

## МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

УДК 681.518.54

### ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВАЛКОВОГО МЛИНА AG-MPS 180 ВК

*Л.М. Заміховський, Р.Б. Скрип'юк*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська,  
15, м. Івано-Франківськ, 76019, тел. (03422)48000, e-mail: ktsu.nung@gmail.com*

*Описана методика і вимірювальна система для зняття перехідної характеристики вертикального валкового млина (ВВМ). Проведено аналіз експериментальних даних – перехідних характеристик. Здійснена ідентифікація за методом Симою, визначений полюс AR-моделі та його залежність від терміну експлуатації ВВМ, який може бути прийнятий за діагностичну ознаку технічного стану (зношення) його робочих органів.*

*Ключові слова: млин, перехідна характеристика, ідентифікація, модель.*

*Описана методика и измерительная система для снятия переходной характеристики вертикальной валковой мельницы. Проведен анализ экспериментальных данных – переходных характеристик и осуществленная идентификация за методом Симою - определен полюс AR-модели и его зависимость от срока эксплуатации ВВМ, который может быть принят за диагностический признак технического состояния (износа) рабочих органов вертикальной валковой мельницы.*

*Ключевые слова: мельница, переходная характеристика, идентификация, модель.*

*The vertical roll mill transitional description removed method and measuring system is described. The experimental data (transitional descriptions) analysis is conducted. The identification using Simoy's methods is made, the ones dependence on the term vertical rolling mill exploitation is described. This term can be accepted as the diagnostic sign of the vertical rolling mill working units technical state and wearing.*

*Key words: mill, transitional characteristic, identification, model.*

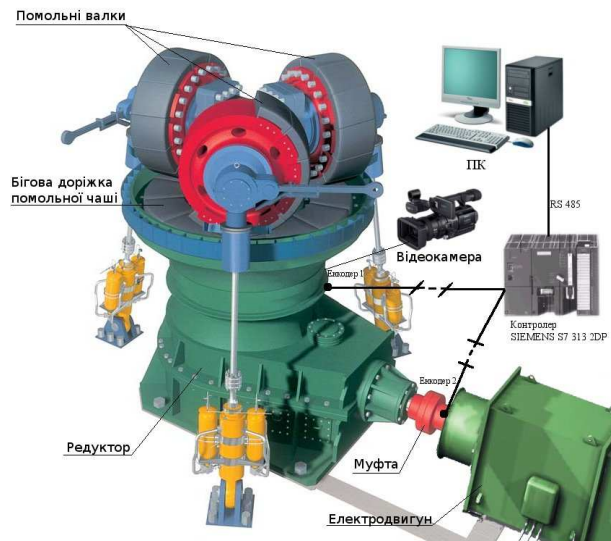
Зростання вартості природного газу, яке намітилося в останні роки, вимагає переходу на енергозберігаючі технології. Однією з таких технологій є використання пилевугільної суміші на найбільш енергоємних підприємствах: в котельних установках енергоблоків теплових електростанцій, доменних печах металургійних комбінатів, в цементній промисловості для випалювання клінкеру тощо. Для приготування пилевугільної суміші використовують вертикальні валкові млини [1]. Так, на ВАТ “Івано-Франківськцемент” для цієї мети використовується вертикальний валковий млин (ВВМ) MPS 180BK фірми PFEIFFER AG.

Від технічного стану робочих органів, якими є три помельні валки та бігова доріжка основного вузла ВВМ – помельної чаші (рис. 1), залежить ефективність процесу помелу вугілля

та якість вихідного продукту.

Не дивлячись на відносну просту конструкцію помельної чаші, основним її недоліком є зношування поверхонь робочих органів. Перевірка стану робочих органів проводиться раз на два тижні шляхом зупинки ВВМ і проведення вимірювання величини їх зносу. Сама процедура вимірювання передбачає прикладання до робочих поверхонь валка і бігової доріжки спеціальних шаблонів з нанесеними на їх робочу поверхню мітками (загальною кількістю – 11 шт.) через рівні проміжки, навпроти яких проводиться вимірювання величини зношеної поверхні тіла за допомогою штангенциркуля [2]. Така методика не дозволяє контролювати технічний стан робочих органів ВВМ в процесі його експлуатації, оскільки вимагає зупинки ВВМ, а

отримані результати не відповідають реальним. Останнє вимагає використання непрямих методів контролю. В [3, 4] наводяться розроблені методи контролю технічного стану робочих органів ВВМ за його вібраційними характеристиками та на основі використання методу непараметричної ідентифікації.



**Рисунок 1 – Конструкція помольної чаші та вимірювальна система для зняття перехідної характеристики**

Метою даної статті є обґрунтування вибору діагностичної ознаки стану робочих органів ВВМ на основі методу його параметричної ідентифікації за перехідною характеристикою, оскільки зменшення їх маси, як можна припустити, буде змінювати динамічні характеристики ВВМ, що може проявлятися у зміні кривої розгону.

Експериментальний матеріал, покладений в основу ідентифікації параметрів млина, представляє собою 29 перехідних характеристики (ПХ) ВВМ, знятих на протязі 2009-2010 років через певний інтервал часу. Враховуючи конструктивні особливості млина AG-MPS 180BK та його контролепридатність, для зняття ПХ було розроблено вимірювальну систему. На першому етапі її розробки була виготовлена двохполосна лінійка з градаціями в 1 см та 10 см відповідно, яка кріпилася до видимої рухомої частини помельної чаші. Поруч з нею на нерухомій основі була встановлена мітка.

Пуск млина знімався на відеокамеру (рис. 1) та переносився на ПК. Далі за допомогою спеціального програмного забезпечення розбивався на кадри (30 кадрів/с). За допомогою стаціонарної мітки та рухомої лінійки можна

було визначити відстань, яку пройшла помельна чаша за 1/30 с та побудувати ПХ. Однак ця методика не була використана у зв'язку з нечіткістю (розмитістю) отриманого зображення. Метод було вдосконалено шляхом встановлення градуйованої лінійки на нерухомій основі та наклеюванні міток різних кольорів на видимій рухомій частині помельної чаші. Відстань між мітками була дещо меншою за довжину лінійки. Це було обумовлено обов'язковою наявністю хоча б однієї мітки навпроти градуйованої лінійки в будь-який період часу. Порівнюючи розташування мітки на двох суміжних кадрах, визначалась відстань, яку пройшла помельна чаша за 1/30 с. Ці дані заносились в таблицю, та на їх основі будувалась ПХ. Хоча методика виявився простою і дієвою, однак похибка отриманих даних була значною (більше 30 %), у зв'язку з чим було прийняте рішення перейти до більш складних апаратних методів, які б давали більшу точність отримання даних.

Розроблена вимірювальна система складається з наступних елементів: енкодера фірми Autonics, контролера CPU 313C-2DP фірми Siemens та програми обробки даних (рис. 1).

Енкодер встановлюється на нерухому основу, суміжну з видимою частиною помельної чаші ВВМ. Для кращого контакту енкодера з основою чаші використали гумовий фланець із довжиною кола 200 мм. Довжина кола основи помельної чаші в місці проведення вимірювань складає 3400 мм. Керуючись технічними характеристиками, був вибраний енкодера типу E40S8-800-3-T-24 з дискретизацією у 800 імпульсів (точок) на оберт. Таким чином величина одного імпульсу (точки) відповідала 0,25 мм.

Сигнал з енкодера потрапляє на лічильник, вмонтований в контролер CPU 313C-2DP. Лічильник сумує всі отримані імпульси, а програма, яка написана в середовищі Simatic Step 7, з періодичністю 20 мс зчитує дані з лічильника та формує базу даних, за якими будується ПХ. З метою врахування впливу редуктора на ПХ на вал привідного електродвигуна встановлювали додатковий енкодер.

Як приклад, на рис. 2 приведена ПХ ВВМ. По осі ординат відкладена кутова швидкість помельної чаші, визначена у кількості імпульсів вимірювальної системи за інтервал дискретизації по часу, який складає 0,02 с. Встановлений режим характеристики дає швидкість порядку 190 імпульсів, що відповідає кутовій швидкості 38 об/хв. По осі абсцис

відкладено час. Як можна бачити, перехідний процес завершується за 1,2 с. Не аналізуючи характеристику вказаного перехідного процесу, відмітимо, що зафіксований усталений процес тривалістю більше, ніж 10 с, який є випадковим процесом, і може використовуватись для ідентифікації.

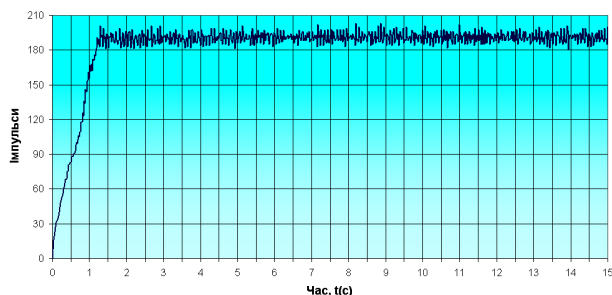


Рисунок 2 – Перехідна характеристика ВВМ

Його можна розглядати з двох точок зору: як результат вібрації ВВМ, обумовленої дією багатьох впливових факторів, аналіз спектру якої дозволить визначити технічний стан робочих елементів ВВМ; як реакцію валу помельної чаші на випадкове збудження моментом опору, що обумовлено процесом помелу. Виходячи з таких міркувань, була значно збільшена тривалість встановленого режиму.

В процесі обробки ПХ було встановлено, що динамічні параметри ВВМ в значній мірі залежать від такого параметра, як величина зусилля притискання валків до бігової доріжки, однак цей параметр не вимірювався. Це призвело до значних неконтрольованих коливань параметрів ідентифікації. Однак відносно велике число отриманих ПХ дозволило відібрати серед них такі, що характеризувалися майже постійним значенням вказаного параметра.

На рис. 3 наведені середні кутові швидкості усталеного режиму для 29 ПХ, які можна розбити на дві зони: нижню (192..194 імп.) та верхню (194..196 імп.). Оскільки у верхню зону не входить жодна з ПХ отриманих після заміни робочих органів обумовлених їх зносом, у подальших дослідженнях використовуються лише ПХ нижньої зони.

Вибір моделі, що представляє досліджуваний процес, є однією з основних задач ідентифікації. Загальна рекомендація при такому виборі полягає в тому, щоб «починати з простого». До більш складних структур слід переходити тільки тоді, коли більш прості моделі не пройшли тестів на відповідність.

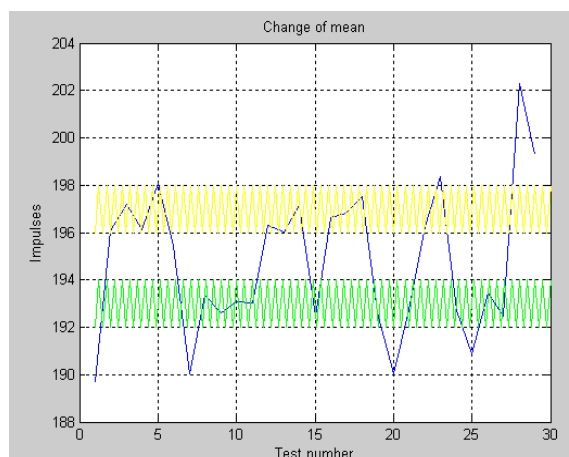


Рисунок 3 – Зміна середніх значень кутових швидкостей для усталеного режиму ПХ

Найбільш простим класом моделей динамічних систем вважається клас лінійних стаціонарних систем. Стаціонарні лінійні системи представляють собою найбільш важливий тип динамічних систем завдяки порівняно простому і ясному математичному апарату, що застосовується для їх опису. Необхідно розуміти, що такі системи відповідають ідеалізованому представленню реальних систем, які у більшості випадків є нестационарними та нелінійними. Не дивлячись на це, таке наближення виправдане, а проектні рішення, що базуються на лінійній теорії, у багатьох випадках є успішними.

На рис. 4 подані впливи, що діють на ВВМ, вихідною величиною якого є кутова швидкість  $N$  ротору млина (РМ). Ротор знаходиться під дією двох енергетичних впливів – енергії електричної мережі  $We$ , яка забезпечує крутний момент  $M_{кр}$ , та реакції розмеленого вугілля  $Wу$ , що змінює момент опору ротору млина  $M_{оп}$ . Останній також залежить від зусилля притискання валків до помельної чаші  $F_{пр}$ . Помельна чаша та валки позначені як ПМ+В. Млин має пусковий пристрій ППр, який запускається при вмиканні електроенергії  $We$  і починає діяти за програмою пуску ПрП з метою обмеження пускового струму потужного (250 кВт) електродвигуна. У встановленому режимі крутний момент  $M_{кр}$  зрівноважений моментом опору  $M_{оп}$ , у результаті чого встановлюється постійна кутова швидкість ротора  $N$ . Але момент опору не залишається сталим – він є функцією повільно змінної величини  $F_{пр}$  та опору вугілля  $Wу$ , який можна представити випадковим процесом. Таким чином маємо складний об'єкт, що знаходиться під дією декількох енергетичних впливів.

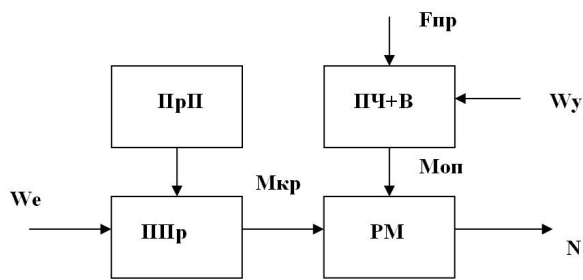


Рисунок 4 – Структура збурюючих впливів на ВВМ

Наведена схема може бути радикально спрощена. По-перше, можна вважати, що зусилля  $F_{пр}$  є постійним, оскільки для ідентифікації відібрані лише ПХ нижньої зони (рис. 3). У цьому випадку його можна віднести до постійних параметрів РМ. При цьому слід вважати  $M_{оп}$  випадковим процесом з нулевим середнім. По-друге, можна знехтувати наявністю ППр та ПрП і вважати, що реакція  $N$  отримана в результаті ступінчатої зміни не  $We$ , а моменту  $M_{кр}$ . Останнє припущення значно змінює реальне становище. Але залишається надія, що часові зміни динамічних параметрів підчас зносу робочих органів млину є значними і будуть впливати на форму перехідного процесу і в цьому випадку. В [2] встановлено, що на протязі безремонтного періоду сумарна маса бігової доріжки та 3-х валків зменшується приблизно на 300 кг. Нова схема наведена на рис. 5.

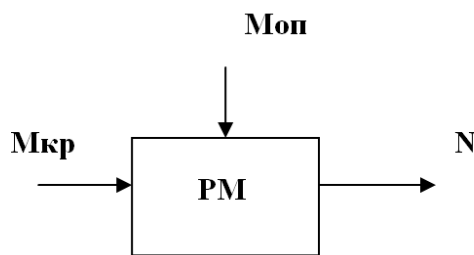


Рисунок 5 – Спрощена схема ідентифікації

Оскільки модель передбачається лінійною, подальше спрощення задачі можливо завдяки застосуванню принципу суперпозиції. Завдання розкладається на дві окремих задачі ідентифікації:

1) полягає у визначенні параметрів РМ при ступінчатій дії лише  $M_{кр}$ . При цьому вихідним сигналом вважають початкову ділянку пускової характеристики  $N1$ , де сигнал наростає (див. рис. 2). Це детермінована задача ідентифікації;

2) полягає у визначенні параметрів РМ при дії випадкового сигналу  $M_{оп}$ . При цьому

вихідним сигналом вважають ділянку встановленого режиму  $N2$ , де сигнал змінюється лише за рахунок статистичного збудження. Це задача спектрального аналізу.

Накладання сигналів  $N1$  та  $N2$  дає, очевидно, сигнал  $N$ . Накладання визначених параметрів моделей РМ1 та РМ2 повинно давати повну модель РМ. Але в останньому накладанні немає сенсу: параметри моделей РМ1 та РМ2 доцільно використовувати як окремі діагностичні ознаки.

У викладеній схемі принцип суперпозиції не реалізується ідеально. Дійсно, при розв'язку задачі 1 вихід не є вільним від дії випадкової складової  $M_{оп}$ , а при розв'язку задачі 2 – від дії ступінчатого імпульсу  $M_{кр}$ . Але майже ідеальний випадок може бути досягнутий за допомогою фільтрації. У задачі 1 це можливо зробити за допомогою інтегрування, наприклад, застосування ідентифікаційного методу площ Симою, який пов'язаний з багаторазовим інтегруванням сигналу  $N1$ . У задачі 2 це просто виконується за рахунок видалення з сигналу  $N2$  його середнього значення.

Таким чином, у подальшому необхідно розв'язати дві окремих задачі. Перша з них є детермінованою і для її розв'язку рекомендується метод площ Симою [5]. Друга відноситься до задач спектрального аналізу [6]. Вона може бути розв'язана як непараметричними, так і параметричними методами. Непараметричні методи дозволяють отримати спектр вібрацій кутової швидкості валу, який несе інформацію про розбалансування ротору та механічні пошкодження робочих органів. Застосування параметричних методів дозволяє знайти параметри системи за допомогою простішого алгоритму авторегресії.

Нижче вказана перша задача, яка сформульована математично, та приводиться її числовий розв'язок за допомогою програмного середовища MatLab 6.5.

Метод площ Симою [5] – один з найстаріших методів ідентифікації, який не втратив практичного значення і зараз завдяки його високій завадостійкості. Це пов'язане з застосуванням в алгоритмі багатократного інтегрування, що приводить до ефективної нейтралізації завад. Математичні основи методу приводяться нижче відповідно до [7].

Нехай передатна функція моделі описується виразом

$$W(s) = K \frac{1 + b_1 s + \dots + b_m s^m}{1 + a_1 s + \dots + a_n s^n},$$

де  $a_i, b_j, i=1, \dots, n, j=1, \dots, m$ , – коефіцієнти;  $K$  –

коефіцієнт підсилення. Причому  $m < n$  для моделі, що має фізичну реалізацію.

Метод дозволяє знайти коефіцієнти  $a_i, b_i$  для системи з приведеною передатною функцією  $\bar{W}(s)$ , що має одиничний коефіцієнт підсилення  $K=1$ . Останнє не обмежує області застосування методу, оскільки коефіцієнт  $K$  завжди може бути обчислений в усталеному (статичному) режимі.

Розкладемо у ряд Маклорена функцію, обернену до передатної функції  $\bar{W}(s)$ :

$$\begin{aligned} \bar{W}^{-1}(s) &= \frac{1 + a_1 s + \dots + a_n s^n}{1 + b_1 s + \dots + b_m s^m} = \\ &= 1 + S_1 s + \dots + S_k s^k + \dots = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} S_k s^k. \end{aligned} \quad (1)$$

Коефіцієнти  $S_k, k=1, 2, \dots$  названі «площами», оскільки вони визначались графоаналітично на розгінній характеристиці системи. Позбавляючись від знаменника в (1) і розкриваючи дужки та прирівнюючи члени з однаковими степенями комплексної змінної  $s$ , отримаємо наступні формули зв'язку коефіцієнтів передатної функції з площами Симою:

$$a_k = b_k + S_k + \sum_{i=1}^{k-1} b_i S_{k-i}, \quad k=1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

Як слідує з (2), дуже просто коефіцієнти визначаються для моделі типу авторегресії (AR-моделі), коли коефіцієнти  $b_j$  рівні нулю. У цьому випадку відповідно до (2)  $a_i = S_i$ .

Для визначення всіх коефіцієнтів (1) достатньо мати  $N=m+n$  рівнянь і стільки ж площ. Тому у (2) і далі  $k$  обмежено числом  $N$ . Зазвичай  $N \leq 5$ , завдяки швидкому накопиченню похибки, обумовленою обмеженням ряду (1). Це обмежує порядок моделі, який на практиці не перевищує третього ( $n \leq 3$ ).

Нині доступність обчислювальної техніки дозволила замінити графоаналітичні методи числовими. Знайдемо, як можна визначити площі з ПХ, яку називають ще перехідною функцією системи  $h(t)$ , тобто її реакції на одиничне ступінчате збудження при нульових початкових умовах. Саме таку функцію ми вважаємо заданою, якщо відома пускова характеристика ВВМ, приклад якої наведено на рис. 2. Для застосування методу потрібна дещо інша функція

$$\varphi(t) = 1 - \bar{h}(t), \quad (3)$$

де  $\bar{h}(t) = h(t)/h_0$ ,  $h_0$  – встановлене значення перехідної функції  $h(t)$ .

Запишемо та представимо рядом Макларена перетворення функції  $\varphi(t)$  за Лапласом:

$$\Phi(s) = \frac{1 - \bar{W}(s)}{s} = \sum_{k=0}^{N-1} \mu_k s^k, \quad (4)$$

де коефіцієнти  $\mu_k$ , що називають моментами, визначаються виразом

$$\mu_k = \frac{1}{k!} \Phi^{(k)}(0), \quad k=0, 1, \dots, N-1. \quad (5)$$

Тут  $\Phi^{(k)}(s)$  є похідною від  $\Phi(s)$  порядку  $k$ .

Пряме перетворення  $\varphi(t)$  за Лапласом складає:

$$\Phi(s) = \int_0^{\infty} \varphi(t) e^{-st} dt. \quad (6)$$

Диференціюючи (6)  $k$  разів та підставляючи результат у (5), отримаємо

$$\mu_k = \frac{1}{k!} \int_0^{\infty} (-t)^k \varphi(t) dt, \quad k=0, 1, \dots, N-1. \quad (7)$$

Формула (7) дозволяє визначити невідомі коефіцієнти розкладу (4) через функцію (3) шляхом інтегрування у часі.

Тепер можна визначити і площі. З (4) маємо  $s\hat{O}(s) = 1 - \bar{W}(s)$ , звідки  $[1 - s\hat{O}(s)]\bar{W}^{-1}(s) = 1$ . Підставляючи сюди вираз  $\Phi(s)$  через коефіцієнти  $\mu_k$  з (4), а також вираз  $\bar{W}^{-1}(s)$  через коефіцієнти  $S_k$  з (1), відкриваючи дужки і прирівнюючи всі коефіцієнти при  $s$  в правій частині нулю, отримаємо

$$S_k = \mu_{k-1} + \sum_{i=0}^{k-2} \mu_i S_{k-i-1}, \quad k=1, 2, \dots, N \quad (8)$$

Формула (8) дозволяє обчислити площі через відповідні моменти, визначені раніше.

Таким чином, обчислювальний процес алгоритму ідентифікації складається з чотирьох етапів:

- формування вихідної функції часу  $\varphi(t)$  відповідно до (3);
- обчислення моментів за формулами (7);
- обчислення площ за формулами (8);
- обчислення коефіцієнтів передатної функції за формулами (2).

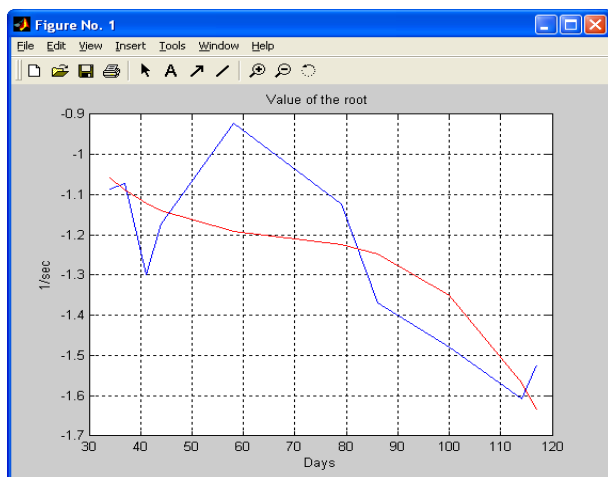
Застосування наведеного алгоритму обумовлюється вибором порядку моделі. Як вже

згадувалось,  $N \leq 5$ . Подальше уточнення порядку можливо з урахуванням числа обумовленості матриць, що описують лінійну систему рівнянь (2) [5]. Але в нашому випадку, завдяки великому рівню завад, матриці погано обумовлені. Тому більш простим і ефективним є використання критерію стійкості моделі. Так за критерієм Стодоли всі площі  $S_k$  повинні бути додатніми. Число  $N$  вибирають настільки великим, щоби всі площі моделі ще були додатніми, а при  $N+1$  з'являлася хоча би одна від'ємна площа. В цьому випадку модель можливо виготовити фізично.

Наведений алгоритм був реалізований в програмному середовищі MatLab 6.5. Особливостями програми є:

- використання глобальної змінної для збереження площ;
- використання у SWITCH не всіх дат, а лише дат проведення тестів 1-ої групи;
- встановлення однакової довжини всіх файлів даних;
- попереднє застосування фільтрів ковзаючого середнього;
- застосування AR-моделі першого порядку;
- перевірка моделі на стійкість за критерієм Стодоли;
- друк результатів з використанням їх оптимальної апроксимації за допомогою поліному 3-го порядку.

Отриманий графік залежності полюса моделі від терміну експлуатації BVM приведено на рис. 6.

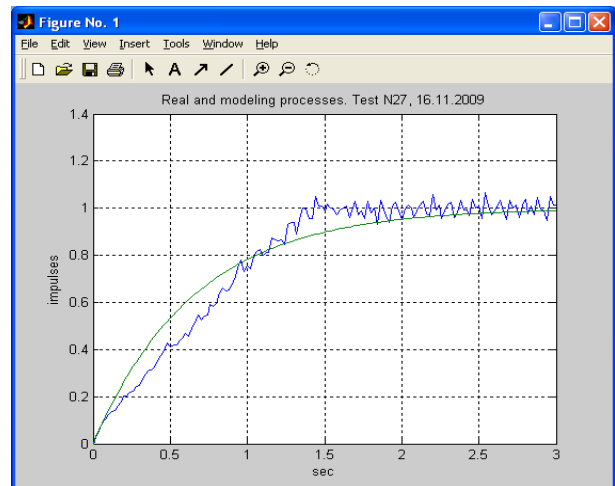


**Рисунок 6 – Графік залежність полюса AR-моделі від терміну експлуатації BVM**

З графіку рис. 6 видно, що, не дивлячись на значний розкид результатів, коефіцієнт перекривання діапазону (відношення

найбільшого та найменшого значень), що обчислений за кривою апроксимації, складає приблизно 1,6. Це може бути достатнім для формування на такій основі діагностичної ознаки стану робочих органів BVM.

На рис. 7 наведено порівняння реальної перехідної характеристики BVM (ПХ від від 16.11.2009) з отриманою в результаті моделювання. З рис. 7 видно, що моделювання пуску BVM ланкою першого порядку є задовільним.



**Рисунок 7 – Графіки реальної та змодельованої перехідних характеристик BVM**

## ВИСНОВКИ

Розроблена на базі енкодера типу E40S8-800-3-T-24 фірми Autonics, контролера CPU 313C-2DP фірми Siemens та створеного програмного забезпечення вимірювальна система, яка дозволяє знімати перехідну (розгінну) характеристику BVM з достатньою точністю.

На основі експериментального матеріалу (29 перехідних характеристик отриманих на протязі 2009-2010 років) була проведена ідентифікація методом Симоу – визначений полюс AR-моделі від терміну експлуатації BVM, який може бути прийнятний за діагностичну ознаку технічного стану (зношення) його робочих органів.

Відмічено, що експериментальна база проведеної ідентифікації характеризується значним розкидом даних, що обумовило порівняно низьку точність визначення параметрів. При формуванні експериментальних матеріалів взагалі не була врахована неконтрольована зміна зусилля притискання валків до бігової доріжки. Врахування

останнього у подальших експериментах дозволить підвищити точність отримання діагностичної ознаки і, відповідно, результату визначення технічного стану робочих органів ВВМ.

1. Компетентность в цементной промышленности. Каталог продукции фирмы SEBR, PFEIFFER AG .www.grag.com.  
2. Заміховський Л.М., Скрип'юк Р.Б. Дослідження зношення робочих органів вертикального валкового млина MPS 180 ВК / Л.М. Заміховський, Р.Б. Скрип'юк // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. - 2008. - №72 . - С. 34-39. 3. Заміховський Л.М. Метод контролю технічного стану вертикального валкового млина AG MPS 180 ВК за його вібраційними характеристиками [Текст] / Л.М. Заміховський, Р.Б. Скрип'юк, В.А. Ровінський // Нафтогазова енергетика. – 2010.- 1(12).- С.138-142. 4. Заміховський Л.М. Використання методу непараметричної ідентифікації для діагностування технічного

стану робочих органів вертикального валкового млина AG MPS 180 ВК [Текст] / Л.М. Заміховський, Р.Б. Скрип'юк // Вісник нац. тех. ун-ту «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ» - 2009.- с.89-93. 5. Симою М.П. Определение коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев систем регулирования. / М.П.Симою // Автоматика и телемеханик - 1957. - № 6 - С.514–527. 6. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. / С.Л.Марпл-мл. – М.: Мир, 1990. – 584 с. 7. Аязян Г.К. Расчет автоматизированных систем с типовым алгоритмом регулирования / Г.К. Аязян. - Уфа: Изд-во Уфимского нефтяного института, 1989. – 136 с.

**Поступила в редакцію 01.12.2010 р.**

**Рекомендував до друку докт. техн. наук,  
проф. Горбійчук М.І.**