



УДК 681.518:534.1

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ СПІРАЛЬНОГО КЛАСИФІКАТОРА ДЛЯ ЗАДАЧ КОНТРОЛЮ І УПРАВЛІННЯ

В.І. Дмитрієв¹, Ю.О. Шевченко²

¹старший викладач кафедри системного аналізу і управління, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», м. Дніпро, Україна, e-mail: valerii-dmitriev@mail.ru

²асистент кафедри системного аналізу і управління, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», м. Дніпро, Україна, e-mail: shevchenko.yu.o@nmu.one

Анотація. В роботі розглянута електромеханічна система спірального класифікатора, дана оцінка її ролі при рудопідготовці в замкнутому циклі подрібнення, обґрунтовані можливості контролю продуктивності по пісках (по ре циклу) і оцінки технічного стану спіралі.

Ключові слова: електромеханічна система, спіральний класифікатор, коливання, амплітудо-частотний аналіз, динамічна складова моменту, продуктивність рециклу по піску.

RESEARCH OF THE ELECTROMECHANICAL SYSTEMS OF SPIRAL CLASSIFIER FOR THE TASK OF CONTROL AND MANAGEMENT

Valeriy Dmitriev¹, Yuliya Shevchenko²

¹senior teacher of System Analysis and Management Department, National Mining University, Dnipro, Ukraine, e-mail: valerii-dmitriev@mail.ru

² assistant, System Analysis and Management Department, National Mining University, Dnipro, Ukraine, e-mail: shevchenko.yu.o@nmu.one

Abstract. Electromechanical system spiral classifier considered, evaluation system of ore preparation role in crushing a closed loop provided, ability to control performance on the sand justified (to recycle) and evaluate the technical condition of the spiral.

Keywords: electromechanical system, spiral classifier, fluctuations, amplitude-frequency analysis, the dynamic component of the moment, the productivity of the cycle for sands.

Вступ. Удосконалення підходів і принципів автоматизації технологічних процесів обумовлює пошук і аналіз простих і надійних засобів автоматичного контролю технологічних параметрів, структур побудови систем автоматичного управління. В технології збагачення руди процеси рудопідготовки є складними, матеріаломісткими і недостатньо автоматизованими через відсутність засобів автоматичного контролю, реально працюючих і які забезпечують автоматичне управління та оптимізацію [1, 2].



Спіральні класифікатори (СК) в технології збагачення руди створюють замкнений цикл рудоподготовки (ЗЦІ), що складається з агрегату для подрібнення і власне спірального класифікатора, який утворює рециркулюючий потік недоподрібненої руди в завантаження агрегату для подрібнення. Таким чином спіральний класифікатор виконує два функціональні завдання: класифікацію (поділ по крупності) подрібненої руди і повернення недоподрібненої до заданого класу крупності ($d_r \leq 0,074$ мм) руди, що обумовлює дві задачі по автоматизації цих процесів.

Перше завдання реалізується шляхом вимірювання та управління щільністю пульпи на зливному порозі класифікатора [1, 2]. Такі системи впроваджені і є досвід їх експлуатації. Вирішення другого завдання обумовлює наявність автоматичного контролю продуктивності рециркулюючого потоку руди і побудови систем автоматичного управління з його використанням на вході в барабан агрегату для подрібнення. Відомі розробки засобів автоматичного контролю продуктивності рециркулюючого потоку не забезпечують завдання автоматизації, пройшли разову перевірку або технічно важко реалізувати [3, 4].

Мета і завдання дослідження полягають у виявленні та обґрунтуванні методу автоматичного контролю продуктивності спірального класифікатора по рециркулю - пісках для задач управління, що забезпечить необхідну точність і достатню простоту реалізації.

Основна частина. Електромеханічна система спірального класифікатора, типу 2КСН-24, наведена на рисунку 1 і складається: з двох спіралей 1, зубчатих передач відкритого 2 та закритого типів 4, еластичної муфти 5, яка з'єднує вихідний вал редуктора 4 і вал приводного асинхронного електродвигуна 6.

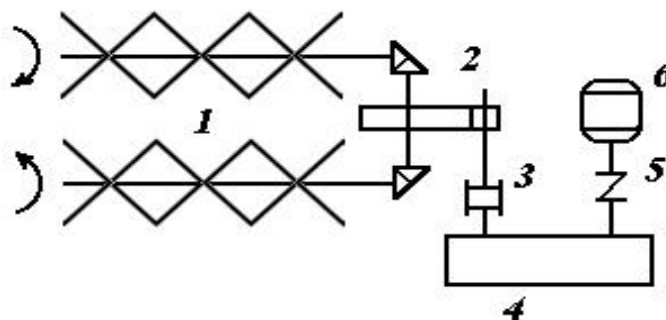


Рисунок 1 – Спрощена електромеханічна схема двохспірального класифікатора з електроприводом.

За умови нормального процесу класифікації в ванні класифікатора, тобто при щільності пульпи (1200 ... 1700) г / л, процес утворення пісків є рівномірним по фронту класифікації і між лопатями спіралі утворюються

порції пісків, з формою усіченого конуса. Лопаті спіралі безпосередньо пересувають порції пісків і періодично навантажують утримують їх спиці (один виток спіралі на валу утримує 6-ть спиць). Таке навантаження спиць призводить відповідно до періодичного навантаження уздовж валу спіралі спицями, які закріплені на валу, при русі порцій пісків валом спіралі, що обертається.

Передача енергії руху від валу приводного електродвигуна 6 відбувається далі по ланцюгу (див. рисунок 1): еластична муфта 5, закритий редуктор 4, еластична муфта 3, відкрита зубчата передача 2, вали 1 спіралей класифікатора, лопаті спіралей, порції пісків що пересуваються. Ця схема передачі енергії дозволяє зробити припущення про можливість оцінки маси пісків, що пересуваються і скидаються в жолоб СК порцій пісків, по споживаній активної потужності, що приводиться електродвигуном 6. При цьому необхідно дати оцінку можливості поділу сигналу потужності на його складові: постійну і динамічну, оцінити їх внесок у загальний сигнал.

Постійна складова характеризує середні витрати на пересування порцій пісків, тертя пісків о піски, пісків о лопать, тертя в підшипниках і зубчастих передачах, втрати енергії в муфтах і в обмотках електродвигуна. Наслідком цього і є зміна середніх значень потужності в часі, при зміні втрат енергії на тертя, втрат в муфті і обмотках електродвигуна, які залежать від вологості і крупності пісків, технологічних режимів, умов експлуатації обладнання і т. д. Динамічні складові можуть нести інформацію про маси порцій пісків, що транспортуються і скидаються в жолоб для піску [5].

Всі основні джерела збудження коливань спірального класифікатора - як електромеханічної системи, що призводять до коливань сигналу потужності приводного електродвигуна визначаються:

- дефектами механічних вузлів - невірноваженістю валу спіралі, неточністю виготовлення зубчастих передач і т. д.;
- несиметричним положенням навантаження пісків до спіралі і періодичним впливом моменту від навантаження на спиці спіралі;
- наявністю нелінійності при терті пісків по спіралі і при роботі еластичної муфти;
- дискретною зміною моменту при обертання спіралі і скиданні пісків порціями, укладених між сусідніми витками спіралі, в жолоб для піску;
- наявністю навантажених зубчастих передач, які крім того мають великі зазори;
- несиметричністю валів, з'єднаних жорсткими і гнучкою муфтами;
- вібропереміщенням в опорних і упорних підшипниках;

- наявністю полюсів в роторі і статорі, нерівномірними повітряними зазорами між ними;
- несиметричністю розташування ротора електродвигуна в магнітному полі статора;
- ослабленням кріплення окремих елементів, що обертаються і елементів конструкції класифікатора на фундаменті.

Кожен із зазначених джерел має характерну (свою) частоту коливань і відповідну амплітуду, яка в тій чи іншій мірі залежить від загального навантаження транспортується пісків, володіє різною енергоємністю і внеском в сумарний сигнал споживаної активної потужності.

Природно, що для завдання контролю піскового навантаження найбільший інтерес представляє то джерело, яке найменш схильний до впливу перешкод як частотних, так і амплітудних.

Розглянемо основні з зазначених джерел і виконаємо аналіз їх частот і амплітуд з прив'язкою до технічних параметрів класифікатора 2КПС-24.

1. Коливання, що викликані невірноваженістю валів спіралей, дискретним розташуванням їх окремих елементів, в значній мірі залежать від стану механічних вузлів і елементів. Наприклад, обрив лопаті або футеровки, розрив спиці призводять до зростання амплітуди коливань при тих же значеннях піскового навантаження. Частота цих коливань дорівнює частоті обертання валу спіралі:

$$f_1 = \frac{n}{60} \text{ Гц}, \quad (1)$$

де n – швидкість обертання валу спіралі, об/хв., при $n = 1,96$ об/хв. $f_1 = 0,033$ Гц.

2. Періодичне навантаження спиць, які утримують лопаті спіралей при їх послідовному зануренні в піски призводить до відповідної зміни крутного моменту, тобто до коливань з частотою пропорційною кількості спиць, які припадають на один виток (оборот) спіралі. Розглянуті класифікатори зазвичай мають 6 спиць, зсунутих по колу витка спіралі на 60° кожна. Частота цих коливань визначиться:

$$f_2 = 6 \cdot f_1 = 6 \cdot \frac{n}{60} \text{ Гц}, \quad (2)$$

та при $n = 1,96$ об/хв. $f_2 = 6 \cdot 1,96/60 = 0,1956 \sim 0,2$ Гц.

3. Наявність зубчастих передач призводить до коливань з частотами:

$$f_3 = Z_i \cdot f_1, \text{ Гц}, \quad (3)$$

де Z_i – число зубців колеса, шестірни.

Це так звані "зубцеві частоти" і їх амплітуда характеризується передатним моментом обертання (навантаженням), ступенем зносу зубів і зазорами при установці зубчастих передач. Наприклад, частота при контактній взаємодії зубів конічної пари відкритої передачі 2 (див. рисунок 1) дорівнює: $f_3 = 76 \cdot 1,96/60 = 2,414 \sim 2,4$ Гц.

4. Наявність еластичної муфти призводить до нелінійних перетворень крутного моменту, що викликає крутильні коливання в системі, що поділяє муфта - до валу спіралі і редуктор з одного боку і ротор приводного електродвигуна.

Уявімо електромеханічну систему класифікатора у вигляді двомасової системи (рисунок 2), де J_1 – зосереджений момент інерції спіралі класифікатора і редуктора, J_2 – зосереджений момент інерції ротора електродвигуна, $c_{1,2}$ – жорсткість еластичної муфти.

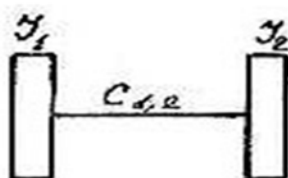


Рисунок 2 – Електромеханічна система класифікатора у вигляді двомасової системи

Система диференціальних рівнянь руху цієї системи може бути представлена у вигляді [6]:

$$\begin{cases} J_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + C_{1,2} (\varphi_1 - \varphi_2) \\ J_2 \cdot \ddot{\varphi}_2 - C_{1,2} (\varphi_1 - \varphi_2) \end{cases}, \quad (4)$$

де φ_1, φ_2 – миттєві кути повороту мас, щодо деякого початкового положення.

Приватне рішення цієї системи має вигляд:

$$\begin{cases} \varphi_1 = A_1 \cdot \sin(\omega_c \cdot t + E) \\ \varphi_2 = A_2 \cdot \sin(\omega_c \cdot t + E) \end{cases}. \quad (5)$$

Підставимо значення (5) в систему (4) і вирішивши її щодо частоти вільних коливань системи отримаємо [6, 7]:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{(J_1 + J_2)C_{1,2}}{J_1 \cdot J_2}}. \quad (6)$$

З виразу (6) видно, що частота характеризується загальним станом електромеханічної системи і пропорційна жорсткості муфти. Піськове навантаження входить до складу J_1 у вигляді приєднаного моменту інерції і крім

того надає демпфуючий вплив на амплітуду коливань. З вищенаведеного впливає, що використання амплітуди на частоті власних коливань системи для оцінки піскового навантаження неабсолютно. За наявними експериментальними даними ω_c для класифікаторів типів КСН і КСП знаходяться в діапазоні (5...10) Гц.

Еластична муфта 5 розташована безпосередньо перед приводним електродвигуном 6 і виконує також функції фільтра низьких частот [8], тобто коливання з частотами вище частоти "зрізу" f_{cp} даної муфти не проходять і їх аналіз недоцільний. Для муфт, застосовуваних в умовах підприємств: 5-ти пелюсткової і виготовленої з транспортної гуми - попередній аналіз показав, що $f_{cp} > 5$ Гц.

5. Особливості конструкції спіралі класифікатора полягають в тому, що вона має два заходи і кінцями кожного з них двічі скидає порції пісків в жолоб за один оборот. Це призводить до коливань крутного моменту і, відповідно, споживаної потужності електродвигуна. Частота цих коливань визначається:

$$f_4 = 2 \cdot f_1 \text{ Гц} \quad (7)$$

$$\text{та при } n = 1,96 \frac{\text{об}}{\text{хв}} \dots f_4 = 2 \cdot \frac{1,96}{60} = 0,06536 \sim 0,065 \text{ Гц.}$$

Спіраль класифікатора і визначні її елементи безпосередньо приймає вплив піскового навантаження, тому її динаміка має певні переваги для забезпечення контролю. Крім частот f_1, f_2, f_4 спіраль генерує і інші частоти вимушених коливань під дією зовнішнього навантаження зі змінною складовою. Ідентифікація динамічних характеристик спіралі [8] на підставі подання її у вигляді динамічного еквівалентного валу з жорсткістю на кручення, що змінюється періодично з частотою 6ω (т. я. спіраль в перерізі має 6 спиць поспільдовно сприймають дію моменту від піскового навантаження). Рішення диференціального рівняння руху цього валу (7) показало широкий спектр частот вимушених коливань, який наведено на рисунку 3. На ньому позначено: штрихова лінія відповідає основній частоті обертання спіралі (валу) класифікатора; потовщені довгі відрізки відповідають частотам 2ω та 6ω при відповідних коливаннях зовнішнього моменту і жорсткості; потовщені короткі - характеризують коливання валу з частотами 4ω і 8ω ; тонкі короткі - відповідають частотам, які з'являтимуться в вимушених коливаннях валу при обліку несиметричної зміни жорсткості і зовнішнього моменту.

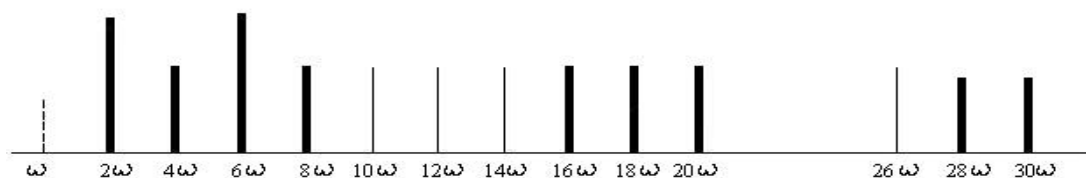


Рисунок 3 – Спектр частот вимушених коливань валу спіралі

6. Колювання через несиметричності розташування ротора електродвигуна в магнітному полі статора характеризують зміну загального навантаження на приводний електродвигун, що включає і навантаження по піску. Частота цих коливань визначається:

$$f_5 = \frac{\bar{\omega}_g}{60} \text{ Гц}, \quad (8)$$

де $\bar{\omega}_g$ – швидкість обертання ротора приводного електродвигуна, об/хв. $f_5 = 485/60 = 8,083 \sim 8,1$ Гц.

Інші види джерел коливань в меншій мірі можуть характеризувати навантаження по піску і тому не розглядаються.

Далі розглянемо рівняння руху електроприводу спіралей класифікатора в загальному вигляді [9]:

$$M = M_c + M_g, \quad (9)$$

де M – момент створений електродвигуном; M_c – складова моменту, що витрачається на подолання сил опору руху (статичний момент); M_g – складова моменту, що витрачається на зміну запасу кінетичної енергії систем (динамічний момент).

Аналогічно можна записати і для активної потужності, споживаної електродвигуном спіралей:

$$P = P_c + P_g. \quad (10)$$

Складова активної потужності P_c включає різні втрати на тертя і втрати власне на транспортування пісків.

Динамічна складова потужності характеризує зміну запасу кінетичної енергії в системі:

$$P_g = M_g \cdot \omega, \quad (11)$$

$$P_g = \frac{dA_g}{dt} = J \cdot \varpi \frac{d\varpi}{dt} + \frac{\varpi}{2} \cdot \frac{dJ}{dt}, \quad (12)$$

де ϖ – наведена швидкість обертання системи; $A_g = J \cdot \varpi^2 / 2$ – запас кінетичної енергії систем; $J = m \cdot \rho^2$ – момент інерції приведений до валу електродвигуна; m – маса, що обертається, наведена до валу електродвигуна; ρ – приведений радіус інерції.

Аналогічно (12) отримаємо з (11) для динамічного моменту:

$$M_g = \frac{P_g}{\varpi} = J \cdot \frac{d\varpi}{dt} + \frac{\varpi}{2} \cdot \frac{dJ}{dt}. \quad (13)$$

При роботі спірального класифікатора швидкість обертання електродвигуна і, власне, швидкість обертання спіралей практично не змінюється, тобто практично $\varpi = \text{const}$ і тому для складової вираження (13) одержимо:

$$J \cdot \frac{d\varpi}{dt} = 0. \quad (14)$$

Конструктивні особливості спіралей класифікатора призводять до того, що піски скидаються в жолоб кінцями спіралей дискретно - порціями, укладеними між витками спіралей. Тому для наведеної маси системи можна записати:

$$m = m_c \pm \Delta m \cdot \sin(\varpi \cdot t), \quad (15)$$

де m_c – середнє значення маси системи; $\pm \Delta m$ – зміна маси системи, викликане зазначеним явищем, з періодом кратним частоті ϖ . Це і призводить до появи коливань моменту на валу приводного електродвигуна спіралей, тобто M_g і відповідно складової P_g .

Утворення пісків з пульпи, що надходить в класифікатор з млина відбувається безперервно і практично не впливає на величину M_g .

Виходячи з цього, рівняння (13) отримаємо у вигляді:

$$M_g = K_1 \frac{d[\rho^2(m_c \pm \Delta m \cdot \sin(\varpi \cdot t))]}{dt}, \quad (16)$$

де з урахуванням $m_c = \text{const}$ можливо прирівняти:

$$\frac{\omega}{2} \cdot \rho^2 = K_1, \quad (17)$$

Після перетворення отримаємо:

$$M_g = K_1 \frac{d(\pm \Delta m \cdot \sin(\varpi \cdot t))}{dt} = \pm K_1 \cdot \Delta m \cdot \varpi \cdot \cos(\varpi \cdot t). \quad (18)$$

На підставі виразів (11) і (18) отримаємо:

$$P_g = \pm K_1 \cdot \Delta m \cdot \varpi^2 \cdot \cos(\varpi \cdot t). \quad (19)$$

Прийнявши $K = K_1 \cdot \varpi^2$ отримаємо:

$$P_g = \pm K \cdot \Delta m \cdot \cos(\varpi \cdot t). \quad (20)$$

З виразів (18) і (20) можливо зробити висновок, що динамічні складові моменту потужності пропорційні зміні маси пісків в момент часу t за рахунок їх періодичного (порціями) скидань в жолоб для піску СК.

На підставі наведених виразів розроблений спосіб контролю продуктивності по рециклу [9], який полягає у вимірюванні одного з параметрів, що характеризує величину повного механічного моменту на валу привідного електродвигуна класифікатора (наприклад споживану активну потужність привідного електродвигуна). Далі вимірюють миттєві значення цього параметра і виділяють його динамічну складову, відповідну динамічній складовій повного механічного моменту. За зміною величини амплітуди визначають продуктивність класифікатора по піску, причому величину амплітуди вимірюють на характерній частоті коливань динамічної складової.

Динамічна складова моменту на валу приводного електродвигуна включає вплив і на перліку інших частот (див. п. п. 1-3), що може забезпечити контроль технічного стану обладнання спіралі (див. рисунок 2): обрив лопаті спіралі, розрив спиці, пошкодження зубів відкритої передачі конічної пари і т. д. Еластична муфта (див. п. п. 4) забезпечує стійку роботу електро-механічної системи спіралі, усуваючи резонансні коливання, що виникають на частотах вище 6,0 Гц.

Висновки і пропозиції по продовженню досліджень. Отриманий результати досліджень показали можливості використання амплітудо-частотних характеристик коливань валу спіралі, а відповідно, і сигналу потужності приводного електродвигуна для оцінки маси піску, які у вигляді порцій транспортуються по кориту класифікатора і скидаються в жолоб для піску СК і оцінки технічного стану спіралі.

Серед розглянутих частот коливань найбільш інформативною і завадостійкою є подвійна оборотня частота f_4 , яка характеризує частоту скидання порцій пісків в жолоб для піску. Для класифікатора 2КСП-2,4 вона дорівнює $f_4 = 0,065$ Гц.

Розвиток досліджень і практичних розробок передбачається в побудові і дослідженні математичної моделі спіралі, для оцінки завадостійкості інформаційних каналів контролю, розробці структур систем автоматичного керування і алгоритмів визначення параметрів продуктивності по пісках і технічного стану електромеханічної системи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Автоматизация обогатительных фабрик / Г.А.Хан, В.П.Картушин, Л.В.Сорокер и др. – М.: Недра, 1974. – 280с.
2. Тихонов О.Н. Автоматизация производственных процессов на обогатительных фабриках/ О.Н.Тихонов. – М.: Недра, 1985. – 272с.
3. Бабець Є.К. Дослідження інформативності параметрів збагачення руди при побудові інтелектуальних систем управління / Є.К. Бабець, В.П. Хорольський, В.Б. Хоцкіна // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг. – 2006. - №13. – с. 55-59.
4. Хоцкіна В.Б. Автоматизація процесів керування технологічним комплексом збагачення залізних руд з використанням моделей мереж Петрі / В.Б. Хоцкіна // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг, - 231. - №34, - с. 15-18.
5. Дмитриев В.И. Экспериментальные методы оценки производительности по рециркулу в замкнутых циклах измельчения. / В.И. Дмитриев. с. 160-169. // Матеріали міжнар. конф., 3- вересня – 3 жовтня, 2015р. - Дніпропетровськ / - Д.: Національний гірничий університет, 2015. – Т.3. – 252с.
6. Маслов Г.С. Расчеты колебаний валов. / Г.С. Маслов – М.: Машиностроение, 1980. – 151с.
7. Бизерман В.Л. Теория механических колебаний. / В.Л. Бизерман – М.: Высшая школа, 1980. – 408с.
8. Корсун В.И.Идентификация динамических характеристик спирали классификатора и их практическая проверка / В.И. Корсун, А.Н. Марюта, В.И.Дмитриев // Автоматический контроль и управление в цветной металлургии. Тезисы докладов РНТС. – Ташкент, 1983. – С. 28–28.
9. Дмитриев В.И. А.С. 1269838 СССР, МКИ В 03 В 13/00. Способ определения производительности спирального классификатора по пескам / В.И. Дмитриев // №3904014/22-03; Заявлено 27.05.85; Опубликовано 15.11.86. Бюл. №42. // Открытия. Изобретения. – 1986. - №42 – С.82.

УДК 621.787

ПОВЫШЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ ШЕСТЕРЕН ДЛЯ ГОРНЫХ МАШИН

С.Д. Карпухин¹, Н.А. Юшин²

¹ кандидат технических наук, доцент, e-mail: mgtu-gvi@yandex.ru

² студент, e-mail: dr.mgtu@yandex.ru

^{1, 2} кафедра «Материаловедение», Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана, Россия