



ДВНЗ «ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»



**Наукова робота на здобуття Премії Президента України
для молодих учених в 2022 році**

ЛАКТИОНОВ Іван Сергійович

**ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА
АПАРАТНО-ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ПОБУДОВИ
КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ СТАНУ
МІКРОКЛІМАТУ ТЕПЛИЦЬ**

Принципи теорії:

- системність і метрологічна задовільність агрегації розподіленої вимірjuвальної інформації;
- цілісність і адаптивність обробки результатів моніторингу;
- комплексність обліку функціональних зв'язків вимірюваних параметрів під час інтерпретації результатів моніторингу;
- оперативність і надійність передачі вимірjuвальної інформації;
- масштабованість застосування.

Науково-прикладна проблема полягає в розвитку теорії побудови комп'ютеризованих систем моніторингу інтегрального стану фізичних середовищ завдяки обґрунтуванню структурно-алгоритмічної організації та розробці інформаційно-вимірjuвального забезпечення комплексної агрегації та інтерпретації розподілених вимірjuвальних даних щодо мікроклімату промислових теплиць.

Науково-технічне протиріччя, яке полягає у відсутності теорії якісного переходу від вимірювань розподілених фізико-хімічних параметрів до моніторингу інтегрального стану мікроклімату, що призводить до дисбалансу між теорією та практикою в галузі прикладних комп'ютеризованих систем аграрного спрямування

Вагомість результату розв'язання проблеми полягає в розвитку програмно-технічної бази вітчизняних тепличних підприємств, що стимулює позитивну динаміку продовольчої безпеки України завдяки підвищенню індикативних показників інвестиційної привабливості та довгострокової стійкості аграрних підприємств із вирощування овочевих культур на захищених ґрунтах

Задачі глобального розвитку FAO і вимоги ASABE

Недостатність міждисциплінарних досліджень, що обумовлює фрагментарно-феноменологічний підхід до моніторингу тепличних процесів

Тема наукової роботи „Інформаційно-вимірjuвальне забезпечення та апаратно-програмні засоби побудови комп'ютеризованих систем моніторингу стану мікроклімату теплиць” є **актуальною**

Динамічне зростання площ теплиць і активне впровадження технологій інтелектуалізації та цифровізації до аграрного сектору

Постанови і розпорядження КМ та ВР України
Наукові програми, плани і теми

Рис. 1. Структура обґрунтування актуальності напрямку наукових досліджень

Концептуальний підхід до вирішення науково-прикладної проблеми

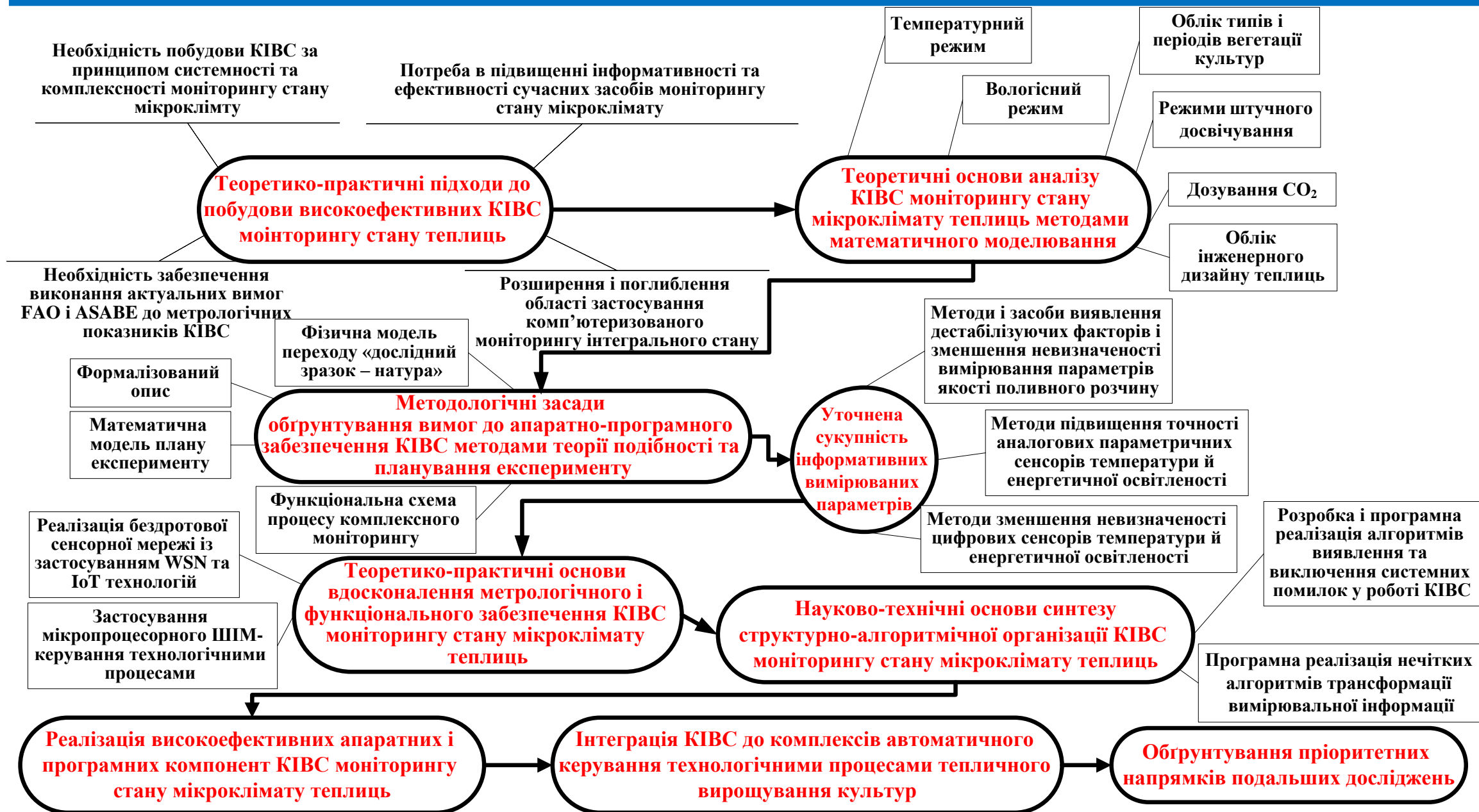


Рис. 2. Структура концептуального підходу до вирішення наукової проблеми

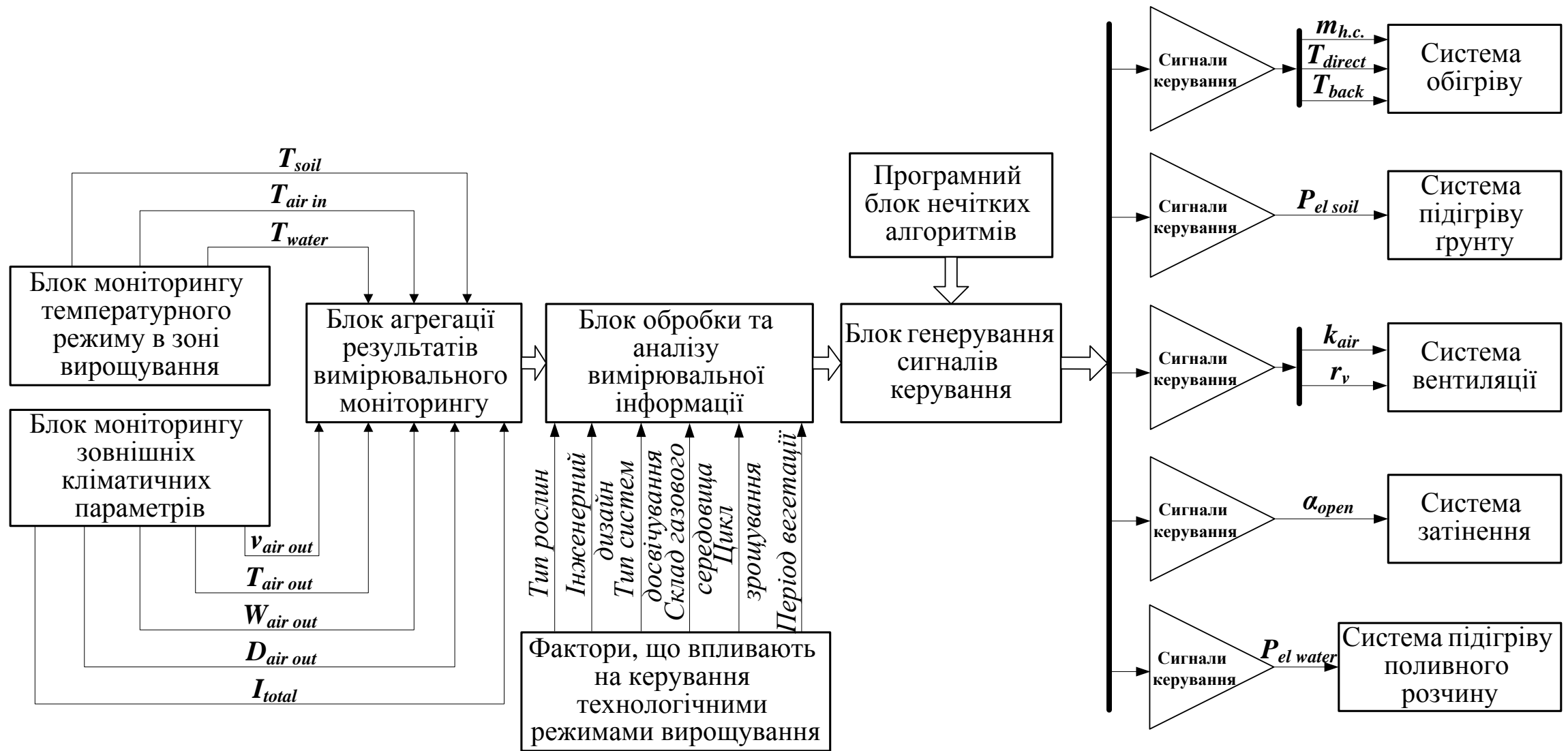
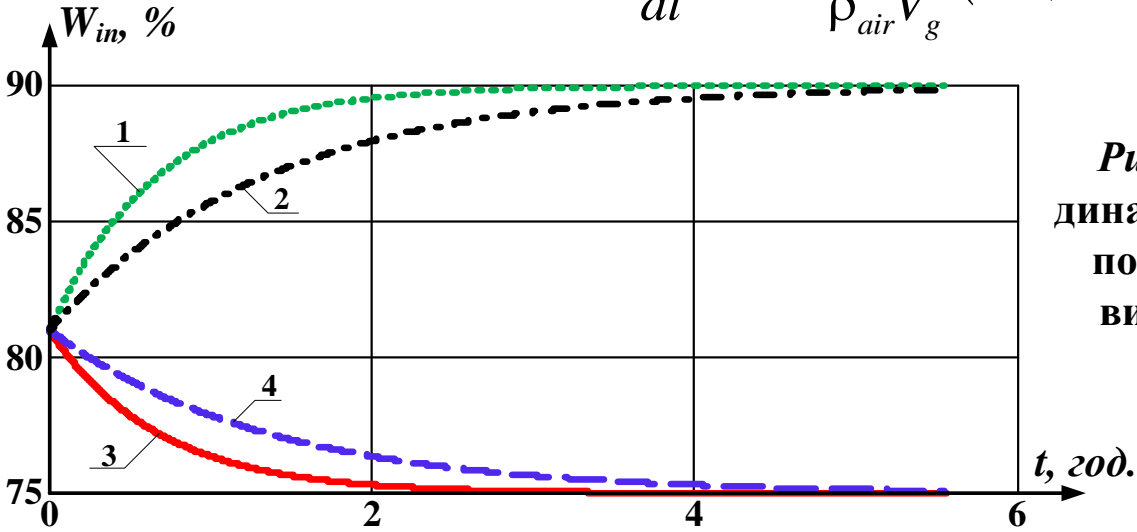


Рис. 3. Функціональна схема процесу комп'ютеризованого моніторингу температурного режиму вирощування

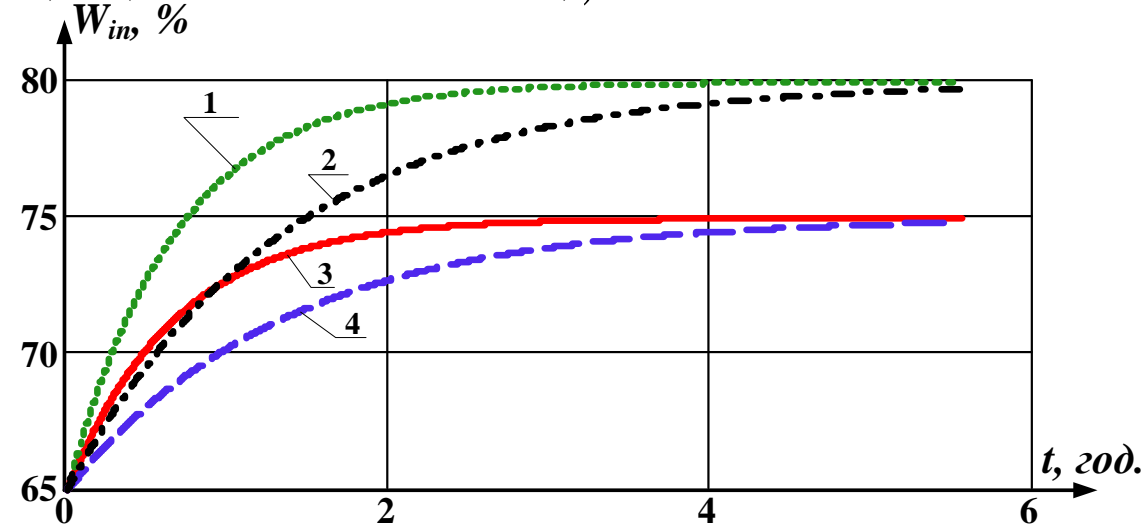
Результати моделювання процесу вимірювального моніторингу технологічного режиму зволоження повітря зони вирощування

Базове ЗДР:
$$\frac{dW_{air\ in}(t)}{dt} = \frac{L_{air\ in}}{\rho_{air} V_g} (C_e (P_{air\ out}(t) - P_{air\ in}(t)) - (W_{air\ in}(t) - W_{air\ out}(t))) + Z_{total\ hum}(t)$$

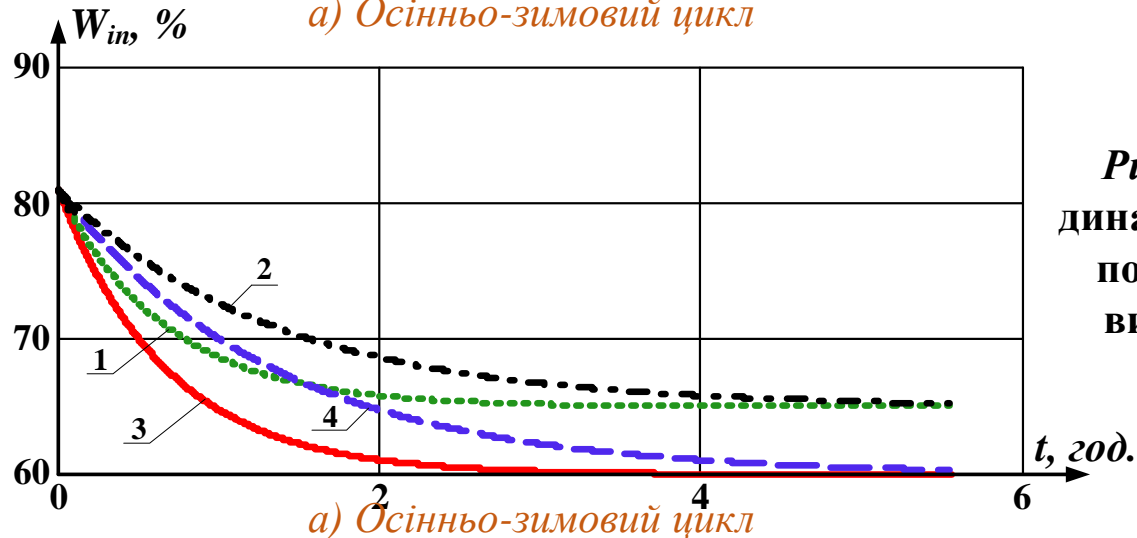


а) Осінньо-зимовий цикл

Рис. 4. Додова динаміка вологи в повітрі під час вирощування огірків

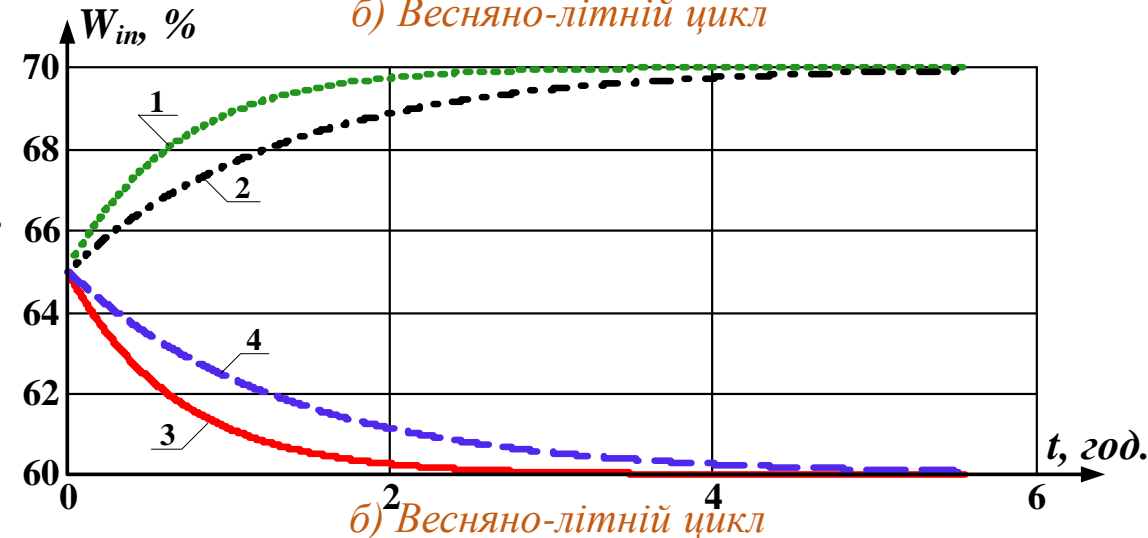


б) Весняно-літній цикл



а) Осінньо-зимовий цикл

Рис. 5. Додова динаміка вологи в повітрі під час вирощування томатів



б) Весняно-літній цикл

(1 – Під час плодоношення, $V_g=1875\text{ м}^3$; 2 – Під час плодоношення, $V_g=3750\text{ м}^3$;
3 – До плодоношення, $V_g=1875\text{ м}^3$; 4 – До плодоношення $V_g=3750\text{ м}^3$), V_g – об'єм теплиці.

Результати моделювання процесу вимірального моніторингу динаміки CO₂ у зоні вирощування

Базове ДР:

$$\frac{\partial C_{CO_2 in}}{\partial t} = D_{CO_2} \left(\frac{\partial^2 C_{CO_2 in}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_{CO_2 in}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_{CO_2 in}}{\partial z^2} \right) - \underbrace{\left(\vec{V}_x \frac{\partial C_{CO_2 in}}{\partial x} + \vec{V}_y \frac{\partial C_{CO_2 in}}{\partial y} + \vec{V}_z \frac{\partial C_{CO_2 in}}{\partial z} \right)}_{\varphi_{CO_2}^{vent}} + \varphi_{CO_2}^{sour}(x, y, z, t) - \varphi_{CO_2}^{phot}(x, y, z, t)$$

Отримане ДР з обліком накладених обмежень:

$$\frac{\partial C_{CO_2 in}}{\partial t} = D_{CO_2} \frac{\partial^2 C_{CO_2 in}}{\partial z^2} - \varphi_{CO_2}^{phot}$$

Рішення ДР:

$$C_{CO_2 in}(z, t) = \underbrace{\left\{ C_1 + \frac{z}{H} (C_2 - C_1) \right\}}_{f_1(z)} +$$

$$+ \underbrace{\left\{ \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(\frac{C_2 \cdot \cos(n\pi) - C_1}{n\pi} \right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi z}{H}\right) \cdot e^{-\frac{n^2 \pi^2 D_{CO_2} t}{H^2}} \right] + \frac{4}{\pi} C_{max} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{2k+1} \cdot \sin\left(\frac{(2k+1)\pi z}{H}\right) \cdot e^{-\frac{(2k+1)^2 \pi^2 D_{CO_2} t}{H^2}} \right\}}_{f_2(z, t)} -$$

$$- \underbrace{\left\{ \frac{4H^2 \varphi_{CO_2}^{phot}}{\pi^3 D_{CO_2}} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{(2k+1)^3} \cdot \sin\left(\frac{2k+1}{H} \cdot z\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{(2k+1)^2 \pi^2 D_{CO_2} t}{H^2}} \right) \right) \right\}}_{f_3(z, t)}$$

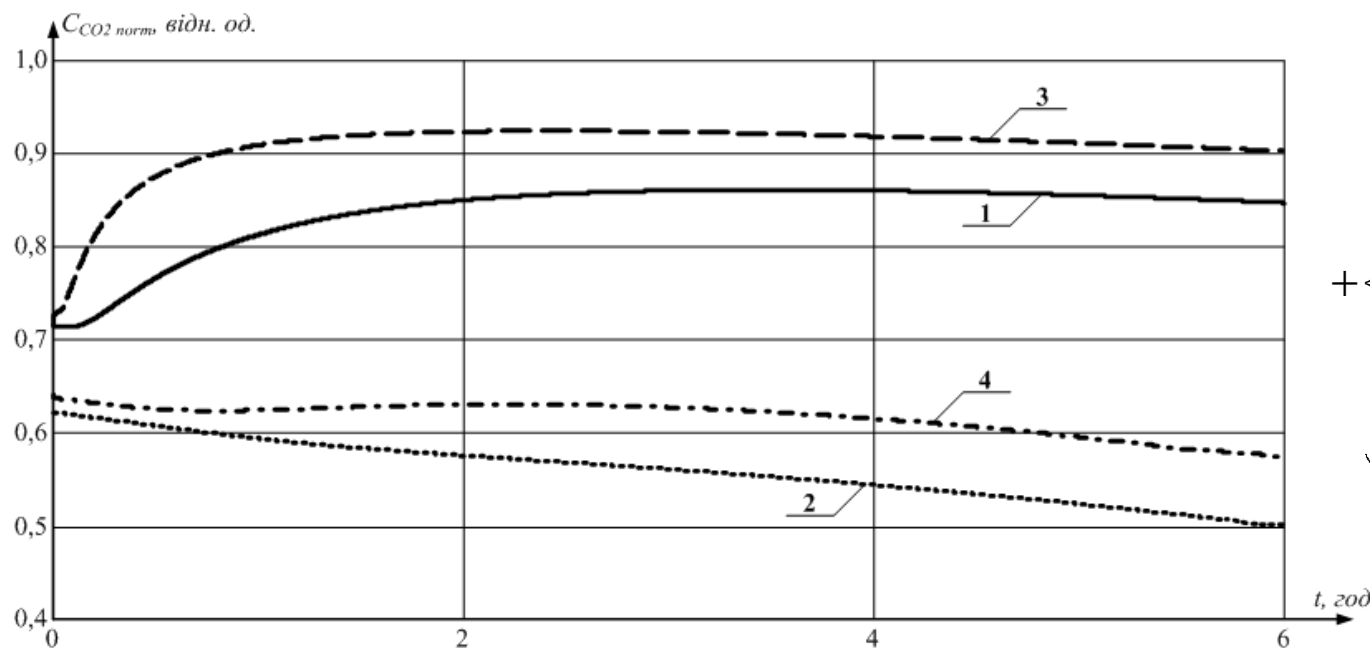


Рис. 6. Результати моделювання динаміки CO₂ у зоні вирощування

(1, 2 – томати до і під час плодоношення, відповідно;
3, 4 – огірки до і під час плодоношення, відповідно)

Результати моделювання процесу вимірювального моніторингу ефективної енергетичної освітленості зони вирощування

Модель функціональних перетворень:

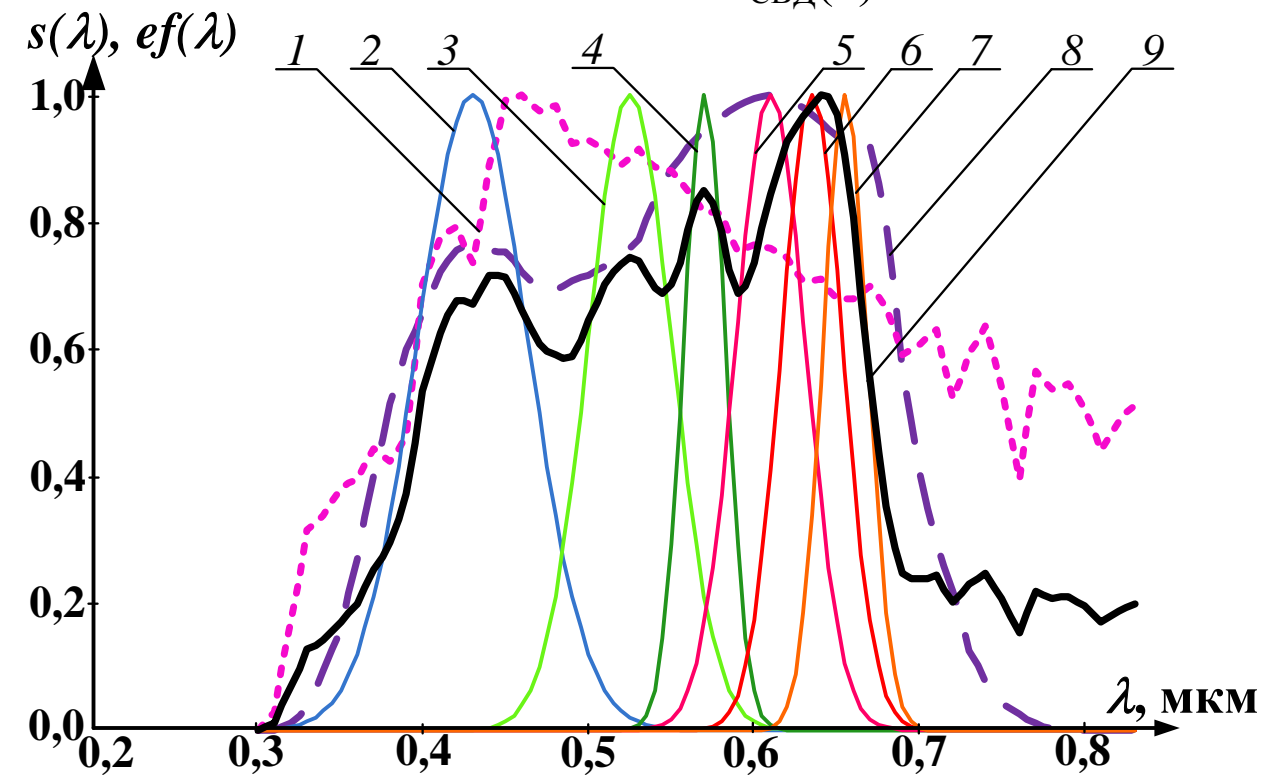
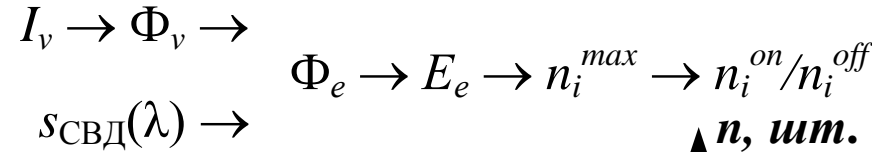


Рис. 7. Спектральний розподіл показників ефективності фотосинтезу (1 – нормована спектральна характеристика зовнішньої освітлення; (2...7) – нормовані спектральні характеристики потужності випромінювання СВД; 8 – необхідна відносна спектральна ефективність фотосинтезу; 9 – відносна спектральна ефективність фотосинтезу, що отримана в результаті дії СВД і зовнішнього освітлення)

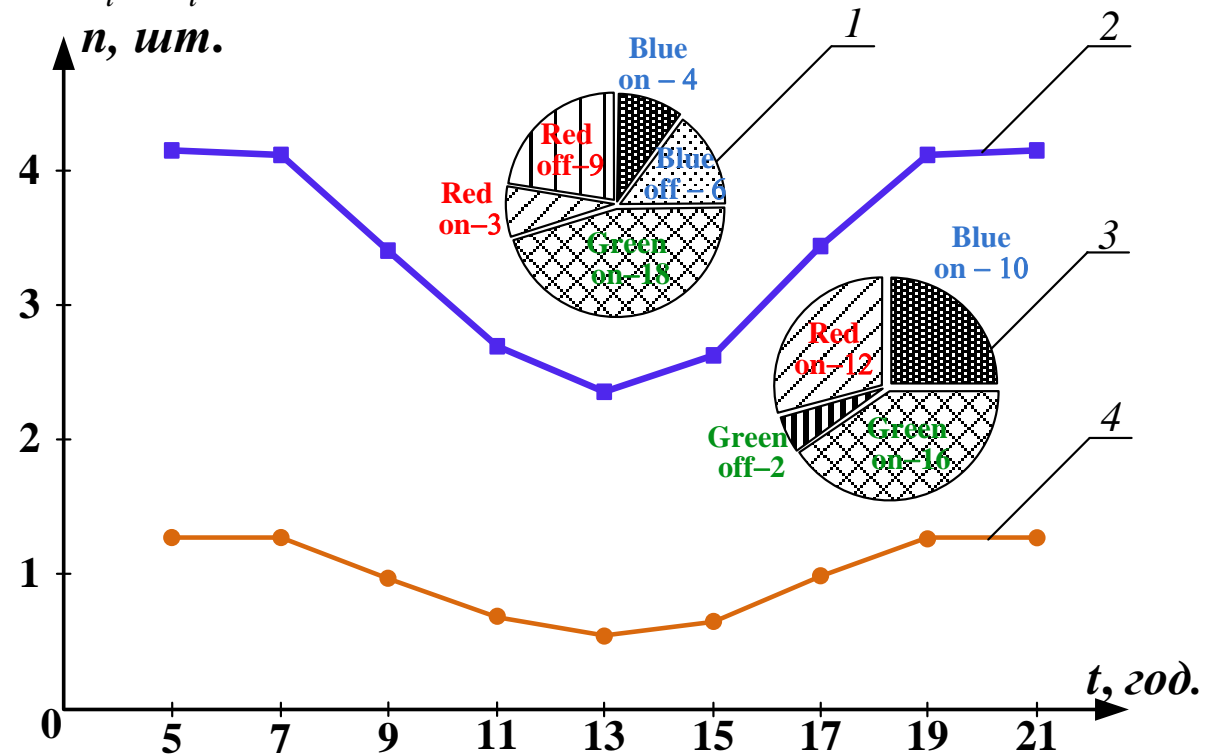


Рис. 8. Динаміка зміни кількості модулів СВД, що необхідні для доосвітлення тепличних культур (1, 3 – режими роботи СВД у модулі штучного доосвітлення для огірків і томатів; 2, 4 – кількість модулів для доосвітлення огірків і томатів, відповідно)

Загальна структура процесу моніторингу стану мікроклімату теплиць

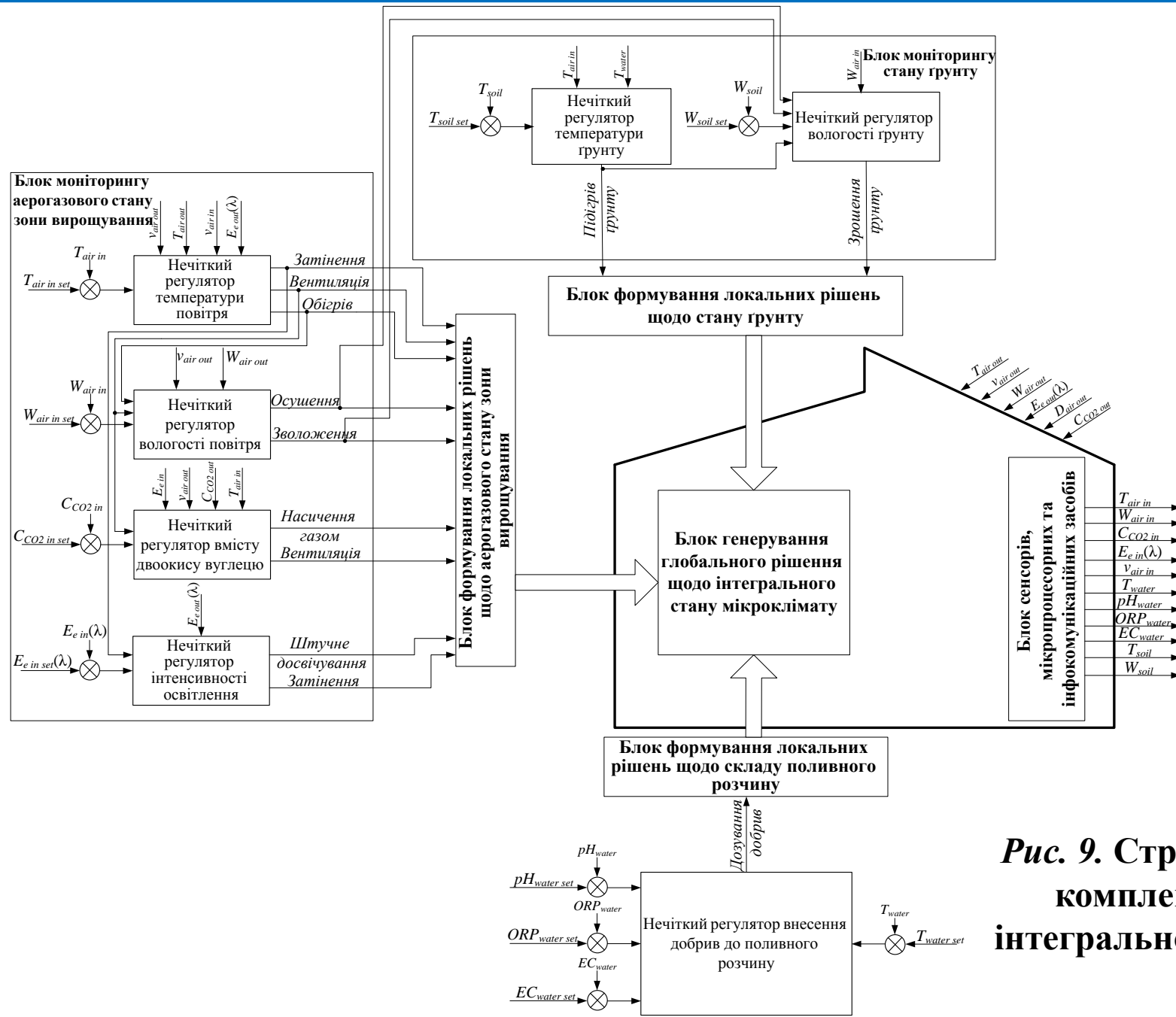
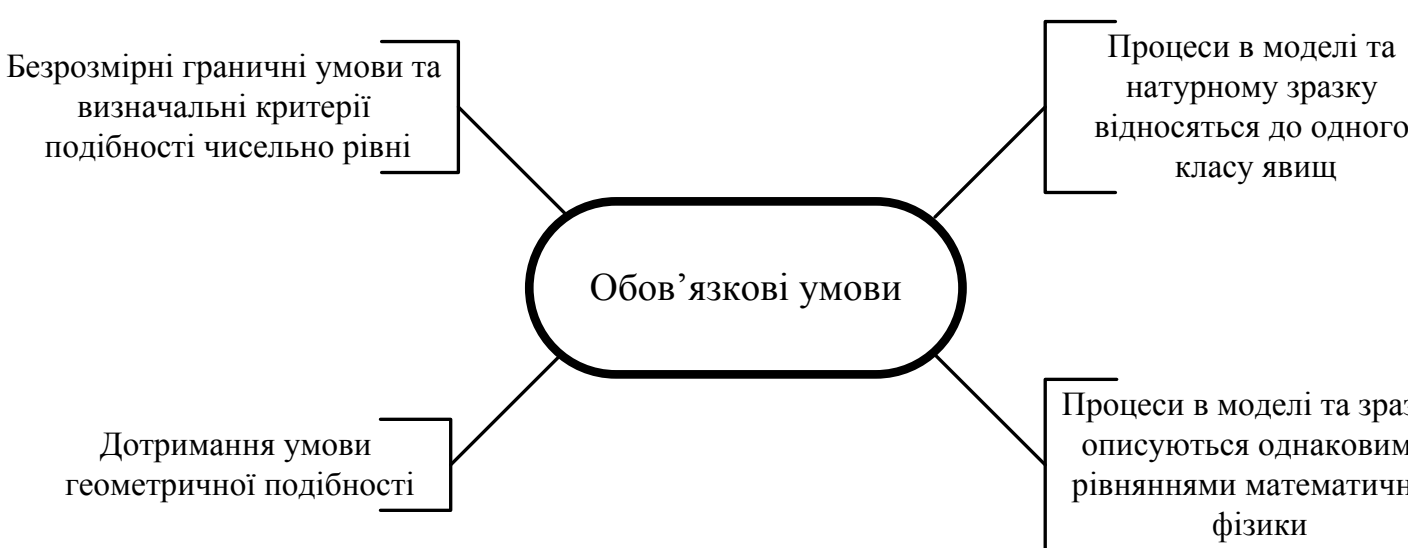


Рис. 9. Структурна схема процесу комплексного моніторингу інтегрального стану мікроклімату теплиць



Рівняння в розмірностях впливних фізичних величин:

Рис. 10. Основні етапи обґрунтування моделі масштабного переходу



$$(\kappa z \cdot m^{-2} \cdot c^{-1}) = \alpha_{model} \cdot (K)^{A_1} \cdot (\kappa z)^{A_2} \cdot (K)^{A_3} \cdot (\kappa z)^{A_4} \cdot (K)^{A_5} \times (\kappa z \cdot c^{-3})^{A_6} \cdot (\kappa z \cdot m^{-3})^{A_7} \cdot (m \cdot c^{-1})^{A_8} \cdot (\kappa z \cdot m^{-3})^{A_9}$$

Комплексний критерій подібності «модель – натура»:

$$Z_{phot} = \underbrace{k_{air\ in}^v \cdot k_{water}^C}_{\alpha_{model}} \cdot \left(\frac{k_{soil}^T}{k_{air\ in}^T} \right)^{A_3} \cdot \left(\frac{k_{soil}^W}{k_{air\ in}^W} \right)^{A_4} \cdot \left(\frac{k_{water}^T}{k_{air\ in}^T} \right)^{A_5} \times \left(\frac{k_e^E}{k_{water}^C \cdot (k_{air\ in}^v)^3} \right)^{A_6} \cdot \left(\frac{k_{CO2\ in}^C}{k_{water}^C} \right)^{A_9}$$

Рис. 11. Обов'язкові умови розробки моделі масштабного переходу

$$Z_{phot} = \alpha_{model} \cdot (P_1)^{A_3} \cdot (P_2)^{A_4} \cdot (P_3)^{A_5} \cdot (P_4)^{A_6} \cdot (P_5)^{A_9} \quad 9$$

Результати досліджень метрологічних характеристик вимірювальних каналів температури фізичних середовищ теплиць. Цифрові сенсори

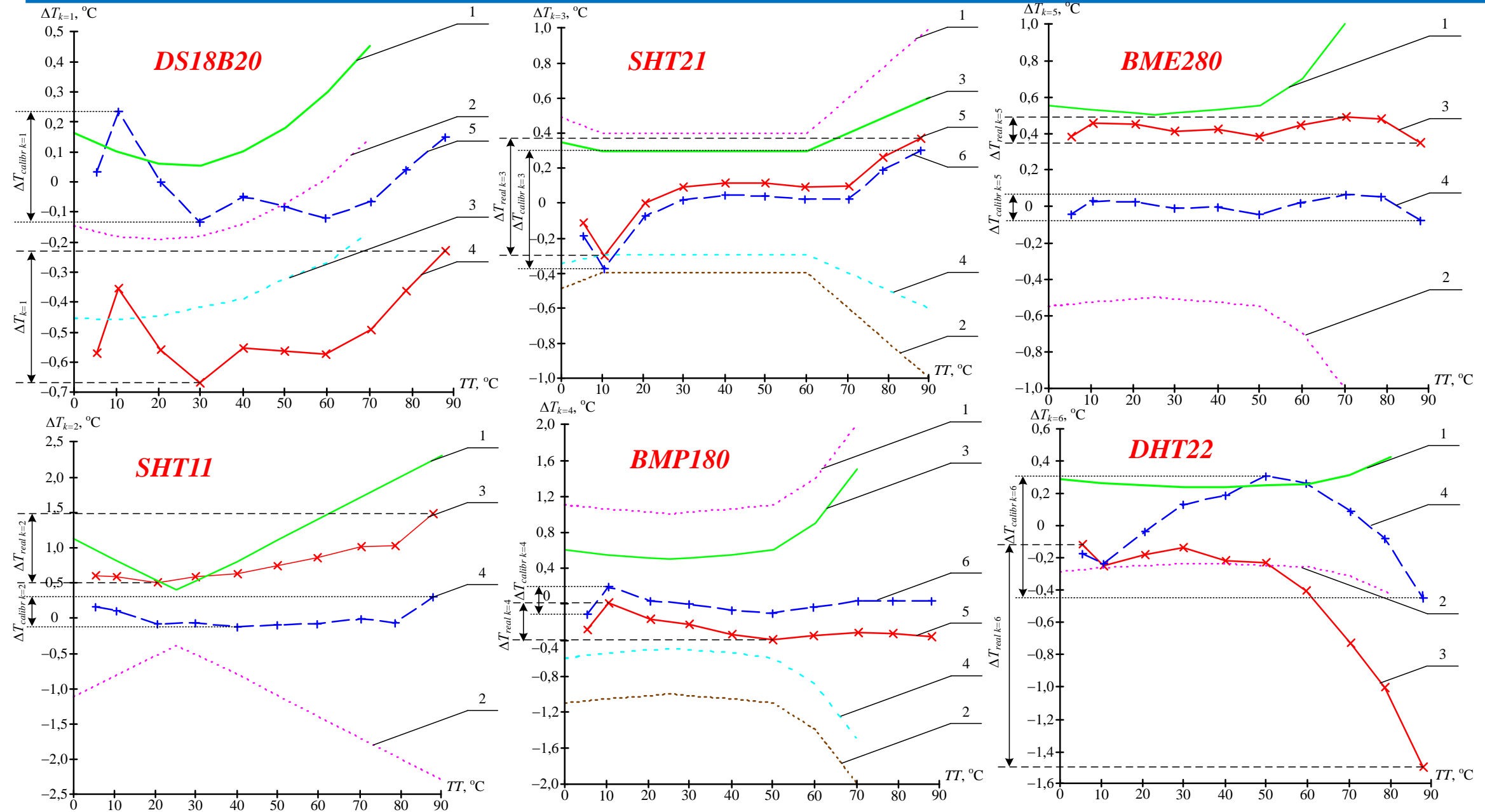


Рис. 12. Результати досліджень динаміки абсолютних невизначеностей цифрових сенсорів температури

Результати досліджень метрологічних характеристик вимірювальних каналів температури фізичних середовищ теплиць. Аналоговий сенсор

Базове рівняння апроксимації:

$$T_{\text{calc}} = \frac{1}{\frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \cdot \ln \frac{R1 \cdot \frac{U_{\text{OUT}}}{U_S - U_{\text{OUT}}}}{R_0}} - T_0.$$

Отримане рівняння обчислення початку діапазону другої еталонної температури в залежності від першої:

$$\lambda_{\text{end1}}(T_{\text{begin}}, T_{\text{end1}}^{\text{calc}}) = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} = \frac{\int_{T_{\text{begin}}}^{T_{\text{end1}}^{\text{calc}}} r(T) dT - \int_{T_{\text{begin}}}^{T_{\text{end2}}^{\text{calc}}} r(T) dT}{\int_{T_{\text{begin}}}^{T_{\text{end2}}^{\text{calc}}} r(T) dT},$$

$$T_{\text{end1}}^{\text{calc}}(T_{\text{begin}}) = k_T \cdot T_{\text{begin}} + b_T,$$

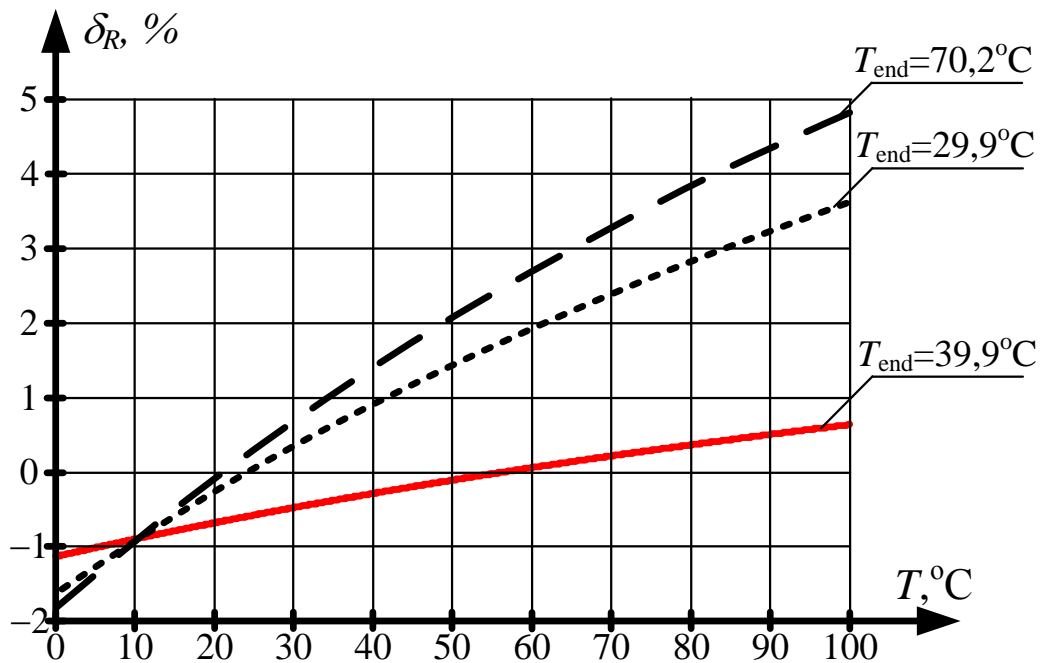


Рис. 13. Зміна відносної невизначеності апроксимації в залежності від значення другої еталонної температури

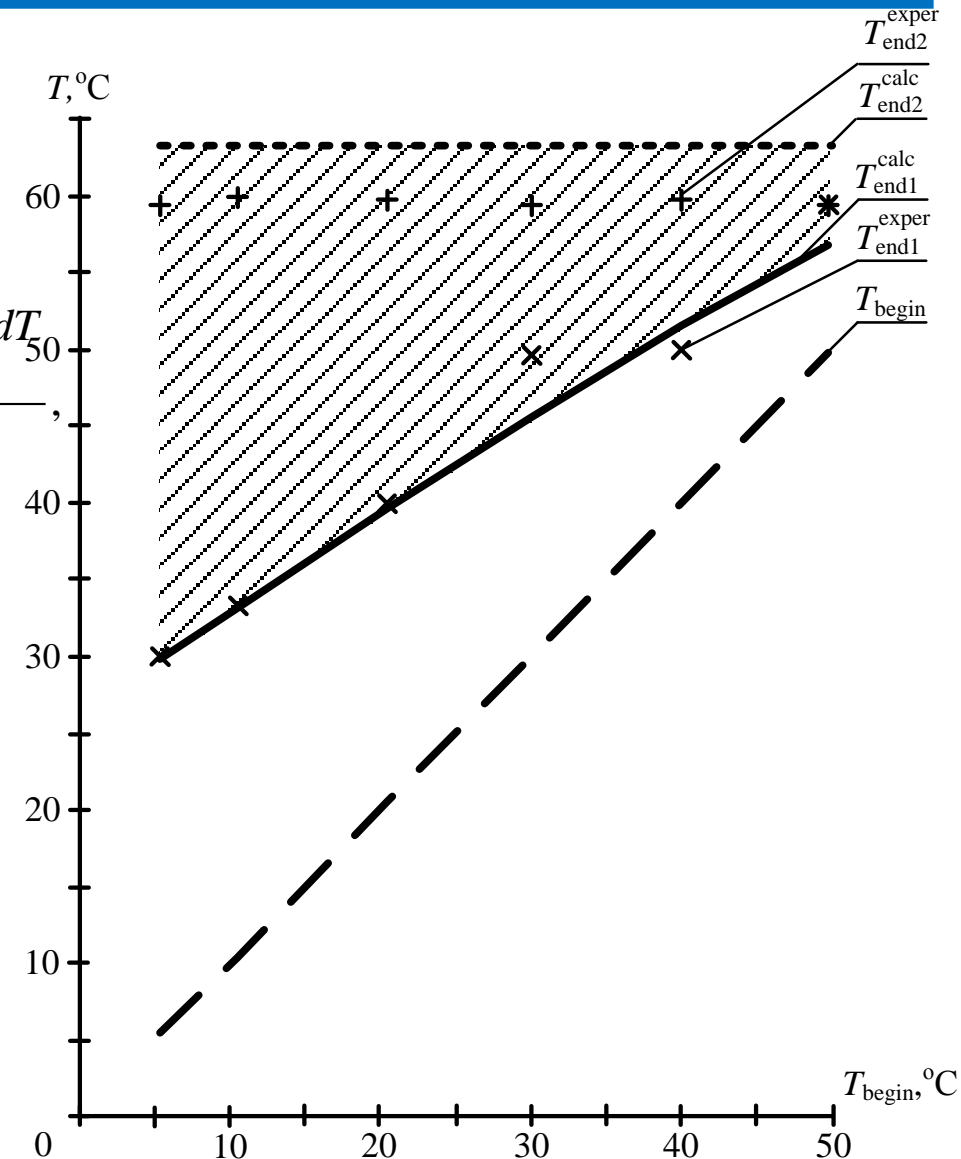


Рис. 14. Діапазон вибору другої еталонної температури

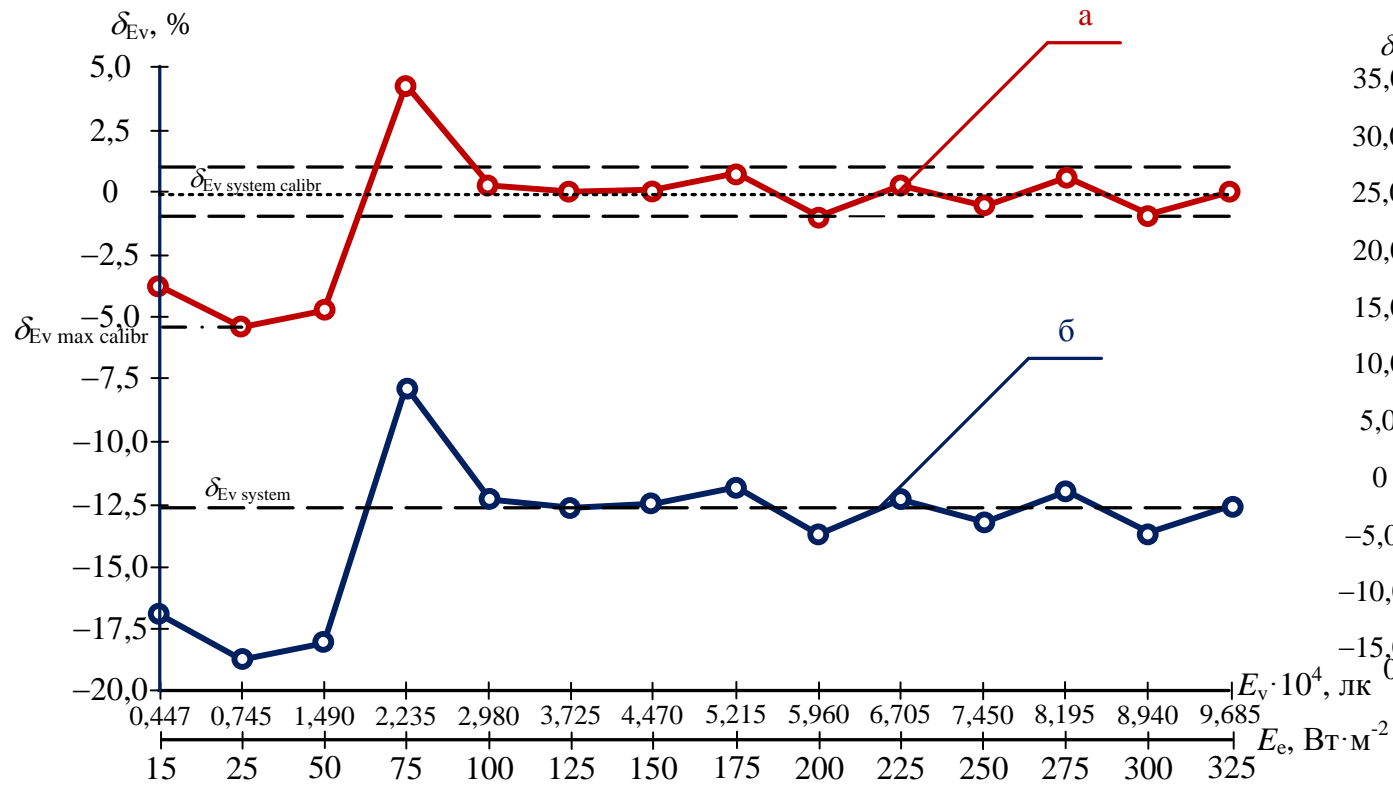


Рис. 15. Відносна невизначеність апроксимації результатів вимірювання із використанням сенсора GY-302 від вимірюваного значення освітленості до (б) і після використання калібрувального рівняння (а)

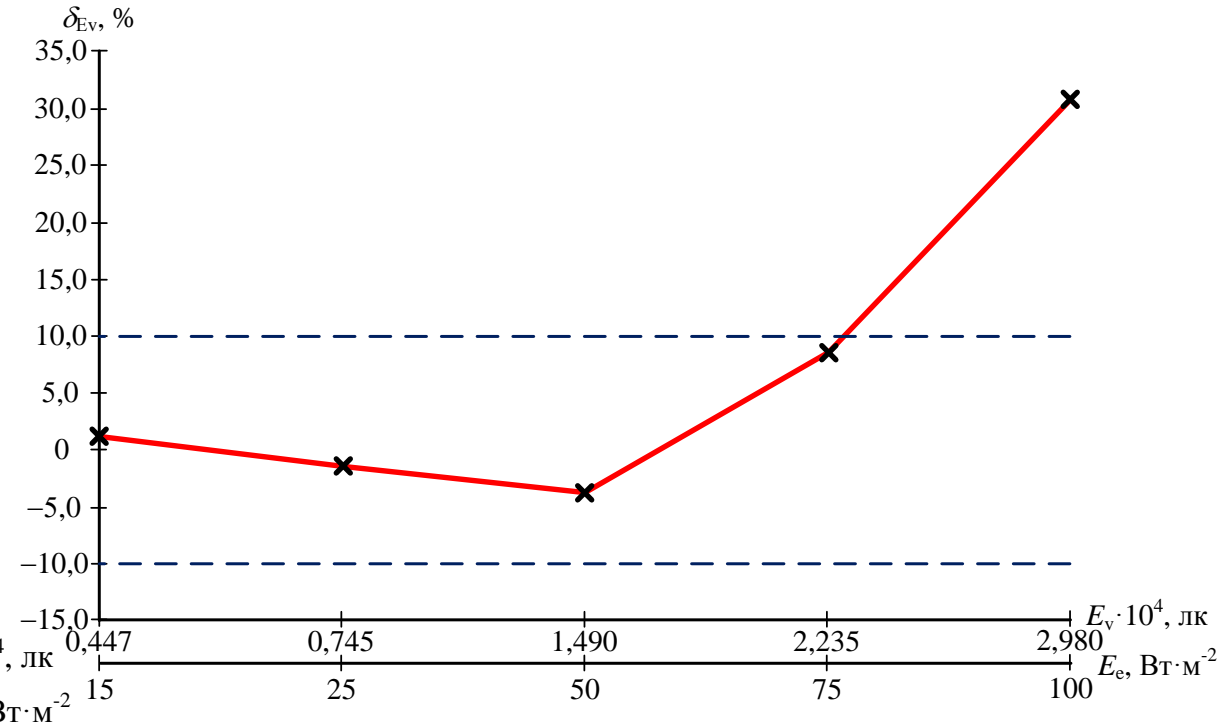


Рис. 16. Зміна відносної невизначеності вимірювання освітленості фоторезистором VT83N1 KY-018 від її вимірюваного значення

Метод зменшення невизначеності вимірювання електропровідності поливного розчину

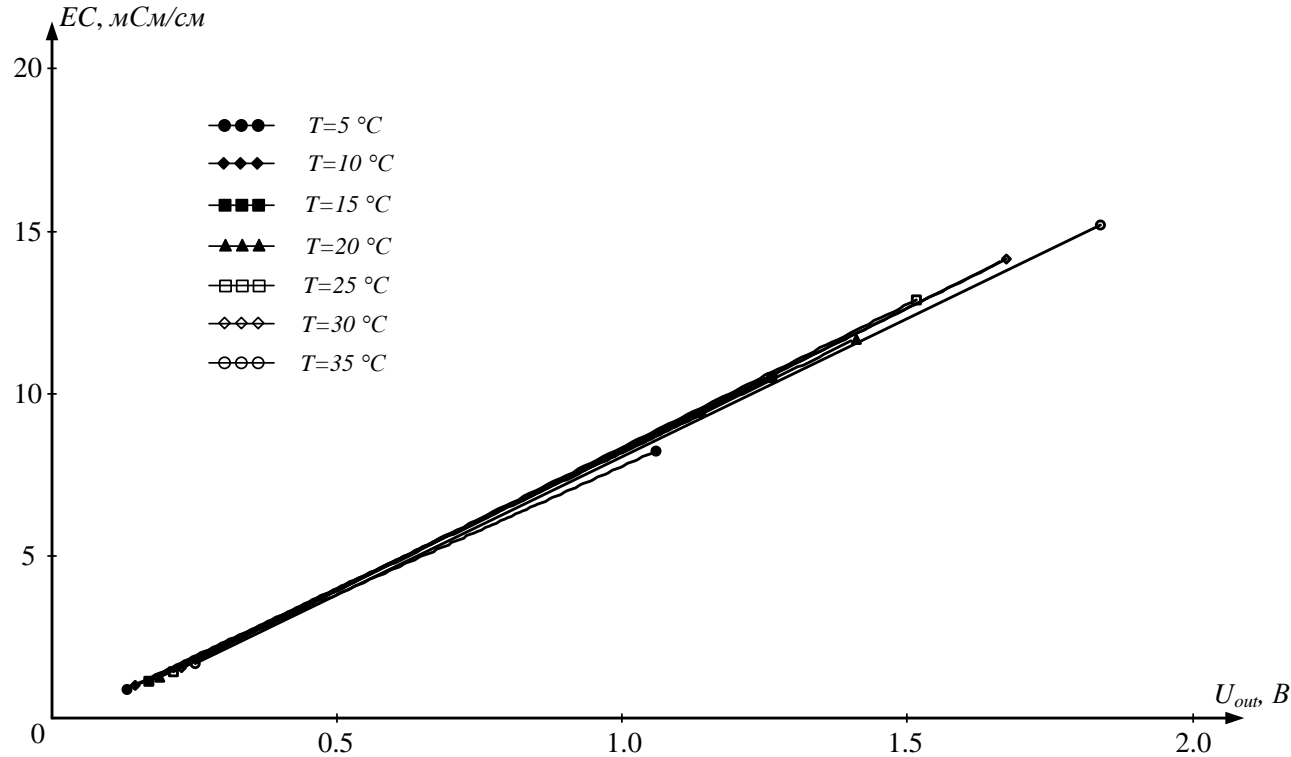
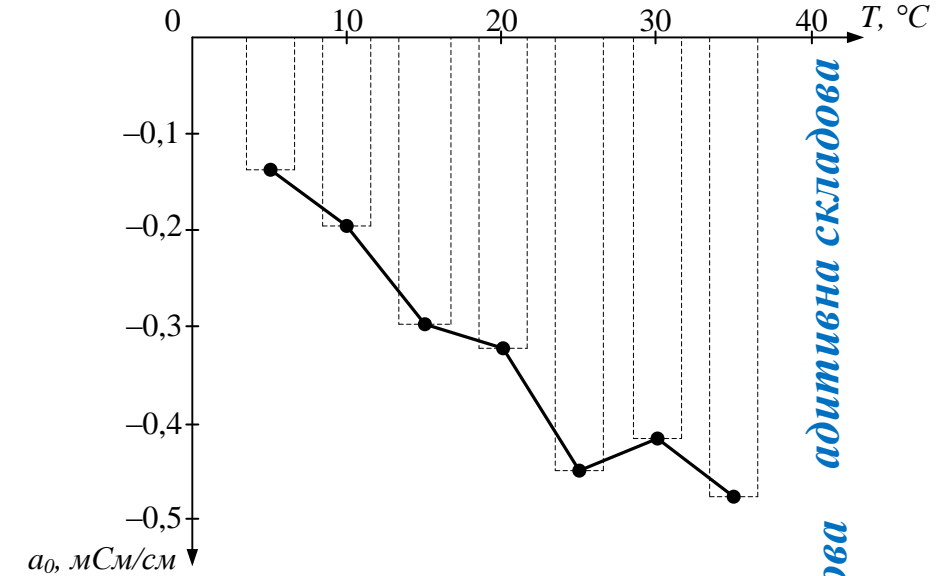
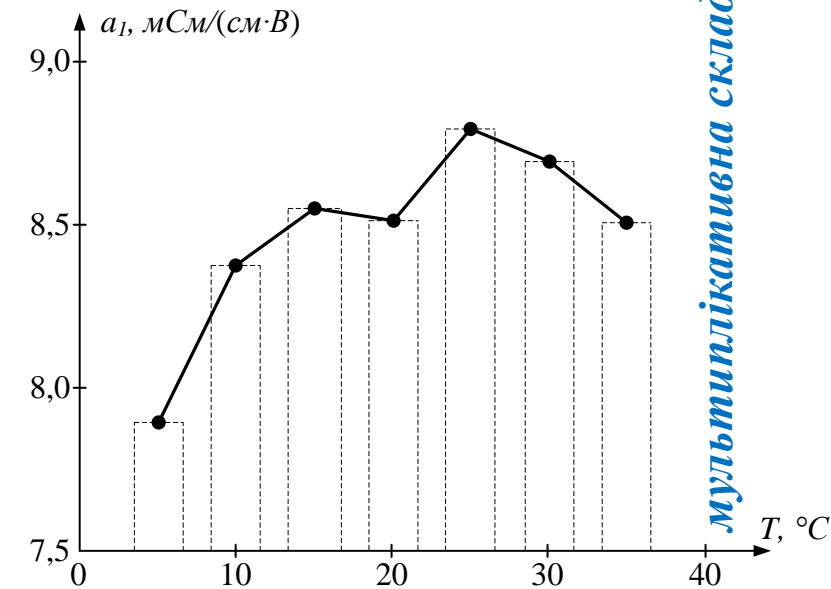


Рис. 17. Характеристики перетворення комп'ютеризованого ВК електропровідності поливного розчину



адитивна складова



мультиплікативна складова

Рис. 18. Залежність коефіцієнтів апроксимації ВК електропровідності

Сукупність рівнянь апроксимації:

$$EC = a_0(T) + a_1(T) \cdot U_{out}$$

$$EC = \begin{cases} 8,135 \cdot U_{out} - 0,166, & \text{якщо } 5 \leq T \leq 10 \\ 8,462 \cdot U_{out} - 0,246, & \text{якщо } 10 < T \leq 15 \\ 8,529 \cdot U_{out} - 0,310, & \text{якщо } 15 < T \leq 20 \\ 8,652 \cdot U_{out} - 0,387, & \text{якщо } 20 < T \leq 25 \\ 8,744 \cdot U_{out} - 0,434, & \text{якщо } 25 < T \leq 30 \\ 8,601 \cdot U_{out} - 0,447, & \text{якщо } 30 < T \leq 35 \end{cases}$$

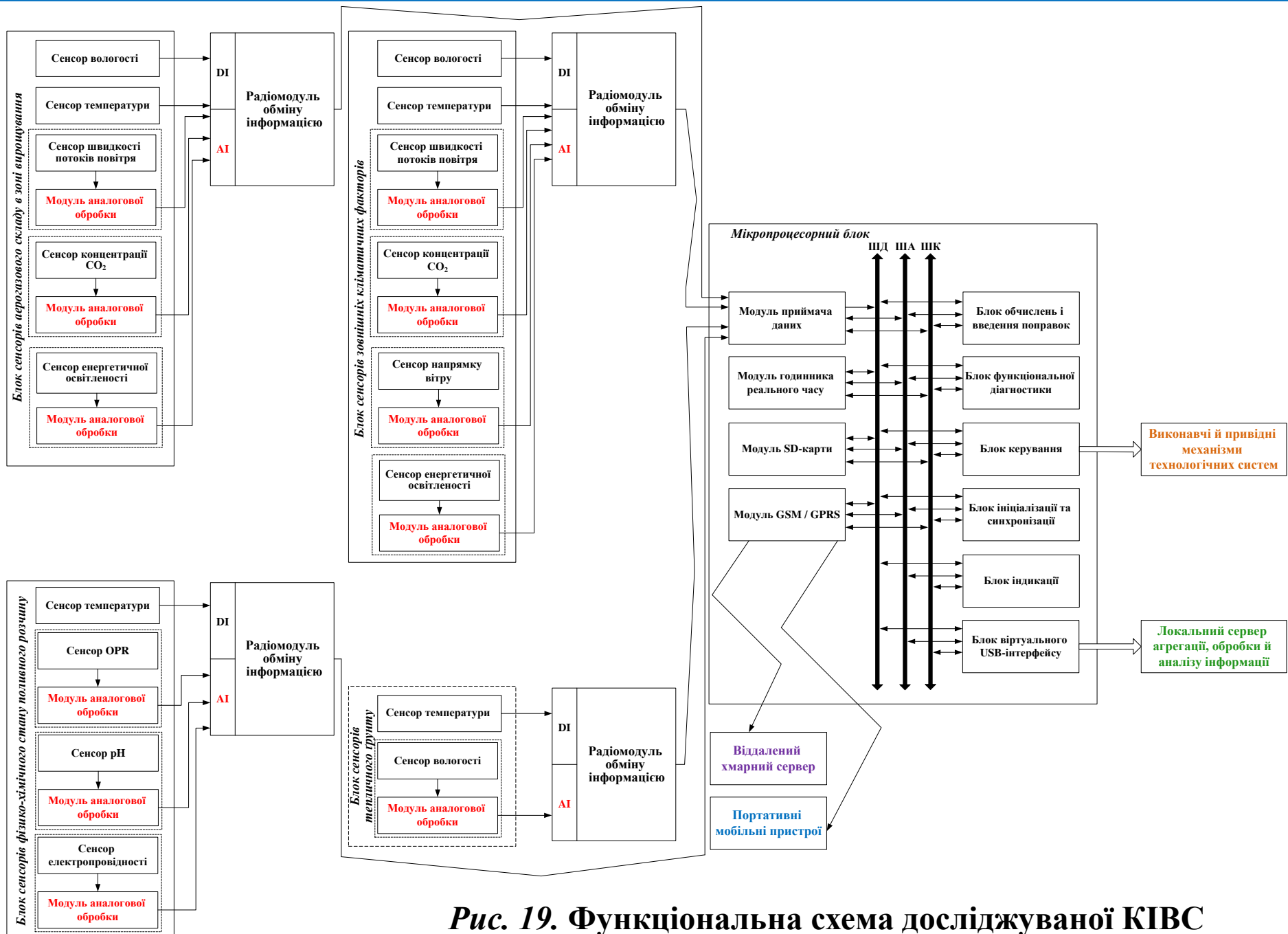


Рис. 19. Функціональна схема досліджуваної КІВС

Цільова функція оптимізації бездротової мережі сенсорів: $Location_{opt} = \max \left(C_a^T, C_a^E, C_a^{NE}, C_a^{TNO}, 1/C_a^{TO} \right)$

$$C_a^T = \left(\frac{7\pi}{3} + 2\sqrt{3} + 4 \right) R_{act}^2; \quad C_a^E = \frac{\left(\frac{7\pi}{3} + 2\sqrt{3} + 4 \right) R_{act}^2}{9\pi R_{act}^2} = 0,52; \quad C_a^{NE} = \frac{\pi + 6\sqrt{3}}{12} R_{act}^2;$$

$$C_a^{TNO} = 3 \left(\frac{\pi + 6\sqrt{3}}{4} \right) R_{act}^2; \quad C_a^{TO} = \left(\frac{19\pi}{12} - \frac{5\sqrt{3}}{2} + 4 \right) R_{act}^2,$$

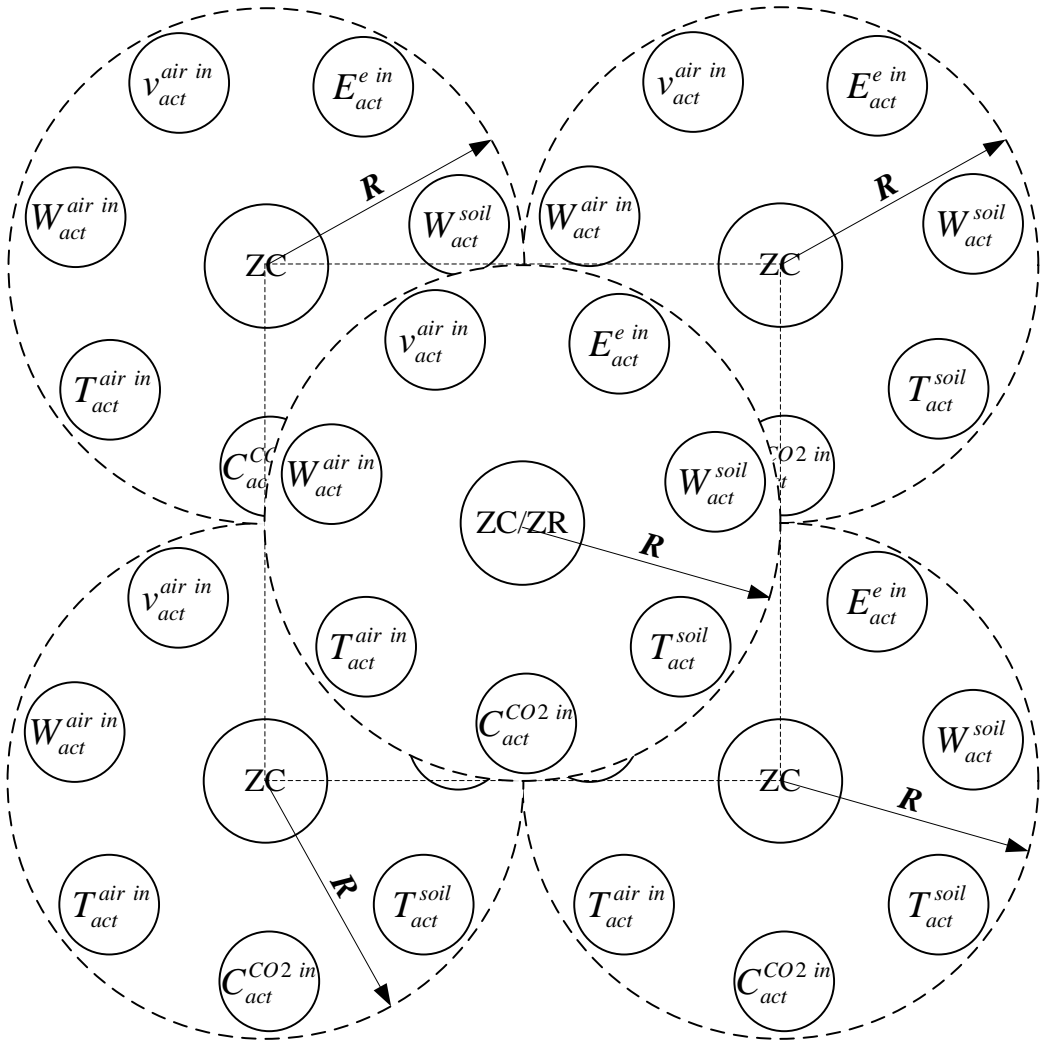


Рис. 20. Фрагмент топології апаратних компонент під час вимірювального моніторингу стану мікроклімату в зоні вирощування

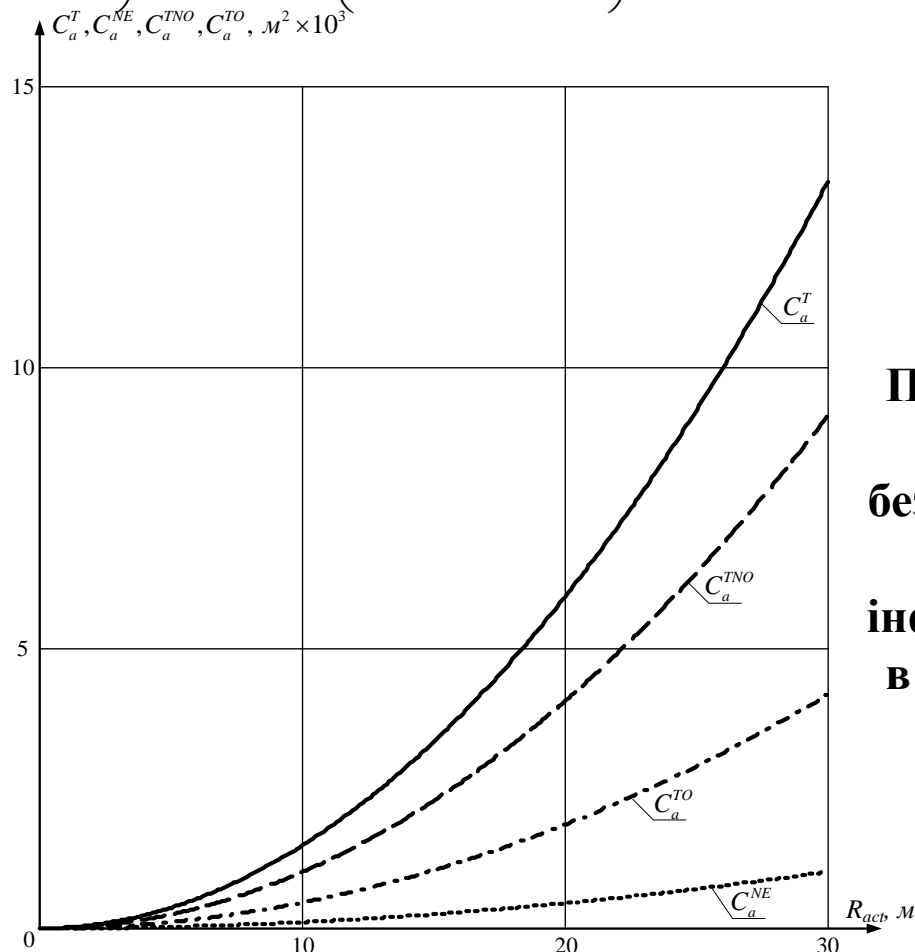
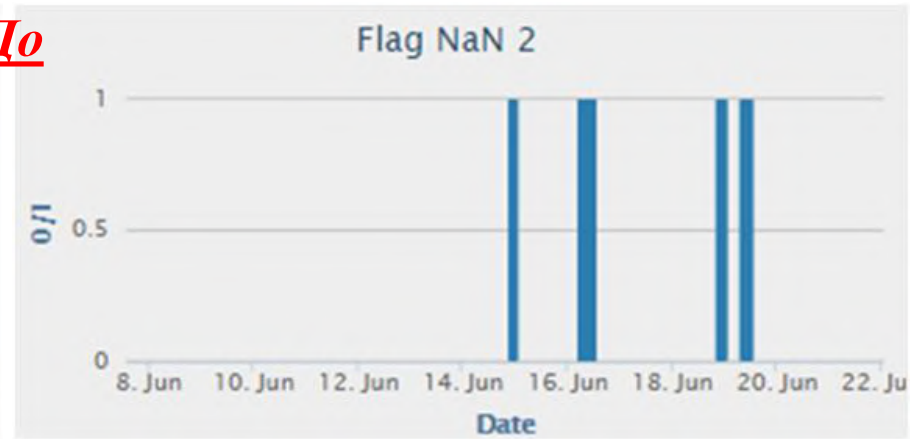
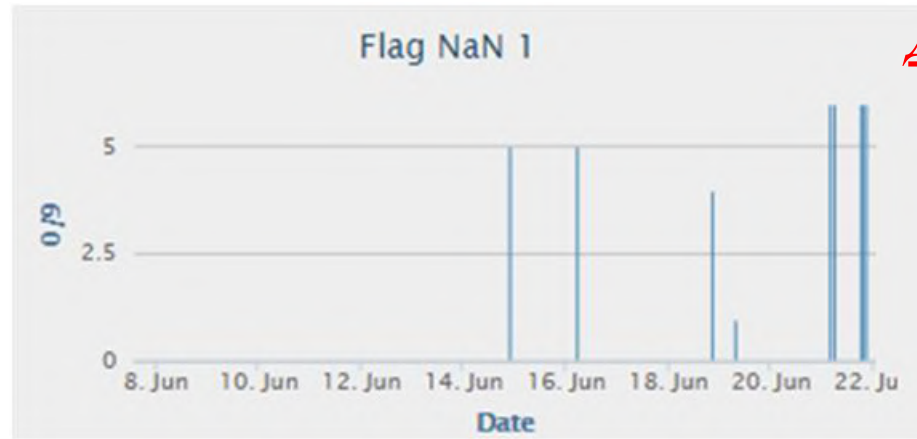
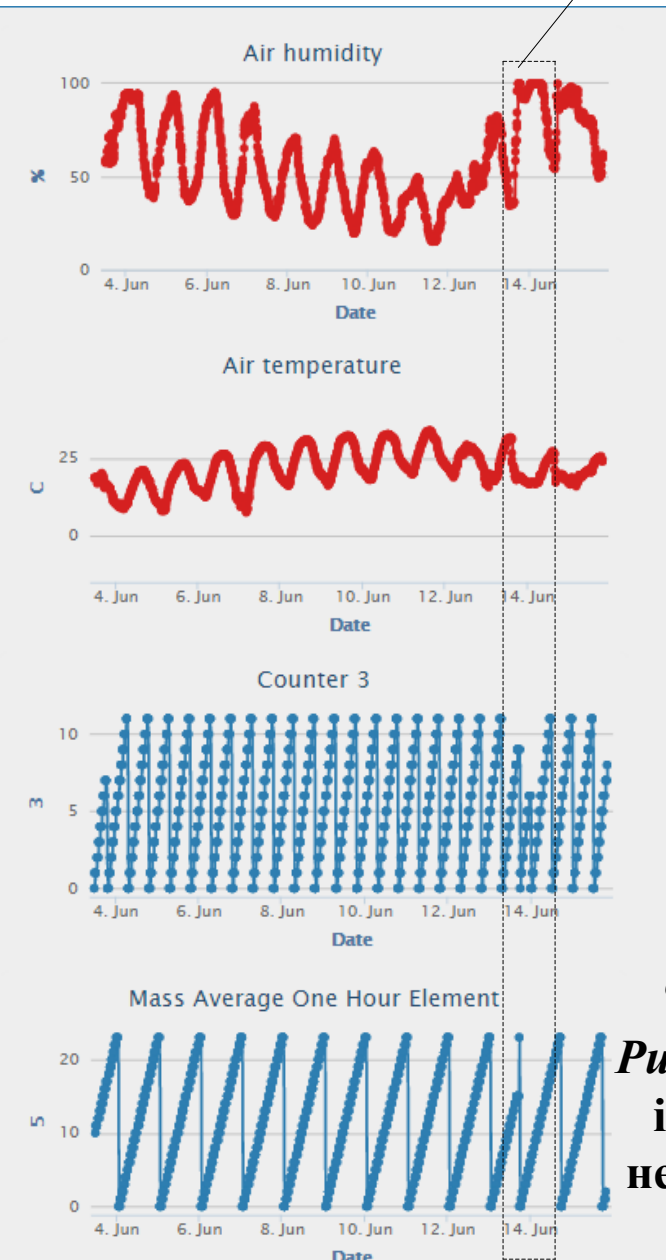


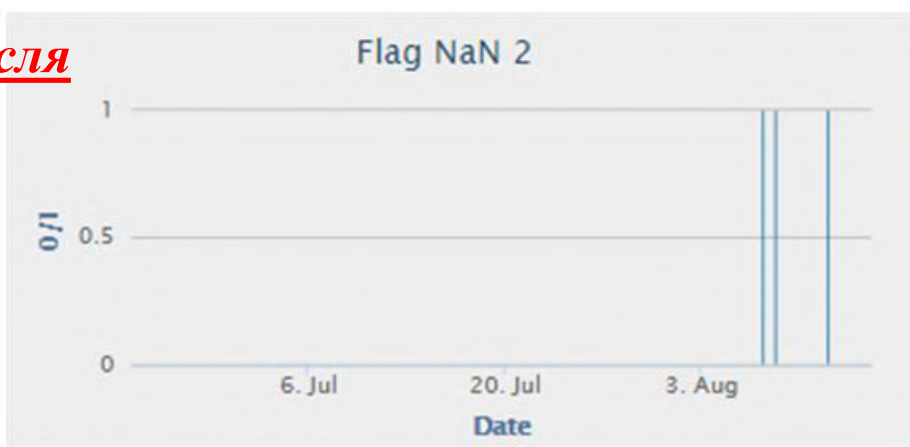
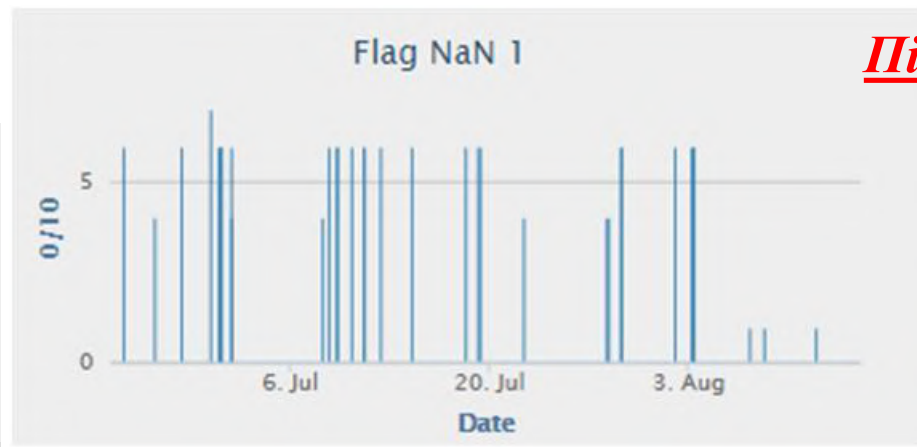
Рис. 21. Показники якості бездротового обміну інформацією в теплицях

момент співпадіння
переривань



До

системні помилки у результатах *спостережень* системні помилки у результатах *вимірювань*



Після

системні помилки у результатах *спостережень* системні помилки у результатах *вимірювань*

Рис. 22. Графічна інтерпретація несправностей у роботі КІВС

Рис. 23. Кількість появ системних помилок (Inf і NaN)



Рис. 24. Загальний вигляд дослідного зразка комп'ютеризованої теплиці

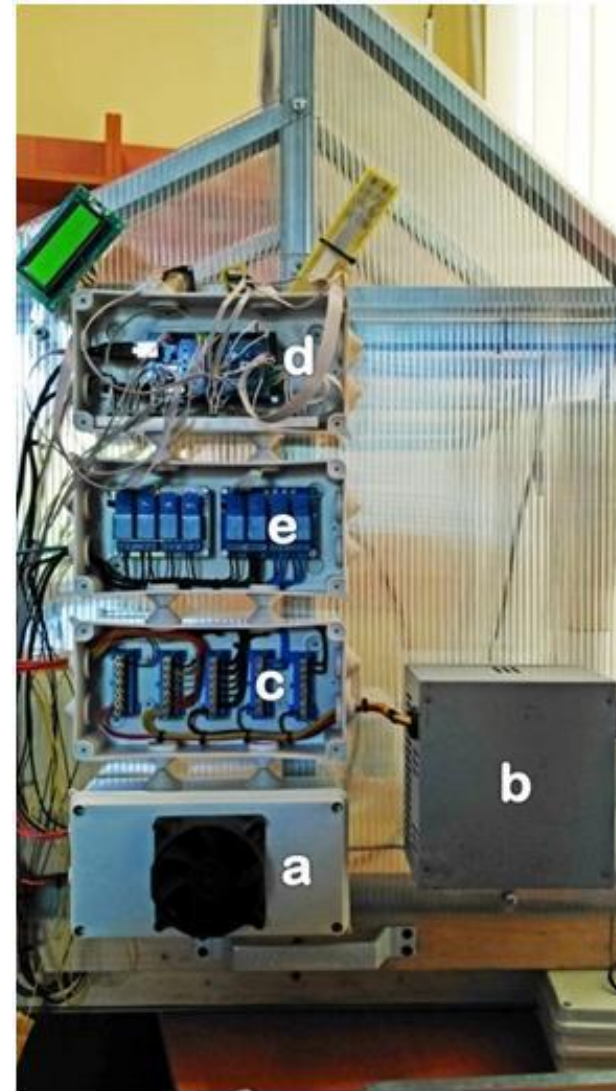


Рис. 25. Електрична частина дослідного зразка



Рис. 26. Блок моніторингу зовнішніх кліматичних параметрів



Дослідний зразок КІВС до виробничих умов Донецької державної сільськогосподарської дослідної станції НААН України під час проведення спільних міждисциплінарних досліджень із розробки агротехнічних прийомів.



Методики градування й калібрування комп'ютеризованих засобів вимірювальної техніки фізичних параметрів, які використано у виробничих умовах ДП «Укрметртестстандарт» і ДП «Донецькстандартметрологія» при вдосконаленні існуючих і розробці нових програм випробувань засобів вимірювальної техніки.



Розробка комплексної програми економічного розвитку сільських територій Донецької області на 2018–2022 роки та стратегії розвитку галузі рослинництва, формуванні заходів із підвищення інвестиційної привабливості та довгострокової стійкості регіональних агропромислових виробництв.



Навчальний процес під час підготовки бакалаврів і магістрів за спеціальностями 141, 151, 152, 171, що дозволило інтегрувати новітні досягнення в галузі комп'ютерних, сенсорних та інфокомунікаційних технологій під час практичної підготовки студентів.



Держ- та госпбюджетні тематики кафедри електронної техніки ДВНЗ «ДонНТУ».

Період публікаційної та апробаційної активності за представленою науковою роботою:
2016 – 2021 роки.

Публікації. Основні результати опубліковано в **50** працях, з яких: **2** монографії; **2** навчальні посібники; **14** статей у виданнях Scopus і WoS; **12** статей у наукових фахових виданнях України; 17 статей у збірниках матеріалів конференцій (1 із них індексована в Scopus та IEEE Xplore, 2 – закордонні); **1** патент України на винахід і 2 патенти України на корисну модель.

Показники цитування: загальна кількість посилань на публікації автора / h-індекс роботи, згідно баз даних складає відповідно: Web of Science – **9/2**, Scopus – **60/5**, Google Scholar – **96/5**.

Апробація: **6** Міжнародних конференцій (2 із них проведені закордоном, 1 – Scopus та IEEE); **9** Всеукраїнських конференцій; Міжнародна виставка науково-технічних розробок **elcomUkraine' 2017** (Київ, 2017); XXXI Міжнародна агропромислова виставка **АГРО-2019** (Київ, 2019); Рада регіонального розвитку Донецької області (Маріуполь, 2019); Гран-прі національного конкурсу **Ukraine Smart Awards – 2020** у номінації «Smart Agro» (Київ, 2020).

У результаті проведених досліджень та практичного їх упровадження в науковій роботі розв'язано важливу науково-прикладну проблему розвитку теорії побудови комп'ютеризованих систем моніторингу інтегрального стану фізичних середовищ завдяки обґрунтуванню структурно-алгоритмічної організації та розробці інформаційно-вимірювального забезпечення агрегації та інтерпретації розподілених вимірювальних даних щодо мікроклімату промислових теплиць. Вагомість результату розв'язання цієї проблеми полягає в розвитку програмно-технічної бази вітчизняних тепличних підприємств, що стимулює позитивну динаміку продовольчої безпеки України завдяки підвищенню інвестиційної привабливості та довгострокової стійкості аграрних підприємств із вирощування овочевих культур на захищених ґрунтах.

Практична значимість

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає в розширенні й поглибленні області впровадження та використання серійних поліфункціональних комп'ютеризованих компонент під час реалізації комплексного комп'ютеризованого моніторингу стану мікроклімату теплиць, що забезпечує можливість підвищення ефективності протікання технологічних процесів вирощування. Закономірності, отримані в результаті досліджень, дозволили розробити методики, структури, апаратні й програмні засоби для створення високоефективних комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних систем моніторингу стану мікроклімату теплиць.