Биотехнологический процесс, энтомологический препарат трихограмма, яйца зерновой моли, пневматический калибратор.

The biotechnological process of production entomological preparation of Trichogramma consists of operations which touch owner of Trichogramma: preparation and infection of grain; moistening of grain and interfusion; load it in boxing; receipt of butterflies and eggs of corn moth; cleaning and storage of eggs of corn moth; utilization of wastes of production and operations, which execute at breeding of Trichogramma: dropping of eggs of corn moth in bottles; infection it by Trichogramma; collection and cleaning of infected eggs; determination of high-quality indexes of preparation and his storage. Using contemporary methods of determination of optimum construction technological parameters of calibrator will allow to promote the high-quality indexes of preparation of entomologist of Trichogramma.

Biotechnological process, entomological preparation of Trichogramma, egg of corn moth, pneumatic calibrator.

УДК 631.315:629.783:525

ОПТИМІЗАЦІЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ЗАКОНУ КЕРУВАННЯ НОРМАМИ ВНЕСЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ У ТЕХНОЛОГІЯХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА

Л.В. Аніскевич, доктор технічних наук
О.В. Ямков, кандидат технічних наук
Національний університет біоресурсів і природокористування України
М.О. Свірень, доктор технічних наук
Кіровоградський національний технічний університет

Проаналізовані можливості формування закону керування дозуючими системами машин для внесення технологічних матеріалів в залежності від величин динамічних параметрів виконавчих органів, а також при непередбачених змінах цих величин в виробничих (польових) умовах шляхом пошуку оптимальних значень коефіцієнтів закону керування методом чисельної апроксимації в просторі динамічних параметрів системи.

Дозуюча система, динамічні параметри, адаптація, інтерполяція.

© Л.В. Аніскевич, О.В. Ямков, М.О. Свірень, 2012

Постановка проблеми. Запровадження технологій точного землеробства передбачає внесення технологічних матеріалів (ТМ), таких, як насіння, добрива, пестициди тощо з прецизійним дозуванням, а також з високою просторовою точністю доставки ТМ в задану точку поля. При цьому слід зауважити, що умови виконання механізованих технологічних операцій в полі характеризуються широким діапазоном перебігу статистичних характеристик факторів збурення технічних систем – нерівностей поверхні поля, варіабельності врожайності по площі поля, змін температурних режимів функціонування тощо. Динамічні параметри (коефіцієнт затухання, підсилення, стала часу тощо) які характеризують стан технічних систем, при цьому також можуть змінюватись непередбаченим шляхом. Наприклад, злипання вихідного отвору дозатора мінеральних добрив приводить до зміни такого параметру системи, як коефіцієнт підсилення і, як результат, до недозволеного порушення процесу виконання поставленого завдання. Подібні зміни у часі статистичних характеристик діючих факторів, а також динамічних параметрів технічних систем треба враховувати при проведенні керованих операцій доставки ТМ до об'єкту (наприклад, пестицидів до листостеблової маси рослин), оскільки вони спричиняють певну невизначеність умов роботи сільськогосподарських машин.

Аналіз останніх досліджень. Розрахунок керуючих дій для динамічного об'єкту, що працює в умовах невизначеності, лежить в основі принципу адаптації [1-2], а сам динамічний об'єкт набуває властивостей інваріантності до невизначеної зміни стану діючих на нього факторів. Застосування адаптивних динамічних систем значно розширює діапазон умов в яких виконуваний ними технологічний процес може бути оптимальним.

В роботі [3] показано, що, наприклад, для лінійної адаптивної моделі регулятора норми внесень ТМ, закон оптимальної керуючої дії в інтервалі часу $[t, t+\Delta T]$ має вигляд:

$$U_O(t) = P_1(d)\hat{\mu}'(t) + P_2(d)\hat{\mu}(t) + P_3(d)\hat{V}(t) + P_4(d)\hat{V}^2(t) + P_5(d)\hat{V}^3(t), \quad (1)$$

де P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 - коефіцієнти;

$d = \left(K, \xi, T_C, \Delta T\right)^T$ - вектор-стовпець динамічних параметрів системи;

$\hat{\mu}(t)$ - інтенсивність вихідного потоку ТМ;

$\hat{\mu}'(t)$ - оцінка швидкості зміни фактичної інтенсивності вихідного потоку ТМ;

K - номінальне значення коефіцієнта підсилення;

ξ - коефіцієнт затухання;

T_C - стала часу системи;

$\hat{V}$ - оцінка швидкості руху МТА.

Суть проблеми практичного застосування адаптивних систем на МТА для внесення ТМ полягає в тому, що алгоритм оптимізації керуючої дії (1) базується на розрахунку оптимальних значень коефіцієнтів P_1, P_2, P_3, P_4, P_5. Оцінки коефіцієнту затухання $\hat{\xi}$, сталої часу $\hat{T}$ та коефіцієнта підсилення $\hat{K}$ для адаптивних систем проводиться за досить складними аналітичними формулами, виконання обчислень за якими, а також процедури ідентифікації та адаптації параметрів системи в реальних умовах поля вимагають певного часу (до одиниць секунд), що 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. Ці факти вимагають пошуку більш ефективних 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:

$$P_i = f(\xi, K, T_C, T) \qquad (2)$$

де параметри ξ, K, T_C якраз і виступають в якості динамічних характеристик системи, що можуть непередбачено змінюватися в процесі роботи.

З цього випливає, що адаптацію поведінки динамічної системи керування змінними нормами внесення ТМ машин-реалізаторів можливо провести не тільки за аналітичними формулами, але і шляхом пошуку оптимальних значень коефіцієнтів (у даному випадку $P_1 - P_5$) методом чисельної апроксимації у просторі параметрів ξ, K, T_C (рис. 1).

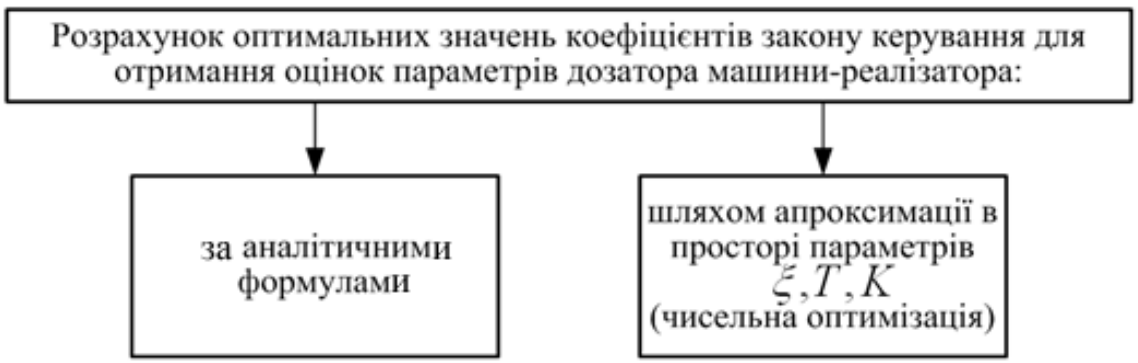

Рис. 1. Схема варіантів розрахунку значень коефіцієнтів P_1, P_2, P_3, P_4, P_5.

Для перевірки висунутої гіпотези проведено розрахунок коефіцієнтів P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 на прикладі функціонування пневматичної висівної системи, якість роботи якої оцінювалась величинами середньоквадратичних відхилень SD значень фактичної норми висіву насіння від заданої з використанням процедури оптимізації динамічних параметрів системи і за умов, коли нижній, основний та верхній рівні для кожного з фактичних значень параметрів ξ_{fact}; T_{fact} та K_{fact} становив 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 $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, SD$ в залежності від значень параметрів об'єкту ξ, T_C і K наведені в табл. 1.

Таблиця 1

1. Оптимальні значення коефіцієнтів $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, SD$ ***в залежності від значень параметрів системи*** ξ, T_C і K.

№ обра-хунку	ξ_{fact}	T_{fact}, с	K_{fact}	Коефіцієнти P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 та SD відповідно
1	0.1	0.4	0.002	-0.76555E+00, -0.68375E+01, 0.73423E+01, 0.76784E+00, 0.45058E+00, 0.58714E+00
2	0.1	0.4	0.004	-0.73955E+00, -0.66011E+01, 0.68687E+01, 0.76689E+00, 0.59927E+00, 0.19894E+00
3	0.1	0.4	0.006	-0.69354E+00, -0.65102E+01, 0.66991E+01, 0.74469E+00, 0.71743E+00, 0.26150E+00
4	0.1	0.7	0.002	-0.12943E+01, -0.75281E+01, 0.80000E+01, 0.14074E+01, 0.60212E+00, 0.26981E+01
5	0.1	0.7	0.004	-0.97209E+00, -0.77141E+01, 0.79708E+01, 0.10493E+01, 0.73439E+00, 0.13031E+01
6	0.1	0.7	0.006	-0.76463E+00, -0.69799E+01, 0.71569E+01, 0.76146E+00, 0.64958E+00, 0.69008E+00
7	0.1	1.0	0.002	-0.17499E+01, -0.75553E+01, 0.80000E+01, 0.17841E+01, 0.74687E+00, 0.40818E+01
8	0.1	1.0	0.004	-0.14306E+01, -0.77722E+01, 0.80000E+01, 0.15500E+01, 0.65487E+00, 0.27287E+01
9	0.1	1.0	0.006	-0.11352E+01, -0.75041E+01, 0.76858E+01, 0.11866E+01, 0.10126E+01, 0.20252E+01
10	0.3	0.4	0.002	-0.69215E+00, -0.67256E+01, 0.72300E+01, 0.84441E+00, 0.54790E+00, 0.62826E+00
11	0.3	0.4	0.004	-0.67591E+00, -0.64233E+01, 0.66827E+01, 0.73195E+00, 0.36704E+00, 0.12059E+00
12	0.3	0.4	0.006	-0.68733E+00, -0.70556E+01, 0.72323E+01, 0.72735E+00, 0.33451E+00, 0.97589E-01
13	0.3	0.7	0.002	-0.12592E+01, -0.75247E+01, 0.80000E+01, 0.15340E+01, 0.50769E+00, 0.26890E+01
14*	0.3	0.7	0.004	-0.90140E+00, -0.75649E+01, 0.78202E+01, 0.10212E+01, 0.60934E+00, 0.13383E+01
15	0.3	0.7	0.006	-0.73125E+00, -0.70931E+01, 0.72684E+01, 0.77285E+00, 0.58214E+00, 0.65385E+00

№ обра-хунку	ξ_{fact}	T_{fact}, с	K_{fact}	Коефіцієнти P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 та SD відповідно
16	0.3	1.0	0.002	-0.16801E+01, -0.75520E+01, 0.80000E+01, 0.20000E+01, 0.74767E+00, 0.40624E+01
17	0.3	1.0	0.004	-0.12476E+01, -0.77669E+01, 0.80000E+01, 0.13578E+01, 0.78400E+00, 0.27364E+01
18	0.3	1.0	0.006	-0.10892E+01, -0.78462E+01, 0.80000E+01, 0.12080E+01, 0.55211E+00, 0.19292E+01
19	0.5	0.4	0.002	-0.64819E+00, -0.72163E+01, 0.77244E+01, 0.82217E+00, 0.53581E+00, 0.50625E+00
20	0.5	0.4	0.004	-0.66137E+00, -0.66867E+01, 0.69437E+01, 0.75899E+00, 0.31125E+00, 0.94482E-01
21	0.5	0.4	0.006	-0.64884E+00, -0.69040E+01, 0.70777E+01, 0.71796E+00, 0.25429E+00, 0.70758E-01
22	0.5	0.7	0.002	-0.11589E+01, -0.75247E+01, 0.80000E+01, 0.16408E+01, 0.57530E+00, 0.26926E+01
23	0.5	0.7	0.004	-0.80620E+00, -0.75032E+01, 0.77581E+01, 0.98527E+00, 0.52311E+00, 0.13534E+01
24	0.5	0.7	0.006	-0.73063E+00, -0.76595E+01, 0.78296E+01, 0.81403E+00, 0.44286E+00, 0.50969E+00
25	0.5	1.0	0.002	-0.14528E+01, -0.75619E+01, 0.80000E+01, 0.18887E+01, 0.42476E+00, 0.40696E+01
26	0.5	1.0	0.004	-0.11711E+01, -0.77632E+01, 0.80000E+01, 0.14221E+01, 0.86356E+00, 0.27341E+01
27	0.5	1.0	0.006	-0.10901E+01, -0.78412E+01, 0.80000E+01, 0.13441E+01, 0.69367E+00, 0.19389E+01

*рядок даних, що відповідає опорній точці проведення операції апроксимації.

На рис. 2–4 представлені 3-вимірні поверхні величини середньоквадратичного відхилення SD різниці значень фактичної норми висіву насіння та заданої норми від значень динамічних характеристик системи ξ_{fact}, T_{fact} та K_{fact}.

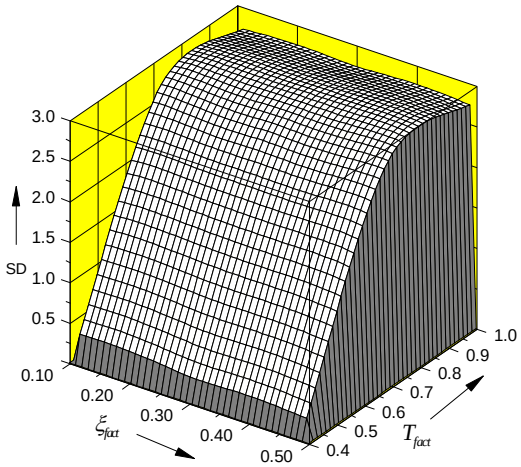

Рис. 2. 3-вимірна поверхня величини середньоквадратичного відхилення SD від значень динамічних характеристик системи ξ_{fact} та T_{fact}.

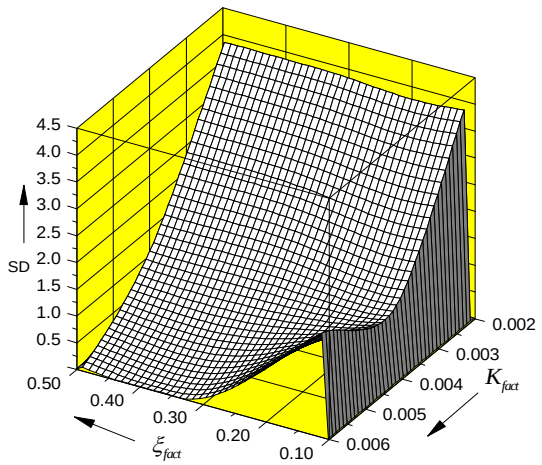

Рис. 3. 3-вимірна поверхня величини середньоквадратичного відхилення SD від значень динамічних характеристик системи ξ_{fact} та K_{fact}.

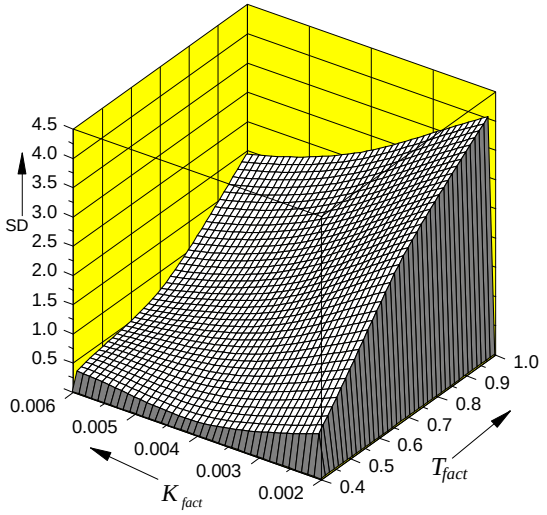

Рис. 4. 3-вимірна поверхня величини середньоквадратичного відхилення SD від значень динамічних характеристик системи K_{fact} та T_{fact}.

Зокрема, рис. 2 показує, що на зменшення величини SD суттєво впливає величина параметру T_{fact}, у той час як ξ_{fact} в даному випадку практично не впливає на рівень SD. Але, коли розглядається варіант одночасної зміни параметрів ξ_{fact} та K_{fact} (рис. 3), то ξ_{fact} впливає на рівень SD значною мірою, так само як і величина K_{fact}. У той же час, при сумісній зміні параметрів K_{fact} та T_{fact} (рис. 4), зміна величини коефіцієнту підсилення K_{fact} не має суттєвого впливу на величину SD, а T_{fact} - має суттєвий вплив.

Аналіз масиву даних з розрахунку коефіцієнтів P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, а також величини середньоквадратичної похибки SD відхилень

значень фактичної норми висіву насіння від заданої 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 вагоме практичне значення, оскільки процедура апроксимації величин коефіцієнтів закону керування дозуючими системами машин для внесення ТМ має простий алгоритм (на відміну від алгоритму оптимізації) і може виконуватись в польових умовах бортовим контролером МТА з відносно низькою обчислювальною потужністю. При цьому буде забезпечений високий рівень адаптації режимів роботи регульованих дозаторів при непередбачених змінах динамічних параметрів об'єкту регулювання за рахунок 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 (ΔP_6) у функції варіацій масштабних значень узагальнених параметрів об'єкту $\Delta\hat{a}_1, \Delta\hat{a}_2, \Delta\hat{a}_3$ мають вигляд:

$$\Delta P_l = c_{l1}\Delta\hat{a}_1 + c_{l2}\Delta\hat{a}_2 + c_{l3}\Delta\hat{a}_3 + c_{l4}\Delta\hat{a}_1^2 + c_{l5}\Delta\hat{a}_2^2 + c_{l6}\Delta\hat{a}_3^2 + \\ + c_{l7}\Delta\hat{a}_1\Delta\hat{a}_2 + c_{l8}\Delta\hat{a}_1\Delta\hat{a}_3 + c_{l9}\Delta\hat{a}_2\Delta\hat{a}_3, \quad (3)$$

$$l = 1,...,6,$$

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

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

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

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

$$a_{1op} = \frac{K_{op}}{T_{op}^2},\ a_{2op} = -\frac{2\xi_{op}}{T_{op}},\ a_{3op} = -\frac{1}{T_{op}^2}. \quad (4)$$

де ξ_{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. Дані для аналізу залежності оптимальних значень коефіцієнтів $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$ від значень параметрів об'єкту

ξ, T_C і K можна представити в табличній формі (табл. 2). Вектор-стовпець коефіцієнтів апроксимації $\hat{c}_l = (c_{l1}, c_{l2}, ..., c_{l9})^T$, $l = 1,...,6$ розраховується за формулою:

$$\hat{c}_l = A^+ \square \bar{P}_l,\ l = 1,...,6 \qquad (5)$$

де A^+ - псевдообернена матриця розміром 9x26 значень координатних функцій параметрів табл. 2;
$\square P_l = (\square P_{l1}, \square P_{l2}, ..., \square P_{l26})^T$, - вектори-стовпці варіацій оптимальних значень $P_1,...,P_6$ у вузлах таблиці 2 відносно оптимальних значень в опорній точці.

2. Формат представлення даних для аналізу значень $\square P_l$.

№ розрахунку	ξ	T	K	P_1	P_2	P_l	P_6
1	ξ_1	T_1	K_1	P_{11}	P_{21}	…	P_{61}
2	ξ_2	T_2	K_2	P_{12}	P_{22}	…	P_{62}
…	…	…	…	…	…	…	…
27	ξ_{27}	T_{27}	K_{27}	P_{127}	P_{227}	…	P_{627}

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

Результати вирішення задачі функціонування пневматичного висівного дозатора виводилися в числовий файл, в якому фіксувалися псевдообернена матриця A^+, матриця оцінок коефіцієнтів апроксимації $c = (\hat{c}_1^T, \hat{c}_2^T, ..., \hat{c}_6^T)^T$, матриця варіацій вихідних та розрахункових оптимальних значень коефіцієнтів $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$ відносно опорного значення, матриця помилок апроксимації в 26 вузлах таблиці вихідних даних, а також величини середньоквадратичних відхилень коефіцієнтів апроксимації по 26 вузлах. Наприклад, на рис. 5 та рис. 6 представлені графіки зміни розрахованих за аналітичними формулами та обчислених методом апроксимації у просторі ξ, K, T_C оптимальних значень коефіцієнтів P_2 та P_3.

Аналіз графіків показує, що розрахункові значення коефіцієнтів P_2 та P_3 досить близькі за величиною до аналітичних оптимальних значень цих коефіцієнтів. Відносна величина середнього квадратичного відхилення розрахункових значень коефіцієнтів від вихідних складає 2,2 % та 1,7 % для P_2 та P_3 відповідно. Відносне математичне сподівання помилок розрахункових значень для всіх коефіцієнтів ($P_1 \div P_5$) не перевищує 2,7 %. Значення середнього квадратичного відхилення нев'язки апроксимації по 26 вузлах 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.

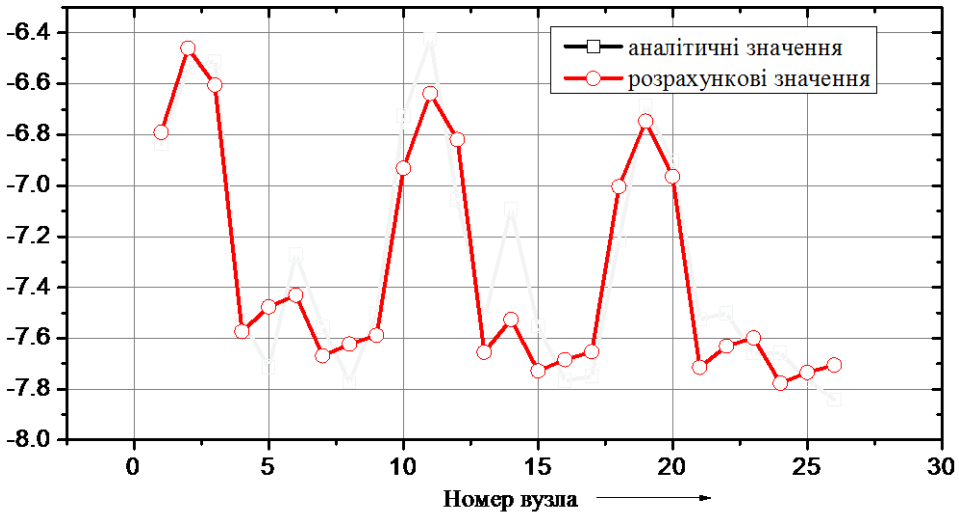

Рис. 5. Графіки зміни аналітичних та розрахункових оптимальних значень коефіцієнту P_2.

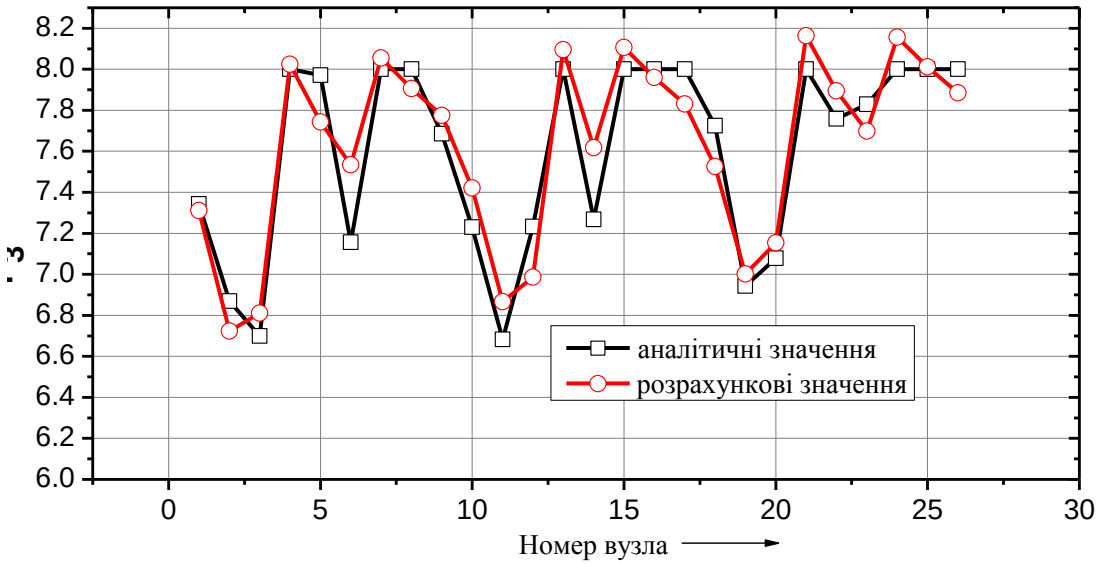

Рис. 6. Графіки зміни вихідних та розрахункових оптимальних значень коефіцієнту P_3.

Числові значення наведених статистичних характеристик дають підставу для важливого висновку: формування закону керування дозуючими системами дозаторів машин для внесення ТМ в залежності від значень динамічних параметрів виконавчих органів, а також при непередбачених змінах значень параметрів у виробничих (польових) умовах, ефективно проводити шляхом

пошуку оптимальних значень коефіцієнтів закону керування через чисельну апроксимацію в просторі параметрів ξ, K, T.

Окрім того, представлена методика визначення оптимальних значень коефіцієнтів закону керування дозволяє рекомендувати до практичного застосування також і загальновідомі методи інтерполяції базових для вузлових точок оптимальних значень коефіцієнтів закону керування для поточних значень величин динамічних параметрів системи. В такому випадку, на першому етапі проводиться інтерполяція величин оптимальних значень коефіцієнтів за двома вхідними параметрами (наприклад, за ξ і K), а в наступному – ще за одним параметром (наприклад за T_C). Операції інтерполяції можуть проводитись з високою швидкістю при мінімальних вимогах до обчислювальних потужностей процесорних систем спеціалізованого бортового обладнання машин для внесення ТМ.

Список літератури

1. *Цыпкин Я.З.* Адаптация и обучение в автоматических системах / *Я.З. Цыпкин*. – М.: Наука, 1968. – 234 с.
2. *Куропаткин П.В.* Оптимальные адаптивные системы / *П.В. Куропаткин*. – М.: Высшая школа, 1980. – 288 с.
3. *Аніскевич Л.В.* Адаптивне управління нормами внесення технологічних матеріалів в точному землеробстві / *Л.В. Аніскевич* // Науково-виробничий журнал "Електротехніка і механіка". – 2007. – № 1. – С. 57–66.

Проанализированы возможности формирования закона управления дозирующими системами машин для внесения технологических материалов в зависимости от величин динамических параметров исполнительных органов, а также при непредвиденных изменениях этих величин в производственных (полевых) условиях путем поиска оптимальных значений коэффициентов закона управления методом численной аппроксимации в пространстве динамических параметров системы.

Дозирующая система, динамические параметры, адаптация, интерполяция.

The possibilities of forming the management law of metering devices of machines for precision farming during the changes of dynamic parameters in field terms by the searching of optimum values of coefficients of management law through numeral approximation in space of dynamic parameters of the system are analysed.

Metering system, dynamic parameters, adaptation, interpolation.