

УДК681.511.22:681.518.25:621.926.2

ПРОГНОЗУЮЧЕ КЕРУВАННЯ КОНУСНОЮ ДРОБАРКОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ ОРТОНОРМОВАНИХ ФУНКЦІЙ ЛАГЕРРА

О. Ю. Михайленко

Державний вищий навчальний заклад «Криворізький національний університет»
вул. XXII Партз'їзду, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна. E-mail: epem.mykhailenko@gmail.com

Розглянуто питання прогнозуючого керування конусною дробаркою з використанням ортонормованих функцій Лагерра для параметризації вектору керування. Застосування такого підходу дозволило знизити обчислювальне навантаження на пристрій керування за рахунок зменшення числа змінних, що підлягають обчисленню, яке обумовлюється порядком моделі Лагерра. Виконано порівняльний аналіз впливу параметрів замкнутої системи на якість перехідних процесів. Встановлено, що час переходу з одного сталого режиму в інший залежить від порядку й масштабного коефіцієнту моделі Лагерра, а також від горизонту прогнозування. Перерегулювання виникає при коротких горизонтах прогнозування (один–три кроки) або при значеннях масштабного коефіцієнту, менших за 0,5. Перерегулювання може бути знижено шляхом зміни обмежень на амплітуду керування. Число обмежень не впливає на протікання перехідного процесу через застосований принцип прогнозуючого керування з ковзним горизонтом. Для всіх змінних параметрів замкнутої системи забезпечується нульова похибка сталого режиму.

Ключові слова: керування з прогнозуючою моделлю, функції Лагерра, конусна дробарка.

ПРОГНОЗИРУЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ КОНУСНОЙ ДРОБИЛКОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОРТОНОРМИРОВАННЫХ ФУНКЦИЙ ЛАГЕРРА

А. Ю. Михайленко

Государственное высшее учебное заведение «Криворожский национальный университет»
ул. XXII Партсъезда, 11, г. Кривой Рог, 50027, Украина. E-mail: epem.mykhailenko@gmail.com

Рассмотрен вопрос прогнозирующего управления конусной дробилкой с использованием ортонормированных функций Лагерра для параметризации вектора управления. Применение такого подхода позволило снизить вычислительную нагрузку на устройство управления за счет уменьшения числа переменных, подлежащих вычислению, которое обуславливается порядком модели Лагерра. Выполнен сравнительный анализ влияния параметров замкнутой системы на качество переходных процессов. Установлено, что время перехода из одного установившегося режима в другой зависит от порядка и масштабного коэффициента модели Лагерра, а также от горизонта прогнозирования. Перерегулирование возникает при коротких горизонтах прогнозирования (один–тришага) или при значениях масштабного коэффициента, меньших, чем 0,5. Перерегулирование может быть снижено путем изменения ограничений на амплитуду управления. Число ограничений не влияет на протекание переходного процесса из-за применения принципа прогнозирующего управления со скользящим горизонтом. Для всех переменных параметров замкнутой системы обеспечивается нулевая погрешность установившегося режима.

Ключевые слова: управление с прогнозирующей моделью, функции Лагерра, конусная дробилка.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Підвищення ефективності ведення технологічних процесів разом із раціональним використанням невідновних природних ресурсів в умовах функціонування підприємств гірничо-металургійного комплексу займають провідну позицію в структурі наукових задач, що підлягають розв'язку. На гірничо-збагачувальних комбінатах значну ресурсо- й енергоємність мають процеси підготовки руди до збагачення шляхом її подрібнення в млинах. Проте переробка сировини, максимально однорідної за гранулометричним складом, дозволяє суттєво знизити енергетичні витрати на цій стадії. Враховуючи, що матеріал у цех подрібнення надходить після багатостадійного дроблення конусними дробарками, необхідно підвищити якість переробки на даному етапі рудопідготовки.

У роботі [1] було встановлено, що досягти високої однорідності дробленої руди за гранулометричним складом можна за рахунок одночасної зміни в процесі роботи ширини розвантажувальної щілини й швидкості обертання конуса дробильного агрегату.

Отже, одним із шляхів підвищення якісних показників дроблення є розробка методу керування на основі зазначеної властивості процесу.

Конусна дробарка як динамічний об'єкт характеризується значною інерційністю, багатомірністю, нелінійністю й наявністю жорстких зв'язків між вхідними й вихідними величинами, тому наявність адекватної моделі технологічного об'єкту, за допомогою якої можна з достатньою точністю передбачити його реакцію на вхідні впливи, дозволяє при розробці системи керування застосовувати регулятори, що засновані на розрахунковому алгоритмі керування, який використовує відомий опис системи для формування сигналу керування. Такий алгоритм отримав назву керування з прогнозуючою моделлю [2].

Перевага використання такого підходу в умовах керування виробничими процесами збагачувальних комбінатів обумовлюється можливістю врахування фізичних і технологічних обмежень процесу. Другою перевагою є визначення керуючих впливів у

режимі реального часу. При цьому швидкість обмежується лише частотою тактування сучасних апаратних засобів автоматизації й швидкістю збіжності оптимізаційних алгоритмів.

Зокрема, у випадку керування конусною дробаркою на траєкторію керування накладаються природні жорсткі обмеження. Так, ширина розвантажувальної щілини не може бути від'ємною й перевищувати величину, яка обумовлюється конструкційними особливостями, а саме висотою підйому чаші агрегату. Регулювання швидкості обертання ексцентрики, у свою чергу, не передбачає реверс двигуна електропривода в процесі дроблення руди, тому керування обмежується робочим діапазоном у режимі двигуна.

На вищевикладені особливості слід зважати при побудові системи керування з прогнозуючою моделлю, тому прямо визначати вектор коефіцієнтів аналітичним розрахунком неможливо.

Глибоку нелінійність процесів рудопідготовки [1] також необхідно брати до уваги, при цьому рішення задачі прогнозування керування значно ускладнюється внаслідок застосування алгоритмів нелінійного квадратичного програмування для визначення послідовності керувань. Проте використання блочно-орієнтованих структур, які описують поведінку об'єкту з компенсаторами статичних нелінійностей, дозволяє поєднати достатню точність апроксимації динаміки з великою швидкістю методів лінійного керування [3–5].

Використання функцій Лагерра при параметризації вектору керувань [6–9] дозволяє вибирати розташування майбутніх обмежень. Це потенційно дозволяє знизити кількість обмежень у межах горизонту прогнозування та, як наслідок, зменшити обчислювальне навантаження при розрахунках у режимі реального часу для складних багатомірних і багатоз'язаних об'єктів. Також слід ураховувати фактор експоненціального затухання функцій Лагерра, який полягає у тому, що приріст керувань прямує до нуля після закінчення перехідного процесу [6]. Отже, достатньо накладати обмеження лише на перехідному періоді характеристики, таким чином додатково зменшити число обмежень.

Мета роботи полягає в розробці замкненої системи прогнозування керування конусною дробаркою по каналу «ширина розвантажувальної щілини –гранулометричний склад руди» із застосуванням ортонормованих функцій Лагерра для параметризації вектору керувань і аналізі впливу параметрів запропонованої системи на якісні характеристики перехідних процесів.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Під час розрахунків траєкторія приростів керуючої дії може бути інтерпретована як імпульсна характеристика стійкої динамічної системи. З використанням набору функцій Лагерра дана характеристика апроксимується з високою точністю, в результаті приріст керуючої дії в довільний момент часу надається вразом

$$\Delta u[k+n] = \sum_{i=1}^p c_i[k] l_i[k+n], \quad (1)$$

де p – порядок моделі Лагерра; n – момент вибірки; $c_i[k]$ – коефіцієнти моделі, $\{i \in \mathbb{N} \mid 1 \leq i \leq p\}$; $l_i[k+n]$ – значення функцій Лагерра в момент $k+n$.

Вираз (1) у векторній формі приймає вигляд:

$$\Delta U = \underline{L}[k]^T \gamma, \quad (2)$$

де γ – вектор коефіцієнтів моделі Лагерра; $\underline{L}[k]$ – набір дискретних функцій Лагерра в матричній формі, що отриманий із різницевого рівняння

$$\underline{L}[k+1] = A \underline{L}[k], \quad (3)$$

з початковими умовами:

$$\underline{L}[0]^T = \sqrt{1-\psi^2} [1 \quad -\psi \quad \psi^2 \quad -\psi^3 \quad \dots \quad (-1)^{p-1} \psi^{p-1}]. \quad (4)$$

Тобто вираз (3) є окремим випадком надання дискретних функцій Лагерра в просторі станів з урахуванням відсутності складової, що описує вплив входу на значення вектору стану.

Слід відзначити, що наданий підхід виключає використання такого параметра, як горизонт керування N_c при формалізації керування. При цьому якість апроксимації траєкторії керування довільної складності й довжини залежить виключно від порядку моделі Лагерра p та масштабного коефіцієнту ψ .

Задача керування з прогнозуючою моделлю зводиться до визначення вектора параметрів γ , що забезпечує найкраще наближення, з точки зору обраної цільової функції, виходу об'єкту керування до завдання.

Для визначення вектора керування цільова функція подається у векторному вигляді [10]:

$$J = (R - Y)^T Q (R - Y) + \Delta U^T S \Delta U, \quad (5)$$

де $R^T = \underbrace{[r[k] \quad r[k] \quad \dots \quad r[k]]}_{N_p}$ – вектор сигналу за-

вдання; $r[k]$ – завдання в момент обчислення; Q, S – діагональні матриці ваги входу й виходу.

Вектор виходу об'єкта в межах горизонту прогнозування:

$$Y = \Omega L[k] + \Theta^* u[k-1] + \Theta \Delta U, \quad (6)$$

Де $L[k]$ – вектор стану моделі Лагерра, яка апроксимує динаміку об'єкта (не плутати з $\underline{L}[k]$);

$$\Omega = \begin{bmatrix} C\Phi \\ C\Phi^2 \\ \vdots \\ C\Phi^{N_p} \end{bmatrix}; \quad \Theta^* = \begin{bmatrix} C\Gamma \\ C\Phi\Gamma + C\Gamma \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{N_p} C\Phi^{i-1}\Gamma \end{bmatrix};$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} C\Gamma & 0 & \dots & 0 \\ C\Phi\Gamma + C\Gamma & C\Gamma & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ \sum_{i=1}^{N_p} C\Phi^{i-1}\Gamma & \sum_{i=1}^{N_p-1} C\Phi^{i-1}\Gamma & \dots & \sum_{i=1}^{N_p-N_c} C\Phi^{i-1}\Gamma \end{bmatrix}.$$

Виконуючи підстановку (6) і (2) в (5), отримаємо наступний вираз:

$$\begin{aligned}
 J = & (\Psi - \Theta \underline{L}[k]^T \gamma)^T Q (\Psi - \Theta \underline{L}[k]^T \gamma) + \\
 & + (\underline{L}[k]^T \gamma)^T S \underline{L}[k]^T \gamma = \Psi^T Q \Psi - \gamma^T \underline{L}[k] \Theta^T Q \Psi - \\
 & - \Psi^T Q \Theta \underline{L}[k]^T \gamma + \gamma^T \underline{L}[k] \Theta^T Q \Theta \underline{L}[k]^T \gamma + \\
 & + \gamma^T \underline{L}[k] S \underline{L}[k]^T \gamma = \Psi^T Q \Psi - 2 \gamma^T \underline{L}[k] \Theta^T Q \Psi + \\
 & + \gamma^T \underline{L}[k] (\Theta^T Q \Theta + S) \underline{L}[k]^T \gamma,
 \end{aligned} \quad (7)$$

де $\Psi = R - \Omega \underline{L}[k]^T - \Theta^* u[k-1]$, а $\underline{L}[k]$ – набір дискретних функцій Лагерра, що використовуються для апроксимації вектора керування.

Із застосуванням властивості ортонормованості функцій Лагерра вираз (7) спрощується:

$$J = \Psi^T Q \Psi - 2 \gamma^T \underline{L}[k] \Theta^T Q \Psi + \gamma^T (\Theta^T Q \Theta + S) \gamma. \quad (8)$$

Для знаходження мінімуму цільової функції (8) за умови відсутності обмежень визначаємо її часткову похідну по вектору коефіцієнтів моделі Лагерра:

$$\frac{\partial J}{\partial \gamma} = 2 (\Theta^T Q \Theta + S) \gamma - 2 \underline{L}[k] \Theta^T Q \Psi. \quad (9)$$

Закон керування визначається аналітично з урахуванням того, що мінімізація J досягається при $\frac{\partial J}{\partial \gamma} = 0$:

$$\gamma = (\Theta^T Q \Theta + S)^{-1} (\underline{L}[k] \Theta^T Q \Psi) \quad (10)$$

за умови існування оберненої матриці $(\Theta^T Q \Theta + S)^{-1}$.

Керування в умовах обмежень вимагає рішення задачі квадратичного програмування в режимі реального часу. З урахуванням того, що дані про значення вектору стану $L[k]$ у момент часу k відомі й встановлені обмеження на вектор приростів керування ΔU , оптимізаційна процедура полягає у мінімізації цільової функції:

$$J = \frac{1}{2} \gamma^T H \gamma + \gamma^T g, \quad (11)$$

де $H = 2 (\underline{L}[k] \Theta^T Q \Theta \underline{L}[k]^T + S)$; $g = -2 \underline{L}[k] \Theta^T Q \Psi$;
 $\Psi = R - \Omega \underline{L}[k]^T - \Theta^* u[k-1]$

за умови

$$\begin{aligned}
 \Delta U^{\min} & \leq \Delta U \leq \Delta U^{\max}; \\
 U^{\min} & \leq U \leq U^{\max}.
 \end{aligned} \quad (12)$$

Перед застосуванням прогноуючого керування на основі функцій Лагерра з обмеженнями необхідно визначити матриці даних, які використовуються при формуванні обмежень.

Припустимо, що обмеження накладаються лише на амплітуду керування. Позначимо межі для керуючих дій, обумовлені фізичним насиченням виконуючих пристроїв, через U^{\min} і U^{\max} . Зміна керування визначається виразом

$$u[k+n] = \left(\sum_{i=0}^n \Delta u[k+i] \right) + u[k-1]. \quad (13)$$

З урахуванням використання функцій Лагерра при проектуванні системи керування приріст керуючої дії:

$$\Delta u[k] = L[k]^T \gamma. \quad (14)$$

При підстановці (13) у (12) отримуємо

$$u[k+n] = \left(\sum_{i=0}^n L[k+i]^T \right) \gamma + u[k-1]. \quad (15)$$

Вираз (15) може бути наданий у матричній формі:

$$U = L_{\Sigma} \gamma + u[k-1], \quad (16)$$

де

$$\begin{aligned}
 U & = [u[k] \quad u[k+1] \quad \dots \quad u[k+N_p]]^T; \\
 L_{\Sigma} & = \begin{bmatrix} L[k]^T \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^1 L[k+i]^T \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{N_p} L[k+i]^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1[k] & l_2[k] & \dots & l_p[k] \\ \sum_{i=0}^1 l_1[k+i] & \sum_{i=0}^1 l_2[k+i] & \dots & \sum_{i=0}^1 l_p[k+i] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{N_p} l_1[k+i] & \sum_{i=0}^{N_p} l_2[k+i] & \dots & \sum_{i=0}^{N_p} l_p[k+i] \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Підставляємо (16) у (12):

$$U^{\min} \leq L_{\Sigma} \gamma + u[k-1] \leq U^{\max}.$$

Отриманий вираз можна надати двома нерівностями:

$$\begin{aligned}
 L_{\Sigma} \gamma & \leq U^{\max} - u[k-1]; \\
 -L_{\Sigma} \gamma & \leq -U^{\min} + u[k-1].
 \end{aligned} \quad (17)$$

У матричній формі (16) приймає вигляд:

$$\begin{bmatrix} L_{\Sigma} \\ -L_{\Sigma} \end{bmatrix} \gamma \leq \begin{bmatrix} U^{\max} - u[k-1] \\ -U^{\min} + u[k-1] \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Використання матричного запису (18) забезпечує гнучкість при виборі числа обмежень у векторі амплітуд U . Для об'єктів декількома входами включаються індивідуальні межі для кожної керуючої дії.

Налаштування схеми керування здійснюється шляхом вибору алгоритму рішення задачі оптимального керування, зміни параметрів моделі Лагерра, а також за рахунок варіювання горизонту прогнозування й числа обмежень.

Для аналізу якості керування використовується лінійна частина нелінійної блочно-орієнтованої системи [11], що отримана при апроксимації динаміки моделі конусної дробарки, яка запропонована в роботі [1]. Керування здійснюється шляхом зміни ширини розвантажувальної щілини. Сигнал завдання змінюється з 0 до 1 % виходу класу -9,1+6,7 мм на початку розрахунку, потім на п'ятій секунді збільшується до 2 % та на восьмій секунді зменшується до 0,5 %. Обчислювальні експерименти здійснювались при такій конфігурації обладнання: AMD Athlon II X4 645 3.1 GHz, 4096 MB DDR3 SDRAM, Windows 7 x64.

Виконаємо аналіз впливу параметрів моделі Лагерра, що апроксимує вектор приростів керування, на характеристики перехідного процесу об'єкту. Горизонт прогнозування вибирається з урахуванням сталої часу системи й дорівнює $N_p = 20$. Обмеження накладаються на всі елементи вектору $\Delta U = L[k]^T \gamma$. Масштабний коефіцієнт $\psi = 0,8$ та не змінюється при моделюванні. При проведенні поточного дослідження, а також усіх наступних для рішення задачі квадратичного програмування використовується алгоритм Хілдрета.

Результати обчислювального експерименту зображено на рис. 1. З графіків видно, що для приведенного діапазону зміни порядку моделі Лагерра такі показники якості керування, як перерегулювання, коливальність і похибка сталого режиму, дорівнюють нулю. Кількість ортонормованих функцій, які використовуються для відтворення траєкторії керування, впливає лише на час перехідного процесу. Так, при порядку моделі $p = 1$ швидкість реакції системи з прогнозуючою моделлю на вхідну дію значно знижується. Збільшення складових у межах $\{p \in \mathbb{N} \mid 3 \leq p \leq 9\}$ призводить до значного зменшення часу перехідного процесу. При цьому в піддіапазоні $\{p \in \mathbb{N} \mid 5 \leq p \leq 9\}$ швидкодія практично не змінюється, але, як видно з другого графіка (рис. 1), чим вище порядок, тим більший початковий приріст керування необхідний для переведення об'єкта з одного сталого режиму в інший.

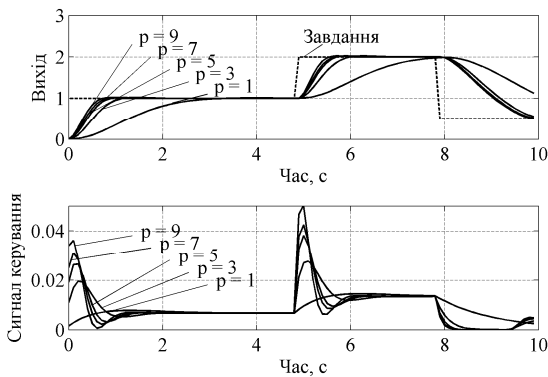


Рисунок 1 – Рішення задачі квадратичного програмування при обмеженні на амплітуду керування й змінному порядку моделі Лагерра

З урахуванням значної інерційності динаміки конусної дробарки, для подальших досліджень порядок моделі Лагерра встановлюємо $p = 5$ як компромісне рішення між швидкодією замкненої системи, обчислювальними витратами й навантаженням на об'єкт, яке пов'язане з величиною приросту керуючої дії.

Масштабний коефіцієнт функцій Лагерра дозволяє керувати динамікою замкненої системи через модифікацію горизонту прогнозування N_s . Динамічні характеристики системи керування з прогнозуючою моделлю при варіюванні ψ зображено на рис. 2.

Для проведення імітаційного моделювання горизонт прогнозування й порядок моделі Лагерра встановлюються на рівні $N_p = 20$ та $p = 5$ відповідно.

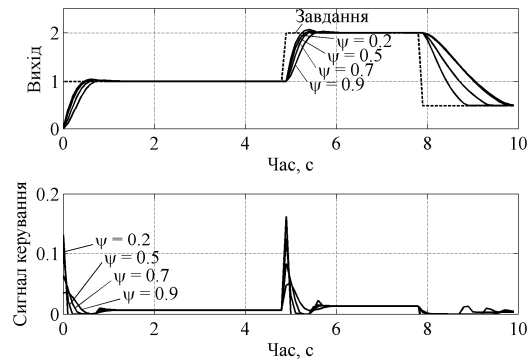


Рисунок 2 – Рішення задачі квадратичного програмування при обмеженні на амплітуду керування й змінному масштабному коефіцієнті

Аналіз часового ряду показує, що масштабний коефіцієнт впливає на швидкодію регулятора. Чим нижче ψ , тим швидше проходить перехідний процес. Однак при цьому, як чітко видно зі збільшених графіків (рис. 3), виникає перерегулювання.

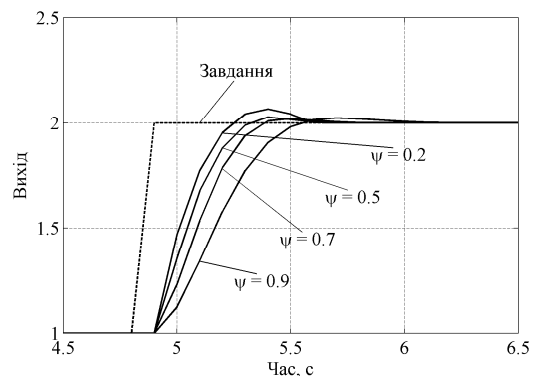


Рисунок 3 – Рішення задачі квадратичного програмування при обмеженні на амплітуду керування й змінному масштабному коефіцієнті (збільшений фрагмент)

У табл. 1 наведено дані про зміну перерегулювання при збільшенні ψ .

Таблиця 1 – Порівняння якісних характеристик перехідного процесу замкненої системи при зміні масштабного коефіцієнта моделі Лагерра

Коефіцієнт ψ	Максимальне значення перехідної характеристики	Перерегулювання, %
0,2	2,066	3,3
0,5	2,028	1,4
0,8	2,02	1
0,9	2,023	1,15

Відзначимо, що збільшення ψ у цілому призводить до зниження перерегулювання. Зміна масштабно коефіцієнта з $\psi = 0,2$ до $\psi = 0,8$ знижує перерегулювання на 69,7% від початкового, але подальше збільшення до $\psi = 0,9$ – на 65,5%.

Як уже було зазначено вище, горизонт прогнозування N_p вибирається з урахуванням сталої часу об'єкта. Виконаємо порівняльну оцінку якісних показників перехідного процесу замкненої системи з регулятором, який оснований на функціях Лагерра для ряду N_p : 1, 3, 5, 20, 50, 100. Результати імітаційного моделювання (рис. 4, 5) демонструють, що N_p суттєво впливає на швидкість реакції системи при зміні завдання й перерегулюванні.

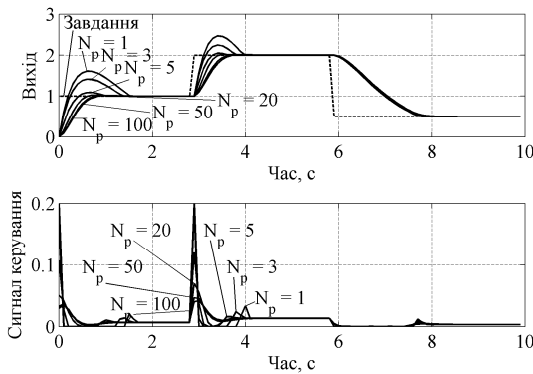


Рисунок 4 – Рішення задачі квадратичного програмування при обмеженні на амплітуду керування ($u^{\max} = 0,2$) і змінному горизонті прогнозування

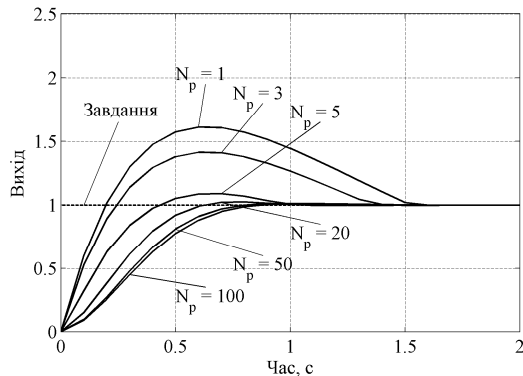


Рисунок 5 – Рішення задачі квадратичного програмування при обмеженні на амплітуду керування й змінному горизонті прогнозування (збільшений фрагмент)

Числові дані обчислювального експерименту наведено в табл. 2.

Послідовне збільшення горизонту прогнозування з $N_p = 1$ до $N_p = 3$ і $N_p = 5$ призводить до зменшення перерегулювання на 32,4 та 85,8% відповідно. У результаті зміни цього параметру спостерігається зниження часу переходу системи з одного сталого режиму в інший на 12,5 і 37,5%. При подальшому

збільшенні N_p перерегулювання знаходиться в технічно допустимих межах 5%, а при $N_p = 50$ і $N_p = 100$ ним практично можна знехтувати.

Таблиця 2 – Порівняння якісних характеристик перехідного процесу замкненої системи при зміні горизонту прогнозування

Горизонт прогнозування N_p	Максимальне значення перехідної характеристики	Перерегулювання, %	Час перехідного процесу, с
1	1,611	61,1	1,6
3	1,413	41,3	1,4
5	1,087	8,7	1
20	1,025	2,5	0,9
50	1,012	1,2	0,8
100	1,012	1,2	0,8

Реакція на зміну завдання (рис. 4) з 2 до 0,5% виходу руди класу -9,1+6,5 мм на шостій секунді моделювання показує, що в досліджуваних межах N_p замкнена система має однакову швидкодню й нульове перерегулювання. Це пояснюється потраплянням амплітуди керування в зону нижнього обмеження u^{\min} .

Таким чином, можна зробити припущення, що для усунення перерегулювання при додатних змінах завдання необхідно зменшити верхнє обмеження u^{\max} . Ряд динаміки для $u^{\max} = 0,03$ зображено на рис. 6. З графіків видно, що зміна u^{\max} призвела до суттєвого зниження перерегулювання й часу перехідного процесу. Результати моделювання зведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Порівняння якісних характеристик перехідного процесу замкненої системи при зміні горизонту прогнозування ($u^{\max} = 0,03$)

Горизонт прогнозування N_p	Максимальне значення перехідної характеристики	Перерегулювання, %	Час перехідного процесу, с
1	1,181	18,1	1,4
3	1,096	9,6	1,2
5	1,025	2,5	0,9
20	1,013	1,3	0,8
50	1,011	1,1	0,85
100	1,011	1,1	0,85

Аналіз наведених даних показує, що при $u^{\max} = 0,03$ перерегулювання для $N_p = 1$ до $N_p = 3$ знижується на 70,4 і 76,8% порівняно з $u^{\max} = 0,2$. Час перехідного процесу зменшується на 12,5 і 14,3% відповідно. Для наступного ряду горизонту прогнозування: 5, 20, 50, 100 – перерегулювання має технічно допустиме значення. Для $N_p = 50$ до $N_p = 100$ якість перехідного процесу змінюється несуттєво. Це пояснюється тим, що лише на декілька елементів результуючого вектора керування, отри-

маного шляхом рішення задачі квадратичного програмування, накладаються обмеження. Тобто, чим менше N_p , тим більше число керувань перевищують допустимі межі й прирівнюються до u^{\max} або u^{\min} .

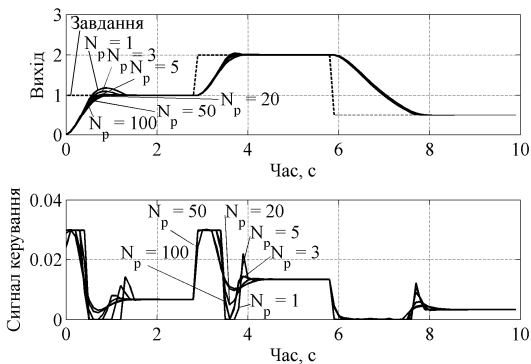


Рисунок 6 – Рішення задачі квадратичного програмування при обмеженні на амплітуду керування ($u^{\max} = 0,03$) і змінному горизонті прогнозування

Отже, підвищення якості перехідного процесу можна досягнути збільшенням горизонту прогнозування або зниженням верхньої межі обмеження u^{\max} керування.

Також відзначимо, що похибка сталого режиму для розглянутих значень горизонту прогнозування дорівнює нулю.

Отже, підсумовуючи вищевикладене, при проектуванні системи керування з прогнозуючою моделлю доцільно використовувати горизонт прогнозування $N_p = 20$ з обмеженнями на амплітуду керування $0 \leq L[k]^T \gamma \leq 0,03$.

Наприкінці проаналізуємо останній параметр, який може впливати на якість перехідних процесів системи керування з прогнозуючою моделлю, число обмежень на вектор керування N_c . Дослідження проводились для горизонту прогнозування $N_p = 50$ за умови, що $u^{\min} = 0$ і $u^{\max} = 0,2$. Ряд кількості елементів вектору U , на які діють обмеження, вибрано таким: 1, 3, 5, 10, 20, 50. Перехідні процеси в замкненій системі зображено на рис. 7.

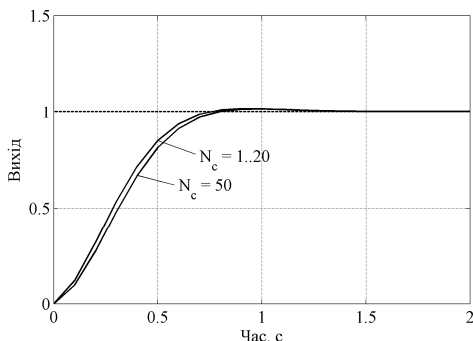


Рисунок 7 – Рішення задачі квадратичного програмування при змінному числі обмежень на амплітуду керування (збільшений фрагмент)

Видно, що для значень N_c : 1, 3, 5, 10, 20 графіки реакції системи однакові й накладаються один на

інший. Це пов'язано з особливостями реалізації принципу прогнозуючого керування з ковзним горизонтом прогнозування, зокрема з тим, що на вхід об'єкту подається виключно перший елемент послідовності $u[k]$, який входить в оптимальний вектор керування U , а всі інші складові ігноруються. При $N_c = 50$ швидкодія замкненої системи незначно знижується на 0,06 %.

ВИСНОВКИ. Удосконалено класичну схему керування з прогнозуючою моделлю шляхом застосування ортонормованих функцій Лагерра для апроксимації вектора керуючих дій. При цьому замість знаходження повного оптимального вектора керувань, що забезпечує найкраще наближення вихідної координати об'єкта до завдання, необхідно визначити елементи вектора коефіцієнтів моделі Лагерра, число яких обумовлюється її порядком. Таким чином, зменшується кількість змінних, що підлягають розрахунку. У результаті знижується обчислювальне навантаження на пристрій керування, збільшується швидкодія системи й, як наслідок, її стійкість, оскільки система скоріше адаптується до зміни характеру зовнішніх збурень.

Дослідження впливу параметрів розробленої системи керування на якість перехідних процесів показало, що характер їх протікання залежить від налаштувань схеми керування у всіх випадках, окрім зміни кількості обмежень. На швидкодію системи найбільший вплив має порядок моделі Лагерра, особливо при його низьких значеннях. Зміна числа ортонормованих функцій з одного до п'яти зменшує час перехідного процесу на 83,3 %. На перерегулювання суттєво впливає горизонт прогнозування й, у меншій мірі, масштабний коефіцієнт моделі Лагерра. Так, при зміні горизонту прогнозування з одного до п'яти знижується перерегулювання на 85,8 %, а наступне збільшення до 100 практично його усуває. Також у результаті обчислювальних експериментів установлено, що зниження перерегулювання досягається шляхом варіювання обмежень на керуючу дію. Відзначимо, що при будь-якій конфігурації схеми керування похибка сталого режиму відсутня.

ЛІТЕРАТУРА

1. Johansson A. Modeling And Simulation Of Cone Crushers // in Proceedings of IFACMMM. Workshop on Automation in Mining, Mineral and Metal Industry. – 2009. – Viñadel Mar, Chile. – PP. 13–18.
2. Allgöwer F., Findeisen R., Nagy Z.K. Nonlinear Model Predictive Control: From Theory to Application // Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers. – 2004. – Iss. 35/2004(3). – PP. 299–315.
3. Du J., Song C. Multi-PI Control for Block-structured Nonlinear Systems // Journal of Computers. – 2012. – Iss. 7/2012(12). – PP. 3044–3051.
4. Patikirikoral T., Wang L., Colman A. and others. Hammerstein-Weiner Nonlinear Model Based Predictive Control For QoS Management in Complex Software Systems // Control Engineering Practice. – 2012. – Iss. 20/2012(1). – PP. 49–61. – ISSN 0967-0661.

5. Abonyi J., Babuska R., Ayala Botto M. and others. Identification and Control of Nonlinear Systems Using Fuzzy Hammerstein Models // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. – 2000. – Iss. 39/2000(11). – PP. 4302–4314.

6. Wang L. Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB. – London: Springer-Verlag, 2009. – 375 p. – ISBN 978-1-84882-330-3.

7. Mahmoodi S., Poshtana M., Jahed-Motlagh R. Nonlinear Model Predictive Control of a pH Neutralization Process Based on Wiener–Laguerre Model // *Chemical Engineering Journal*. – 2009. – Iss. 146. – PP. 328–337.

8. Hadeif J.E., Oлару S., Rodriguez-Ayerbe P. and others. Nonlinear Model Predictive Control Of The Air Path Of A Turbocharged Gasoline Engine Using Laguerre Functions // In *Proceedings of System Theory,*

Control and Computing (ICSTCC), 2013, 17th International Conference. – Sinaia, 2013. – PP. 193–200.

9. Dasgupta D., Patwardhan S.C. NMPC of a Continuous Fermenter Using Wiener-Hammerstein Model Developed from Irregularly Sampled Multi-rate Data // *Proceedings of the 9th International Symposium Dynamics and Control of Process Systems (DYCOPS 2010)*. – Belgium: Leuven, 2010. – PP. 623–628.

10. Yang J. Numerical Methods for Model Predictive Control: Master of Science Degree Thesis. – Technical University of Denmark, 2008. – 180 p.

11. Mykhailenko O. Cone Crusher Model Identification Using Block-Oriented Systems With Orthonormal Basis Functions // *International Journal of Control Theory and Computer Modeling (IJCTCM)*. – 2014. – Iss. 4/2014 (3). – PP. 1–8.

MODEL PREDICTIVE CONTROL OF CONE CRUSHER BASED ON ORTHONORMAL BASIS LAGUERRE FUNCTIONS

O. Mykhailenko

State Institution of Higher Education “Kryvyi Rih National University”

vul. XXII Partyzivdu, 11, Kryvyi Rih, 50027, Ukraine. E-mail: epem.mykhailenko@gmail.com

In this paper, model predictive control of cone crusher using orthonormal basis functions for control vector parameterization is showed. This approach has reduced the computational complexity and increase the controller speed. A comparative analysis of the parameters influence on the closed-loop system response quality is implemented. Settling time depends on the Laguerre model order and scaling factor as well as the prediction horizon. Overshoot occurs at short prediction horizon (1-3 samples) or scaling factor values less than 0.5. Overshoot can be reduced by changing constraints on the amplitudes of control. A number of limits on the control does not affect closed-loop response through receding horizon control principle. All model predictive control schemes are provided zero steady-state error. The control vector parameterization based on orthonormal basis functions will be used to the design nonlinear model predictive control application.

Key words: model predictive control, Laguerre functions, cone crusher.

REFERENCES

1. Johansson, Andreas (2009), “Modeling and Simulation of Cone Crushers”, *Proceedings of the IFACMMM 2009*, Viña del Mar, Chile, 14–16 October, pp. 13–18.

2. Allgöwer, F. (2004), “Nonlinear Model Predictive Control: From Theory to Application”, *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers*, Vol. 35, no. 3, pp. 299–315.

3. Du, J. and Song, C. (2012), “Multi-PI Control for Block-structured Nonlinear Systems”, *Journal of Computers*, Vol. 7, no. 12, pp. 3044–3051.

4. Patikirikoral, T., Wang, L. and Colman, A. (2012), “Hammerstein-Weiner Nonlinear Model Based Predictive Control For QoS Management in Complex Software Systems”, *Control Engineering Practice*, Vol. 20, no. 1, pp. 49–61.

5. Abonyi, J., Babuska, R. and Ayala Botto, M. (2000), “Identification and Control of Nonlinear Systems Using Fuzzy Hammerstein Models”, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 39, no. 11, pp. 4302–4314.

6. Wang, Liuping (2009), *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB*, *Advances in Industrial Control*, Springer-Verlag, London, Great Britain.

7. Mahmoodi, Sanaz, Poshtan, Javad, Jahed-Motlagh, Mohammad Reza and Montazeri, Allahyar

(2009), “Nonlinear Model Predictive Control of a pH Neutralization Process Based on Wiener–Laguerre Model”, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 146, pp. 328–337.

8. Hadeif, J.E., Oлару, S. and Rodriguez-Ayerbe, P. (2013), “Nonlinear Model Predictive Control Of The Air Path Of A Turbocharged Gasoline Engine Using Laguerre Functions”, *Proceedings of System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, Sinaia, pp. 193–200.

9. Dasgupta, Dwaipayan and Patwardhan, Sachin C. (2010), “NMPC of a Continuous Fermenter Using Wiener-Hammerstein Model Developed from Irregularly Sampled Multi-rate Data”, *In Proceedings of the 9th International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems (DYCOPS 2010)*, Leuven, Belgium, pp. 623–628.

10. Yang, J. (2008), *Numerical Methods for Model Predictive Control: Master of Science Degree Thesis*, *Technical University of Denmark*, 180 p.

11. Mykhailenko, O. (2014), “Cone Crusher Model Identification Using Block-Oriented Systems With Orthonormal Basis Functions”, *International Journal of Control Theory and Computer Modeling (IJCTCM)*, Vol. 4, no. 3, pp. 1–8.

Стаття надійшла 23.06.2014.