

Михайленко О. Ю.

## КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ДРОБЛЕННЯ РУДИ З ВИКОРИСТАННЯМ БЛОЧНО-ОРІЄНТОВАНОЇ ПРОГНОЗУЮЧОЇ МОДЕЛІ

*В статті розглянуто питання розробки системи прогнозуючого керування процесом дроблення руди. Запропоновано метод формування керувань, який базується на інвертуванні статичних нелінійностей блочно-орієнтованої моделі і апроксимації траєкторії керування системами ортонормованих функцій Лагерра. Отримана система продемонструвала високу якість перехідних процесів і низьке обчислюване навантаження на пристрій керування.*

**Ключові слова:** процес дроблення, керування з прогнозуючими моделями, якість керування, обчислювальне навантаження, моделювання.

### 1. Вступ

Одним зі шляхів підвищення ефективності рудопідготовки на гірничо-збагачувальних комбінатах є отримання максимально дрібної і однорідної руди на стадії дроблення. Таке рішення дозволяє перенести енерговитрати з операції подрібнення на менш енергоємний процес. Цього можна досягнути або повним переобладнанням технологічних ліній, або оптимізацією режимів роботи існуючого технологічного устаткування за рахунок розробки нових і удосконалення існуючих методів та алгоритмів керування ним. З економічної точки зору, перевага надається останньому рішенню.

Існуючі методи і системи автоматизованого керування (САК) процесом дроблення не дозволяють ефективно керувати гранулометричним складом готового продукту, тому розробка адаптивної САК, що дозволить забезпечити високі характеристики крупності в умовах коливань властивостей руди, зміни параметрів технологічного обладнання та наявності завад у каналах передачі даних є актуальною науковою задачею.

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Метод керування з прогнозуючою моделлю (МРС) продемонстрував високу ефективність при керуванні технологічними процесами. Принцип керування полягає в прогнозуванні поведінки системи на визначеному інтервалі і забезпечення на ньому найкращого наближення виходу об'єкту до сигналу завдання [1–3] шляхом рішення оптимізаційної задачі. Найбільш розповсюдженою формою цільової функції при цьому є квадратичний критерій.

Враховуючи нелінійність процесу дроблення доцільно розглянути можливі шляхи рішення задачі прогнозуючого керування за умови, що прогнозуюча модель також є нелінійною (NMPC). Більш простий метод полягає в лінеаризації нелінійної моделі навколо робочої точки [4] і застосуванні методів лінійного прогнозуючого керування (MPC). Проте, якісні характеристики такого регулятора значно погіршуються при значних відхилен-

нях від номінального режиму роботи, що пояснюється нездатністю лінеаризованої моделі описати глобальну поведінку нелінійної системи.

Враховуючи, що NMPC-керування є формою задачі нелінійного програмування, тому для знаходження оптимальної траєкторії керуючих дій можуть бути застосовані методи послідовного квадратичного програмування або внутрішньої точки [5]. Проте, в результаті зростає обчислювальне навантаження на пристрій керування і швидкодія системи при обчисленнях у режимі реального часу. Це обумовлюється більш складною ітеративною процедурою знаходження рішення задачі нелінійного програмування, у порівнянні з лінійним.

Третій спосіб базується на застосуванні методу інверсії статичної нелінійності [4], який зручно використовувати разом з блочно-орієнтованими системами через незалежність лінійного і нелінійного блоків моделей. При цьому при формулюванні задачі прогнозуючого керування відбувається заміна вихідних координат, керуючих дій і сигналів завдання проміжними зворотними змінними. Тоді для визначення вектора керувань, застосовуються алгоритми лінійного або квадратичного програмування, в залежності від відсутності або наявності обмежень на змінні входу-виходу. Проте, використання нелінійних компенсаторів може привести до отримання квазіоптимальних, а часто і субоптимальних рішень модифікованої задачі прогнозуючого керування.

Ключовим завданням при керуванні з прогнозуючою моделлю є визначення майбутньої траєкторії керування, тобто послідовності амплітуд керуючої дії або її приростів. За умов великої частоти дискретизації і тривалих горизонтів прогнозування число елементів вектору керувань, які необхідно визначити, може бути достатньо значним, що знижує час знаходження оптимального рішення, внаслідок великого обчислювального навантаження [6].

Дослідження [7] присвячено зниженню часу розрахункових операцій MPC-керування за рахунок скорочення числа ступенів свободи послідовності керувань в межах горизонту прогнозування. В роботі [8] обчислювальна ефективність визначення траєкторії керування підвищується за рахунок її наближеного представлення

вейвлет-функціями. Аналогічним чином в [6, 9] апроксимація траєкторії керування здійснюється системою ортонормованих базисних функцій Лагерра. Це дозволяє використовувати уніфіковану модель опису послідовності керувань. В результаті після визначення структури моделі (її порядку), число параметрів, які підлягають ідентифікації значно знижується і обмежується параметрами набору ортонормованих функцій.

Перевага використання керування з прогнозуючою моделлю в умовах керування виробничими процесами гірничо-збагачувальних комбінатів обумовлюється можливістю врахування фізичних і технологічних обмежень процесу шляхом накладання обмежень на амплітуду і приріст керування, а також на вихідні координати і підтверджується дослідженнями [10, 11]. Другою, більш загальною перевагою, є визначення керуючих впливів в режимі реального часу. При цьому швидкість обмежується лише частотою тактування сучасних апаратних засобів автоматизації і швидкістю збіжності оптимізаційних алгоритмів.

### 3. Об'єкт, ціль та задачі дослідження

*Об'єкт дослідження* — процеси автоматизованого керування дробленням руди у конусних дробарках при рудопідготовці на гірничо-збагачувальних комбінатах.

*Мета дослідження* полягає в розробці принципів, структури і системи адаптивного автоматизованого керування процесом дроблення руди на базі прогнозуючої моделі, що забезпечують формування та підтримку заданих однорідності дробленого продукту і окремого виходу контрольного класу крупності при дії неконтрольованих збурень, обумовлених коливаннями характеристик рудної сировини, змінами параметрів технологічного обладнання і завадами у каналах передачі даних.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

1. Розробка методу формування прогнозуючого керування процесом дроблення руди.
2. Дослідження якості перехідних процесів в замкненій системі і час обчислення керувань при використанні запропонованого методу.

### 4. Обладнання та методи дослідження якості розробленого прогнозуючого регулятора

**4.1. Об'єкт керування і обладнання, що використовувалося при проведенні обчислювальних експериментів.** При проведенні обчислювальних експериментів в якості об'єкту керування використано багатомірну аналітичну модель процесу дроблення руди [12]. При цьому керуючі дії процесу представлені шириною розвантажувальної щілини ( $\theta$ ) і швидкістю обертання конусу ( $\omega$ ), а вихідні координати — коефіцієнтом варіації характеристики крупності ( $CV$ ) і виходом контрольного класу ( $\gamma$ ).

Обчислення здійснювалися в програмному пакеті MATLAB на ПК з наступною конфігурацією: Intel Core i3-3120M 2,5 GHz 4 Гб ОЗУ Win7 x64.

**4.2. Методика визначення показників якості керування процесом дроблення.** Для оцінки точності керування процесом дроблення руди використано коефіцієнт варіації середньоквадратичної похибки  $CV(RMSE)$  виду:

$$CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i - \hat{y}_i}}{\sum_{i=1}^n \hat{y}_i / n}, \quad (1)$$

де  $r_i$  — сигнал завдання;  $\hat{y}_i$  — вихід об'єкту керування;  $n$  — кількість вимірів.

Оцінка часу ідентифікації моделі Лагерра здійснювала-ся стандартними засобами програмного пакету MATLAB.

### 5. Результати дослідження якості перехідних процесів і обчислювального навантаження при керуванні процесом дроблення руди з використанням прогнозуючої моделі

Для якісного формування адаптивного керування повинен бути відомий адекватний математичний опис об'єкту. В даній роботі в якості прогнозуючої моделі процесу дроблення використано блочно-орієнтовану структуру (БОМ) поєднану з системами ортонормованих функцій (СОФ) Лагерра. Адекватність моделі підтверджена дослідженнями [13].

Враховуючи нелінійність гібридної моделі при формуванні керувань необхідно використовувати методи нелінійного прогнозуючого керування (NMPC), котрі складні у реалізації та мають невисоку швидкість через свій ітераційний характер. Тому було досліджено доцільність застосування методу прогнозуючого керування, котрий базується на інвертуванні статичних нелінійних функцій входу-виходу гібридної моделі, що дозволило звести задачу прогнозуючого керування до задачі квадратичного програмування у наступній формі:

$$J = (R^* - \hat{Y}^*)^T Q^* (R^* - \hat{Y}^*) + \Delta \hat{U}^{*T} S^* \Delta \hat{U}^*; \\ R^* = Y^{-1}(R); \hat{Y}^* = Y^{-1}(\hat{Y}); \hat{U}^* = \Xi^{-1}(\hat{U}), \quad (1)$$

за умов:

$$\left\{ \hat{U}^* \in \mathbb{R}^n \mid \hat{U}_{\min}^* \leq \hat{U}^* \leq \hat{U}_{\max}^* \right\} \forall \{k \in \mathbb{N} \mid 1 \leq k \leq N_c - 1\}; \\ \left\{ \hat{Y}^* \in \mathbb{R}^n \mid \hat{Y}_{\min}^* \leq \hat{Y}^* \leq \hat{Y}_{\max}^* \right\} \forall \{k \in \mathbb{N} \mid 1 \leq k \leq N_p\}, \quad (2)$$

де  $Q^*$ ,  $S^*$  — матриці вагових коефіцієнтів входу-виходу;  $\Xi^{-1}(\cdot)$ ,  $Y^{-1}(\cdot)$  — зворотні функції нелінійностей входу-виходу;  $\Delta \hat{U}^*$  — інвертована траєкторія керування  $\Delta \hat{U}^* = [\hat{\Delta u}^*[k] \ \hat{\Delta u}^*[k+1] \ \dots \ \hat{\Delta u}^*[k+N_c-1]]^T$ ;  $\hat{Y}^*$  — інвертований вектор прогнозованих значень виходу БОМ  $\hat{Y}^* = [\hat{y}^*[k+1|k] \ \hat{y}^*[k+2|k] \ \dots \ \hat{y}^*[k+N_p|k]]^T$ ;  $R^*$  — сигнал завдання на горизонті прогнозування  $R^* = [r^*[k+1|k] \ r^*[k+2|k] \ \dots \ r^*[k+N_p|k]]^T$ ;  $N_c$  — горизонт керування;  $N_p$  — горизонт прогнозування.

Було складено структурну схему системи керування процесом дроблення з прогнозуючою моделлю, що представлена на рис. 1.

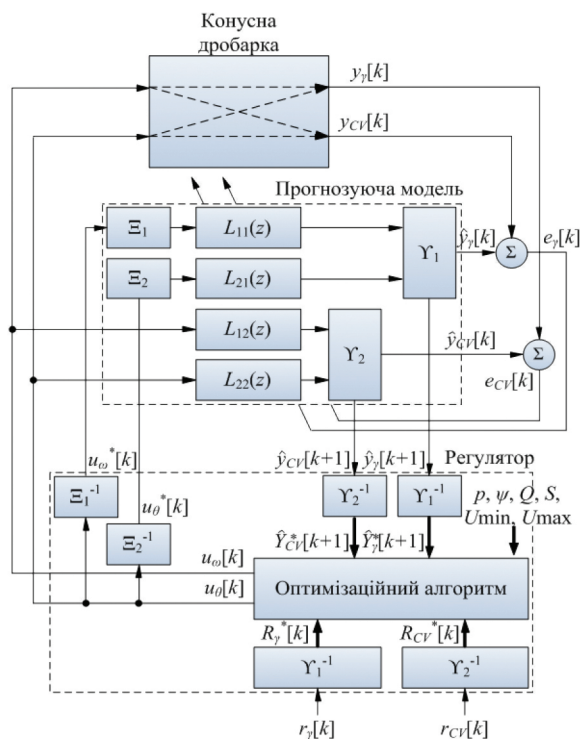


Рис. 1. Структурна схема системи прогнозуючого керування процесом дроблення

Вона складається з трьох основних блоків: об'єкту керування – конусної дробарки, гібридної прогнозуючої моделі і регулятора. В структуру прогнозуючої моделі входять дві пари систем Вінера і Гаммерштейна-Вінера.

Для зниження обчислювального навантаження запропоновано апроксимувати послідовність керувань на горизонті прогнозування лінійною моделлю. Враховуючи, що траєкторія приростів керуючої дії інтерпретується, як імпульсна характеристика динамічної системи, то її доцільно моделювати СОФ Лагерра через властивість експоненціального затухання ортонормованих функцій:

$$\Delta \hat{U}^* = \underline{L}[k]^T \gamma, \tag{3}$$

де  $\gamma$  – вектор параметрів моделі;  $\underline{L}[k]$  – вектор стану моделі Лагерра.

Оптимізаційна процедура визначення параметрів моделі, що апроксимує траєкторію керувань:

$$J = \frac{1}{2} \gamma^T 2(\underline{L}[k] \Theta^T Q^* \Theta \underline{L}[k] + S^*) \gamma + \gamma^T (-2 \underline{L}[k] \Theta^T Q^* \Psi) \rightarrow \min, \tag{4}$$

де  $\Omega$ ,  $\Theta$  – матриці системи і керування прогнозуючої моделі;  $\Psi = R - \Omega \underline{L}[k]^T - \Theta^* u[k-1]$ , за умов:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \underline{L}_\Sigma \\ -\underline{L}_\Sigma \end{bmatrix} \gamma &\leq \begin{bmatrix} \hat{U}_{\max}^* - \hat{u}^*[k-1] \\ -\hat{U}_{\min}^* + \hat{u}^*[k-1] \end{bmatrix}, \\ \underline{L}_\Sigma &= \begin{bmatrix} \underline{L}[k]^T & \sum_{i=0}^1 \underline{L}[k+i]^T & \dots & \sum_{i=0}^{N_p} \underline{L}[k+i]^T \end{bmatrix}^T. \end{aligned}$$

Для оцінки ефективності системи прогнозуючого керування процесом дроблення, котра використовує зворотні нелінійні функції і СОФ Лагерра при параметризації вектору керувань (далі за текстом система iLMPC) виконаємо серію обчислювальних експериментів. Для проведення порівняльного аналізу якості перехідних процесів і обчислювального навантаження додатково виконаємо моделювання роботи прогнозуючого регулятора з алгоритмом нелінійного послідовного квадратичного програмування визначення елементів траєкторії керування (далі NMPC). Довжина траєкторії прогнозування  $N_p$ , число обмежень  $N_c$  та значення матриць вагових коефіцієнтів  $Q$ ,  $S$  приймаються однаковими для обох систем.

Моделювання виконувалося для вибірки 1000 відліків з інтервалом дискретизації  $\Delta t = 0,5$  с. Отже, експериментальний часовий проміжок склав  $\{t \in \mathbb{R} | 0 \leq t \leq 500\}$  секунд. На вхід обох систем подаються сигнали завдання, котрі змінюються за однаковим законом.

Регулятори налаштовуються наступним чином. Горизонт прогнозування  $N_p$ , складає 20 відліків. Матриці вагових коефіцієнтів входу-виходу було обрано з наступними значеннями: для коефіцієнта варіації  $Q_{CV} = 1200$ , для виходу контрольного класу  $Q_\gamma = 20$ , для входу за швидкістю обертання конусу  $S_\omega = 0,005$  і для входу за шириною розвантажувальної щілини  $S_\theta = 0,005$ . Для системи NMPC встановлено горизонт керування 10 відліків. На амплітуди перших складових векторів керувань накладені обмеження  $\{\omega \in \mathbb{R} | 4 \leq \omega \leq 12\}$  об/с і  $\{\theta \in \mathbb{R} | 8 \leq \theta \leq 10\}$  мм.

На рис. 2, а наведені перехідні процеси у замкнутих системах прогнозуючого керування. В цілому якість системи iLMPC помітно краща. При цьому, система NMPC продемонструвала згасаючу коливальність при регулюванні. Як видно з графіків, при запропонованих налаштуваннях регулятора у NMPC-системі наявне суттєве перерегулювання. Для коефіцієнту варіації характеристики крупності воно складає  $\delta_{CV} = 7,58\%$ , а для окремого виходу контрольного класу  $\delta_\gamma = 2,7\%$ . Слід відзначити, що для виходу контрольного класу крупності значення вагових коефіцієнтів підібрані більш вдало.

Проте, як видно з фрагменту сталого режиму (рис. 2, б) на інтервалі  $\{t \in \mathbb{R} | 80 \leq t \leq 85\}$  секунд система NMPC має значно вищі похибки у статиці, абсолютні похибки яких складають  $e_{ст CV} = 0,0027$ ,  $e_{ст \gamma} = 0,043\%$  для показника однорідності дробленої руди і окремого виходу контрольного класу, відповідно.

Додатково проведені дослідження обчислювального навантаження на цифровий пристрій керування при використанні порівнюваних прогнозуючих регуляторів. Графічна інтерпретація результатів обчислювального експерименту наведені на рис. 3. У середньому час обчислення комбінації керувань складає 1,14 мілісекунд для системи iLMPC і 168,34 мілісекунд для системи NMPC. Різке підвищення часу формування керувань для системи iLMPC спостерігається при зміні завдан-

ня за обома вхідними величинами об'єкту керування. Для системи NMPC час обчислень змінюється постійно у діапазоні  $\{t_{\text{проц}} \in \mathbb{R} | 0,059 \leq t_{\text{проц}} \leq 0,42\}$  секунди, як у перехідному, так і сталому режимах роботи замкненої системи керування.

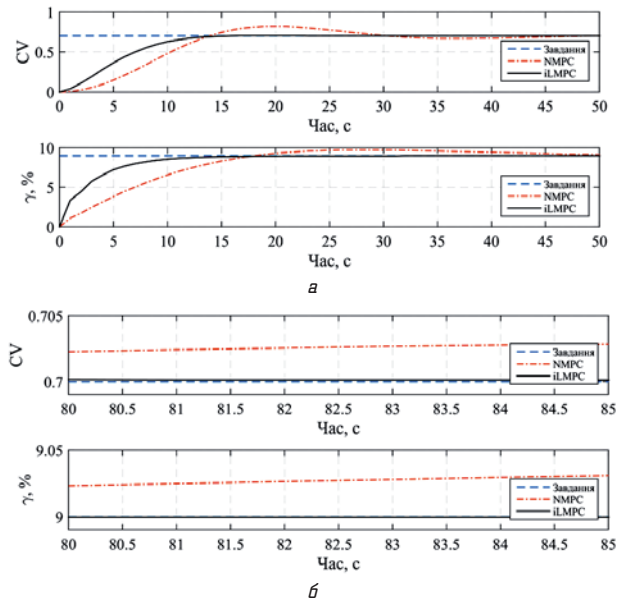


Рис. 2. Результати моделювання замкнених контурів САК процесом дроблення (фрагменти): а — перехідні процеси; б — сталий режим роботи

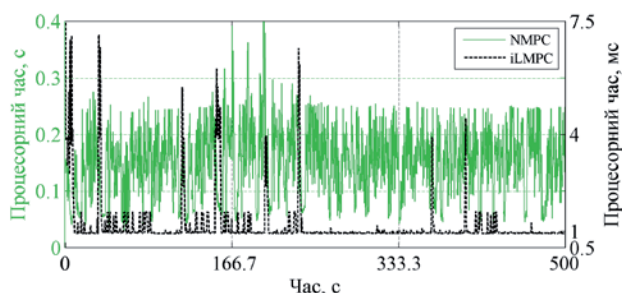


Рис. 3. Час формування керувань прогнозуючими регуляторами

Таким чином, можна констатувати, що прогнозуючий регулятор з інверсією статичних нелінійностей і апроксимацією траєкторій керувань СОФ Лагерра має кращі якісні характеристики перехідних процесів, зокрема, швидкодію, точність та обчислювальне навантаження у порівнянні зі звичайним нелінійним прогнозуючим регулятором. З урахуванням часу адаптивної ідентифікації параметрів гібридної прогнозувальної моделі [13] загальний час розрахунків складає 43,84 мілісекунди, що значно менше інтервалу дискретизації. Ця особливість дозволяє здійснювати весь обчислювальний цикл у інтервалі між отриманням даних про поточне значення режимних параметрів процесу дроблення від відповідних датчиків і АЦП.

Виконаємо дослідження якісних характеристик регуляторів при впливі на об'єкт зовнішніх неконтрольованих збурень. Здійснимо моделювання для двох збурюючих факторів: високочастотної перешкоди з низької амплітудою, що характерні для каналів передачі даних від датчиків до пристрою керування і низькочастотних з високою амплітудою, що обумовлені коливаннями

гранулометричних та фізико-механічних властивостей гірської маси. Для імітації першої дії використаємо послідовність випадкових чисел, котрі змінюються на кожному відліку за нормальним законом з середньоквадратичним відхиленням  $\sigma_{CV1} = 0,05$  для показника однорідності дробленого продукту і  $\sigma_{\gamma1} = 0,5$  % для окремого виходу контрольного класу крупності. Моделювання низькочастотних коливань виконаємо також шляхом використання послідовності випадкових чисел з середньоквадратичними відхиленнями  $\sigma_{CV2} = 0,2$  та  $\sigma_{\gamma2} = 2,2$  %, що змінюються на кожному 60 відліку. Результати моделювання роботи прогнозуючих регуляторів представлені на рис. 4.

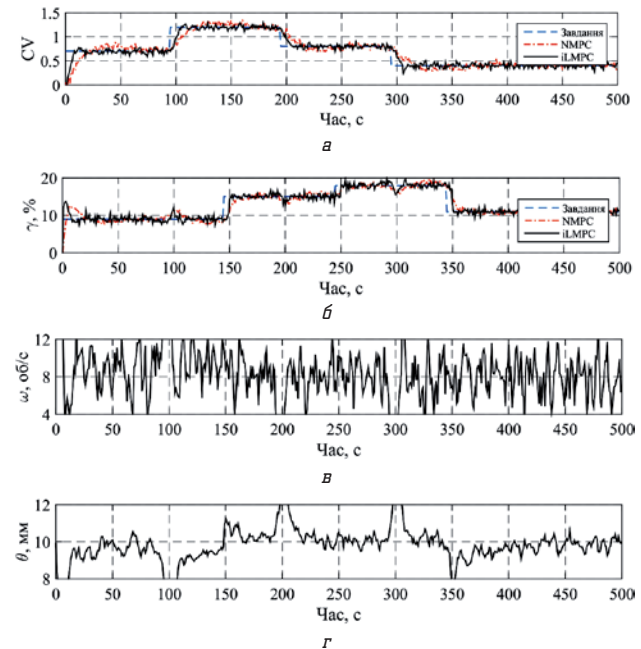


Рис. 4. Перехідні процеси в замкнених контурах САК процесом дроблення при дії зовнішніх збурень: а — коефіцієнт варіації характеристики крупності; б — вихід контрольного класу; в — швидкість обертання дроблячого конусу; г — ширина розвантажувальної щілини

Як видно з графіків, якість перехідних процесів очікувано знижується. У системи iLMPC з'являється перерегулювання  $\delta_{CV} = 6,7$  % при керуванні однорідністю дробленої руди. Також за даною вихідною координатою знижується швидкодія обох регуляторів. При керуванні за окремим виходом контрольного класу якісні характеристики системи iLMPC не погіршуються (перерегулювання складає лише  $\delta_{\gamma} = 12,31$  %), в той час як у регулятора NMPC збільшується час перехідного процесу і підвищується перерегулювання до  $\delta_{\gamma} = 12,2$  %.

Графіки (рис. 4, в, г) демонструють, що високі показники регулювання системи iLMPC обумовлюються коливаннями керуючої дії за швидкістю, що формується при розв'язанні задачі квадратичного програмування.

На рис. 5 наведені графіки часу знаходження комбінації керувань на кожному відліку для систем прогнозувального керування, що розглядаються, при впливі неконтрольованих збурень.

Відзначимо, що швидкодія регулятора iLMPC суттєво не змінюється у порівнянні з незбуреною системою і у середньому складає 1,19 мілісекунд, а швидкодія



обчислень системи NMPC знизуються до 195,16 мілісекунд, тобто на 15,9 %.

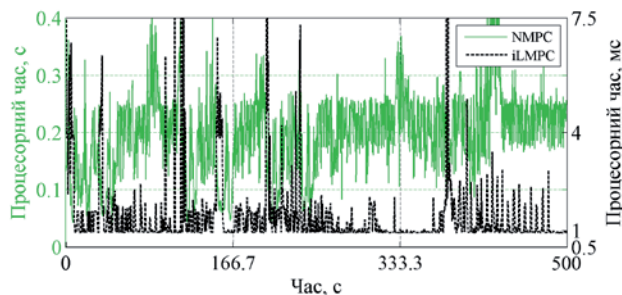


Рис. 5. Час формування керувань прогнозуєчими регуляторами

Таким чином можна зробити висновок, що система прогнозуєчого керування з інвертуванням статичних нелінійностей гібридної блочно-орієнтованої моделі і СОФ Лагерра, котрі параметризують траєкторії керувань може бути використана у реальних умовах рудопідготовки на гірничо-збагачувальних комбінатах і реалізована на базі цифрового пристрою керування, що працює з інтервалом дискретизації вище 20 мілісекунд.

## 6. Висновки

Запропоновано метод формування прогнозуєчого керування процесом дроблення руди, який заснований на інвертуванні статичних нелінійностей входу-виходу блочно-орієнтованої моделі і апроксимації траєкторій керування системами ортонормованих функцій Лагерра. Такий підхід дозволяє звести задачу прогнозуєчого керування до задачі квадратичного програмування, і тим самим зменшити час обчислювальних операцій.

Проведено порівняльний аналіз якості регулювання і швидкодії системи, що реалізує запропонований метод, з системою нелінійного прогнозуєчого керування. Встановлено, що при однакових налаштуваннях порівнюваних регуляторів і ідентичних збуреннях розроблена система дозволяє забезпечити на 12,5 % і 11,9 % менші перерегулювання за коефіцієнтом варіації характеристики крупності та виходом контрольного класу, на 6,3 і 14,7 секунди менший час перехідних процесів за відповідними режимними параметрами і в 164 рази (1,19 мілісекунд) нижчий час формування керувань. Слід відзначити, що у запропонованій системі керування нижча похибка у статичці.

## Література

- Allgöwer, F. Nonlinear Model Predictive Control: From Theory to Application [Text] / F. Allgöwer, R. Findeisen, Z. K. Nagy // Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers. — 2004. — Vol. 35, № 3. — P. 299–315.
- Веремей, Е. И. Управление с прогнозирующими моделями [Текст] / Е. И. Веремей, М. В. Сотникова. — СПб.: СПбГУ, 2014. — 212 с.
- Кабанов, С. А. Управление системами на прогнозирующих моделях [Текст] / С. А. Кабанов. — СПб.: СПбГУ, 1997. — 200 с.
- Patikirikoral, T. Hammerstein-Weiner Nonlinear Model Based Predictive Control For QoS Management in Complex Software Systems [Text] / T. Patikirikoral, L. Wang, A. Colman, J. Han // Control Engineering Practice. — 2012. — Vol. 20, № 1. — P. 49–61. doi:10.1016/j.conengprac.2011.09.003
- Базара, М. Нелинейное программирование. Теория и алгоритмы [Текст]: пер. с англ. / М. Базара, К. Штетти. — М.: Мир, 1982. — 593 с.
- Hadef, J. E. Nonlinear Model Predictive Control Of The Air Path Of A Turbocharged Gasoline Engine Using Laguerre Functions [Text] / J. E. Hadef, S. Olaru, P. Rodriguez-Ayerbe, G. Colin, Y. Chamailard, V. Talon // In Proceedings of System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2013 17th International Conference. — Sinaia, 2013. — P. 193–200. doi:10.1109/icstcc.2013.6688959
- Hadef, J. E. Explicit-Ready Nonlinear Model Predictive Control of the Air Path of a Turbocharged Spark-Ignited Engine [Text] / J. E. Hadef, S. Olaru, P. Rodriguez-Ayerbe, G. Colin, Y. Chamailard, V. Talon // In Proceedings of 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control. — Tokyo, Japan, 2013. — P. 189–194. doi:10.1109/cca.2013.6662746
- Lee, J. H. Improving Computational Efficiency of Model Predictive Control Algorithm Using Wavelet Transformation [Text] / J. H. Lee, Y. Chikkula, Z. Yu, J. C. Kantor // International Journal of Control. — 1995. — Vol. 61, № 4. — P. 859–883. doi:10.1080/00207179508921935
- Wang, L. Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB [Text] / L. Wang. — London: Springer-Verlag, 2009. — 375 p. doi:10.1109/acc.2009.5159781
- Поркуян, О. В. Идентификация объектов управления на основе моделей Гаммерштейна относительно к процессам магнитной сепарации [Текст]: зб. наук. пр. / О. В. Поркуян // Вісник Криворізького технічного університету. — 2007. — № 19. — С. 223–228.
- Корнієнко, В. І. Автоматизовані системи оптимального керування процесами крупного дроблення та самоздрібнювання руд [Текст]: автореф. дис. ... д-р. техн. наук: 05.13.07 / В. І. Корнієнко. — Дніпропетровськ, 2010. — 40 с.
- Михайленко, О. Ю. Удосконалення математичної моделі конусної дробарки з урахуванням розділення камери дроблення на зони [Текст]: зб. наук. пр. / О. Ю. Михайленко // Вісник Криворізького національного університету. — Кривий Ріг: ДВНЗ «КНУ», 2013. — Вип. 35. — С. 163–170.
- Mykhailenko, O. Cone Crusher Model Identification using Block-Oriented Systems with Orthonormal Basis Functions [Text] / O. Mykhailenko // International Journal of Control Theory and Computer Modelling (IJCTCM). — 2014. — Vol. 4, № 3. — P. 1–8. doi:10.5121/ijctcm.2014.4301

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ДРОБЛЕНИЯ РУДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЛОЧНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛИ

В статье рассмотрен вопрос разработки системы прогнозирующего управления процессом дробления руды. Предложен метод формирования управлений, основанный на инвертировании статических нелинейностей блочно-ориентированной модели и аппроксимации траекторий управления системами ортонормированных функций Лагерра. Полученная система продемонстрировала высокое качество переходных процессов и низкую вычислительную нагрузку на устройство управления.

**Ключевые слова:** процесс дробления, управление с прогнозирующими моделями, качество управления, вычислительная нагрузка, моделирование.

*Михайленко Олексій Юрійович, асистент, кафедра електропостачання та енергетичного менеджменту, ДВНЗ «Криворізький національний університет», Україна, e-mail: epem.mykhailenko@gmail.com.*

*Михайленко Алексей Юрьевич, асистент, кафедра електропостачання та енергетичного менеджменту, ГВУЗ «Криворізький національний університет», Україна.*

*Mykhailenko Oleksii, State institution of higher education «Kryvyi Rih National University», Ukraine, e-mail: epem.mykhailenko@gmail.com*