

10. Wang L.-X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems // IEEE Trans. Fuzzy Systems 1993. № 1 (2). P. 146–155.
 11. Spooner J.T., Passino K.M. Stable adaptive control using fuzzy systems and neural networks // IEEE Trans. Fuzzy Systems. 1996. № 4 (3). P. 339–359.
 12. Schubert. H. Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. – Leipzig, 1967, Bd. 11, p. 472.
 13. Morkun V. Optimization of the second and third stages of grinding based on fuzzy control algorithms / V. Morkun, O. Savytskyi, M. Tymoshenko. // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – №8. – P. 22–25.
 14. Торопов О.А. Расчет параметров гидроциклонов нового поколения / О.А. Торопов // Горный журнал. – 2008. - №6. – С. 105-108.
 15. Тихонов О. Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1984. – 208 с.
 16. Усков А.А. Принципы построения систем управления с нечеткой логикой // Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. 2004. № 6. С. 7-13.
- Рукопись поступила в редакцию 08.04.16

УДК 681.51: 622.788

К.В. ЛОБОВА, студентка, Криворізький національний університет

МОДЕЛЬ КЕРУВАННЯ ТЕРМІЧНОЮ ОБРОБКОЮ КОТУНІВ НА КОНВЕЄРНІЙ ВИПАЛЮВАЛЬНІЙ МАШИНИ ЗА МЕТОДОМ ЗВОРОТНОГО ЯКОБІАНА

Показано, що для підвищення продуктивності конвеєрної випалювальної машини і якості котунів ефективним є впровадження для цієї мети комп'ютеризованих систем керування технологічним процесом опалу котунів, що в своєму складі використовують спеціальні моделі. Тому запропоновано для керування термічною обробкою котунів на конвеєрній випалювальній машині використати модель автоматизованої системи керування, яка ґрунтується на методі зворотного якобіана.

Згідно з методом зворотних операторів при синтезі систем автоматизованого керування випалювальної машини побудована система пристроїв, що реалізують потрібне перетворення. Такі перетворення зворотні тим, які здійснюються над відповідними змінними в самому об'єкті та в додаткових вимірювально-обчислювальних пристроях, що порівнюють. Для цього синтез системи автоматизованого керування випалювальної машини за методом зворотних операторів запропоновано виконати на алгоритмічній системі управління, яка дозволяє простежити алгоритм перетворення змінних. Усе це дозволило побудувати структурну схему системи автоматизованого керування випалювальної машини за методом зворотного оператора. Ця схема представлена пристроями неузгодження і перетворення та задатчиком вхідних параметрів, які представляються квазізворотною моделлю конвеєрної випалювальної машини.

Розроблена автоматизована система керування має модель об'єкту і квазізворотну модель, які описуються системою диференціальних рівнянь. Передбачається побудова локальної самоналагоджувальної за поточними значеннями параметрів моделі. Вказано, що алгоритм керування конвеєрною випалювальною машиною за методом зворотного оператора, як це видно з наведеного аналізу, вимагає отримання зворотних матриць.

Ключові слова: конвеєрна випалювальна машина, котуни, структурна схема, модель об'єкту, матриця, квазізворотна модель, зворотній якобіан.

Постановка проблеми. Автоматизація контролю та керування є одним із способів підвищення продуктивності конвеєрної випалювальної машини (КВМ) і поліпшенню якості котунів. Найбільш ефективними є впроваджені в останні роки системи комплексної автоматизації агрегатів і механізмів КВМ. Для розробки та впровадження цих систем необхідно ретельне вивчення процесу, а також їх дослідження, як об'єктів автоматизації. Тому проведення досліджень в області створення ефективних методів та засобів автоматизації процесу випалу котунів на конвеєрній випалювальній машині є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Загальновідомо, що для керування термічною обробкою котунів на КВМ використовуються різні моделі [1-3]. Для підвищення продуктивності КВМ і якості котунів ефективним є впровадження для цієї мети комп'ютеризованих систем керування технологічним процесом випалювання котунів, що в своєму складі використовують спеціальні моделі [7].

Саме відомі моделі дозволяють керувати технологічним процесом в окремих зонах КВМ [8]. При цьому не в повній мірі враховуються впливи сусідніх зон [9], зміни швидкості переміщення палет, якість палива, теплогазообмін, тощо [13].

Відомий також метод зворотного якобіана, який має широке застосування для синтезу систем управління технологічними об'єктами [4-6,10-12]. Цей метод виявляється зручним тим, що

він має властивість автономності, так як кожен елемент неузгодженості має можливість змінюватися в часі незалежно від інших елементів.

Формулювання мети роботи. Метою запропонованої статті є необхідність звернути увагу спеціалістів до побудови моделі технологічного процесу керування обробкою котунів на конвеєрній випалювальній машині, використовуючи давно відомий метод зворотного якобіана для вирішення даної проблеми.

Викладення матеріалу та результати. Побудуємо автоматизовану систему керування технологічним процесом термічної обробки котунів на конвеєрній випалювальній машині. Попередньо параметри, що характеризують процес, підрозділяємо на вхідні та вихідні, а потім досліджуємо взаємозв'язок між ними. КВМ є багато зв'язковою, так як зміна хоча б одного вхідного параметра викликає зміну декількох вихідних параметрів. Враховуючи, що згідно з методом зворотних операторів при синтезі систем автоматизованого керування КВМ необхідно побудувати систему пристроїв, що реалізують потрібне перетворення. Ці перетворення в певному сенсі зворотні тим, які здійснюються над відповідними змінними в самому об'єкті та в додаткових вимірювально-обчислювальних пристроях, що порівнюють. При цьому синтез системи автоматизованого керування КВМ за методом зворотних операторів можливо виконати на алгоритмічних і неалгоритмічних системах управління. В алгоритмічній системі можна чітко простежити алгоритм перетворення змінних. В неалгоритмічній системі цього зробити не можна. Зазвичай розімкнені системи управління є алгоритмічними. Одночасно неалгоритмічна система будується тільки як замкнута системою керування.

При побудові автоматизованої системи керування КВМ необхідно вирішити задачу автоматичного вироблення і вводу в об'єкт таких вхідних впливів, при яких вихідні величини задовольняли б певним умовам. Ці умови зазвичай відповідають прийнятним критеріям керування. Чи задовольняють вихідні величини заданим умовам, визначається за допомогою контрольно-вимірюваних або обчислювальних пристроїв, які виконуються так, щоб на виході їх виходили величини, звані неузгодженості, тощо. Структурну схему системи автоматизованого керування КВМ, побудовано за методом зворотного оператора, в найзагальнішому вигляді наведено на рис. 1.

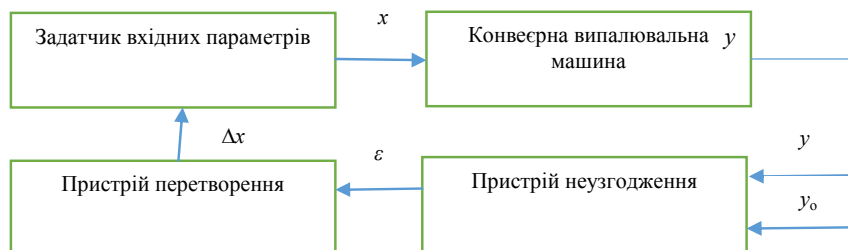


Рис. 1. Структурна схема системи автоматизованого керування КВМ, побудована за методом зворотного оператора

Робота КВМ описується наступною системою рівнянь.

У системі рівнянь (1) вихідні параметри прийняті такі позначення: h_h - висоту шару котунів, ω_s - швидкість переміщення палет КВМ, P_{sgp} - стабілізацію тиску газу, P_{sp} - стабілізація тиску та Q_{sgs} - витрат газу в зоні сушки, T_r - регулювання температури та Q_{pr} - тиску в горні зони підігріву та Q_{rr} - зони випалу, Q_{sa} - стабілізацію витрат повітря в зоні охолодження, P_{scp} - тиску та T_r - регулювання температури повітря. Параметри в системі рівнянь (1) позначені з індексами «z» можливо задавати, а «y» тільки отримувати.

У рівняннях $f(x)$ є оператор, який визначає математичні зв'язки між векторами вхідних і вихідних величин у КВМ є незворотною ланкою, по відношенню до якої вектор x можна тільки задавати, а вектор y - тільки отримувати. За визначенням вектор x повинен задовольняти умові: $\varepsilon = S(y_0, x)$, $\|\varepsilon\| < \varepsilon_0$, де оператор S здійснює зв'язки між заданим вектором y_0 (наприклад, в задачі стабілізації), вектором вхідних величин x і вектором відхилень ε , яка-небудь норма якого не повинна перевершувати певного числа ε_0 .

Згідно з методом зворотних операторів, систему керування необхідно побудувати у вигляді сукупності пристроїв, оборотних по відношенню до конвеєрної випалювальної машини. Такою сукупністю є система пристроїв, що наближено реалізують перетворення, зворотні тим, які виробляються над відповідними змінними в об'єкті. Крім того, цієї сукупності можна задавати на вхід вектор y і отримувати на виході вектор x .

$$\begin{cases}
 h_{hy} = f_1(h_{hz}, \omega_{sz}, P_{sgpz}, P_{spz}, Q_{sgsz}, T_{trz}, Q_{prz}, Q_{rrz}, Q_{saz}, P_{scpz}, T_{rt}) \\
 \omega_{sy} = f_2(h_{hz}, \omega_{sz}, P_{sgpz}, P_{spz}, Q_{sgsz}, T_{trz}, Q_{prz}, Q_{rrz}, Q_{saz}, P_{scpz}, T_{rt}) \\
 P_{sgpy} = f_3(h_{hz}, \omega_{sz}, P_{sgpz}, P_{spz}, Q_{sgsz}, T_{trz}, Q_{prz}, Q_{rrz}, Q_{saz}, P_{scpz}, T_{rt}) \\
 P_{spsy} = f_4(h_{hz}, \omega_{sz}, P_{sgpz}, P_{spz}, Q_{sgsz}, T_{trz}, Q_{prz}, Q_{rrz}, Q_{saz}, P_{scpz}, T_{rt}) \\
 Q_{sgsy} = f_5(h_{hz}, \omega_{sz}, P_{sgpz}, P_{spz}, Q_{sgsz}, T_{trz}, Q_{prz}, Q_{rrz}, Q_{saz}, P_{scpz}, T_{rt}) \\
 T_{try} = f_6(h_{hz}, \omega_{sz}, P_{sgpz}, P_{spz}, Q_{sgsz}, T_{trz}, Q_{prz}, Q_{rrz}, Q_{saz}, P_{scpz}, T_{rt}) \\
 Q_{pry} = f_7(h_{hz}, \omega_{sz}, P_{sgpz}, P_{spz}, Q_{sgsz}, T_{trz}, Q_{prz}, Q_{rrz}, Q_{saz}, P_{scpz}, T_{rt}) \\
 Q_{rry} = f_8(h_{hz}, \omega_{sz}, P_{sgpz}, P_{spz}, Q_{sgsz}, T_{trz}, Q_{prz}, Q_{rrz}, Q_{saz}, P_{scpz}, T_{rt}) \\
 Q_{say} = f_9(h_{hz}, \omega_{sz}, P_{sgpz}, P_{spz}, Q_{sgsz}, T_{trz}, Q_{prz}, Q_{rrz}, Q_{saz}, P_{scpz}, T_{rt}) \\
 P_{scpy} = f_{10}(h_{hz}, \omega_{sz}, P_{sgpz}, P_{spz}, Q_{sgsz}, T_{trz}, Q_{prz}, Q_{rrz}, Q_{saz}, P_{scpz}, T_{rt}) \\
 T_{rty} = f_{11}(h_{hz}, \omega_{sz}, P_{sgpz}, P_{spz}, Q_{sgsz}, T_{trz}, Q_{prz}, Q_{rrz}, Q_{saz}, P_{scpz}, T_{rt}).
 \end{cases} \quad (1)$$

Пристрій неузгодження є пристроєм для визначення неузгодженості між поточним значенням вектора вихідних параметрів і заданим його значенням. Значення ε визначається як різниця зазначених векторів: $\varepsilon = y - y_0$. Задатчик вхідних параметрів x , який при наявності прирощення Δx , відмінного від нуля, відповідним чином змінює значення на вході конвеєрної випалювальної машини.

Пристрої неузгодження і перетворення та задатчик вхідних параметрів є квазізворотньою моделлю конвеєрної випалювальної машини, яка описується системою рівнянь

$$\begin{cases}
 h_{hz} = \Phi_1(h_{hy}, \omega_{sy}, P_{sgpy}, P_{spsy}, Q_{sgsy}, T_{try}, Q_{pry}, Q_{rry}, Q_{say}, P_{scpy}, T_{rty}) \\
 \omega_{sz} = \Phi_2(h_{hy}, \omega_{sy}, P_{sgpy}, P_{spsy}, Q_{sgsy}, T_{try}, Q_{pry}, Q_{rry}, Q_{say}, P_{scpy}, T_{rty}) \\
 P_{sgpz} = \Phi_3(h_{hy}, \omega_{sy}, P_{sgpy}, P_{spsy}, Q_{sgsy}, T_{try}, Q_{pry}, Q_{rry}, Q_{say}, P_{scpy}, T_{rty}) \\
 P_{spz} = \Phi_4(h_{hy}, \omega_{sy}, P_{sgpy}, P_{spsy}, Q_{sgsy}, T_{try}, Q_{pry}, Q_{rry}, Q_{say}, P_{scpy}, T_{rty}) \\
 Q_{sgsz} = \Phi_5(h_{hy}, \omega_{sy}, P_{sgpy}, P_{spsy}, Q_{sgsy}, T_{try}, Q_{pry}, Q_{rry}, Q_{say}, P_{scpy}, T_{rty}) \\
 T_{trz} = \Phi_6(h_{hy}, \omega_{sy}, P_{sgpy}, P_{spsy}, Q_{sgsy}, T_{try}, Q_{pry}, Q_{rry}, Q_{say}, P_{scpy}, T_{rty}) \\
 Q_{prz} = \Phi_7(h_{hy}, \omega_{sy}, P_{sgpy}, P_{spsy}, Q_{sgsy}, T_{try}, Q_{pry}, Q_{rry}, Q_{say}, P_{scpy}, T_{rty}) \\
 Q_{rrz} = \Phi_8(h_{hy}, \omega_{sy}, P_{sgpy}, P_{spsy}, Q_{sgsy}, T_{try}, Q_{pry}, Q_{rry}, Q_{say}, P_{scpy}, T_{rty}) \\
 Q_{saz} = \Phi_9(h_{hy}, \omega_{sy}, P_{sgpy}, P_{spsy}, Q_{sgsy}, T_{try}, Q_{pry}, Q_{rry}, Q_{say}, P_{scpy}, T_{rty}) \\
 P_{scpz} = \Phi_{10}(h_{hy}, \omega_{sy}, P_{sgpy}, P_{spsy}, Q_{sgsy}, T_{try}, Q_{pry}, Q_{rry}, Q_{say}, P_{scpy}, T_{rty}) \\
 T_{rtz} = \Phi_{11}(h_{hy}, \omega_{sy}, P_{sgpy}, P_{spsy}, Q_{sgsy}, T_{try}, Q_{pry}, Q_{rry}, Q_{say}, P_{scpy}, T_{rty}).
 \end{cases} \quad (2)$$

Пристрій перетворювання на рис. 1 здійснює взаємозв'язок між вектором нев'язок $\Delta y = \varepsilon$ і вектором Δx

$$\begin{cases}
 \Delta h_{hz} = \Delta \Phi_1(\Delta h_{hy}, \Delta \omega_{sy}, \Delta P_{sgpy}, \Delta P_{spsy}, \Delta Q_{sgsy}, \Delta T_{try}, \Delta Q_{pry}, \Delta Q_{rry}, \Delta Q_{say}, \Delta P_{scpy}, \Delta T_{rty}) \\
 \Delta \omega_{sz} = \Delta \Phi_2(\Delta h_{hy}, \Delta \omega_{sy}, \Delta P_{sgpy}, \Delta P_{spsy}, \Delta Q_{sgsy}, \Delta T_{try}, \Delta Q_{pry}, \Delta Q_{rry}, \Delta Q_{say}, \Delta P_{scpy}, \Delta T_{rty}) \\
 \Delta P_{sgpz} = \Delta \Phi_3(\Delta h_{hy}, \Delta \omega_{sy}, \Delta P_{sgpy}, \Delta P_{spsy}, \Delta Q_{sgsy}, \Delta T_{try}, \Delta Q_{pry}, \Delta Q_{rry}, \Delta Q_{say}, \Delta P_{scpy}, \Delta T_{rty}) \\
 \Delta P_{spz} = \Delta \Phi_4(\Delta h_{hy}, \Delta \omega_{sy}, \Delta P_{sgpy}, \Delta P_{spsy}, \Delta Q_{sgsy}, \Delta T_{try}, \Delta Q_{pry}, \Delta Q_{rry}, \Delta Q_{say}, \Delta P_{scpy}, \Delta T_{rty}) \\
 \Delta Q_{sgsz} = \Delta \Phi_5(\Delta h_{hy}, \Delta \omega_{sy}, \Delta P_{sgpy}, \Delta P_{spsy}, \Delta Q_{sgsy}, \Delta T_{try}, \Delta Q_{pry}, \Delta Q_{rry}, \Delta Q_{say}, \Delta P_{scpy}, \Delta T_{rty}) \\
 \Delta T_{trz} = \Delta \Phi_6(\Delta h_{hy}, \Delta \omega_{sy}, \Delta P_{sgpy}, \Delta P_{spsy}, \Delta Q_{sgsy}, \Delta T_{try}, \Delta Q_{pry}, \Delta Q_{rry}, \Delta Q_{say}, \Delta P_{scpy}, \Delta T_{rty}) \\
 \Delta Q_{prz} = \Delta \Phi_7(\Delta h_{hy}, \Delta \omega_{sy}, \Delta P_{sgpy}, \Delta P_{spsy}, \Delta Q_{sgsy}, \Delta T_{try}, \Delta Q_{pry}, \Delta Q_{rry}, \Delta Q_{say}, \Delta P_{scpy}, \Delta T_{rty}) \\
 \Delta Q_{rrz} = \Delta \Phi_8(\Delta h_{hy}, \Delta \omega_{sy}, \Delta P_{sgpy}, \Delta P_{spsy}, \Delta Q_{sgsy}, \Delta T_{try}, \Delta Q_{pry}, \Delta Q_{rry}, \Delta Q_{say}, \Delta P_{scpy}, \Delta T_{rty}) \\
 \Delta Q_{saz} = \Delta \Phi_9(\Delta h_{hy}, \Delta \omega_{sy}, \Delta P_{sgpy}, \Delta P_{spsy}, \Delta Q_{sgsy}, \Delta T_{try}, \Delta Q_{pry}, \Delta Q_{rry}, \Delta Q_{say}, \Delta P_{scpy}, \Delta T_{rty}) \\
 \Delta P_{scpz} = \Delta \Phi_{10}(\Delta h_{hy}, \Delta \omega_{sy}, \Delta P_{sgpy}, \Delta P_{spsy}, \Delta Q_{sgsy}, \Delta T_{try}, \Delta Q_{pry}, \Delta Q_{rry}, \Delta Q_{say}, \Delta P_{scpy}, \Delta T_{rty}) \\
 \Delta T_{rtz} = \Delta \Phi_{11}(\Delta h_{hy}, \Delta \omega_{sy}, \Delta P_{sgpy}, \Delta P_{spsy}, \Delta Q_{sgsy}, \Delta T_{try}, \Delta Q_{pry}, \Delta Q_{rry}, \Delta Q_{say}, \Delta P_{scpy}, \Delta T_{rty}).
 \end{cases} \quad (3)$$

Матриця Φ (2,3) є зворотною по відношенню до матриці f . Для випадку, коли мірності вхідного і вихідного векторів рівні, $\Phi = f^{-1}(x)$.

Тому цей спосіб називається способом зворотних операторів. Випадок, коли мірність вектора вхідних параметрів об'єкта не дорівнює мірності вихідних параметрів, буде розглянуто особливо.

Вектор неузгодження ε , що визначає неузгодженість між поточним значенням вихідного параметра об'єкта та його заданим значенням, за визначенням, повинен бути менше наперед заданого значення, точніше, яка-небудь норма його повинна бути менше визначеної кількості ε_0 . Зазвичай величина ε_0 вибирається залежно від постановки задачі і визначає точність відтворення об'єкта моделлю і поріг нечутливості системи, так як у випадку якщо обрана норма поточного значення вектора неув'язок менше ε_0 , коректування вхідних параметрів об'єкта не проводиться. Якщо через ε_1 позначити відповідну міру неузгодження, отриману від заміни початкової функції об'єкта апроксимується рівнянням моделі, то мінімальне значення ε_0 повинно бути більше ε_1 . Мінімальне значення ε_0 назвемо порогом чутливості керуючої системи.

Отже, на значення порога чутливості системи впливає вибір моделі об'єкта. Якщо врахувати, що модель об'єкта не рекомендується вибирати складною через можливих ускладнень з її аналізом, визначенням зворотного оператора і обчисленням керуючих впливів, то ясно, яке значення випадає на долю вибору критерію наближення моделі до об'єкта. Через зазначених ускладнень модель процесу в системах управління рідко вибирається з розрахунку апроксимації у всій області можливих станів об'єкта з однаковою точністю в сенсі обраного критерію. Зазвичай передбачається побудова локальної самоналагоджувальної за поточними значеннями параметрів моделі.

Найбільш простий для автоматичного аналізу є лінійна модель. При наявності лінійної моделі можна побудувати досить простий алгоритм визначення моделі об'єкта, визначення моделі, зворотної по відношенню до об'єкта, і обчислення керуючих впливів.

При застосуванні лінійної моделі нелінійного об'єкта, крім завдання вибору критерію наближення, виникає завдання визначення такого роду прямий, яка локально щонайкраще апроксимована в нелінійну криву. Тут коротко доведемо, що прямий найкращого локального наближення кривої є дотична. Заради простоти цього доказу зазвичай користуються одновимірним випадком, коли залежність $y=f(x)$ визначена на площині. Функція $f(x)$ неперервна і k разів диференційована. Зазначена функція на площині утворює дугу, довжина якої на деякій ділянці обчислюється як інтеграл від похідної функції на вказаній ділянці. Це легко довести побудовою описаного багатокутника і визначенням довжини дуги як межі його периметра, коли число сторін прагне до нескінченності. Похідна довжини дуги завжди є позитивною величиною, звідки випливає, що довжина дуги є строго зростаючою функцією. Знаходимо функцію, що зв'язує довжину дуги з параметром y . Для цього потрібно знайти функцію, зворотну залежності довжини дуги від змінної x , і визначити її похідну. Потім через дві довільні точки дуги проводиться пряма, і за допомогою знайденої функції, що зв'язує довжину дуги з параметром y , проводиться аналіз похибки відтворення дуги прямий. Визначається умова мінімуму цієї похибки. Аналіз умови мінімуму виявляє, що похибка мінімальна тоді, коли пряма є дотичною. Отже, в досить малій околиці деякої точки найкращим лінійним наближенням кривої є дотична, проведена через цю точку.

Отже, при побудові локальної лінійної моделі найкращим способом відображення об'єкта є побудова його моделі у вигляді лінійного полінома Тейлора. Таку модель можна отримати, використовуючи критерій сильного наближення функції з одиничним ступенем близькості. Так як передбачається, що початкова функція є безперервною і певне число разів диференційована, але на значення цієї функції накладається випадкова перешкода, то ясно, що для фільтрації випадкових перешкод необхідно застосувати критерій середньоквадратичної гладкості.

Отже, для побудови самоналагоджувальних систем керування за методом зворотних операторів математичну модель об'єкта найдоцільніше шукати у вигляді реалізації лінійного рівняння Тейлора. Окремий випадок синтезу систем керування за методом зворотних операторів, при якому як зворотну оператора використовується зворотний якобіан, називатимемо синтезом систем керування за методом зворотного якобіана.

Структурна схема системи керування, наведена на рис. 1, при заміні зворотного оператора на зворотний якобіан не змінюється. Не змінюється і зміст рівнянь конвеєрної випалювальної машини, пристрою неузгодження та задатчика вхідних параметрів. Як і при використанні методу зворотних операторів у випадку, коли мірності векторів вхідних і вихідних параметрів рівні,

при використанні методу зворотного якобіана вважається, що об'єкт в загальному вигляді описується системою рівнянь (1). Змінюється вміст пристрою перетворення, який реалізує взаємозв'язок між вектором неузгодженості та вектором зміни керуючих впливів у вигляді системи рівнянь (4)

$$\begin{cases} \Delta h_{hz} = d_{11}\Delta h_{hy} + d_{12}\Delta \omega_{sy} + d_{13}\Delta P_{sgpy} + d_{14}\Delta P_{spsy} + d_{15}\Delta Q_{sgsy} + d_{16}\Delta T_{try} + d_{17}\Delta Q_{pry} + d_{18}\Delta Q_{rry} + d_{19}\Delta Q_{say} + d_{110}\Delta P_{scpy} + d_{111}\Delta T_{try} \\ \Delta \omega_{sz} = d_{21}\Delta h_{hy} + d_{22}\Delta \omega_{sy} + d_{23}\Delta P_{sgpy} + d_{24}\Delta P_{spsy} + d_{25}\Delta Q_{sgsy} + d_{26}\Delta T_{try} + d_{27}\Delta Q_{pry} + d_{28}\Delta Q_{rry} + d_{29}\Delta Q_{say} + d_{210}\Delta P_{scpy} + d_{211}\Delta T_{try} \\ \Delta P_{sgpz} = d_{31}\Delta h_{hy} + d_{32}\Delta \omega_{sy} + d_{33}\Delta P_{sgpy} + d_{34}\Delta P_{spsy} + d_{35}\Delta Q_{sgsy} + d_{36}\Delta T_{try} + d_{37}\Delta Q_{pry} + d_{38}\Delta Q_{rry} + d_{39}\Delta Q_{say} + d_{310}\Delta P_{scpy} + d_{311}\Delta T_{try} \\ \Delta P_{spz} = d_{41}\Delta h_{hy} + d_{42}\Delta \omega_{sy} + d_{43}\Delta P_{sgpy} + d_{44}\Delta P_{spsy} + d_{45}\Delta Q_{sgsy} + d_{46}\Delta T_{try} + d_{47}\Delta Q_{pry} + d_{48}\Delta Q_{rry} + d_{49}\Delta Q_{say} + d_{410}\Delta P_{scpy} + d_{411}\Delta T_{try} \\ \Delta Q_{sgsz} = d_{51}\Delta h_{hy} + d_{52}\Delta \omega_{sy} + d_{53}\Delta P_{sgpy} + d_{54}\Delta P_{spsy} + d_{55}\Delta Q_{sgsy} + d_{56}\Delta T_{try} + d_{57}\Delta Q_{pry} + d_{58}\Delta Q_{rry} + d_{59}\Delta Q_{say} + d_{510}\Delta P_{scpy} + d_{511}\Delta T_{try} \\ \Delta T_{trz} = d_{61}\Delta h_{hy} + d_{62}\Delta \omega_{sy} + d_{63}\Delta P_{sgpy} + d_{64}\Delta P_{spsy} + d_{65}\Delta Q_{sgsy} + d_{66}\Delta T_{try} + d_{67}\Delta Q_{pry} + d_{68}\Delta Q_{rry} + d_{69}\Delta Q_{say} + d_{610}\Delta P_{scpy} + d_{611}\Delta T_{try} \\ \Delta Q_{prz} = d_{71}\Delta h_{hy} + d_{72}\Delta \omega_{sy} + d_{73}\Delta P_{sgpy} + d_{74}\Delta P_{spsy} + d_{75}\Delta Q_{sgsy} + d_{76}\Delta T_{try} + d_{77}\Delta Q_{pry} + d_{78}\Delta Q_{rry} + d_{79}\Delta Q_{say} + d_{710}\Delta P_{scpy} + d_{711}\Delta T_{try} \\ \Delta Q_{rrz} = d_{81}\Delta h_{hy} + d_{82}\Delta \omega_{sy} + d_{83}\Delta P_{sgpy} + d_{84}\Delta P_{spsy} + d_{85}\Delta Q_{sgsy} + d_{86}\Delta T_{try} + d_{87}\Delta Q_{pry} + d_{88}\Delta Q_{rry} + d_{89}\Delta Q_{say} + d_{810}\Delta P_{scpy} + d_{811}\Delta T_{try} \\ \Delta Q_{saz} = d_{91}\Delta h_{hy} + d_{92}\Delta \omega_{sy} + d_{93}\Delta P_{sgpy} + d_{94}\Delta P_{spsy} + d_{95}\Delta Q_{sgsy} + d_{96}\Delta T_{try} + d_{97}\Delta Q_{pry} + d_{98}\Delta Q_{rry} + d_{99}\Delta Q_{say} + d_{910}\Delta P_{scpy} + d_{911}\Delta T_{try} \\ \Delta P_{scpz} = d_{101}\Delta h_{hy} + d_{102}\Delta \omega_{sy} + d_{103}\Delta P_{sgpy} + d_{104}\Delta P_{spsy} + d_{105}\Delta Q_{sgsy} + d_{106}\Delta T_{try} + d_{107}\Delta Q_{pry} + d_{108}\Delta Q_{rry} + d_{109}\Delta Q_{say} + d_{1010}\Delta P_{scpy} + d_{1011}\Delta T_{try} \\ \Delta T_{rtz} = d_{111}\Delta h_{hy} + d_{112}\Delta \omega_{sy} + d_{113}\Delta P_{sgpy} + d_{114}\Delta P_{spsy} + d_{115}\Delta Q_{sgsy} + d_{116}\Delta T_{try} + d_{117}\Delta Q_{pry} + d_{118}\Delta Q_{rry} + d_{119}\Delta Q_{say} + d_{1110}\Delta P_{scpy} + d_{1111}\Delta T_{try} \end{cases} \quad (4)$$

Коефіцієнти цієї моделі є елементами зворотного якобіана (5)

$$\begin{pmatrix} d_{11}, d_{12}, d_{13}, d_{14}, d_{15}, d_{16}, d_{17}, d_{18}, d_{19}, d_{110}, d_{111} \\ d_{21}, d_{22}, d_{23}, d_{24}, d_{25}, d_{26}, d_{27}, d_{28}, d_{29}, d_{210}, d_{211} \\ d_{31}, d_{32}, d_{33}, d_{34}, d_{35}, d_{36}, d_{37}, d_{38}, d_{39}, d_{310}, d_{311} \\ d_{41}, d_{42}, d_{43}, d_{44}, d_{45}, d_{46}, d_{47}, d_{48}, d_{49}, d_{410}, d_{411} \\ d_{51}, d_{52}, d_{53}, d_{54}, d_{55}, d_{56}, d_{57}, d_{58}, d_{59}, d_{510}, d_{511} \\ d_{61}, d_{62}, d_{63}, d_{64}, d_{65}, d_{66}, d_{67}, d_{68}, d_{69}, d_{610}, d_{611} \\ d_{71}, d_{72}, d_{73}, d_{74}, d_{75}, d_{76}, d_{77}, d_{78}, d_{79}, d_{710}, d_{711} \\ d_{81}, d_{82}, d_{83}, d_{84}, d_{85}, d_{86}, d_{87}, d_{88}, d_{89}, d_{810}, d_{811} \\ d_{91}, d_{92}, d_{93}, d_{94}, d_{95}, d_{96}, d_{97}, d_{98}, d_{99}, d_{910}, d_{911} \\ d_{101}, d_{102}, d_{103}, d_{104}, d_{105}, d_{106}, d_{107}, d_{108}, d_{109}, d_{1010}, d_{1011} \\ d_{111}, d_{112}, d_{113}, d_{114}, d_{115}, d_{116}, d_{117}, d_{118}, d_{119}, d_{1110}, d_{1111} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Висновки. Алгоритм керування КВМ за методом зворотного оператора, як це видно з наведеного аналізу, вимагає отримання зворотних матриць. На КВМ мірність вектора вхідних параметрів досить рідко буває дорівнює мірності вектора вихідних параметрів, і тому майже завжди має місце прямокутна матриця коефіцієнтів моделі. Квадратна матриця є окремим (і досить рідкісним) випадком прямокутної матриці.

На закінчення відзначимо, що наближення моделі до КВМ за критерієм середньоквадратичної гладкості дозволило побудувати лінійну модель нелінійного об'єкта, кращу з усіх можливих.

Список літератури

1. **Лобов В.Й., Котляр М.О.** Моделирование розподілу температур у шарі залізородних обкотишів газоповітряної камери в конвеєрних печах фабрики орудкування // журнал "Научный вестник Национального горного университета", 2015. - № 2, С.109-117.
2. **Лобов В.Й., Котляр М.О.** Дослідження термічної обробки шару обкотишів в газоповітряній камері обпалювальної машини конвеєрного типу // журнал "Научный вестник Национального горного университета", 2015. - № 3, С.131-136.
3. Vyacheslav Lobov, Karina Lobova, Mykhailo Koltiar. Investigation of temperature distribution along the height of the layer of pellets on conveyor roasting machine. Metallurgical and Mining Industry, №. 4, p.p. 34-38, 2015.
4. **Кудрявцев Л. Д.** Математический анализ, 2 изд., т. 1 - 2, М., 1973.
5. **Ильин В. А., Позняк Э. Г.**, Основы математического анализа, 4 изд., ч. 1-2, М., 1980-82.
6. **Никольский С. М.**, Курс математического анализа, 4 изд., т. 2, М., 1991.
7. **Буткарев А.А.** Разработка и применение математических моделей и алгоритмов для исследования и оптимизации параметров непрерывного технологического процесса с плотным фильтруемым слоем на примере производства железородных окатышей. - Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Екатеринбург, 1998. - 211с.

8. Эффективный способ адаптации математической модели при моделировании процесса обжига окатышей на конвейерной машине / Буткарев А.П., Сквирский Е.С., Некрасова Е.В., Козырев П.И. // Теплотехническое обеспечение основных технологических процессов черной металлургии. М.: Металлургия, 1988. - С. 3-12.

9. Братчиков С. Г. Теплотехника окисковывания железорудного сырья / С. Г. Братчиков, Ю. А. Берман, Я. Л. Белоцерковский и др. – М.: Металлургия, 1970. – 344 с.

10. Мищенко И.М., Хлапонин Н.С. Развитие агломерации – основное направление энергосбережения и повышения эффективности в доменном производстве. – Металл и литье Украины, 2006. – № 3–4.

11. Калиткин Н.Н. Численные методы // под ред. А.А. Самарского / М.: Наука, 1978. – 512 с.

12. Белоцерковский Я.Л., Клейн В.И., Леонтьев Л.И. и др. Энергопотребление при агломерации. – Екатеринбург: УРО РАН, 1998. – 57 с.

13. Копоть Н. Н. Сравнительный анализ теплотехнических схем современных обжиговых конвейерных машин//Н.Н.Копоть, А.Б. Воробьев, С.С. Гончаров, А.А. Буткарев, А.П. Буткарев // Сталь, 2010. - № 3. - С. 8-13. Рукопись подано до редакції 17.03.16

УДК 622.807.622.684

О.В. НЕСТЕРЕНКО, канд. техн. наук, доц., Н.Ю. ШВАГЕР, д-р техн. наук, проф.,
Т.А. КОМИССАРЕНКО, канд. техн. наук, доц., М.В. ДОМНИЧЕВ, канд.техн.наук,
И.А. НЕСТЕРЕНКО, студент, Криворожский национальный университет

СВЯЗЫВАНИЕ ЧАСТИЦ ПЫЛИ МОСТИКАМИ ЖИДКОСТИ ПРИ ЕЕ ЗАГУЩЕНИИ

В связи со значительными темпами снижения глубины железорудных карьеров возрастает роль автомобильного транспорта, при перемещении горной массы. Одновременно с этим также возрастает грузоподъемность автосамосвалов. Это в свою очередь приводит к увеличению давления на полотно временных щебеночных карьерных и прикарьерных технологических автодорог. Следствием этого является переизмельчение щебня, что приводит к неорганизованному выбросу пыли в атмосферу.

Для борьбы с таким негативным явлением чаще всего используют воду или водные растворы солей.

Взаимодействие частиц пыли, находящихся в перманентно изменяющейся жидкой среде, для простоты можем представить в виде двух частиц в первоначально переувлажненной среде.

Для борьбы с этим негативным явлением чаще всего используют воду или водные растворы солей магния или кальция, которые образуют вокруг пылинок в щебенной смеси полотна дороги жидкие манжеты (мостики). Прочность манжет при связывании каменного материала определяется комплексным взаимодействием физико-химических свойств жидкости и связуемой пыли.

Связи между частицами пыли в этот период обеспечиваются за счет прочности жидких манжет. Однако эти связи непрочны. При механическом внешнем воздействии на пылинки расстояние между ними значительно сокращается в вследствие чего происходит уплотнение щебня. Это приводит к существенному удалению жидкости из щебня, переупаковки частиц пыли при одновременном и интенсивном испарении влаги.

Ключевые слова. аутогезия, адгезия щебеночные автодороги, водные растворы солей.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Выброс пыли из щебеночных автодорог происходит из конструктивного слоя износа упрочняющего полотна, призванного омоноличивать щебень или гравий. Толщина этого слоя составляет несколько сантиметров и зависит от типа автомобилей эксплуатирующих дорогу.

Все основные процессы образования пыли при переизмельчении щебня и ее связывание происходят, в основном, в этом слое при взаимодействии жидкости с минеральными частицами. Поэтому для предотвращения выбросов пыли с дорожного полотна производится профилактическое его смачивание водой или раствором соли. На первом этапе этого процесса наблюдается переизбыток влаги в сыпучей среде. Происходит это по двум причинам : 1) необходимость увлажнения всей толщи дороги диктует потребность в одновременно большом количестве воды; 2) проникновение ее в толщу дороги происходит в течении длительного времени (нескольких десятков минут). А поэтому на полотне дороги удерживается определенный запас влаги.

Для простоты представим две частицы минеральной пыли связанных жидким мостиком (манжетой) в разных стадиях смачивания.

На начальной стадии смачивания, при переизбытке жидкости, мениск манжеты будет выпуклым (рис. 1а).

Пытаясь принять естественное равновесное положение мениска (горизонтальное), капли будут раздвигать частицы, что препятствует на этом этапе их аутогезии.