

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 681.5

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.294-304>**О.І. Кепко**, доц., канд. техн. наук, **І.О. Лісовий**, доц., канд. техн. наук,**О.Ю. Ковальчук**, доц., канд. техн. наук*Уманський національний університет садівництва, Умань, Україна**e-mail: piop@udau.edu.ua*

Структурно-логічна схема автоматичної системи управління замкнутою системою опалення та вентиляції теплиць

В процесі проектування автоматичної системи управління замкнутою системою опалення та вентиляції теплиць з регенерацією повітря було обґрунтовано та розроблено структурно-логічну схему управління, яка передбачає управління технологічними параметрами (температурою, вологістю, концентрацією CO₂, освітленістю). Структурно-логічна схема була створена на основі технологічної карти вирощування гливи звичайної з урахуванням зміни температури, вологості, концентрації CO₂ та освітленості у функції часу.

замкнута система вентиляції, регенерація повітря, структурно-логічна схема, вирощування грибів

Постановка проблеми. Інтерес до автоматизації теплиць зараз досяг значного рівня. Впровадження цифрових технологій в аграрне виробництво дозволило запровадити нові технології, технічну інформацію та зручність управління, зробивши рослинництво керованим на основі таких технологій [1].

Характер і тривалість перехідних процесів в теплицях при великих обсягах виробництва [2, 3] вимагає моделювання цих процесів для оцінки об'єкта на будь-якій ділянці перехідного процесу [4, 5]. Це питання особливо актуальне для замкнутих систем вентиляції, через їх складність.

Точності і надійності автоматичного управління при наявності систематичної і випадкової похибки покладають на дослідника відповідальну задачу, а їх оцінка проводиться з використанням методів теорії ймовірностей і математичної статистики [6].

Сучасні промислові штами гриба глива розроблялися з метою отримання найвищих врожаїв плодової маси при найменших витратах на їх виробництво.

Як це часто буває, штучно створені сорти пред'являють більш жорсткі вимоги в технології вирощування, ніж їх "дикі предки". Тому створення і підтримування мікроклімату на високому рівні є вимогою обов'язковою [7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розглянемо типову технологію вирощування гливи. Найчастіше гливу вирощують на субстраті з соломи злакових культур або з відходів кукурудзи, які подрібнюють до частинок 2–4 см, після чого зволожують до 75% протягом кількох днів. Реакція середовища повинна бути близькою до нейтральної (рН близько 6,5). Змочений та добре перемішаний матеріал розміщують в камері для пастеризації, де пастеризують насиченою парою, яку пускають в камеру при температурі 65–70°C з постійною циркуляцією повітря. Пастеризація продовжується

12 годин. Далі субстрат охолоджують до 24...25°C, і змішують з міцелієм (2–5% маси субстрату), потім укладають в мішки і розміщують на стелажах в камері пророщування [8].

Камерою пророщування може бути камера пастеризації або спеціальна камера, яка має систему вентиляції та циркуляції повітря. Міцелій росте протягом 15–20 днів при відносній вологості повітря 90–95%. Температуру повітря в цей період підтримують в межах 18–20°C. Під час росту міцелій гіфами з'єднує частини субстрату, який після звільнення ємкостей залишається у вигляді блоків.

Процес плодоутворення у гливи починається після досягання міцелію і продовжується 3 тижні при температурі 20–22°C. В цей період культуру не поливають, але забезпечують добре провітрювання приміщення. Після чого субстрат виймають з мішків і блоки розміщують в плівкові або скляні теплиці штабелями (з проходами для догляду за культурою). Штабелі укривають плівкою і приміщення охолоджують до 10–12°C. Через 2–3 дні поверхня субстрату стає кремовою від появи зародків плодкових тіл. Плівку зі штабелів знімають. В період плодоношення підтримують температуру повітря 12...14°C, відносну вологість 95%, проводять вентиляцію. Приміщення для вирощування гливи повинно мати світлопроникну покрівлю або штучне освітлення. Догляд в період плодоношення складається з підтримання оптимальної температури, вологості, концентрації CO₂ та освітленості.

Постановка завдання та виклад основного матеріалу. Виходячи з вищенаведеного, процес вирощування гливи можна розбити на три основні фази: перша фаза – вегетативний ріст, друга – перехід від вегетативного росту до плодоношення, третя фаза – плодоношення. Очевидно, що фази росту – це є функція часу, тобто $\Phi = f(T)$. Виходячи з цього, складемо технологічну карту процесу вирощування культури, опускаючи при цьому процес підготовки субстрату (табл. 1).

Таблиця 1 – Технологічна карта вирощування гливи звичайної

Фази	Період	Процес	Строк виконання
I	1	Пророщування міцелію	15–20 днів
II	2	Процес плодоутворення	3 тижні
	3		2–3 тижні
III	4	Період плодоношення	до кінця плодоношення

Джерело: розроблено автором

Складемо технологічну карту зміни температури, вологості, концентрації CO₂ та освітленості у функції часу (табл. 2).

Таблиця 2 – Параметри вирощування гливи звичайної

Фази	Період	Температура, t, °C	Вологість, H, %	Концентрація CO ₂ , C, %	Освітлення, E, лк
I	1	18–20	90–95	–	–
II	2	20–22	90	0,08–0,1	500
	3	10–12	90	0,08–0,1	500
III	4	12–14	90	0,08–0,1	500

Джерело: розроблено автором

Аналогічно розглядаються культури, які вирощуються в інших приміщеннях трайдему.

Обґрунтування параметрів та режимів роботи пристрою автоматичного керування ЗСВ. Починаючи проектування, потрібно визначити вид автоматичного керуючого пристрою (АКП). Процес вирощування розбито на кілька мініпроцесів (табл. 2), які слідує один за одним, паралельно один одному, і пов'язані між собою функцією часу. Наприклад, режим опалення в першому періоді переходить в режим опалення другого періоду, а той – в режим третього періоду. Такий процес буде відповідати АКП типу “автомат”.

Для зручності складено узагальнюючу модель об'єкта управління у вигляді “чорного ящика” (рис. 1).

Згідно технології вирощування можна виділити 4 керовані величини: Y_1 – температура; Y_2 – вологість; Y_3 – концентрація CO_2 ; Y_4 – освітлення.

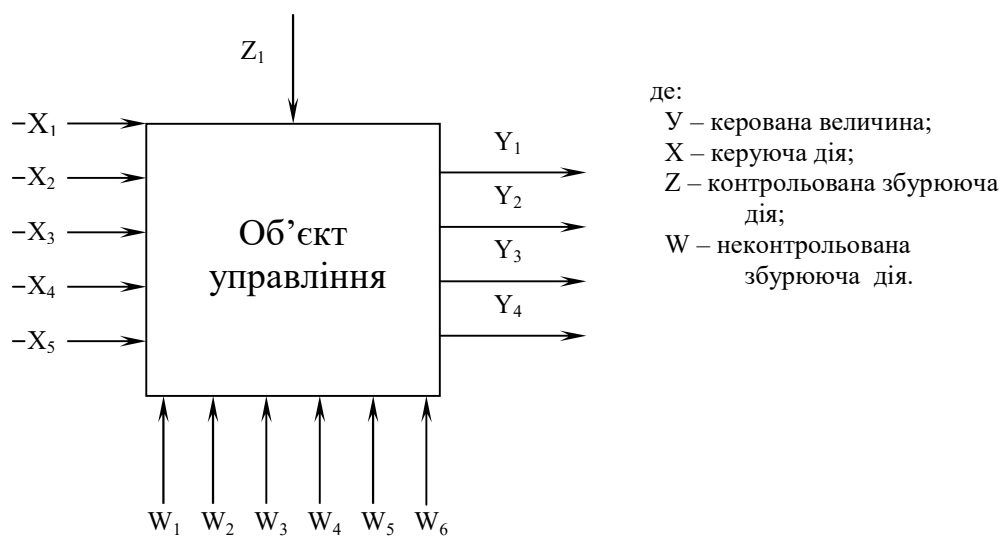


Рисунок 1 – Модель об'єкту управління

Джерело: розроблено автором

Визначимо керуючу дію. Щоб забезпечити заданий рівень температури в культивацийному приміщенні, потрібні – опалення приміщення в зимовий період та вентиляція в літній період. В першому випадку керуючою дією буде температура води в системі опалення X_1 , а в другому величина повітрообміну системи вентиляції X_2 . Для забезпечення заданої вологості необхідно або видаляти зайву вологу за допомогою вентиляції, або зволожувати приміщення (при нестачі вологи). Технологія вирощування гливи передбачає підтримання вологості повітря в першому і четвертому періодах (табл. 2) вище за атмосферну, а в другому та третьому – на рівні атмосферної. В зв'язку з цим, для першого і другого періодів як керуючу дію виберемо продуктивність установки зволоження повітря X_3 . В процесі дихання грибів виділяється значна кількість CO_2 , для видалення зайвої вуглекислоти застосуємо вентиляцію, тому за керуючу дію приймаємо величину повітрообміну вентиляційної установки X_4 . Для забезпечення режиму освітлення за керуючу дію виберемо час роботи освітлювальної установки X_5 .

Керуючі дії X_2 та X_4 однакові, тому вибираємо з них одну за принципом “диктуючої” шкідливості. Вибір між керуючими діями X_2 та X_4 буде мати, в основному, сезонний характер. Так, літом перевагу буде мати повітрообмін X_2 в зв'язку

з підвищенням температури навколишнього середовища, а взимку, навпаки, вентиляція буде проводитись тільки для видалення CO_2 .

Визначимо збуджуючі дії, які впливають на об'єкт керування. Їх необхідно розбити на дві групи: контрольовані (які можливо і бажано вимірювати) та неконтрольовані (які вимірювати неможливо або не потрібно). На параметри мікроклімату в культивацийному приміщенні впливають контрольовані фактори (зовнішня температура Z_1) і неконтрольовані (швидкість вітру W_1 , відкривання дверей і воріт W_2 , вологість зовнішнього повітря W_3 , концентрація CO_2 в зовнішньому повітрі W_4 , природне освітлення W_5 , теплота, яка надходить від освітлювальних приладів та технологічного обладнання W_6).

Очевидно, що дана система керуючих дій передбачає попереднє визначення статичних та динамічних характеристик приміщення, в якому буде проводитись вирощування грибів.

Сформулюємо алгоритм функціонування і управління.

Замкнута система опалення та вентиляції в певний період доби працює як система із двох приміщень [9], тому модель об'єкту управління з деякими внутрішніми зв'язками буде мати вигляд (рис. 2).

Графічно алгоритм управління можна зобразити у вигляді блок-схеми (рис. 3).

Блок 2 передає управління 3 при виборі автоматичного режиму управління мікрокліматом в системі теплиць. У Блоці 3 формується завдання на роботу системи, вводяться вихідні дані по технологічних параметрах мікроклімату: t_{b1} , t_{b2} , t_{b3} , – температурі внутрішнього повітря, відповідно, в грибниці, світлиці та темниці; C_{b1} , C_{b2} , C_{b3} , – концентрації CO_2 в грибниці, світлиці та темниці; W_{b1} , W_{b2} , W_{b3} , – вологості внутрішнього повітря в грибниці, світлиці та темниці; E_{b1} , E_{b2} , – освітленості, відповідно, в грибниці та темниці; x – кількості повторів у циклах повтору (затримка).

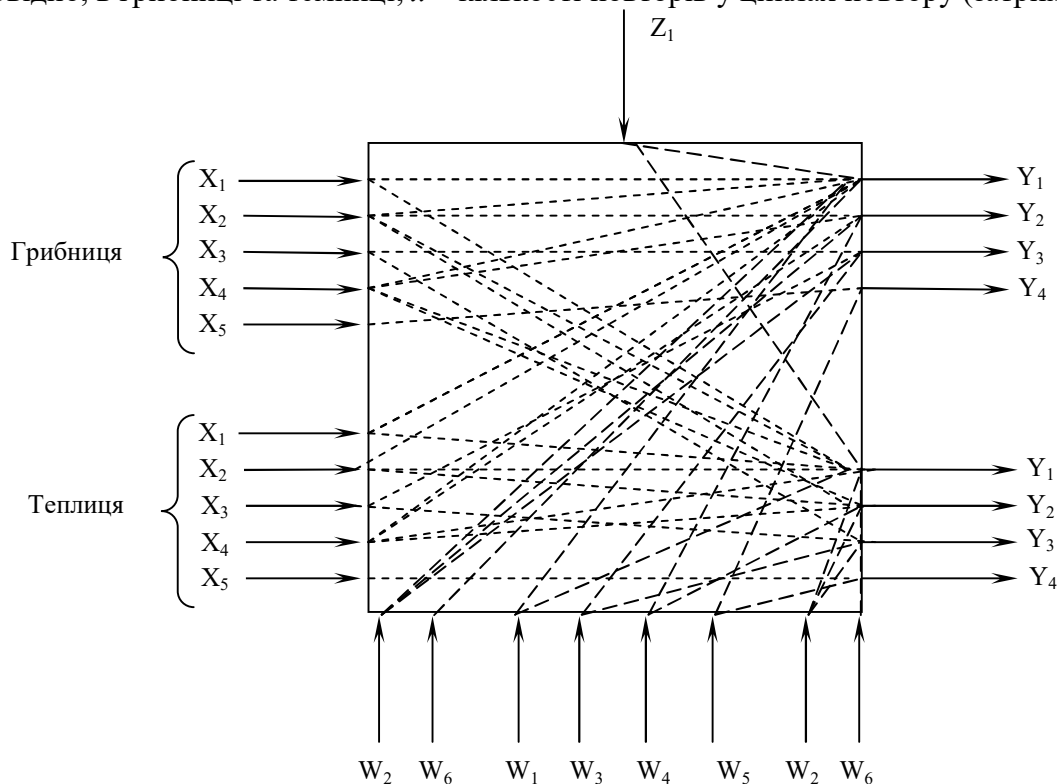
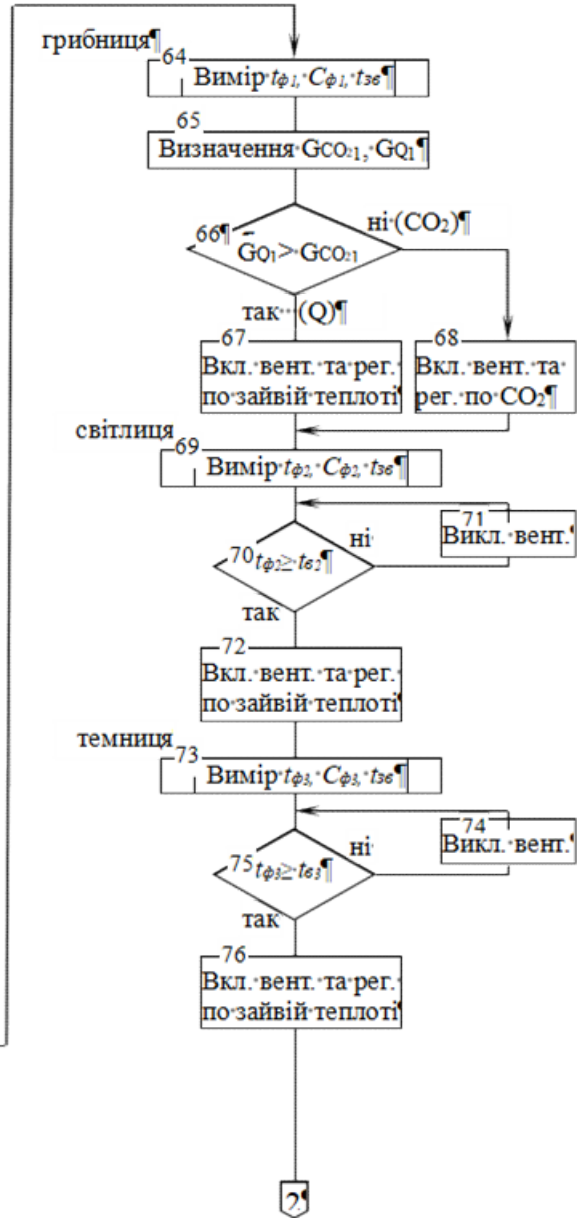
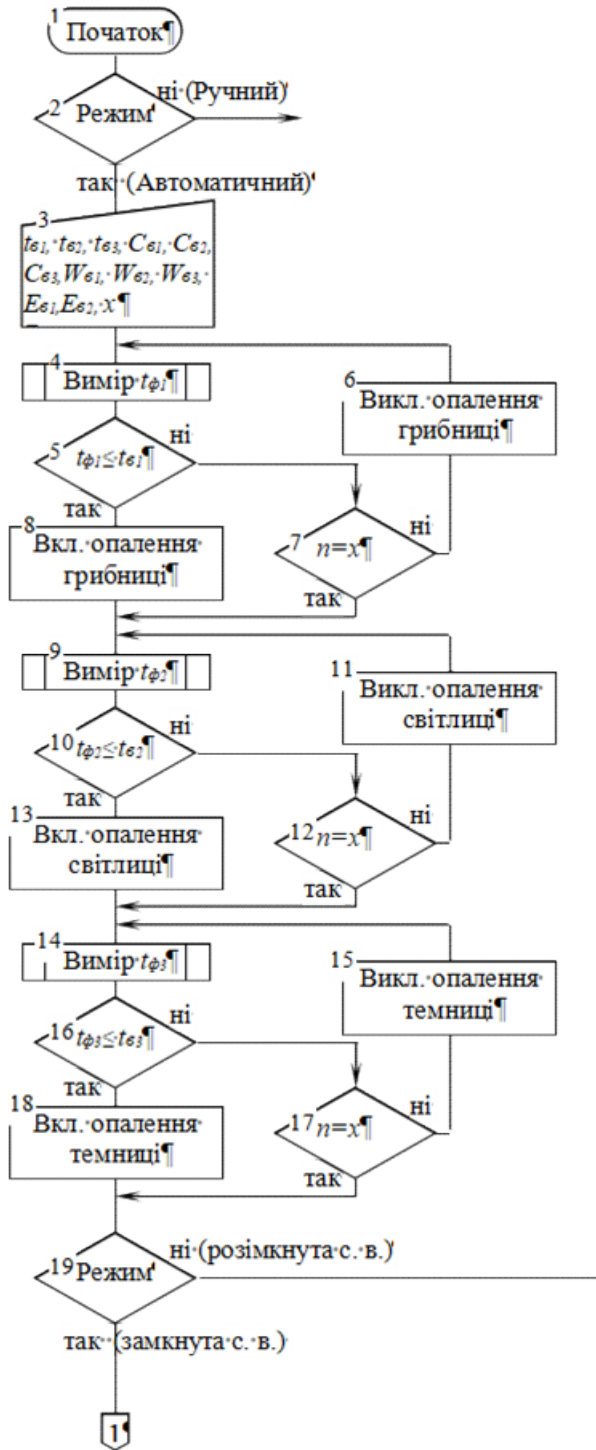


Рисунок 2 – Модель об'єкту управління

Джерело: розроблено автором



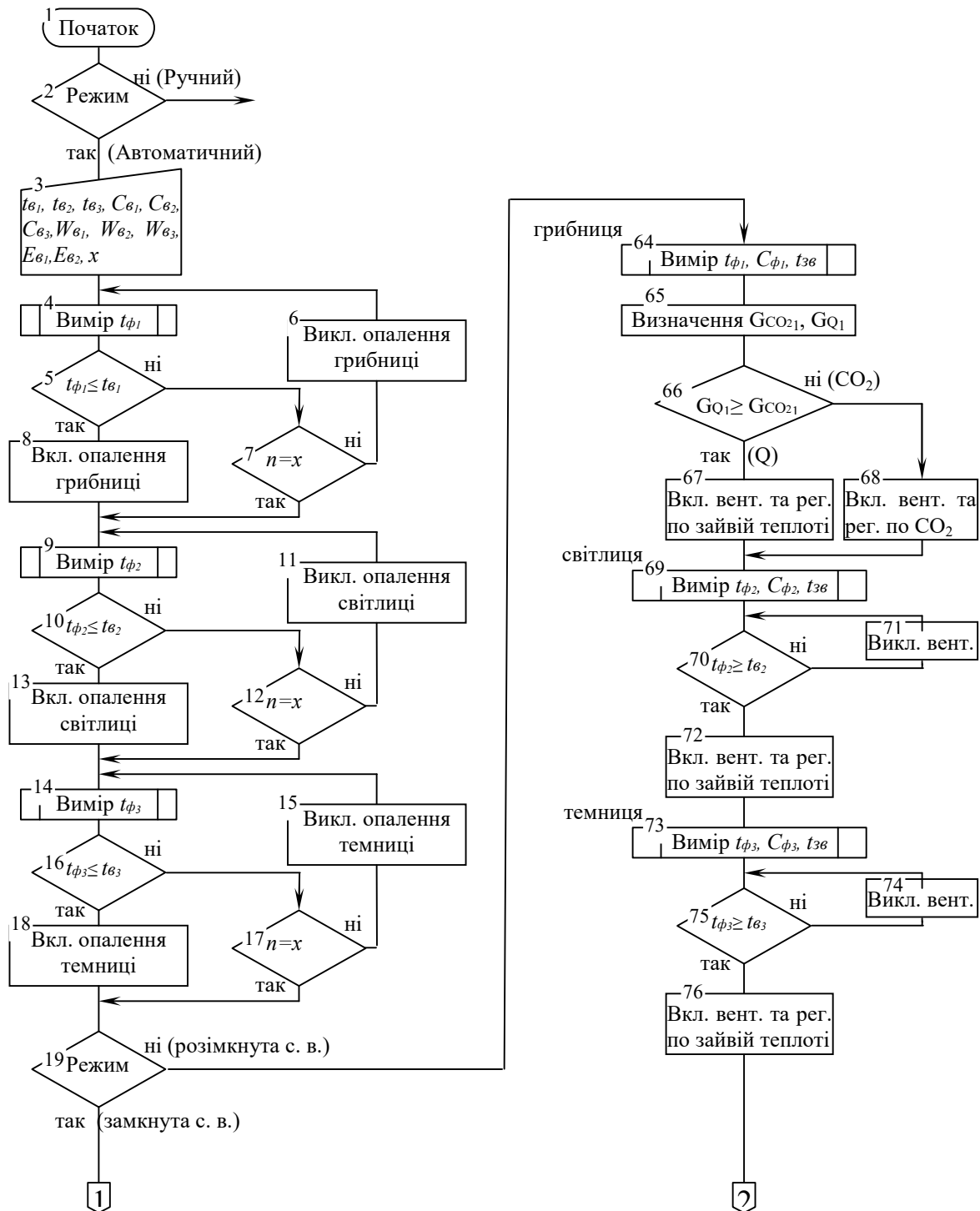


Рисунок 3.1 – Структурно-логічна схема замкнутої системи вентиляції

Джерело: розроблено автором

4-й блок вимірює фактичне (поточне) значення внутрішньої температури у грибниці та посилає його у 5, де відбувається порівняння із заданим значенням температури $t_{\epsilon 1}$. При $t_{\phi 1} \leq t_{\epsilon 1}$, блок 5 включає опалення грибниці, а при $t_{\phi 1} > t_{\epsilon 1}$, проходячи через блок затримки 7, – включає його (блок 6). Аналогічними є алгоритми управління опаленням світлиці (блоки 9–13) та темниці (блоки 14–18).

У блоці 19 відбувається вибір способу управління вентиляцією теплиць –

„Розімкнута система вентиляції” або „Замкнута система вентиляції”. При виборі останньої, управління передається логічному блоку 20, де відбувається вибір пари приміщень „грибниця–світлиця” або „грибниця–темниця” в залежності від пори доби.

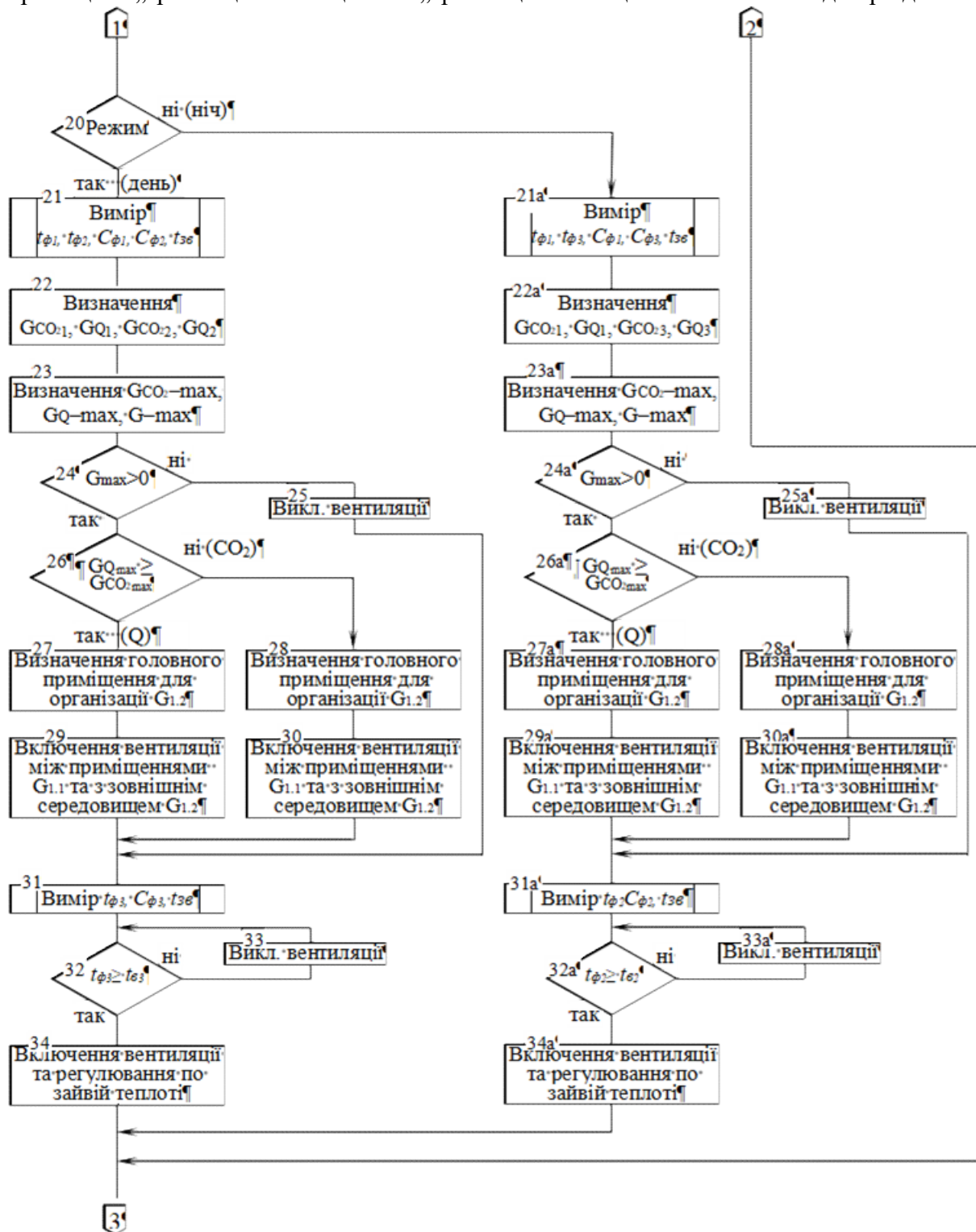


Рисунок 3.2 – Структурно-логічна схема замкнутої системи вентиляції (продовження)

Джерело: розроблено автором

В світлу частину доби при виборі пари „грибниця–світлиця” управління

передається блоку 21, в якому відбувається вимірювання поточних значень внутрішніх температури повітря і концентрації CO_2 в обох приміщеннях $t\phi_1, t\phi_2, C\phi_1, C\phi_2$ та температури зовнішнього повітря $t_{зв}$. 22-й блок розраховує величини повітрообмінів по зайвій теплоті та $CO_2 - GCO_{21}, GCO_{22}, GQ_1, GQ_2$.

В 23-му блоці визначається максимальний з повітрообмінів по вуглекислоті GCO_{2max} та максимальний по зайвій теплоті GQ_{max} , а також максимальний з них – G_{max} . Далі управління передається блоку 24, в якому G_{max} порівнюється з нулем і при відсутності повітрообміну система вентиляції не вмикається 25. При $G_{max} > 0$ в блокові 26 відбувається вибір повітрообміну по шкідливості (зайвій теплоті або CO_2).

При $GQ_{max} \geq GCO_{2max}$ повітрообмін відбувається по надлишковій теплоті і управління передається блоку 27, де відбувається вибір головного приміщення з пари „грибниця–світлиця” по найбільшому з них повітрообміну. Повітрообмін цього приміщення розділяється на два повітрообміни: 1-й організовується між парою приміщень, 2-й – між головним приміщенням і зовнішнім повітрям [9]. Блок 29 включає вентилятори замкнутої системи вентиляції та проводить регулювання їх продуктивності. При $GQ_{max} < GCO_{2max}$ управління відбувається аналогічно (блоки 28, 30). У цей час в темниці вентилявання проводиться незалежно від пари „грибниця–світлиця” (блоки 31–34).

При виборі, у блоці 20, пари „грибниця–темниця” (нічний час) управління передається 21а і далі – аналогічно денному варіанту (блоки 21а – 34а).

При виборі розімкнутої автоматичної системи (блок 19) управління передається блоку 64, в якому вимірюється поточні значення $t\phi_1, C\phi_1, t_{зв}$ грибниці. 65-й блок розраховує повітрообмін по CO_2 та Q . У 66-му логічному блоці порівнюються розраховані у 65-му, тобто визначається шкідливість, по якій проводиться вентилявання грибниці. При $GQ_1 \geq GCO_{21}$ управління передається 67, який вмикає вентиляційну установку і проводить вентилявання по зайвій теплоті. При $GQ_1 < GCO_{21}$ управління передається блоку 68 який вмикає вентиляційну установку і проводить регулювання вже по концентрації CO_2 в приміщенні. Далі управління передається блоку 69, де вимірюються поточні значення температури повітря в світлиці $t\phi_2$, концентрації $CO_2 - C\phi_2$ та зовнішньої температури повітря $t_{зв}$. У 70 відбувається порівняння фактичного значення температури в світлиці $t\phi_2$ із заданим $t_{\phi 2}$. При $t\phi_2 \geq t_{\phi 2}$ управління передається 62 для включення вентиляційної установки і регулювання повітрообміну по зайвій теплоті, при $t\phi_2 < t_{\phi 2}$ 61 включає вентиляційну установку. Вентилювання темниці відбувається аналогічно світлиці (блоки 73–76).

Алгоритм регулювання вологості в грибному приміщенні починається з блока 35, який вимірює фактичне значення вологості повітря в приміщенні $W\phi_1$ і передає управління на логічний блок 36, тут фактичне поточне значення вологості порівнюються з даним $W_{в1}$. При $W\phi_1 < W_{в1}$, після затримки у 37, вмикається установка зволоження 38. При $W\phi_1 \geq W_{в1}$ зволожувальна установка вмикається 39. Алгоритм регулювання вологості в світлиці та темниці аналогічні алгоритму грибного приміщення, відповідно, блоки 40–44 та 45–49.

Алгоритм регулювання освітлення починається з блоку 50, який вимірює поточне значенні освітленості в грибниці і передає управління на логічний блок 52. При зменшенні освітлення в приміщенні грибниці нижче 1500 лк включається 50% ламп (блок 50). При $E\phi_1 > 1500$ лк після блоку затримки 53 передається команда на виключення освітлення 51. Після вимірювання поточного значення освітленості у блоці 57 $E\phi_1$ порівнюється із заданим значенням освітленості в 1000 лк. При $E\phi_1 \leq 1000$ лк блок 59 включає 100% ламп системи освітлення при $E\phi_1 > 1000$ лк. після блоку 58 управління передається на блок 56 відключення 50% ламп освітлювальної системи.

Управління освітленням в темниці проводиться по погодинній програмі, яка включає в себе блок 60 порівняння фактичного часу доби із заданим часом вмикання освітлення темниці (21.00) і блока 62 із часом вимкання. Включення і виключення освітлення проводиться блоками 61 і 63.

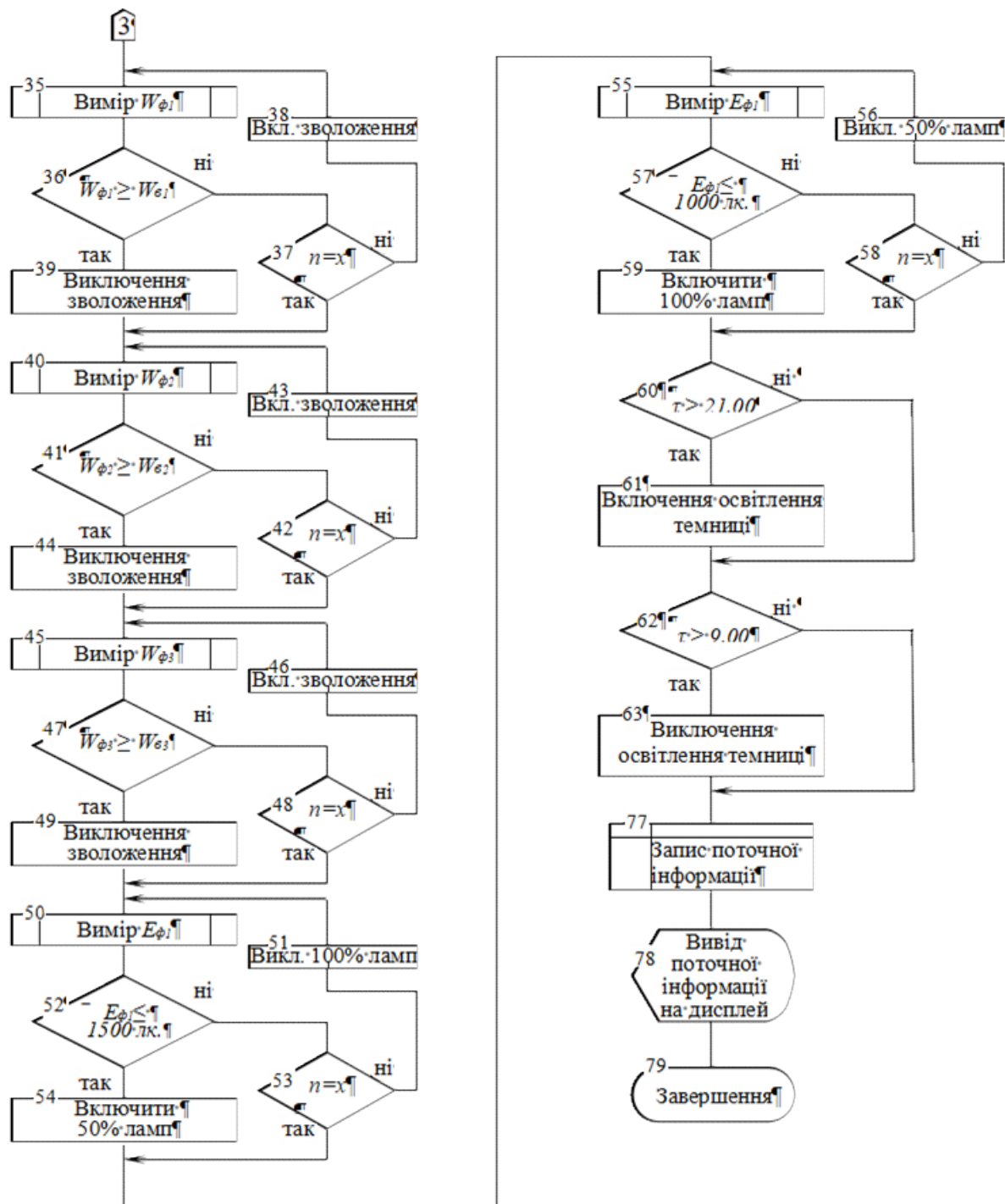


Рисунок 3.3 – Структурно-логічна схема замкнутої системи вентиляції (закінчення)
 Джерело: розроблено автором

Блоки 77 і 78 реалізують алгоритм запису поточної інформації на пристрій запам'ятовування та вивід інформації на пристрій індикації (монітор).
 Алгоритм управління є основою для подальшого проектування.

Для вибору типу регулятора визначаємо, що $\tau/T_1 = 0,11$ і $\tau/T_{2a} = 44,8$ [10].

При відношенні $\tau/T > 0,2$ вибираємо регулятор безперервної дії.

Всі прилади та виконавчі пристрої працюють на електроенергії.

Як видно з алгоритму управління, автомат повинен мати пам'ять. Протягом всього технологічного циклу пристрій повинен пам'ятати значення температури, вологості, концентрації CO₂ та освітленості в кожному приміщенні та інші.

По виду пам'яті, яка використовується, пристрій буде синхронним, так як зміна параметрів автоматичного пристрою управління (АПУ) буде відбуватися в момент надходження синхронізуючих імпульсів.

В зв'язку з тим, що деякі перехідні процеси не є стабільними, і мають коливальний характер, за винятком, у нашому випадку, освітленості, то виникає необхідність ввести в алгоритм управління затримку для реагування системи на тривалість імпульсів.

Висновки:

1. Встановлено, що з точки зору автоматичного управління температурою субстрату та повітря, система „культиваційне приміщення – теплиця” з водяною системою опалення являє собою двоємнісний об'єкт.

2. Обґрунтовано та розроблено структурно-логічну схему управління замкнутою системою опалення та вентиляції, яка передбачає управління технологічними параметрами (температурою, вологістю, концентрацією CO₂, освітленістю) в системі.

Список літератури

1. Achour Yasmine, Ouammi Ahmed, Zejli Driss, Technological progresses in modern sustainable greenhouses cultivation as the path towards precision agriculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 147(3). pp.111251
2. Sethi V.P., Sumathy K., Lee C., Pal D.S. Thermal modeling aspects of solar greenhouse microclimate control: A review on heating technologies. *Solar Energy*. 2013. Vol. 96. pp. 56–82.
3. Costantino A., Comba L., Sicardi G., Bariani M., Fabrizio E. Energy performance and climate control in mechanically ventilated greenhouses: A dynamic modelling-based assessment and investigation. *Applied Energy*. 2021. Vol. 288. Pp. 116583.
4. Gorobec V., Yatsenko O. Development and heating systems mathematical model of heat and mass transfer in the greenhouse with alternative energy sources. *Energy and automation*. 2014. Vol. 1.
5. Dudnyk A. O. Synthesis and research of mathematical models of energy consumption for heating greenhouses in winter. *Scientific Bulletin of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine. Series: Technology and energy of agricultural industry*. 2014. Vol. 194 (3). Pp. 218–222.
6. Шелестовський Б.Г., Габрусев Г.В., Габрусєва І.Ю. Вища математика: теорія ймовірностей та математична статистика: навч. посібник. Тернопіль : СМП "Тайп", 2023. 142 с.
7. Achour Yasmine, Ouammi Ahmed, Zejli Driss Technological progresses in modern sustainable greenhouses cultivation as the path towards precision agriculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 147(3). pp.111251.
8. Голуб Г.А., Кепко О.І. Вибір структури цехів по виробництву субстратів та вирощуванню грибів. *Наук. вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. № 251. 2016. С. 183–192.
9. Golub G., Kepko O. Modelling the work of closed system of heating and ventilation of greenhouses. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 52, № 2. Pp. 85–90.
10. Golub G., Kepko O., Pushka O., Kovtuniuk Z., Kotliar T. Modeling of substrate and air temperature dynamics in the mushroom greenhouse. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 69, № 1. Pp. 315–324.

References

1. Achour, Yasmine; Ouammi, Ahmed & Zejli, Driss. (2021). Technological progresses in modern sustainable greenhouses cultivation as the path towards precision agriculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 147(3). pp.111251. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111251> [in English].

2. Sethi, V. P., Sumathy, K., Lee, C. & Pal, D. S. (2013). Thermal modeling aspects of solar greenhouse microclimate control: A review on heating technologies. *Solar Energy*, 96, pp. 56–82 [in English].
3. Costantino, A., Comba, L., Sicardi, G., Bariani, M. & Fabrizio, E. (2021). Energy performance and climate control in mechanically ventilated greenhouses: A dynamic modelling-based assessment and investigation. *Applied Energy*, 288 [in English].
4. Gorobec, V. & Yatsenko, O. (2014). Development and heating systems mathematical model of heat and mass transfer in the greenhouse with alternative energy sources. *Energy and automation*, 1 [in English].
5. Dudnyk, A. O. (2014). Synthesis and research of mathematical models of energy consumption for heating greenhouses in winter. *Scientific Bulletin of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine. Series: Technology and energy of agricultural industry*, 194 (3), pp. 218–222 [in English].
6. Shelestovskiy B.H., Habrusiev H.V. & Habrusieva I.Iu. (2023) Vyshcha matematyka: teoriia ymovirnosti ta matematychna statystyka [Higher mathematics: probability theory and mathematical statistics]. Navchalnyi posibnyk. Ternopil: SMP "Taip" [in Ukrainian].
7. Achour, Yasmine; Ouammi, Ahmed & Zejli, Driss. (2021). Technological progresses in modern sustainable greenhouses cultivation as the path towards precision agriculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 147147(3). pp.111251 [in English].
8. Holub, H.A. & Kepko, O.I. (2016). Vybir struktury tsekhiv po vyrobnytstvu substrativ ta vyroshchuvanniu hrybiv [The choice of the structure of workshops for the production of substrates and the cultivation of mushrooms]. *Nauk. visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seriya: tekhnika ta enerhetyka APK – Science Bulletin of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine. Series: agribusiness technology and energy, № 251*, 183–192 [in Ukrainian].
9. Golub, G. & Kepko, O. (2017). Modelling the work of closed system of heating and ventilation of greenhouses. *INMATEH – Agricultural Engineering, Vol.52, 2*, 85-90 [in English].
10. Golub G., Kepko O., Pushka O., Kovtuniuk Z. & Kotliar T. (2023). Modeling of substrate and air temperature dynamics in the mushroom greenhouse. *INMATEH – Agricultural Engineering, Vol.69, 1*, 315–324. doi:DOI: <https://doi.org/10.3563> [in English].

Oleg Kepko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ivan Lisovyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yuriy Kovalchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine

Structural and Logic diagram of the Automatic Control System of the Closed Heating AND Ventilation System of Greenhouses

In the process of designing an automatic control system for a closed system of heating and ventilation of greenhouses with air regeneration, a structural and logical control scheme was substantiated and developed, which provides control of technological parameters (temperature, humidity, CO₂ concentration, lighting).

The structural-logical scheme was created on the basis of the technological map of the cultivation of common oyster mushrooms taking into account changes in temperature, humidity, CO₂ concentration and illumination as a function of time. As a result of the study, controlled quantities, control actions, controlled disturbing actions and uncontrolled disturbing actions were determined. The parameters and modes of operation of the device for automatic control of the closed ventilation system are substantiated. The proposed control algorithm must have memory. During the entire technological cycle, the device must remember the values of temperature, humidity, CO₂ concentration and lighting in each room and others. According to the type of memory used, the device will be synchronous, as the parameters of the automatic control device (APU) will change at the moment of arrival of synchronizing pulses. Due to the fact that some transient processes are not stable and have an oscillatory character, with the exception of illumination in our case, it is necessary to introduce a delay into the control algorithm for the response of the system to the duration of pulses. All devices and executive devices work on electricity.

Conclusions: 1. It was established that from the point of view of automatic control of the temperature of the substrate and air, the system "cultivation room – greenhouse" with a water heating system is a two-volume object. 2. The structural and logical control scheme of the closed heating and ventilation system, which provides for the control of technological parameters (temperature, humidity, CO₂ concentration, illumination) in the system, is substantiated and developed.

closed ventilation system, air regeneration, structural and logical scheme, mushroom cultivation

Одержано (Received) 13.11.2023

Прорецензовано (Reviewed) 30.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023