УДК 681.5

АДАПТИВНИЙ МІНІМАКСНИЙ КРИТЕРІЙ ЯК ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ВИХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ КЕРОВАНИХ ОБ'ЄКТІВ

А. М. Мацуй, В. О. Кондратець
Кіровоградський національний технічний університет

Анотація. *Показано, що існують керовані об'єкти, де достатньо складно досягти необхідної точності визначення вихідної величини, наприклад, завитковий живильник в гірничорудній галузі. Запропоновано адаптивний мінімаксний критерій тривалості осереднення сигналу і знайдені його параметри, які дозволяють визначати розрідження пульпи з високою точністю у самих складних експлуатаційних умовах.*

Ключові слова: *завитковий живильник, співвідношення тверде/рідке, оптимальна тривалість осереднення, адаптація.*

Вступ

У гірничорудній промисловості України окремі види продукції, зокрема магнетитовий концентрат, більш вартісний порівняно з зарубіжними аналогами. Це зменшує його конкурентоспроможність на світовому ринку, а також виробів на його основі. Послабити ці вади передбачає реалізація Галузевої програми енергоефективності та енергозбереження на період до 2017р., затвердженої наказом Міністра промислової політики України №152 від 25.02.2009 року в частині гірничо-металургійного комплексу. На реалізацію цих задач спрямовані і плани наукових досліджень Кіровоградського національного технічного університету, зокрема, держбюджетна тема «Автоматизація процесів керування розділенням твердого по крупності у механічних спіральних класифікаторах» (державний реєстраційний номер 0115U003602). В роботі [1] сказано, що зниження енергоємності процесів подрібнення та підвищення їх технологічної ефективності необхідно розглядати як найбільш важливу складову на шляху інтенсифікації рудопідготовки. Одним з основних напрямів позитивного впливу на ці процеси є удосконалення автоматичного управління подрібненням руди [2]. В той же час в цій же роботі [2] звертається увага на необхідність розробки інформаційних засобів, а в роботі [3] зроблено акцент на відсутність надійних засобів необхідної точності або на досить значну вартість окремих давачів. Тому тема даної статті, спрямованої на підвищення точності визначення вихідних величин промислових керованих об'єктів, є актуальною.

Підвищенням точності вимірювальних засобів вчені займаються практично постійно. Поширеними є принцип інваріантності в вимірювальній техніці [4] і структурні методи підвищення точності засобів вимірювання [5]. Розповсюдження отримують алгоритмічні методи підвищення точності [6], де сигнал отримують відповідно розробленому алгоритму. Такі залежності бувають достатньо складними, до них входить ряд змінних, які визначаються з певними похибками. Тому до них доцільно застосовувати критерій незначних похибок [7]. Використання критерію незначних похибок при аналізі частинних похибок вимірювань дозволяє виокремити ті величини, які суттєво впливають на кінцевий результат. Підвищення точності вимірювання цих величин дозволяє зменшити сумарну похибку. У збагачувальній галузі алгоритмічні методи інколи стають не результатом підвищення точності, а основними, оскільки іншими підходами отримати потрібну інформацію не можливо. Це, зокрема, відноситься до визначення співвідношення тверде/рідке на вході кульових млинів, що подрібнюють вихідну руду з пісками односпірального класифікатора [8], піски класифікатора [9], рівень та тиск пульпи [10] у приймальному пристрої завиткового живильника. Ці алгоритми самі по собі володіють неповною інваріантністю [11], що дозволяє отримувати результуючі похибки, менші похибок вимірювання окремих величин або отримувати достатню точність при визначенні одного з параметрів зі значною похибкою. Однак ці алгоритми самі по собі ще не забезпечують високої точності вимірювання. Для отримання необхідних результатів часто корисні сигнали позбавляють від перешкод, застосовуючи, наприклад, фільтри Калмана-Б'юсі [12] або інші. Сигнали, які отримують у ланцюгах вимірювання параметрів, звичайно являють собою випадкові процеси. Зважаючи на це, їх піддають фільтруванню, згладжуючи або знаходячи здебільшого поточне середнє значення сигналу на даному відрізку часу [13]. При цьому визначають

© Мацуй А.М., Кондратець В.А., 2017

інтервал фіксування (осереднення) сигналів. Для похибки, що не перевищує 2%, інтервал інтегрування можливо визначити за залежністю, яку запропонував В.В. Солодовніков, якщо відоме верхнє значення частоти спектра випадкового сигналу [14]. О.С. Вентцель [15] орієнтовно пропонує на повному періоді самої високочастотної гармоніки у складі випадкової функції фіксувати 5..10 рівномірно розташованих значень. Довжину реалізації випадкової функції визначають шляхом знаходження мінімуму дисперсії [16]. У деяких випадках таким чином оброблені сигнали не забезпечують достатньої точності і додатково необхідно реалізувати допоміжні заходи, наприклад, метод мінімаксу [17], під яким підрозуміваються принцип оптимального вибору параметрів [18]. Стосовно керованих об'єктів зі значними сталими часу, значними і тривалими впливами збурюючих і керуючих діянь, наближених до східчастих функцій, цей захід також не забезпечує високої точності. Гарантувати необхідну точність визначення керованих величин за таких умов, мабуть, не можливо застосуванням критерію, коли одне і те ж правило є практично найкращим для будь-якого значення параметра, що належить до області альтернативи. Цього досягнути можливо використанням послідовного критерію [19], де оптимальне значення показника при визначальному параметрі не є оптимальним при іншому значенні показника. Тобто, необхідно адаптувати мінімаксний критерій до змінних умов керованого об'єкта, однак такі задачі ніхто не розглядав.

1. Постановка завдання

Метою даної роботи є розробка адаптивного мінімаксного критерію, який забезпечує незмінну точність визначення значення вихідних параметрів керованих об'єктів за умов дії складних і тривалих збурень.

Для реалізації поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- розглянути конкретний приклад керованого об'єкта, який потребує застосування мінімаксного критерію;
- теоретично описати мінімаксний критерій;
- теоретично обґрунтувати визначальний параметр мінімаксного критерію;
- виконати аналіз зміни визначального параметра адаптивного мінімаксного критерію;
- розробити алгоритм, що реалізує адаптивний мінімаксний критерій, та отримати результати оцінювання мінімаксу і вихідного параметра керованого об'єкта.

2. Конкретний приклад керованого об'єкта, який потребує застосування мінімаксного критерію

Адаптивний мінімаксний критерій розглянемо на прикладі завиткового живильника, який використовують для завантаження кульового млина рідким матеріалом з підняттям його з точки, що знаходиться нижче осі подрібнювального агрегату (рис.1). Завитки 9 (рис.1) обертаються разом з барабаном 1 кульового млина. Половину

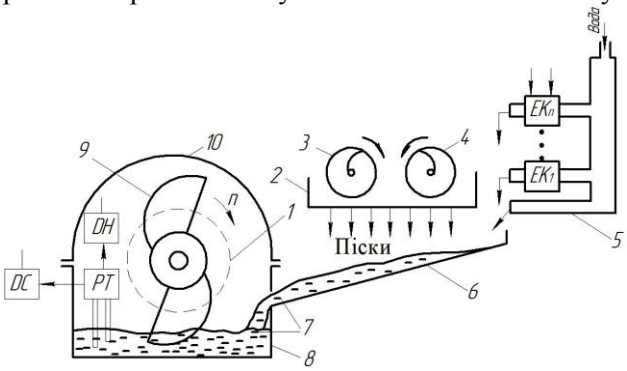


Рис.1 Завитковий живильник у циклі подрібнення пісків з механічним двоспіральним класифікатором: 1 – барабан кульового млина; 2 – двоспіральний класифікатор; 3 – друга спіраль; 4 – перша спіраль: 5 – магістралі подачі води в пісковий жолоб; 6 – пісковий жолоб; 7 – пульпа; 8 – приймальний пристрій завиткового живильника; 9 – завиток; 10 – кожух завиткового живильника; PT – перетворювач тиску; DH – датчик рівня пульпи; DC – датчик співвідношення тверде/рідке; $EK_1,\ldots,EK_5$ – електромагнітні клапани

оберту, коли взаємодіє один завиток 9 з пульпою 7 у приймальному пристрої 8, агрегат здійснює за 1,56 с. В нижній частині приймального пристрою завиток захоплює пульпу, об'єм якої залежить від її рівня, і транспортує до осі кульового млина, де вона перетікає у його барабан 1. Рівень пульпи і співвідношення тверде/рідке в приймальному пристрої завиткового живильника є його вихідними параметрами. Розглянемо задачу відносно співвідношення тверде/рідке в керованому об'єкті. Математичні моделі завиткового живильника отримані в роботі [20]. Вимірювання вихідних параметрів здійснюється перетворювачем тиску PT та датчиками рівня DH і співвідношення тверде/рідке DC. Вони працюють у достатньо складних умовах, оскільки збурення пульпи у приймальному пристрої 8 здійснюється одночасно за трьома напрямами. Спіралі 3 і 4 розвантажують піски нерівномірно в часі і ця зміна об'ємної витрати пульпи у пісковому жолобі 6 впливає як на рівень рідкого матеріалу у приймальному пристрої, так і на співвідношення

тверде/рідке в ньому . У кожній половині оберту в пульпі проходить завиток і спричиняє різкі зміни рівня пульпи, характер яких, отриманий на фізичній моделі, показано на рис.2. З реалізацій випадкових процесів видно, що інтенсивність зміни рівня пульпи залежить від усталених його значень. Крім того, епізодично за допомогою електромагнітних клапанів $EK_1,\ldots,\ EK_5$, в залежності від витрати пісків, включаються або відключаються магістралі подачі води 5 (рис.1). При цьому наноситься східчастий вплив на приймальний пристрій завиткового живильника 8, що супроводжується перехідними процесами, приклад яких приведено на рис.3.

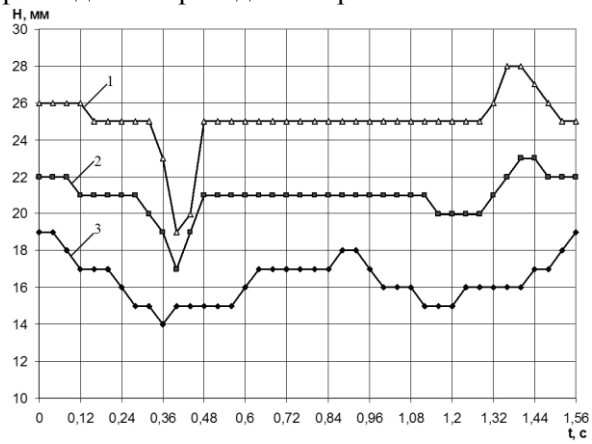
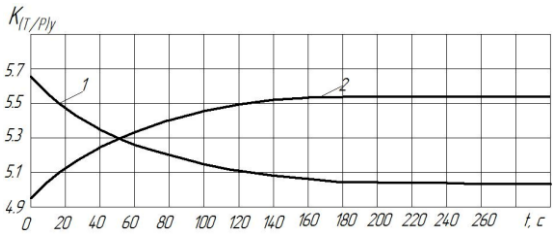
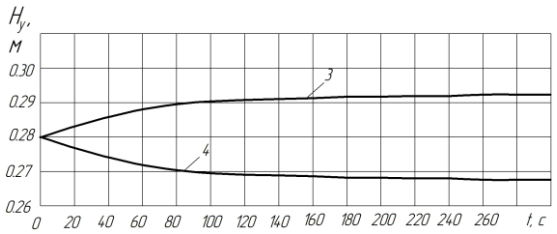


Рис.2. Реалізації випадкових процесів зміни рівня у приймальному пристрої завиткового живильника за половину оберту при різних середніх значеннях показника: 1 – 25мм; 2 – 21мм; 3 – 17 мм



а



б

Рис.3. Зміна співвідношення тверде/рідке (а) і рівня пульпи (б) в приймальному пристрої завиткового живильника при комутації першої магістралі подачі додаткової води в пісковий жолоб класифікатора: 1, 3 – включення магістралі; 2, 4 – виключення магістралі

Перехідні процеси як за співвідношенням тверде/рідке $K_{(T/P)y}$, так і за рівнем пульпи H_y здійснюються за експонентами. При включенні магістралі $K_{(T/P)y}$ зменшується, а рівень H_y зростає. Виключення магістралі супроводжується зростанням $K_{(T/P)y}$ і зменшеним H_y. У перехідних процесах швидкість зміни регульованої величини не постійна і існує граничне прискорення $K''_{(T/P)y}(t)$. У процесах інтегрування чим довший часовий інтервал визначення величини, тим менше похибка δ_k вимірювання параметра впливає на кінцевий результат. Наявність $K''_{(T/P)y}(t)$ в сигналі вводить додаткову похибку, яка, навпаки, буде тим більшою, чим довшим буде часовий інтервал. Виходячи з цього, повинен існувати найкращий часовий відрізок T_B, що забезпечує найвищу точність визначення швидкості зміни $K_{(T/P)y}(t)$. Такий інтервал T_B назвемо мінімаксним критерієм.

3. Теоретичне описання мінімаксного критерію

Виміряна швидкість зміни $K_{(T/P)y}(t)$ з врахуванням похибки дорівнює

$$\upsilon_k = \frac{K_{(T/P)y}(t+T_B) \pm \delta_k - K_{(T/P)y}(t) \pm \delta_k}{T_B}. \quad (1)$$

Похибка за швидкістю

$$\delta' = \frac{K_{(T/P)y}(t+T_B) - K_{(T/P)y}(t)}{T_B} - K'_{(T/P)y}(t) + \frac{2\delta_k}{T_B}. \quad (2)$$

Функцію $K_{(T/P)y}(t+T_B)$ розкладемо в ряд Тейлора

$$K_{(T/P)y}(t+T_B) = K_{(T/P)y}(t) + \\ + \frac{T_B}{1!} K'_{(T/P)y}(t) + \frac{T_B^{\,2}}{2!} K''_{(T/P)y}(t) + \ldots . \quad (3)$$

Обмежившись першими трьома членами ряду, отримаємо

$$\delta' = \frac{T_B \left| K''_{(T/P)y}(t) \right|}{2} + \frac{2\delta_k}{T_B}. \quad (4)$$

Оцінюючи граничну похибку, необхідно замість $\left| K''_{(T/P)y}(t) \right|$ прийняти $\left| K''_{(T/P)y}\max \right|$.

Знайдемо першу похідну виразу (4) за T_B. Вона буде дорівнювати

$$\frac{\partial\delta'}{\partial T_B} = \frac{\left|K''_{(T/P)y}\max\right|}{2} - \frac{2\delta_k}{T_B}. \qquad (5)$$

Прирівнюючи (5) до нуля, отримаємо недостатню умову мінімуму помилки

$$\frac{\left|K''_{(T/P)y}\max\right|}{2} - \frac{2\delta_k}{T_B} = 0, \qquad (6)$$

звідки

$$T_B = 2\sqrt{\frac{\delta_k}{\left|K''_{(T/P)y}\max\right|}}. \qquad (7)$$

Знаючи δ_k і $\left|K''_{(T/P)y}\max\right|$ для конкретного процесу, знаходимо його чисельне значення. Однак при цьому необхідно враховувати технологічні особливості керованого об'єкта. Наприклад, завитковий живильник здійснює половину оберту за 1,56 с, збуджуючи рух пульпи в приймальному пристрої. Тоді доцільно час T_B виражати у цілому числі таких інтервалів, тобто, в числі циклів $t_c = 1{,}56$ с, округлюючи отримане T_B до такого значення. Така операція буде сприяти підвищенню точності визначення вихідної величини керованого об'єкта.

4. Теоретичне обґрунтування визначального параметра мінімаксного критерію

Мінімаксний критерій дозволяє оптимізувати процес визначення співвідношення тверде/рідке у приймальному пристрої завиткового живильника, однак принцип, закладений в його основу, передбачає найбільш точне визначення параметра в середній частині діапазону. Ліворуч і праворуч допускаються похибки, які можуть бути в різних режимах роботи відчутними. Це вимагає удосконалення мінімаксного критерію.

На початковій ділянці перехідного процесу має місце велике значення швидкості зміни $K_{(T/P)y}$. Значні відхилення $\Delta K_{(T/P)y}$ на такій ділянці перехідного процесу дозволяють порівняно точно визначити параметр навіть за одним вимірюванням, тому інтервал часу тут повинен бути самим коротким. При віддаленні від цієї ділянки перехідного процесу точність визначення $K_{(T/P)y}$ необхідно підвищувати, оскільки різниця між попереднім і виміряним значенням буде менш відчутною. Досягнути кращої достовірності вимірювань можливо збільшенням їх числа при осередненні. При переході на режим, близький до усталеного, кількість вимірювань необхідно збільшувати, оскільки різниця між показаннями занадто мала. На усталеній ділянці перехідного процесу кількість вимірювань повинна бути достатньо великою. Аналіз показує, що на такій ділянці число циклів роботи завиткового живильника кульового млина повинно складати більше 50. Отже, мінімаксний критерій T_B виступає мірою точності визначення швидкості зміни співвідношення тверде/рідке, а саме значення швидкості може визначати час, впродовж кого знаходять середнє значення $K_{(T/P)y}$ в одиницях циклів, однак цю закономірність варіації часового інтервалу необхідно встановити, тобто, обґрунтувати критерій зміни тривалості осереднення значень співвідношення тверде/рідке в процесі ідентифікації. Тут можливо здійснити кілька підходів. Розглянемо один з них, який базується на високій надійності визначення швидкості зміни $K_{(T/P)y}$.

Зменшення швидкості υ_k зміни $K_{(T/P)y}$ вимагає збільшення інтервалу осереднення сигналу. На всьому діапазоні зміни υ_k необхідно встановити різну тривалість інтервалу осереднення $K_{(T/P)y}$ – від мінімальної до 50…70 циклів роботи завиткового живильника, що дорівнюють $t_c = 1{,}56$ с. Більш конкретно такий зв'язок можливо простежити, розглядаючи залежність швидкості зміни співвідношення тверде/рідке в приймальному пристрої завиткового живильника впродовж перехідного процесу, як це показано на рис.4. З рис.4 (крива 1) видно, що в перехідному процесі швидкість зміни співвідношення

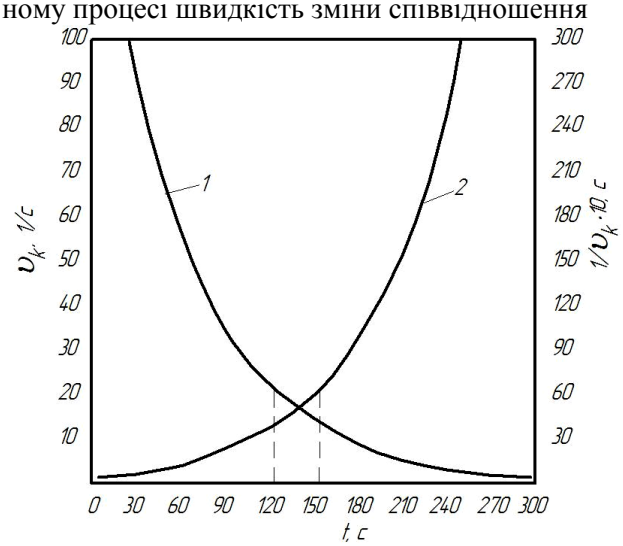


Рис.4. Залежність швидкості зміни співвідношення тверде/рідке в приймальному пристрої завиткового живильника та її оберненої величини впродовж перехідного процесу: 1 - υ_k ; 2 - $1/\upsilon_k$

тверде/рідке зменшується за нелінійною залежністю. Спочатку зменшення відбувається стрімко, потім має місце перехідна зона, а після неї пара-

метр спадає занадто повільно. Мінімаксу тут фізично відповідає зона в межах 120…150 с, оскільки перехідний процес триває близько 300 с. В цілому мінімакс, що знаходиться у цій зоні, найбільш добре характеризує всю залежність, однак ліворуч та праворуч цієї зони будуть допускатись суттєві похибки. В якості визначального параметра тут можливо використовувати і обернену величину $1/\upsilon_k$. Її характеризує крива 2 на рис.4. У даному випадку відбувається обернений характер зміни. При цьому у початковій частині перехідного процесу чутливість до зміни співвідношення тверде/рідке достатньо низька. Навпаки, в кінці перехідного процесу чутливість висока. Відповідно кривій 1 на рис.4 можливо відмітити зворотне. Чутливість у початковій фазі перехідного процесу висока, а після 150 с стає достатньо низькою. Звідси витікає, що у якості визначального параметра у початковій фазі перехідного процесу до 120 с (до мінімаксу) необхідно використовувати швидкість зміни вихідної величини υ_k , а після мінімаксу – обернену величину $1/\upsilon_k$.

5. Аналіз зміни визначального параметра адаптивного мінімаксного критерію

Аналіз показує, що результати, близькі до оптимальних, можливо отримати при автоматичному керуванні тривалістю осереднення в залежності від діапазону варіації визначального параметра – швидкості зміни співвідношення тверде/рідке в приймальному пристрої завиткового живильника υ_k або оберненої величини $1/\upsilon_k$. Зрозуміло, що інтервал осереднення сигналу спочатку повинен бути якомога коротшим, а потім збільшуватись в міру зменшення швидкості зміни вихідної величини керованого об'єкта. При цьому необхідно враховувати характер перехідного процесу. Зв'язок швидкості зміни співвідношення тверде/рідке в приймальному пристрої завиткового живильника в перехідному процесі встановлюють дані табл.1. З даних табл.1 видно,

Таблиця 1

Зв'язок швидкості зміни співвідношення тверде/рідке в приймальному пристрої завиткового живильника з тривалістю перехідного процесу

Тривалість перехідного процесу, с	Швидкість зміни $K_{(T/P)y}$ $\upsilon_k \times 10^{-4}$, 1/с	Відношення швидкостей в сусідніх часових інтервалах	Відношення швидкостей в сусідніх часових подвійних інтервалах	Обернене значення швидкості зміни $K_{(T/P)y}$ $1/\upsilon_k$, с	Відношення обернених значень швидкостей в сусідніх часових інтервалах
1,56	149,74	-	-	-	-
6,24	138,77	1,08	-	-	-
7,80	136,03	1,02	-	-	-
9,36	133,34	1,02	1,041	-	-
10,92	129,40	1,02	-	-	-
12,48	126,84	1,02	1,051	-	-
14,04	123,08	1,02	-	-	-
15,60	120,64	1,02	1,051	-	-
17,16	118,27	1,02	-	-	-
18,72	114,77	1,02	1,051	-	-
20,28	112,48	1,02	-	-	-
21,84	109,17	1,02	1,051	91,6	-
43,68	78,48	1,39	-	127,4	1,39
65,52	56,43	1,39	1,94	177,2	1,39
87,36	40,15	1,40	-	249,1	1,40
109,20	28,59	1,40	1,97	349,8	1,40

що на початковій гільці перехідного процесу швидкість зміни співвідношення тверде/рідке рівномірно зменшується. Потім швидкість зменшується уповільнено до малих значень. В кінці перехідного процесу вона складає близько 20% початкового значення. На початку діапазону при вибраних тривалостях осереднення сигналу різниця швидкостей невелика і складає практично 2%. Тому для досягнення високої точності при осередненні сигналів на початку перехідного процесу необхідно мати достатньо точну апаратуру для вимірювання вихідної величини керо-

ваного об'єкта. У протилежному випадку необхідно збільшувати тривалість осереднення сигналу, дещо втрачаючи точність. З даних табл.1 також слідує, що при збільшенні тривалості осереднення на один технологічний цикл різниця в сигналах вже складає на початку перехідного процесу 5%, що легко фіксується звичайними вимірювальними засобами. З даних табл.1 також видно, що відношення вихідної величини в сусідніх часових інтервалах як за параметром υ_k, так і за $1/\upsilon_k$ в кінці перехідного процесу однакове і складає 1,39…1,40. З цієї точки зору практично не має різниці у використанні υ_k чи $1/\upsilon_k$ при встановленні тривалості осереднення. Однак, враховуючи, що в кінці перехідного процесу сигнал υ_k стає незначним, а $1/\upsilon_k$, навпаки, великим, більш доцільно для встановлення інтервалу осереднення вихідної величини керованого об'єкта використовувати параметр $1/\upsilon_k$.

Враховуючи сказане, у даному випадку можливо запропонувати зміну тривалості осереднення сигналу у відповідності з даними табл.2, виражену у кількості технологічних циклів $t_c = 1{,}56$ с. Зрозуміло, що тут може існувати кілька альтернативних варіантів зміни тривалості осереднення сигналів. Згідно даних табл.2 початкова тривалість розпочинається з чотирьох технологічних циклів, тобто з 6,24 с. Це дозволяє розпізнати суттєві зміни вихідної величини в керованому об'єкті. Якщо це зафіксовано, то далі інтервал осереднення збільшується на один технологічний цикл і стає відповідно 7,8 с, 9,36 с і т.д. Це триває наближено до мінімаксу. Потім інтервал осереднення (після мінімаксу) доцільно стрімко збільшувати, наприклад, на 14 технологічних циклів порівняно з мінімаксом. Таке збільшення може здійснюватися з кроком $14t_c$ до кінця кривої перехідного процесу.

Таблиця 2

Відповідність тривалості інтервалів осереднення сигналу співвідношення тверде/рідке діапазонам зміни швидкості $K_{(T/P)y}$ у перехідному процесі

Швидкість $\upsilon_k \times 10^{-4}$ зміни $K_{(T/P)y}$, c^{-1}		Тривалість осереднення сигналу, виражена в кількості технологічних циклів t_c, с
max	min	
150,0	138,8	4
138,7	136,1	5
136,0	133,3	6
133,2	129,4	7
129,3	126,8	8
126,7	123,1	9
123,0	120,7	10
120,6	118,3	11
118,2	114,8	12
114,7	112,5	13
112,4	109,2	14
109,1	78,2	28
78,4	56,2	42
56,4	40,2	56
40,1	12,0	70

Відповідно даним табл.2 можливо керувати тривалістю осереднення сигналу співвідношення тверде/рідке безпосередньо за швидкістю зміни $K_{(T/P)y}$. Знаходження $K_{(T/P)y}$ з оптимальною точністю гарантує високу якість керування технологічним процесом.

6. Розробка алгоритму, що реалізує адаптивний мінімаксний критерій, та результати оцінювання мінімаксу і вихідного параметра керованого об'єкта

Відносна похибка ідентифікації $K_{(T/P)y}$ складає близько 2,71%, $K_{(T/P)y}$=5,4. Тоді абсолютна похибка визначення співвідношення тверде/рідке становить δ_k = 0,14634.

Перехідний процес описується рівнянням

$$K_{(T/P)y}(t) = \left(1 - e^{-\frac{1}{T_y}t}\right) K_{(T/P)g}, \qquad (8)$$

де $K_{(T/P)g}$ – співвідношення тверде/рідке в пісковому жолобі.

Друга похідна відповідно (8) дорівнює

$$K''_{(T/P)y}(t) = \left(-K_{(T/P)g}/T_y^2\right)e^{-\frac{1}{T_y}}. \qquad (9)$$

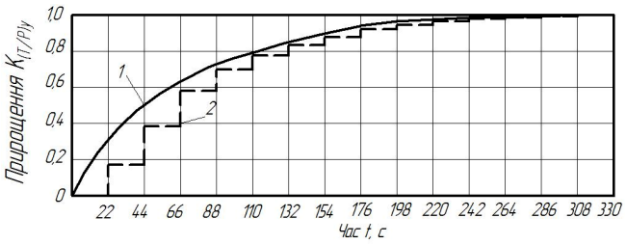
Максимальне значення прискорення $K''_{(T/P)y\max}$ буде при $t = 0$, тобто, $K''_{(T/P)y\max} = -K_{(T/P)g}/T_y^2$. Враховуючи, що в пісковому жолобі $K_{(T/P)g}$ = 5,0, T_y = 65,2 с, отримуємо $\left|K''_{(T/P)y\max}\right| = |0{,}0011762|$, 1/с^2. Тоді відповідно (7) T_B = 22,31 с. Передбачуваний мінімум похибки за швидкістю відповідно (4) дорівнює $\delta'_{\min}$ = 0,026239 1/с. При відхиленні T_B на ±0,8 с похибка δ' ліворуч і праворуч передбачуваного мінімуму приймає значення 0,026257 1/с і 0,026256 1/с, що більше $\delta'_{\min}$. Тому знайдена $\delta'_{\min}$ є мінімумом, а отримане T_B – мінімаксним критерієм. Враховуючи результати розрахунків і те, що цикл завиткового живильника складає t_c = 1,56 с, приймемо $T_B = 14\,t_c$ = 21,84 с, що незначно відхилено від знайденого мінімуму. Відповідно мінімаксному критерію можливо визначати швидкість зміни співвідношення тверде/рідке з оптимальною точністю впродовж 21,84 с.

Знаходження співвідношення тверде/рідке в приймальному пристрої завиткового живильника з використанням мінімаксного критерію можливо здійснити за алгоритмом, представленим на рис.5. Насамперед за допомогою спеціальної алгоритмічної схеми відповідно рис.2 відшукується ділянка випадкового процесу з незмінним рівнем пульпи. Використовуючи значення параметрів пульпи на цій ділянці, реалізується підпрограма знаходження $K_{(T/P)y}$ (рис.5). Знайдене значення $K_{(T/P)y}$ запам'ятовується. Такі процедури виконуються впродовж $4\,t_c$ = 6,24 с з визначенням і запам'ятовуванням середнього значення $K_{(T/P)y}$ за цей інтервал часу. Потім здійснюється така ж процедура з запам'ятовуванням наступного значення $K_{(T/P)y}$ за такий же інтервал часу. Отримані дані використовуються при реалізації підпрограми знаходження швидкості зміни $K_{(T/P)y}$, яка використовується в підпрограмі вибору числа циклів осереднення сигналу за даними табл.2, введеними в пам'ять контролера. Вибране число циклів слугує основою роботи підпрограми осереднення значень $K_{(T/P)y}$, яка формує кінцеве значення співвідношення тверде/рідке в приймальному пристрої завиткового живильника. Паралельно з цим знайдене середнє значення $K_{(T/P)y}$ впродовж нового циклу осереднення сигналів використовується підпрограмою знаходження швидкості зміни $K_{(T/P)y}$ для здійснення вибору нового значення числа циклів осереднення сигналів. Це продовжується весь час при роботі технологічного агрегату. Розглянутий алгоритм реалізується контролером.

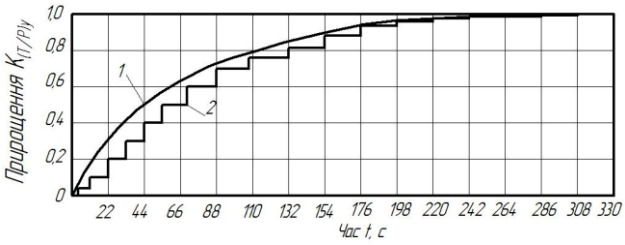
Рис.5. Алгоритм знаходження співвідношення тверде/рідке в приймальному пристрої завиткового живильника за допомогою адаптивного мінімаксного критерію

Результати визначення вихідної величини керованого об'єкта наведені на рис.6. На рис.6,а представлено порівняння теоретичної залежності 1 зміни співвідношення тверде/рідке в завитковому живильнику і визначеної залежності 2 з використанням знайденого мінімаксного критерію T_B = 21,84 с. З графіків видно, що лише в середині та кінці діапазону результати достатньо точно співпадають. На початку перехідного процесу результати визначення вихідної величини незадовільні. З використанням адаптивного мінімаксного критерію з даними, приведеними в табл.2, результати на початку перехідного процесу покращуються при практично однакових показниках в середній частині і в кінці перехідного процесу (рис.6, б). Оскільки точність бажано покращити, доцільно використати альтернативний варіант зміни тривалості осереднення сигналу в залежності від υ_k. Враховуючи, що крутизна зміни $K_{(T/P)y}$ на початку перехідного процесу велика, можливо інтервал осереднення вихідної величи-

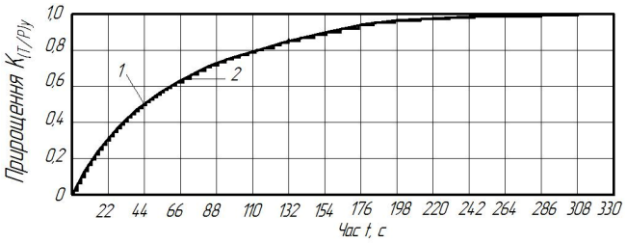
ни тут взяти мінімальним, тобто, t_c =1,56 с, не допускаючи великих похибок вимірювання $K_{(T/P)y}$. Далі його необхідно збільшувати на 1 t_c при зменшенні υ_k, досягаючи значення мінімаксного критерію T_B = 21,84 с, а потім не збільшувати. Отримані за таких умов залежності подані на рис.6,в. Залежності практично співпадають, забезпечуючи високу точність визначення вихідної величини в перехідних процесах які достатньо часто відбуваються.



а



б



в

Рис.6. Результати визначення вихідної величини керованого об'єкта у перехідному процесі з застосуванням мінімаксного критерію:
а – неадаптивного; б – адаптивного; в – адаптивного з внесенням коректив; 1 – теоретична крива; 2 – залежності, отримані з застосуванням мінімаксного критерію

Висновки та перспективи подальших розробок

У промисловості зустрічаються керовані об'єкти, де в наслідок складності зміни вихідної величини необхідно застосовувати допоміжні заходи для забезпечення необхідної точності її вимірювання. До таких керованих об'єктів, зокрема, можливо віднести завитковий живильник, що подає пульпу у кульові млини з більш низької відмітки відносно осі барабана, якщо співвідношення тверде/рідке розглядати як вихідну величину. Засобом підвищення точності тут може слугувати мінімаксний критерій, тобто, тривалість осереднення вихідного сигналу, який забезпечує високу точність в середній частині перехідного процесу, а ліворуч і праворуч може допускати великі похибки. Тому розроблявся адаптивний мінімаксний критерій, який забезпечує високу точність на всьому діапазоні зміни параметра. Визначальною величиною для зміни тривалості осереднення сигналу можливо використати швидкість зміни вихідної величини. Знайдені умови зміни тривалості осереднення вихідної величини від швидкості її наростання або зменшення. Мінімаксний критерій складає 14 циклів роботи завиткового живильника протяжністю 1,56 с. Найкращі результати формування вихідної величини відповідають мінімальній початковій тривалості 1,56 с з подальшим збільшенням її на таку ж величину до 14 циклів з наступною стабілізацією тимчасового відрізка при зменшенні її швидкості від найбільшого значення до нуля. Реалізується адаптивний мінімаксний критерій автоматично контролером. Перспективою подальших розробок є реалізація розробленого адаптивного мінімаксного критерію у сучасних системах автоматичного керування, що суттєво підвищить їх точність і ефективність здійснення технологічних процесів

Список використаної літератури

1. Маляров, П. В. Основы интенсификации процессов рудоподготовки [Текст] / П. В. Маляров. – Ростов-на-Дону: ООО «Ростиздат», 2004. – 320 с.

2. Измельчение. Энергетика и технология [Текст] / Г. Г. Пивняк, Л. А. Вайсберг, В. И. Кириченко и др.]. – М.: Изд. дом. «Руда и Металлы», 2007. – 296 с.

3. Купін, А. І Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології [Текст] / А. І. Купін. – Кривий Ріг: Видавництво КТУ, 2008. – 204 с.

4. Принцип инвариантности в измерительной технике [Текст] / [Б. Н. Петров, В. А. Викторов, Б. В. Лункин, А. С. Совлуков]. – М.: Наука, 1976. – 242 с.

5. Туз, Ю. М. Структурные методы повышения точности измерительных приборов [Текст] / Ю. М. Туз. – К.: Вищ. шк. Голов. издательство, 1976. – 265 с.

6. Боднер, В. А. Приборы первичной информации [Текст] / В. А. Боднер. – М.: Машиностроение, 1981. – 344 с.

7. Рудзит, Я. А. Основы метрологии, точность и надежность в приборостроении [Текст]

/Я. А. Рудзит, В. Н. Плуталов. – М.: Машиностроение, 1991. – 304 с.

8. Кондратець, В. О. Обґрунтування системи комп'ютерної ідентифікації та регулювання розрідження пульпи у кульових млинах з циркулюючим навантаженням [Текст] / В. О. Кондратець, О. М. Сербул // Вісник КНУ. – Кривий Ріг. –2013. – Вип.34. – С. 45-50.

9. Кондратец, В. А. Автоматическая система идентификации разжижения пульпы в шаровой мельнице, измельчающей пески двухспирального классификатора [Текст] / В. А. Кондратец // Вестник ИрГТУ. – Иркутск. – 2014. – №2. – С. 12-20.

10. Мацуй, А. М. Автоматична стабілізація співвідношення руда/вода в кульових млинах, що подрібнюють піски класифікатора [Текст] / А. М. Мацуй, В. О. Кондратець // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні: журнал. – Запоріжжя. – 2012. – №2. – С. 115-119.

11. Менский, Б. М. Принцип инвариантности в автоматическом регулировании и управлении [Текст] / Б. М. Менский. – М.: Машиностроение, 1972. – 248 с.

12. Фомин, В. Н. Рекуррентное оценивание и адаптивная фильтрация [Текст] / В. Н. Фомин. – М.: Наука, 1984. – 288 с.

13. Алиев, Т. М. Измерительная техника [Текст] / Т. М. Алиев, А. А. Тер-Хачатуров. – М.: Высш.шк., 1991. – 384 с.

14. Солодовников, В. В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления [Текст] / В. В. Солодовников. – М.: Физматгиз, 1960. – 600 с.

15. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576с.

16. Виленкин, С. Я. Статистические методы исследования систем автоматического регулирования [Текст] / С. Я. Виленкин. – М.: Советское радио, 1967. – 200 с.

17. Монсик, В. Б. Вероятность и статистика [Текст] / В. Б. Монсик, А. А. Скрынников. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 381с.

18. Демьянов, В. Ф. Введение в минимакс [Текст] / В. Ф. Демьянов, В. Н. Малоземов. – М.: Наука, 1972. – 368 с.

19. Левин, Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. [Текст] / Б. Р. Левин. – М.: Сов. радио, 1975. – 392 с.

20. Кондратец, В. А. Математическое моделирование улиткового питателя шаровой мельницы как объекта управления [Текст] / В. А. Кондратец // Вісник КрНУ. – Кременчук. – 2014. – №3. – С. 64-70.

References

1. Maljarov, P. V. Basics of intensification of ore preparation processes [Osnovy intensifikacii processov rudopodgotovki], (2004), Rostov-on-Don, Russian Federation, 320 p.

2. Pivnjak, G. G., Vajsberg, L. A., and Kirichenko, V. I. Grinding. Energy and technology [Izmel'chenie. Jenergetika i tehnologija], (2007), Moscow, Russian Federation, 296 p.

3. Kupin, A. I. Intellectual identification and management in the context of enrichment technology processes [Intelektual'na identifikacija ta keruvannja v umovah procesiv zbagachuval'noї tehnologiї], (2008), Kryvyi Rih, Ukraine, 204 p.

4. Petrov, B. N., Viktorov, V. A., Lunkin, B. V., and Sovlukov, A. S. The principle of invariance in measuring technology [Princip invariantnosti v izmeritel'noj tehnike], (1976), Moscow, Russian Federation, 242 p.

5. Tuz, Ju. M. Structural methods for improving the accuracy of measuring instruments [Strukturnye metody povyshenija tochnosti izmeritel'nyh priborov], (1976), Kyiv, Ukraine, 265 p.

6. Bodner, V. A. Primary information devices [Pribory pervichnoj informacii], (1981), Moscow, Russian Federation, 344 p.

7. Rudzit, Ja. A., and Plutalov, V. N. Fundamentals of Metrology, Accuracy and Reliability in Instrument Making [Osnovy metrologii, tochnost' i nadezhnost' v priborostroenii], (1991), Moscow, Russian Federation, 304 p.

8. Kondratec', V. O., and Serbul, O. M. Substantiation of the computer identification system and regulation of pulp liquefaction in ball mills with circulating load [Obg'runtuvannja systemy komp'juternoi' identyfikacii' ta reguljuvannja rozridzhennja pul'py u kul'ovyh mlynah z cyrkuljujuchym navantazhennjam], (2013), *Bulletin of the Kryvyi Rih National University*, Kryvyi Rih, Ukraine, No. 34, pp.45-50.

9. Kondratec, V. A. Automatic system for identification of pulp liquefaction in a ball mill, grinding sands of a double-spiral classifier [Avtomaticheskaja sistema identifikacii razzhizhenija pul'py v sharovoj mel'nice, izmel'chajushhej peski dvuhspiral'nogo klassifikatora], (2014), *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*, Irkutsk, Russian Federation, No. 2, pp.12-20.

10. Macuj, A. M., and Kondratec, V. A. Automatic stabilization of the ore / water ratio in ball mills that grind sands of the classifier [Avtomatichna stabilizacija spivvidnoshennja ruda/voda v kul'ovih mlinah, shho podribnjujut' piski klasifikatora], (2012), *New materials and technologies in metallur-*

gy and machine building, Zaporizhzhia, Ukraine, №2, pp. 115-119.

11. Menskij, B. M. The principle of invariance in automatic regulation and control [Princip invariantnosti v avtomaticheskom regulirovanii i upravlenii], (1972), Moscow, Russian Federation, 248 p.

12. Fomin, V. N. Recurrent estimation and adaptive filtering [Rekurrentnoe ocenivanie i adaptivnaja fil'tracija], (1984), Moscow, Russian Federation, 288 p.

13. Aliev, T. M., and Ter-Hachaturov, T. M. Measuring technology [Izmeritel'naja tehnika], (1991), Moscow, Russian Federation, 384 p.

14. Solodovnikov, V. V. Statistical dynamics of linear automatic control systems [Statisticheskaja dinamika linejnyh sistem avtomaticheskogo upravlenija], (1960), Moscow, Russian Federation, 600 p.

15. Ventcel', E. S. Theory of Probability [Teorija verojatnostej], (1969), Moscow, Russian Federation, 576 p.

16. Vilenkin, S. Ja. Statistical methods of investigation of automatic control systems [Statisticheskie metody issledovanija sistem avtomaticheskogo regulirovanija], (1967), Moscow, Russian Federation, 200 p.

17. Monsik, V. B., and Skrynnikov, A. A. Probability and Statistics [Verojatnost' i statistika], (2013), Moscow, Russian Federation, 381 p.

18. Dem'janov, V. F., and Malozemov, V. N. Introductions to the minimax [Vvedenie v minimaks], (1972), Moscow, Russian Federation, 368 p.

19. Levin, B. R. Theoretical bases of statistical radio engineering [Teoreticheskie osnovy statisticheskoj radiotehniki], (1975), Moscow, Russian Federation, 392 p.

20. Kondratec, V. A. Mathematical modeling of the cochlear feeder of a ball mill as a control object [Matematicheskoe modelirovanie ulitkovogo pitatelya sharovoi mel'nitsy kak ob"ekta upravleniya], (2014), *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, Kremenchuk, Ukraine, No. 3, pp. 64-70.

ADAPTIVE MINIMAX CRITERION AS A MEANS OF INCREASING THE ACCURACY OF DETERMINING THE INITIAL PARAMETERS OF MANAGED OBJECTS

A. N. Matsui, V. A. Kondratets
Kirovohrad National Technical University

Abstract. *The article directs to improve the accuracy of output quantities of complex managed objects, including cochlear feeders in the mining-ore industry. The aim of this work is developing of adaptive minimax criterion that provides virtually unchanged accuracy determination of ratio of solid/liquid under the conditions of action of complex and prolonged disturbances. The goal is solved by solving the problems managed object analysis, theoretical description of minimax criterion, substantiation and analysis changes the parameter defining criterion, development the algorithm of realization of criterion and valuation of output parameter of object. The problems were solved by methods of analysis, theory of automatic control, physical modeling the theory of error, the theory of sensitivity. It was got analytical dependence for determining the optimal duration averaging the output value (Minimax),it was substantiated decisive criterion setting, it was found the connection velocity of change of the output value (vacuum) with the duration of the transitional process, it was obtained accordance the duration of intervals averaging ranges of variation the output value in transitional process, it was appreciated obtained minimax, it was elaborated the algorithm of discovering the ratio of solid / liquid using adaptive minimax criterion, it was made valuing of determining the initial value. Minimax criterion includes 14 cycles of working cochlear feeder with length of 1.56 sec. The best results of formation the output value correspond to the minimum initial duration of averaging 1.56 with a further increasing it of the same quantity accordingly velocity of change of the pulp dilution, reaching minimax 21,84 sec. Then increase the duration averaging is not necessary. The discovered conditions of realization minimax criterion provide high accuracy of the output value in the most complicated exploitation conditions. The adaptive minimax criterion realizes automatically by controller. This can significantly to increase the accuracy and effectiveness of functioning of the systems automatic control of technological process.*

Key words: *cochlear feeder, the ratio of solid/liquid, the optimal duration of averaging, adaptation.*

АДАПТИВНЫЙ МИНИМАКСНЫЙ КРИТЕРИЙ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

А. Н. Мацуй, В. А. Кондратец
Кировоградский национальный технический университет

Аннотация. *Показано, что существуют управляемые объекты, где достаточно сложно достичь необходимой точности определения выходной величины, например, улитковый питатель в горнорудной промышленности. Предложено адаптивный минимаксный критерий длительности осреднения сигнала и найдены его параметры, которые позволяют определять разжижение пульпы с высокой точностью в самых сложных эксплуатационных условиях.*

Ключевые слова: *улитковий питатель, соотношение твердое/жидкое, оптимальная длительность осреднения, адаптация.*

Получено 28.03.2017

Мацуй Анатолий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производительных процессов Кировоградского национального технического университета. Просп. Университетский, 8, Кропивницкий, Украина, E-mail: Matsuyan@mail.ru, тел. +38-050-060-48-70

Matsui Anatolii, PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of automation of production processes, Kirovohrad National Technical University, University ave., 8, Kropyvnytskyi, Ukraine

ORCID ID: 0000 0001 5544 0175

Кондратец Василий Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизации производительных процессов Кировоградского национального технического университета. Просп. Университетский, 8, Кропивницкий, Украина, E-mail: KondratetsVA@gmail.com, тел. +38-0522-56-70-91

Kondratets Vasilii, Dr. of Science, Professor, Professor of Department of automation of production processes, Kirovohrad National Technical University, University ave., 8, Kropyvnytskyi, Ukraine

ORCID ID: 0000 0002 1411 168X