УДК 681.2.083:519.242.7

І.С. Лактіонов (канд. техн. наук, доц.), В.А. Лебедєв,**Г.А. Лактіонова, М.О. Бережний**

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» МОН України,

кафедра електронної техніки, м. Покровськ, Україна

e-mail: ivan.laktionov@donntu.edu.ua; vladyslav.lebediev@donntu.edu.ua;

ganna.laktionova@donntu.edu.ua; Berejnoimax0@gmail.com

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПЛАНУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА
КЕРУВАННЯ ЗВОЛОЖЕННЯМ ТЕПЛИЧНИХ КУЛЬТУР**

Дослідження, які було проведено в наведеній статті присвячено обґрунтуванню плану експериментальних досліджень щодо розробки структурно-алгоритмічних організацій комп'ютеризованих систем адаптивного моніторингу та керування режимами зволоження тепличних культур. Під час досліджень було проаналізовано відомі результати досліджень у предметній області розробки комп'ютеризованих систем неруйнівного моніторингу та керування режимами зволоження культур у тепличних умовах. У статті було обґрунтовано сукупність вимог до технічних і функціональних характеристик комп'ютеризованої системи, що досліджується. Встановлено тип експерименту – ротатбельний план другого порядку та визначено кількість точок експерименту, що дорівнює 25. Обґрунтовано основні положення плану експериментальних досліджень комплексного інтегрального впливу вологості ґрунту й повітря зони вирощування культур з урахуванням дії факторів, що впливають на показники якості вирощування. Запропоновано науково-практичні рішення щодо апаратно-програмної реалізації лабораторного зразка комп'ютеризованої системи неруйнівного моніторингу та керування режимом зволоження тепличних культур.

Ключові слова: вологість, теплиця, план експерименту, апаратно-програмна реалізація, комп'ютеризована система, моніторинг, керування.

DOI: 10.31474/2075-4272-2019-1-32-103-113

Актуальність задачі дослідження. Однією з обов'язкових умов зростання національної економіки є забезпечення достатнього рівня продовольчої безпеки держави. Необхідність забезпечення достатнього обсягу якісних продуктів овочівництва, а також кліматичні й структурно-галузеві особливості розвитку країн та їх окремих регіонів, обумовлюють підвищення уваги до виробництва продуктів рослинництва на закритих ґрунтах. Адже, такий спосіб виробництва овочевої продукції дозволяє забезпечувати населення якісною вітчизняною тепличною продукцією впродовж усього року. В свою чергу, одним із найбільш пріоритетних та інвестиційно-привабливих векторів зростання ефективності функціонування аграрних підприємств овочівництва на захищеному ґрунті є удосконалення технологічних процесів вирощування овочевої та овочево-розсадної продукції шляхом розробки і дослідження з подальшим впровадженням комп'ютеризованих систем комплексного моніторингу та керування мікрокліматом промислових теплиць. Таким чином, обґрунтування вимог до структурно-алгоритмічних організацій комп'ютеризованих систем моніторингу та керування режимами зволоження тепличних культур у складі комплексів автоматизації промислових теплиць є актуальною науково-прикладною задачею.

Аналіз відомих результатів дослідження. Виходячи з аналізу тенденцій попиту на овочеву тепличну продукцію в Україні встановлено, що найбільш популярними для

тепличного вирощування є огірки та помідори. З метою їх якісного вирощування необхідно мати апріорну інформацію щодо технологічних норм зволоження ґрунту й повітря. На підставі аналізу діючих відомчих норм технологічного проектування встановлено рекомендовані діапазони динаміки вологи в ґрунті та повітрі під час вирощування огірків та помідорів у промислових теплицях [1]. Відносна вологість ґрунту та повітря в зоні вирощування: для огірків – вологість ґрунту повинна змінюватись від 50 до 60 %, вологість повітря – від 70 до 90 %; для помідорів – вологість ґрунту повинна змінюватись від 70 до 80 %, вологість повітря – від 60 до 70 %. З урахуванням апріорної інформації щодо регламентованих діапазонів зміни вологості ґрунту й повітря в тепличних умовах авторами проведено аналіз існуючих методів вимірювання вологості [2–4], які наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Методи вимірювання вологості ґрунту

Назва методу	Характеристика методу
Гравіметричний метод	Базується на вилученні води зі зразка шляхом випаровування, вимивання або хімічної реакції.
Нейтронне розсіювання	Вологість визначається опосередковано через середнє значення втрати енергії або термалізація нейтронів під час зіткнення нейтронів з різними атомами.
Метод згасання гамма-випромінювання	Використовується для вимірювання вологості ґрунту в шарі не більше 1–2 см. Ступінь зниження інтенсивності гамма-променів під час їх проходження через ґрунт залежить від складу ґрунту та його щільності.
Електромагнітний метод	Базується на впливі вологості на електромагнітні властивості ґрунту.
Тензіометричний метод	Прилади на базі цього методу здатні фіксувати зміни вологоємності ґрунту, що є наслідком інфільтрації води, поливу, випаровування та транспірації вологи.
Мікрохвильовий метод	Базується на явищі випромінювання тепла поверхнею ґрунту в мікрохвильовому діапазоні.
Ядерно-магнітний резонанс	Базується на здатності під час резонансу виявити концентрацію атомів водню і, відповідно, вологи в ґрунті.
Термічний метод	Базується на зв'язку теплової інерції ґрунту та його вологості.
Рефлектометричний метод	У цьому методі вимірюється час проходження електричного імпульсу вздовж кабелю, який залежить від електропровідності, яка визначається вологістю ґрунту.
Оптичний метод	Базується на тому, що за наявності вологи на поверхні світло, відбите від неї, поляризується
Кондуктометричний метод	Базується на залежності електропровідності ґрунту від вмісту вологи.
Дієлькометричний метод	Базується на залежності діелектричних властивостей ґрунту від вологості.

На підставі аналізу переваг і недоліків методів вимірювання вологості, які наведено в табл. 1, а також із урахуванням техніки вимірювання вологості ґрунту в теплицях, було встановлено, що в основу розроблюваної системи буде покладено дієлькометричний метод.

Серійні сенсори на базі цього методу дозволяють виконувати неруйнівний вимірний контроль показників вологості ґрунту в режимі реального часу. Ємнісні датчики працюють шляхом швидкої зарядки і розрядки позитивного і заземленого електрода в ґрунті, створюючи електромагнітне поле. Після цього встановлюється функціональний зв'язок між ємністю конденсатора та діелектричною проникністю ґрунту, яка залежить від

його відносної вологості. Основним недоліком таких сенсорів є обов'язкова процедура калібрування на місці проведення вимірювань для зменшення похибки вимірювання об'ємного вмісту води в ґрунті [5, 6]. У даній роботі авторами використано типову модель ємнісного сенсору вологості ґрунту [7], який конструктивно та програмно сумісний із бюджетними мікропроцесорними платформами. Зовнішній вигляд сенсору наведено на рис. 1 та його основні технічні характеристики представлено в табл. 2.

Рисунок 1 – Зовнішній вигляд досліджуваного сенсору вологості тепличних ґрунтів

Таблиця 2 – Технічні характеристики досліджуваного сенсору вологості ґрунтів

Параметр	Типове значення
Метод вимірювання вологості	ємнісний
Тип вихідного сигналу	аналоговий
Напруга живлення	від 3,3 до 5,5 В
Вихідна напруга	від 1,2 до 2,5 В
Інтерфейс підключення	РН 2.0–3Р
Геометричні розміри	98x23 мм

На теперішній час значна кількість науковців займаються питаннями дослідження та розробки систем комп'ютеризованого вимірювального контролю вологості тепличних ґрунтів. Так, наприклад, В.С. Vergouw займався дослідження процесів, що протікають у сенсорах вологості в ґрунтового тепличному садівництві [8]. Н.Sharma, М. К. Shukla та R. Steiner вирішували питання порівняльного аналізу різних моделей ємнісних сенсорів та встановлення коефіцієнтів врожайності для трьох вегетативних періодів у тепличних умовах [9]. S. Henderson, D. Gholami та Y. Zheng досліджували взаємозв'язок між зміною мікроклімату та врожайністю тепличних культур [10]. Виходячи з аналізу кількості проведених досліджень на вітчизняному та міжнародному рівні, а також їхнього вектору спрямування авторами встановлено, що недостатня увага приділена дослідженню питань зі встановлення закономірностей інтегрального впливу вологості ґрунту й повітря з обліком дестабілізуючих факторів і параметрів на ефективність вирощування тепличних культур, що призводить до неможливості об'єктивного аналізу принципів адаптації алгоритмів функціонування комп'ютеризованих вимірювальних систем до типів і режимів вегетації вирощуваних культур. Одним із обов'язкових етапів вирішення задачі з усунення даного недоліку є обґрунтування плану експерименту зі встановлення закономірностей впливу динаміки вологи на якість вирощування культур із подальшим регресійним аналізом результатів спостережень.

Мета та задачі досліджень. Прикладна проблема, на вирішення якої спрямовано дослідження статті полягає в обмеженості існуючих результатів досліджень щодо ефективності та інформативності комп'ютеризованих технологій моніторингу та керування режимами зволоження тепличних культур, що обумовлює низьку продуктивність аграрних виробництв України, і як результат, обмежену конкурентоспроможність продукції рослинництва на вітчизняному й світовому ринках.

Мета статті полягає в обґрунтуванні плану експериментальних досліджень щодо розробки структурно-алгоритмічної організації комп'ютеризованої системи адаптивного моніторингу та керування режимами зволоження тепличних культур.

Основні завдання досліджень:

- аналіз відомих результатів досліджень із розробки комп'ютеризованих систем неруйнівного моніторингу та керування режимами зволоження культур у тепличних умовах;
- обґрунтування плану експериментальних досліджень комплексного інтегрального впливу вологості ґрунту й повітря зони вирощування культур з урахуванням впливу дестабілізуючих параметрів і факторів;
- обґрунтування науково-практичних положень щодо апаратно-програмної реалізації й впровадження комп'ютеризованих систем неруйнівного моніторингу та керування режимами зволоження культур на захищених ґрунтах.

Результати досліджень. На підставі результатів досліджень, які отримано авторами в попередніх роботах [5, 6, 11], а також визначеної мети й задач дослідження запропоновано узагальнену функціональну схему процесу експериментальних випробувань розроблюваної системи, яку наведено на рис. 2.

Рисунок 2 – Функціональна схема процесу експериментальних випробувань системи

Складність процесів керування технологічними режимами вирощування овочевих культур у тепличних умовах не дозволяє отримати прості співвідношення для автоматизованого регулювання параметрів мікроклімату. Облік регламентованого переліку фізико-хімічних факторів і взаємозв'язків нелінійних процесів вимагають розробки складних алгоритмів функціонування комп'ютеризованих систем моніторингу та керування. Одним із можливих варіантів розв'язання даної науково-технічної задачі є розробка і використання регресійних моделей під час побудови адаптивних алгоритмів функціонування автоматизованих систем. Прийняті області варіювання параметрів мікроклімату, що підлягають моніторингу під час керування режимом зрошення культур представлено в табл. 3.

Таблиця 3 – Рекомендовані області зміни параметрів мікроклімату

Параметр мікроклімату	Умовне позначення	Діапазони зміни
Температура повітря	T_{air}	18 – 26 °C
Вологість повітря	W_{air}	60 – 90 %
Температура ґрунту	T_{soil}	17 – 24 °C
Вологість ґрунту	W_{soil}	65 – 80 %
Інтенсивність світла в зоні вирощування культур	E_{area}	80 – 160 Вт/м ²

У якості базового алгоритму розрахунку коефіцієнтів моделі використаний ротатбельний план другого порядку. В даному випадку вихідною функцією є нормоване

значення врожайності овочевих тепличних культур [12]. Загальна кількість точок експерименту знаходиться за наступною формулою [13, 14]:

$$N = 2^k + 2k + k_0 = 32 + 10 + 13 = 55, \quad (1)$$

де N – загальна кількість точок експерименту; $k=5$ – кількість факторів, що визначається числом контрольованих параметрів; $2^k=32$ – кількість точок повного факторного експерименту (ядро плану); $2k=10$ – зіркові точки плану; $k_0 = 4k^2/2^k + 2k \approx 13$ – експерименти у центрі плану.

Розрахована за формулою (1) кількість експериментальних точок дозволяє зробити висновок про складність і значну тривалість лабораторних випробувань та подальшої обробки вимірювальної інформації. Отже, шляхом аналізу існуючих результатів експериментальних і теоретичних досліджень в області овочівництва на закритих ґрунтах [1] була встановлена сукупність первинних незалежних параметрів, а саме: T_{soil} , W_{soil} , E_{area} . Це дозволяє зменшити число змінних параметрів у порівнянні з початковим (див. табл. 1) та спростити план експерименту. Решта параметрів під час планування зазначеного вище експерименту є вторинними: $T_{\text{air}}=\varphi(T_{\text{soil}})$, $W_{\text{air}}=\psi(W_{\text{soil}})$. Отже, кількість точок плану експерименту визначається наступним чином:

$$N > 2^k + 2k + k_0 = 8 + 6 + 10,5 = 25.$$

Таким чином, регресійне рівняння залежності врожайності тепличних культур від первинних параметрів мікроклімату за умови ротатбельного плану експериментальних досліджень другого порядку в загальному вигляді є наступним:

$$Y = a_0 + (a_1 T_{\text{soil}} + a_{11} T_{\text{soil}}^2) + (a_2 W_{\text{soil}} + a_{22} W_{\text{soil}}^2) + (a_3 E_{\text{area}} + a_{33} E_{\text{area}}^2) + a_{12} T_{\text{soil}} W_{\text{soil}} + a_{13} T_{\text{soil}} E_{\text{area}} + a_{23} W_{\text{soil}} E_{\text{area}}, \quad (2)$$

де Y – узагальнений показник врожайності тепличних культур; a_i , $a_{i,j}$, $a_{i,i}$ – коефіцієнти регресійної моделі; T_{soil} , W_{soil} , E_{area} – первинні параметри мікроклімату теплиць.

Рівняння (2) складено за умови симетричності матриці коефіцієнтів рівняння $a_{12}=a_{21}$, $a_{13}=a_{31}$, $a_{23}=a_{32}$, що відповідає ротатбельному алгоритму планування.

Отримана матриця планування експерименту в стандартному й натуральному масштабах представлена в табл. 4. Для кожного параметра мікроклімату в табл. 4 встановлено стандартні рівні: 0 – середнє значення з відповідного діапазону варіювання; +1 – максимальне значення діапазону варіювання; -1 – мінімальне значення діапазону варіювання; $\pm 2,38$ – зіркові точки плану.

Для розрахунку значень фізико-хімічних параметрів мікроклімату теплиць у зіркових точках в натуральному масштабі використані наступні формули:

$$\begin{aligned} X_i^{\max} &= +\alpha \cdot \Delta X_i + X_i^0; \\ X_i^{\min} &= X_i^0 - \alpha \cdot \Delta X_i, \end{aligned} \quad (3)$$

де $X_i^{\max}$, $X_i^{\min}$ – максимальне і мінімальне значення $i^{\text{го}}$ вимірюваного параметра в зіркових точках в натуральному (фізичному) масштабі; $\pm \alpha$ – значення зоряного плеча в стандартному

масштабі ($\pm 2,38$); ΔX_i – половина діапазону варіювання $i^{\text{го}}$ параметра; X_i^0 – середнє значення діапазону варіювання його параметра в натуральному масштабі.

Таблиця 4 – Матриця плану експериментальних дослідження впливу

№ з/п	Стандартний масштаб			Натуральний масштаб			Постійна складова	Ефект (Y), кВт/м^2
	T_{soil} , відн. од.	W_{soil} , відн. од.	E_{area} , відн. од.	T_{soil} , °C	W_{soil} , %	E_{area} , Вт/м^2		
1	-1	-1	-1	17	65	80	+1	y_1
2	+1	-1	-1	24	65	80	+1	y_2
3	-1	+1	-1	17	80	80	+1	y_3
4	+1	+1	-1	24	80	80	+1	y_4
5	-1	-1	+1	17	65	160	+1	y_5
6	+1	-1	+1	24	65	160	+1	y_6
7	-1	+1	+1	17	80	160	+1	y_7
8	+1	+1	+1	24	80	160	+1	y_8
9	+2,38	0	0	29	72	120	+1	y_9
10	-2,38	0	0	12	72	120	+1	y_{10}
11	0	+2,38	0	20,5	90	120	+1	y_{11}
12	0	-2,38	0	20,5	55	120	+1	y_{12}
13	0	0	+2,38	20,5	72	215	+1	y_{13}
14	0	0	-2,38	20,5	72	25	+1	y_{14}
15	0	0	0	20,5	72	120	+1	y_{15}
16	0	0	0	20,5	72	120	+1	y_{16}
17	0	0	0	20,5	72	120	+1	y_{17}
18	0	0	0	20,5	72	120	+1	y_{18}
19	0	0	0	20,5	72	120	+1	y_{19}
20	0	0	0	20,5	72	120	+1	y_{20}
21	0	0	0	20,5	72	120	+1	y_{21}
22	0	0	0	20,5	72	120	+1	y_{22}
23	0	0	0	20,5	72	120	+1	y_{20}
24	0	0	0	20,5	72	120	+1	y_{21}
25	0	0	0	20,5	72	120	+1	y_{22}

Таким чином, на підставі матриці плану експериментальних досліджень із подальшим регресійним аналізом результатів спостережень можуть бути отримані коефіцієнти рівняння (2) за формулами [13–15]:

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \frac{A}{N} \left[2\lambda^2 (k+2) \sum_{j=1}^N y_j - 2\lambda c \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N x_{i,j}^2 y_j \right]; \\
 a_i &= \frac{c}{N} \sum_{j=1}^N x_{i,j} y_j; \\
 a_{i,i} &= \frac{A}{N} \left[c^2 ((k+2)\lambda - k) \sum_{j=1}^N x_{i,j}^2 y_j + c^2 (1-\lambda) \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N x_{i,j}^2 y_j - 2\lambda c \sum_{j=1}^N y_j \right]; \\
 a_{i,j} &= \frac{c^2}{N\lambda} \sum_{j=1}^N x_{i,j} x_{1,j} y_j,
 \end{aligned} \tag{4}$$

де N – число дослідів в матриці плану (дорівнює 25); k – кількість незалежних параметрів (дорівнює 3); i – порядковий номер параметра (змінюється від 1 до 3); j – порядковий номер експерименту (змінюється від 1 до 25); y_j – значення функції відгуку (ефекту) у $j^{\text{му}}$ досліді; $x_{i,j}$ – значення $i^{\text{го}}$ фактора в $j^{\text{му}}$ досліді; $x_{1,j}$ – значення $1^{\text{го}}$ фактора в $j^{\text{му}}$ досліді; $\lambda = k \cdot N / ((k+2) \cdot (N - k_0))$, $c = N / \sum_{j=1}^N x_{i,j}^2$, $A = 1 / 2\lambda [(k+2)\lambda - k]$ – допоміжні розрахункові співвідношення.

Отримане рівняння (2) із розрахованими коефіцієнтами (4) є базою програмної компоненти системи моніторингу й керування режимами зволоження тепличних культур. Блок-схему запропонованого алгоритму експериментальних досліджень комп'ютеризованої системи моніторингу й керування параметрами зволоження тепличних культур наведено на рис. 3.

Рисунок 3 – Блок-схема алгоритму експериментальних досліджень системи

Також авторами статті запропоновано структуру експериментальної установки для дослідження динаміки вологи в тепличному ґрунті задля подальшого удосконалення розроблюваної системи моніторингу й керування мікрокліматом теплиць, яку наведено на рис. 4.

Рисунок 4 – Загальна структура лабораторної установки для дослідження динаміки вологи

Запропонований підхід, який покладено в основу розроблюваної структурно-алгоритмічної організації експериментальної установки полягає в паралельному детектуванні вихідних сигналів сенсорів вологості ґрунту на різних глибинах та відстанях від кореневої системи рослин задля оптимізації алгоритмів керування системою крапельного зрошення.

Висновки. У наведеній статті проведено дослідження з обґрунтування плану експериментальних досліджень щодо розробки структурно-алгоритмічних організацій комп'ютеризованих систем адаптивного моніторингу та керування режимами зволоження тепличних культур. Основні результати досліджень полягають в наступному: проаналізовано відомі результати досліджень у предметній області розробки комп'ютеризованих систем неруйнівного моніторингу та керування режимами зволоження культур у тепличних умовах, що дозволило поставити вимоги до технічних і функціональних характеристик розроблюваної системи; обґрунтовано основні положення плану експериментальних досліджень комплексного інтегрального впливу вологості ґрунту й повітря зони вирощування культур з урахуванням дії факторів, що впливають на показники якості вирощування; запропоновано науково-практичні рішення щодо апаратно-програмної реалізації комп'ютеризованої системи неруйнівного моніторингу та керування режимом зволоження тепличних культур.

Перелік використаної літератури

1. ВНТП АПК–19–07. Тепличні і оранжерейні підприємства. Споруди захищеного ґрунту для фермерських (селянських) господарств: Відомчі норми технологічного проектування / М-во аграр. політ. України. – К.: «ХІК», 2007. – 140 с.
2. Платформа для агробізнесу. [Електронний ресурс]: Методи вимірювання вологості ґрунту. – Режим доступу: <https://propozitsiya.com/ua/metody-vymiryuvannya-vologosti-gruntu>. – Назва з титул. екрана.
3. ObservantTM. [Електронний ресурс]: Monitoring Soil Moisture for Optimal Crop Growth. – Режим доступу: <https://observant.zendesk.com/hc/en-us/articles/208067926-Monitoring-Soil-Moisture-for-Optimal-Crop-Growth>. – Назва з титул. екрана.
4. Лактіонов, І.С. Комп'ютеризовані вимірювачі комплексу фізичних параметрів ґрунтів та мікроклімату промислових теплиць: монографія / І.С. Лактіонов, О.В. Вовна, А.А. Зорі. – Покровськ: ДВНЗ «ДонНТУ», 2016. – 212 с.
5. Лактіонов, І.С. Методика та результати лабораторних випробувань комп'ютеризованого вимірювача вологості тепличних ґрунтів / І.С. Лактіонов, О.В. Вовна, В.А. Лебедєв // Вісник ЖДТУ. Сер. Технічні науки. – Житомир, 2018. – № 1 (81). – С. 136 – 143.
6. Лактіонов, І.С. Комп'ютеризована технологія агрегації та обробки результатів градування вимірювача вологості тепличних ґрунтів / І.С. Лактіонов, В.А. Лебедєв // Наук. пр. Донецьк. нац. техн. ун-ту. Сер. Обчислювальна техніка та автоматизація. – Покровськ, 2018. – Вип. 1 (31). – С. 97 – 107.
7. Arduino.ua. [Електронний ресурс]: Ємнісний сенсор вологості ґрунту від DFRobot. – Режим доступу: <https://arduino.ua/prod3255-emkostnii-datchik-vlajnosti-pochvi-ot-dfrobot>. – Назва з титул. екрана.
8. Agricultural and Biological Engineering [Електронний ресурс]: Sensor-based automation of irrigation of Bermudagrass. – Режим доступу: <https://abe.ufl.edu/faculty/mdukes/pdf/publications/SMS/Thesis-B-Cardenas.pdf>. – Назва з титул. екрана.
9. Sharma, H. Soil moisture sensor calibration, actual evapotranspiration, and crop coefficients for drip irrigated greenhouse chile peppers / H. Sharma, M.K. Shukla, P.W. Bosland, R. Steine // Agricultural Water Management. – Amsterdam, 2017. – Vol. 179. – PP. 81 – 91.
10. Henderson, S. Soil Moisture Sensor-based Systems are Suitable for Monitoring and

Controlling Irrigation of Greenhouse Crops / S. Henderson, D. Gholami, Y. Zheng // Journal of the American Society for Horticultural Science. – Virginia, 2018. – Vol. 53 (4). PP. 552 – 559.

11. Laktionov, I.S. Planning of remote experimental research on effects of greenhouse microclimate parameters on vegetable crop-producing / I.S. Laktionov, O.V. Vovna, A.A. Zori // International Journal On Smart Sensing and Intelligent Systems. – Palmerston North, 2017. – Vol. 10 (4). – PP. 845 – 862.

12. Terleev, V.V. The structure of the information providing a model for the agricultural structures production process / V.V. Terleev, R.A. Polouektov, B.I. Bakalenko // Agrophysics. – St. Petersburg, 2012. – Vol. 2 (6). – PP. 29 – 36.

13. Гатапова, Н.Ц. Основы теории и техники физического моделирования и эксперимента: учебное пособие / Н.Ц. Гатапова, А.Н. Колиух, Н.В. Орлова, А.Ю. Орлов. – Тамбов: ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. – 77 с.

14. Мухачев, В.А. Планирование и обработка результатов эксперимента: учебное пособие / В.А. Мухачев. – Томск: ТУСУР, 2007. – 118 с.

15. Coruh, S. Statistical evaluation and optimization of factors affecting the leaching performance of copper flotation waste / S. Coruh, S. Elevli, F. Geyikci // Scientific World Journal. – London, 2012 – Vol. 18. – PP. 1–8.

References

1. Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine (2007), VNTP APK–19–07. *Teplychni i oranzhereyni pidpryyemstva. Sporudy zakhyschenoho gruntu dlya fermers'kykh (selyans'kykh) hospodarstv: Vidomchi normy tekhnolohichnoho proektuvannya* [VNTP APK–19–07. Greenhouse and orangery companies. Protected soil structures for farming (rural) farms: Standards for technological designing], Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine, Kiev, Ukraine.

2. Platforma dlya agrobiznesu (2019). Electronic Resources: finding resources by subject [online], Retrieved from: <https://propozitsiya.com/ua/metody-vymiryuvannya-vologosti-gruntu> (Accessed 05 Sept. 2019).

3. ObservantTM (2019). Electronic Resources: finding resources by subject [online], Retrieved from: <https://observant.zendesk.com/hc/en-us/articles/208067926-Monitoring-Soil-Moisture-for-Optimal-Crop-Growth> (Accessed 09 Sept. 2019).

4. Laktionov, I.S., Vovna O.V. and Zori A.A. (2016), *Komp'yuteryzovani vymiryuvachi kompleksu fizychnykh parametriv gruntiv ta mikroklimatu promyslovykh teplyts': monohrafiya* [The computerized meters of the physical parameters complex of the industrial greenhouses soils and microclimate: a monograph], SHEE «DonNTU», Pokrovs'k, Ukraine.

5. Laktionov, I.S., Vovna O.V., Lebediev V.A. (2018), «Technique and results of laboratory research of greenhouse soils' moisture computerized meter», *The Journal of Zhytomyr State Technological University. Series: Engineering*, no. 1 (81), pp. 136–143.

6. Laktionov, I.S., Lebediev, V.A. (2018), «Computerized technology of aggregation and processing of the humidity meter calibration results for the greenhouse soils», *Nauk. pr. DonNTU. Ser.: «Obchyslyval'na tekhnika ta avtomatyzatsiya»*, no. 1 (31)' 2018, pp. 97 – 107.

7. Arduino.ua (2019). Electronic Resources: finding resources by subject [online], Retrieved from: <https://arduino.ua/prod3255-emkostnii-datchik-vlajnosti-pochvi-ot-dfrobot> (Accessed 11 Sept. 2019).

8. Agricultural and Biological Engineering (2019). Electronic Resources: finding resources by subject [online], Retrieved from: <https://abe.ufl.edu/faculty/mdukes/pdf/publications/SMS/Thesis-B-Cardenas.pdf> (Accessed 07 Sept 2019).

9. Sharma, H., Shukla, M.K., Bosland, P.W., Steine, R. (2017), «Soil moisture sensor calibration, actual evapotranspiration, and crop coefficients for drip irrigated greenhouse chile peppers», *Agricultural Water Management*, vol. 179. pp. 81 – 91.

10. Henderson, S., Gholami, D., Zheng, Y. (2018), «Soil Moisture Sensor-based Systems are Suitable for Monitoring and Controlling Irrigation of Greenhouse Crops», *Journal of the American Society for Horticultural Science*, vol. 53 (4), pp. 552 – 559.
11. Laktionov, I.S., Vovna, O.V., Zori, A.A. (2017), «Planning of remote experimental research on effects of greenhouse microclimate parameters on vegetable crop-producing», *International Journal On Smart Sensing and Intelligent Systems*, vol. 10 (4), pp. 845 – 862.
12. Terleev, V.V., Polouektov, R.A., Bakalenko, B.I. (2012), «The structure of the information providing a model for the agricultural structures production process», *Agrophysics*, vol. 2 (6), pp. 29 – 36.
13. Gatapova, N.Ts., Koliuh, A.N., Orlova, N.V., Orlov, A.Yu. (2014). *Osnovy teorii i tekhniki fizicheskogo modelirovaniya i eksperimenta: uchebnoe posobie* [Basis of the theory and technique of physical modeling and experiment: training manual], FGBOU VPO «TGTU», Tambov, RF.
14. Muhachev, V.A. (2007). *Planirovanie i obrabotka rezultatov eksperimenta: uchebnoe posobie* [Planning and processing of experimental results: tutorial], TUSUR, Tomsk, Russian Federation.
15. Coruh, S., Eleveli, S., Geyikci, F. (2012), «Statistical evaluation and optimization of factors affecting the leaching performance of copper flotation waste», *Sc. World Journal*, vol. 18, pp. 1–8.

И.С. Лактионов, В.А. Лебедев, А.А. Лактионова, М.О. Бережной
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

Обоснование плана экспериментальных исследований компьютеризированной системы мониторинга и управление увлажнением тепличных культур. Проведенные исследования в данной статье посвящены обоснованию плана экспериментальных исследований по разработке структурно-алгоритмической организации компьютеризированных систем адаптивного мониторинга и управления режимами увлажнения тепличных культур. При проведении исследований были проанализированы известные результаты в предметной области разработки компьютеризированных систем неразрушающего мониторинга и управления режимами увлажнения культур в тепличных условиях. В статье была обоснована совокупность требований к техническим и функциональным характеристикам исследуемой компьютеризированной системы. Установлен тип эксперимента – ротатбельный план второго порядка и определено количество точек эксперимента, которое равно 25. Обоснованы основные положения плана экспериментальных исследований комплексного интегрального воздействия влажности почвы и воздуха зоны выращивания культур с учетом действия факторов, влияющих на показатели качества выращивания. Предложена совокупность научно-практических решений по аппаратно-программной реализации компьютеризированной системы неразрушающего мониторинга и управления режимом увлажнения тепличных культур.

Ключевые слова: влажность, теплица, план эксперимента, аппаратно-программная реализация, компьютеризированная система, мониторинг, управление.

I.S. Laktionov, V.A. Lebediev, H.A. Laktionova, M.O. Berezhnyi
SHEI "Donetsk National Technical University"

Rationale of the experimental research plan for a computerized monitoring and control system of greenhouse crop moistening. The article studies are devoted to the rationale of the experimental research plan. This plan applies intended for the development of the structural and algorithmic organization of the computerized systems for adaptive monitoring and control of greenhouse crops humidification regimes. In conducting research the known results have been analyzed in the subject area of computerized systems development for non-destructive monitoring and control of crop humidification regimes in greenhouse conditions. The set of requirements for technical and functional characteristics investigated computerized system has been justified in this article. The

use of the second order rotatable plan has been justified. The number of experiment points was calculated. This amount is 25. There was offered a hardware component architecture of the monitoring and control computerized system of humidification regimes in greenhouse conditions. The main provisions of the experimental research plan for the integrated effect of soil and air humidity in the crop growing zone have been substantiated. These provisions take into account the effects of factors, which affecting on the quality indicators of cultivation process. The set of scientific and practical solutions for hardware and software implementation of the computerized system of non-destructive monitoring and control of humidification regime for greenhouse crops has been proposed. Trends of priority research on efficiency improvement of commercial greenhouse complexes have been substantiated.

Keywords: humidity, greenhouse, experimental plan, hardware and software implementation, computerized system, monitoring, control.

Лактіонов Іван Сергійович, Україна, закінчив ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електронної техніки ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Донецька обл., 85301, Україна).

Основний напрямок наукової діяльності – прогресивні технології з підвищення ефективності комп’ютеризованих вимірювачів фізико-хімічних параметрів мікроклімату штучних екосистем.

Лебедєв Владислав Андрійович, Україна, закінчив ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», асистент кафедри електронної техніки ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Донецька обл., 85301, Україна).

Основний напрямок наукової діяльності – методи та засоби контролю параметрів мікроклімату промислових теплиць; мікропроцесорні технології.

Лактіонова Ганна Анатоліївна, Україна, закінчила ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», асистент кафедри електронної техніки ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Донецька обл., 85301, Україна).

Основний напрямок наукової діяльності – методи та засоби побудови комп’ютеризованих систем моніторингу та керування технологічними процесами.

Бережний Максим Олегович, Україна, студент бакалавріату кафедри електронної техніки ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Донецька обл., 85301, Україна).

Основний напрямок наукової діяльності – розробка та дослідження адаптивних засобів контролю параметрів мікроклімату промислових теплиць на базі нечіткої логіки.