

Б.І. Котов, проф., д-р техн. наук, В.О. Грищенко, ас.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Моделювання перехідних режимів обладнання холодильної камери та структури системи автоматичного керування (САК) температурно- вологісним режимом

Приведені математичні моделі холодильної камери, повітроохолоджувача та структури системи автоматичного керування температурним і вологісним режимом. Визначені передаточні функції основних елементів об'єкту керування. Запропонована структура комбінованої камери САК температурним режимом холодильної камери.

холодильна камера, охолоджувач, математична модель, САК

Для забезпечення нормативних параметрів технологічного мікроклімату в різні періоди зберігання плодоовочевої продукції сучасні сховища (камери зберігання) обладнані системами вентилявання, охолодження та зволоження повітря всередині камери.

Ефективність функціонування обладнання, яка визначається ступенем збереження продукції та питомими витратами енергії на забезпечення раціональних режимів зберігання, значною мірою залежить від якості його регулюючої частини – САК температурно-вологісними режимами охолодження та зберігання.

Існуючі системи найбільш часто застосовують двохпозиційний спосіб регулювання температури повітря, шляхом періодичного вимикання приводу компресора холодильної машини, який має суттєві недоліки: значні коливання температури в камері, незначний наробіток на відмову, підвищені енерговитрати.

Практика роботи САК режимами кондиціювання технологічного мікроклімату [1-3], які реалізовано на засобах, не враховуючих особливостей системи температурно-вологісної обробки повітря споруд для зберігання продукції та властивостей самої продукції, показує, що вони не працездатні в умовах змінення навантажень 10...30%, так як не можуть компенсувати збурення.

Задача вибору методів і засобів автоматичного керування не може бути вирішена без наявності математичних моделей, які достовірно характеризують динамічні характеристики технологічного обладнання систем.

Аналіз досліджень [1-7] показав, що існуючі математичні моделі описують динамічні характеристики окремих елементів системи: тепло- і масообмінні процеси взаємодії продукту та повітря [4,5], огороджуючих поверхонь приміщення [9], повітроохолоджувачів [7], зрошувальних камер [6], та систем кондиціювання повітря (СКП) [14], які не враховують стан приміщення і продукту. Комплексні математичні моделі системи "споруда-продукт-обладнання" холодильного зберігання плодоовочевої продукції при створенні САК не використовуються.

Що стосується вибору способів керування та структурної схеми (одноконтурна, багатоконтурна, ієрархічна), то у відповідності до результатів досліджень [1,2,6] можна констатувати наступні положення. Автоматична стабілізація температури повітря в камері, яка забезпечує зниження усушки при зберіганні, досягається шляхом

підтримання середнього значення параметрів на заданому рівні. Як правило в системах керування використовують релейні регулятори які не забезпечують задовільної якості регулювання в системах стабілізації температури після охолоджувачів або в камерах, обумовлюючи існування стабільних коливань, які негативно впливають на втрати продукції. Регулятори П, ПІ, ПД, які застосовуються в загальнопромислових системах кондиціонування повітря, не завжди якісно забезпечують регулювання показників, тому, що при проектуванні не враховуються динамічні властивості об'єкту, і вибору способу управління.

Доведено експериментами і теоретичним аналізом, що найбільш економічним способом керування температурним режимом є стабілізація температури повітря безпосередньо в камері з використанням плавного керування холодопродуктивністю компресора.

В холодильній техніці (при зберіганні харчових продуктів) всі розрахунки виконуються для стаціонарних режимів: параметрів камери, теплових навантажень, маси продукції. Але камери холодильного зберігання плодоовочевої продукції працюють в умовах нестаціонарного температурно-вологісного режиму. Причинами порушень стаціонарного режиму є добові та сезонні коливання температури оточуючого середовища, постійна зміна маси продукту, позиційна система керування вмиканням компресора. Температура повітря в камері може коливатися в межах 1-4 °С, що призводить до виникнення внутрішніх потоків теплоти та маси. В загальному випадку температура продукту (основний показник) залежить від теплових надходжень через огорожу, тепловиділень продукту, утворення інею.

Вдосконалена математична модель камери зберігання плодоовочевої продукції з повітряною системою охолодження із загально об'ємним розподілом повітря побудована з таких міркувань.

Охолодження рослинної соковитої продукції – складний нестаціонарний процес тепло- і масообміну. З одного боку воно характеризується виділенням продуктом тепла та вологи та зумовленими ними процесами, а з другого – тепловіддачею та масовіддачею від поверхні продукту до охолоджуючого повітря. При цьому спостерігається нерівномірність температурних і вологісних полів в об'ємі камери зберігання. Тому тепло- і масообмінні процеси в камері зберігання можна кваліфікувати, як нелінійні динамічні системи з розподіленими параметрами і взаємопов'язаними керованими величинами.

Але використання в реальних САК надзвичайно складних математичних моделей позбавляє їх гнучкості, ускладнює застосування та вимагає значних обчислювальних потужностей. Тому при створенні САК температурно-вологісними режимами плодоовочесховищ доцільно використовувати наближений підхід до математичного опису камери з продуктом, як об'єкту керування, який дає змогу спростити вигляд передаточної функції та визначити її параметри (числові) з точністю, необхідною для визначення якісної картини процесів регулювання.

В роботі використано наближений підхід до складання математичної моделі, який полягає у наведенні ряду пов'язаних між собою окремих місткостей із зосередженими параметрами.

Ґрунтуючись на початковій формалізації апріорних даних про камеру холодильного зберігання продукції, складено узагальнену математичну модель.

В основу математичної моделі сховища з продукцією при холодильному охолодженні, покладені рівняння теплового та матеріального балансу між повітрям, продуктом і огороженням з урахуванням тепло- і вологовиділень продукцією та впливом зовнішнього середовища (теплопритоками від сонячного випромінювання та температури зовнішнього повітря).

Введемо такі позначення:

$\theta_j, \bar{t}_v, \theta_c, t_z$ – температура матеріалу, повітря, стін та зовнішнього повітря;

c_p, c_j, c_c – питома теплоємність матеріалу, повітря і стін;

m_j, m_v, m_c – маса матеріалу, повітря і стін;

β_i – коефіцієнт випаровування;

$\alpha_j, \alpha_c, \alpha_n$ – коефіцієнт теплообміну матеріалу, внутрішніх стін та зовнішніх стін;

F – поверхня опромінювання;

f_j, f_c, f_n – питома поверхня матеріалу, внутрішніх стін та зовнішніх стін;

d – вологовміст повітря;

r – питома теплота пароутворення.

$q(\theta)$ – теплові виділення продукту, як функція температури продукту;

β – коефіцієнт випаровування;

G_v – витрата повітря, що циркулює в камері;

m_{ov} – маса вологи, що конденсується;

t_1, d_1 – температура і вологовміст повітря на вході в камеру.

Математична модель камери холодильного зберігання представимо у вигляді системи диференціальних рівнянь (1-4):

$$m_v \cdot c_p \frac{dt}{d\tau} = G_v \cdot c_p (t_1 - t_2) - \alpha_j \cdot f_j (\bar{t} - \theta_j) - \alpha_c \cdot f_c (\bar{t} - \theta_c), \quad (1)$$

$$m_j \cdot c_j \frac{d\theta_j}{d\tau} = \alpha_j \cdot f_j (\bar{t}_v - \theta_j) + q(\theta_j) \cdot m_j - \beta_i \cdot F_i \cdot r (a \cdot \theta_j + c - b \cdot d), \quad (2)$$

$$m_c \cdot c_c \frac{d\theta_c}{d\tau} = \alpha_c \cdot f_c (\bar{t} - \theta_c) - \alpha_n \cdot f_n (\theta_c - t_z), \quad (3)$$

$$m_{v0} \frac{dd}{d\tau} = \beta \cdot F_n (a \cdot \theta_j + c - b \cdot d) - G_v (d_2 - d_1). \quad (4)$$

В математичний опис холодильної камери входять параметри t_1 і d_1 як постійні задані величини. Величини t_1 і d_1 фактично є вихідними параметрами повітроохолоджувача. Для їх визначення складемо систему рівнянь теплового та матеріального балансу для повітроохолоджувача:

$$m_o c_o \frac{d\theta_o}{d\tau} = \alpha_o f_o (t_v - \theta_o) - Q_o, \quad (5)$$

$$c_p m_{vo} \frac{dt_v}{d\tau} = c_p G_v (t_1 - t_v) - \alpha_o f_o (t_v - \theta_o), \quad (6)$$

$$m_{vo} \frac{dd}{d\tau} = (d_1 - d) G_v - \sigma_o f_o (d - d''(\theta_o)), \quad (7)$$

$$d_o(\theta_o) = a \theta_o + c, \quad (8)$$

де m_o, m_{vo} – маса охолоджувача і повітря в його об'ємі;

α_o, σ_o – коефіцієнти теплообміну та масообміну теплообмінника;

f_o – поверхня теплообмінника;

$d''(\theta_o)$ – вологовміст насиченого повітря при температурі поверхні теплообміну;

θ_o – температура труб і ребер охолоджувача та холодоагенту середня за об'ємом;

Q_o – холодопродуктивність холодильної установки.

Розв'язок системи рівнянь (1-8) з використанням ЕОМ дозволяє розрахувати змінення всіх основних параметрів холодильної камери при будь яких коливаннях температури атмосферного повітря та внутрішніх збуреннях.

Як приклад використання математичної моделі на рисунках 1-2 наведено перехідні процеси повітроохолоджувача, на рисунку 3 наведено перехідний процес в камері. На рисунку 5 – перехідний процес в штабелі яблук при вимкненому повітроохолоджувачі та вентиляторі.

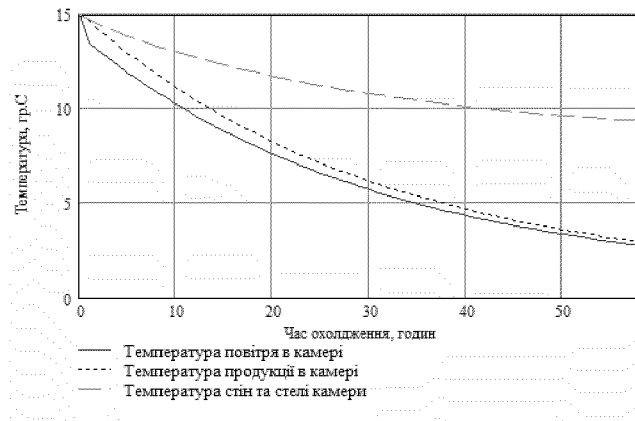


Рисунок 1 – Перехідний процес охолодження камери з продуктом при: $G_v = 10$ об'ємів /год; $t_z = 15$ °C; $t_1 = -5$ °C

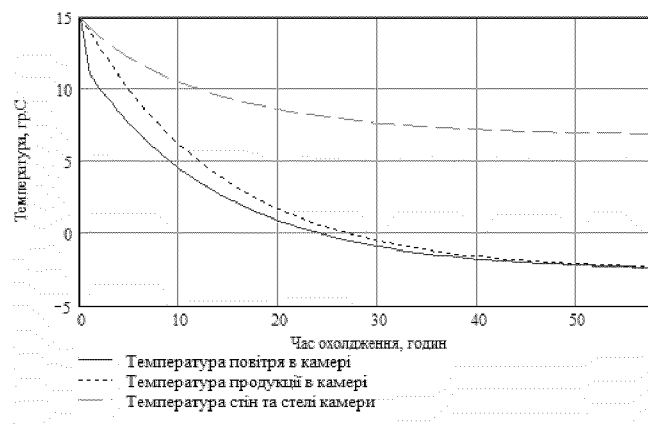


Рисунок 2 – Перехідний процес охолодження камери з продуктом при: $G_v = 30$ об'ємів /год; $t_z = 15$ °C; $t_1 = -5$ °C

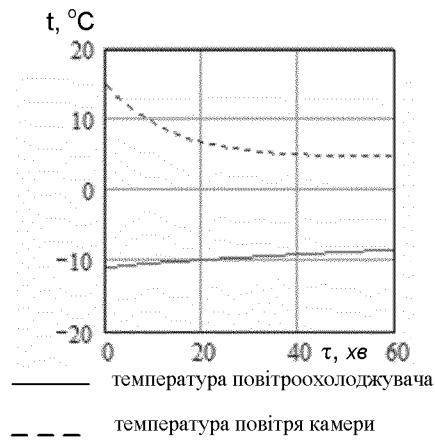


Рисунок 3 – Перехідний процес в повітроохолоджувачі

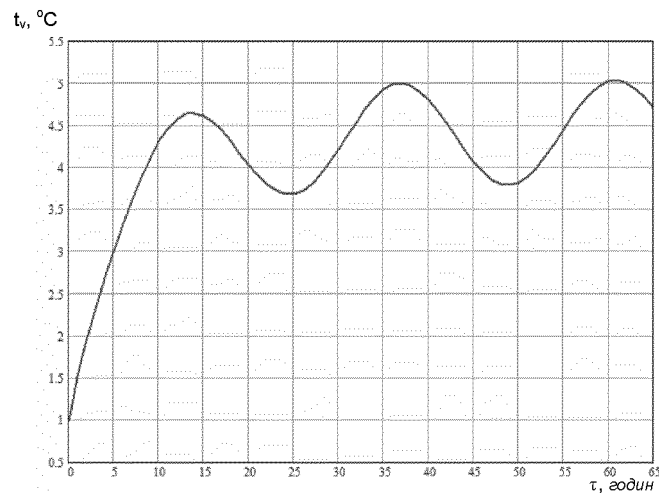


Рисунок 4 – Перехідний процес в штабелі яблук при вимкненому повітроохолоджувачі

Аналізом перехідних процесів встановлено, що динамічні властивості сховища, насамперед залежать від кратності циркуляції повітря (витрати повітря), питомої поверхні огороження сховища, коефіцієнтів теплопередачі та теплообміну.

Аналітичні передаточні функції об'єкта керування мають досить складний вигляд, як ланки п'ятого-шостого порядку. Але з аналізу розгінних кривих, сховище з обладнанням і продуктом можна представити в такому вигляді:

- передаточна функція повітроохолоджувача по каналу витрати повітря – температура t_1 :

$$W_1(p) = \frac{t_1(p)}{G(p)} = \frac{k_1(G)}{T_1 p + 1}; \quad (9)$$

- передаточна функція повітроохолоджувача по каналу холодопродуктивність – температура t_1 :

$$W_2(p) = \frac{t_1(p)}{Q_0(p)} = \frac{k_2(p)}{T_2 p + 1}; \quad (10)$$

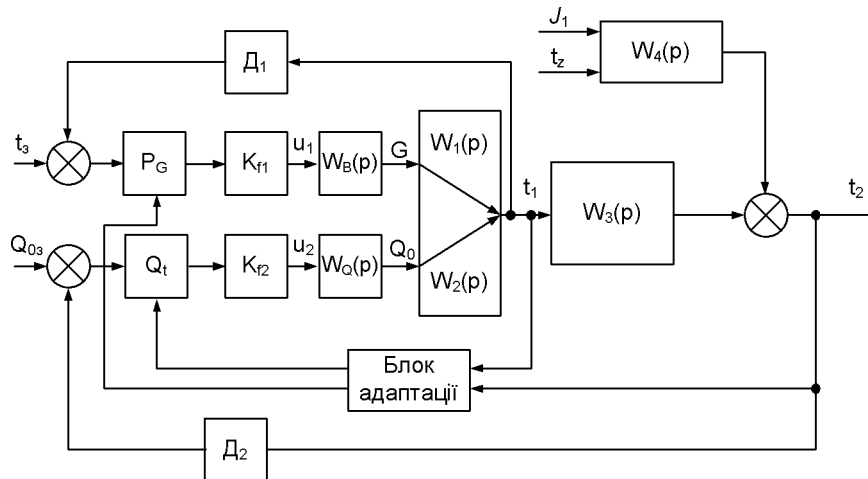
- передаточна функція холодильної камери з продуктом:

$$W_3(p) = \frac{k(G_v)}{T_1 p^2 + T_2 p + 1} e^{-p\tau}; \quad (11)$$

- передаточна функція по каналу зовнішніх збурень – температура на виході з камери t_2 :

$$W_4(p) = \frac{t_2(p)}{t_z(p)} = \frac{k_4}{T_5 p^2 + T_6 p + 1}. \quad (12)$$

Для досліджуемого об'єкту керування запропонована структурна схема комбінованої САК, яка передбачає стабілізацію температури повітря із повітроохолоджувача, та компенсацію збурень зміненням холодопродуктивності компресора у функції температури повітря на вході в повітроохолоджувач (на виході холодильної камери). Структурна схема комбінованої системи наведена на рисунку 5.



$W_B(p)$, $W_{Q_0}(p)$ - передаючі функції відповідно вентиляційного і холодильного блоків;
 k_{f_1} , k_{f_2} - коефіцієнти передачі частотних перетворювачів

Рисунок 5 – Структурна схема комбінованої САК

Розроблено удосконалену математичну модель камери холодильного зберігання рослинної продукції. Визначені передаточні функції основних елементів об'єкту керування. Запропонована структура комбінованої камери САК температурним режимом холодильної камери.

Список літератури

1. Мартыненко И.И., Гирнык Н.Л., Полищук В.М. Автоматизация управления температурно-влажностными режимами сельскохозяйственных объектов /Всесоюзная академия с.-х. наук им. В.И. Ленина. – М.: Колос, 1984 – 152 с.
2. Куравлев Е.С. Автоматическое регулирование влажности воздуха в холодильных камерах. М.: Колос, 1969 – 47 с.
3. Чумак И.Г. Холодильные установки. М: Агропромиздат, 1991. – 370 с.
4. Долгих В.В. Разработка и исследование систем автоматического управления микроклиматом камер холодильного хранения пищевых продуктов: Автореф. дис. к.т.н. Краснодар, 1973. – 28 с.
5. Гельберт М.И. Обоснование параметров разработка АСР режима хранения картофеля: Автореф. дис. к.т.н. М.: 1976. – 17 с.
6. Архипов Г.В. Автоматизированные установки кондиционирования воздуха. М.: Энергия, 1975. – 200 с.
7. Вычужанин В.В. Математическая модель воздухоохладителя при нестационарной нагрузке// Холодильная техника и технология, №2, 2008.-С.61-62.

8. Вычужанин В.В. Модель динамики системы кондиционирования воздуха// Холодильная техника и технология, №2, 2007.- С.31-33.
9. Вычужанин В.В. Динамические свойства ограждающих поверхностей кондиционируемого помещения судна// Холодильная техника и технология, №3, 2006.- С.10-13.
10. Вычужанин В.В. Комбинированная автоматическая система регулирования параметров воздуха в кондиционере// Холодильная техника и технология, №9, 1985.- С.43-44.
11. Аксельрод С.И. Область рационального применения Рс-регуляторов в автоматизированных системах кондиционирования воздуха// Холодильная техника, №10, 1972.- С.19-23.
12. Алехин Н.Б., Якименко Г.С. Совершенствование системы автоматического управления производительностью холодильной машины// Холодильная техника и технология, 1986.- вып. 43.- С.99-104.
13. Алехин Н.Б. анализ способов управления температурными режимами в холодильных камерах// Холодильная техника и технология, №37, 1983.- С.92-97.
14. Четверухин Б.М. Исследование температурно-влажностных полей как объекта регулирования в системе кондиционирования воздуха: Автореф. дис. к.т.н. К.: 1969. – 27 с.

В. Котов, В. Грищенко

Моделирование переходных режимов оборудования холодильной камеры и структуры системы автоматического управления (САК) температурно-влажностным режимом

Приведены математические модели холодильной камеры, воздухоохладителя и структуры системы автоматического управления температурным и влажностным режимом. Определены передаточные функции основных элементов объекта управления. Предложена структура комбинированной камеры САК температурным режимом холодильной камеры.

В. Kotov, V. Gryshchenko

Simulation of transient modes of refrigeration chamber equipment and the structure of the automatic (ACS) control of temperature and humid conditions

A mathematical model of a refrigerator chamber, refrigerating medium and the structure of the temperature and humid condition automatic control system are given. The transfer functions of the basic control elements of a controlled object are found. A combined chamber structure with the ACS refrigerator chamber temperature mode is offered.

Одержано 02.09.09