

УДК 631.2 : 658.2

**ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ  
АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ КИСЛОТНОСТІ ТА КОНЦЕНТРАЦІЇ  
ЖИВИЛЬНОГО РОЗЧИНУ  
В ГІДРОПОННИХ 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](mailto:vit1986@ua.fm)*

**Анотація.** Метою дослідження була оптимізація системи автоматичного регулювання параметрів живильного розчину в гідропонних теплицях. Розроблена система передбачає автоматичне регулювання кислотності живильного розчину шляхом подачі у змішувальний резервуар за сигналами промислового рН-метра кислоти та концентрації розчину шляхом подачі за сигналами кондуктометра концентрованих розчинів мінеральних добрив. Встановлено, що найдоцільнішим є релейно-імпульсний закон регулювання. З використанням визначених передатних функцій окремих елементів системи розроблена функціонально-алгоритмічна схема систем автоматичного регулювання кислотності та концентрації живильного розчину і проведені їх дослідження. Показником якості за оптимізації системи автоматичного регулювання було прийняте сумарне квадратичне відхилення, що дало можливість визначити тривалість імпульсу регулятора. Інтервал квантування за часом регулятора визначений за умови забезпечення стійкості системи. У результаті проведених досліджень систем автоматичного керування кислотності і концентрації живильного розчину в гідропонних теплицях встановлено, що відхилення кислотності живильного розчину від заданого значення не перевищує 0,2 од. рН, а його питомої електропровідності – 0,02 См/м, що відповідає агротехнічним вимогам.

**Ключові слова:** *гідропонна теплиця, живильний розчин, кислотність, концентрація розчину, система керування, оптимізація*

**Актуальність.** Нині у зимових теплицях широко застосовують гідропонний метод вирощування рослин, який дає можливість отримувати високі та стабільні врожаї за низької собівартості продукції.

При гідропонному вирощуванні рослин всі необхідні мінеральні речовини рослини отримують із живильного розчину, тому кислотність (рН) та загальну концентрацію живильного розчину необхідно підтримувати на оптимальному рівні протягом всього періоду вегетації.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Нині у гідропонних теплицях з багаторазовим використанням живильного розчину коригування його складу проводять на основі хімічних аналізів, які виконуються агрохімічною лабораторією. Це не дозволяє здійснювати безперервний контроль за зміною параметрів живильного розчину і своєчасно здійснювати його коригування, оскільки за період між аналізами рН розчину змінюється на 0,7-0,8 одиниць, а концентрація мінеральних елементів на 60-90 % [1], хоча відхилення концентрації окремого елемента на 30 % від оптимального його значення викликає порушення поглинання рослинами інших елементів, що призводить до зниження врожайності та якості продукції.

У зв'язку з цим виникла необхідність у розробці обладнання, яке здійснює автоматичний контроль та підтримання кислотності і загальної концентрації живильного розчину на оптимальному рівні.

**Мета дослідження** – оптимізація системи автоматичного регулювання кислотності та концентрації живильного розчину.

**Матеріали і методи дослідження.** Кислотність живильного розчину в змішувальному резервуарі регулюються шляхом подачі насосом-дозатором за сигналом рН-метра кислоти, а концентрація живильного розчину – шляхом подачі насосами-дозаторами добрив за сигналом кондуктометричного концентратоміра концентрованих розчинів мінеральних добрив [2].

Для створення алгоритмічної структури схеми системи автоматичного регулювання необхідно виконати математичний опис кожної її ланки і знайти їх передатні функції.

У зв'язку з тим, що час чистого запізнювання об'єкта управління на декілька порядків вище сталих часу первинних перетворювачів, то останніми можна знехтувати [3]. Тоді передатні функції первинних перетворювачів

$$W_{nn}(p) = K_{nn}, \quad (1)$$

де  $K_{nn}$  – коефіцієнт передачі, який для рН-метра становить 20 мВ/од.рН, кондуктометра –  $10 \text{ мВ} \cdot \text{См}^{-1} \cdot \text{м}$  [2].

Аналогічно можна знехтувати сталими часу виконавчих механізмів, а їх передатну функцію апроксимувати безінерційною ланкою

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

де  $K_{\epsilon m}$  – коефіцієнт передачі, який для насоса-дозатора кислоти становить  $1,26 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{В} \cdot \text{с}$ ; для насосів-дозаторів добрив –  $4,04 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{В} \cdot \text{с}$  [2].

Тоді передатна функція об'єкта керування спільного з виконавчим механізмом та первинним перетворювачем має вигляд:

$$W(p) = \frac{K_{\epsilon m} K_{oy} K_{nn}}{p} e^{-p\tau}, \quad (3)$$

де  $K_{oy}$  – коефіцієнт передачі об'єкта керування, який за каналом регулювання концентрації становить для огірків  $0,147 \text{ См} \cdot \text{м}^{-4}$ , томатів –  $0,167 \text{ См} \cdot \text{м}^{-4}$ , а за каналом регулювання рН –  $-6,5 \text{ од. рН} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $\tau$  – час запізнення, який за каналом регулювання концентрації становить 1284 с, а за каналом регулювання рН – 528 с [2].

Оскільки об'єкт керування характеризується великим часом запізнення, а також необхідністю окремої подачі компонентів живильного розчину у встановленій послідовності: кислота, концентровані розчини А і Б, вода, найприйнятнішим є імпульсний закон регулювання.

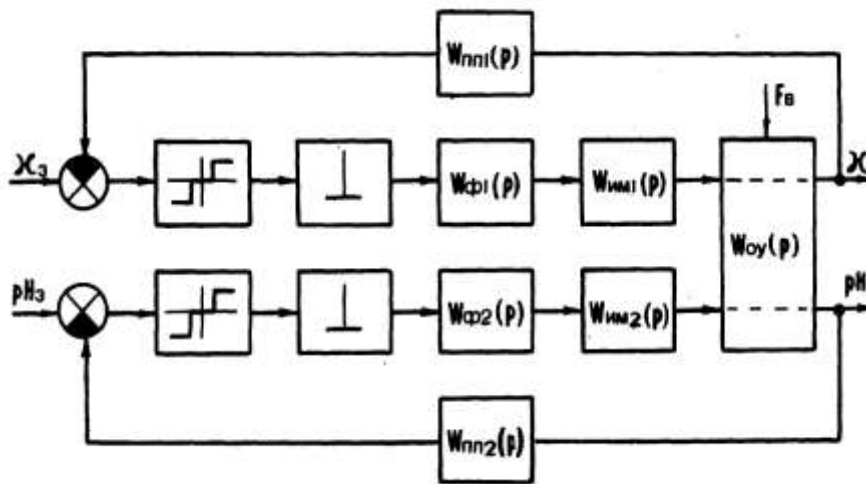
Імпульсні регулятори створюються на базі позиційних з додаванням імпульсних переривників. Релейно-імпульсний регулятор є послідовно з'єднаними нелінійним елементом, найпростішим імпульсним елементом та

формулюючи коло. Передатна функція формуючого кола за прямокутної форми імпульсів має вигляд:

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

де  $s$  – тривалість імпульсу.

Таким чином, використовуючи одержані передатні функції елементів системи автоматичного регулювання кислотності і концентрації живильного розчину, розробили алгоритмічну схему вказаних систем, яка наведена на рис. 1.



**Рис. 1. Функціонально-алгоритмічна схема системи автоматичного регулювання параметрів живильного розчину**

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

Рівняння нелінійних імпульсних систем, алгоритмічна схема яких наведена на рис. 1, складається із:

- рівняння нелінійного елемента:

$$X_1(t) = \begin{cases} U \text{ при } |x(t)| > \gamma \\ 0 \text{ при } |x(t)| \leq \gamma \end{cases}, \quad (5)$$

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

$$X_3(t) = \begin{cases} 1; 0 \leq t < S \\ 0; S \leq t < \infty \end{cases} \quad (7)$$

- об'єкта керування з виконавчим механізмом

$$y_{вих}(t) = K_{\epsilon m} K_{oy}(t - \tau) \quad (8)$$

та умови замикання

$$x(t) = x_3(t) - K_{nn} y_{вих}(t). \quad (9)$$

На основі рівнянь (5), (6), (7) отримуємо рівняння відносно вихідної величини за  $|x(t)| > \gamma$ :

$$y_{вих}(t) = \frac{K_{\epsilon m} K_{oy} U(t - \tau - n(T - s)) \text{ при } nT + \tau \leq t \leq nT + \tau + s}{K_{\epsilon m} K_{oy} U s(n + 1) \text{ при } nT + \tau + s \leq t \leq (n + 1)T + \tau}, \quad (10)$$

де  $n = \left\lfloor \frac{t - \tau}{T} \right\rfloor$ .

Підставивши (10) у рівняння (9), отримаємо рівняння відносно похибки:

$$X(t) = \frac{X_3(t) - K_{\Sigma} U(t - \tau - n(T - s)) \text{ при } nT + \tau \leq t \leq nT + \tau + s}{X_3(t) - K_{\Sigma} U s(n + 1) \text{ при } nT + \tau + s \leq t \leq (n + 1)T + \tau}, \quad (11)$$

де  $K_{\Sigma} = K_{\epsilon m} K_{oy} K_{nn}$ .

Замінивши в рівняннях (10) і (11)  $t$  на  $mT$ , отримаємо рівняння, яке характеризує стан системи в дискретні моменти часу  $t = mT$ :

$$y_{вих}(mT) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} K_{\epsilon m} K_{oy} (m - m_{\tau}) s U, \quad (12)$$

або

$$X(mT) = X_3(mT) - \sum_{m=-\infty}^{\infty} K_{\Sigma}(m - m_{\tau})sU. \quad (13)$$

Кислотність і концентрація живильного розчину повинні підтримуватися на рівні, визначеному агротехнічними вимогами. Тому показником якості за оптимізації системи автоматичного регулювання кислотності і концентрації живильного розчину приймаємо сумарне квадратичне відхилення:

$$I = \sum_{m=0}^{\infty} (y - y_3)^2 \quad (14)$$

при обмеженні

$$|y - y_3| \leq \Delta, \quad (15)$$

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

**Результати досліджень.** Використовуючи рівняння (13), знаходимо сумарне квадратичне відхилення:

$$I = \sum_{m=m_3}^{m_2} (y - y_3)^2 + \sum_{m=m_3}^{m_y} (y - y_3)^2 + \sum_{m=m_y}^{\infty} \Delta^2. \quad (16)$$

Перша складова обумовлена дією на об'єкт керування зовнішніх збурень, останні – похибкою, яка виникає в системі регулювання. Тому необхідно розглядати дві останні складові:

$$I = \sum_{m=m_3}^{\infty} (y - y_3)^2 + \sum_{m=m_y}^{\infty} \Delta^2. \quad (17)$$

Першу складову цього рівняння можна записати у вигляді

$$\sum_{m=m_3}^{m_y} (y - y_3)^2 = \sum_{m=m_3}^{m_y} (y - y_y \pm \Delta^2)^2. \quad (18)$$

Тоді

$$I = \sum_{m=m_3}^{m_y} (y - y_y \pm \Delta^2)^2 + \sum_{m=m_y}^{\infty} \Delta^2. \quad (19)$$

Використовуючи вираз (13), отримаємо

$$I = \sum_{m=m_3}^{m_y} (n - m_y) \bar{K}_{BM} K_{OK} U_S \pm \Delta + \sum_{m=m_3}^{\infty} \Delta^2. \quad (20)$$

Як випливає з виразу (14), показник оптимальності  $I$  є функцією параметра  $s$ . Умову його мінімуму отримаємо, коли

$$\frac{\partial I(s)}{\partial s} = 0. \quad (21)$$

Частинна похідна

$$\frac{\partial I}{\partial s} = \sum_{m=m_3}^{m_y} (n - m_y) \bar{K}_{BM} K_{OK} U_S \pm \Delta. \quad (22)$$

Враховуючи, що в системі із запізненням

$$m_y = m_3 + m_\tau, \quad (23)$$

отримаємо

$$\frac{\partial I}{\partial s} = m_\tau^2 K_{BM} K_{OK} U_S \mp \Delta. \quad (24)$$

Прирівнявши вираз (24) до нуля і розв'язавши його, знаходимо формулу для визначення тривалості імпульсу:

$$S = \pm \frac{\Delta}{K_{\epsilon m} K_{oy} U m_\tau}. \quad (25)$$

Коли  $m_\tau=1$

$$S = \pm \frac{\Delta}{K_{\epsilon m} K_{oy} U}. \quad (26)$$

За формулою (26) були визначені значення тривалості імпульсів регуляторів для системи автоматичного регулювання кислотності та концентрації живильного розчину при вирощуванні огірків та помідорів, які відповідно становлять 111 с, 153 с і 135 с.

Інтервал квантування за часом визначимо за умови забезпечення абсолютної стійкості системи.

Передатна функція лінійної частини:

$$W_l(p) = W_{\epsilon m}(p) W_{oy}(p) W_{nn}(p) W_\phi(p) \quad (27)$$

або

$$W_n(p) = \frac{K_\Sigma}{p^2} (1 - e^{-ps}) e^{-p\tau}. \quad (28)$$

Дискретну передатну функцію лінійної частини одержуємо з передатної функції неперервної частини шляхом  $D$ -перетворення:

$$W^*(p) = D W(p) \doteq D \left\{ \frac{K_\Sigma}{p^2} (1 - e^{-ps}) e^{-p\tau} \right\}. \quad (29)$$

Якщо винести за знак  $D$ -перетворення функції  $(1 - e^{-ps})$  і  $e^{-p\tau}$ , користуючись таблицею відповідності [5] для функції

$$D \left\{ \frac{K_\Sigma}{p^2} \right\} = \frac{K_\Sigma T e^{pT}}{(e^{pT} - 1)^2}, \quad (30)$$

отримаємо

$$W^*(p) = \frac{K_\Sigma T e^{p(T-\tau)}}{(e^{pT} - 1)^2} - \frac{K_\Sigma T e^{p(T-\tau-S)}}{(e^{pT} - 1)^2}. \quad (31)$$

Замінивши у виразі (31)  $p$  на  $j\omega$ , отримаємо амплітудно-фазову частотну характеристику лінійної частини:

$$W^*(j\omega) = \frac{K_\Sigma T e^{j\omega(T-\tau)}}{(e^{j\omega T} - 1)^2} - \frac{K_\Sigma T e^{j\omega(T-\tau-S)}}{(e^{j\omega T} - 1)^2}, \quad (32)$$

або

$$W^*(j\omega) = \text{Re}^*(\omega) + j \text{Im}^*(\omega), \quad (33)$$

де

$$\text{Re}^*(\omega) = \frac{K_\Sigma T}{\cos \omega T - 1} \sin \omega \left( \tau + \frac{S}{2} \right) \sin \omega \frac{S}{2}; \quad (34)$$

$$\text{Im}^*(\omega) = \frac{K_\Sigma T}{\cos \omega T - 1} \sin \omega \frac{S}{2} \cos \omega \left( \tau + \frac{S}{2} \right). \quad (35)$$

Коефіцієнт статичної лінеаризації нелінійного елемента  $K_c$  визначається за формулою:



$$K_c = \frac{U}{x}. \quad (36)$$

Максимальне значення він має тоді, коли  $x=\gamma$ .

Зону нечутливості регулятора визначають за формулою:

$$\gamma = K_{mn}\Delta, \quad (37)$$

де  $\Delta$  – допустима статична похибка регулювання.

Для регулятора кислотності розчину зона нечутливості становить 4 мВ, а концентрації – 2 мВ.

Звідси випливає, що коефіцієнт статичної лінеаризації знаходиться у межах

$$0 \leq K_c \leq \frac{U}{\gamma}. \quad (38)$$

Коефіцієнт динамічної лінеаризації дорівнює нулю.

Умова абсолютної стійкості системи записується у вигляді нерівності

$$Re^*(\omega) > -\frac{1}{K_{c\max}} \quad (39)$$

при  $Im^*(\omega) = 0$  і  $0 \leq \omega \leq \frac{\omega_0}{2}$ ,

де  $\omega_0$  – частота квантування за часом. Вона визначається за формулою:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}. \quad (40)$$

Для знаходження частоти  $\omega_0$  прирівнюємо вираз (35) до нуля:

$$\frac{K_\Sigma T}{\cos \omega T - 1} \sin \omega \frac{S}{2} \cos \omega \left( \tau + \frac{S}{2} \right) = 0. \quad (41)$$

Звідси

$$\omega_0 = \frac{\pi}{2\tau + s}. \quad (42)$$

Підставивши у вираз (34) значення частоти  $\omega_0$ , отримаємо

$$\frac{K_{\Sigma} T}{\cos \frac{\pi T}{2\tau + s} - 1} \sin \frac{\pi s}{2(2\tau + s)} + \frac{1}{K_{c \max}} > 0. \quad (43)$$

Як впливає із рівняння (36)

$$\Delta = K_{\text{вм}} K_{\text{оу}} U s. \quad (44)$$

Звідси з урахуванням виразу (37)

$$K_{c \max} = \frac{1}{K_{\Sigma} s}. \quad (45)$$

Підставивши вираз (45) у (43), після перетворень отримаємо:

$$\frac{K_{\Sigma} T \sin \frac{\pi s}{2(2\tau + s)} + K_{\Sigma} s \left( \cos \frac{\pi T}{2\tau + s} - 1 \right)}{\cos \frac{\pi T}{2\tau + s} - 1} > 0. \quad (46)$$

Оскільки знаменник менший за нуль, для виконання нерівності (46) необхідно, щоб

$$\frac{T}{s} \sin \frac{\pi s}{2(2\tau + s)} + \cos \frac{\pi T}{2\tau + s} - 1 \leq 0. \quad (47)$$

Розв'язки нелінійної нерівності (47) будуть визначати область значень  $T$ , при яких зберігається умова абсолютної стійкості системи (рис. 2).

Виходячи зі значень часу запізнення  $\tau$ , а також тривалості імпульсу  $s$  за нерівністю (47) розраховували значення інтервалів квантування за часом. Вони становлять для каналу регулювання кислотності 410,1–1376,2 с, для каналу регулювання концентрації при вирощуванні огірків 959,1–3205,1 с і томатів 958,1–3183,4 с.

Інтервал квантування за часом визначали, виходячи із необхідності окремої подачі кислоти, концентрованих розчинів добрив і води, одночасного регулювання параметрів живильного розчину у двох резервуарах та з урахуванням часу, необхідного для пуску та зупинки виконавчих механізмів:

$$T_p = 2(2s_y + s_k + s_e + t_{\text{вм}}), \quad (48)$$

де  $s_y$  – тривалість імпульсів подачі концентрованих розчинів добрив;  $s_k$  – тривалість імпульсу подачі кислоти;  $s_B$  – тривалість подачі води;  $t_{BM}$  – час, необхідний для пуску та зупинки виконавчих механізмів,  $t_{BM} = 60$  с.

Приймаємо значення інтервалу квантування за часом 1140 с, яке лежить у межах визначеної області стійкості параметра.

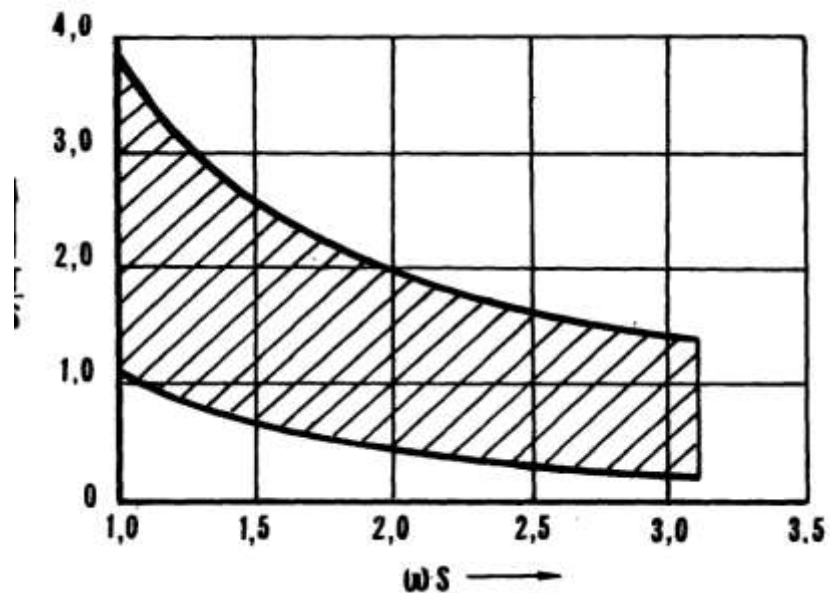
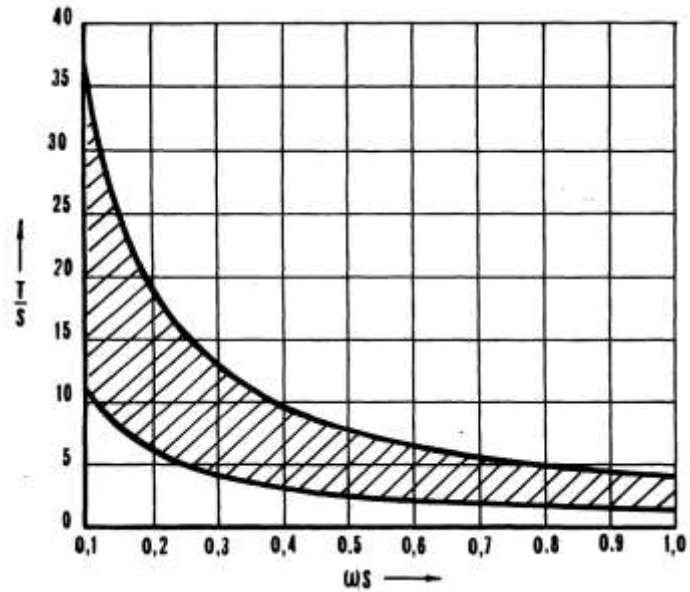


Рис. 2. Области стійкості астатичного об'єкта першого порядку із запізненням

Амплітудно-фазні частотні характеристики лінійної частини в інтервалі частоти від 0 до  $\omega_0/2$  для систем автоматичного регулювання кислотності та концентрації живильного розчину наведені на рис. 3. Як випливає з цих характеристик, системи автоматичного керування параметрів живильного розчину мають абсолютну стійкість.

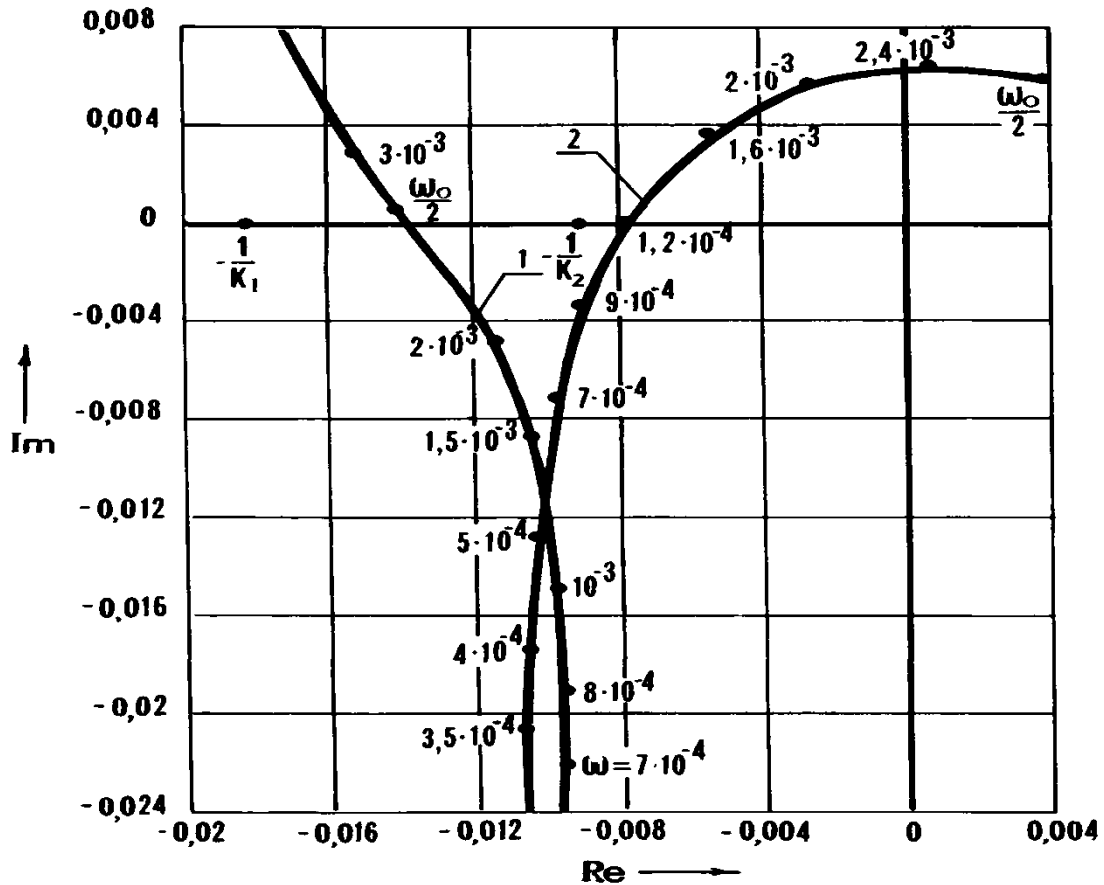


Рис. 3. Визначення стійкості систем автоматичного регулювання кислотності (1) та концентрації (2) живильного розчину

### Висновки

У результаті проведених досліджень систем автоматичного керування кислотності і концентрації живильного розчину в гідропонних теплицях встановлено, що відхилення кислотності живильного розчину від заданого

значення не перевищує 0,2 од. рН, а його питомої електропровідності – 0,02 См/м, що відповідає агротехнічним вимогам.

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

### **Список літератури**

1. Выращивание овощей в гидропонных теплицах / Под ред. Д. Д. Крылова. – К.: Урожай, 1977. – 128 с.
2. Синявський О. Ю. Автоматичне керування мінеральним живленням рослин у гідропонних теплицах / О. Ю. Синявський, В. В. Савченко. – К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2016. – 249 с.
3. Бесекаерский В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекаерский, Е. П. Попов. – М.: Наука, 1975. – 768 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. Krylov, D.S. ed. (1977). Vyrashchivaniye ovoshchey v gidroponnykh teplitsakh [Cultivation of vegetables in hydroponic greenhouses]. Kyiv, Urozhay, 128.
2. Syniavskiy, O. Yu, Savchenko, V. V. (2016). Avtomatychnе керuvania mineralnym zhyvlenniam roslын u hidroponnykh teplytsiakh [Automatic control for mineral nutrition of plants in hydroponic greenhouses]. Kyiv, KOMPRYNT, 249 .
3. Besekerskiy, V. A., Popov, E. P.(1975). Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya.[Theory of automatic control systems]. Moskow: Nauka, 768.
4. Tsypkin, Y.. Z. (1977). Osnovy teorii avtomaticheskikh sistem [Fundamentals of the theory of automatic systems]. Moskow: Nauka, 560.
5. Ivashchenko, N. N. (1978). Avtomaticheskoye regulirovaniye [Automatic control]. – Moskow: Mashinostroyeniye, 736 .

## ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КИСЛОТНОСТИ И КОНЦЕНТРАЦИИ ПИТАТЕЛЬНОГО РАСТВОРА В ГИДРОПОННЫХ ТЕПЛИЦАХ

*А. Ю. Синявский, В. В. Савченко*

**Аннотация.** Целью исследования была оптимизация системы автоматического регулирования параметров питательного раствора в гидропонных теплицах. Разработанная система предусматривает автоматическое регулирование кислотности питательного раствора путем подачи в смесительный резервуар по сигналам промышленного рН-метра кислоты и концентрации раствора путем подачи по сигналам кондуктометра концентрированных растворов минеральных удобрений. Установлено, что наиболее целесообразным является релейно-импульсный закон регулирования. С использованием полученных передаточных функций отдельных элементов системы разработана функционально-алгоритмическая схема систем автоматического регулирования кислотности и концентрации питательного раствора и проведены их исследования. Показателем качества при оптимизации системы автоматического регулирования было принято суммарное квадратичное отклонение, что позволило определить длительность импульса регулятора. Интервал квантования по времени регулятора определен при условии обеспечения устойчивости системы. В результате проведенных исследований систем автоматического управления кислотности и концентрации питательного раствора в гидропонных теплицах установлено, что отклонения кислотности питательного раствора от заданного значения не превышает 0,2 ед. рН, а его удельной электропроводности - 0,02 См / м, что соответствует агротехническим требованиям.

**Ключевые слова:** гидропонная теплица, питательный раствор, кислотность, концентрация раствора, система управления, оптимизация

## AUTOMATIC CONTROL OPTIMIZATION OF ACIDITY AND CONCENTRATION OF NUTRIENT SOLUTION IN HYDROPONIC GREENHOUSES

*A. Sinyavsky, V. Savchenko*

**Abstract.** The aim of the study was to optimize the automatic control system of nutrient solution in hydroponic greenhouses. The system provides automatic control of pH by feeding nutrient solution in a mixing tank for signals of industrial pH-meter and the concentration of acid solution by feeding the signals of conductivity meters concentrated solutions of mineral fertilizers. Established that is most appropriate impulse relay-law regulation. Using the specified transfer functions of individual system elements developed functional and algorithmic scheme of automatic control of

*acidity and concentration of nutrient solution and conducted their investigation. Quality score optimization of the automatic adjustment was made total deviation, which made it possible to determine the pulse width controller. Quantization interval time controller determined by the condition of stability of the system. As a result of the research of automatic control of pH and concentration of the nutrient solution in hydroponic greenhouses found that acidity nutrient solution deviation from the set value does not exceed 0.2 units pH, and its conductivity - 0.02 S/m, which corresponds to agrotechnical requirements.*

**Key words:** *hydroponic greenhouse, nutrient solution, pH, solution concentration, control system, optimization*