

УДК 631.2 : 658.2

## **ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПОДАЧЕЮ ЖИВИЛЬНОГО РОЗЧИНУ В ТЕПЛИЦЯХ**

*О. Ю. Синявський, кандидат технічних наук, доцент*

*В. В. Савченко, кандидат технічних наук, доцент*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*e-mail vit1986@ua.fm*

**Анотація.** Метою дослідження була оптимізація системи автоматичного керування подачею живильного розчину в теплицях. Розроблена система передбачає автоматичне регулювання вологості мінеральної вати шляхом подачі в теплицю за сигналами НВЧ-вологоміра живильного розчину. Встановлено, що найдоцільнішим є релейно-імпульсний закон регулювання. З використанням визначених передатних функцій окремих елементів системи розроблена функціонально-алгоритмічна схема систем автоматичного регулювання вологості мінеральної вати і проведені їх дослідження. Показником якості за оптимізації системи автоматичного регулювання було прийняте сумарне квадратичне відхилення, що дало можливість визначити тривалість імпульсу регулятора. У результаті проведених досліджень системи автоматичного керування подачею живильного розчину в теплицях встановлено, що відхилення вологості мінеральної вати від заданого значення не перевищує 5 %, що відповідає агротехнічним вимогам.

**Ключові слова:** *теплиця, живильний розчин, мінеральна вата, вологість, система керування, оптимізація*

**Актуальність.** Нині у зимових теплицях широко застосовують виробництво овочів на малооб'ємній гідропоніці, коли на одну рослину приходиться 5-15 л субстрату.

Поливання рослин живильним розчином проводять через автоматичну краплинну систему зрошення. Подача води або живильного розчину виконується безпосередньо до кореневої зони в заданій кількості, що, оптимізуючи водно-

повітряний та режим мінерального живлення, скорочує на 20-30 % витрати води і добрив, зменшує захворюваність рослин і підвищує врожайність на 8-17 % [1].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Поливання рослин найчастіше здійснюють за заданою агроном програмою залежно від інтенсивності сонячної радіації. При програмному керуванні тривалість поливання становить від 3 до 15 хв, всього циклу – 30 хв, паузи між циклами – 3 хв. Система поливання вмикається від 5 до 20 разів на день [2]. При застосуванні малооб'ємної гідропоніки із системою краплинного поливання втрати мінеральних добрив і води складають не менше 25 %.

У зв'язку з цим виникла необхідність у розробці обладнання, яке здійснює автоматичне підтримання вологості мінеральної вати на оптимальному рівні.

**Мета дослідження** – оптимізація системи автоматичного регулювання вологості мінеральної вати.

**Матеріали і методи дослідження.** Функціональна схема системи автоматичного регулювання вологості мінеральної вати наведена на рис. 1.

Система працює в автоматичному режимі – за сигналами первинного перетворювача вологості субстрату 1, які поступають в регулятор 2, що керує виконавчими механізмами 4 і 5, та за часовою програмою від автомата поливання 3 (КJ).

Для створення алгоритмічної структурної схеми системи автоматичного регулювання необхідно виконати математичний опис кожної її ланки.

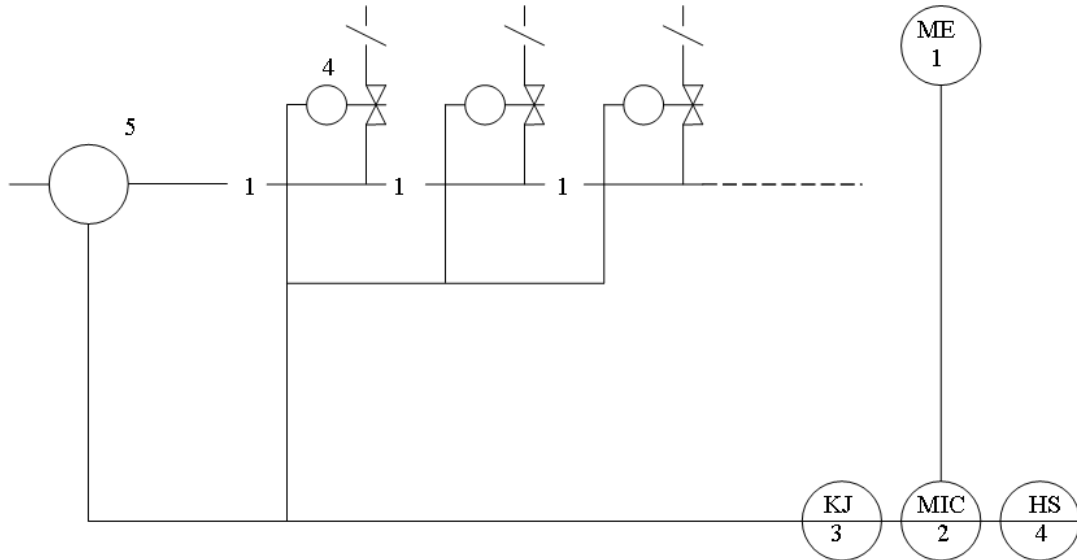
Передатна функція мінеральної вати як об'єкта керування має вигляд [3]:

$$W_o(p) = \frac{2,57 \cdot 10^5}{1050 p + 1} e^{-210p}. \quad (1)$$

Для вимірювання вологості субстрату вибраний НВЧ-вологомір мінеральної вати конструкції ІМЕСГ, передатна функція якого

$$W_{mn}(p) = K_{mn}, \quad (2)$$

де  $K_{m1}$  – коефіцієнт передачі,  $K_{m1} = 2\text{мВ}/\%$ .



**Рис. 1. Функціональна схема системи автоматичного регулювання вологості мінеральної вати**

Виконавчим механізмом виступає насос з електромагнітним вентиляем. Оскільки час чистого запізнювання об'єкта керування на порядок вище сталих часу виконавчих механізмів, то останніми можна знехтувати. Тоді передатна функція виконавчого механізму

$$W_{вм}(p) = K_{вм}, \quad (3)$$

де  $K_{вм}$  – коефіцієнт передачі, який складає  $5.12 \cdot 10^{-7}$  л/(с·В).

Оскільки для об'єкта керування відношення  $\tau/T < 0,2$ , то найдоцільнішим є позиційне регулювання. При виборі закону регулювання необхідно враховувати, що за краплинного зрошення вся площа теплиць розділена на секції, які послідовно підживлюються живильним розчином. Тому, виходячи із динамічних властивостей об'єкта керування з урахуванням існуючої технології подачі

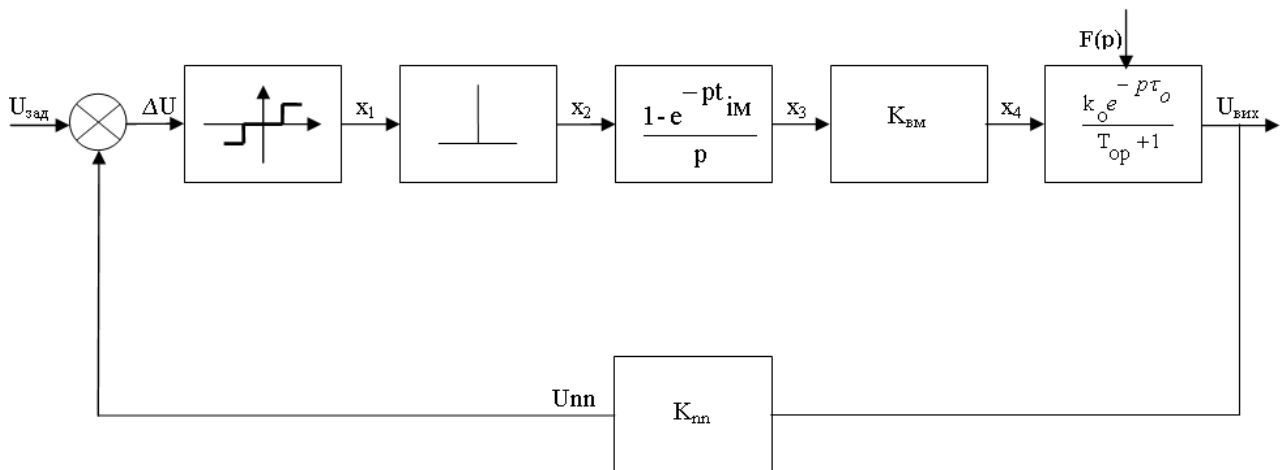
живильного розчину в теплиці, найдоцільнішим є релейно-імпульсний закон регулювання.

Релейно-імпульсний регулятор можна представити у вигляді послідовно з'єднаних нелінійного елемента, найпростішого елемента та формуючого кола. Передатна функція формуючого кола за прямокутної форми імпульсів має вигляд:

$$W_{\phi}(p) = \frac{1 - e^{-pt_{im}}}{p}, \quad (4)$$

де  $t_{im}$  – тривалість імпульсу.

Структурно-алгоритмічна схема системи автоматичного регулювання вологості мінеральної вати показана на рис. 2.



**Рис.2. Структурно-алгоритмічна схема системи автоматичного регулювання вологості субстрату**

Ця система є нелінійною і дискретною, характеризується наявністю запізнювальних ланок. Для її аналізу необхідно користуватися теорією нелінійних імпульсних систем автоматичного регулювання [4].

Рівняння системи автоматичного регулювання вологості субстрату складається із:

рівняння нелінійного елемента

$$x_1(t) = \begin{cases} U & \text{за } |x(t)| > \gamma \\ 0 & \text{за } |x(t)| < \gamma \end{cases}, \quad (5)$$

де  $\gamma$  – зона нечутливості регулятора;

найпростішого імпульсного елемента

$$x_2(t) = \delta(t) = \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \delta(t - mT), \quad (6)$$

де  $T$  – інтервал квантування за часом;

формуючого кола

$$x_3(t) = \begin{cases} 1; & 0 \leq t \leq t_{im} \\ 0; & t_{im} \leq t < \infty \end{cases}; \quad (7)$$

об'єкта керування з виконавчим механізмом

$$y_{вих} = K_{вм} K_o (1 - e^{-t-\tau/T_0}). \quad (8)$$

Використовуючи рівняння (6), (7), (8) можна одержати рівняння відносно вихідної величини в дискретні моменти часу  $t = mT$ :

$$y_{вих}(mT) = \sum_{m=0}^{\infty} K_{вм} K_o (m - m_{\tau}) U(1 - e^{-t_{im}/T_0}), \quad (9)$$

де  $m_{\tau} = [\tau/T]$ .

За показник якості при оптимізації системи автоматичного регулювання вологості субстрату приймаємо сумарне квадратичне відхилення

$$I = \sum_{m=0}^{\infty} (y - y_3)^2 \quad (10)$$

за обмеження

$$|y_y - y_3| \leq \Delta, \quad (11)$$

де  $y_3$  – задане значення вихідної величини;  $y_y$  – усталене значення вихідної величини;  $\Delta$  – допустима похибка регулювання.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Використовуючи рівняння (9), знаходимо:

$$I = \sum_{m=0}^{m_3} (y - y_3)^2 + \sum_{m=m_3}^{m_y} (y - y_3)^2 + \sum_{m=m_y}^{\infty} \Delta^2. \quad (12)$$

Перша складова виразу (12) обумовлена впливом на об'єкт керування збурень, останні – похибкою, яка виникає в системі керування. Тому необхідно розглядати дві останні складові в рівнянні (12).

Другу складову виразу (12) можна записати у вигляді:

$$\sum_{m=m_3}^{m_y} (y - y_3)^2 = \sum_{m=m_3}^{m_y} (y - y_y \pm \Delta)^2. \quad (13)$$

Тоді

$$I = \sum_{m=m_3}^{m_y} (y - y_y \pm \Delta)^2 + \sum_{m=m_y}^{\infty} \Delta^2. \quad (14)$$

Використовуючи вираз (9), отримаємо:

$$I = \sum_{m=m_3}^{m_y} (K_{\text{ВМ}} K_o (m - m_y) U (1 - e^{-t_{\text{ім}}/\Gamma_o}) \pm \Delta)^2 + \sum_{m=m_y}^{\infty} \Delta^2, \quad (15)$$

Умову мінімуму показника оптимальності отримаємо прирівнюванням частинної похідної до нуля:

$$\frac{\partial I}{\partial t_{\text{ім}}} = \sum_{m=m_3}^{m_y} \frac{2}{\Gamma_o} (K_{\text{ВМ}} K_o (m - m_y) U e^{-t_{\text{ім}}/\Gamma_o} (K_o K_{\text{ВМ}} (m - m_y) U (1 - e^{-t_{\text{ім}}/\Gamma_o}) \pm \Delta) = 0, \quad (16)$$

Враховуючи, що у системі із запізненням

$$m_y = m_3 + m_{\tau}, \quad (17)$$

маємо

$$\frac{\partial I}{\partial t_{\text{ім}}} = \frac{2}{\Gamma_o} m_{\tau} K_{\text{ВМ}} K_o U e^{-t_{\text{ім}}/\Gamma_o} (m_{\tau} K_o K_{\text{ВМ}} U (1 - e^{-t_{\text{ім}}/\Gamma_o}) \pm \Delta), \quad (18)$$

Звідси знаходимо формулу для визначення тривалості імпульсу:

$$t_{iM} = -T_0 \ln\left(1 \mp \frac{\Delta}{m_{\tau} K_{\text{вМ}} K_o U}\right). \quad (19)$$

За формулою (19) була визначена тривалість імпульсу для системи автоматичного регулювання вологості мінеральної вати

$$t_{iM} = -1054 \ln\left(1 \pm \frac{5}{5.12 \cdot 10^{-7} \cdot 2.57 \cdot 10^5 \cdot 380}\right) = 111 \text{ с.}$$

Інтервал квантування за часом визначається як

$$T = a t_{iM}, \quad (20)$$

де  $a$  – кількість секцій в теплиці.

Для теплиці площею 1 га  $a = 6$  і

$$T = 6 \cdot 111 = 666 \text{ с.}$$

Були проведені дослідження стійкості системи автоматичного регулювання вологості субстрату.

Передатна функція лінійної частини

$$W_{\Sigma}(p) = \frac{K_{\Sigma}}{p(T_o p + 1)} (1 - e^{-pt_{iM}}) e^{-p\tau_o}, \quad (21)$$

де  $K_{\Sigma} = K_o K_{\text{вМ}}$

Виконавши  $D$ -перетворення, отримуємо дискретну функцію лінійної частини [5]:

$$W^x(p) = \frac{K_{\Sigma} e^{pT} (1 - e^{-T/T_o}) (1 - e^{-pt_{iM}}) e^{-p\tau_o}}{(e^{pT} - 1)(e^{pT} - e^{-T/T_o})}. \quad (22)$$

Замінивши  $p$  на  $j\omega$ , отримуємо амплітудно-фазну характеристику лінійної частини системи:

$$W^x(j\omega) = \frac{K_{\Sigma} e^{j\omega T} (1 - e^{-T/T_o}) (1 - e^{-j\omega t_{iM}}) e^{-j\omega \tau_o}}{(e^{j\omega T} - 1)(e^{j\omega T} - e^{-T/T_o})}, \quad (23)$$

або

$$W^*(j\omega) = \operatorname{Re}^*(j\omega) + j \operatorname{Im}^*(j\omega). \quad (24)$$

Виконавши відповідні перетворення, з виразу (23) отримаємо:

$$\operatorname{Re}^*(j\omega) = \frac{A}{B}, \quad (25)$$

де

$$A = K \sum (1 - e^{-T/T_0})(\cos \omega(T + \tau) - (1 + e^{-T/T_0}) + e^{-T/T_0} \cos \omega(T - \tau) - \cos \omega(t_{iM} + \tau + T) + (1 + e^{-T/T_0}) \cos \omega(t_{iM} + \tau) - e^{-T/T_0} \cos \omega(t_{iM} + \tau - T)); \quad (26)$$

$$B = 2(1 - \cos \omega T)(1 + e^{-2T/T_0} - 2e^{-T/T_0} \cos \omega T); \quad (27)$$

$$\operatorname{Im}^*(j\omega) = \frac{C}{B}, \quad (28)$$

де

$$C = K \sum (1 - e^{-T/T_0})(-\sin \omega(T + \tau) + (1 + e^{-T/T_0}) \sin \omega \tau + e^{-T/T_0} \sin \omega(T - \tau) + \sin \omega(t_{iM} + \tau + T) - (1 + e^{-T/T_0}) \sin \omega(t_{iM} + \tau) + e^{-T/T_0} \sin \omega(t_{iM} + \tau - T)); \quad (29)$$

Підставивши в отримані вирази значення відповідних параметрів, отримали амплітудно-фазову частотну характеристика лінійної частини системи, яка наведена на рис. 3.

Коефіцієнт статичної лінеаризації знаходиться в межах

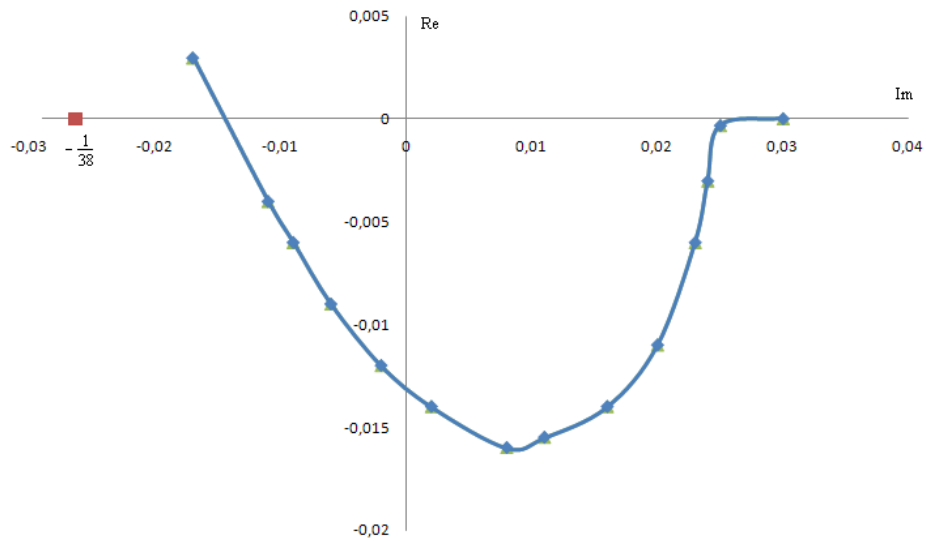
$$0 \leq K_c \leq \frac{U}{\gamma}, \quad (30)$$

де  $\gamma$  – зона нечутливості регулятора, яка визначається за формулою:

$$\gamma = K_m \Delta. \quad (31)$$

Для регулятора вологості субстрату  $\gamma = 2 \cdot 5 = 10$  мВ, а максимальне значення коефіцієнта статичної лінеаризації 38 В/мВ.





**Рис. 3. Дослідження стійкості системи автоматичного регулювання вологості мінеральної вати**

На дійсній осі АФЧХ відмічена точка з координатами  $(-1/K_{с \text{ макс}}; j0)$ . Як випливає із наведеного графіка, виконується умова абсолютної стійкості нелінійної імпульсної системи при розрахованих параметрах налагодження регулятора.

**Висновки і перспективи.** У результаті проведених досліджень системи автоматичного керування подачею живильного розчину в теплицях встановлено, що відхилення вологості мінеральної вати від заданого значення не перевищує 5 %, що відповідає агротехнічним вимогам.

Отримані залежності, які дають можливість визначити параметри налагодження релейно-імпульсного регулятора для статичного об'єкта першого порядку із запізненням, можуть використовуватися для широкого класу статичних об'єктів, оскільки їх передатні функції в більшості випадків апроксимуються аперіодичною першого порядку і запізнювальною ланками.

### Список використаних джерел

1. Тепличное овощеводство на малообъемной гидропонике / [Х. Симитчиев, В. Каназирска, К. Милиев, П. Джуров]; пер. с болг. – М.: Агропромиздат, 1985. – 136 с.
2. Пилюгина В. В. Автоматическое управление подачей питательного раствора в теплице на малообъемной гидропонике / В. В. Пилюгина, Ю. Г. Шейнгин, Б. В. Захаров // Науч. – техн. бюлл. по электр. с. х-ва ВИЭСХ. – 1986. – Вып. 1 (56). – С. 33-38.
3. Синявський О. Ю. Автоматичне керування мінеральним живленням рослин у гідропонних теплицях / О. Ю. Синявський, В. В. Савченко. – К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2016. – 249 с.
4. Цыпкин Я. З. Основы теории автоматических систем / Я. З. Цыпкин. – М.: Наука, 1977. – 560 с.
5. Иващенко Н. Н. Автоматическое регулирование / Н. Н. Иващенко. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.

### References

1. Simitchiyev, Kh, Kanazirska, V., Miliyev, K., Dzhurov, P. (1985). Teplichnoye ovoshchevodstvo na maloob'yemnoy gidroponike [Greenhouse vegetable growing on low-volume hydroponics]. Moscow: Agropromizdat, 136.
2. Pilyugina, V. V., Sheyngin, Yu. G., Zakharov, B. V. (1986). Avtomaticheskoye upravleniye podachey pitatel'nogo rastvora v teplitse na maloob'yemnoy gidroponike [Automatic control of the supply of nutrient solution in the greenhouse on low-volume hydroponics]. Nauch. – tekhn. byull. po elektr. s. kh-va VIESKH, 1 (56), 33-38.
3. Syniavskiy, O. Yu, Savchenko, V. V. (2016). Avtomatychne keruvania mineralnym zhyvlenniam roslyn u hidroponnykh teplytsiakh [Automatic control for mineral nutrition of plants in hydroponic greenhouses]. Kyiv: KOMPRYNT, 249 .
4. Tsyppkin, Y. Z. (1977). Osnovy teorii avtomaticheskikh sistem [Fundamentals of the theory of automatic systems]. Moscow: Nauka, 560.
5. Ivashchenko, N. N. (1978). Avtomaticheskoye regulirovaniye [Automatic control]. – Moscow: Mashinostroyeniye, 736 .

## ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ПИТАТЕЛЬНЫМ РАСТВОРЕ В ТЕПЛИЦЕ

*А. Ю. Синявский, В. В. Савченко*

**Аннотация.** *Целью исследования была оптимизация системы автоматического управления подачей питательного раствора в теплицах. Разработанная система предусматривает автоматическое регулирование влажности минеральной ваты путем подачи в теплицу по сигналам СВЧ-влажмера питательного раствора. Установлено, что наиболее целесообразным*

является релейно-импульсный закон регулирования. С использованием передаточных функций отдельных элементов системы разработана функционально-алгоритмическая схема системы автоматического регулирования влажности минеральной ваты и проведены ее исследования. Показателем качества при оптимизации системы автоматического регулирования было принято суммарное квадратичное отклонение, что позволило определить длительность импульса регулятора. В результате проведенных исследований системы автоматического управления подачей питательного раствора в теплицах установлено, что отклонение влажности минеральной ваты от заданного значения не превышает 5%, что соответствует агротехническим требованиям.

**Ключевые слова:** теплица, питательный раствор, минеральная вата, влажность, система управления, оптимизация

## **OPTIMIZATION OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR NUTRIENT SOLUTION SUPPLY IN THE GREENHOUSE**

*A. Sinyavsky, V. Savchenko*

**Abstract.** *The aim of the study was to optimize the automatic control system for nutrient solution supply in greenhouses. The developed system provides for automatic regulation of the moisture content of mineral wool by supplying a nutrient solution to the greenhouse according to the signals of the microwave moisture meter. It is established that the most expedient is the relay-pulse regulation law. With the use of transfer functions of individual elements of the system, a functional-algorithmic scheme of the system for automatic regulation of moisture in mineral wool has been developed and its studies have been carried out. The quality index in the optimization of the automatic control system was taken as the total quadratic deviation, which made it possible to determine the pulse width of the regulator. As a result of the carried out researches of the automatic control system for nutrient solution supply in the greenhouses, it was established that the deviation of the moisture content of the mineral wool from the set value does not exceed 5 %, which corresponds to the agrotechnical requirements.*

**Key words:** *greenhouse, nutrient solution, mineral wool, humidity, control system, optimization*