великий обсяг даних реального часу припадає на основні технологічні параметри всього виробництва, які зчитуються з АСКТП у БДРЧ виробництва. Серед даних реального часу окремо виділені змінні для дорадчих дій та генерації повідомлень з ПК АРМ ДКЗД. Ці змінні можуть змінюватися диспетчером АРМ ДКЗД або формуватися підсистемою підтримки прийняття рішень (САКЕППТ).

Для формування загального архіву основних технологічних параметрів виробництва ПК АРМ ДКЗД проводить запис даних в ПК ТСОД, використовуючи стандартний інтерфейс доступу до архівних даних ODBC. Крім ДКЗД в БАД «Fito» ведеться запис даних МРФ.

Підсистема ППР САКЕППТ включає свою копію бази даних реального часу, яка формується даними з БДРЧ виробництва. Для обміну використовується технологія OPC, в якому ППР є OPC-клієнтом. Така структура дає можливість підключити ППР до будь-якої іншої системи, що підтримує OPC. Дані реального часу також включають змінні для дорадчих дій, які формуються модулем прийняття рішень.

Для аналізу ППР потребує архівних даних, які формуються в результаті вибірки даних з БД «Fito». Для доступу до архівних даних використовується технологія ODBC. ПК ППР САКЕППТ побудований на LabView (National Instruments), розроблено програмне забезпечення для реалізації даної системи в SCADA-системі користувача.

Таким чином, ППР постійно аналізує стан виробничого процесу. Швидкість доставки даних реального часу від МРФ до ППР порядку 5-10 с, що достатньо для дорадчих систем. У разі виникнення нештатної ситуації (визначається аналізом вектора стану та змінних аварійних ситуацій) ППР може провести вибірку архівних даних.

Для інформаційної взаємодії між підсистемами в реальному часі використана технологія OPC.

Технологія OPC забезпечує одній програмі (OPC-Клієнту) доступ до даних процесу іншої програми (OPC-Сервера) через стандартний набір інтерфейсів. У САКЕППТ використовуються інтерфейси OPC DA, які призначені саме для обміну даними реального часу. COM-інтерфейси OPCDA стандартизують доступ OPCDA-Клієнта до даних процесу OPCDA-Сервера. У свою чергу програмами OPC-Серверами в системі є інші SCADA. Тобто OPCDA-Сервер надає доступ OPCDA-Клієнту до бази даних реального часу SCADA, тому служить в якості драйвера-шлюза між БДРЧ ДКЗД та SCADA [235].

Всі доступні в САКЕППТ SCADA-програми можуть бути OPCDA-Клієнтами, оскільки у них наявний відповідний драйвер. Таким чином, в даному випадку OPCDA-Сервер можна назвати універсальним (з боку



SCADA) драйвером зв'язку. Слід зазначити, що ряд SCADA-програм повністю базуються на OPC (Genesis, Master SCADA).

Найчастіше OPC-технологія використовується як універсальний інтерфейс до драйверів контролерів та периферійних пристроїв. Тобто разом з контролером може поставлятися спеціальна програма – OPC-Сервер, яка надає контролеру доступ до змінних цього типу. Тобто OPC-Сервер, з одного боку, має драйвери для зв'язку з контролерами за конкретними протоколами промислових мереж, а з іншого – надає універсальний OPC-інтерфейс для зв'язку з сервером SCADA-програми. У такій системі SCADA буде OPC-Клієнтом [287].

Для реалізації зв'язку по OPC користувач повинен [235]:

1. Налаштувати OPC-Сервер за допомогою спеціалізованої програми-конфігуратора, що поставляється разом з ним: створити всі необхідні змінні сервера, тобто дати їм ім'я (ItemID) та вказати джерела даних в ПЛК, на які вони посилаються.

2. У OPC-Клієнті вказати:

- назву OPC-Сервера, з яким необхідно зв'язатися (ProgID);
- для вибраної змінної в якості джерела даних вказати ім'я на OPC-Сервері, тобто ItemID, що був створений на 1-му кроці. Як правило, ItemID вибирається зі списку, який надає Browser на стороні OPC-Клієнта.

OPC DA технологія базується на Клієнт-Серверній архітектурі. OPC-Клієнт користується послугами OPC-Сервера, використовуючи COM-інтерфейси його об'єктів. OPC-Сервер отримує необхідні дані через драйвери зв'язку і зберігає їх у своїй базі даних реального часу. Для того, щоб доступитися до даних OPC-Сервера, OPC-Клієнт створює для себе OPC-Group, в яких створює OPC-Item, що посилаються на ці дані [287].

OPC-Клієнт (OPC Client) – прикладна програма, яка вміє користуватися об'єктами OPC-Сервера за допомогою OPC-інтерфейсів. OPC-Сервер (OPC Server) – прикладна програма, яка надає доступ до визначених у специфікації OPC COM-об'єктів за допомогою OPC-інтерфейсів.

З одним OPC-Сервером можуть з'єднатися декілька OPC-Клієнтів. З іншого боку, одна і та сама програма OPC-Клієнт може одночасно користуватися послугами декількох OPC-Серверів. Тобто OPC технологія є мультиклієнтною і мультисерверною.

Оскільки OPC-Сервер – це COM-Сервер, він реєструється на комп'ютері унікальним числовим ідентифікатором (GUID) та має унікальний строковий програмний ідентифікатор (ProgID). Тобто для того, щоб для OPC-Клієнта визначити, з яким OPC-Сервером на тому самому ПК йому необхідно з'єднатися, достатньо вказати його ProgID.

Об'єкт OPC-Item надає доступ до джерела даних (надалі – тег) в межах OPC-Сервера, яке ідентифікується унікальним в межах сервера ідентифікатором ItemID. Тому під час створення OPC-Item'a вказується ItemID необхідного тега. Правила ідентифікації даних залежать від реалізації OPC-Сервера, а механізм визначення їх джерел (наприклад, адреса пристрою та змінної в ПЛК), як правило, реалізується в конфігураторі цього сервера. Весь список ItemID має плоску (неієрархічну) структуру імен, які повністю відповідають назві тегів БДРЧ. Для навігації по списку/дереву ідентифікаторів OPC-Сервери мають об'єкт OPC Browser [287].

OPC-Item належить Клієнту, який його створив, і тому його не можуть використовувати декілька клієнтів. Тим не менше є можливість посилатися на одні й ті самі дані.

З кожним OPC-Item-ом асоціюється поточне значення (Value), позначка часу (Time Stamp) та якість (Quality). Це дає можливість визначити свіжість даних та їх достовірність, що має велике значення під час формування дорадчих повідомлень.

OPC-Group – об'єкт OPC-Сервера, призначений для виконання групових операцій над OPC-Item-ами. Оскільки OPC-Item не може існувати без цього об'єкта, спочатку OPC-Клієнт створює OPC-Group, а потім в його межах створює OPC-Item-и. В інтерфейсі OPC DA 2.0 кожний OPC-Group, як і все його наповнення, належить окремому Клієнту. Механізм

групування дає змогу розділяти дані за принципом читання/запису, періодичністю операцій та активувати/деактивувати відновлення змінних [287].

Технологія OPC надає двохсторонній доступ до даних, тобто як для читання, так і для запису. Механізми реалізації цих сервісів практично однакові за принципом, однак мають свої особливості у різних версіях специфікації OPC DA. Читання зводиться до вирішення наступних питань: коли на OPC-Сервері повинні відновлюватися дані з пристроїв для кожного з OPC-Item-ів; яким чином про відновлення даних дізнається OPC-Клієнт і як він їх отримає. Операції читання та запису проводяться одночасно для всіх Item-ів у межах OPC-Group.

Синхронне читання (Sync Read). Ініціація процесу відновлення змінних на OPC-Сервері може проводитись самим OPC-Клієнтом. Тобто за необхідності OPC-Клієнт робить запит на відновлення певної OPC-Group. У такому випадку Клієнт може заморозити виконання своєї програми (поток), поки не дочекається результату читання від OPC-Сервера. Такий спосіб називається синхронним читанням (Sync Read).

Асинхронне читання (Async Read). Механізм синхронного читання гальмує роботу програми (поток) Клієнта, тому доречний для читання невеликих обсягів даних. Альтернативою йому може бути використання асинхронного читання (Async Read), при якому OPC-Клієнт теж ініціює обмін, однак не чекає результату обробки. Замість цього, закінчуючи процес читання, OPC-Сервер викликає функцію зворотного виклику OPC-Клієнта (обробник події AsyncReadComplete), в яку передає результат читання. Для реалізації цього механізму необхідно, щоб в об'єкті OPC-Group був активований механізм підписки (Subscript) [287].

Періодичне читання з оповіщенням (Periodical Read with Notify). За необхідності відновити дані обидва наведених вище способи потребують від OPC-Клієнта кожний раз проводити запит до OPC-Сервера. Однак, як правило, дані необхідно читати періодично через певні інтервали часу.

Для цього в специфікаціях OPC DA є механізм періодичного читання з оповіщенням (Periodical Read with Notify). Під час створення OPC-Group Клієнт замовляє частоту відновлення Item-ів у межах цієї групи. Через вказані проміжки часу OPC-Сервер буде відновлювати ці дані, а результат зберігатиме в кеші (Cache). Якщо дані (Value або Quality) хоча б для одного OPC-Item-а в OPC-Group змінилися, буде викликана зворотна функція оповіщення (Notify), тобто обробник події DataChange, в параметрах виклику якого будуть передані нові значення. Для ефективного використання цього механізму можна скористатися зоною нечутливості (Deadband). Необхідно зазначити, що в об'єкті OPC-Group повинен бути активований механізм підписки та прапорець активності (ACTIVE FLAG). Крім того, періодично відновлюватись будуть тільки активні OPC-Item [287].

Операції запису можуть проводитись двома способами: синхронний запис (Sync Write) і асинхронний запис (Async Write). Функціонування повністю аналогічне, як і в операціях читання. У САКЕПІТ використовується періодичне читання з оповіщенням, що найбільш підходить для періодичного оновлення даних в реальному часі. Для запису використовується асинхронний запис.

У САКЕПІТ бази даних використовуються для ведення історії подій, збереження значень даних від МРФ і даних АРМ оператора. У цьому контексті можна виділити два способи доступу до даних: для запису та для читання.

Дані в архів зберігаються, як правило, в тому форматі, який пропонує прикладна програма LabView. Тобто тип архіву та формат даних, що записуються, диктується вимогами цього програмного засобу або вибирається з ряду стандартних. Рідше є можливість в корегуванні розміщення, типу та формату бази даних. Тому можна умовно припустити, що під час запису даних проблем із сумісністю не виникає.

Інша ситуація виникає під час доступу до даних для читання. Якщо програмні засоби, які пишуть дані і які їх читають, підтримують різні

формати, то виникає проблема, пов'язана із сумісністю форматів, а отже й з доступом до даних для читання. Очевидно, що одне з рішень, яке може бути запропоновано – це вибір програмних засобів, які підтримують єдиний формат доступу до баз даних. Однак, як правило, вибір програмних засобів часто виступає в якості обмеження під час побудови систем, особливо коли системи впроваджуються поетапно. Крім того, такий підхід не дає гнучкості під час реалізації системи, адже обмеження диктуються вибором засобів одного виробника. Інше рішення – це використання додаткового спеціалізованого програмного забезпечення, яке перетворює дані з одного формату в інший, або написання додаткових бібліотек. Такий підхід дорогий в рішенні і потребує тривалої апробації [287].

Найпростішим рішенням, яке доступне в сучасних програмних засобах ІС, є використання стандартних технологій доступу до баз даних. Серед них можна виділити використання СКБД з підтримкою стандартної мови запитів SQL, а також стандартних інтерфейсів доступу до баз даних ODBC та OLEDB. Крім наведених технологій є й інші відомі і, можливо, більш прогресивні рішення, однак для наведеної системи найбільш підходить технологія ODBC, оскільки підтримується ПЗ МРФ та оператора. ODBC (Open Database Connectivity) – один із стандартних інтерфейсів доступу до реляційних баз даних, які засновані на мові SQL. Зв'язок з різними джерелами даних проводиться за допомогою драйверів ODBC, які оформлені у вигляді динамічних бібліотек (DLL) і підтримують єдиний інтерфейс ODBC API, що базується на виконанні SQL-запитів. Тобто, незалежно від типу джерела даних, прикладна програма генерує SQL-запити, які відправляються потрібному драйверу, що працює з даним джерелом. Драйвер забезпечує перетворення цих запитів у мову джерела або сам виконує необхідні операції, що вказані в запиті [287].

Для користувача даної технології необхідно зробити таку послідовність операцій. В адміністраторі ODBC, який знаходиться в панелі керування

адміністратора Windows, створюється DSN (Data Source Name) для необхідного джерела даних [287]:

- вибирається тип DSN: System DSN (доступний всім користувачам), User DSN (доступний поточному користувачу), File DSN (настройки зберігаються в окремому файлі);
- вказується ім'я DSN;
- вибирається драйвер ODBC;
- налаштовується драйвер для конкретного джерела даних.

У клієнтській прикладній програмі в якості джерела даних вказується ім'я DSN. З'єднання прикладної програми з необхідним джерелом даних забезпечується диспетчером драйверів (Driver Manager), який реалізований у вигляді бібліотеки ODBC.DLL.

Головне меню системи керування виробництвом рослинної продукції тепличних комплексів для виробництва продукції заданої якості представлено на (рис. 5.3).



Рис. 5.3. Головне меню САКЕПІТ для виробництва продукції заданої якості

На (рис. 5.4) представлено алгоритм функціонування системи керування виробництвом рослинної продукції.

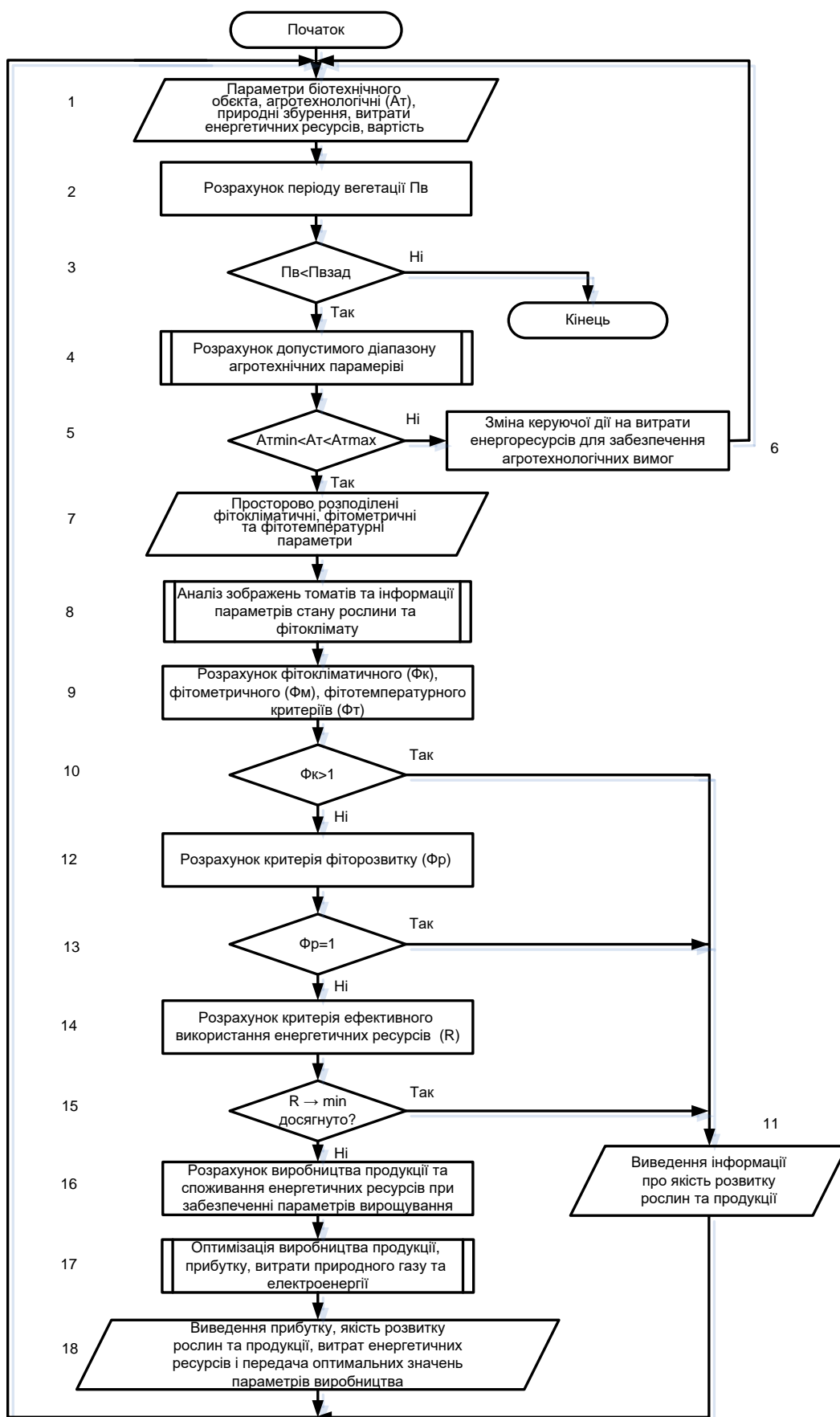


Рис. 5.4. Алгоритм функціонування системи керування виробництвом рослинної продукції

Меню фітомоніторингу представлено на (рис. 5.5).

### МЕНЮ ФІТОМОНІТОРИНГУ

**Розташування рослини**

Номер ряду: 58  
Номер рослини: 15

**Дата фітомоніторингу**

рік: 2017, місяць: 4, день: 1

[Головне меню системи управління](#)

**Фітометричні показники**

Кількість квіточок у суцвітті, шт: 11

Кількість плодів на гілці, шт: 9

Середня вага плоду рослини, грам: 117

Приріст ваги плодів рослини, грам/день: 135

Ступінь зрілості томатів: 0,83

Температура рослини, °C: 22

Середня величина діаметра плоду, мм: 67

**Показник фіторозвитку:** 0,83  
**Відхилення показника фіторозвитку:** -0,17

**Фітокліматичні показники**

Температура повітря, °C: 23

Вологість повітря, %: 67

Інтенсивності сонячної радіації, мДж/м²: 4,35

Вуглекислий газ, %: 0,0425

Поживних речовин, мл: 400

**Фітокліматичний показник:** 1,15  
**Відхилення фітокліматичного показника:** 0,15

**Фото зображення томата**

Рис. 5.5. Меню фітомоніторингу

Меню системи керування енергетичними потоками тепличного комплексу представлено на (рис. 5.6).

### МЕНЮ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПОТОКАМИ ТЕПЛИЧНОГО КОМБІНАТУ

**Показники ефективності виробництва**

**Показник якості**

Значення показника якості томатів: 0,67

Значення показника якості розвитку рослин: 0,74

**Відхилення показника ефективного використання енергетичних ресурсів відносно якості розвитку рослин:** 0,46

**Відхилення показника ефективного використання енергетичних ресурсів відносно технологічних вимог:** 0,2

**Поточна дата**

рік: 2017, місяць: 4, день: 1

[Головне меню системи управління](#)

**Відхилення параметрів мікроклімату**

Температура повітря, °C: 3,1

Вологість повітря, %: 8,5

Інтенсивності сонячної радіації, мДж/м²: 1,15

Вуглекислий газ, %: 0,012

Поживних речовин, мл: 15

**Параметри мікроклімату**

Температура повітря, °C: 24

Вологість повітря, %: 61

Інтенсивності сонячної радіації, мДж/м²: 4,75

Вуглекислий газ, %: 0,0411

Поживних речовин, мл: 420

**Кліматичні показники**

Температура повітря, °C: 15

Вологість повітря, %: 67

Інтенсивності сонячної радіації, мДж/м²: 4,75

Вуглекислий газ, %: 0,0388

**Споживання енергетичних ресурсів електротехнічними комплексами, що забезпечують технологію виробництва**

загальне споживання природного газу, м³: 5225	температура повітря, м³: 4798	вуглекислий газ, м³: 427
загальне споживання електроенергії, кВт: 1984	температура повітря, кВт: 1277	вуглекислий газ, кВт: 420
	вологість повітря, кВт: 68	поживних речовин, кВт: 136
		освітленість, кВт: 55

Рис. 5.6. Меню системи керування енергетичними потоками тепличного комплексу



Меню розрахунку критеріїв керування представлено на (рис. 5.7).

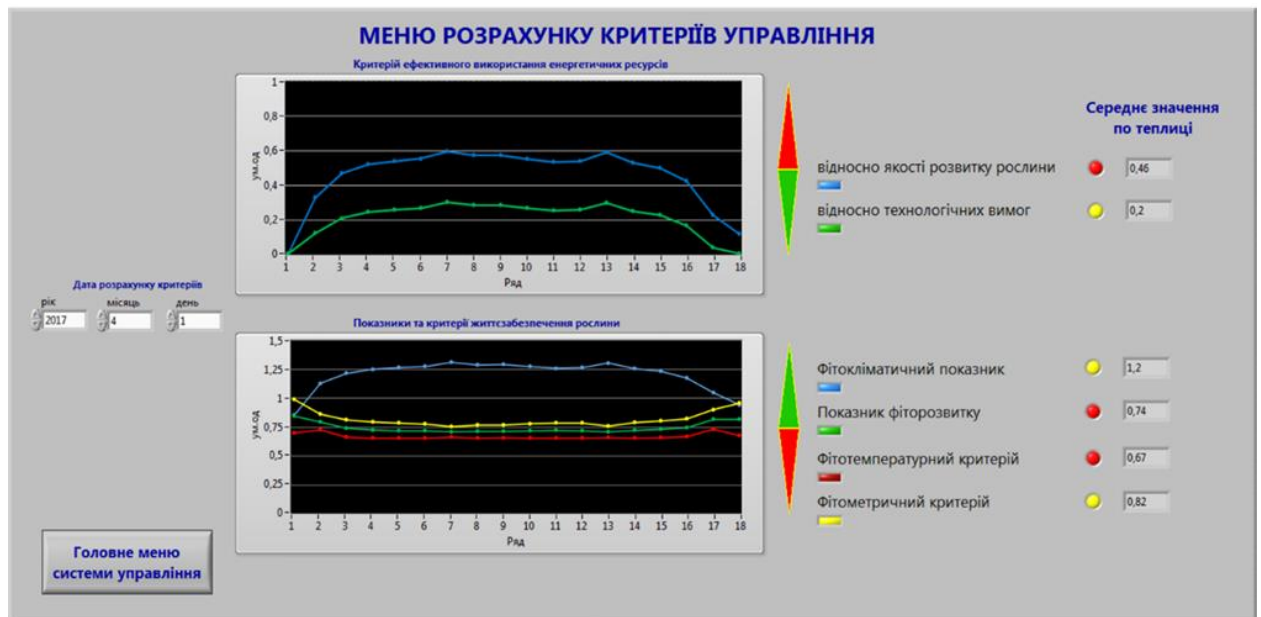


Рис. 5.7. Меню розрахунку критеріїв керування

## 5.2. Промислове випробування системи керування виробництвом рослинної продукції

Розроблена система керування виконанням технології виробництва рослинної продукції тепличних комплексів для виробництва продукції заданої якості складається з:

- мобільного робота фітомоніторингу;
- системи керування виробництвом рослинної продукції;
- системи автоматизованого контролю параметрів і керування мікрокліматом.

Випробування системи керування здійснювалося відповідно до стандарту ДСТУ 2709-94. Автоматизовані системи керування технологічними процесами. Метрологічне забезпечення та ДСТУ 3738-98 (ГОСТ 12.2.072-98) Роботи промислові. Роботизовані технологічні комплекси. Вимоги безпеки та методи випробувань.

Для розробленої системи виконано такі основні за стандартом види випробувань [243, 256, 269]: 1) попередні; 2) експлуатація; 3) впровадження.

Згідно з першим пунктом стандарту було виконано ряд перевірних робіт, зміст і порядок яких здійснюється під час зовнішнього огляду та перевірки рухомих частин МРФ. Під час зовнішнього огляду виявляють механічні пошкодження, дефекти складових механізму. Перевірка рухомих частин виконується самим випробуванням. Всі рухомі частини повинні зрушуватися плавно, без помітних стрибків. Перевіряють діапазон роботи встановлених пристроїв, надійність закріплення механізмів та їх складових, комплектність приладів підсистем тощо [276, 292, 293]. Способом багаторазових вимірювань інтервалів еталонного базису роботи підсистем МРФ було проведено його перевірку.

Під час випробування перевірено придатність роботи джерела живлення, плавність руху деталей, надійність обертання прийомо-передавальних механізмів навколо своєї осі й нахилу у вертикальній площині. Вимірюючи вихідну напругу, оцінювали наявність сигналу вздовж лінії зв'язку, працездатність індикаторів та інших електрично зв'язаних складових. Під час даної перевірки підтвердились попередні розрахунки щодо використання енергії акумуляторної батареї, які були раніше опубліковані.

Випробовувалась система керування автоматичним зарядним пристроєм батареї Рb акумуляторів мобільного робота. Головним елементом системи керування зарядженням батареї акумуляторів робота є зарядний пристрій SKYRC IMAX B6AC v2. Розробники цього засобу задля його універсальності передбачили багато режимів зарядження для різного типу акумуляторів. Ці режими обираються кнопками на лицьовій панелі пристрою, причому деякі натискання мають бути тривалішими за інші.

Щоб забезпечити автоматичне керування вибором режиму зарядження батареї з шести Рb-акумуляторів, розроблено систему на базі PIC-контролера, що автоматично керує пристроєм SKYRC IMAX B6AC v2 за допомогою

сигналів, які після транзисторного підсилення вмикають вихідні реле в послідовності та із затримками, що задають потрібний режим зарядки. Контакти цих реле приєднано паралельно до кнопок керування.

Обраний режим для вказаної батареї ємністю 12 А•год. передбачає струм зарядження 1,2 А. При досягненні 14,4 В напруги зарядний пристрій автоматично знижує струм. Коли він стає менше 0.4 А, пристрій SKYRC IMAX B6AC v2 автоматично відключає зарядний струм. Алгоритм роботи підсистеми зарядження наведено в Додатку 3.

Розроблено електричну принципову схему (Додаток II) та схему підключень системи зарядження, а також щит керування, який вміщує:

- автоматичний вимикач захисту,
- плату з PIC-контролером та вихідними реле,
- зарядний пристрій SKYRC IMAX B6AC v2,
- 2 кінцевих вимикачі для фіксації прибуття робота на зарядження.

Для МРФ на базі електронної плати Arduino Nano розроблено систему вимірювання рівня розрядження батареї акумуляторів.

Якщо в процесі функціонування робота напруга акумулятора опуститься нижче заданого порога, контролер Arduino Nano подає контролеру Arduino Mega, що керує вимірюваннями та рухом робота, сигнал про припинення технологічної роботи та рух на зарядження. Коли робот своїми контактними виступами натисне на кінцеві вимикачі щита системи зарядження, як вказано раніше, вмикається зарядження. Контролер Arduino Nano на час зарядження вимикає живлення споживачів робота.

Під час зарядження Arduino Nano за допомогою датчика Холла ACS712-5A контролює струм зарядження. Як тільки струм зменшиться майже до нуля (припиниться зарядження), контролер Arduino Nano автоматично вмикає живлення споживачів робота і передає контролеру Arduino Mega сигнал щодо продовження технологічної роботи.

Зв'язок між контролерами Arduino Nano та Arduino Mega здійснюється за інтерфейсом RS232 в ASCII-кодах.

Було проведено контроль підсистеми фітомоніторингу. Для оцінки роботи підсистеми визначено похибки інформаційно-вимірювальних каналів (ІВК) та перевірено роботу безпроводної передачі даних.

Безпроводний канал передачі вимірювальної інформації у всесвітню мережу виконаний за стандартом IEEE 802.11 (Wi-Fi). Для реалізації такого варіанта передачі цифрових потоків МРФ укомплектований Wi-Fi модулем, що підтримує три основні редакції необхідного стандарту – 802.11a, 802.11b, 802.11g та є сумісним із керуючим пристроєм Arduino Mega ADK.

Щоб упевнитись у достовірності переданої інформації, проведено оцінку роботи підсистеми фітомоніторингу. Для цього також визначено похибки інформаційно-вимірювальних каналів (ІВК). Під час випробування проведено оцінку якості роботи безпроводного каналу передачі інформації згідно з методикою щодо перевірки каналів зв'язку на відповідність нормам.

Як зазначено, для передачі даних від вимірювального пристрою до системи керування використовується стандарт бездротових локальних мереж. Враховуючи, що площа промислової теплиці значна і кількість рослин у ній теж значна, необхідно розрахувати відстань, на яку можливо передати цифровий сигнал, де:

$$D = 10^{\left(\frac{FSL}{20} - \frac{33}{20} \log F\right)}, \quad (5.1)$$

де FSL (Free Space Loss) – втрати в просторі, дБ; F – частота каналу передачі, МГц.

Втрати в просторі визначаються за формулою:

$$FSL = Y - S, \quad (5.2)$$

де Y – сумарна потужність каналу, дБ; S – запас підсилення каналу, дБ.

Для розрахунків приймається, що запасу каналу достатньо в 20 дБ.

Сумарна потужність каналу рівна сумі всіх потужностей передавача, антени передавача і приймача, чутливості системи та різниці втрат системи передачі:

$$Y = P_t + G_t + G_r - P_{min} - L_t - L_r, \quad (5.3)$$

де  $P_t$  – потужність передавача, дБ;  $G_t$  – коефіцієнт посилення передавальної антени, дБ;  $G_r$  – коефіцієнт посилення приймальної антени, дБ;  $P_{min}$  – чутливість приймача на даній швидкості передачі, дБ;  $L_t$  – втрати сигналу в коаксіальному кабелі і роз'ємах передавального тракту, дБ;  $L_r$  – втрати сигналу в коаксіальному кабелі і роз'ємах приймального тракту, дБ.

У якості робочої частоти був обраний 13 канал, оскільки частота роботи маршрутизатора рівна 2474 МГц, а швидкість передачі рівна 6 МВ/с, де чутливість рівна 88 dbm. Звідси визначимо сумарну потужність каналу:

$$Y = 18 + 5 + 5 + 88 - 3 - 3 = 110 \text{ (дБ)}.$$

Відповідно втрати в просторі становитимуть:

$$FSL = 110 - 20 = 90 \text{ (дБ)}.$$

Відстань передачі тоді дорівнює:

$$D = 10^{\left(\frac{90}{20} - \frac{33}{20} - \lg 2472\right)} = 0,282 \text{ (км)}.$$

Розрахована відстань передачі цифрового сигналу для розробленого вимірювального комплексу забезпечує отримання інформації відповідно до конструктивних особливостей теплиці.

Визначені похибки вимірювального каналу температури та вологості, де середньоквадратична похибка вимірювання вологості становить 0,62%, температури – 0,2°C; абсолютна похибка для вологості становить 1,21%, для температури – 0,393°C.

Розраховані значення похибок дають можливість зробити висновок, що розроблена система забезпечує необхідну точність отримання інформації відповідно до існуючих вимог.

Для реалізації алгоритму керування МРФ слід встановити й налаштувати додаткове технічне обладнання. У приміщенні теплиці має бути встановлений сервер з відповідним програмним забезпеченням для роботи з мобільним роботом, також налаштована Wi-Fi мережа. МРФ повинен бути підключений до такої мережі, через неї він надсилатиме результати вимірювання параметрів атмосфери та фітостану в теплиці до сервера збереження та опрацювання даних.

Зарядну станцію розташовують на твердій і рівній поверхні таким чином, щоб робот міг вільно під'їхати до неї. Зарядна станція повинна бути завжди підключена до мережі живлення.

Для реалізації алгоритму керування роботом виконується додаткова розмітка [222, 291] теплиці (рис. 5.8).

Для повної інформації про конструктивні особливості теплиці слід провести налаштування програмного забезпечення МРФ:

- задають кількість рядів, де будуть проводитись вимірювання;
- задають кількість вимірювань в ряді;
- заносять в поле переміщення робота координати всіх міток вручну або за допомогою робота.

Технічні умови щодо використання МРФ. Перед початком роботи для того, щоб мобільний робот рухався в просторі теплиці, він повинен пройти певні контрольні точки, що задаються оператором перед пуском робота.

Оскільки МРФ між рядами рослин рухається технологічними направляючими, то його рух обмежений – «вперед-назад». Заїзд на

направляючі здійснюється за допомогою кольорової розмітки, нанесеної на підлогу теплиці.

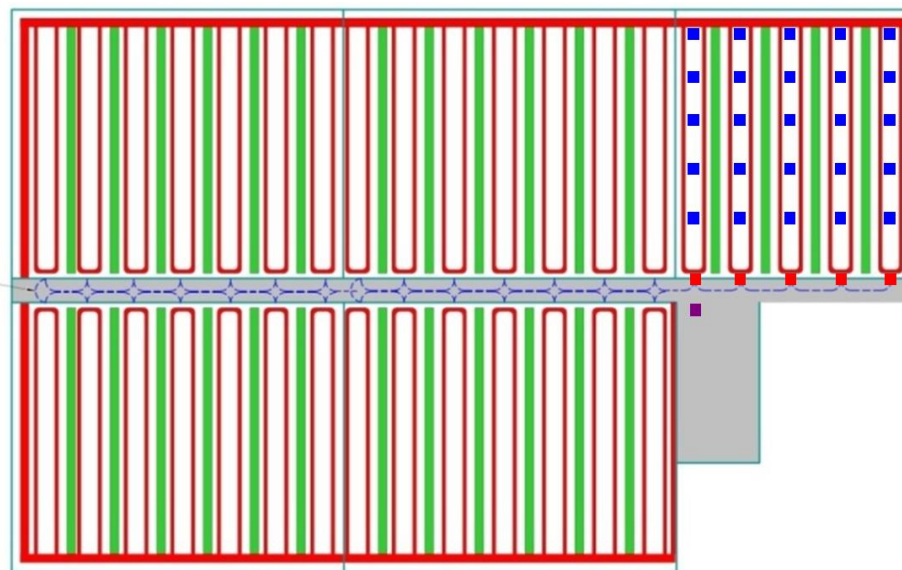


Рис. 5.8. Візуальний план теплиці та розмітка для спрощення орієнтування МРФ

За наявності перешкоди на маршруті робот визначає її ультразвуковим датчиком; якщо є можливість перешкоду обминути – здійснюється маневрування; якщо немає можливості дістатись до певної контрольної точки, робот подає звуковий сигнал та відправляє повідомлення оператору і переходить до наступної точки [257, 275, 295].

Для спрощення орієнтації мобільного робота простір теплиці умовно розбито на сектори; зміну сектора робот відстежує за допомогою кольорових міток на підлозі теплиці.

Початок навігації МРФ починається з бази підзарядження робота. Мобільний робот встановлюється на базу передньою частиною для налаштування датчика-компаса. Робоча база робота у теплиці обладнана зарядною станцією SKYRC IMAH B6AC v2, де задля універсальності передбачено декілька режимів зарядження для різного типу акумуляторів. Ці режими задаються вручну за допомогою кнопок, розташованих на лицьовій панелі пристрою.

Після вмикання робот починає працювати в автоматичному режимі, відповідно проходячи через координати, занесені у поле його переміщень.

МРФ оснащений підсистемою виявлення перешкод, яка за алгоритмом роботи зупиняє його перед непроїзною перешкодою та шукає алгоритм проїзду по маршруту, оминаючи перешкоду. Проте у разі неможливості проїзду перешкоди мобільний робот зупиняється і вмикає звукове повідомлення для оператора. У цьому випадку оператор повинен підійти до мобільного робота і усунути перешкоду на його маршрут.

Перебуваючи на синіх мітках, робот проводить технологічні вимірювання. Під час перебування на червоних мітках бортова система вимірювання рівня розрядження батареї акумулятора постійно перевіряє рівень заряду акумуляторної батареї робота. Якщо в процесі роботи мобільного робота напруга акумулятора опуститься нижче заданого порога, він припиняє проводити технологічні роботи і рухається на базу підзарядження.

Коли МРФ своїми контактними виступами натисне на кінцеві вимикачі щита системи зарядження, вмикається зарядження. На час зарядження вмикається живлення споживачів робота. У процесі підзарядження мобільного робота, коли він перебуває на зарядній станції, повинен світитися зелений індикатор, підтверджуючи успішний процес зарядження.

Коли напруга досягає значення 14,4 В, зарядний пристрій автоматично знижує струм. Коли він стає менше 0.4 А, пристрій SKYRC IMAX B6AC v2 автоматично відключає зарядний струм. МРФ повертається до точки, на якій призупинив технологічні вимірювання, та продовжує свою технологічну роботу.

На (рис. 5.9) представлено мобільний робот фітомоніторингу в ПрАТ «Комбінат «Тепличний» Київської обл., Броварського р-ну.





Рис. 5.9. Зовнішній вигляд МРФ

Система керування енергетичними потоками тепличних комплексів формувала оператору повідомлення у вигляді рекомендованих дій та завдань під час виникнення нештатних ситуацій та змінювала технологічні режими керування в межах агротехнологічних вимог для забезпечення відповідних стратегій керування виконанням технології виробництва рослинної продукції для отримання рослинної продукції заданої якості. Всі підсистеми, що входять до складу с САКЕППТ, працювали стабільно, забезпечуючи при цьому вимоги технологічного стандарту щодо якості продукції.

Було проведено економічну оцінку ефективності роботи і впровадження САКЕППТ, також проведено ексергоекономічну оцінку можливої додаткової модернізації існуючої системи керування.

### **5.3. Економічні розрахунки ефективності впровадження системи керування**

#### **5.3.1. Техніко-економічні показники впровадження системи керування**

Економічний прибуток визначається із використанням методу лінійного програмування [194], який описує відповідний процес безперервного виробництва і дає можливість визначити, за яких умов досягатиметься максимальний або мінімальний прибуток від впровадження САКЕППТ.

Мобільний робот фітомоніторингу в САКЕППТ відіграє роль контролюючої складової параметрів розвитку рослини. Він формує результати фітомоніторингу та сприяє формуванню керуючої дії для визначення оптимального рішення і встановлення відповідних параметрів мікроклімату.

Споживання електроенергії під час вирощування овочів у теплиці за добу становить 1400 Вт·год згідно з наведеними квартальними таблицями споживання електроенергії ПрАТ «Комбінат «Тепличний». Відповідно, після впровадження САКЕППТ витрати на електроенергію становлять менше на величину споживання енергії таких ланок керування і контролю, як фітомонітор, датчики вимірювання температури повітря, вологості повітря, температури рослини, освітленості, датчики кислотності, температури та вологості субстрату, датчик вимірювання діаметра та блок підсилювачів сигналів. Кожен із зазначених елементів споживає певну кількість електроенергії, яку можна визначити з урахуванням паспортних даних і часу роботи на добу. Сумарне споживання електроенергії всіх вище названих складових – 387 Вт·год. Затрати збільшуються на відповідну величину споживання енергії залежно від кількості розміщених у теплиці датчиків, один комплект яких разом витрачає 55 Вт·год на добу.

Водночас комплекс використовує електроенергію із мережі лише під час підзарядження акумуляторних батарей, і величина такого споживання залежить від кількості циклів зарядження: середня величина електрозатрат становитиме 180-200 Вт·год.

Отже, економія споживання електроенергії від впровадження вимірювального комплексу рівна різниці між величиною споживання запропонованим комплексом та стаціонарним обладнанням –  $387 - 200 = 187$  Вт·год.

Тоді загальне збереження електроенергії визначили із формули:

$$\Delta W = \frac{\Delta E}{100} W_s S_p, \quad (5.4)$$

де  $\Delta E$  – економія електроенергії за рахунок раціонального споживання порівняно з існуючими системами;  $W_s$  – питоме споживання електроенергії під час вирощування овочів;  $S_p$  – площа вирощування овочів.

Відповідно, економія електроенергії збільшується при більшій площі теплиці, адже для одного гектара  $\Delta E = 187$  Вт·год, а питоме споживання електроенергії збільшується на відповідну величину її споживання комплектами датчиків, що замінюються (тобто 55 Вт·год).

Графік функції економії електроенергії залежно від площі матиме такий вигляд (рис. 5.10).

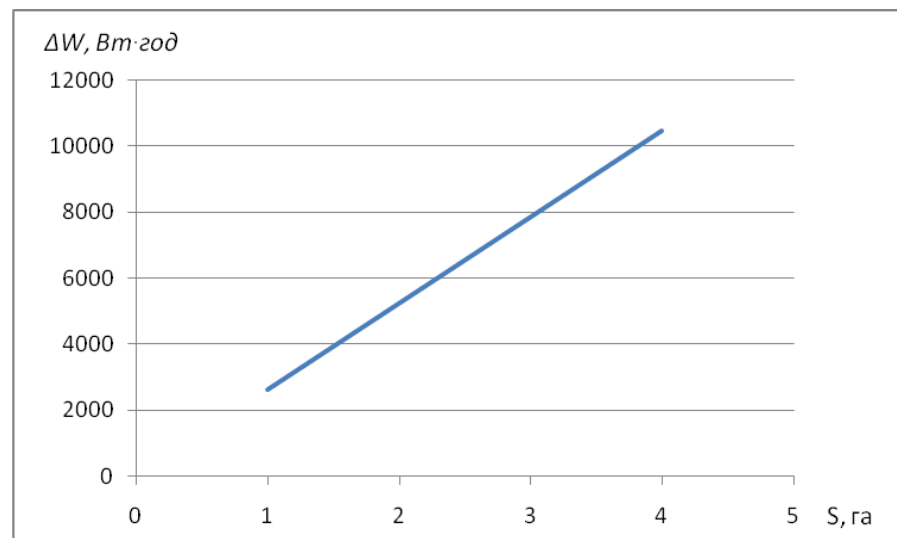


Рис. 5.10. Графік економії електроенергії

При цьому слід враховувати зміни у виході продукції. Продуктивність теплиць з існуючими ситемами регулювання мікроклімату ПрАТ «Комбінат «Тепличний» становить 58,6 кг/м<sup>2</sup> томатів. За використання запропонованої системи керування мікрокліматом продуктивність кожного куща збільшиться на 0,151 кг приросту продукції на добу [168, 194]. Оскільки рослини томата в теплиці висаджуються з відношенням 4 шт./м<sup>2</sup>, то приріст овочевої продукції збільшиться на  $\Delta P = 0,604$  кг/м<sup>2</sup>.

Вартість додатково отриманої продукції в перерахунку визначається [255]:

$$\Delta\P = \Delta P \cdot C \cdot S, \quad (5.5)$$

де  $\Delta P$  – додатковий врожай з 1 м<sup>2</sup> площі теплиці за результатами виробничих випробувань, кг;  $C$  – ціна за 1 кг продукції;  $S$  – площа, на якій вирощуються рослини, м<sup>2</sup>.

Вартість додатково отриманої продукції буде різною залежно від площі теплиці, адже додатковий врожай з 1 м<sup>2</sup> площі теплиці й ціна за 1 кг продукції вважаються постійними.

Економічна ефективність становить:

$$E_p = \Delta W \cdot B + \Delta\P - A, \quad (5.6)$$

де  $\Delta W$  – економія електроенергії за рахунок впровадження комплексу;  $B$  – діючий тариф на електроенергію для сільськогосподарських виробників ( $B=0,96$  грн/1 кВт·год);  $\Delta\P$  – вартість додатково отриманої продукції;  $S$  – площа, на якій вирощуються овочі;  $A$  – амортизаційні витрати.

Амортизаційні витрати визначаються як:

$$A = a \cdot K = 0,05 \cdot 56000 = 2800 \text{ грн.}, \quad (5.4)$$

де  $a$  – норма амортизаційних відрахувань (5%);  $K$  – повна вартість створення комплексу ( $K=56000$  грн.).

Визначимо площу теплиці, для якої економічно доцільно використовувати МРФ. Для цього використаємо цільову функцію, при відповідних обмеженнях. Цільова функція має вигляд:

$$\Delta W \cdot B + \Delta P \cdot C \cdot S \rightarrow \max. \quad (5.5)$$

При цьому введені такі обмеження по площі теплиці й кількості електроенергії, що економиться за рахунок впровадження запропонованого комплексу. Обмеження мають вигляд:

$$\begin{cases} \Delta W \cdot B + \Delta P \cdot C \cdot S > A, \\ S > 0, \\ \Delta W \geq 0. \end{cases} \quad (5.6)$$

Розв'яжемо задачу лінійного програмування за допомогою графічного методу. Для цього на декартовій системі координат будуюмо обмеження, де відповідно:

$$\begin{cases} \Delta W \cdot 0,96 + 1,68 \cdot S > 2800, \\ S > 0, \\ \Delta W \geq 0. \end{cases} \quad (5.7)$$

Вісь  $x_1$  відповідає за обмеження економії електроенергії за рахунок впровадження МРФ ( $\Delta W$ ), а  $x_2$  – площа, на якій вирощуються овочі ( $S$ ). Будуємо прямі лінії обмежень, звідки знаходимо точки оптимального прибутку.

Позначивши межі допустимих значень, за допомогою вектора-градієнта, який складається із коефіцієнтів цільової функції (0,96; 1,68), вказуємо максимізацію цільової функції. Початок вектора – початок

координат (0; 0), кінець – точка V (0,96; 1,68). Область допустимих значень представлено на (рис. 5.11).



Рис. 5.11. Область допустимих значень

На графіку показано точку А, що вказує, для якої мінімальної площі доцільно використовувати розроблений комплекс – від 1666,67 м<sup>2</sup>.

Мобільний робот фітомоніторингу дасть змогу існуючій системі керування якісно контролювати й виконувати низку додаткових функцій: контролювати параметри мікроклімату і здійснювати фітомоніторинг рослин; проводити збір та обробку інформації зазначених параметрів у теплиці; створювати архіви даних для подальшого їх опрацювання; функціонувати в ручному, автоматичному і дистанційному режимах керування. Використання розробленого МРФ доцільно для площі теплиці від 1666,67 м<sup>2</sup>.

Визначимо врожайність помідорів у зонах, де рівень вуглекислого газу, температури та вологості повітря виходить за межі комфортного розвитку рослин, за втрати врожаю не менше 30%:

$$Bp'_m = Bp_m \cdot 0.7 = 31.5, \text{ кг/м}^2, \quad (5.8)$$

де  $Bp_m$  – врожайність помідорів, 45 кг/м<sup>2</sup>.

Оцінимо можливі загальні втрати врожайності на ділянках з низькою температурою:

$$Bv = S_t Bp_m' Cв' = 106323 \text{ грн.}, \quad (5.9)$$

де  $S_t$  – площа ділянок теплиці, що перебувають в зоні з пониженою температурою, 1000 м<sup>2</sup>;  $Cв'$  – середня собівартість 1 кг помідорів, 15.20 грн.

Як вже зазначалося, існуюча система автоматичного керування параметрами мікроклімату за своїми особливостями не може отримувати достовірну інформацію про рівень параметрів мікроклімату по всій площі теплиці на різних її рівнях. Зазначена проблема вирішується двома варіантами:

I – впровадження системи керування енергетичними потоками просторово-розподілених об'єктів – тепличних комплексів, для виробництва продукції заданої якості, до складу системи входить МРФ;

II – впровадження зазначеної системи з додатковою модернізацією існуючої системи опалення теплиці.

Реалізацію першого етапу може забезпечити МРФ, який стежитиме за параметрами мікроклімату і фітостаном на всій площі теплиці. Вартість упровадження такої системи  $Kp$  становитиме, за нашими підрахунками, 56000 грн, що значно менше від можливих втрат внаслідок помилок класичної системи.

Другий варіант є більш капіталозатратним. Суть його полягає у встановленні на трубопроводах системи приземного підігріву диференційованих заслінок, які зможуть змінювати витрату теплоносія і таким чином регулювати температуру повітря для певних ділянок теплиці, використовуючи покази МРФ. За нашими оцінками, капітальні вкладення для реалізації  $Kс$  становитимуть 94000 грн.

Існуюча система автоматичного контролю та керування параметрами мікроклімату за своїми особливостями не може отримувати достовірну інформацію про показники вуглекислого газу, температури та вологості повітря по всій площі теплиці на різних рівнях.

Загальні капітальні вкладення, що необхідні для модернізації існуючої системи автоматичного керування параметрами мікроклімату та впровадження МРФ:

$$K = K_p + K_c = 150000 \text{ грн.} \quad (5.10)$$

Особливість МРФ полягає в тому, що він дає можливість збільшити прибуток за рахунок якісного контролю і прогнозу за дозріванням плодів та отриманням якісного врожаю, а також за рахунок раціонального використання енергетичних ресурсів. Для ПрАТ «Комбінат «Тепличний» у структурі собівартості помідорів затрати на енергоносії становлять 60%. За рахунок раціонального споживання енергоресурсів, отримання достовірної інформації про стан мікроклімату і за результатами фітомоніторингу біологічного об'єкта на всій площі теплиці на різних рівнях можна зменшити витрати енергоносіїв, що дасть можливість зменшити собівартість продукції на 15%:

$$Зв = Cв' \cdot 0,15 = 2,28 \text{ грн.} \quad (5.11)$$

Отже, собівартість продукції за умови впровадження мобільного робота становитиме:

$$Cв = Cв' - Зв = 12,92 \text{ грн.} \quad (5.12)$$

Таким чином, за рахунок економії енергоресурсів отримаємо:

$$E = (Зв \cdot V_{p_T}) S_z = 310127, \text{ грн,} \quad (5.13)$$



де  $S_z$  – загальна площа теплиці.

Визначимо річні експлуатаційні витрати, які складаються з амортизаційних відрахувань (5% від вартості капітальних вкладень), витрат на ремонтно-технічне обслуговування – 10%, заробітної плати  $ЗП$  у розмірі 108000 грн на рік для одного обслуговуючого працівника та інших витрат в розмірі 10% від загальних капітальних вкладень:

$$E_b = (0.05 \cdot K + 0.1 \cdot K + ЗП) \cdot 1.1 = 143550 \text{ грн.} \quad (5.14)$$

Розрахуємо річну економію (річний приріст прибутку), яку отримаємо за рахунок використання МРФ. Річна економія являє собою сукупність економії, отриманої в результаті підвищення врожайності і зменшення витрат на енергоносії:

$$PE = B_v + E = 416450, \text{ грн.} \quad (5.15)$$

Строк окупності  $T_{ок}$  розраховується як:

$$T_{ок} = \frac{K}{(PE - E_b)} = 0.55, \text{ років.} \quad (5.16)$$

Визначимо чисту дисконтовану вартість  $Чд$  з урахуванням ліквідної вартості  $K_l$  наприкінці строку експлуатації установки  $T=10$  років при незмінних за роками розмірах річного приросту прибутку, нормою дисконту  $p=0,1$  та експлуатаційними витратами  $E_6$ . Отримаємо результат:

$$K_l = 0,1 \cdot K = 15000, \text{ грн;} \quad (5.17)$$

$$ЧД = (PE - E_v) \frac{(1+p)^T - 1}{p(1+p)^T} - K + K_n(1+p)^{-T} = 1531233, \text{ грн.} \quad (5.18)$$

Позитивне значення критерію чистої дисконтованої вартості свідчить про вигідність проекту за прийнятої ставки дисконту. Таким чином, для прийнятих умов система керування енергетичними потоками просторово-розподілених об'єктів – тепличних комплексів, для виробництва продукції заданої якості, до складу якої (системи) входить МРФ, є економічно вигідною, що підтверджено відповідним актом впровадження ПрАТ «Комбінат «Тепличний».

### **5.3.2. Ексергоекономічна оцінка ефективності впровадження системи керування енергетичними потоками**

Поняття ексергії як максимальної працездатності зручно використовувати під час розгляду ступеня досконалості різних процесів з точки зору перетворення енергії. Якщо процес протікає повністю оборотно, то «одержуємо сумарну працездатність» речовини (це ж стосується і механічної роботи), яка повинна дорівнювати «працездатності, що витрачаємо». За наявності незворотності «сумарна працездатність» зменшується. Це «зменшення працездатності» і є мірою втрат. Ексергетичний аналіз різних процесів показав, що є процеси, які протікають достатньо досконало, водночас існує ряд процесів, які навіть при найретельнішому здійсненні абсолютно виявляються низькоефективними [6, 205].

Терміни «втрати енергії» і «втрати ексергії» мають принципово різний зміст. Перший означає втрату енергії не взагалі (енергія зникати, як відомо, не може), а втрату її для цієї системи або для цієї проблеми, у випадку, якщо частина енергії непридатна для неї за своєю формою чи параметрами. Другий термін означає зникнення ексергії, пов'язане з дисипацією енергії [5, 92].

Розглянемо дві енергетичні системи, між якими відбувається обмін енергією. Ексергетичний баланс цього процесу можна представити як [60, 117]:

$$E_{\text{система1}} - E_{\text{система2}} = \int_1^2 \frac{T - T_0}{T} \partial Q + [W_{1 \rightarrow 2} + p_0(V_2 - V_1)] - T_0 S_{\text{gen}}, \quad (5.19)$$

де доданок  $\int_1^2 \frac{T - T_0}{T} \partial Q$  описує транспорт ексергії, асоційований з теплом; доданок  $[W_{1 \rightarrow 2} + p_0(V_2 - V_1)]$  – транспорт ексергії, асоційований з роботою; останній доданок  $E_D = T_0 S_{\text{gen}}$  має назву деструкції ексергії (втрати працездатності).

Для проведення ексергетичного аналізу для довільного ( $k$ -го) елемента системи має бути розраховано досить багато критеріїв, основу яких становлять такі:

- ексергетичний баланс  $k$ -го елемента [6]:

$$E_{F,k} = E_{P,k} + E_{D,k} + E_{L,k}; \quad (5.20)$$

де  $E_{D,k}$  – абсолютна деструкція ексергії;  $E_{L,k}$  – абсолютні ексергетичні втрати (англ. – exergy losses), що виникають під час зовнішнього контакту елемента системи з навколишнім середовищем;  $E_{P,k}$  – ексергія, що отримана від виробленої продукції.

Абсолютна деструкція ексергії (англ. – exergy destruction) як функція від термодинамічної недосконалості процесу:

$$E_{D,k} = T_0 S_{\text{gen},k}. \quad (5.21)$$

Таким чином, деструкція ексергії є ніщо інше, як додаткова робота (одержана або витрачена) для виробництва позитивного ефекту порівняно з теоретичним.

Ексергоекономічна оцінка проводиться на рівні компонентів систем з використанням таких критеріїв для  $k$ -го компонента. З ексергетичного аналізу відомо:

- абсолютна деструкція ексергії,  $E_{D,k}$  [6, 117]:

$$E_{D,k} = E_{F,k} - E_{P,k} - E_{L,k}; \quad (5.22)$$

- ексергетична ефективність,  $\varepsilon_k$ :

$$\varepsilon_k = \frac{E_{P,k}}{E_{F,k}} = 1 - \frac{E_{D,k} + E_{L,k}}{E_{F,k}}; \quad (5.23)$$

- відносна деструкція ексергії,  $y_k$ :

$$y_{D,k} = \frac{E_{D,k}}{E_{F,k}}. \quad (5.24)$$

Визначимо критерії ексергоекономічного аналізу [6, 117]:

- ціна ексергії палива:

$$c_{F,k} = \frac{C_{F,k}}{E_{F,k}}; \quad (5.25)$$

де  $C_{F,k}$  – ціна палива,

- ціна ексергії продукту:

$$c_{P,k} = \frac{C_{P,k}}{E_{P,k}}; \quad (5.26)$$

де  $C_{P,k}$  – ціна продукту,

- вартість, пов'язана з деструкцією ексергії:

$$c_{D,k} = c_{F,k} E_{D,k}; \quad (5.27)$$

- вартість, пов'язана з втратами ексергії:

$$c_{L,k} = c_{F,k} E_{L,k}; \quad (5.28)$$

- - відносна розбіжність цін:

$$r_k = \frac{c_{P,k} - c_{F,k}}{c_{F,k}} = \frac{1 - \varepsilon_k}{\varepsilon_k} + \frac{Z_k}{c_{F,k} E_{P,k}}; \quad (5.29)$$

- вартість капітальних витрат:

$$Z_k = Z_k^{CI} + Z_k^{OM}, \quad (5.30)$$

де  $Z_k^{CI}$  – вартість капітальних інвестицій;  $Z_k^{OM}$  – вартість експлуатації та обслуговування.

Коли відповідні функції цін встановлено, ціна оптимальної ексергетичної ефективності  $\varepsilon_k^{OPT}$  для  $k$ -го елемента може наближено визначатися як:

$$\varepsilon_k^{OPT} = \frac{1}{1 + F_k} \quad (5.31)$$

при

$$F_k = \left( \frac{(\beta + \gamma_k) B_k n_k}{\tau c_{F,k} E_{P,k}^{1-m_k}} \right)^{\frac{1}{n_k+1}}, \quad (5.32)$$

де  $\beta$  – фактор відновлення капіталу;  $\gamma_k$  – коефіцієнт, що враховує фіксовану частину експлуатаційних витрат і витрат на обслуговування, які залежать від загальних капітальних інвестицій, асоційованих з  $k$ -им компонентом;

$B_k, n_k, m_k$  – постійні, які використовуються для визначення функцій  $\varepsilon_k$ ;  $E_{P,k}$  – середньорічний час експлуатації системи за номінальної продуктивності.

У загальному випадку ексергоекономічний критерій оптимізації має вигляд [83]:

$$Z_{\Sigma} = \frac{\sum_n C_n E_n + \overline{K_n}}{\sum_k E_k}, \quad (5.33)$$

де  $C_n, E_n$  – вартість і річне споживання ексергії із зовнішніх джерел;  $\overline{K_n}$  – річні капітальні та пов'язані з ними витрати в  $n$ -му елементі системи;  $E_k$  – річна витрата ексергії для одержання  $k$ -го продукту.

Метою комплексної системи оптимізації є вибір таких значень параметрів системи (технологічних, конструктивних та ін.), які забезпечили б оптимальні чи близькі до оптимальних значення критерію ефективності:

$$Z_{opt} = \text{extr}\{Z(x_j)\}, \quad (5.34)$$

$$x_j \in R^n,$$

де  $R^n$  –  $n$ -мірний дійсний векторний простір.

Ексергоекономічний аналіз і оцінка вказують і порівнюють реальні джерела вартості в системі, рівняння (5.25-5.30) показують процес формування вартості в межах системи, визначають оптимальну вартість, за якою зроблений кожен потік продукту.

Визначимо вартість експлуатації енергозберігаючої системи, д.е./кВт:

$$Z = Z^{Cl} + Z^{fuel} + Z^{OM}, \quad (5.35)$$

де  $Z^{fuel}$  – витрати на початкову енергію для функціонування системи.

Економічна модель дійсної енергоперетворюючої системи являє собою спільне рішення системи рівнянь:

- капітальні (інвестиційні) витрати системи, д.е./кВт:

$$Z^{Cl} = a \bar{a} \frac{1}{t_A}; \quad (5.36)$$

- для кожного елемента системи:

$$Z^{Cl} = a_k x_k^n (1+b)^y / N_k; \quad (5.37)$$

- витрати на початкову енергію для функціонування системи, д.е./кВт:

$$Z^{fuel} = w c_F; \quad (5.38)$$

- вартість експлуатації та обслуговування, д.е./кВт:

$$Z^{OM} = b \frac{1}{t_A} + d; \quad (5.39)$$

- амортизаційні відрахування, д.е./кВт:

$$a = \frac{q^n (1-q)}{q^n - 1} \left( 1 + \frac{i+r}{100} \frac{CP}{2} \right); \quad (5.40)$$

- коефіцієнт дисконтування:

$$q^{-1} = \left( 1 + \frac{i+t+v}{100} \right)^{-1}; \quad (5.41)$$

- питоме енергоспоживання, кДж / (кВт · год):

$$w = \frac{3600}{\eta}; \quad (5.42)$$

- середній час роботи системи, г/рік:

$$\tau_A = \frac{\text{Річне виробництво корисного ефекту}}{\text{Номінальна потужність}}, \quad (5.43)$$

де  $c_F$  – ціна палива (д.е./кВт);  $\bar{a}$  – інвестиційна вартість (д.е./кВт);  $b$  – витрати на ремонт і обслуговування, що залежать від встановленої потужності (д.е./кВт);  $d$  – витрати на ремонт і обслуговування, що залежать від покоління техніки, що використовується (д.е./кВт);  $i$  – банківський відсоток інвестиційних витрат на створення системи (%/рік);  $r$  – інфляційний коефіцієнт (%/рік);  $n$  – термін служби об'єкта (рік);  $CP$  – час створення об'єкта (рік);  $t_A$  – річні податки (%/рік);  $v$  – річна страховка (%/рік);  $x$  – характеристика  $k$ -го елемента;  $a$  – ціна одиниці обладнання;  $n, y$  – показники функцій;  $N$  – термін експлуатації.

Проведемо ексергоекономічну оцінку за допомогою ексергоекономічного фактора:

$$f_k = \frac{Z_k}{Z_k + c_{F,k}(E_{D,k} + E_{L,k})}. \quad (5.44)$$

Значення  $c_{F,k}$  залежать від відносного положення  $k$ -го компонента в системі та його взаємозв'язку з попереднім і наступним компонентами.

Проведено розрахунок обох варіантів впровадження системи керування енергетичними потоками просторово-розподілених об'єктів – тепличних комплексів, для виробництва продукції заданої якості за допомогою ексергоекономічного фактора (рис. 5.12).



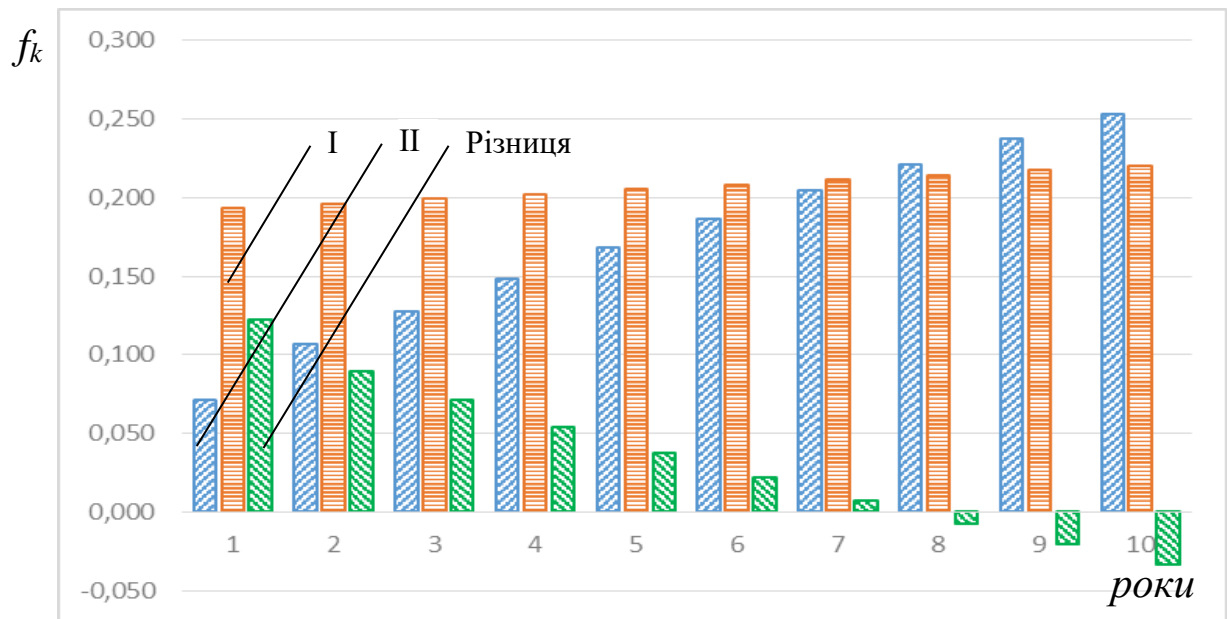


Рис. 5.12. Значення коефіцієнта ефективності модернізації системи керування: I-варіант, II-варіант, різниця коефіцієнтів

Аналіз розрахунку, представленого на (рис.5.12), дає змогу зробити висновок, що I варіант впровадження системи дає більше значення коефіцієнта ефективності модернізації, починаючи з 1-го року експлуатації системи керування. З кожним роком експлуатації системи керування значення коефіцієнта ефективності зростає в обох варіантах, лише на 8-й рік експлуатації II варіант даватиме найбільше значення коефіцієнта ефективності модернізації з подальшим його зростанням.

У розділі використані матеріали власних досліджень [6, 83, 194].

## Висновки до Розділу 5

1. Розроблена інформаційна структура інтегрованої системи керування енергетичними потоками тепличних комплексів для виробництва продукції заданої якості. Інформаційна інтеграція полягає в єдиному комплексному підході до створення і ведення інформаційної бази всієї системи та її компонентів на основі єдиного технологічного процесу збору, зберігання,

передачі й обробки інформації, який забезпечує узгоджену інформаційну взаємодію усіх підсистем із системою керування енергетичними потоками тепличних комплексів. Розроблено програмне забезпечення системи керування енергетичними потоками тепличних комплексів зі зручним інтерфейсом в програмному середовищі LabView.

2. У ПрАТ «Комбінат «Тепличний» Київської обл., Броварського р-ну проведено промислове випробування системи керування енергетичними потоками тепличних комплексів, яка формувала оператору повідомлення у вигляді рекомендованих дій та завдань під час виникнення нештатних ситуацій та змінювала технологічні режими керування в межах агротехнологічних вимог для забезпечення відповідних стратегій керування виконанням технології виробництва рослинної продукції заданої якості. Всі підсистеми, що входять до складу системи керування енергетичними потоками тепличних комплексів для виробництва продукції заданої якості, працювали стабільно, забезпечуючи при цьому вимоги технологічного стандарту щодо якості продукції.

3. Застосування системи керування енергетичними потоками тепличних комплексів для виробництва продукції заданої якості в ПрАТ «Комбінат «Тепличний» (цех №9) дало змогу отримати економію енергоресурсів у розмірі 310127 грн і за рахунок підвищення врожайності та якості томатів збільшити прибуток до 106323 грн, що дає можливість отримати додатковий прибуток у розмірі 104,11 грн/м<sup>2</sup> і тим самим зменшити собівартість продукції на 5,7%. У процесі роботи система інтелектуального керування енергетичними ресурсами продемонструвала високу надійність.

4. У результаті досліджень і проведених розрахунків задач лінійного програмування визначено, що використання мобільного робота фітомоніторингу доцільно в теплицях площею не менше 0,166667 га.

5. Проведено ексергоекономічну оцінку ефективності впровадження системи керування енергетичними потоками тепличних комплексів для

виробництва продукції заданої якості та можливої додаткової модернізації існуючої системи керування. Проведено ексергетичний аналіз та визначено ексергоекономічний критерій оптимізації енергетичних систем, який дає змогу зробити висновок, що впровадження системи керування енергетичними потоками тепличних комплексів, до складу якої входить мобільний робот фітомоніторингу, дає більше значення коефіцієнта ефективності модернізації – 0,193, починаючи з 1-го року експлуатації системи керування. З кожним роком експлуатації системи керування значення коефіцієнта ефективності зростає в обох варіантах, лише на 8-й рік експлуатації впровадження зазначеної системи з додатковою модернізацією існуючої системи опалення теплиці буде давати найбільше значення коефіцієнта ефективності – 0,221, з подальшим його зростанням.

## ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена важлива науково-прикладна проблема розроблення наукових основ створення систем енергоефективного керування енергетичними потоками в просторово-розподілених багатозв'язних біотехнічних об'єктах – промислових теплицях, що функціонують в умовах невизначеності, для виробництва рослинної продукції заданої якості. Основні наукові та практичні результати полягають в такому.

1. За результатами аналізу функціонування систем автоматизації, що супроводжують технологію виробництва рослинної продукції в промислових теплицях в Україні, встановлено, що частка енергетичних ресурсів у структурі собівартості продукції сягає 70-80%. При цьому температура повітря, як основний технологічний фактор впливу на енергетичну характеристику виробництва, в атмосфері теплиці коливається від 18,4 до 23,1°C, а температура рослин суттєво відрізняється від температури повітря (інколи на 7°C), що знижує якість виробленої рослинної продукції та ефективність виробництва в цілому.

2. На основі використання генетичного алгоритму визначено п'ять основних факторів впливу на розвиток рослини та якість рослинної продукції в промисловій теплиці, на забезпечення відповідного рівня яких витрачається 70% енергетичних ресурсів, – це світлозабезпечення, вологозабезпечення, теплозабезпечення, забезпечення поживними речовинами та газозабезпечення.

3. Запропоновані нові критерії:

- оцінки станів розвитку рослин і рослинної продукції, а саме фітометричний (оцінка якості розвитку рослини інтегральною залежністю показників з ваговим коефіцієнтом 0,25 всіх показників) та фітотемпературний, використання яких системою автоматизації процесів

керування технологіями виробництва рослинної продукції забезпечує задану якість рослин та продукції з урахуванням всіх фаз розвитку рослин;

- ефективного використання енергетичних ресурсів, суть якого полягає у мінімізації різниці між відносними показниками фітокліматичного життєзабезпечення та фіторозвитку рослин, що забезпечує мінімізацію енергетичних витрат і задану якість рослин та продукції, його зростання в середньому по всій теплиці до 46% свідчить про неефективне споживання енергоносіїв.

4. Розроблено на основі розв'язання рівняння Нав'є-Стокса просторово-розподілену математичну модель промислової теплиці, що дає можливість оцінювати значення температури в її просторі та використовувати ці результати для формування маршруту переміщення мобільного робота фітомоніторингу. При цьому величина похибки не перевищує 5%.

5. Обґрунтовано архітектуру та концепцію побудови системи автоматизації процесів енергоефективного керування енергетичними потоками під час виробництва рослинної продукції заданої якості в просторово-розподілених біотехнічних об'єктах – промислових теплицях, яка функціонує на основі використання мобільного робота для фітомоніторингу, а також обґрунтовано застосування результатів нейромережевого аналізу для формування стратегій керування.

6. Розроблено на основі математичного апарату вейвлет-перетворень новий метод безконтактного визначення у промисловій теплиці фітометричних параметрів рослин, що дало змогу оцінювати якість розвитку рослин та використовувати зазначене в трьох основних фазах розвитку рослин (цвітіння, формування плоду, отримання врожаю) в загальному алгоритмі формування стратегій керування.

7. Розроблено за результатами параметричного синтезу та методології оптимального проєктування мобільний робот для моніторингу станів рослин, якості рослинної продукції та параметрів атмосфери в просторі

промислової теплиці, просторове орієнтування якого реалізується на основі теорії імовірнісних автоматів та стимулюючого навчання, що спільно із системою його технічного зору створює умови для самостійного переміщення, оминаючи перешкоди. Алгоритм функціонування робота реалізовано на основі програмних середовищ Processing/Wiring, Node-RED та LabVIEW. Доведено економічну доцільність використання робота на площі теплиці не менше 0,2 га.

8. Розроблено на основі методу варіаційного числення математичну модель переміщення мобільного робота, що дало можливість мінімізувати енерговитрати його акумуляторної батареї за рахунок вибору швидкості переміщення на різні відстані. Адекватність моделі підтверджена критерієм Фішера та практичним використанням робота в промисловій теплиці (похибка не перевищувала 5%).

9. Розроблено енергоефективну систему автоматизації процесів керування енергетичними потоками в просторово-розподіленому біотехнічному об'єкті – промисловій теплиці, для виробництва рослинної продукції, функціонування якої забезпечується інтелектуальним методом формування стратегій керування на основі неповної інформації про стани рослин, якість рослинної продукції, параметри атмосфери теплиці, що надходять від мобільного робота, та використання нейромережевого аналізу для формування стратегій керування, що мінімізують енергетичні витрати на забезпечення технології вирощування в умовах невизначеності. Енергетичний аналіз такої системи дає підстави стверджувати про її перспективність: на 8-й рік експлуатації системи значення коефіцієнта ефективності сягне 0,221 з подальшим його зростанням.

10. Реалізовано та проведено в ПрАТ «Комбінат «Тепличний» дослідно-промислові випробування розробленої системи автоматизації процесів керування енергетичними потоками для виробництва рослинної продукції в просторово-розподіленому біотехнічному об'єкті – промисловій теплиці, з такими результатами:

- за рахунок підвищення енергоефективності частка енергетичних ресурсів у структурі собівартості виробленої продукції порівняно з діючою системою зменшилась на 4,2%;

- собівартість виробленої продукції порівняно з діючою системою зменшилась на 5,7%.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Altug S., Mo-Yuen C., Joel H. Trussell Fuzzy Inference Systems Implemented on Neural Architectures for Motor Fault Detection and Diagnosis. IEEE Transactions On Industrial Electronics. 1999. Vol. 46. № 6.
2. ANSYS 2011. ANSYS Fluent Theory Guide. Release, Published in the USA, 794 p.
3. Bardina J. E., Huang P. G., Coakley T. J. Turbulence Modeling Validation, Testing and Development. California, NASA reports April, 1997. 88 p.
4. Barili, A., Ceresa, M., Parisi, C.: Energy-saving motion control for an autonomous mobile robot. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Athens. July, 1995. Vol.2. P. 674–676.
5. Bejan A., Transaronis G., Moran M. Thermal Design and Optimization. New York: J. Wiley. 1996. 530 p.
6. Bolbot I. Exergoeconomic optimization of power systems. From the journal «Energy and Automation». 2015. №3, P. 45–53.
7. Boulard T., Wang S. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate condition. Agric Forest Meteorol 2000. P. 25–34.
8. Chen D., Bai F., L. Wu. Kinematics control of wheeled robot based on angular rate sensors. IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, September 21-24, Chengdu, China. 2008. P. 598-602.
9. Chiu Yi-Chich, Suming Chen, Jia-Feng Lin. Study of an Autonomous Fruit Picking Robot System in Greenhouses. Engineering in Agriculture, Environment and Food. 2013. Vol. 6, Issue 3. P. 92–98.
10. Chochowski A., Bolbot I., Lysenko V., Reshetiuk V. The optimization of energy efficiency of mobile robots. Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Agriculture No 70 (Agricultural and Forest Engineering), Warsaw 2017. P. 79-88.



11. Chui E. H., Raithby G. D. Computation of radiant heat transfer on a non-orthogonal mesh using the finite-volume method, *Numerical Heat Transfer*, 2013. vol. 23. part B. P. 269–288.
12. Dixon W. E., D. M. Dawson, F. Zheang, and Z. Erkan. Global Exponential Tracking Control of a Mobile Robot System via a PE Condition. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B: Cybernetics*. 2000. Vol. 31(1). P. 129-142.
13. Egami, T., Morita, H., Tsuchiya, T.: Efficiency optimized model reference adaptive control system for a DC motor. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 1990. Vol. 37(1), P. 28–33.
14. Elfes A. Sonar-based real-world mapping and navigation. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*. 1987. Vol. 3(3). P. 249-265.
15. Elfes A. Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation. *Intern. journal Computer*. 1989. Vol. 22. (6). P. 46-57.
16. Fierro, R., and F. L. Lewis. Control of a Nonholonomic Mobile Robot: Backstepping Kinematics into Dynamics. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*. New Orleans. 1995. LA, USA. P. 3805-3810.
17. Hanjalic, K. Advanced Turbulence Closure Models: A View on the Current Status and Future Prospects, *Int. J. Heat & Fluid Flow*, 1994. vol. 15, – P. 178-203.
18. Hashim S., Tien-Fu Lu. A new strategy in dynamic time-dependent motion planning for nonholonomic mobile robots. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. 2009. P. 1692 – 1697.
19. Hassanzadeh P., Raithby G. D., Chui E. H. Efficient calculation of radiation heat transfer in participating media, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2008. Vol. 22, no 2, pp. 129-139, doi:10.2514/1.33271, Reston/USA.
20. Hugo Challa. Integration of explanatory and empirical crop models for greenhouse management support, *Proceedings of Models. Plant Growth, Acta Hort.* 507. 2007. P:107-115.

21. I.-Chang Yanga, Kuang-Wen Hsiehb, Chao-Yin Tsaic, Yu-I. Huangb, Yu-Liang Chenc, Suming Chen. Development of an automation system for greenhouse seedling production management using radio-frequency-identification and local remote sensing techniques. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 2014. Vol. 7. issue 1. February. P. 52–58.
22. Ichihara Y., Ohnishi. K. Path planning and tracking control of wheeled mobile robot considering robots capacity. *IEEE International Conference on ICIT*. 2006. P. 176 – 181.
23. Kanayama, Y., Y. Kimura, F. Miyazaki, and T. Noguchi. A Stable Tracking Control Method for an Autonomous Mobile Robot. *Proceedings of the IEEE 102 International Conference on Robotics and Automation*. Cincinnati, USA. 1990. P. 384-389.
24. Khmelnik S. I. Navier-Stokes equations. On the existence and the search method for global solutions, *Mathematics in Computers*. MiC. 2018. 134 p.
25. Kichah A, Bournet PE, Migeon C, Boulard T. Measurement and CFD simulation of microclimate characteristics and transpiration of an impatiens pot plant crop in a greenhouse. *Biosyst Eng* 2012. 112:22–34.
26. Korobiichuk, I., Lysenko, V., Reshetyuk, V., Lendiel, T., & Kamiński, M. Energy-efficient electrotechnical complex of greenhouses with regard to quality of vegetable production. In *International Conference on Systems, Control and Information Technologies* 2016. P. 243-251.
27. Koshkin D. The dynamic model of the greenhouse environment control system. *Motrol*, 2011. Lublin. Tom 13A. P. 189–195.
28. Kusko, A., Galler, D.: Control means for minimization of losses in AC and DC motor drives. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 1983. 19(4), P. 561–570.
29. Launder B. E. Spalding D. B. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, London, England. 1972.
30. Lysenko V., Reshetyuk V., Shtepa V., Dudnyk A. Greenhouse Environment Control System With Neural Network Predictions of External Disturbances [Електронний ресурс]. *Contemporary aspects of production*

engineering. XXII International students scientific conference, 22–25 May 2013. abstract. Warsaw, P. 40–52.

31. Lysenko V. P., Bolbot I. M., Romasevych Yu. O., Loveykin V. S., Voytiuk V. D. Algorithms of robotic electrotechnical complex management in agricultural production. River Publishers Series in Automation, Control and Robotics. Control systems: Theory and Applications. 2018. P. 271-289.

32. Lysenko V. P., Zhyltsov A. V., Bolbot I. M., Lendiel T. I., Nalyvaiko V. A. Phytomonitoring in the phytometrics of the plants. E3S Web of Conferences 154, 07012 (2020) ICoRES 2019 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015407012>

33. Lysenko, V., Lendiel, T., & Komarchuk, D. Phytomonitoring in a Greenhouse Based on Arduino Hardware. 2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 2018. P. 365-368.

34. Majdoub H, Boulard T, Fatnassi H, Bouirden L. Airflow and microclimate patterns in a one-hectare. Canary type greenhouse: an experimental and CFD assisted study. Agric Forest Meteorol 2009. P. 50–62.

35. Martin F. G. Robotic Explorations: An Introduction to Engineering Through Design Prentice Hall, 2000. 462 p.

36. Martinović G., Janos S. Greenhouse microclimatic environment controlled by a mobile measuring station. NJAS. Wageningen Journal of Life Sciences. 2014, 6 December. Vol. 70/71. P. 61-70.

37. Mathala J. Gupta, Pitam Chandra. Effect of greenhouse design parameters on conservation of energy for greenhouse environmental control. Energy. August. 2002. Vol. 27, Issue 8. P. 777–794.

38. Mehta S. S., Burks T. F., Dixon W. E. Vision-based localization of a wheeled mobile robot for greenhouse applications: A daisy-chaining approach. Computers and Electronics in Agriculture. 2008, August. Vol. 63, Issue 1. P. 28-37.

39. Mei, Y., Lu, Y.-H., Hu, Y.C., Lee, C.S.G. Energy-efficient motion planning for mobile robots. In. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans. 2004. Vol.5. P. 4344–4349.
40. Modest M. F. Radiative Heat Transfer (Third Edition), Publishing in: Academic Press, 2013. 897 p.
41. Murthy J. Y., Mathur S. R. Finite volume method for radiative heat transfer using unstructured meshes, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1998. vol.12, no.3, P. 313-321.
42. Nolfi S., Floreano D. Evolutionary Robotics: The Biology, Intelligence, and Technology of Self-Organizing Machines Bradford Books. 2004. 320 p.
43. Ntinasa G., Koukounarasb A., Kotsopoulos T. Effect of energy saving solar sleeves on characteristics of hydroponic tomatoes grown in a greenhouse. Scientia Horticulturae. 2015, 14 October. Vol. 194. P. 126–133.
44. Sarkar S. Balakrishnan L. Application of a Reynolds-Stress Turbulence Model to the Compressible Shear Layer. ICASE Report 90-18 NASA CR 182002. 1990.
45. Shengyuan Xu, Wei Xing Zheng, Yun Zou. Passivity Analysis of Neural Networks with Time-Varying Delays. IEEE Transactions on Circuits and Systems II. Express Briefs. Vol. 56 (4). P. 325–329.
46. Shvorov S., Reshetyuk V., Bolbot I., Shtepa V., Chirchenko D. Theoretical issues construction and operation of agricultural mission robotic system. Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Agriculture No 60 (Agricultural and Forest Engineering), Warsaw 2012. P. 97-102.
47. Speziale C., Gatski T., Hussaini M., Lumley J. Modeling of Turbulent Transport Equations. Simulation and Modeling of Turbulent Flows, Oxford University. Press, 1996. 159 p.
48. Stanghellini C. Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management. Ph. D. Dissertation. Wageningen : Agricultural University, 1987. 150 p.

49. Thornley J. H. M., Hurd R. G., Pooley A. A model of growth of the fifth leaf of tomato. *Annals of Botany*. 1981. Vol. 48. P. 327 – 340.
50. Thornley J.H.M., Hurd R.G. An Analysis of the Growth of Young Tomato Plants in Water Culture at Different Light Integrals and CO<sub>2</sub> Concentrations. *Annals of Botany*. 1979. Vol.38, Issue 2 P. 389-400.
51. Trokhaniak V., Klendii O. Numerical simulation of hydrodynamic and heat-mass exchange processes of a microclimate control system in an industrial greenhouse. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II. Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, 2018. Vol. 11 (60). no. 2. 171-184.
52. Voronin, A. N., Yasinsky, A. G., Shvorov, S. A. Synthesis of compromise-optimal trajectories of mobile objects in conflict environment. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2002. No 34(2). P. 1-8.
53. Zhang, P., Xu, L. Unsupervised Segmentation of Greenhouse Plant Images Based on Statistical Method. 2018. *Scientific Reports*. 8 (1). № 4465.
54. Агарков А. М., Шишко Г. Г. Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов при эксплуатации теплиц. Киев, Будивельник, 1985. 120 с.
55. Алабовский А. Н., Недужий И. А. Техническая термодинамика и теплопередача. М., Выща школа, 1990. 255 с.
56. Алехина Н. Д., Балнокин Ю. В., Гавриленко В. Ф. и др. Физиология растений: Учебник для студ. Вузов. Под. ред. И. П. Ермакова. М., Издательский центр «Академия», 2005. 640 с.
57. Алиев Э. А. Выращивание овощей в гидропонных теплицах. М., Урожай, 1985. 160 с.
58. Алиев Э. А., Гилль Л. С. и др. Овощеводство и цветоводство защищенного грунта для любителей. К., Урожай, 1990. 256 с.
59. Альянах И. Н. Моделирование вычислительных систем. Л., Машиностроение, 1998. 223 с.

60. Амерханов Р. А., Долинский А. А., Драганов Б. Х. Основы эксергоэкономического метода оптимизации энергопреобразующих систем. Промышленная теплотехника. 2010. Т. 32, № 2. С. 90-101.
61. Андрианов Ю. Д., Глейзер Л. Я., Игнатьев М. Б. и др. Управляющие системы промышленных роботов. Под общ. ред. И. М. Макарова. М. Машиностроение, 1984. 288 с.
62. Андриевский Е. Н. Эксплуатация электроустановок в сельском хозяйстве. М., Энергоатомиздат, 1988. 143 с.
63. Анхимюк В. Л., Олейко В. Ф., Михеев Н. Н. Теория автоматического управления. Мн., 2000. 352 с.
64. Апостолук В. О., Апостолук О. С. Інтелектуальні системи керування: конспект лекцій. К., НТУУ «КПІ», 2008. 88 с.
65. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения. Успехи физических наук. 1998. Т. 166. № 11. С. 1145–1170.
66. Асфаль Р. Роботы и автоматизация производства. Пер. с англ. Евстегнеева М. Ю. и др. М., Машиностроение, 1989. 448 с.
67. Ахатов А. К. Мир томата глазами фитопатолога. М., КМК, 2010. 288 с.
68. Барский А. Б. Логические нейронные сети: учебное пособие. М., 2012. 352 с.
69. Батанов А. Ф., Грицынин С. Н., Муркин С. В. Робототехнические комплексы для обеспечения специальных операций. Специальная техника, 1999. №6. С. 10-17.
70. Батіщев Д. І., Неймарк Е. А., Старостін Н. В. Застосування генетичних алгоритмів до вирішення задач дискретної оптимізації. Нижній Новгород, 2007. 88 с.
71. Бейко И. В., Бублик Б. Н., Зинько П. Н. Методы и алгоритмы решения задач оптимизации. К., Вища шк., 1983. 511 с.
72. Беликов Ю. М. Автоматизация управления микроклиматом в тепличных комбинатах. Техника в сельском хозяйстве, 1984. № 1. С. 26–29.

73. Белов И. А., Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений: учебное пособие. Балт. Гос. Техн. ун-т. СПб., 2001. 108 с.
74. Блохин Л. Н., Осадчий С. И., Дидык А. К., Рудюк Г. И. Технологии конструирования современных конкурентоспособных комплексов управления стохастическим движением объектов. Кировоград, 2015. 284 с.
75. Болбот И. М. Критерий обеспечения урожайности растений – основа эффективного потребления энергетических ресурсов тепличными комплексами. Труды международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве», М., 2014. Том-2. С. 157–162.
76. Болбот И. М. Математическая модель влияния теплового режима на развитие и урожайность томатов в системе растение-почва-воздух. MOTROL. Lublin. 2013. Vol. 15 № 4. P. 153–158.
77. Болбот І. М. Архітектура енергоефективної системи управління теплицею із застосуванням нейромережевого аналізу та робототехнічного комплексу. II Міжнародна науково-практична конференція. Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні. Київ, 26-27 червня 2014 року: тези доповіді. С. 108–110.
78. Болбот І. М. Ергономічний аналіз систем диспетчерського управління і збору даних. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2011. №11 (4). С. 103–108.
79. Болбот І. М. Комплексна оцінка рівня якості томатів. III Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК», Київ, 17-18 грудня 2015 року: тези доповіді. С. 49–50.
80. Болбот І. М. Математична модель теплозабезпечення рослини в системі рослина-грунт-повітря. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2013. №13 (5). С. 21–27.
81. Болбот І. М. Особливості застосування інтелектуальних систем при керуванні електротехнічними комплексами в промисловій теплиці. IV

Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК», Київ, 21-22 лютого 2016 року: тези доповіді. С. 51–53.

82. Болбот І. М. Підсистема комплексної оцінки рівня якості томатів системи керування електротехнічними комплексами в промисловій теплиці. Міжнародна науково-практична конференція з нагоди 120-річчя заснування НУБіП України. Проблеми розвитку систем енергетики і автоматики. Том 5, Київ, 23-25 травня 2018 року: тези доповіді. С. 32–33.

83. Болбот І. М. Екзергоекономічна оптимізація енергетичних систем. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2011. № 166 Частина 4. С. 126–133.

84. Болбот І. М. Енергоефективна нейромережева підсистема керування електротехнічним комплексом в промисловій теплиці. V Міжнародна науково-практична конференція. Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК. Київ, 19-20 грудня 2019 року: тези доповіді. С. 126–127.

85. Болбот І. М. Моделювання факторів життєзабезпечення рослини в системі рослина-грунт-повітря. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2014. № 194 Частина 2. С. 50–57.

86. Болбот І. М. Нестационарна нелінійна теплопередача через зовнішні захисні конструкції теплиць. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2011. № 161. С. 175–179.

87. Болбот І. М., Болбот А. І. Концептуальна модель системи управління енергетичними потоками тепличних комбінатів. IX Міжнародна науково-технічна конференція. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта). Київ, 19-22 травня 2020 року: тези доповіді.  
<http://econference.nubip.edu.ua/index.php/pmeas/pmeas2020/paper/view/2340>



88. Боровиков В. П. Нейронные сети. Statistica Neural Networks. Методология и технологии современного анализа данных. М., Горячая линия - Телеком, 2008. 392 с.
89. Бородин И. Ф., Недилько Н. М. Автоматизация технологических процессов. М., Агропромиздат, 1986. 368 с.
90. Борщ В. И., Донец В. А., Коваль В. В., Лейбзон А. Я., Лесовой И. П. Оптимизация структур больших систем. К., 2000. 188 с.
91. Брагин В. Б., Войлов Ю. Г., Жабитинский Ю. Д. и др. Системы очувствления и адаптивные промышленные роботы. Под ред. Попова Е. П., Ключева В. В. М., Машиностроение, 1988. 392 с.
92. Бродянский В. М., Верховский Г. П., Карчев Я. Я. и др. Эксергетические расчеты технических систем: Справ. Пособие. Под ред. А. А. Долинского, В. М. Бродянского. К., Наук. думка, 1991. 360 с.
93. Брызгалов В. А., Советкина В. Е., Савинова Н. И. Овощеводство защищенного грунта. Под ред. В. А. Брызгалова. М., Колос, 1995. 325 с.
94. Бурдаков С. Ф., Мирошник И. В., Стельмаков Р. Э. Системы управления движением колесных роботов. СПб., Наука, 2001. 229 с.
95. Віхрова Л. Г., Слюсаренко Т. О., Каліч В. М. Патент 8716 UA, МПК A01G 15/00. Пристрій для регулювання мікроклімату в приміщенні теплиці. Заявник і власник Кіровоградський національний технічний університет. № u200501357; заявлено 15.02.2005; опубліковано 15.08.2005, Бюл. № 8, 2005 р.
96. Воронин А. Н. Многокритериальный синтез динамических систем. К., Наукова думка, 1992. 157 с.
97. Гавриченко А. И., Клочков А. М. Динамика температуры воздуха в блочной теплице при обогреве. Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1975. № 4. С. 12-15.
98. Гайдышев И. Анализ и обработка данных : специальный справочник. СПб., Питер, 2001. 752 с.
99. Галушкин А. И. Нейронные сети: основы теории. М., 2015. 496 с.

100. Ганжа В. Л. Основы эффективного использования энергоресурсов. Теория и практика энергосбережения. Минск, Белорусская наука, 2007. 450 с.
101. Гарбуз В. М., Захаров А. В., Повещенко Ю. А., Попов С. Б., Попов Ю. П. Математическое моделирование тепловых процессов в почве теплиц. Отв. ред. В. М. Гарбуз. АН СССР Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша. М., Наука, 2005. 25 с.
102. Гареев А. Ф. Применение вероятностной нейронной сети для задачи классификации текстов. Наука и образование. М., НиО, 2004. № 11. С. 105–117.
103. Геловани В. А., Башлыков А. А. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений. М., 2001. 294 с.
104. Герасимов Б. М., Тарасов В. А., Токарев И. В. Человеко-машинные системы принятия решений с элементами искусственного интеллекта. К., Наук. думка, 1993. 184 с.
105. Гілля Л. С. Сучасні технології овочівництва закритого і відкритого ґрунту. Частина 1. Закритий ґрунт. Вінниця, Нова книга, 2008. 364 с.
106. Глобус А. М., Каганов М. А. Физика среды обитания растений. Перев. с англ. под ред. Глобуса А. М. Л., Гидрометеиздат, 1968. 305 с.
107. Головки В. Нейроинтелект: теория и применение. Книга 2. БПИ, Брест, 1999. 227 с.
108. Гольцев Д. Г. Сутність та маркетинговий підхід до поняття «якість» у системі управління якістю. Актуальні проблеми економіки. 2009. № 3. С. 79-88.
109. Горбачев В. А. Математическое моделирование углекислотного режима сельскохозяйственных посевов. Обзорная информация ВНИИГМИ–МЦД, серия «Метеорология», 1983. Вып. 10. 44 с.
110. Горобець В. Г., Яценко О. В. Розробка системи опалення та математичної моделі процесів тепло- і масопереносу в теплицях з використанням альтернативних джерел енергії. Енергетика і автоматика, 2014. №1. С. 25-37.

111. Градецкий В. Г., Вешников В. Б., Калиниченко С. В. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. М., Наука, 2001. 360 с.
112. Гудвин Г. К., Гребен С. Ф., Сольгадо М. Э. Проектирование систем управления. М., БИНОМ, Лаборатория знаний, 2004. 911 с.
113. Державний стандарт України. Ергономічні принципи проектування робочих систем. ДСТУ ISO 6385 – 99. Видання офіційне. Київ, Держстандарт України, 1999. 5 с.
114. Державні будівельні норми України. Теплиці та парники: ДБН В.2.2-2-95. К., Держкоммістобудування України, 1995. 14 с.
115. Джалурия Й. Естественная конвекция: тепло- и массообмен. Пер. с англ. С. Л. Вишневецкого. М., Мир, 1983. 399 с.
116. Діордієв В. Т., Кашкарьов А. О. Керування параметрами мікроклімату теплиці на основі прямого спалювання біологічної маси. Праці ТДАТУ. Мелітополь, ТДАТУ, 2014. Вип. 14. Т. 2. С. 86-93.
117. Долинский А. А., Драганов Б. Х., Дубровин В. А. Оптимизация технических систем методом эксергоэкономики. Промышленная теплотехника. 2003. № 4. С. 28-31.
118. Драганов Б. Х., Кузнецов В. А., Рудобашта С. П. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве. М., АПИ, 1986. 463 с.
119. Драганов Б. Х. Динамика синергетических и иерархических систем в эволюционных процессах. Відроджується енергетика. 2009. №2 (17). С. 5-7.
120. Драганов Б. Х. Термoeкономическая оптимизация энергетических систем при эксплуатационном и экологическом режимах их работы. Экотехнологии и ресурсосбережение. 2006. №2. С. 8–10.
121. Драганов Б. Х., Долинський А. А., Міщенко А. В. Теплотехніка. Київ, «ІНКOC», 2005. 504 с.
122. Драганов Б. Х., Бессараб О. С., Долінський А. А., Лазоренко В. О., Міщенко А. В., Шеліманова О. В. Теплотехніка. Підручник. 2-е вид., перероб. і доп. Київ, «ІНКOC», 2005. 400 с.

123. Древис М., Хольц И. Управление водным режимом овощных культур в теплицах. Пер. с нем. Д. О. Лёбла, С. И. Шуничева. М., Колос, 1981. с. 37.
124. Дремин Н. И. и др. Вейвлеты и их использование. УФН. 2001. Т. 171. № 5. С. 24-30.
125. Дудник А. О. Автоматизоване керування процесом вирощування томатів у теплицях з прогнозуванням зовнішніх природних збурень : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.13.07 – автоматизація процесів керування. Нац. ун-т харч. технологій. К., 2014.
126. Дьяконов В. П. MATLAB: учеб. Кур. СПб., Питер, 2001. 560 с.
127. Дьяконов В. П., Абрамов И. В. MATLAB. Обработка сигналов и изображений: специальный справочник. СПб., Питер, 2002. 380 с.
128. Егоров К. В. Основы теории автоматического регулирования. М., Энергия, 1967. 648 с.
129. Егупов Н. Д. Методы классической и современной теории автоматического управления. Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления. М., 2000. 736 с.
130. Епифанов А. П., Гущинский А. Г., Малайчук Л. М. Электропривод в сельском хозяйстве. СПб., Лань, 2010. 224 с.
131. Журавлев В. В. Математические модели процессов регуляции в физиологии растений. Научный журнал Известия АГУ. 2008. Барнаул. Том 1 №57. С. 43 – 57.
132. Заєць Н. А. Наукові основи керування електротехнічними комплексами неперервних виробництв із прогнозуванням нештатних ситуацій : дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи. Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. К., 2019.
133. Заєць Н. А., Штепа В. М. Використання генетичного алгоритму для вирішення оптимізаційних задач в електротехніці. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. К. НУБіПУ. 2011. Вип. 166. С. 157 – 164.

134. Згуровський М. З., Панкратова Н. Д. Основи системного аналізу. К., 2007. 544 с.
135. Зеeman И. Климат теплиц и его регулирование. Пер. с нем. М., Сельхозиздат, 1961. 126 с.
136. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Основы управления манипуляционными роботами. Учебник для вузов. 2-е изд., доп. М., МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 480 с.
137. Зенкевич С. Л., Назарова А. В. Система управления мобильного робота. Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Приборостроение. 2006. №3. С.31-51.
138. Иванов А. О. Теорія автоматичного керування: підручник. Дніпропетровськ, Національний гірничий університет, 2003. 250 с.
139. Ільчук М. М., Зрібняк Л. Я. та ін. Організація і планування сільськогосподарського виробництва. К., Нова Книга, 2007. 784 с.
140. К. Дж. Дейт. Введение в системы базы данных. К., «Издательский дом ВИЛЬЯМС», 2005. 1325 с.
141. Каталог технічних засобів автоматизації Arduino [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://arduino.ua/>
142. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. М., Вильямс, 2001. 516 с.
143. Карпов В. Э. К вопросу об управлении мобильным роботом в условиях общей постановки задачи. Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. № 1.
144. Карпов В. Э., Вальцев В. Б. Динамическое планирование поведения робота на основе сети «интеллектуальных» нейронов. Искусственный интеллект и принятие решений. 2009. №2. С. 58-69.
145. Касаткин А. И. Профессиональное программирование на языке СИ. Минск, 1993. 300 с.
146. Катренко А. В., Пасічник В. В., Пасько В. П. Теорія прийняття рішень: підручник для студ.вищих навч.закл. К., ВНУ, 2009. 447 с.

147. Клапвайк Д. Климат теплиц и управление ростом растений. М., Колос, 1976. 127 с.
148. Клименко Л. П., Пізінцалі Л. В., Александровська Н. І. та ін. Метрологія, стандартизація та управління якістю. Приклади і задачі. Частина II. М., 2010. 78 с.
149. Коваль В. Вдосконалений метод побудови локальної карти середовища мобільного робота. Вісник Тернопільського державного технічного університету ім. І. Пулюя. 2003. Т.8. №2. С. 80-88.
150. Коваль В. Спосіб виявлення перешкод мобільного робота з використанням технології злиття показів різномірних сенсорів. АСУ и приборы автоматики. Харьков. 2004. Вип. 126. С. 128-135.
151. Козирський В. В., Болбот І. М. Архітектура енергоефективної системи управління теплицею із застосуванням нейромережевого аналізу та робототехнічного комплексу. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2015. № 209 Частина 2. С. 75–80.
152. Козирський В. В., Болбот І. М., Батанов Ю. О. Адаптивна математична модель «Температура повітря – врожайність томатів». Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2013. № 184 Частина 2. С. 110–114.
153. Козирський В. В., Болбот І. М., Батанов Ю. О. Математична модель оцінювання впливу світлозабезпечення на ріст і розвиток рослин у спорудах закритого ґрунту. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2014. № 194 Частина 1. С. 36–43.
154. Козирський В. В., Болбот І. М., Мартинюк Л. В. Метод визначення сумарного термічного опору огорожуючої конструкції сонячного колектора. Енергетика і автоматика. 2012. № 2. С. 5–7.
155. Кононюк А. Ю. Нейронні мережі і генетичні алгоритми. К., 2008. 446 с.
156. Корчемний М. О., Лисенко В. П., Чапний М. В. Нейронні мережі. К., НАУ, 2008. 156 с.

157. Корчемний М. О., Федорейко В. С., Щербань В. Ю. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. Тернопіль, Підручники & посібники, 2001. 974 с.
158. Крак Ю. В., Кручинін К. С. Попередня вейвлет-обробка і використання методу головних для вирішення задачі ідентифікації особи за фотографічним зображенням. Штучний інтелект. 2010. № 1. С. 76–85.
159. Круглов В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М., Горячая линия–Телеком, 2002. 382 с.
160. Крянев А. В., Лукин Г. В. Математические методы обработки неопределенных данных. М., ФИЗМАТЛИТ, 2003. 216 с.
161. Кудрявцев В. Б., Гасанов Э. Э., Подколзин А. С. и др. Введение в теорию интеллектуальных систем: учеб. пособ. М., Издательский отдел факультета ВМиК МГУ им. М. В. Ломоносова МАКС Пресс, 2006. 208 с.
162. Кунцевич В. М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации. К., 2006. 261 с.
163. Куртнер Д. А., Усков И. Б. Климатические факторы и тепловой режим в открытом и защищенном грунте. Л., Гидрометеиздат, 1982. 235 с.
164. Ладанюк А. П., Власенко Л. О. Розробка ефективних систем автоматизації технологічних комплексів з використанням методів сучасної теорії керування. Інтегровані технології та енергозбереження. 2001. № 3. С. 14–19.
165. Ладанюк А. П., Смітюх Я. В., Власенко Л. О., Заєць Н. А., Ельперін І. В. Системний аналіз складних систем управління: навчальний посібник. К., 2013. 274 с.
166. Лендел Т. І. Енергоефективне керування електротехнічним комплексом теплиці з урахуванням стану біологічного об'єкта : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук, Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. К., 2016.

167. Ленков С. В., Шворов С. А., Болбот І. М., Штепа В. М., Чирченко Д. В. Дискретна векторна оптимізація траєкторій руху мобільних роботів. Сучасна спеціальна техніка. Системи та методи обробки інформації. 2012. №1 (28). С. 13–19.

168. Лисенко В. П. Економічний критерій вибору стратегії керування біотехнологічними об'єктами. Біоресурси і природокористування. 2014. Т. 6, № 3/4. С. 174–179.

169. Лисенко В. П. Наукові основи керування електротехнічними комплексами для виробництва сільськогосподарської продукції : дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи. Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. К., 2014.

170. Лисенко В. П., Болбот І. М. Алгоритм керування інтелектуальним роботизованим електротехнічним комплексом в промисловій теплиці. XXIV Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика 2017», Київ, 13-15 вересня 2017 року: тези доповіді. С. 176.

171. Лисенко В. П., Болбот І. М., Лендел Т. І. Патент 115830 UA, МПК A01G 9/24 (2006.01). Спосіб регулювання мікроклімату в теплиці з урахуванням фітотемпературного критерію оцінки розвитку рослин. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201612202; заявлено 01.12.2016; опубліковано 25.04.2017, Бюл. № 8.

172. Лисенко В. П., Болбот І. М., Лендел Т. І., Патент 124088 UA, МПК B25J 11/00, B25J 1/02 (2006.01). Маніпулятор для вимірювання стану атмосфери в біотехнічних об'єктах. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201708123; заявлено 04.08.2017; опубліковано 26.03.2018, Бюл. № 6.

173. Лисенко В. П., Болбот І. М., Лендел Т. І., Чернов І. І. Патент 114191 UA, МПК G05B 19/24 (2006.01), B25J 9/18 (2006.01), B25J 9/16 (2006.01). Спосіб керування переміщенням мобільного робота в теплиці. Заявник і



власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201611119; заявлено 04.11.2016; опубліковано 27.02.2017, Бюл. № 4.

174. Лисенко В. П., Болбот І. М., Лендел Т. І., Чернов І. І. Патент 95283 UA, МПК A01B 51/00, A01G 3/00, A01D 45/00, A01G 25/00. Мобільний самохідний електротехнічний комплекс фітомоніторингу в теплиці. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № a201305341; заявлено 25.04.2013; опубліковано 25.12.2014, Бюл. № 24.

175. Лисенко В. П., Болбот І. М., Мірошник В. О., Лендел Т. І. Температура рослин як параметр для регулювання. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2015. № 209 Частина 1. С. 64–72.

176. Лисенко В. П., Болбот І. М., Чернов І. І. Структура та архітектура електротехнічного роботизованого комплексу фітомоніторингу рослин в теплиці. II Міжнародна науково-практична конференція. Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні. Київ, 25-26 червня 2015 року: тези доповіді. С. 117–118.

177. Лисенко В. П., Болбот І. М., Штепа В. М., Лендел Т. І. Підсистема фітомоніторингу в теплиці. II Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК», 15-16 жовтня 2014 року: тези доповіді. С. 73–74.

178. Лисенко В. П., Болбот І. М., Лендел Т. І. Використання фітотемпературного критерію оцінки розвитку рослин в системі автоматичного регулювання. Міжнародна науково-практична конференція з нагоди 115-річчя заснування НУБіП України, Київ, 5-6 листопада 2013 року: тези доповіді. С. 12–13.

179. Лисенко В. П., Болбот, І. М. Лендел Т. І., Чернов І. І. Патент 103274 UA, МПК G05B 13/00. Система управління біотехнічними об'єктами. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування

України. № u201505549; заявлено 05.06.2015; опубліковано 10.12.2015, Бюл. № 23.

180. Лисенко В. П., Мірошник В. О., Штепа В. М., Болбот І. М., Дудник А. О. Патент 88809 UA, МПК A01G 9/24 (2006.01). Пристрій штучного клімату. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № a201210803; заявлено 14.09.12; опубліковано 10.04.14, Бюл. № 7.

181. Лисенко В. П., Решетюк В. М., Штепа В. М., Заєць Н. А., Мірошник В. О., Дудник А. О. Системи штучного інтелекту: нечітка логіка, нейронні мережі, нечіткі нейронні мережі, генетичний алгоритм. К., 2014. 336 с.

182. Лисенко В. П., Штепа В. М., Болбот І. М., Лендел Т. І., Чернов І. І. Патент 95612 UA, МПК G05B 13/0. Система управління біотехнічними об'єктами. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201408491; заявлено 25.07.2014; опубліковано 25.12.2014, Бюл. № 24.

183. Лисенко В. П., Штепа В. М., Дудник А. О. Ймовірнісна (Байєсівська) нейронна мережа класифікації температурних образів. Вісник аграрної науки. 2011. № 4. С. 53–56.

184. Лисенко В. П., Штепа В. М., Заєць Н. А., Болбот І. М., Дудник А. О., Лендел Т. І. Патент 92971 UA, МПК G05B 13/00. Система управління біотехнічними об'єктами. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201404129; заявлено 17.04.2014; опубліковано 25.12.2014, Бюл. № 24.

185. Лисенко В. П., Штепа В. М., Заєць Н. А., Болбот І. М., Дудник А. О. Патент 76175 UA, МПК G05B 13/00. Система управління процесом утримання біологічних об'єктів. Заявник і власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u201207133; заявлено 12.06.2012; опубліковано 25.12.2012, Бюл. № 24.

186. Лисенко В. П., Штепа В. М., Голуб Б. Л., Болбот І. М., Щербатюк В. Л. Система управління біотехнічними об'єктами із нейромережевими блоками. XIX Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика 2012», Київ, 26-28 вересня 2012 року: тези доповіді. С. 223–224.

187. Лисенко В. П., Штепа В. М., Голуб Б. Л. Система управління біотехнічними об'єктами із нейромережевими блоками. Автоматика/Automatics - 2012. XIX Міжнар. конф. з автоматичного управління, Київ, 26–28 вересня 2012: тези доп. С. 223–224.

188. Лисенко В. П., Болбот І. М. Вплив біологічного об'єкта на визначення оптимального значення температури при локалізації датчиків автоматизованих систем управління. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2009. № 139 С. 32–37.

189. Лисенко В. П., Болбот І. М., Лендел Т. І. Енергоефективна система керування електротехнологічним комплексом промислових теплиць. Технічна електродинаміка. 2019. № 2. С. 78–81.

190. Лисенко В. П., Болбот І. М., Лендел Т. І. Інтелектуальний мобільний робот для теплиць. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2017. № 187. С. 58–60.

191. Лисенко В. П., Болбот І. М., Лендел Т. І. Фітотемпературний критерій оцінки розвитку рослини. Науковий журнал «Енергетика і автоматика». 2013. № 3. С. 122–128.

192. Лисенко В. П., Болбот І. М., Лендел Т. І., Чернов І. І. Програмно-апаратне забезпечення системи фітомоніторингу в теплиці. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2017. № 154. С. 42–45.

193. Лисенко В. П., Болбот І. М., Лендел Т. І. Мобільні роботи фітомоніторингу в теплиці. Київ, ЦП «Компринт», 2017. 255 с.

194. Лисенко В. П., Болбот І. М., Чернов І. І. Економічне обґрунтування впровадження робототехнічних систем у тепличні господарства. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2012. № 174. Частина 2. С. 53–59.

195. Лисенко В. П., Болбот І. М., Чернов І. І. Моделювання температурних полів у теплиці. Індуктивне моделювання складних систем. Збірник наукових праць. 2015. Вип. 7. С. 154–164.

196. Лисенко В. П., Болбот І. М., Чернов І. І. Орієнтація мобільного робота в просторі теплиці за допомогою імовірнісних автоматів та стимулюючого навчання. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2014. № 194 Частина 3. С. 166–172.

197. Лисенко В. П., Болбот І. М., Чернов І. І. Система керування електротехнічного роботизованого комплексу фітомоніторингу рослин в теплиці. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2016. № 252. С. 25–33.

198. Лисенко В. П., Болбот І. М., Штепа В. М., Заєць Н. А., Ряба О. І. Нейромережеве розпізнавання образів стану агротехнічних культур. IV Міжнародна науково-технічна конференція «Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи», Тернопіль, 24–26 квітня 2012 року: тези доповіді. С. 109–111.

199. Лисенко В. П., Головінський Б. Л. Метод оцінки ефективності роботи систем управління умовами утримання біологічних об'єктів для промислового виробництва сільськогосподарської продукції. Аграрна наука та освіта. К., 2005. Т.6, № 3–4. С. 127–133.

200. Лисенко В. П., Козирський В. В., Болбот І. М., Болбот О. М., Чернов І. І., Батанов Ю. О. Робототехнічна система фітомоніторингу в тепличному господарстві. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2011. № 166 Частина 3. С. 93–98.

201. Лисенко В. П., Лендел Т. І. Моделі для формування оптимальних стратегій керування у спорудах закритого ґрунту. Вісник аграрної науки. 2015. Вип. 10. С. 45-48.

202. Лисенко В. П., Штепа В. М., Болбот І. М., Заєць Н. А., Ряба О. І. Підсистема прийняття рішень як функціональний елемент системи управління біотехнічними об'єктами. Міжнародна наукова конференція «Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту». Херсон, 2012 року: тези доповіді. С. 276–278.

203. Лисенко, В. П., Болбот, І. М. Роботи та робототехнічні системи в агропромисловому комплексі. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2010. № 153. С. 105–111.

204. Лихацький В. І., Бургарт Ю. Е., Васянович В. Д. Овочівництво. За ред. В. І. Лихацького. К., Урожай, 1996. 359 с.

205. Лозано М. А., Валеро А. Теория эксергетической стоимости. Пергамон Пресс. 1993. т.18, №9. С. 939–960.

206. Лыков А. В., Иванов А. В. Конечные интегральные преобразования и их применение к решению задач теплопроводности. Тепло- и массообмен в процессах испарения. М., 1958. С. 105–145.

207. Лысенко В. Ф., Болбот И. М., Лендел Т. И. Вейвлет-анализ в фитометрии растений. Актуальные вопросы современной науки. Новосибирск, Издательство ЦРНС. 2014. С. 163–173.

208. Лысенко В. Ф., Болбот И. М., Чернов И. И. Математическая модель динамики движения электротехнического роботизированого комплекса фитомониторинга в теплице. MOTROL. Lublin. 2015. Vol. 17 № 4. Р. 19–24.

209. Люгер Дж. Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. Пер. с англ. Н. И. Галагана, К. Д. Протасовой. М., Вильямс, 2005. 864 с.

210. Макаров И. М., Топчиев Ю. И. Робототехника: история и перспективы. М., Наука, Издательство МАИ. 2003. 101 с.

211. Макарова И. М., Чиганова В. А. Управляющие системы промышленных роботов. М., Энергоатомиздат, 1984. 430 с.
212. Максимов Н. А. Краткий курс физиологии растений. М., «Госиздат с.х.литературы», 1958. 562 с.
213. Малоземов В. Н., Певный А. Б., Третьяков А. А. Быстрое вейвлетное преобразование дискретных периодических сигналов и изображений. Проблемы передачи информации. 1998. Т. 34, вып. 2. С. 77–85.
214. Мартиненко І. І., Лисенко В. П., Тищенко Л. П., Болбот І. М., Олійник П. В. Проектування систем електрифікації та автоматизації АПК. Підручник. К., 2008. 330 с.
215. Мартыненко И. И., Бадалян А. Х., Степанян А. С. Управление микроклиматом теплиц. Мех. и электр. с. х. 1984. №10. С. 8-10.
216. Мартыненко И. И., Гирнык Н. Л., Полищук В. М. Автоматизация управления температурно-влажностными режимами сельскохозяйственных объектов. М., Колос, 1984. 152 с.
217. Мартыненко И. И., Котов Б. И. Компенсация внешних возмущений в системах автоматического регулирования температуры. Мех. и электр. соц. с.- х. 1973. № 9. С. 52–55.
218. Мартыненко Ю. Г. Управление движением мобильных колесных роботов. Фундаментальная и прикладная математика, 2005. Т. 11. №8. С.29-80.
219. Маслов О., Пузанов А., Куванов К., Платов О. Проектирование и изготовление высокопроходимых мобильных роботов специального назначения с использованием современных САПР. CAD/CAM/CAE Observer. 2005. №2. С. 61–64.
220. Матюхин В. И. Управление механическими системами. М., Физматлит, 2009. 320 с.
221. Мачульский И. И. Робототехнические системы и комплексы. Под ред. И. И. Мачульского, М., Транспорт, 1999. 464с.

222. Медведев В. А., Шиянов А. И. Управление роботами. Воронеж, 2003. 187 с.
223. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СНБ., Наука, 2000. 325 с.
224. Мойсеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. М., Наука, 1981. 488 с.
225. Муртазов Т., Шомош А., Гончарук Н. и др. Микроклиматические основы тепличного овощеводства. Пер. с болг. Е. С. Сигаева. М., Колос, 1982. 175 с.
226. Назаров А. В., Лоскутов А. Ю. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем. СПб., 2003. 384 с.
227. Національний стандарт України. Енергозбереження. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання ISO 50001:2011 (ДСТУ ІБО 50001:2014).
228. Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача, Изд. 2-е. М., Высшая школа, 1975. 496 с.
229. Олійник В. С. Довідник сільського електрика. К., Урожай, 1989. 264 с.
230. Опришко О. О., Болбот І. М., Андріїшина М. В., Пасічник Н. А. Методичні підходи для керування вибіркоким внесенням добрив. Аграрна наука і освіта. Механізація, електрифікація, автоматизація. 2008. Том 9, № 3-4. С. 100–104.
231. Опрышко А., Пасичник Н. Робототехнические системы для городских тепличных хозяйств. Motrol, 2012. Lublin. Tom 14. №3. С. 222–223.
232. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. М., 2002. 344 с.
233. Пелихов Е. Ф. Экономическая эффективность инноваций. Нар. укр. акад. Х., Изд-во НУА, 2005. 167 с.
234. Панкратова Н. Д. Системный анализ в динамике диагностирования

сложных технических систем. Системні дослідження та інформаційні технології. 2008. № 1. С. 33–49.

235. Пасічник В. В., Резніченко В. А. Організація баз даних і знань. К., BHV, 2006. 384 с.

236. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Мехатроника» направления подгот. «Мехатроника и робототехника». М., Машиностроение, 2006. 255 с.

237. Полевой В. В. Физиология растений. М., Высшая школа, 1989. 464 с.

238. Полуэктов Р. А., Смоляр Э. И., Терлеев В. В., Топаж А. Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. СПб.: 2006. 290 с.

239. Поляк Б. Т. Введение в оптимизацию. М., 1983. 384 с.

240. Поляков А. О., Смирнов Ю. М. Технология интеллектуальных систем: учебное пособие. СПб., 2004. 144 с.

241. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкредидзе Р. В. Математическая теория оптимальных процессов. М., 1976. 392 с.

242. Попов Е. П., Юревич Е. И. Робототехника. М., Машиностроение, 1984. 288 с.

243. Попов Е., Письменный Г. Основы робототехники. Введение в специальность: Учебник для вузов. М., Высшая шк., 1999. 224 с.

244. Пупена О. М., Ельперін І. В., Луцька Н. М., Ладанюк А. П. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах: навчальний посібник. К., 2011. 552 с.

245. Пупков К. А., Егупова Н. Д. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 2. М., 2000. 734 с.

246. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд. Пер с англ. М., Вильямс, 2006. 1408 с.

247. Редько В. Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект: Модели и концепции эволюционной кибернетики. М., 2015. 224 с.



248. Рідкокаша А. А., Голдер К. К. Основы систем штучного інтелекту. Навчальний посібник. Черкаси, "ВІДЛУННЯ-ПЛЮС", 2002. 240 с.
249. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер с польск. М., Горячая линия - Телеком, 2004. 452 с.
250. Рыбина Г. В. Основы построения интеллектуальных систем. М., Финансы и статистика, 2010. 432 с.
251. Рысс А. А. Автоматизация технологических процессов в защищенном грунте. М., Россельхозиздат, 1983. 80 с.
252. Сидорчук О. В., Сенчук С. Р. Инженерний менеджмент: системотехніка виробництва, Львів, ЛДАУ, 2006. 126 с.
253. Смирнов А. В., Тягунов О. А. Программный комплекс для моделирования транспортных роботов. Экстремальная робототехника: Сб. трудов IX Междунар. науч.-техн. конф. СПб., 1998. С. 98-72.
254. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем. М., Высшая школа, 1998. 260 с.
255. Спільний наказ Міністерства економіки України та Міністерства фінансів України «Про затвердження Методики визначення економічної ефективності витрат на наукові дослідження і розробки та їх впровадження у виробництво» від 25.09.01 – № 218/446 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www1.nas.gov.ua/infrastructures/Legaltexts/Others/mef/Documents/218-446.pdf>
256. Спыну Г. А. Промышленные роботы. Конструирование и применение. Учеб. пособие. 2-е изд. К., Выща шк., 1991. 311 с.
257. Спыну Г. А. Роботы с искусственным интеллектом. К., Техника, 1989. 111 с.
258. Тараканов Г. И., Борисов Н. В., Климов В. В. Овощеводство защищенного грунта. М., Колос, 1982. 303 с.
259. Тараканов Г. И., Мухин В. Д., Шуин К. А. и др. Овощеводство. М., Колос, 2003. 472 с.

260. Тарасов В. Б., Калущая А. П. Моделирование взаимодействия робота с внешней средой на основе пространственных логик и распространения ограничений. Программные продукты и системы. 2010. № 2. С. 16-17.

261. Тойберт П. Оценка точности результатов измерений. Пер. с немецкого В. Н. Храменкова, М., Энергоатомиздат, 1988. 88 с.

262. Токмаков Н. М., Грудинин В. С. Математическая модель системы управления микроклиматом аграрных теплиц. Журнал «Гавриш», 2008. №3. С. 28-31.

263. Торнли Дж. Г.М. Математические модели в физиологии растений. Пер. с англ. Д. М. Гродзинского. К., Наук. думка, 1982. 312 с.

264. Третьяков Н. Н., Кошкин Е. И., Макрушин Н. М. Физиология и биохимия сельскохозяйственных растений. М., Колос, 1998. 640 с.

265. Троханяк В. І., Богдан Ю. О. Застосування методу кінцевих елементів при побудові сітки в Ansys Meshing для CFD моделей. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія «Технічні науки» 2015. Вип. 30, Т. 2. С. 181–189.

266. Усков А. А., Кузьмин А. В. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечёткая логика. М., «Горячая линия – Телеком», 2004. 143 с.

267. Федоренко Р. П. Приближенное решение задач оптимального управления. М., 1978. 488 с.

268. Фомин В. Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А. Адаптивное управление динамическими объектами. М., 1981. 448 с.

269. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М., Мир, 1989. 624с.

270. Фукунава К. Автоматическое распознавание образов. М., Наука, 1979. 367 с.

271. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение автоматических систем. М., 1968. 460 с.

272. Цыпкин Я. З. Дискретные адаптивные системы управления. Итоги науки и техники. 1984. Т. 17. С. 3-73.
273. Цыпкин Я. З. Основы информационной теории идентификации. М., 1984. 520 с.
274. Цыпкин Я. З. Рекуррентные алгоритмы оптимизации в условиях неопределенности. Итоги науки и техники. 1983. Т. 16. С. 3-70.
275. Чинакал В. О. Интеллектуальные системы и технологии: Учеб. пособие. М., РУДН, 2008. 303 с.
276. Шахинпур М. Курс робототехніки. Пер. с англ. М., Мир, 1990. 527 с.
277. Шворов С. А., Штепа В. М., Болбот І. М., Заєць Н. А., Дудник А. О. Методичні засади розпізнавання образів із використанням багатошарового персептрона. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. 2012. Вип. 35. С. 66–72.
278. Шворов С. А., Берназ А. М., Бурчак О. І. та ін. Підхід до вирішення задачі компромісно-оптимального вибору маршруту руху об'єктів в конфліктному середовищі. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. К., Київський університет, 2008. № 19. С. 63–71.
279. Шворов С. А., Болбот І. М., Штепа В. М. Обґрунтування раціонального варіанту побудови інтелектуальної роботизованої системи спеціального призначення. Науковий журнал «Енергетика і автоматика». 2012. № 2. <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/4994>
280. Шворов С. А., Болбот І. М., Штепа В. М., Заєць Н. А., Дудник А. О. Багатокритеріальний синтез маршрутів пересування мобільних роботів з розпізнаванням перешкод. Науковий журнал «Енергетика і автоматика». 2012. № 1 (11). [http://www.nbu.gov.ua/e-journals/eia/2012\\_1/12ssadod.pdf](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/eia/2012_1/12ssadod.pdf).
281. Ширяев В. И., Ширяев Е. В. Принятие решений. Прогнозирование в глобальных системах. М., 2013. 176 с.
282. Шифрин Я. Промышленная робототехника. М., Машиностроение, 1982. 415 с.

283. Шишко Г. Г., Потапов В. А., Злобин Л. А. Отопление и вентиляция теплиц. К., Будівельник, 1984. 112 с.
284. Шишко Г. Г., Потапов В. А., Сулима Л. Т., Чебанов Л. С. Теплицы и тепличные хозяйства: Справочник. К., Урожай, 1993. 422 с.
285. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., Наука, 1974. 712 с.
286. Шпак Ю. А. Программирование на языке С для AVR и PIC микроконтроллеров. К., МК-Пресс, 2006. 400 с.
287. Школа автоматики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://edu.asu.in.ua/>
288. Шульгіна Л. М. Довідник по овочівництву закритого ґрунту. К., Урожай, 1989. 216 с.
289. ЩигOLEв Б. М. Математическая обработка наблюдений: 3-е изд. М., Наука, 1969. 230 с.
290. Юревич Е. И. Управление роботами и робототехническими комплексами. Л., Машиностроение, 2000. 235 с.
291. Юревич Е. И. Динамика управления роботами. М., Наука, 1984. 336 с.
292. Юревич Е. И. Основы робототехники: 2 изд. перераб. и доп. СПб., БХВ-Петербург, 2005. 416 с.
293. Ямпольский Л. С. Промышленная робототехника. К., Техніка, 1984. 288 с.
294. Ямпольский Л. С., Калинин О. М. Система автоматизированного проектирования робототехнологических комплексов. К., Знание, 1982. 18 с.
295. Ясницкий Л. Н. Введение в искусственный интеллект. М., Академия, 2005. 176 с.

## ДОДАТКИ

## Додаток А. Стохастична матриця переходів

№	1	2	3	4	№	1	2	3	4	№	1	2	3	4	№	1	2	3	4
2	0	0	100	0	124	68	0	32	0	202	13	10	77	0	278	22	0	78	0
3	0	0	100	0	126	67	0	33	0	203	5	77	13	5	282	30	0	70	0
6	0	0	100	0	128	66	0	34	0	204	12	20	58	10	284	29	0	71	0
8	0	0	100	0	130	65	0	35	0	205	5	78	12	5	286	28	0	72	0
10	0	0	100	0	132	64	0	36	0	206	11	20	59	10	288	27	0	73	0
12	0	0	100	0	134	63	0	37	0	207	5	79	11	5	290	26	0	74	0
14	0	0	100	0	136	62	0	38	0	208	10	20	60	10	292	25	0	75	0
16	0	0	100	0	138	61	0	39	0	209	5	80	10	5	294	24	0	76	0
18	0	0	100	0	142	79	0	21	0	210	9	20	61	10	296	23	0	77	0
22	49	0	51	0	144	78	0	22	0	211	5	81	9	5	298	22	0	78	0
24	48	0	52	0	146	77	0	23	0	212	8	20	62	10	302	40	0	60	0
26	47	0	53	0	148	76	0	24	0	213	5	82	8	5	304	39	0	61	0
28	46	0	54	0	150	75	0	25	0	214	7	20	63	10	306	38	0	62	0
30	45	0	55	0	152	74	0	26	0	215	5	83	7	5	308	37	0	63	0
32	44	0	56	0	154	73	0	27	0	216	6	20	64	10	310	36	0	64	0
34	43	0	57	0	156	72	0	28	0	217	5	84	6	5	312	35	0	65	0
36	42	0	58	0	158	71	0	29	0	218	5	20	65	10	314	34	0	66	0
38	41	0	59	0	162	78	2	20	0	219	5	85	5	5	316	33	0	67	0
42	49	0	51	0	163	0	3	20	77	220	0	100	0	0	318	32	0	68	0
44	48	0	52	0	164	77	3	10	10	222	5	25	70	0	322	40	0	60	0
46	47	0	53	0	165	0	4	20	76	223	8	72	0	10	324	39	0	61	0
48	46	0	54	0	166	76	4	10	10	224	5	15	71	9	326	38	0	62	0
50	45	0	55	0	167	0	5	20	75	225	11	73	0	9	328	37	0	63	0
52	44	0	56	0	168	75	5	10	10	226	5	15	72	8	330	36	0	64	0
54	43	0	57	0	169	0	6	20	74	227	12	74	0	8	332	35	0	65	0
56	42	0	58	0	170	74	6	10	10	228	5	15	73	7	334	34	0	66	0
58	41	0	59	0	171	0	7	20	73	229	13	75	0	7	336	33	0	67	0
62	59	0	41	0	172	73	7	10	10	230	5	15	74	6	338	32	0	68	0
64	58	0	42	0	173	0	8	20	72	231	14	76	0	6	342	50	0	50	0
66	57	0	43	0	174	72	8	10	10	232	5	15	75	5	344	49	0	51	0
68	56	0	44	0	175	0	9	20	71	233	15	77	0	5	346	48	0	52	0
70	55	0	45	0	176	71	9	10	10	234	5	15	76	4	348	47	0	53	0
72	54	0	46	0	177	0	7	20	73	235	16	78	0	4	350	46	0	54	0
74	53	0	47	0	178	70	10	10	10	236	5	15	77	3	352	45	0	55	0
76	52	0	48	0	179	0	10	20	70	237	17	79	0	3	354	44	0	56	0
78	51	0	49	0	180	0	0	20	80	238	5	15	78	2	356	43	0	57	0
82	59	0	41	0	182	60	5	35	0	239	18	80	0	2	358	42	0	58	0
84	58	0	42	0	183	20	5	16	59	240	80	0	0	20	362	50	0	50	0
86	57	0	43	0	184	59	5	16	20	242	20	0	80	0	364	49	0	51	0
88	56	0	44	0	185	20	5	15	60	244	19	0	81	0	366	48	0	52	0
90	55	0	45	0	186	58	7	15	20	246	18	0	82	0	368	47	0	53	0
92	54	0	46	0	187	20	7	15	60	248	17	0	83	0	370	46	0	54	0
94	53	0	47	0	188	57	7	16	20	250	16	0	84	0	372	45	0	55	0
96	52	0	48	0	189	20	7	16	57	252	15	0	85	0	374	44	0	56	0
98	51	0	49	0	190	56	8	16	20	254	14	0	86	0	376	43	0	57	0
102	69	0	31	0	191	20	8	16	56	256	13	0	87	0	378	42	0	58	0
104	68	0	32	0	192	55	8	17	20	258	12	0	88	0	382	100	0	0	0
106	67	0	33	0	193	20	8	17	55	262	30	0	70	0	384	100	0	0	0
108	66	0	34	0	194	54	9	17	20	264	29	0	71	0	386	100	0	0	0
110	65	0	35	0	195	20	9	17	54	266	28	0	72	0	388	100	0	0	0
112	64	0	36	0	196	53	9	18	20	268	27	0	73	0	390	100	0	0	0
114	63	0	37	0	197	20	9	18	53	270	26	0	74	0	392	100	0	0	0
116	62	0	38	0	198	52	9	19	20	272	25	0	75	0	394	100	0	0	0
118	61	0	39	0	199	35	10	20	35	274	24	0	76	0	396	100	0	0	0
122	69	0	31	0	200	40	0	20	40	276	23	0	77	0	398	100	0	0	0

## Додаток Б. Код програмної реалізації алгоритму Q-learning

```

public QLearning(long itMax, double explore, double amort,
                 double recomp, double penal, double apprent,
                 int Qsize, int[][] mapDefine, boolean d_apprent)
{
    this.iterMax=itMax;
    this.exploration=explore;
    this.amortissement=amort;
    this.recompense=recomp;
    this.penalite=penal;
    this.apprentissage=apprent;
    this.Q_S=Qsize;
    this.map=mapDefine;
    initQValues(Qsize);
    this.d_apprent=d_apprent;
    if(this.d_apprent)
    {
        apprent_step=this.apprentissage/this.iterMax;
    }
}

private void initQValues(int Qsize)
{
    QValues=new double[Qsize][Qsize][Actions];
    // init des qvalues
    for(int i=0;i<Qsize;i++)
    {
        for(int j=0;j<Qsize;j++)
        {
            for(int a=0;a<Actions;a++)
            {
                QValues[i][j][a]=0.0;
            }
        }
    }
    //-----
}

//

public int[][] giveResMap()
{
    for(int i=0;i<this.Q_S;i++)
    {
        for(int j=0;j<this.Q_S;j++)
        {
            this.map[i][j]+=(100+100*this.giveBestAction(i,j));
        }
    }
    return map;
}

```

```

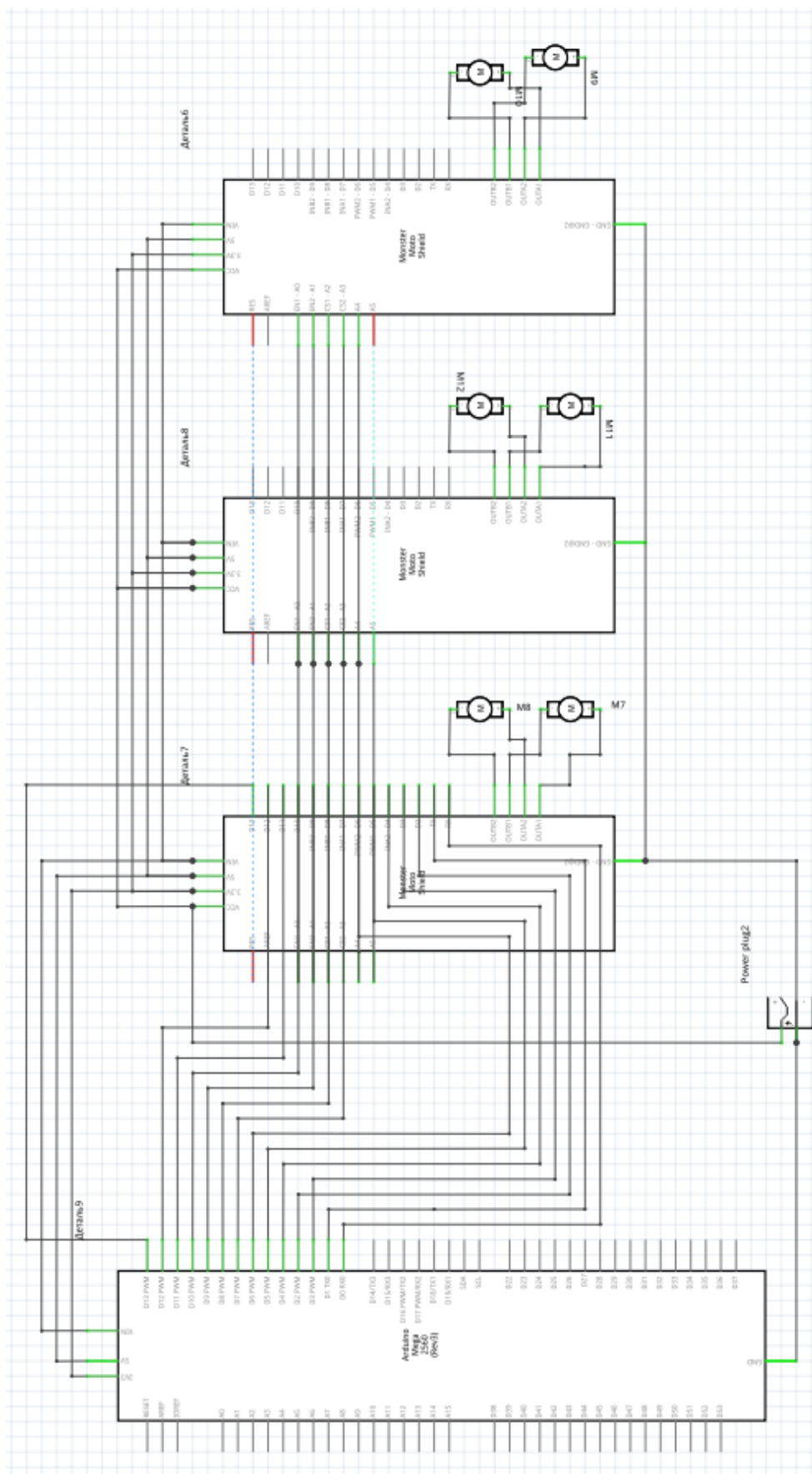
private int[] giveNextState(int StateI, int StateJ, int action)
{
    int result[]=new int[2];
    switch (action)
    {
        case A_N:
            if (StateI==0)
            {
                result[0]=StateI;
                result[1]=StateJ;
            }
            else
            {
                result[0]=StateI-1;
                result[1]=StateJ;
            }
            break;
        case A_E:
            if(StateJ==Q_S-1)
            {
                result[0]=StateI;
                result[1]=StateJ;
            }
            else
            {
                result[0]=StateI;
                result[1]=StateJ+1;
            }
            break;
        case A_S:
            if(StateI==Q_S-1)
            {
                result[0]=StateI;
                result[1]=StateJ;
            }
            else
            {
                result[0]=StateI+1;
                result[1]=StateJ;
            }
            break;
        case A_O:
            if(StateJ==0)
            {
                result[0]=StateI;
                result[1]=StateJ;
            }
            else
            {
                result[0]=StateI;
                result[1]=StateJ-1;
            }
            break;
    }
}

```

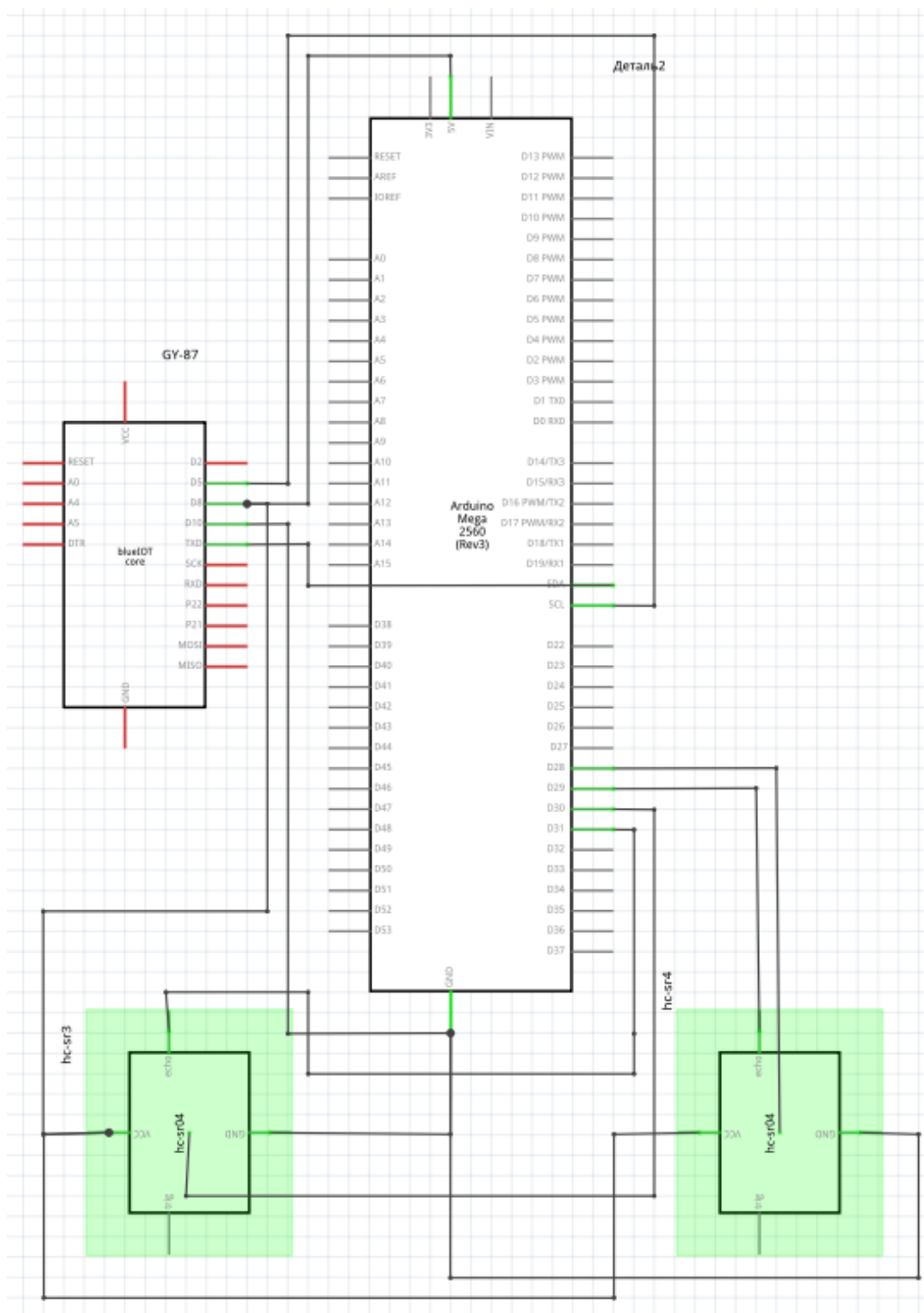




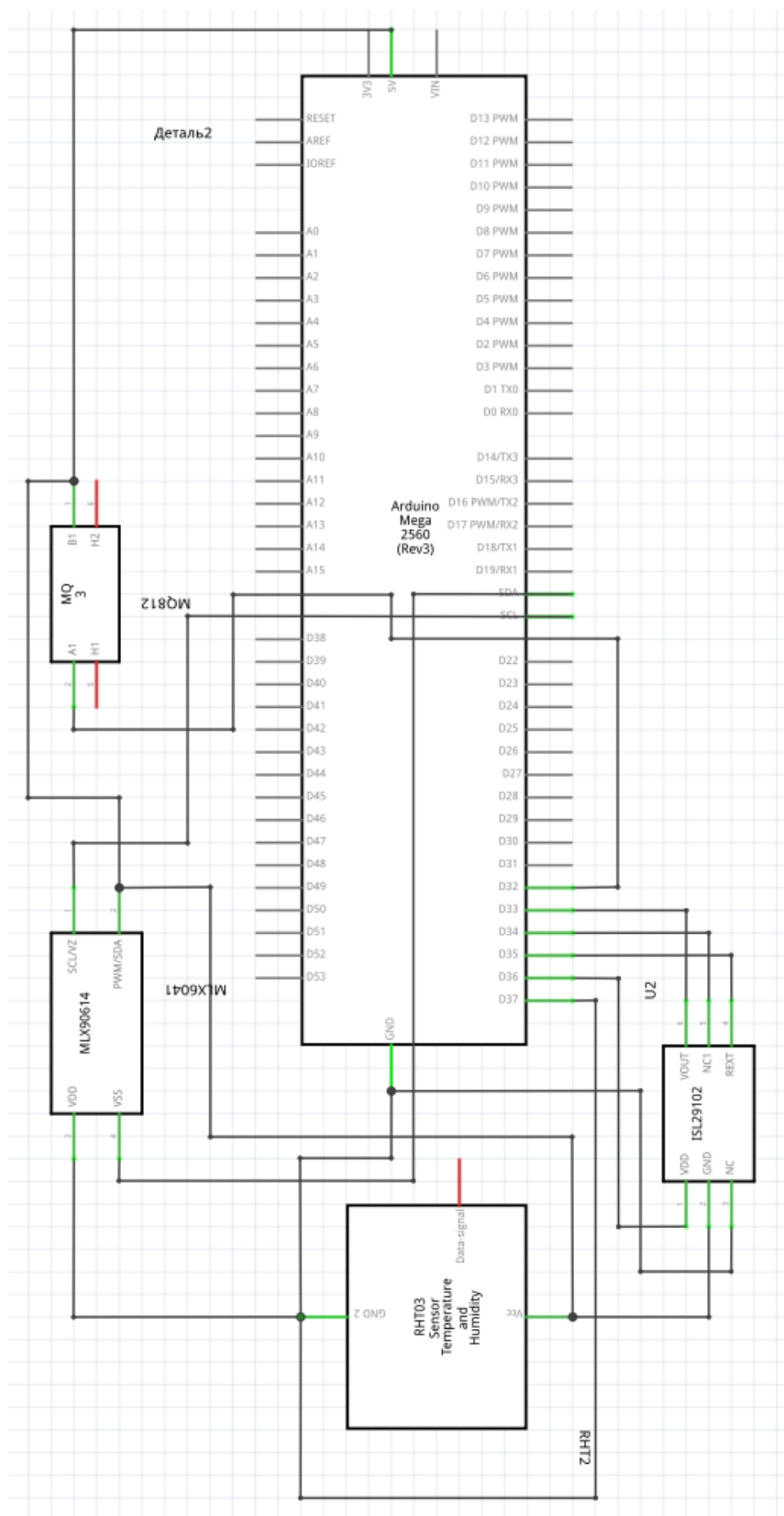
Додаток Г. Принципова електрична схема керування електричними двигунами робота



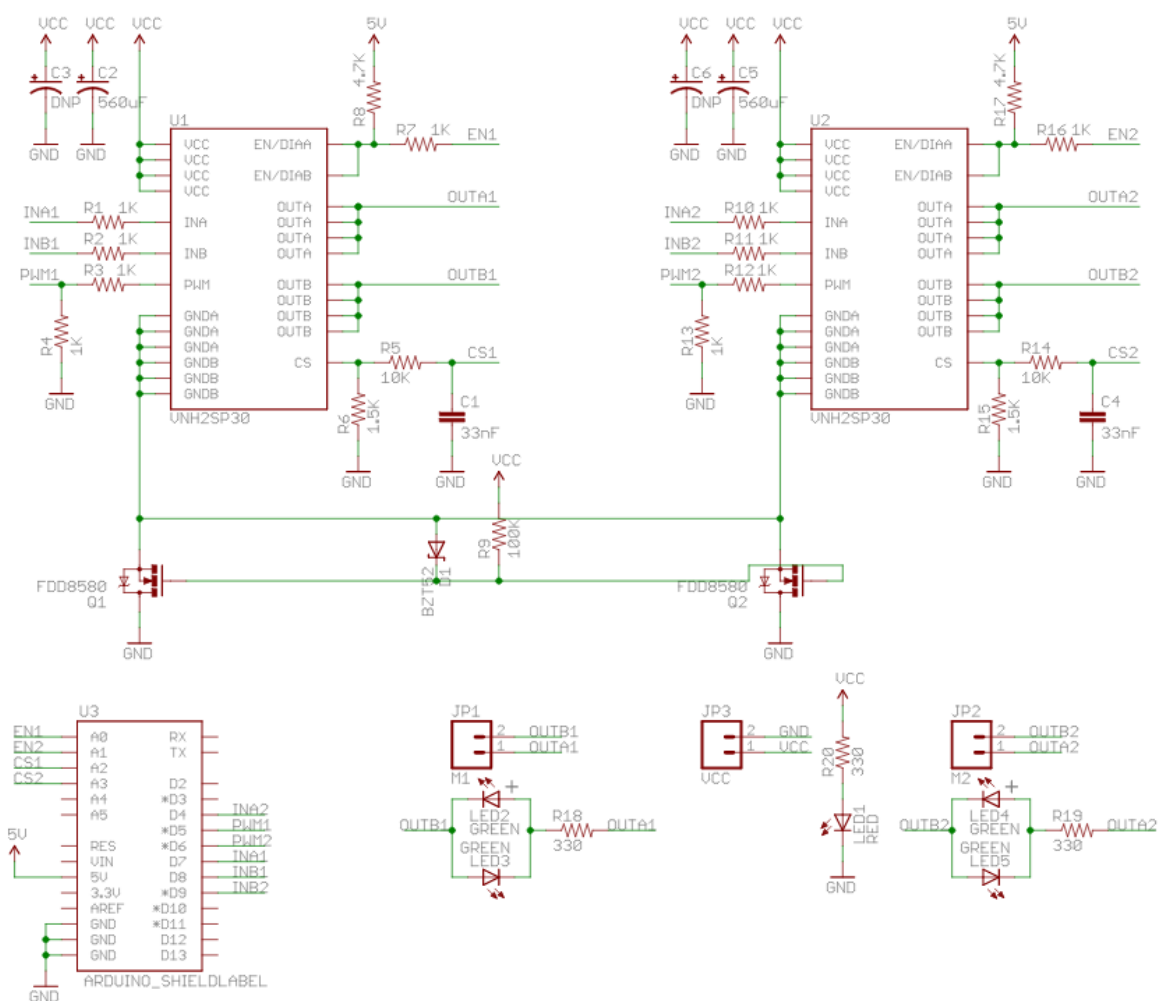
Додаток Г. Принципова електрична схема керування електричними двигунами робота, що відповідають за пересування робота



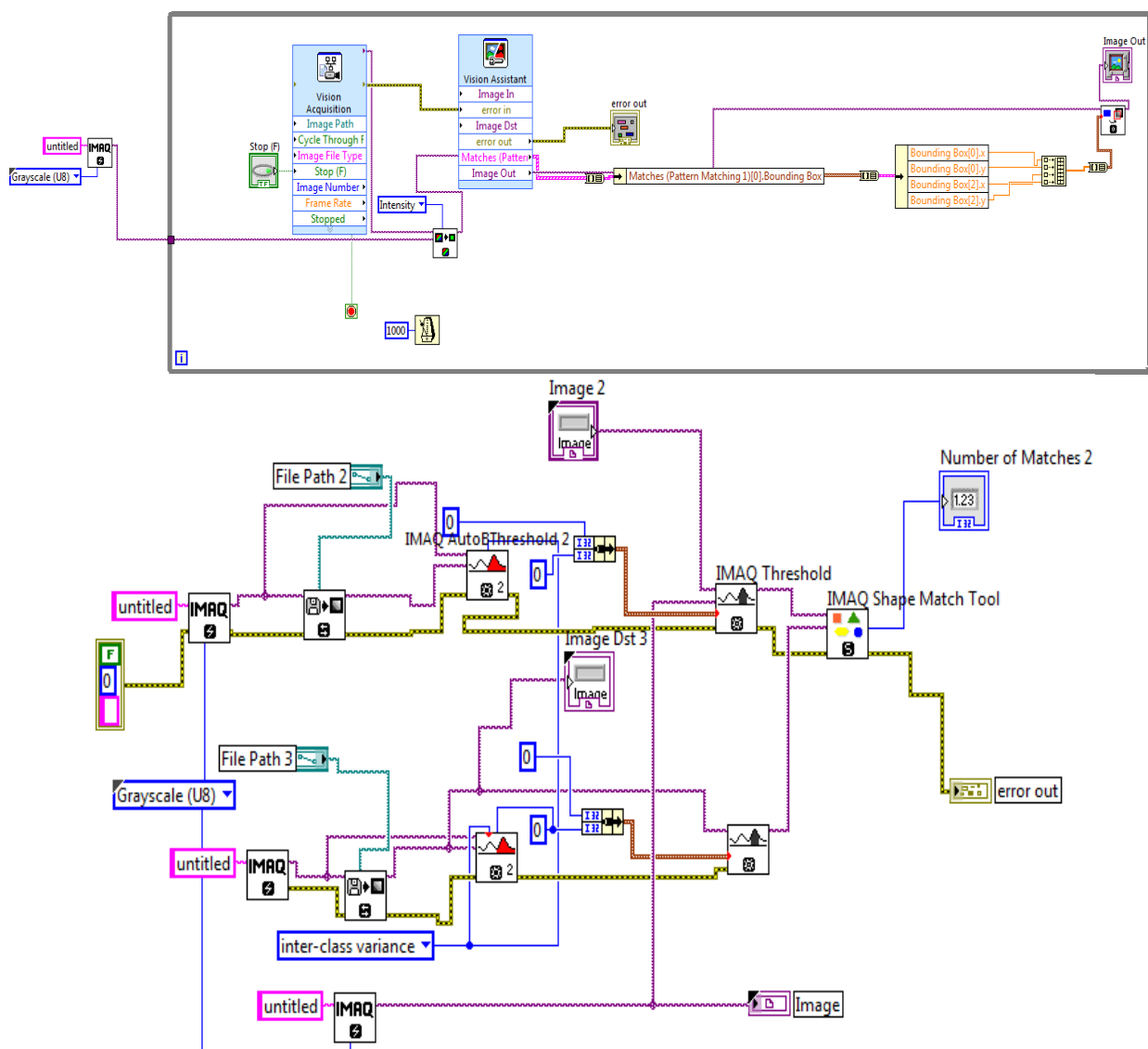
# Додаток Д. Принципова електрична схема приєднання сприймаючих елементів робота



## Додаток Е. Схема електрична принципова силового контролера двигунів



## Додаток Є. Блок-діаграма програми розпізнавання плоду помідора



## Додаток Ж. Код програмної реалізації блока вимірювання

```

//Пример простого меню для Arduino
//В меню используется 4 экрана
//за номер отображаемого экрана отвечает переменная m
#include <EEPROM.h>
#include <Wire.h>
//#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <LiquidCrystal.h>
#include <DS1307.h> //Подключение библиотеки для DS1307
#include <DHT.h>
#define pinRS 12 // RS к аналоговому пину 0
#define pinRW 11
#define pinE 10 // E к аналоговому пину 1
#define pinDB4 5 // DB4 к цифровому пину 9
#define pinDB5 4 // DB5 к цифровому пину 6
#define pinDB6 3 // DB6 к цифровому пину 8
#define pinDB7 2 // DB7 к цифровому пину 7
#define DHTPIN 7
#define DHTTYPE DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
int relayT = 8;
int relayH = 9;
int relayO = 6;
int relayh = 13;
//LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2); //инициализируем 2х строчный дисплей
LiquidCrystal lcd(pinRS, pinRW, pinE, pinDB4, pinDB5, pinDB6, pinDB7);
long previousMillis = 0;
long interval = 20000;
long previousMillis2 = 0;
long interval2 = 20000;
int address = 0;
byte value;
int m=0; // переменная для экранов меню
int txD; // переменная для примера 1
int txN; // переменная для примера 2
int Hpol; // переменная для примера 3
int Mpol;
int HsvetN;
int HsvetK;
int hx;
int rT;
int rH;
int rO;
int rh;
int releState = LOW;
int releState4 = LOW;
#define nextPin 50 //кнопка меню на 6 входе
#define prevPin 51 //кнопка возврата
#define upPin 52 //увеличение значения отображаемого параметра
#define downPin 53 //уменьшение значения
boolean buttornextWasUp = true;
boolean buttonprevWasUp = true;
boolean buttonupWasUp = true;
boolean buttondownWasUp = true;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  dht.begin();
  pinMode(relayT, OUTPUT);
  pinMode(relayH, OUTPUT);
  pinMode(relayO, OUTPUT);
  pinMode(relayh, OUTPUT);

```

```

// Установка пинов как входов
pinMode(nextPin, INPUT);
pinMode(prevPin, INPUT);
pinMode(upPin, INPUT);
pinMode(downPin, INPUT);
//lcd.init(); // инициализация LCD
//lcd.backlight(); // включаем подсветку
lcd.begin(16, 2);
// Вывод приветствия
lcd.print( "GreenHOUSE" );
// задержка
delay (1000);
//установка часов; //функция настройки часов, если в этом есть необходимость
}
//Объявляем функцию установки даты и времени
void установкаЧасов()
{
  RTC.stop(); // останавливаем ход часов
  RTC.set(DS1307_SEC,0); // устанавливаем секунды
  RTC.set(DS1307_MIN,40); //устанавливаем минуты
  RTC.set(DS1307_HR,16); //устанавливаем часы
  RTC.set(DS1307_DOW,2); //устанавливаем номер дня недели
  RTC.set(DS1307_DATE,24); //устанавливаем число
  RTC.set(DS1307_MTH,3); // устанавливаем месяц
  RTC.set(DS1307_YR,15); // устанавливаем год
  RTC.start(); // запускаем ход часов
}
void loop () {
  unsigned long currentMillis = millis();
  float h = dht.readHumidity();
  float t = dht.readTemperature();
  int tx;
  int tzon;
  int H = RTC.get(DS1307_HR,true);
  int M = RTC.get(DS1307_MIN,false);
  if (H < 16 && H >= 8) //ночная и дневная температуры
  {tz = tzD;}
  else
  {tz = tzN;}
  if(currentMillis - previousMillis > interval) {
    previousMillis = currentMillis;
    if (((tz) <= t) || (t == 1)) //сравнение температур
    {releState = LOW;}
    else
    {releState = HIGH;}
    digitalWrite(relayT, releState);
  }
  if ((Hpol == H && Mpol <= M) || (rH == 1)) // реле полива
  {digitalWrite(relayH, LOW);}
  else
  {digitalWrite(relayH, HIGH);}
  if ((HsvetN >= H && HsvetK < H) || (rO == 1)) // реле освещенности
  {digitalWrite(relayO, LOW);}
  else
  {digitalWrite(relayO, HIGH);}
  if(currentMillis - previousMillis2 > interval2) {
    previousMillis2 = currentMillis;
    if (((hz) <= t) || (th == 1)) //
    {releState4 = LOW;}
    else
    {releState4 = HIGH;}
    digitalWrite(relayh, releState4);
  }
}

```

```

boolean buttonnextIsUp = digitalRead(nextPin);
boolean buttonprevIsUp = digitalRead(prevPin);
boolean buttonupIsUp = digitalRead(upPin);
boolean buttondownIsUp = digitalRead(downPin);
//Обработка нажатия кнопки меню
if (buttonnextWasUp && !buttonnextIsUp)
{
    delay(10);
    buttonnextIsUp = digitalRead(nextPin);
    if (!buttonnextIsUp)
    {
        m++;
        if (m>11)
        {
            m=0;
        }
        delay(100);
        lcd.clear();
    }
}
//Обработка нажатия кнопки назад
if (buttonprevWasUp && !buttonprevIsUp)
{
    delay(10);
    buttonprevIsUp = digitalRead(prevPin);
    if (!buttonprevIsUp)
    {
        m--;
        if (m<0)
        {
            m=11;
        }
        delay(100);
        lcd.clear();
    }
}
// Обработка нажатия для txD +
if (buttonupWasUp && !buttonupIsUp)
{
    delay(10);
    buttonupIsUp = digitalRead(upPin);
    if (!buttonupIsUp && m==1)
    {
        txD++;
        EEPROM.write(20, txD);
        if (txD>40)
        {
            txD=10;
            EEPROM.write(20, txD);
        }
        delay (100);
        lcd.setCursor(5, 1);
        lcd.print(" ");
    }
}
// Обработка нажатия для txD -
if (buttondownWasUp && !buttondownIsUp)
{
    delay(10);
    buttondownIsUp = digitalRead(downPin);
    if (!buttondownIsUp && m==1)
    {
        txD--;
        EEPROM.write(20, txD);
        if (txD<0)
        {

```



```

tzD=40;
EEPROM.write(20, tzD);
}
delay (100);
lcd.setCursor(5, 1);
lcd.print(" ");
})
// Обработка нажатия для tzN +
if (buttonUpWasUp && !buttonUpIsUp)
{
  delay(10);
  buttonUpIsUp = digitalRead(upPin);
  if (!buttonUpIsUp && m==2)
  {
    tzN++;
    EEPROM.write(21, tzN);
    if (tzN>40)
    {
      tzN=10;
      EEPROM.write(21, tzN);
    }
    delay (100);
    lcd.setCursor(5, 1);
    lcd.print(" ");
  })
// Обработка нажатия для tzN -
if (buttonDownWasUp && !buttonDownIsUp)
{
  delay(10);
  buttonDownIsUp = digitalRead(downPin);
  if (!buttonDownIsUp && m==2)
  {
    tzN--;
    EEPROM.write(21, tzN);
    if (tzN<0)
    {
      tzN=40;
      EEPROM.write(21, tzN);
    }
    delay (100);
    lcd.setCursor(5, 1);
    lcd.print(" ");
  })
// Обработка нажатия для Hpol +
if (buttonUpWasUp && !buttonUpIsUp)
{
  delay(10);
  buttonUpIsUp = digitalRead(upPin);
  if (!buttonUpIsUp && m==3)
  {
    Hpol++;
    EEPROM.write(22, Hpol);
    if (Hpol>23)
    {
      Hpol=0;
      EEPROM.write(22, Hpol);
    }
    delay (100);
    lcd.setCursor(5, 1);
    lcd.print(" ");
  })
// Обработка нажатия для Hpol -
if (buttonDownWasUp && !buttonDownIsUp)

```

```

{
delay(10);
buttondownIsUp = digitalRead(downPin);
if (!buttondownIsUp && m==3)
{
Hpol--;
EEPROM.write(22, Hpol);
if (Hpol<0)
{
Hpol=23;
EEPROM.write(22, Hpol);
}
delay (100);
lcd.setCursor(5, 1);
lcd.print(" ");
}}
// Обработка нажатия для Mpol +
if (buttonupWasUp && !buttonupIsUp)
{
delay(10);
buttonupIsUp = digitalRead(upPin);
if (!buttonupIsUp && m==4)
{
Mpol++;
EEPROM.write(23, Mpol);
if (Mpol>59)
{
Mpol=0;
EEPROM.write(23, Mpol);
}
delay (100);
lcd.setCursor(5, 1);
lcd.print(" ");
}}
// Обработка нажатия для Mpol -
if (buttondownWasUp && !buttondownIsUp)
{
delay(10);
buttondownIsUp = digitalRead(downPin);
if (!buttondownIsUp && m==4)
{
Mpol--;
EEPROM.write(23, Mpol);
if (Mpol<0)
{
Hpol=59;
EEPROM.write(23, Mpol);
}
delay (100);
lcd.setCursor(5, 1);
lcd.print(" ");
}}
// Обработка нажатия для HsvetN +
if (buttonupWasUp && !buttonupIsUp)
{
delay(10);
buttonupIsUp = digitalRead(upPin);
if (!buttonupIsUp && m==5)
{
HsvetN++;
EEPROM.write(24, HsvetN);
if (HsvetN>23)
{

```

```

HsvetN=0;
EEPROM.write(24, HsvetN);
}
delay (100);
lcd.setCursor(5, 1);
lcd.print(" ");
})
// Обработка нажатия для HsvetN -
if (buttondownWasUp && !buttondownIsUp)
{
  delay(10);
  buttondownIsUp = digitalRead(downPin);
  if (!buttondownIsUp && m==5)
  {
    HsvetN--;
    EEPROM.write(24, HsvetN);
    if (HsvetN<0)
    {
      HsvetN=23;
      EEPROM.write(24, HsvetN);
    }
    delay (100);
    lcd.setCursor(5, 1);
    lcd.print(" ");
  })
// Обработка нажатия для HsvetK +
if (buttonupWasUp && !buttonupIsUp)
{
  delay(10);
  buttonupIsUp = digitalRead(upPin);
  if (!buttonupIsUp && m==6)
  {
    HsvetK++;
    EEPROM.write(25, HsvetK);
    if (HsvetK>23)
    {
      HsvetK=0;
      EEPROM.write(25, HsvetK);
    }
    delay (100);
    lcd.setCursor(5, 1);
    lcd.print(" ");
  })
// Обработка нажатия для HsvetK -
if (buttondownWasUp && !buttondownIsUp)
{
  delay(10);
  buttondownIsUp = digitalRead(downPin);
  if (!buttondownIsUp && m==6)
  {
    HsvetK--;
    EEPROM.write(25, HsvetK);
    if (HsvetK<0)
    {
      HsvetK=23;
      EEPROM.write(25, HsvetK);
    }
    delay (100);
    lcd.setCursor(5, 1);
    lcd.print(" ");
  })
// Обработка нажатия для hz +
if (buttonupWasUp && !buttonupIsUp)

```

```

{
  delay(10);
  buttonupIsUp = digitalRead(upPin);
  if (!buttonupIsUp && m==7)
  {
    hz++;
    EEPROM.write(26, hz);
    if (hz>40)
    {
      hz=0;
      EEPROM.write(26, hz);
    }
    delay (100);
    lcd.setCursor(5, 1);
    lcd.print(" ");
  }
  // Обработка нажатия для hz -
  if (buttondownWasUp && !buttondownIsUp)
  {
    delay(10);
    buttondownIsUp = digitalRead(downPin);
    if (!buttondownIsUp && m==7)
    {
      hz--;
      EEPROM.write(26, hz);
      if (hz<0)
      {
        hz=40;
        EEPROM.write(26, hz);
      }
      delay (100);
      lcd.setCursor(5, 1);
      lcd.print(" ");
    }
    // Обработка нажатия для rT +
    if (buttonupWasUp && !buttonupIsUp)
    {
      delay(10);
      buttonupIsUp = digitalRead(upPin);
      if (!buttonupIsUp && m==8)
      {
        rT = 0;
        EEPROM.write(27, rT);
        // digitalWrite(relayT, LOW);
      }
    }
    // Обработка нажатия для rT -
    if (buttondownWasUp && !buttondownIsUp)
    {
      delay(10);
      buttondownIsUp = digitalRead(downPin);
      if (!buttondownIsUp && m==8)
      {
        // ledEnabled = !ledEnabled;
        rT = 1;
        EEPROM.write(27, rT);
        // digitalWrite(relayT, HIGH);
      }
    }
    //if (rT == 1) {digitalWrite(relayT, HIGH);} else {digitalWrite(relayT, LOW);}
    // Обработка нажатия для rH +
    if (buttonupWasUp && !buttonupIsUp)
    {
      delay(10);
      buttonupIsUp = digitalRead(upPin);

```

```

if (buttonupIsUp && m==9)
{
    rH = 0;
    EEPROM.write(28, rH);
    // digitalWrite(relayH, LOW);
} // Обработка нажатия для rH -
if (buttondownWasUp && buttondownIsUp)
{
    delay(10);
    buttondownIsUp = digitalRead(downPin);
    if (buttondownIsUp && m==9)
    { // ledEnabled = !ledEnabled;
        rH = 1;
        EEPROM.write(28, rH); // digitalWrite(relayH, HIGH);
    } //if (rH == 1) {digitalWrite(relayH, HIGH);} else {digitalWrite(relayH, LOW);}
    // Обработка нажатия для rO +
    if (buttonupWasUp && buttonupIsUp)
    { delay(10);
        buttonupIsUp = digitalRead(upPin);
        if (buttonupIsUp && m==10)
        { rO = 0;
            EEPROM.write(29, rO); // digitalWrite(relayO, LOW);
        } // Обработка нажатия для rO -
        if (buttondownWasUp && buttondownIsUp)
        {
            delay(10);
            buttondownIsUp = digitalRead(downPin);
            if (buttondownIsUp && m==10)
            { // ledEnabled = !ledEnabled;
                rO = 1;
                EEPROM.write(29, rO); // digitalWrite(relayO, HIGH);
            } //if (rO == 1) {digitalWrite(relayO, HIGH);} else {digitalWrite(relayO, LOW);}
            // Обработка нажатия для rh +
            if (buttonupWasUp && buttonupIsUp)
            { delay(10);
                buttonupIsUp = digitalRead(upPin);
                if (buttonupIsUp && m==11)
                { rh = 0;
                    EEPROM.write(30, rh);
                    // digitalWrite(relayh, LOW);
                } // Обработка нажатия для rh -
                if (buttondownWasUp && buttondownIsUp)
                { delay(10);
                    buttondownIsUp = digitalRead(downPin);
                    if (buttondownIsUp && m==11)
                    { // ledEnabled = !ledEnabled;
                        rh = 1;
                        EEPROM.write(30, rh); // digitalWrite(relayh, HIGH);
                    } //if (rh == 1) {digitalWrite(relayh, HIGH);} else {digitalWrite(relayh, LOW);}
                }
            }
        }
    }
    //вывод меню
    if (m==0)
    { lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print( "Menu" );
        lcd.setCursor(6,0);
        lcd.print(RTC.get(DS1307_HR,true));
        lcd.setCursor(8,0);
        lcd.print("."); // печатаем разделитель
        lcd.setCursor(9,0);
        lcd.print(RTC.get(DS1307_MIN,false));
        if (H < 22 && H >= 8)
        {lcd.setCursor(12,0);
            lcd.print( "den" );}
        else

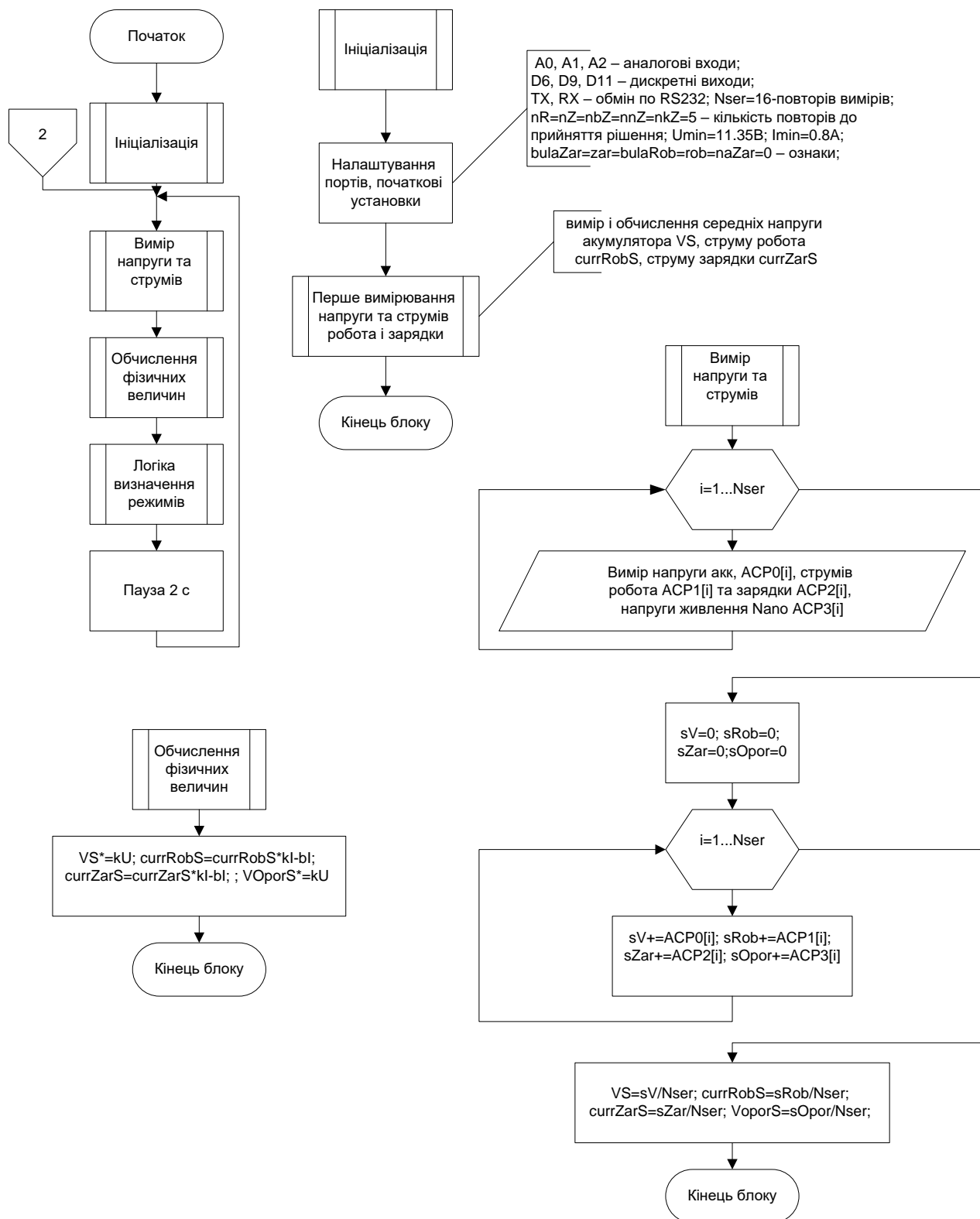
```

```

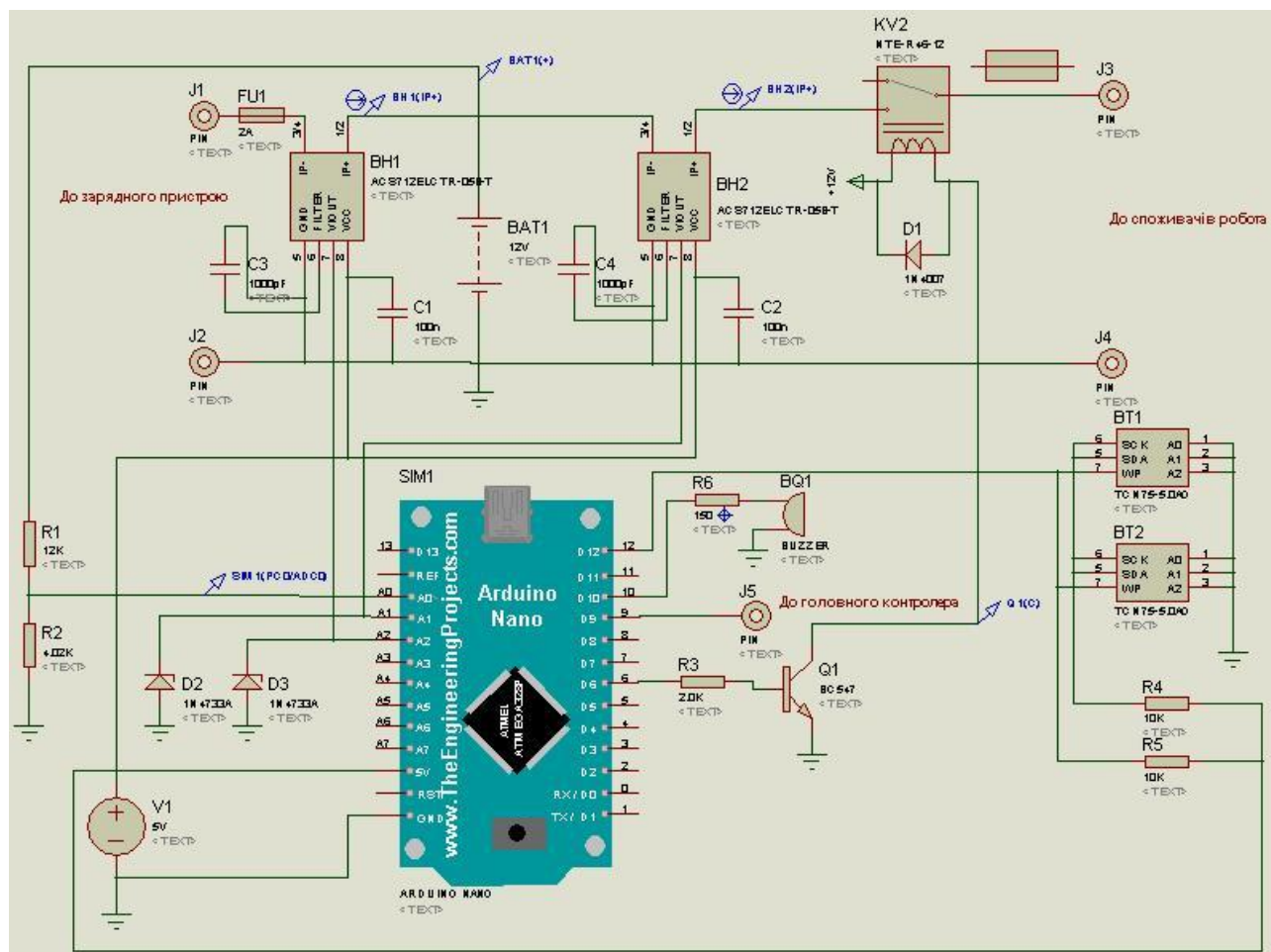
{lcd.setCursor(12,0);
 lcd.print( "hoch" );}
// lcd.setCursor(12,0);
// lcd.print((H));
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print( "T=" );
//p1 = EEPROMread(0);
lcd.print((t));
lcd.print( " H=" );
//p2 = EEPROMread(1);
lcd.print(h);
lcd.print( " LED=" );
}}
buttonupWasUp = buttonupIsUp;
buttondownWasUp = buttondownIsUp;
buttonnextWasUp = buttonnextIsUp;
buttonprevWasUp = buttonprevIsUp; }

```

### Додаток 3. Алгоритми роботи підсистеми зарядження акумулятора



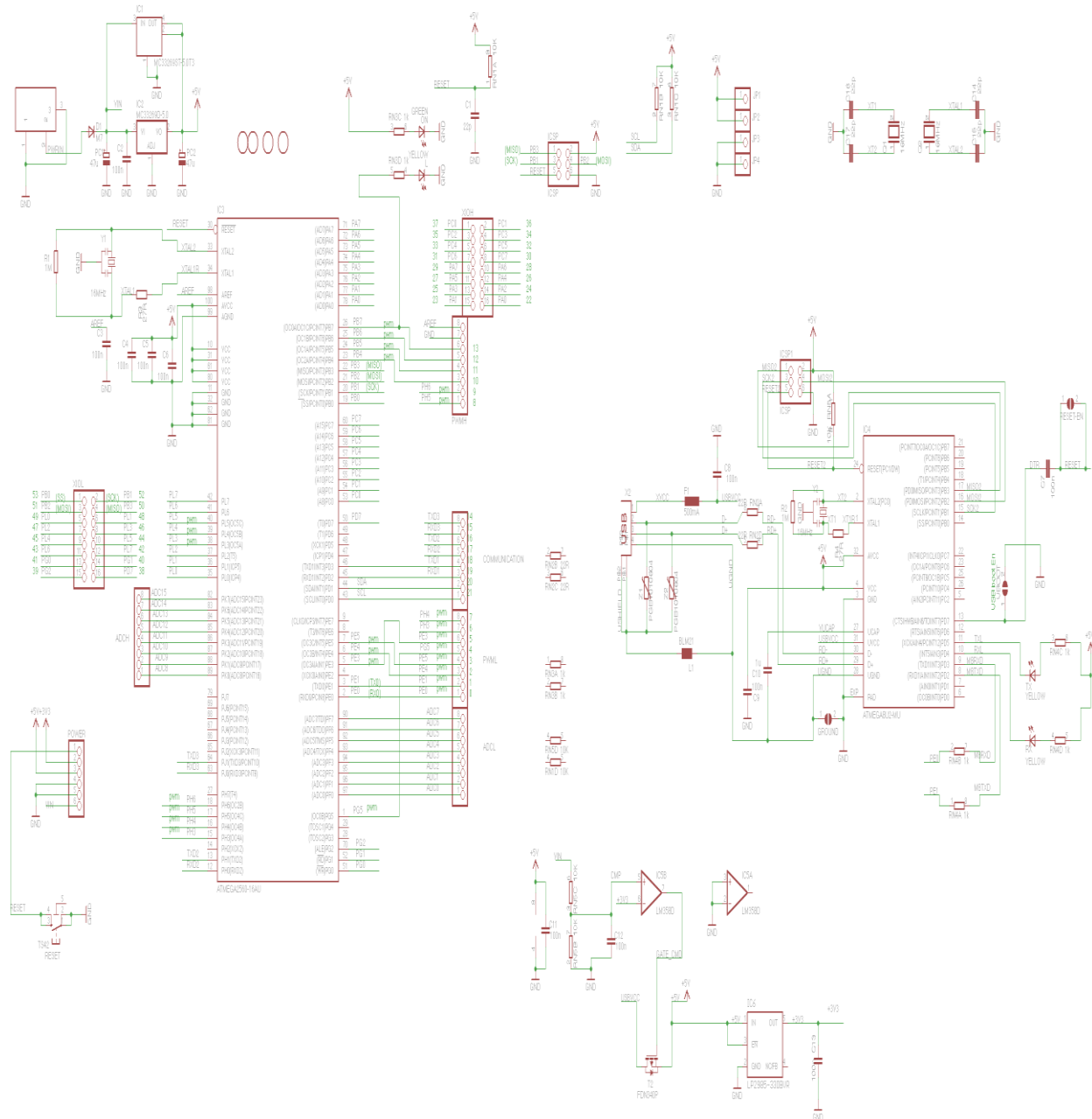
## Додаток І. Принципова електрична схема зарядження акумулятора





# Додаток І. Електрична принципова схема підсистеми фітомоніторингу

These are for future definition and shall have no responsibility whatsoever for conflicts or incompatibilities arising from future changes to them.  
The product information on the Web Site or elsewhere is subject to change without notice. Do not realize a design with this information.



## Додаток І. Текст основної програми роботи мобільного робота

```

#include <DHT h> //
#include <Wire h> //
#include <Ultrasonic h> //
#include "Co2Ppm.h" //
#include "Variables.h" //
#include "Features.h" //
#include "Color_detect.h" //
#include "gyro.h" //
#include <EEPROM.h> //
//
#include <SPI.h> //
//
#include <stdint.h> //
#include <util/atomic.h> //
#include <Arduino.h> //
////////////////////////////////////

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  Serial2.begin(19200);
  Serial2.attachSerialInterrupt(SerialIntprt);
  BT.begin(9600);

  pinMode(motor_up_stop, INPUT_PULLUP);
  pinMode(motor_down_stop, INPUT_PULLUP);
  pinMode(head_stop_L, INPUT_PULLUP);
  pinMode(head_stop_R, INPUT_PULLUP);

  //dht.setup(dht_pin);

  Wire.begin();

  motors_init();

  int error;
  uint8_t c;

  error = MPU6050_read (MPU6050_WHO_AM_I, &c, 1);
  error = MPU6050_read (MPU6050_PWR_MGMT_2, &c, 1);
  MPU6050_write_reg (MPU6050_PWR_MGMT_1, 0);
  calibrate_sensors();
  set_last_read_angle_data(millis(), 0, 0, 0, 0, 0);
  //get_gyro_data();

  //////////////////////////////////
  pinMode(S0, OUTPUT);
  pinMode(S1, OUTPUT);
  pinMode(S2, OUTPUT);
  pinMode(S3, OUTPUT);
  pinMode(sensorOut, INPUT);
  //Setting frequency-scaling to 100%
  digitalWrite(S0, HIGH);
  digitalWrite(S1, HIGH);

  batCheck();
  /*
  prom_read();
  */
  //////////////////////////////////

```

```

Serial.println("ENTER CHECKPOINTS COUNT: ");
while(!Serial.available() > 0)
{
    checkpoints = Serial.read();
    Serial.print("CHECKPOINT COUNT: ");
    Serial.println(checkpoints);
}
//////////
Serial.println("ENTER ROWS COUNT: ");
while(!Serial.available() > 0)
{
    rows = Serial.read();
    Serial.print("ROWS COUNT: ");
    Serial.println(rows);
}
delay(st_delay);
*/
//////////
Serial.println("READY!");
delay(st_delay);
//////////
Serial.println("RUN.....");
delay(st_delay);
}

void loop()
{
    /*while(1)
    {
        //distance_check();
        //detect_blue();
        //detect_red();
        //delay(100);
        go();
        delay(15000);
    }
    */
    if (hand_mode == 1)
    {
        Bluetooth_control();
    }
    batCheck();
    do {
        поки не закінчатся ряди. // Виконується до
        go(); // Рух вперед. До появи
        червоного маркера.
        motor_stop();
        Serial.println("Dot row");
        delay(1000);
        Angle(-90); // Поворот праворуч. Після повороту автоматична зупинка.
        do {
            закінчатся мітки // Поки не
            row_move(0); // Рух вперед в ряді, на певній
            швидкості
            distance_check(); // Перевірка відстані до перехрестя (за наявності)
            detect_blue(); // Перевірка наявності маркера в ряді (синій)
            if (frequency > 90) // При наявності маркера в ряді.
            {
                motor_stop(); // Зупинка всіх моторів.
                Serial.println("Dot on row");
                delay(st_delay);
                get_data(); // Підняття балки. Зчитування даних з датчиків.
            }
        }
    }
}

```

```

    check_count++;    // Підрахунок маркерів в ряду.
    distance_check();
}
} while (check_count < checkpoints);
Serial.println("Row end");
rows_count++;    // Підрахунок маркерів рядів.
detect_red();
while (frequency < 90)    // Рух в ряду назад до маркеру ряду (червоний)
{
    detect_red();    // Перевірка наявності маркеру ряду (червоний)
    row_move(1);    // Рух назад в ряду
    delay(st_delay);
}
motor_stop();
Serial.println("Row begin");
Angle(90);    // Поворот ліворуч.
check_count = 0;    // Обнулення даних маркерів в ряду.
}
while (rows_count < rows);    // Поки є маркери ряду.
Serial.println("Rows end");
rows_count = 0;    // Обнулення даних маркерів рядів.
go_back();    // Рух назад (за даними гіроскопу) до базової станції.
motor_stop();    // Зупинка всіх моторів.
go();
Serial.println("FINISH!!");
delay(st_delay);
}

```

## Додаток Й. Текст програми керування двигунами мобільного робота

```

void motors_init()
{
    // Ініціалізація цифрових пінів як виходи
    // Для двох моторів
    for (int i = 0; i < 6; i++)
    {
        pinMode(mApin[i], OUTPUT);           //
        pinMode(mBpin[i], OUTPUT);           //
        pinMode(pwmpin[i], OUTPUT);
    }
    // Ініціалізація гальма
    for (int i = 0; i < 6; i++)
    {
        digitalWrite(pwmpin[i], 0);
        digitalWrite(mApin[i], LOW);
        digitalWrite(mBpin[i], LOW);
    }
}

void motorOff(int motor)
{
    for (int i = 0; i < 6; i++)
    {
        digitalWrite(mApin[i], LOW);
        digitalWrite(mBpin[i], LOW);
        analogWrite(pwmpin[i], 0);
    }
}

void motorGo(uint8_t motor, uint8_t direct, uint8_t pwm)    //Режим роботи двигунів
{ //      0: Гальмуєм VCC
  if (motor < 6)                                           //
      1: За годинниковою стрілкою
  { //      2: Проти годинникової стрілки
    if (direct <= 4)                                     //      3:
      Гальмуєм GND
    {
        // Вмикаємо inA[motor]
        if (direct <= 1)
            digitalWrite(mApin[motor], HIGH);
        else
            digitalWrite(mApin[motor], LOW);
        // Вмикаємо inB[motor]
        if ((direct == 0) || (direct == 2))
        {
            digitalWrite(mBpin[motor], HIGH);
        }
        else
        {
            digitalWrite(mBpin[motor], LOW);
        }
        analogWrite(pwmpin[motor], pwm);
    }
  }
}

void motor_stop()
{
    for (int i = 0; i < 6; i++)
    {
        motorOff(i);
    }
}

```

```

void motor_U_D(int side)//Режимы работы двигателя
{
  if (side == 0)
  {
    motorGo(2, CW, motor_speed);
  } else
  {
    motorGo(2, CCW, motor_speed);
  }
}
void motor_stop_U_D()
{
  digitalWrite(mApin[2], LOW);
  digitalWrite(mBpin[2], LOW);
  analogWrite(pwmpin[2], 0);
}
void row_move(int dir)
{
  if (dir == 0)
  {
    //MOVING FORWARD
    motorGo(0, CW, motor_speed);
    motorGo(1, CW, motor_speed);
    Serial.println("Go front side");
  } else {
    motorGo(0, CCW, motor_speed);
    motorGo(1, CCW, motor_speed);
    Serial.println("Go back side");
  }
}
void Angle(float ang)
{
  get_gyro_data();
  float angle_z_sub = angle_z;
  if (ang == 0) return;
  if (ang < 0)
  {
    do {
      motorGo(0, CW, left_motor);
      motorGo(1, CCW, right_motor);
      Serial.print("Right turn ");
      get_gyro_data();
    } while (angle_z > (ang + angle_z_sub));
  }
  else
  {
    do {
      motorGo(0, CCW, left_motor);
      motorGo(1, CW, right_motor);
      Serial.print("Left turn ");
      get_gyro_data();
    } while (angle_z < (ang + angle_z_sub));
  }
  motor_stop();
  delay(500);
  //for (int i = 0; i < 10; i++)
  //{
  get_gyro_data();
  delay(10);
  //}
  angle_z_sub = angle_z - (ang + angle_z_sub);
  if (abs(angle_z_sub) > 2.0)
  {

```

```

    Angle(-angle_z_sub);
  }
}
void go()
{
  get_gyro_data();
  float angle_z_sub = angle_z;
  motorGo(0, CW, left_motor);
  motorGo(1, CW, right_motor);
  Serial.println("GO!");
  Serial.println(angle_z);
  int i = 0;
  do {
    get_gyro_data();
    if (angle_z < (-1.0 + angle_z_sub)) {
      motorGo(1, CW, right_motor);
      motorGo(0, CW, 50);
      //motorGo(0, BRAKEGND, 0);
      Serial.println("L+");
      delay(20);
      get_gyro_data();
      Serial.println(angle_z);
    }
    else if (angle_z > (1.0 + angle_z_sub)) {
      //motorGo(1, BRAKEGND, 0);
      motorGo(1, CW, 50);
      motorGo(0, CW, left_motor);
      Serial.println("R+");
      delay(20);
      get_gyro_data();
      Serial.println(angle_z);
    }
    else {
      motorGo(0, CW, left_motor);
      motorGo(1, CW, right_motor);
    }
  } while (i < 100000);
  //} while (frequency < 90);
}
void go_back()
{
  get_gyro_data();
  float angle_z_sub = angle_z;
  motorGo(0, CCW, left_motor);
  motorGo(1, CCW, right_motor);
  Serial.println("GO!");
  Serial.println(angle_z);
  do {
    get_gyro_data();
    if (angle_z < (-1.0 + angle_z_sub)) {
      motorGo(1, CCW, right_motor);
      motorGo(0, BRAKEGND, 0);
      Serial.println("L+");
      delay(20);
      get_gyro_data();
      Serial.println(angle_z);
    }
    else if (angle_z > (1.0 + angle_z_sub)) {
      motorGo(1, BRAKEGND, 0);
      motorGo(0, CCW, left_motor);
    }
  }
}

```

```

    Serial.println("R+");
    delay(20);
    get_gyro_data();
    Serial.println(angle_x);
}
else {
    motorGo(0, C CW, left_motor);
    motorGo(1, C CW, right_motor);
}
detect_red();
if (frequency < 90)
{
    back_count++;
}
//distance_check();
} while (back_count <= 3);
}

```



## Додаток К. Текст програми дистанційного керування мобільного робота

```

void Bluetooth_control()
{
  while (1) {
    if (BT.available() > 0) {
      command = BT.read();
      //Serial.println(command);
      detect_red();
      //detect_blue();
      get_gyro_data();
      float angle_z_sub = angle_z;
      switch (command) {
        case 'F':
          if ((head == 0) && (up_down == 0))
          {
            Serial.println("Front");
            detect_red();
            motorGo(0, CW, left_motor);
            motorGo(1, CW, right_motor);
            //motorGo(0, CW, 255);
            //motorGo(1, CW, 255);
            do {
              get_gyro_data();
              if (angle_z < (-1.0 + angle_z_sub)) {
                motorGo(1, CW, left_motor);
                motorGo(0, BRAKEGND, 0);
                Serial.println("Left turn+");
                delay(20);
                get_gyro_data();
                Serial.println(angle_z);
              }
              else if (angle_z > (1.0 + angle_z_sub)) {
                motorGo(1, BRAKEGND, 0);
                motorGo(0, CW, right_motor);
                Serial.println("Right turn+");
                delay(20);
                //get_gyro_data();
                Serial.println(angle_z);
              }
            }
            else {
              motorGo(0, CW, left_motor);
              motorGo(1, CW, right_motor);
            }
            command = BT.read();
            //detect_red();
            //distance_check();
          } while (command == 'F');
        } else if (up_down == 1)
        {
          motorGo(2, CW, 255);
          Serial.println("M up");
        }
        break;
        case 'B':
          if ((head == 0) && (up_down == 0))
          {
            Serial.println("Back");
            motorGo(0, CCW, left_motor);
            motorGo(1, CCW, right_motor);
            //motorGo(0, CCW, 255);
            //motorGo(1, CCW, 225);
          } else if (up_down == 1)
          {
            motorGo(2, CCW, 255);

```

```

    Serial.println("M down");
}
break;
case 'L':
    if ((head == 0) && (up_down == 0))
    {
        Serial.println("Left");
        motorGo(0, CCW, left_motor);
        motorGo(1, CW, right_motor);
        //Angle(-40);
    } else if (head == 1)
    {
        motorGo(3, CW, motor_speed);
        Serial.println("H left");
    }
    break;
case 'R':
    if ((head == 0) && (up_down == 0))
    {
        Serial.println("Right");
        motorGo(0, CW, left_motor);
        motorGo(1, CCW, right_motor);
        //Angle(40);
    } else if (head == 1)
    {
        motorGo(3, CCW, motor_speed);
        Serial.println("H right");
    }
    break;
case 'X':
    head = 1;
    break;
case 'x':
    head = 0;
    break;
case 'V':
    up_down = 1;
    break;
case 'v':
    up_down = 0;
    break;
default:
    motor_stop();
    break;
} } } }

```

Додаток Л. Текст програми зчитування інформації з датчика CO<sub>2</sub>

```

#ifndef CO2PPM_H
#define CO2PPM_H
#include "Variables.h"
#define MG_PIN           (8) // define which analog input channel you are going to use
#define BOOL_PIN         (-2) // Arduino D2-CO2 sensor digital pinout, labled with "D" on PCB
#define DC_GAIN           (8.5) // define the DC gain of amplifier
/*~~~~~Software Related Macros~~~~~*/
#define READ_SAMPLE_TIMES (10) // define how many samples you are going to take in
normal operation
#define READ_SAMPLE_INTERVAL (50) // define the time interval(in milisecond) between each
samples in normal operation
/*~~~~~Application Related Macros~~~~~*/
//These values differ from sensor to sensor. User should deremine this value.
#define ZERO_POINT_X      (2.602) // lg400=2.602, the start point_on X_axis of the curve
#define ZERO_POINT_VOLTAGE (0.324) // define the output of the sensor in volts when the
concentration of CO2 is 400PPM
#define MAX_POINT_VOLTAGE (0.265) // define the output of the sensor in volts when the
concentration of CO2 is 10,000PPM
#define REACTION_VOLTAGE (0.059) // define the voltage drop of the sensor when move the
sensor from air into 1000ppm CO2
/*~~~~~Globals~~~~~*/
float CO2Curve[3] = {ZERO_POINT_X, ZERO_POINT_VOLTAGE, (REACTION_VOLTAGE /
(2.602 - 4))};
int percentage;
float volts;
/*~~~~~MQRead~~~~~*/
Input: mg_pin - analog channel
Output: output of SEN-000007
Remarks: This function reads the output of SEN-000007
float MQRead(int mg_pin) {
    int i;
    float v = 0;

    for (i = 0; i < READ_SAMPLE_TIMES; i++) {
        v += analogRead(mg_pin);
        delay(READ_SAMPLE_INTERVAL);
    }
    v = (v / READ_SAMPLE_TIMES) * 5 / 1024;
    return v;
}
/*~~~~~MQGetPercentage~~~~~*/
Input: volts - SEN-000007 output measured in volts
       pcurve - pointer to the curve of the target gas
Output: ppm of the target gas
Remarks: By using the slope and a point of the line. The x(logarithmic value of ppm)
          of the line could be derived if y(MQ-811 output) is provided. As it is a
          logarithmic coordinate, power of 10 is used to convert the result to non-logarithmic
          value.
int MQGetPercentage(float volts, float *pcurve) {
    volts = volts / DC_GAIN;
    if (volts > ZERO_POINT_VOLTAGE || volts < MAX_POINT_VOLTAGE) {
        return -1;
    } else {
        return pow(10, (volts - pcurve[1]) / pcurve[2] + pcurve[0]);
        volts = 0;
    }
}
#endif

```





## Додаток М. Текст програми зчитування інформації з датчиків кольору

```

#ifndef COLOR_DETECT_H
#define COLOR_DETECT_H
#include <DHT h>
#include <Wire h> //
#include <Ultrasonic h> //
#include "Co2Ppm.h" //
#include "Variables.h" //
#include "Features.h" //
#include "Color_detect.h" //
#include "gyro.h" //
#include <SPI h> //
#include <stdint h> //
#include <util/atomic h> //
#include <Arduino h> //
int detect_red()
{
    // Setting red filtered photodiodes to be read
    digitalWrite(S2, LOW);
    digitalWrite(S3, LOW);
    frequency = pulseIn(sensorOut, LOW);
    frequency = map(frequency, 25, 55, 100, 0);
    Serial.print("R= "); //printing name
    Serial.println(frequency);
    if (frequency > 80)
    {
        Serial.println("RED DETECTED"); //printing name
    }
    return frequency;
} int detect_green()
{
    // Setting Green filtered photodiodes to be read
    digitalWrite(S2, HIGH);
    digitalWrite(S3, HIGH);
    frequency = pulseIn(sensorOut, LOW);
    //frequency = map(frequency, 35, 140, 100, 0);
    Serial.print("G= "); //printing name
    Serial.println(frequency);
    if (frequency > 90)
    {
        Serial.println("GREEN DETECTED"); //printing name
    }
    return frequency;
} int detect_blue()
{
    // Setting Blue filtered photodiodes to be read
    digitalWrite(S2, LOW);
    digitalWrite(S3, HIGH);
    frequency = pulseIn(sensorOut, LOW);
    //frequency = map(frequency, 220, 160, 100, 0);
    Serial.print("B= "); //printing name
    Serial.println(frequency);
    if (frequency > 900)
    {
        Serial.println("BLUE DETECTED"); //printing name
    }
    return frequency;
} int clear_color()
{
    digitalWrite(S2, HIGH);
    digitalWrite(S3, LOW);
}
#endif

```

## Додаток Н. Акти впровадження наукових досліджень

<b>Погоджено</b> Перший проректор  <b>І.І. Ібатуллін</b> 	<b>Затверджую</b> Голова правління ПрАТ «Комбінат «Тепличний»  <b>В.І. Червищенко</b> 
« 13 »	« 01 »
2017 р.	2017 р.

**А К Т**  
**про впровадження результатів науково-дослідних, дослідно-конструкторських та технологічних робіт**

Даним актом стверджується, що результати роботи «Розробка інтелектуального роботизованого електротехнічного комплексу для моніторингу фітостану та повітря в спорудах закритого ґрунту» № 110/1 - НТР від 01 березня 2016 року, № 0116U001589, виконаної Національним університетом біоресурсів і природокористування України, навчально-науковим інститутом енергетики, автоматики і енергозбереження, кафедрою автоматики та робототехнічних систем.

01.03.2016 – 31.12.2017.	вартістю	400 (чотириста тисяч) грн. 00 коп.
строки виконання		цифрами та прописом

Впроваджено в ПрАТ «Комбінат «Тепличний» Україна, 7443, Київської обл.,  
 назва підприємства, де здійснювалось впровадження  
 Броварський р-н, смт. Калинівка вул. Теплична, 2.

1. **Вид впроваджуваних робіт.** Систематичне використання протягом періоду вегетації «Інтелектуального роботизованого електротехнічного комплексу для моніторингу фітостану та повітря в спорудах закритого ґрунту» дозволить зменшити енергетичну складову в структурі собівартості готової рослинної продукції в спорудах закритого ґрунту, забезпечуючи при цьому вимоги технологічного стандарту щодо якості продукції.
2. **Масштаби впровадження:** 4 га.
3. **Новизна результатів науково-дослідних робіт.** Мобільний комплекс забезпечить систему необхідною інформацією про параметри атмосфери, стани рослин з ідентифікацією відповідних зон, а система визначить необхідні стратегії керування, що максимізують прибуток виробництва (із врахуванням біологічних особливостей рослин та споживання енергоносії). Важливою особливістю такої системи є те, що вона як зворотній зв'язок використовує інформацію про якість продукції.

Наукова новизна підтверджена патентами України: «Спосіб керування переміщенням мобільного робота в теплиці» №114191 від 27.02.2017, «Спосіб регулювання мікроклімату в теплиці з урахуванням фітотемпературного критерію оцінки розвитку рослин» №115830 від 25.04.2017.

4. Дослідно-промислова перевірка була проведена з 04.09.2017 – 27.10.2017, акт №1 від 30.10.2017. в ПрАТ «Комбінат «Тепличний».

номер, дата актів випробування, назва підприємства

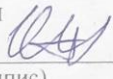
5. **Річний економічний ефект у грошовому виразі:** Застосування інтелектуального роботизованого електротехнічного комплексу для моніторингу фітостану та стану атмосфери в спорудах закритого ґрунту (цех №9) дозволило отримати економію енергоресурсів у розмірі 241312 грн. та за рахунок підвищення врожайності і якості томатів збільшити прибуток до 96525 грн., що дало можливість отримати додатковий прибуток у розмірі 84,46 грн/м<sup>2</sup>. У процесі роботи інтелектуальний роботизований електротехнічний комплекс продемонстрував високу надійність.

6. **Соціальний і науково-технічний ефект.** Впровадження мобільного роботизованого комплексу в спорудах закритого ґрунту, тепличних господарств має перспективне практичне значення, оскільки зменшує енергетичну складову в структурі собівартості готової рослинної продукції в спорудах закритого ґрунту, забезпечуючи при цьому вимоги технологічного стандарту щодо якості продукції.


Від Національного  
університету біоресурсів і  
природокористування України

Від ПрАТ «Комбінат «Тепличний»

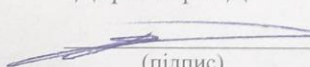
Начальник науково-дослідної  
частини

  
(підпис) В.В. Отченашко  
(ПІБ)  
«31» 10 2017 р.


Головний інженер

  
(підпис) О.В. Мельніченко  
(ПІБ)  
«01» 11 2017 р.


Директор НДІ

  
(підпис) В.Д. Войтюк  
(ПІБ)  
«31» 10 2017 р.

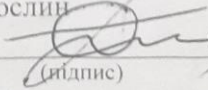
Головний енергетик

  
(підпис) П.З. Левчук  
(ПІБ)  
«01» 11 2017 р.

Керівник розробки

  
(підпис) В.П. Лисенко  
(ПІБ)  
«31» 10 2017 р.

Головний агроном по захисту  
рослин

  
(підпис) С.Г. Юхненко  
(ПІБ)  
«01» 11 2017 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ  
Голова правління  
ПрАТ «Комбінат «Тепличний»  
В. І. Чернишенко

" 10 " 2017 р.

АКТ

впровадження наукової розробки

Ми, які нижче підписались, представники підприємства ПрАТ «Комбінат «Тепличний» Україна, 7443, Київської обл., Броварський р-н, смт. Калинівка вул. Теплична, 2,

(назва та адреса, головні галузеві спеціалісти)

Голова правління Чернишенко В. І.

з одного боку і розробник, працівник кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І. І. Мартиненка Національного університету біоресурсів і природокористування України, к.т.н., доц. Болбот Ігор Михайлович

(наукові співробітники)

з другого боку склали цей акт упровадження наукової розробки:

«Система інтелектуального управління енергетичними ресурсами тепличних комплексів»

(назва і короткий зміст)

Термін виконання 04.09.2017 – 27.10.2017

Результати обліку, що характеризують ефективність використання наукової розробки порівняно з існуючими

Застосування системи інтелектуального управління енергетичними ресурсами тепличних комплексів (цех №9) дозволило отримати економію енергоресурсів у розмірі 310127 грн. та за рахунок підвищення врожайності і якості томатів збільшити прибуток до 106323 грн., що дає можливість отримати додатковий прибуток у розмірі 104,11 грн/м<sup>2</sup>. тим самим зменшити собівартість продукції на 5,7%. У процесі роботи система інтелектуального управління енергетичними ресурсами продемонструвала високу надійність.

(підвищення врожаю, якості продукції, зниження затрат праці і собівартості продукції)

Акт складений " 10 " 2017 р.

Головні спеціалісти:

Гол. інженер Чернишенко В. І.

Гол. енергетик Шевчук Т. З.

Гол. агроном Позір С. О.

Співробітник НУБіП України,  
кафедра автоматики та  
робототехнічних систем  
ім. акад. І. І. Мартиненка  
/Болбот І. М./