

## УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ ВИСОКОТОЧНОГО ДОЗУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

*Л.В. Аніскевич, доктор технічних наук*

*Проведено аналіз можливостей високоточного дозування технологічних матеріалів у випадках непередбачених змін величин динамічних параметрів дозуючих систем в технологіях точного землеробства з використанням методів оптимального управління технічними системами.*

***Дозування, технологічний матеріал, оптимальне управління.***

**Постановка проблеми.** При проведенні таких технологічних операцій, як сівба, або при внесенні добрив, пестицидів, мікроелементів тощо в технологіях точного землеробства (ТЗ) необхідно забезпечити як високоточне дозування технологічних матеріалів (ТМ), так і високу просторову точність доставки останніх в задану точку поля.

При цьому слід зауважити, що умови виконання механізованих технологічних операцій в польових умовах характеризуються широким діапазоном перебігу різних збурюючих факторів – нерівностей поверхні поля, варіювання агробіологічних параметрів стану ґрунту, змін температурних режимів функціонування системи тощо. Динамічні параметри, які характеризують стан дозуючих систем сільськогосподарської машини, при цьому повинні мати оптимальні значення.

**Аналіз останніх досліджень.** Формування оптимального закону керування  $U(t)$  дозуючими системами машин-реалізаторів залежить від цілі керування, а також від наявності апріорної інформації про стан системи і про характер діючих на нього збурень.

Динамічний об'єкт регулювання – дозуюча система машини-реалізатора – також характеризується певним станом та величиною параметрів його складових елементів, а динаміка його поведінки в загальному випадку описується нелінійним векторним рівнянням виду:

$$\bar{x}' = f(\bar{x}, \bar{a}, t) + \varphi(\bar{x}, \bar{a}, t)\bar{U}, \quad (1)$$

де  $f(\bar{x}, \bar{a}, t)$  та  $\varphi(\bar{x}, \bar{a}, t)$  – відомі векторна та матрична функції;

$\bar{x}$  – вектор стану об'єкта;

$\bar{a}$  – вектор параметрів об'єкта;

$\bar{U}$  – вектор керуючих дій.

При вирішенні задач аналітичного конструювання оптимальної системи керування щільністю розподілу ТМ по площі поля можна використати алгоритм побудови оптимальних систем керування, що базується на прямій постановці задачі аналітичного конструювання оптимальних регуляторів [1].

Розглянемо можливість застосування алгоритму оптимального управління по Красовському О.А. [2] на прикладі функціонування пневматичної висівної системи зернової сівалки для технологій змінних норм внесення (ЗНВ) ТМ [3] (рис. 1).

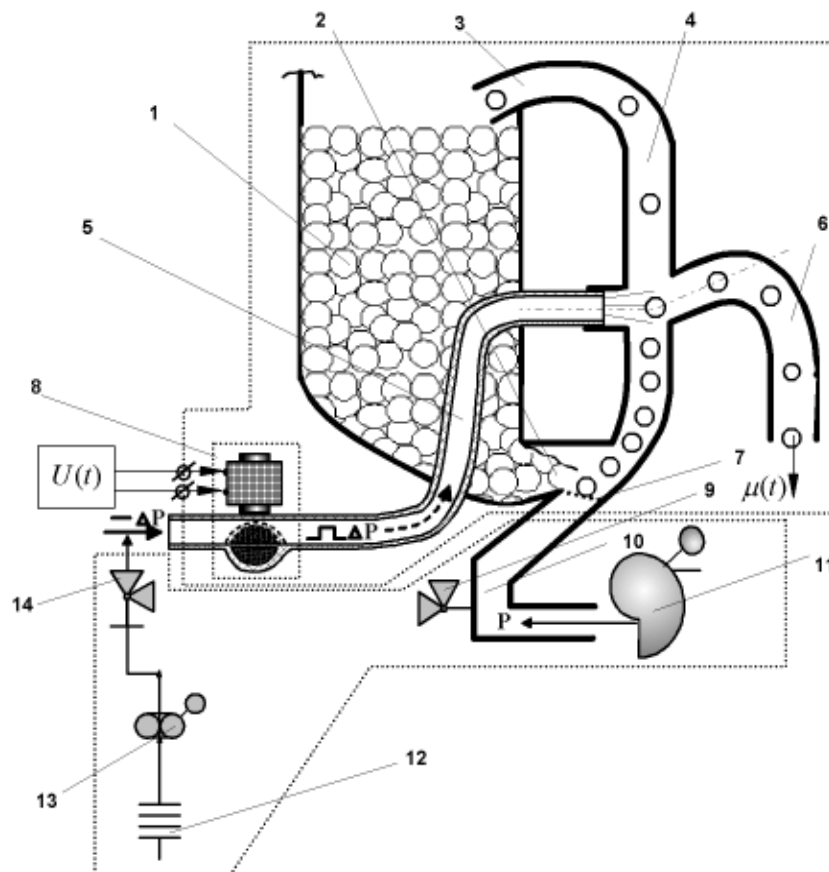


Рис. 1. Пневматична висівна система зернової сівалки для технологій ТЗ.

Висівна система складається з бункера для насіння 1, забірної камери 2; патрубка повернення надлишкового насіння 3; робочої камери 4; ежекторного патрубка 5; насіннепроводу 6; сітки 7; магнітного клапана керування висівом насіння 8, регулятора тиску 9, вмонтованого в повітропровід 10; вентилятора 11; фільтра 12; мотор-компресора 13; регульованого дроселя 14.

В режимі змінних норм сівби, спеціально сформовані імпульси електричного струму подаються на магнітний клапан 8. Це призводить до утворення керованого імпульсного потоку повітря  $\Delta P$ . Необхідний тиск повітря забезпечується мотор-компресором 13, що

засмоктує повітря через фільтр 12. Одночасно з цим, вентилятор 11 подає постійний потік повітря в робочу камеру 4 по дотичній до її внутрішньої поверхні. В цю ж камеру із забірної камери 2 самопливом і за рахунок енергії потоку повітря, що проходить через сітку 7, подається в робочу камеру 4 насіння, що захоплюється потоком повітря і рухається вгору по вертикальній частині робочої камери 4. З ежекторного патрубку 5 виходить імпульсний потік повітря  $\Delta P$  і виносить насіння з робочої камери 4 в насіннепровід 6, вісі яких лежать в одній вертикальній площині. Далі відбувається переміщення насіння до місця заробки в ґрунт традиційним засобом. Насіння, що не потрапило в насіннепровід, по патрубку 3 повертається в бункер 1.

**Результати досліджень.** Блок-схема оптимального управління інтенсивністю вихідного потоку насіння в одному з каналів описаної пневматичної висівної системи наведена на рис. 2.

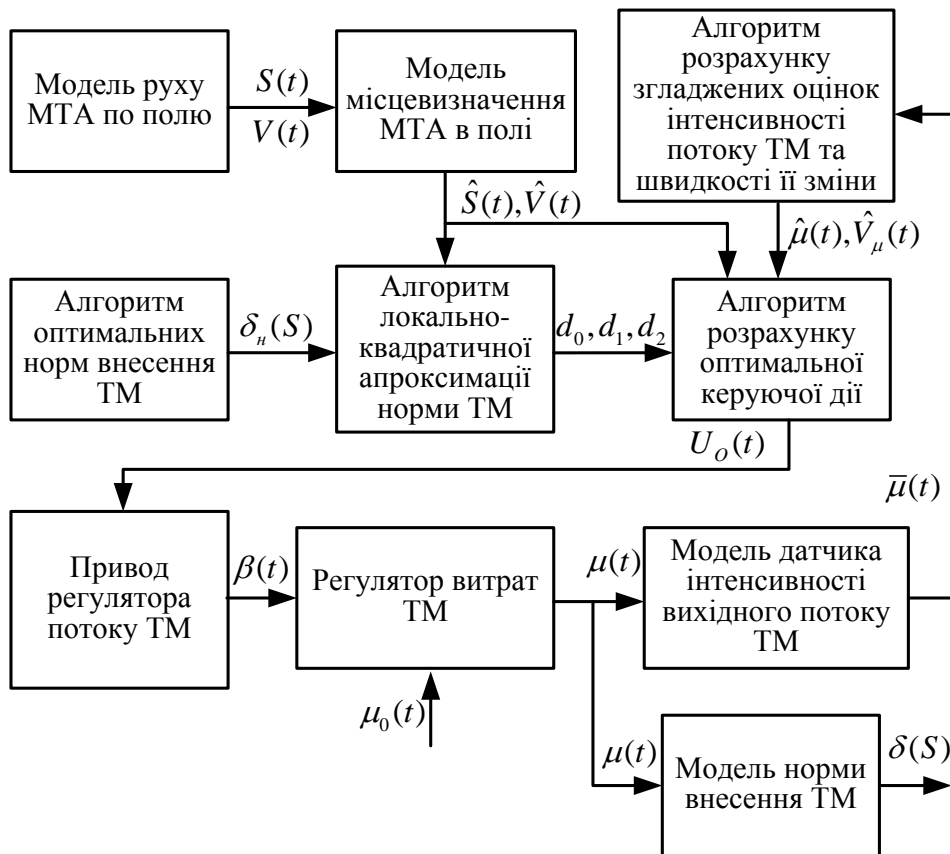


Рис. 2. Блок-схема системи оптимального управління інтенсивністю вихідного потоку насіння в одному з каналів висівної системи.

Модель динаміки процесу керування інтенсивністю потоку насіння описується векторним диференціальним рівнянням виду:

$$\dot{\bar{x}} = A\bar{x} + BU(t), \quad (2)$$

де  $A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & 0 \end{vmatrix}$ ;  $B = \begin{vmatrix} b_{11} \\ 0 \end{vmatrix}$ ;  $\bar{x}(t) = \begin{vmatrix} V_{\mu}(t) \\ \mu(t) \end{vmatrix}$ ;  $a_{11} = -\frac{2\xi}{T}$ ;  $a_{12} = -\frac{1}{T^2}$ ;  $a_{21} = 1$ ;  $b_{11} = \frac{K}{T^2}$ ;

$\xi$  – коефіцієнт затухання;

$T$  – стала часу;

$K$  – коефіцієнт підсилення;

$\mu(t)$  – середня інтенсивність вихідного модульованого потоку насіння;

$V_{\mu}(t) = \mu'(t)$ ;  $U(t)$  – керуюча дія, що подається на вхід клапана 8 керування нормою висіву насіння (рис. 1).

Модель датчика інтенсивності потоку ТМ описується рівняннями:

$$\begin{cases} \bar{\mu}(t) = \tilde{\mu}(t) \left[ 1 + \Delta_{\mu}(t) + \Delta_{\xi\mu}(t) \right]; \\ \tilde{\mu}'(t) = -\frac{1}{T_D} [\tilde{\mu}(t) - \mu(t)], \end{cases} \quad (3)$$

де  $\bar{\mu}(t)$  – вихідний сигнал датчика;

$\tilde{\mu}(t)$  – проміжна змінна величина;

$\Delta_{\mu}(t)$  та  $\Delta_{\xi\mu}(t)$  – систематична та шумова складові відносної помилки вимірювань;

$T_D$  – стала часу датчика, що характеризує його інерційність;

Для вирішення задачі оптимального слідкування в постановці Красовського необхідно розглянути функціонал з ковзним інтервалом оптимізації  $\Delta T$  виду:

$$I_K = \frac{1}{2} \int_t^{t+\Delta T} \left[ \Delta\bar{x}^T(\vartheta) \hat{Q} \Delta\bar{x}(\vartheta) + \bar{U}^T C^{-1} \bar{U} + \bar{U}_o^T C^{-1} U_o \right] d\vartheta, \quad (4)$$

де  $\Delta\bar{x}(\vartheta) = \bar{x}(\vartheta) - \bar{x}_3(\vartheta)$ ;  $\bar{x}_3(\vartheta)$  – необхідний вектор стану об'єкту керування;

$\hat{Q}$  – позитивно визначена матриця;

$C$  – симетрична позитивно визначена матриця;

$\bar{U}_o$  – вектор оптимальних керуючих дій.

У випадку лінійної стаціонарної моделі регулятора норми внесень ТМ машини-реалізатора, точному оптимальному алгоритму слідкування для випадку функціонала (4) відповідає формула:

$$\bar{U}_o(t) = -CB^T \left\{ \int_0^{\Delta T} W^T(\tau) \hat{Q} [W(\tau)\bar{x}(t) - \hat{\bar{x}}_3(\tau)] d\tau \right\}, \quad (5)$$

де  $W(\tau)$  – перехідна матриця моделі динаміки регулятора ЗНВ ТМ;

$\hat{\bar{x}}_3(\tau) = \bar{x}_3(t + \tau)$ .

У функціоналі (4) величина  $C$  виражає позитивний ваговий коефіцієнт, а матриця  $\hat{Q}$ , що входить в цей вираз, для даного випадку має вигляд:

$$\hat{Q} = \begin{vmatrix} q_{11} & 0 \\ 0 & q_{22} \end{vmatrix}; \quad q_{11} > 0; \quad q_{22} > 0.$$

В оптимальному алгоритмі слідування (5) в підінтегральний вираз в правій частині входить прогнозована задана дія  $\hat{x}_3(\tau)$  для  $\tau \in [0, \Delta T]$ :

$$\hat{x}_3(\tau) = \begin{pmatrix} \frac{\partial \delta_n[\hat{S}(\tau)]}{\partial \hat{S}} \hat{V}^2(t) \\ \delta_n[\hat{S}(\tau)] \hat{V}(t) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

де  $\delta_n[\hat{S}(\tau)]$  – необхідна норма сівби;

$\hat{V}(t)$  – оцінка швидкості руху сівалки;

$\hat{S}(\tau) = \hat{V}(t)\tau$  – прогнозоване переміщення сівалки.

Слід зазначити, що якість виконання заданого режиму функціонування машини-реалізатора певною мірою залежить від того, наскільки точно співпадають взяті з картограми-завдання значення заданих норм внесення ТМ з тими, що дійсно необхідні на кожний конкретний момент місцезнаходження МТА в полі. Залежить це від кроку періодизації даних в електронній цифровій картограмі-завданні і конкретних значень координат МТА в полі. Бажано уточнювати, за рахунок проведення операції апроксимації, цифрові дані, які вибираються з електронної картограми-завдання. Для цього застосуємо процедуру локально-квадратичної апроксимації, що дасть змогу отримувати дані з картограми-завдання точно для тих координат, де у цю мить знаходиться МТА. Тоді, якщо залежність  $\delta_n[\hat{S}(\tau)]$  апроксимувати квадратичною функцією виду:

$$\delta_n[\hat{S}(\tau)] = d_0 + d_1\hat{S} + d_2\hat{S}^2, \quad (7)$$

де  $d_0, d_1, d_2$  – коефіцієнти локально квадратичної апроксимації норми сівби, то замість (6) буде:

$$\hat{x}_3(\tau) = \begin{pmatrix} C_1 + C_2\tau \\ C_0 + C_3\tau + C_4\tau^2 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

де  $C_1 = d_1\hat{V}^2(t)$ ;  $C_2 = 2d_2\hat{V}^3(t)$ ;  $C_3 = d_1\hat{V}^2(t)$ ;  $C_4 = d_2\hat{V}^3(t)$ ;  $C_0 = d_0\hat{V}(t)$ ;

Проведення оптимального керування інтенсивністю вихідного потоку ТМ (або потоку насіння в одному з каналів висівної системи, як для обраного прикладу) при роботі машини-реалізатора пов'язано

з необхідністю отримання оцінок фактичної  $\widehat{\mu}(t)$  інтенсивності вихідного потоку ТМ та швидкості зміни цієї інтенсивності:

$$\widehat{\mu}'(t) = b \left\{ \frac{\partial \widehat{\delta}_n[\widehat{x}_T(t)]}{\partial x_T} \widehat{V}(t) + \widehat{\delta}_n[\widehat{x}_T(t)] \widehat{V}'(t) \right\}, \quad (9)$$

де  $\widehat{x}_T$  – оцінка координати переміщення МТА вздовж центральної лінії технологічної колії.

В праву частину виразу (9) входять оцінки компоненти градієнту необхідної щільності внесення ТМ вздовж лінії технологічної колії, а також повздовжнього прискорення МТА.

Для отримання оцінки  $\widehat{\mu}(t)$  в аналітичному вигляді по вихідній інформації датчика інтенсивності, а також для згладжування шумових складових похибки та компенсації динамічної похибки датчика доцільно виконати апроксимацію показників датчика поліномом другого порядку на ковзному інтервалі часу  $[t - \Delta T, t]$ :

$$\widetilde{\mu}(\tau) = a_{i0} + a_{i1}\tau + a_{i2}\tau^2; \quad \tau \in [0, \Delta T], \quad (10)$$

де  $a_{i0}, a_{i1}, a_{i2}$  – коефіцієнти апроксимації.

Якщо  $\widehat{\mu}_j(t), j = 1, 2, \dots, m$  - сукупність дискретних значень вихідного сигналу датчика, що зафіксовані в моменти часу  $t - \Delta T + \Delta\tau(j-1)$ , де  $\Delta\tau = \frac{\Delta T}{m-1}, j = 1, 2, \dots, m; m > 3$ , то найкращі, в сенсі мінімуму середньоквадратичної похибки процесу апроксимації, оцінки коефіцієнтів апроксимації визначаються по формулі:

$$\bar{a}_{ii} = H^+ \bar{y}, \quad (11)$$

де  $\bar{y} = (\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2, \dots, \bar{\mu}_m)^T$ ;

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & \Delta\tau & \Delta\tau^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & (m-1)\Delta\tau & [(m-1)\Delta\tau]^2 \end{pmatrix};$$

"+" – ознака операції псевдообернення матриці, яка (операція) може бути виконана з використанням алгоритму Гревілья [4].

З урахуванням виразів системи (3) можна написати наступні аналітичні вирази для згладжених оцінок інтенсивності вихідного потоку ТМ та швидкості його зміни:

$$\widehat{\mu}(t) = \widetilde{\mu}(t) + T_D \widetilde{\mu}'(t); \quad (12)$$

$$\widehat{\mu}'(t) = \widetilde{\mu}'(t) + T_D \widetilde{\mu}''(t); \quad (13)$$

$$\widetilde{\mu}(t) = \bar{a}_{i0} + \bar{a}_{i1}\Delta T + \bar{a}_{i2}\Delta T^2; \quad (14)$$

$$\widetilde{\mu}'(t) = \bar{a}_{i1} + 2\bar{a}_{i2}\Delta T; \quad (15)$$

$$\widetilde{\mu}''(t) = 2\bar{a}_{i2} \quad (16)$$

Для моделі динаміки об'єкту керування виду (2) вирази для елементів перехідної матриці  $W(\tau)$  у виразі вектора оптимальних керуючих дій (5) представляється можливим записати в наступній аналітичній формі:

– для випадку  $\xi \neq 1$ :

$$\begin{aligned} W_{11}(\tau) &= \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[ -\lambda_1 e^{\lambda_1 \tau} + \lambda_2 e^{\lambda_2 \tau} \right]; \\ W_{12}(\tau) &= \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[ e^{\lambda_1 \tau} - e^{\lambda_2 \tau} \right]; \\ W_{21}(\tau) &= \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[ -e^{\lambda_1 \tau} + e^{\lambda_2 \tau} \right]; \\ W_{22}(\tau) &= \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[ \lambda_2 e^{\lambda_1 \tau} + \lambda_1 e^{\lambda_2 \tau} \right], \end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{де } \lambda_1 = \frac{-\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}}{T}; \lambda_2 = \frac{-\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}}{T};$$

для випадку  $0 < \xi < 1$ :

$$\lambda_1 = -a + ib; \lambda_2 = -a - ib; \quad (18)$$

$$\text{де } a = \frac{\xi}{T}; b = \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T}; \lambda_1 + \lambda_2 = -2a = -\frac{2\xi}{T}; \lambda_1 \lambda_2 = a^2 + b^2 = \frac{1}{T^2};$$

$$\lambda_2 - \lambda_1 = -2ib = -\frac{2i\sqrt{1 - \xi^2}}{T}; (\lambda_2 - \lambda_1)^2 = -\frac{4(1 - \xi^2)}{T^2}; \cos \omega = \frac{1}{2}(e^{i\omega} + e^{-i\omega});$$

$$\sin \omega = \frac{1}{2i}(e^{i\omega} - e^{-i\omega}).$$

– для випадку  $\xi = 1$ :

$$\begin{aligned} W_{11}(\tau) &= \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) e^{\frac{\tau}{T}}; \\ W_{12}(\tau) &= -\frac{\tau}{T^2} e^{\frac{\tau}{T}}; \\ W_{21}(\tau) &= \tau e^{\frac{\tau}{T}}; \\ W_{22}(\tau) &= \left(1 + \frac{\tau}{T}\right) e^{\frac{\tau}{T}}. \end{aligned} \quad (19)$$

Аналіз наведених аналітичних викладок показує, що для випадку прогнозування на інтервалі  $[t, t + \Delta T]$  заданої норми внесення  $\hat{x}_3(\tau)$ ,  $\tau \in [0, \Delta T]$  виду (8) і виразів (17), (18) або (19) для елементів перехідної матриці  $W(\tau)$ , інтеграл в правій частині (5) можливо отримати в аналітичній формі:

$$\begin{aligned} U_o(t) &= P_1(C, K, \xi, T, \Delta T, q_{11}, q_{22}) \hat{V}_\mu(t) + P_2(C, K, \xi, T, \Delta T, q_{11}, q_{22}) \hat{\mu}(t) + \\ &P_3(C, K, \xi, T, \Delta T, q_{11}, q_{22}) d_0 \hat{V}(t) + P_4(C, K, \xi, T, \Delta T, q_{11}, q_{22}) d_1 \hat{V}^2(t) + \\ &P_5(C, K, \xi, T, \Delta T, q_{11}, q_{22}) d_2 \hat{V}^3(t). \end{aligned} \quad (20)$$

Суть проблем практичного застосування виразу (20) полягає в тому, що представлений алгоритм оптимізації керуючої дії базується на розрахунку оптимальних значень коефіцієнтів  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$ . Виконання цих обчислень, а також процедур ідентифікації та адаптації параметрів системи в реальних умовах сільськогосподарського поля вимагають певного часу – до одиниць секунд – і це призводить до погіршення виконання заданого технологічного процесу. Для зменшення часу виконання операцій оптимізації необхідно застосовувати більш потужні бортові обчислювальні процесорні системи, що тягне за собою збільшення фінансових витрат. Цей факт вимагає пошуку оригінальних шляхів оптимізації параметрів системи. Один з таких шляхів полягає в тому, що кожен з коефіцієнтів  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$  залежить як від параметрів системи, так і від параметрів певних функціоналів, а саме:

$$P_i = f(\xi, K, T, C, \Delta T, q_{11}, q_{22}), \quad (21)$$

де  $\xi, K, T$  якраз і виступають в якості динамічних характеристик системи, що можуть непередбачено змінюватися в процесі роботи.

З цього витікає, що адаптацію поведінки динамічної системи керування змінними нормами внесення ТМ машин-реалізаторів можливо провести не тільки за аналітичними формулами визначення коефіцієнтів  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$ , але і через пошук оптимальних їх значень шляхом проведення чисельної апроксимації в просторі значень  $\xi, K, T$  (рис. 3).

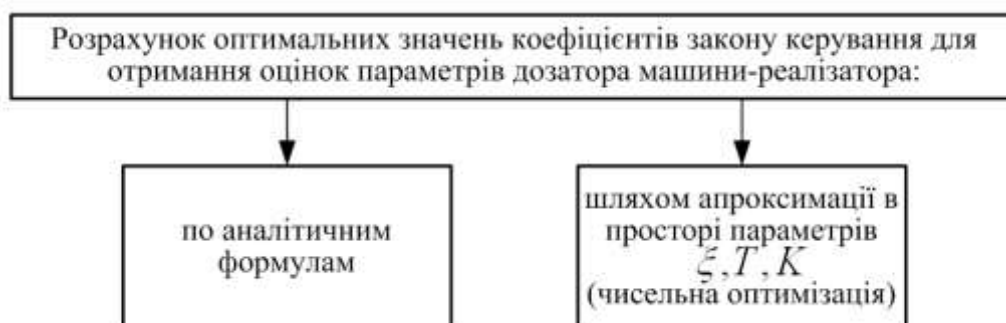


Рис. 3. Варіанти розрахунку значень коефіцієнтів  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$

Проведемо розрахунок коефіцієнтів  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$  для випадку розглянутого вище прикладу функціонування пневматичної висівної системи і, а також величини середньоквадратичних відхилень SD значень фактичної норми висіву насіння від заданої норми сівби з використанням процедури оптимізації динамічних параметрів системи і за умов, коли нижній, основний та верхній рівні для



кожного з фактичних значень параметрів  $\xi_{fact}$ ;  $T_{fact}$  та  $K_{fact}$  становить відповідно: 0.1, 0.3, 0.5; 0.4 с, 0.7 с, 1.0 с та 0.002, 0.004, 0.006.

Оптимальні значення коефіцієнтів  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$  в залежності від рівнів значень параметрів  $\xi, T$  і  $K$  розраховуються за аналітичними виразами (17-20) і зводяться в табличну форму.

На рис. 4 – рис. 6 представлені залежності величини середньоквадратичного відхилення SD різниці значень фактичної норми висіву насіння та заданої норми від фактичних значень динамічних характеристик системи  $\xi_{fact}$ ,  $T_{fact}$  та  $K_{fact}$ .

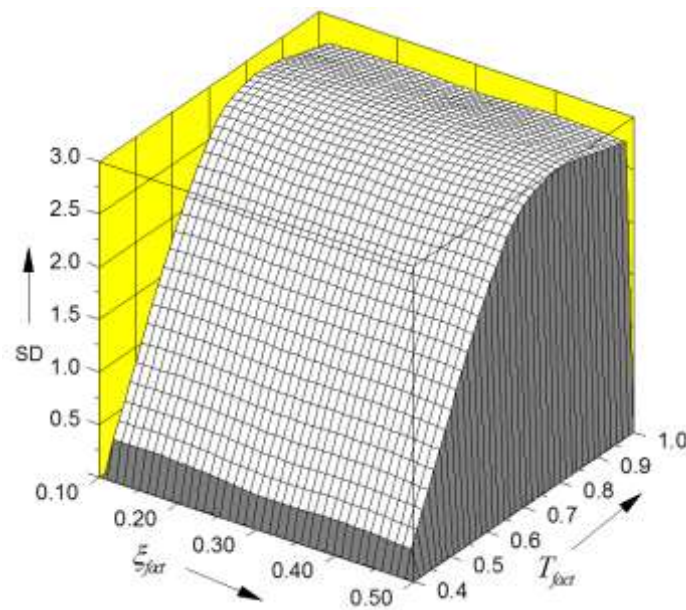


Рис. 4. Залежність величини середньоквадратичного відхилення SD від значень динамічних характеристик системи  $\xi_{fact}$  та  $T_{fact}$

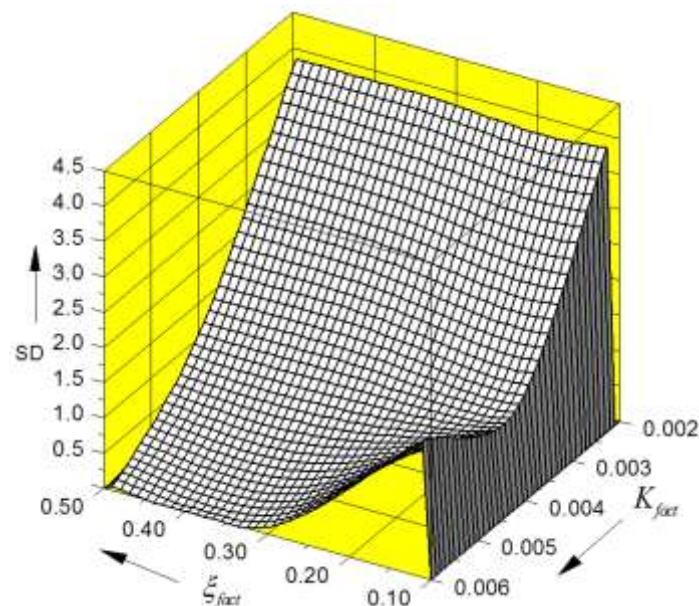


Рис. 5. Залежність величини середньоквадратичного відхилення SD від значень динамічних характеристик системи  $\xi_{fact}$  та  $K_{fact}$ .

Зокрема, з рис. 3 видно, що на зменшення величини SD сильно впливає величина параметру  $T_{fact}$ , у той час як  $\xi_{fact}$  в даному випадку практично не впливає на рівень SD. Але, коли розглядається варіант одночасної зміни параметрів  $\xi_{fact}$  та  $K_{fact}$  (рис. 4), то  $\xi_{fact}$  впливає на рівень SD значною мірою, так саме як і величина  $K_{fact}$ . У той же час, при сумісній зміні параметрів  $K_{fact}$  та  $T_{fact}$  (рис. 5), зміна величини коефіцієнту підсилення  $K_{fact}$  мало впливає на величину SD, а  $T_{fact}$  – сильно.

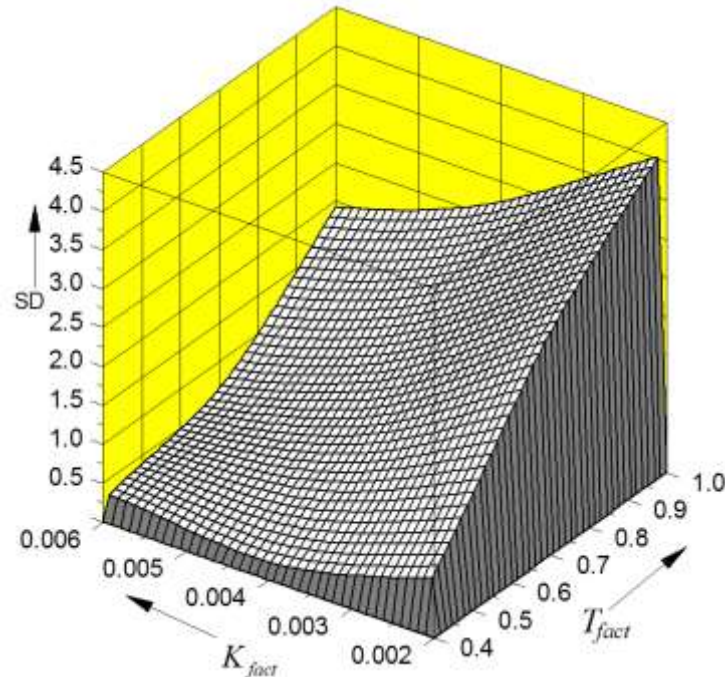


Рис. 6. Залежність величини середньоквадратичного відхилення SD від значень динамічних характеристик системи  $K_{fact}$  та  $T_{fact}$ .

Аналіз масиву даних з розрахунку коефіцієнтів  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$ , а також величини середньоквадратичної похибки SD значень фактичної норми висіву насіння від заданої норми сівби з використанням процедури оптимізації динамічних параметрів системи показує, що характер зміни означених залежностей можливо описати аналітичними рівняннями, наприклад, другого або більш високого порядку. Такий підхід має вагомим практичне значення, так як процедура апроксимації величин коефіцієнтів закону керування дозуючими системами машин-реалізаторів має простий алгоритм (на відміну від алгоритму оптимізації) і може виконуватись в польових умовах бортовим контролером машини-реалізатора з відносно низькою обчислювальною спроможністю (а значить і ціною). При цьому буде забезпечений високий рівень адаптації режимів роботи регульованих дозаторів при

непередбачених змінах динамічних параметрів об'єкту регулювання шляхом використання простих і дешевих (в фінансовому аспекті) рішень.

Для випадку квадратичної апроксимації, аналітичні рівняння, що описують поверхні варіацій  $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3, \Delta P_4, \Delta P_5$  відповідних коефіцієнтів закону регулювання інтенсивністю технологічного потоку, а також поверхні варіацій значень середньоквадратичної похибки реалізації заданої норми внесення ТМ ( $\Delta P_6$ ) в функції варіацій масштабних значень узагальнених параметрів об'єкту  $\Delta \hat{a}_1, \Delta \hat{a}_2, \Delta \hat{a}_3$  мають вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta P_l = & c_{l1} \Delta \hat{a}_1 + c_{l2} \Delta \hat{a}_2 + c_{l3} \Delta \hat{a}_3 + c_{l4} \Delta \hat{a}_1^2 + c_{l5} \Delta \hat{a}_2^2 + c_{l6} \Delta \hat{a}_3^2 + \\ & + c_{l7} \Delta \hat{a}_1 \Delta \hat{a}_2 + c_{l8} \Delta \hat{a}_1 \Delta \hat{a}_3 + c_{l9} \Delta \hat{a}_2 \Delta \hat{a}_3, \end{aligned} \quad (22)$$

$$l = 1, \dots, 6,$$

де  $\Delta P_l = P_l(\Delta \hat{a}_1, \Delta \hat{a}_2, \Delta \hat{a}_3) - P_{lop}$ ,  $l = 1, \dots, 6$  – межі відхилення фактичного значення параметра від його опорного значення при проведенні факторного експерименту;

$$\Delta \hat{a}_i = (a_i - a_{iop}) d_i, \quad i = 1, 2, 3;$$

$d_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) – масштабні коефіцієнти.

Значення узагальнених параметрів об'єкту  $\Delta \hat{a}_1, \Delta \hat{a}_2, \Delta \hat{a}_3$  в опорній точці запишуться так:

$$a_{1op} = \frac{K_{op}}{T_{op}^2}, \quad a_{2op} = -\frac{2\xi_{op}}{T_{op}}, \quad a_{3op} = -\frac{1}{T_{op}^2}. \quad (23)$$

де  $\xi_{op}, K_{op}, T_{op}$  – параметри системи в опорній точці.

В якості вихідних даних для розв'язання задачі апроксимації необхідно використати результати багаторазового вирішення задачі оптимізації закону керування у відповідності до наведеного вище алгоритму. Формат даних для аналізу залежності оптимальних значень коефіцієнтів  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$  від значень параметрів об'єкту  $\xi, T, K$  можна представити в табличній формі (табл. 1). В цій таблиці рядок табличних даних з центральними значеннями величин параметрів  $\xi, T$  і  $K$  відповідає опорній точці проведення операції апроксимації.

Вектор-стовпець коефіцієнтів апроксимації  $\hat{c}_l = (c_{l1}, c_{l2}, \dots, c_{l9})^T$ ,  $l = 1, \dots, 6$  розраховується по формулі:

$$\hat{c}_l = A^+ \Delta \bar{P}_l, \quad l = 1, \dots, 6, \quad (24)$$

де  $A^+$  – псевдообернена матриця розміром (для даного випадку)  $9 \times 26$  значень координатних функцій параметрів таблиці;

$\Delta P_l = (\Delta P_{l1}, \Delta P_{l2}, \dots, \Delta P_{l26})^T$ , – вектори-стовпці варіацій оптимальних значень  $P_1, \dots, P_6$  у вузлах табличних значень параметрів  $\xi, T, K$  відносно оптимальних значень в опорній точці.

### 1. Формат представлення даних для аналізу значень $\Delta P_l$ .

№ розрахунку	$\xi$	$T$	$K$	$P_1$	$P_2$	$P_l$	$P_6$
1	$\xi_1$	$T_1$	$K_1$	$P_{11}$	$P_{21}$	...	$P_{61}$
2	$\xi_2$	$T_2$	$K_2$	$P_{12}$	$P_{22}$	...	$P_{62}$
...	...	...	...	...	...	...	...
26	$\xi_{26}$	$T_{26}$	$K_{26}$	$P_{126}$	$P_{226}$	...	$P_{626}$

Для обчислення псевдооберненої матриці використовується алгоритм Гревілья, а в якості прикладу для проведення розрахунків використані дані у відповідності до обраного об'єкту – пневматичного імпульсного висівного дозатора.

Результати вирішення задачі включали значення псевдооберненої матриці  $A^+$ , матриці оцінок коефіцієнтів апроксимації  $c = (\hat{c}_1^T, \hat{c}_2^T, \dots, \hat{c}_6^T)^T$ , матриці варіацій вихідних та розрахункових оптимальних значень коефіцієнтів  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$  відносно опорного значення, матриці помилок апроксимації в 26 вузлах таблиці вихідних даних, а також величини середньоквадратичних відхилень коефіцієнтів апроксимації по 26 вузлам. Наприклад, на рис. 7 та рис. 8 представлені графіки зміни аналітичних та фактичних оптимальних значень коефіцієнтів  $P_2$  та  $P_3$ .

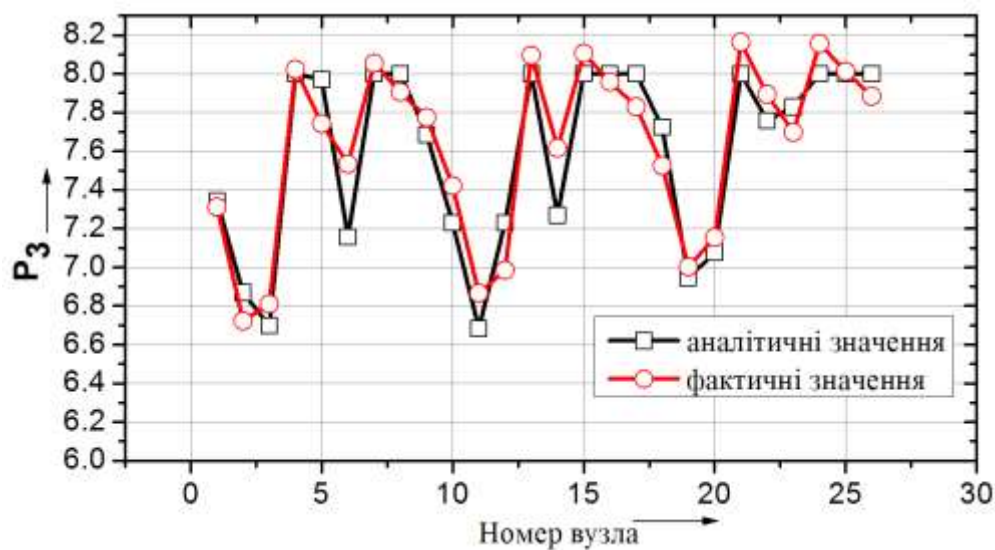


Рис. 7. Значення вихідних та розрахункових оптимальних значень коефіцієнту  $P_2$ .

Аналіз цих графіків показує, що фактичні значення коефіцієнтів  $P_2$  та  $P_3$  близько розташовані до аналітичних оптимальних значень цього коефіцієнту. Відносна величина середнього квадратичного відхилення фактичних значень коефіцієнтів від аналітичних складає 2,2 % та 1,7 % відповідно для  $P_2$  та  $P_3$ . Відносне математичне очікування помилок фактичних значень для всіх коефіцієнтів ( $P_1 \div P_5$ ) не перевищує 2,7 %. Значення середнього квадратичного відхилення нев'язки апроксимації по 26 вузлам для будь якого з коефіцієнтів закону керування не перевищує 0,21 г/м, а математичне сподівання помилки апроксимації для кожного з коефіцієнтів по всім 26 вузлам не перевищує 0.05 г/м.

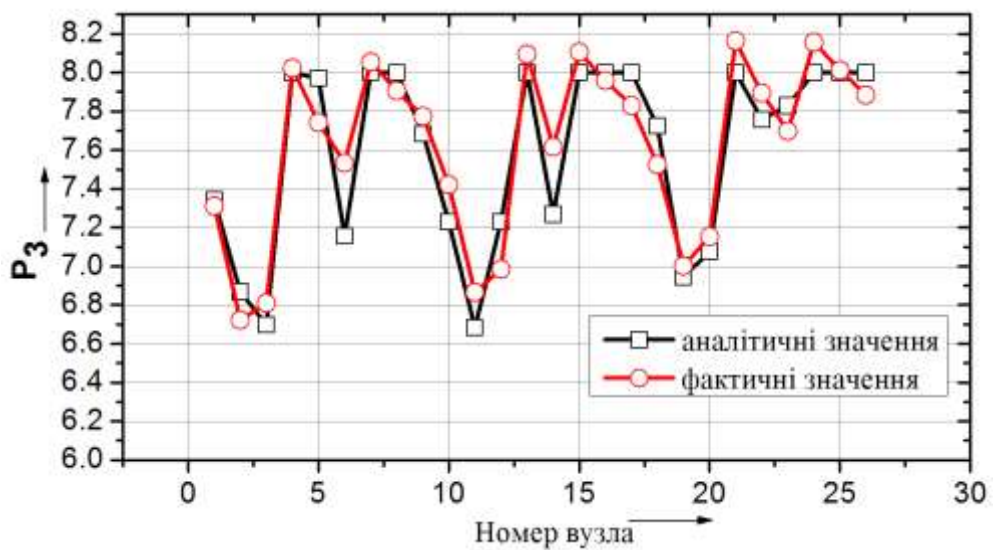


Рис. 8. Значення вихідних та розрахункових оптимальних значень коефіцієнту  $P_3$ .

Результати проведених досліджень дають підставу для наступних **ВИСНОВКІВ**:

1. Формування закону керування регулюючих систем дозаторів для технологій ЗНВ ТМ машин-реалізаторів в залежності від величин динамічних параметрів виконавчих органів, а також при непередбачених змінах цих параметрів в виробничих (польових) умовах ефективно проводити шляхом пошуку оптимальних значень коефіцієнтів закону керування через чисельну апроксимацію в просторі  $\xi, K, T$ .

2. Розроблена методика визначення оптимальних значень коефіцієнтів закону керування дозволяє рекомендувати до практичного застосування методи інтерполяції базових для вузлових точок оптимальних значень коефіцієнтів закону керування для змінних значень величин динамічних параметрів системи. В такому

випадку, на першому етапі проводиться інтерполяція величин оптимальних значень коефіцієнтів по двох вхідних параметрах (наприклад, по  $\xi iK$ ), а в наступному – ще по одному параметру (наприклад по  $T$ ). Операції інтерполяції можуть проводитись з високою швидкістю при мінімальних вимогах до обчислювальних потужностей процесорних систем спеціалізованого обладнання для змінних норм внесення ТМ.

### Список літератури

1. Куропаткин П.В. Оптимальные и адаптивные системы / П.В. Куропаткин. – М.: Высшая школа, 1980. – 288 с.
2. Красовский А.А. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами / Красовский А.А., Буков В.Н., Шендрик В.С. – М.: Наука, 1977. – 234 с.
3. Патент України № 29525 Висівна система сівалки для точного землеробства. / Аніскевич Л.В., Бернхардт Г., Войтюк Д.Г. ; Опубл. 15.11.2000. Бюл. №6.
4. Летов А.М. Аналитическое конструирование регуляторов. ч I-V. / А.М. Летов // Автоматика и телемеханика. – 1960. – № 4, 5, 6. – 1961. – № 4. – 1962. – № 11. – С. 12. – С. 18. – С. 10.

*Проведен анализ возможностей высокоточного дозирования технологических материалов в случаях непредвиденных изменений величин динамических параметров дозирующих систем в технологиях точного земледелия с использованием методов оптимального управления техническими системами.*

***Дозирование, технологичный материал, оптимальное управление.***

*The analysis of possibilities of high-fidelity proportioning of technological materials in cases of unforeseen changes of values of dynamic parameters of batching systems in precision agriculture with use of methods of optimum management technical systems is conducted.*

***Proportioning, technological material, optimum management.***