

С. І. Осадчий, доц., канд. техн. наук, Р.В. Жесан, доц., канд. техн. наук,  
Є. П. Босов, доц., О. С. Киянченко, магістрант  
*Кіровоградський національний технічний університет*

## Визначення оптимальних параметрів настроювання регулятора для багатомірної системи автоматичного керування активним вентиляванням зерна

На основі спеціальних алгоритмів обробки матриць-векторів вхідних та вихідних сигналів визначено оптимальні параметри настроювання регулятора багатомірної системи автоматичного керування активним вентиляванням зерна.

**регулятор, оптимальні параметри, система автоматичного керування, система автоматичного регулювання, передатна функція, матриця-вектор, багатомірна система, активне вентилявання**

Масове застосування комбайнового збирання зернових обумовлює надходження на післязбиральну обробку в стислий термін величезних кількостей зерна. Висока вологість зернової маси різко інтенсифікує природний хід життєдіяльності зерна, що проявляється, як у всіх інших рослинних організмів, у подиху – складному біохімічному процесі. Тому основна мета післязбиральної обробки – звести до мінімуму подих зернової маси без погіршення її посівних і продовольчих якостей. Один з ефективних прийомів післязбиральної обробки зерна – активне вентилявання [1, 2].

Сушіння зерна активним вентиляванням ґрунтується на принципі гігроскопічної рівноваги між вологістю зерна й відносною вологістю вентиляваного повітря. В умовах динамічної рівноваги відносної вологості повітря, що дорівнює 62...70 %, відповідає вологість зерна порядку 8...15 %. У зв'язку із цим у вентиляваних бункерах як сушильний агент використовують зовнішнє або трохи підігрите повітря.

На сучасному етапі розвитку агротехнологій найбільш ефективним є вентилявання із використанням різноманітних систем автоматичного керування (САК) та систем автоматичного регулювання (САР).

Основним елементом у подібних САК та САР – власне об'єктом керування (регулювання) – є сушарка. Тому першою вимогою до автоматизованого агрегату є придатність самого об'єкта до автоматизації, тобто можливість ефективного впливу на процес сушіння зміною параметрів режиму. Для побудови САК автоматизованого об'єкта й вибору її параметрів треба знати поведінку об'єкта в статиці й динаміці. Це дозволяє вирішити питання про найбільш доцільну зміну статичних і динамічних характеристик або синтез коригувальних елементів для досягнення найкращих результатів роботи системи автоматизації агрегату [2-4].

Метою даної статті є визначення аналітичними методами оптимальних параметрів настроювання регулятора САК активним вентиляванням зерна з урахуванням статичних і динамічних властивостей по окремих контурах керування й виявленню ступеня і форм взаємозв'язку між керованими величинами.

Згідно із результатами експериментальних досліджень Мартиненка І. І. [5], спрощена структурна схема процесу активного вентилявання зерна як об'єкта керування може бути представлена рис. 1.

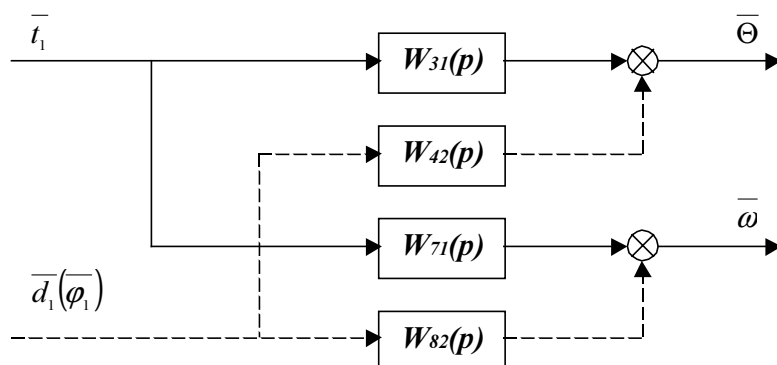


Рисунок 1 – Спрощена структурна схема процесу активного вентилявання зерна як об'єкта керування

На рис. 1  $\bar{t}_1, \bar{d}_1(\bar{\varphi}_1)$  – температура й вологовміст (відносна вологість) повітря, що надходить в установку;  $\bar{\Theta}, \bar{\omega}$  – температура й вологість вентиляваної зернової маси. А передатні функції відповідно:

$$W_{31}(p) = \frac{1}{2p^2 + 15p + 1}; \quad W_{42}(p) = \frac{0,08}{2p^2 + 15p + 1}; \quad W_{71}(p) = \frac{0,9}{60p + 1}; \quad W_{82}(p) = \frac{1}{60p + 1}.$$

У якості вхідних впливів на рис. 1 позначені температура й вологість повітря. Але якщо величину температури можна легко змінювати в широких межах, то маніпулювати вологістю досить складно (просто, хіба що, убик збільшення). Тому для подальших розрахунків при розрахунку параметрів регулятора задамося в якості єдиного керуючого впливу температурою вхідного повітря.

Введемо наступні позначення:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \bar{t}_1 \\ \bar{d}_1(\bar{\varphi}_1) \end{bmatrix} \text{ – вектор вхідних сигналів; } \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \bar{\Theta} \\ \bar{\omega} \end{bmatrix} \text{ – вектор вихідних координат.}$$

Матриця-вектор передатних функцій об'єкта керування має вигляд:

$$\mathbf{W}_{\text{OK}} = \begin{bmatrix} W_{31} \\ W_{71} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Тоді

$$\mathbf{x} = \mathbf{W}_{\text{OK}} \mathbf{u} + \boldsymbol{\psi} = \begin{bmatrix} W_{31} \\ W_{71} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{t}_1 \\ \bar{d}_1(\bar{\varphi}_1) \end{bmatrix} + \boldsymbol{\psi} = \begin{bmatrix} W_{31} \bar{t}_1 \\ W_{71} \bar{t}_1 \end{bmatrix} + \boldsymbol{\psi} = \begin{bmatrix} \bar{\Theta} \\ \bar{\omega} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де  $\boldsymbol{\psi} = \begin{bmatrix} \psi_{\Theta} \\ \psi_{\omega} \end{bmatrix}$  – вектор випадкових збурень,

$\psi_{\Theta}$  і  $\psi_{\omega}$  – випадкові відхилення по температурі й вологості.

Підставимо в співвідношення (1) значення й запишемо матрицю-вектор передатних функцій у вигляді добутку двох інших:

$$\mathbf{W}_{\text{OK}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2p^2 + 15p + 1} \\ \frac{0,9}{60p + 1} \end{bmatrix} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{M}. \quad (3)$$

Нехай

$$\mathbf{P}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2p^2 + 15p + 1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{60p + 1} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

тоді

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 2p^2 + 15p + 1 & 0 \\ 0 & 60p + 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

З огляду на вирази (3)-(5), можна записати

$$\mathbf{P} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{M} = \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 2p^2 + 15p + 1 & 0 \\ 0 & 60p + 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{1}{2p^2 + 15p + 1} \\ \frac{0,9}{60p + 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,9 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Повертаючись до виразу (2), відзначимо

$$\mathbf{x} = \mathbf{W}_{\text{OK}} \mathbf{u} + \boldsymbol{\psi} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{M} \mathbf{u} + \boldsymbol{\psi} \Rightarrow \mathbf{P} \mathbf{x} = \mathbf{M} \mathbf{u} + \mathbf{P} \boldsymbol{\psi}. \quad (7)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 2p^2 + 15p + 1 & 0 \\ 0 & 60p + 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,9 \end{bmatrix}.$$

З урахуванням вищевикладеного можемо в першому наближенні зобразити структурну схему багатомірної САК процесом активного вентилявання зерна в наступному вигляді (рис. 2).

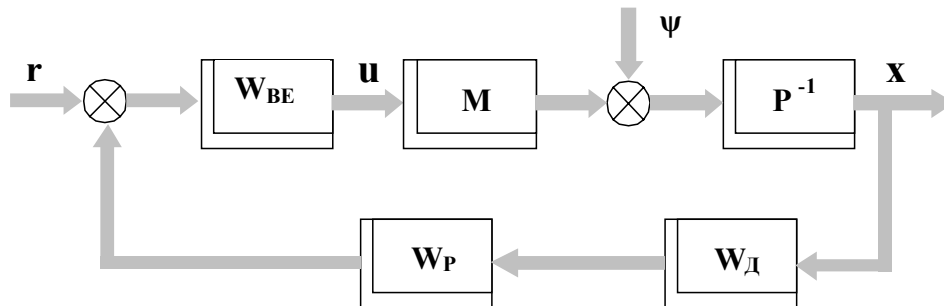


Рисунок 2 – Структурна схема багатомірної САК процесом активного вентилявання зерна в першому наближенні

На рис. 2 є наступні нові позначення:

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} \bar{\Theta}_3 \\ \bar{\omega}_3 \end{bmatrix} - \text{матриця-вектор завдання } (\bar{\Theta}_3 = \text{const}; \bar{\omega}_3 = \text{const});$$

$\mathbf{u}$  – матриця-вектор керуючого впливу;

$\mathbf{W}_{\text{BE}}$  – матриця-вектор передатних функцій виконавчого елемента (теплогенератора);

$\mathbf{W}_{\text{D}}$  – матриця-вектор передатних функцій датчиків (температури й вологості зерна);

$\mathbf{W}_{\text{P}}$  – матриця-вектор передатних функцій регулятора.

З огляду на те, що

$$\mathbf{x} = \tilde{\mathbf{x}} + \Delta\mathbf{x} ; \quad \mathbf{r} = \tilde{\mathbf{r}} ,$$

де  $\tilde{\mathbf{x}}$  й  $\tilde{\mathbf{r}}$  – середні значення, структурна схема САК може бути зведена до схеми класичної САР (рис. 3).

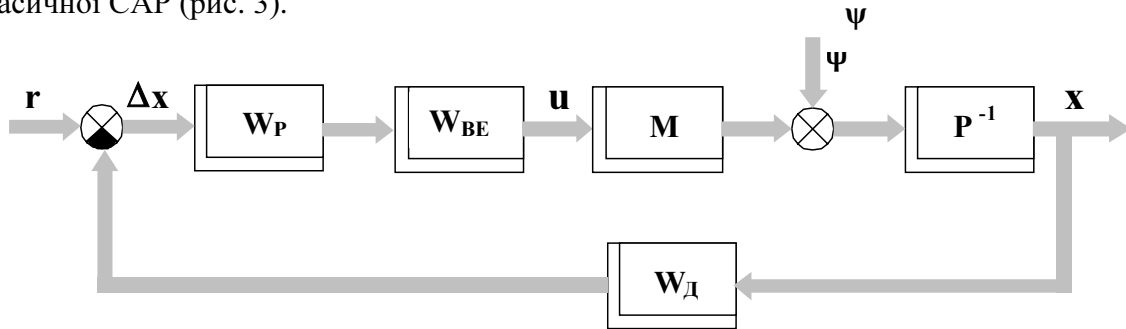


Рисунок 3 – Приведення структурної схеми САК до вигляду, характерного для САР

Оскільки в якості датчиків температури й вологості зерна у сучасних сушарках використовуються цифрові датчики, можна вважати [4], що їхні передатні функції являють собою звичайні коефіцієнти пропорційності, а випадковими складовими в них можна знехтувати. Тоді, у відповідність із розробками Блохіна Л. М. [6], завдання синтезу обраної системи зводиться до частинного випадку – так званого синтезу при «ідеальному» вимірюванні вхідних координат.

Для такого завдання структурна схема системи звичайно зображується в наступному вигляді (рис. 4).

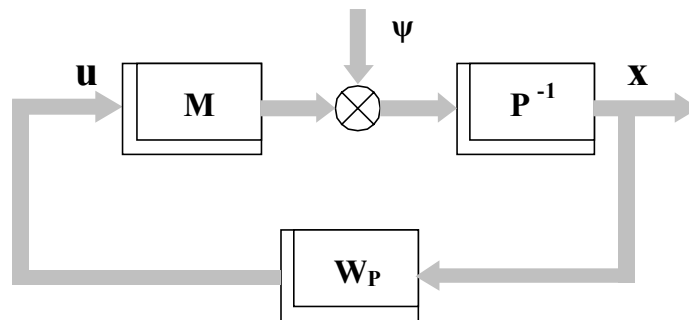


Рисунок 4 – Структура САК при «ідеальному» вимірюванні вхідних координат

На рис. 4 до складу регулятора включені датчики (температури й вологості) і виконавчий елемент (теплогенератор), тому передатна функція  $W_p$  містить у собі і їх відповідні передатні функції.

Будемо вважати, що температура  $\theta$  й вологість  $\omega$  є некорельованими процесами (оскільки зворотне не доведене).

Виходячи з довідкових даних, можемо записати, що для процесу сушіння зерна математичне сподівання й дисперсія по температурі та вологості відповідно будуть мати вигляд:

$$m_{\theta} = 18^{\circ}C , \quad \sigma_{\theta} = 0,1 m_{\theta} = 1,8^{\circ}C ;$$

$$m_{\omega} = 11\% , \quad \sigma_{\omega} = 0,1 m_{\omega} = 1,1\% .$$

Вважаємо, що  $\psi$  – багатомірний (у нашому випадку – двомірний) стаціонарний випадковий процес, для якого найбільш несприятливим випадком проходження в системі завод є так званий «білий шум». Розглянемо цей випадок детальніше.

$$S_{\psi_{\theta}\psi_{\theta}}(p) = \frac{\sigma_{\theta}^2}{\pi} = 1,031324 ; \quad S_{\psi_{\omega}\psi_{\omega}}(p) = \frac{\sigma_{\omega}^2}{\pi} = 0,385155 .$$

По теоремі Вінера-Хінчина [6] для векторного випадкового процесу

$$\begin{aligned} S_{\psi\psi}(p) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} M \left\{ \begin{bmatrix} \psi_{\theta}(-p) \\ \psi_{\omega}(-p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{\theta}(p) & \psi_{\omega}(p) \end{bmatrix} \right\} = \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} M \left\{ \begin{bmatrix} \psi_{\theta}(-p)\psi_{\theta}(p) & \psi_{\theta}(-p)\psi_{\omega}(p) \\ \psi_{\omega}(-p)\psi_{\theta}(p) & \psi_{\omega}(-p)\psi_{\omega}(p) \end{bmatrix} \right\} = \\ &= \begin{bmatrix} S_{\psi_{\theta}\psi_{\theta}}(p) & S_{\psi_{\theta}\psi_{\omega}}(p) \\ S_{\psi_{\omega}\psi_{\theta}}(p) & S_{\psi_{\omega}\psi_{\omega}}(p) \end{bmatrix} . \end{aligned} \quad (8)$$

Оскільки зміна температури й вологості – некорельовані процеси, то справедлива рівність

$$S_{\psi_{\theta}\psi_{\omega}}(p) = S_{\psi_{\omega}\psi_{\theta}}(p) = 0 . \quad (9)$$

Таким чином

$$S_{\psi\psi}(p) = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_{\theta}^2}{\pi} & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_{\omega}^2}{\pi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,031324 & 0 \\ 0 & 0,385155 \end{bmatrix} . \quad (10)$$

Для визначення стійкості об'єкта достатньо знайти корені рівняння

$$\det(\mathbf{P}) = 0$$

і визначити знак їхніх дійсних частин. Стійкість буде доведена, якщо дійсні частини коренів негативні.

$$\begin{aligned} \det(\mathbf{P}) &= \det \left( \begin{bmatrix} 2p^2 + 15p + 1 & 0 \\ 0 & 60p + 1 \end{bmatrix} \right) = \\ &= (2p^2 + 15p + 1)(60p + 1) = 120p^3 + 902p^2 + 75p + 1 . \\ &120p^3 + 902p^2 + 75p + 1 = 0 . \end{aligned}$$

Скориставшись для знаходження коренів даного рівняння можливостями програмного пакета *MATLAB 6.5*, одержимо три дійсних негативних корені:

$$p_1 = - 7,4327; \quad p_2 = - 0,0673; \quad p_3 = - 0,0168.$$

Таким чином, аналіз об'єкта керування показав, що він являє собою стійкий динамічний об'єкт, на який впливають центровані стаціонарні випадкові процеси зміни температури й вологості зерна на вході сушарки зі знайденою матрицею спектральних щільностей  $\mathbf{S}_{\psi\psi}$ . Тоді для синтезу САК можна скористатися наступним алгоритмом [6].

Для замкненої системи (див. рис. 4) можуть бути записані співвідношення:

$$\mathbf{W}_p = \mathbf{F}_u \mathbf{F}_x^{-1} ; \quad (11)$$

$$\mathbf{F}_x = \mathbf{P}^{-1} (\mathbf{M} \mathbf{F}_u + \mathbf{E}_2) , \quad (12)$$

де  $\mathbf{W}_p$  – передатна функція (матриця передатних функцій) оптимального регулятора;

$\mathbf{F}_u$  – оптимальна передатна функція (матриця передатних функцій) замкненої системи від вектора  $\Psi$  до вектора  $\mathbf{u}$ ;

$\mathbf{F}_x$  – оптимальна передатна функція (матриця передатних функцій) замкненої системи від вектора  $\Psi$  до вектора  $\mathbf{x}$ .

У співвідношенні (12) вектор  $\mathbf{E}_2$  є діагональним одиничним:

$$\mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

а вектори  $\mathbf{M}$  та  $\mathbf{P}^{-1}$  були визначені раніше.

Тому завдання синтезу двомірної САК процесом активного вентилявання зерна зводиться до відшукування вектора  $\mathbf{F}_u$ .

Введемо позначення:

$$S_{\psi\psi}(p) = \mathbf{D} \mathbf{D}^* ; \quad (13)$$

$$\mathbf{\Gamma}^* \mathbf{\Gamma} = \mathbf{M}^* \mathbf{P}^*{}^{-1} \mathbf{R} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{M} + \mathbf{C} ; \quad (14)$$

$$\mathbf{N} = \mathbf{\Gamma}^*{}^{-1} \mathbf{M}^* \mathbf{P}^*{}^{-1} \mathbf{R} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{D} = \mathbf{N}_0 + \mathbf{N}_+ + \mathbf{N}_- , \quad (15)$$

де «\*» – знак Ермітового сполучення;

$\mathbf{D}$  – результат операції факторизації матриці  $S_{\psi\psi}(p)$ ;

$\mathbf{\Gamma}$  – результат факторизації виразу (14);

$\mathbf{N}_0$  – матриця, елементи якої – поліноми аргументу  $p$ ;

$\mathbf{N}_+$  – матриця, елементи якої – правильні дроби аргументу  $p$ , що мають полюси тільки в лівій напівплощині;

$\mathbf{N}_-$  – матриця, елементи якої – правильні дроби аргументу  $p$  з полюсами тільки в правій напівплощині.

Відповідно до алгоритму синтезу оптимальних систем стабілізації стійкого об'єкта при «ідеальному» вимірюванні його вихідних координат [6], ідеальна передатна функція (матриця передатних функцій) замкненої системи (див. рис. 4) від вектора  $\Psi$  до вектора  $\mathbf{u}$  може бути визначена за наступним виразом:

$$\mathbf{F}_u = -\mathbf{\Gamma}^{-1} (\mathbf{N}_0 + \mathbf{N}_+) \mathbf{D}^{-1} . \quad (16)$$

Оскільки в нашого об'єкта декларована ідеальність вимірювання вихідних параметрів, прийнемо

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = \lambda^2 ,$$

де  $\lambda$  - множник, що характеризує обмеження на керуючий вплив.

Отже

$$\mathbf{\Gamma}^* \mathbf{\Gamma} = \mathbf{M}^* \mathbf{P}^*{}^{-1} \mathbf{R} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{M} + \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0,9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2p^2 - 15p + 1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{-60p + 1} \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} \frac{1}{2p^2 + 15p + 1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{60p + 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0,9 \end{bmatrix} + \lambda^2 .$$

За допомогою *MATLAB 6.5* проведемо всі подальші обчислення при значенні  $\lambda = 1$ .

Представимо величину  $S_{\psi\psi}(p)$  (див. співвідношення (8), (10)) у вигляді добутку двох матриць-векторів

$$S_{\psi\psi}(p) = \mathbf{D} \mathbf{D}^* . \quad (17)$$

Тоді, виходячи з (10), одержуємо:

$$\mathbf{D} \mathbf{D}^* = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_{\theta}^2}{\pi} & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_{\omega}^2}{\pi} \end{bmatrix} . \quad (18)$$

Звідки можна знайти

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_{\theta}}{\sqrt{\pi}} & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_{\omega}}{\sqrt{\pi}} \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{D}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{\pi}}{\sigma_{\theta}} & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{\pi}}{\sigma_{\omega}} \end{bmatrix} . \quad (19)$$

$$\mathbf{\Gamma}^{-1} = \frac{(p + 0,06727)(p + 0,01667)(p + 7,433)}{(p + 0,09564)(p + 0,01911)(p + 7,432)} . \quad (20)$$

$$\mathbf{M}_* \mathbf{P}_*^{-1} = [1 \quad 0,9] \begin{bmatrix} \frac{1}{2p^2 - 15p + 1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{-60p + 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2p^2 - 15p + 1} & \frac{0,9}{-60p + 1} \end{bmatrix} . \quad (21)$$

Для зручності наступної обробки результатів обчислень поліноми в чисельниках і знаменниках останнього виразу представимо в нормальній формі з нулями й полюсами:

$$\mathbf{M}_* \mathbf{P}_*^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{0,5}{(-p + 7,433)(-p + 0,06727)} & \frac{0,015}{-p + 0,01667} \end{bmatrix} . \quad (22)$$

На підставі виразів (20) (після Ермітового сполучення  $\mathbf{\Gamma}^{-1}$ ) і (22), одержимо

$$\mathbf{\Gamma}_*^{-1} \mathbf{M}_* \mathbf{P}_*^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{(-p + 0,01667) \cdot 0,5}{(-p + 7,432)(-p + 0,09564)(-p + 0,01911)} \\ \frac{0,015 \cdot (-p + 7,433)(-p + 0,06727)}{(-p + 7,432)(-p + 0,09564)(-p + 0,01911)} \end{bmatrix} . \quad (23)$$

Представимо вирази (15) у вигляді матриці-рядка:

$$\mathbf{N}_0 + \mathbf{N}_+ + \mathbf{N}_- = [N_{11} \quad N_{12}] . \quad (24)$$

$$\begin{aligned}
N_{11} &= \frac{0,25 \cdot (-p + 0,016667) \cdot \sigma_{\omega}}{(-p + 0,09564)(-p + 0,01911)(-p + 7,432)(p + 7,433)(p + 0,016667) \cdot \sqrt{\pi}} = \\
&= \frac{\sigma_{\omega}}{\sqrt{\pi}} \cdot \left( \frac{-3,031799 \cdot 10^{-4}}{p + 7,433} + \frac{2,6996 \cdot 10^{-2}}{p + 6,727 \cdot 10^{-2}} \right) . \\
N_{12} &= \frac{0,015 \cdot 0,016667 \cdot (-p + 0,06727)(-p + 7,433) \cdot \sigma_{\omega}}{(-p + 0,09564)(-p + 0,01911)(-p + 7,432)(p + 0,016667) \cdot \sqrt{\pi}} = \\
&= \frac{\sigma_{\omega} \cdot 5,223357 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{\pi} \cdot (p + 1,6667 \cdot 10^{-2})} .
\end{aligned}$$

Виконуючи сепарацію підоператорного виразу (24) методом невизначених коефіцієнтів, одержимо:

$$\mathbf{N}_0 + \mathbf{N}_+ = \begin{bmatrix} \frac{0,026693 \cdot (p + 7,517) \cdot \sigma_{\omega}}{(p + 7,433)(p + 0,06727) \cdot \sqrt{\pi}} & \frac{5,223357 \cdot 10^{-2} \cdot \sigma_{\omega}}{(p + 1,6667 \cdot 10^{-2}) \cdot \sqrt{\pi}} \end{bmatrix} .$$

Помножимо  $\Gamma^{-1}$  на щойно отриманий вираз:

$$\Gamma^{-1}(\mathbf{N}_0 + \mathbf{N}_+) = [f_{11} \quad f_{12}] . \quad (25)$$

$$\begin{aligned}
f_{11} &= \frac{(p + 0,06727)(p + 0,01667)(p + 7,433)(p + 7,517) \cdot 0,026693 \cdot \sigma_{\omega}}{(p + 0,09564)(p + 0,01911)(p + 7,432)(p + 7,433)(p + 0,06727) \cdot \sqrt{\pi}} = \\
&= \frac{(p + 0,01667)(p + 7,517) \cdot 0,026693 \cdot \sigma_{\omega}}{(p + 0,09564)(p + 0,01911)(p + 7,432) \cdot \sqrt{\pi}} . \\
f_{12} &= \frac{(p + 0,06727)(p + 0,01667)(p + 7,433) \cdot 5,223357 \cdot 10^{-2} \cdot \sigma_{\omega}}{(p + 0,09564)(p + 0,01911)(p + 7,432)(p + 0,01667) \cdot \sqrt{\pi}} = \\
&= \frac{(p + 0,06727)(p + 7,433) \cdot 5,223357 \cdot 10^{-2} \cdot \sigma_{\omega}}{(p + 0,09564)(p + 0,01911)(p + 7,432) \cdot \sqrt{\pi}} .
\end{aligned}$$

З огляду на (16), за допомогою *MATLAB 6.5* визначаємо оптимальну передатну функцію  $\mathbf{F}_u$  замкненої системи (див. рис. 4):

$$\mathbf{F}_u = \begin{bmatrix} \frac{3,324 \cdot 10^{-4} p^2 + 2,497 \cdot 10^{-3} p + 4,15 \cdot 10^{-5}}{p^3 + 7,547 p^2 + 0,8546 p + 0,01358} & -\frac{0,05223 p^2 + 0,3918 p + 0,02612}{p^3 + 7,547 p^2 + 0,8546 p + 0,01358} \end{bmatrix} .$$

Тепер відшукаємо передатну функцію  $\mathbf{F}_x$  замкненої системи (див. рис. 4).

Відповідно до виразу (12),

$$\mathbf{F}_x = \mathbf{P}^{-1}(\mathbf{M} \mathbf{F}_u + \mathbf{E}_2) .$$

Поетапно підставимо в цей вираз вже знайдені нами величини.

$$(\mathbf{M} \mathbf{F}_u + \mathbf{E}_2) = \begin{bmatrix} \frac{(p + 7,432)(p + 0,1233)(p + 0,01848)}{(p + 7,432)(p + 0,09564)(p + 0,01911)} \\ \frac{0,052234 \cdot (p + 0,06727)(p + 7,433)}{(p + 7,432)(p + 0,09564)(p + 0,01911)} \end{bmatrix}$$



$$\left[ \frac{0,024024 \cdot (p+7,517)(p+0,01667)}{(p+7,432)(p+0,09564)(p+0,01911)} \cdot \frac{(p+0,1203)(p+0,04149)(p+7,432)}{(p+7,432)(p+0,09564)(p+0,01911)} \right]$$

Помноживши останній вираз на співвідношення (4), знайдемо передатну функцію  $F_x$ :

$$F_x = \left[ \frac{0,5 \cdot (p+0,01848)(p+0,1233)}{(p+7,433)(p+0,09564)(p+0,06727)(p+0,01911)} \cdot \frac{0,026117}{(p+7,432)(p+0,09564)(p+0,01911)} \cdot \frac{0,00040039 \cdot (p+7,517)}{(p+0,01911)(p+0,09564)(p+7,432)} \cdot \frac{0,016667 \cdot (p+0,1203)(p+0,04149)}{(p+0,01667)(p+0,01911)(p+0,09564)(p+7,432)} \right]$$

Тепер необхідно відшукати  $F_x^{-1}$ .

Після ряду спрощень запишемо:

$$F_x^{-1} = \frac{(p+0,09564)(p+0,019)(p+7,432)}{(p+0,01329)(p+0,0037)(p+0,0749)(p+0,2104)} \times \left[ \begin{aligned} & 2 \cdot (p+0,1203)(p+0,06727)(p+0,04142) \\ & - 0,048046 \cdot (p+7,517)(p+0,06727)(p+0,01667) \\ & - 3,134 \cdot (p+0,06727)(p+0,01667) \\ & 59,9988(p+0,19)(p+0,01667)(p+0,1233) \end{aligned} \right]$$

І, нарешті, по формулі (11) визначимо передатну функцію оптимального регулятора:

$$W_p = F_u F_x^{-1} = [W_{11} \quad W_{12}]$$

$$W_{11} = -5,0876 \cdot 10^{-2} p - 3,64 \cdot 10^{-1} + \frac{1,26 \cdot 10^{-1}}{p+2,104 \cdot 10^{-1}} + \frac{-3,35 \cdot 10^{-4}}{p+7,49 \cdot 10^{-2}} + \frac{-1 \cdot 10^{-2}}{p+1,329 \cdot 10^{-2}} + \frac{4,2 \cdot 10^{-2}}{p+3,7 \cdot 10^{-3}} ; \quad (26)$$

$$W_{12} = -3,134 p - 23,507 + \frac{8,04 \cdot 10^{-1}}{p+2,104 \cdot 10^{-1}} + \frac{-1,24 \cdot 10^{-1}}{p+7,49 \cdot 10^{-2}} + \frac{7,05 \cdot 10^{-1}}{p+1,329 \cdot 10^{-2}} + \frac{2,98}{p+3,7 \cdot 10^{-3}} . \quad (27)$$

Для перевірки оптимальності параметрів настроювання регулятора в програмному середовищі *Simulink* було проведено комп'ютерне моделювання двомірної САК процесом активного вентилявання. У ході моделювання з'ясувалося, що регулятор САК може бути істотно спрощений. Так відкидання в передаточних функціях  $W_{11}$  (по каналу температура-температура) і  $W_{12}$  (по каналу температура-

вологість) чотирьох останніх доданків не робить істотного впливу на роботу системи.

На рис. 5 представлені графіки перехідних процесів у системі по двох каналах відповідно до співвідношень (26), (27) і практично співпадаючі з ними графіки «усіченого» регулятора, з параметрами

$$W_{11} = -5,0876 \cdot 10^{-2} p - 3,64 \cdot 10^{-1} ; \quad (28)$$

$$W_{12} = -3,134 p - 23,507 . \quad (29)$$

Спрощення передатних функцій регулятора до вигляду (28), (29) дозволяє легше реалізувати його на практиці.

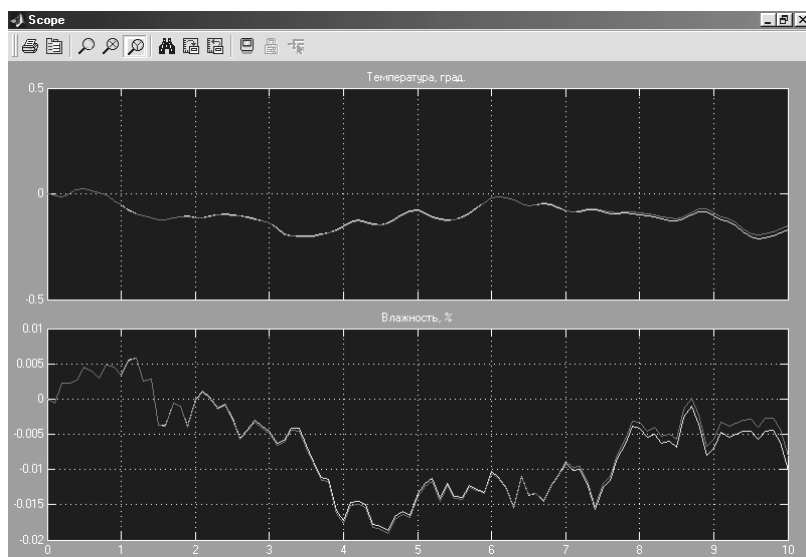


Рисунок 5 – Графіки перехідних процесів у САК по температурі й вологості

Аналіз графіків рис. 5 показав, що відхилення по температурі зерна не перевищують  $0,2^{\circ}\text{C}$ , а по його вологості –  $0,02\%$ . Бачимо, що обрані параметри регулятора дозволяють повністю задовольнити поставлені до останнього вимоги.

## Список літератури

1. Анискин В. И., Рыбарух В. А. Теория и технология сушки во временной консервации зерна активным вентилярованием. – М.: ВИМ, 1972. – 174 с.
2. Автоматизация технологических процессов пищевых производств / Под ред. Е. Б. Карпина. – М.: Пищевая промышленность, 1977. – 432 с.
3. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем. – М.: Госфизматгиз, 1963. – 552 с.
4. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. Пер. с англ. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.
5. Автоматика и автоматизация производственных процессов / И. И. Мартыненко, Б. Л. Головинский, Р. Д. Проценко, Т. Ф. Резниченко. – М.: Агропромиздат, 1985. – 335 с.
6. Блохин Л. Н. Оптимальные системы стабилизации. – К.: Техніка, 1982. – 144 с.

На основе специальных алгоритмов обработки матриц-векторов входных и выходных сигналов определены оптимальные параметры настройки регулятора многомерной системы автоматического управления активным вентилярованием зерна.

On the basis of special algorithms of matrixes-vectors processing of entrance and target signals the regulators optimum settings of the multi-channel automatic control system by active ventilate of a grain are determined.