

В статье выполнен анализ состояний ТУ. Он является дополнением к анализу состояний, выполненному в статьях [2] и [3]. Определены варианты отношения состояний, их полные словесные описания. Показана нецелесообразность использования в составе ГК полных словесных описаний состояний. Предложены новые форма ГК и способ их составления. Приведены примеры составления ГК и проектирования с их помощью.

Определено, что для выбора подходящего варианта описания проекта и его точных характеристик нужен специальный алгоритм.

Список литературы: 1. *Ивахненко И.А.* Об алгоритме проектирования технических устройств / *И.А. Ивахненко, Т.Н. Ивахненко* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. – № 30. – С. 33 – 42. 2. *Ивахненко И.А.* О накоплении глагольных конкретизаций для проектирования технических устройств / *И.А. Ивахненко, Т.Н. Ивахненко* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – № 39. – С. 105 – 114. 3. *Ивахненко И.А.* К вопросу о накоплении глагольных конкретизаций для проектирования технических устройств / *И.А. Ивахненко, Т.Н. Ивахненко* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – № 45. – С. 79 – 86.

Поступила в редколлегию 26.07.11

УДК 621.926.5:539.215:531.36

К.Ю. ДЕЙНЕКА, інженер, НУВГП, Рівне

ВСТАНОВЛЕННЯ УМОВ САМОЗБУДЖЕННЯ ПУЛЬСАЦІЙ ВНУТРІШНЬОКАМЕРНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ БАРАБАННОГО МЛИНА

Визначений основний незбурений рух барабанного млина. Отримані умови стійкості сталого руху машинного агрегату млина і сдвижного перебігу зернистого внутрішньокамерного завантаження. Виявлені причини самозбудження пульсацій завантаження в поперечному перетині камери барабана, що обертається.

Определено основное невозмущенное движение барабанной мельницы. Получены условия устойчивости установившегося движения машинного агрегата мельницы и сдвигового течения зернистой внутрикамерной загрузки. Выявлены причины самовозбуждения пульсаций загрузки в поперечном сечении камеры вращающегося барабана.

The ball-tube mill unperturbed fundamental motion is established. The stability conditions of a mill machine steady-state motion and an intrachamber granular filling shifting flow are determined. The cause of self-excitation of filling pulsations in rotating chamber cross-section is advanced.

Новим технологічним напрямом радикального підвищення надзвичайно низької енергетичної ефективності барабанних млинів є активізація циркуляції завантаження шляхом надавання йому коливних рухів у камері. Доволі перспективним для практичного застосування видається удосконалення процесів подрібнення, на основі ефекту самозбудження автоколивань завантаження, на базі традиційних конструктивних рішень обладнання з барабаном без додаткових елементів, що піддаються прискореному зносу.

Нестійкі режими роботи барабанних млинів досліджувались низкою авторів. Було розроблено моделі вимушених коливань у приводі завантаженого барабана [1], фрикційних коливань при проковзуванні всього завантаження відносно поверхні камери [2], фрикційних коливань при проковзуванні всього завантаження відносно поверхні камери та пружних коливаннях приводу [3], фрикційних коливань при проковзуванні центральної малорухливої частини відносно решти завантаження [4] та фрикційних коливань внутрішніх шарів завантаження [5]. Однак застосування таких спрощених моделей фрикційних крутильних коливань зумовлює розбіжність одержуваних розрахункових результатів із експериментальними даними, скільки проковзування завантаження відносно поверхні камери практично відсутнє.

Попередні пошукові експерименти засвідчили, що пульсаційний рух завантаження в обертовій камері спричинено нестійкістю руху млина, як машинного агрегату. При встановленні умови стійкості руху системи найбільшу складність становило визначення основного незбуреного руху млина.

Завантажений барабан млина (рис. 1) розглядався як система сталого складу зі змінними інерційними параметрами – осьовим моментом інерції та положенням центра мас.

Вважалось, що змінність цих параметрів було зумовлена перерозподілом із відносним рухом мас завантаження на тілі барабана. У рівняннях руху враховувалась вся маса завантаження, не залежно від характеру взаємодії із барабаном.

На основі методів механіки відносного руху було отримано вирази для кінетичної енергії, головного вектора та головного моменту кількостей руху завантаженого барабана. Застосування принципу твердіння механічної системи істотно спростило отримання рівнянь руху завантаженого барабана:

$$M_n = I_z \frac{d\omega}{dt} + M_o, \quad M_o = m_z + M_{az}, \quad m_z = m_{kz} + m_{vz}, \quad M_{az} = -\rho g \int_w r_{vx} dw,$$

$$m_{kz} = -2\rho\omega \int_w (r_{vx}u_x + r_{vy}u_y)dw, \quad m_{vz} = -\rho \int_w \left(r_{vx} \frac{du_y}{dt} - r_{vy} \frac{du_x}{dt} \right) dw,$$

$$I_z = \rho \int_w (r_y^2 + r_z^2) dw,$$

де M_n – приводний крутячий момент, I_z – осьовий момент інерції завантаженого барабана, ω – кутова швидкість барабана, t – час, M_o – момент опору завантаження обертанню барабана, m_z – момент реактивних сил завантаження, m_{kz} – момент реактивних коріолісових сил, m_{vz} – момент реактивних варіаційних сил, M_{az} – момент активних масових сил завантаження.

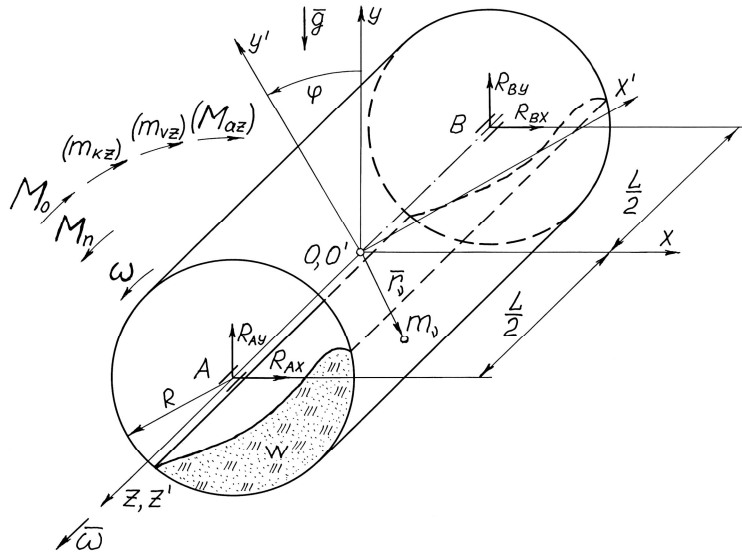


Рис. 1. Розрахункова схема завантаженого барабана

Було залучено рівняння Лагранжа другого роду для системи зі змінними інерційними параметрами із використанням принципу твердіння:

$$\frac{d^*}{dt} \frac{\partial^* T}{\partial \omega} - \frac{\partial^* T}{\partial \varphi} = M_e - m, \quad T = \frac{I\omega^2}{2},$$

де d^*, ∂^* – знаки спеціальних похідних за принципом твердіння системи; M_e , m та I – узагальнені (зведені) моменти зовнішніх, реактивних сил та осьовий момент інерції.

На основі використання принципу встановлення ієрархії змінних, було

прийнято гіпотезу про близькість руху системи до обертання із кутовою швидкістю, що повільно змінюється.

Динамічні та інерційні параметри завантаженого барабана вважались квазістатичними залежностями швидкості обертання, що дозволило одержати рівняння перехідного руху млина:

$$\left\{ \left[\frac{\omega^2}{2} \frac{d^2 I_3(\omega)}{d\omega^2} + 2\omega \frac{d I_3(\omega)}{d\omega} + I_3(\omega) + I_\sigma \right] \frac{1}{i^2} + I_\sigma \right\} \frac{d\omega}{dt} = M_\sigma(\omega) - \frac{M_3(\omega) + M_\sigma}{i\eta_k},$$

де I_3 , I_σ и I_σ – осьові моменти інерції завантаження, барабана та обертових частин двигуна; M_σ – момент приводного двигуна; M_3 – момент опору обертанню барабана; M_σ – момент опору в опорах барабана; i та η_k – передаточне відношення та коефіцієнт корисної дії приводу.

На основі прямого методу Ляпунова було отримано умову асимптотичної стійкості усталеного руху машинного агрегату барабанного млина:

$$\frac{\frac{dM_3(\omega)}{d\omega} \frac{1}{i\eta_k} - \frac{dM_\sigma(\omega)}{d\omega}}{\left[\frac{\omega^2}{2} \frac{d^2 I_3(\omega)}{d\omega^2} + 2\omega \frac{d I_3(\omega)}{d\omega} + I_3(\omega) + I_\sigma \right] \frac{1}{i^2} + I_\sigma} > 0.$$

Екстремальне від'ємне значення другої похідної $d^2 I_3(\omega)/d\omega^2$ може викликати від'ємне значення знаменника отриманої умови стійкості, а екстремальне від'ємне значення похідної $dM_3(\omega)/d\omega$ – від'ємне значення всього чисельника умови.

Це може привести до невиконання умови та втрати стійкості руху.

Було прийнято, що автоколивання в камері обертового барабана спричинені інерційним режимом поведінки зернистого завантаження (рис. 2), що перебуває у стані зсувної течії (рис. 3).

Такий режим реалізується при невеликій густині середовища та великому зсуванні швидкостей.

За таких умов між елементами завантаження завжди виникають деякі зазори.

Взаємодія елементів здійснюється внаслідок їх безперервного зштовхування.

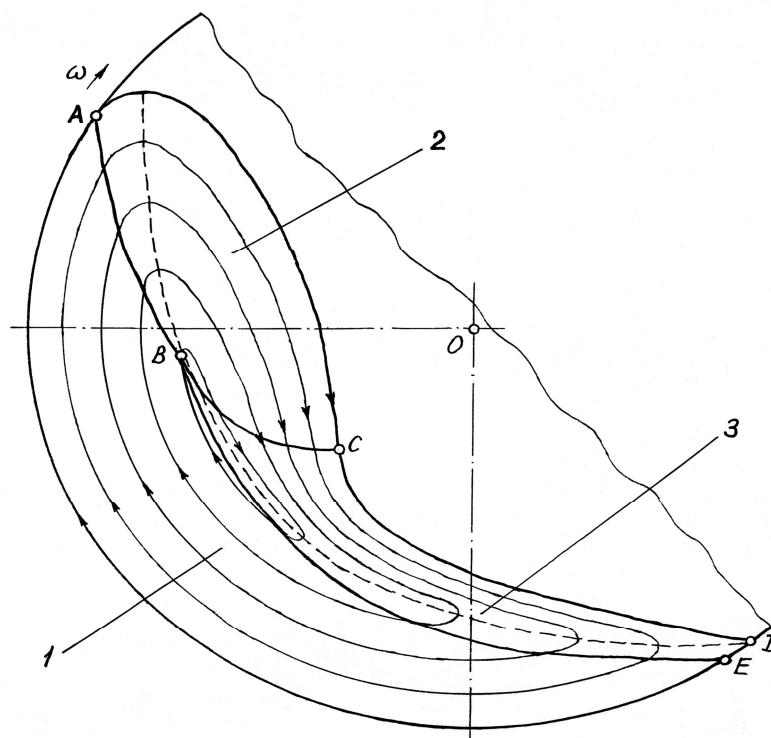


Рис. 2. Схема картини руху завантаження в перерізі камери обертового барабана:
 1 – зона твердотільного руху, 2 – зона відокремлення та падіння,
 3 – зона зсувного шару

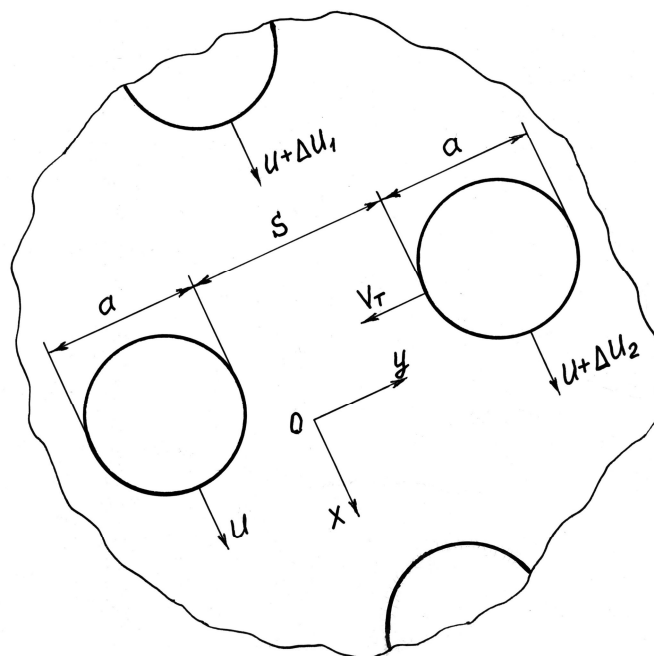


Рис. 3. Схема зсувного потоку завантаження в інерційному режимі

Дисперсна та несуча фази внутрішньомлиного завантаження розглядались, як суцільне середовище із осередненими параметрами, а математичне

описування руху багатофазної системи здійснювалось за допомогою осереднених величин.

На основі теорії швидких рухів зернистих середовищ як математичну модель завантаження було вибрано рівняння неньютонівської рідини, що нестискається. Було приблизно розв'язано вихідне рівняння вигляду:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i, \quad \text{де } P_{ij} = \left(p - \frac{1}{3} \eta \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} - \eta \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

де $\rho = \text{const}$ – масова густина, $\vec{u}$ – середня (макроскопічна) швидкість, $\vec{P}$ – тензор в'язких напружень, p – дисперсний тиск, $\rho \vec{g}$ – об'ємна сила тяжіння, η – коефіцієнт в'язкості.

Враховувались закони збереження маси, імпульсу та теплової енергії:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + u_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} &= -\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i}, & \rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) &= -\frac{\partial P_{ij}}{\partial x_j}, \\ \frac{3}{2} \rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - P_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - I, \end{aligned}$$

де $T = v_T^2/3$ – температура середовища, v_T – середня швидкість хаотичного руху елементів (теплова швидкість), κ – коефіцієнт теплопровідності, I – зменшення енергії хаотичного руху елементів внаслідок їх непружного співударення.

Це дозволило отримати дисперсійне рівняння розглядуваної системи:

$$\beta^3 + (a_1 k^2 - b_1) \beta^2 + k^2 (c_1 k^2 - d_1) \beta - k^2 (e_1 k^2 + f_1) = 0,$$

де $\beta = -i\omega$; ω – збурення швидкості поперек площини зсуву; k – хвильове число; $a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, f_1$ – коефіцієнти, що визначаються характеристиками середовища.

Було встановлено (рис. 4), що рух завантаження млина в зоні відокремлення та падіння є стійким або нестійким по відношенню до малих збурень, що розповсюджуються перпендикулярно до площини зсування, в залежності

від середньої довжини вільного пробігу елементів або від дилатансії завантаження.

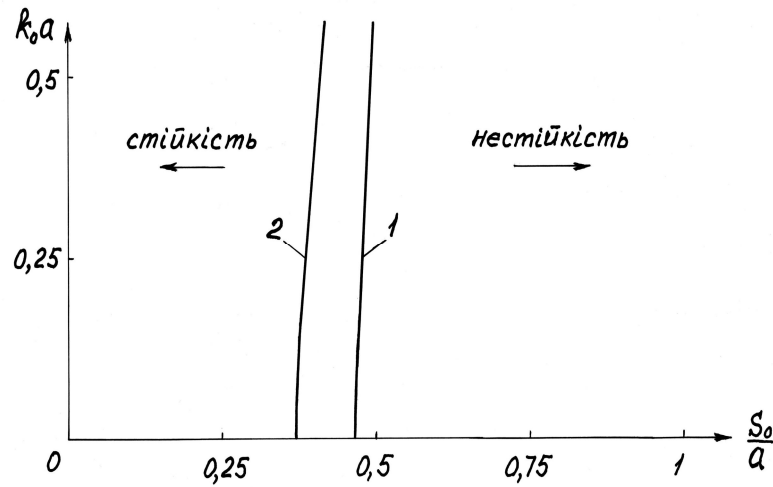


Рис. 4. Дисперсійні криві і схеми областей стійкого та нестійкого руху зернистого завантаження:

- 1 – дисперсійна крива для абсолютно жорстких елементів завантаження,
- 2 – дисперсійна крива для елементів, що деформуються, при демпфуванні.

При порівняно малій дилатансії рух завантаження є стійким, оскільки всі збурення з часом загасають у всьому діапазоні довжин хвиль. При дилатансії, більшій за критичну, такий рух є нестійким у деякому інтервалі хвильових чисел. Критичне значення дилатансії залежить від часу контактування при співударяннях елементів, що деформуються, зменшуючись зі зростанням часу контактування по відношенню до часу вільного пробігу. Показано, що демпфуючий вплив подрібнюваного матеріалу на взаємодію молоткових тіл підвищує час контактування елементів і посилює нестійкість руху.

Отже, чинниками пульсацій завантаження, що суттєво підвищують енергетичну ефективність процесів подрібнення в барабанних млинах [6], є варіації осьового моменту інерції і моменту опору обертанню, дилатансія та демпфуюча дія частинок подрібнюваного матеріалу на взаємодію молоткових тіл.

Список літератури: 1. Виноградов Б.В. Динаміка барабанних млинів: монографія / Б.В. Виноградов. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2004. – 127 с. 2. Сланевский А.В. Челночное движение сыпучей среды во вращающихся печах и мельницах / [А.В. Сланевский, И.И. Лобунина, Л.Г. Берштейн и др.] // Цемент. – 1992. – № 4. – С. 55 – 61. 3. Крюков Д.К. Усовершенствование размольного оборудования горнообогатительных предприятий / Д.К. Крюков. – М.: Недра, 1966. – 174 с. 4. Марюта А.Н. Управление фрикционными колебаниями нагрузки барабанных мельниц с целью интенсификации измельчения трением / А.Н. Марюта // Пробл. трения и изнашивания. – 1988. – Вып. 34. – С. 18 – 28. 5. Новицкий И.В. Автоматическая оптимизация процессов самоизмельче-

ния руд в барабанных мельницах / *И.В. Новицкий*. – Днепропетровск: Системные технологии, 2000. – 195 с. 6. *Дейнека К.Ю.* Создание рациональных режимов работы барабанных мельниц с автоколебательной внутрикамерной загрузкой / *К.Ю. Дейнека* // Вісник НТУ «ХПІ». – 2010. – № 65. – С. 69 – 74.

Надійшла до редколегії 25.07.11

УДК 621.926.5:539.215

Ю.В. НАУМЕНКО, докт. техн. наук, доц., НУВГП, Рівне

СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ ТРИФАЗНОГО РЕЖИМУ РУХУ ВНУТРІШНЬОКАМЕРНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ БАРАБАННОГО МЛИНА

Запропонована модель реального трифазного режиму руху внутрішньокамерного завантаження обертового барабана. Показано, що картина руху завантаження в поперечному перетині камери містить, поряд з традиційною твердотілою і зоною скованого падіння, третю зону зсувного шару, що раніше не враховувалася. Встановлено, що основний процес тонкого подрібнення в барабанному млині здійснюється в зсувному шарі завдяки стиранню і роздавлюванню.

Предложена модель реального трехфазного режима движения внутрикамерной загрузки вращающегося барабана. Показано, что картина движения загрузки в поперечном сечении камеры содержит, наряду с традиционной твердотельной и зоной несвободного падения, ранее не учитывавшуюся третью зону сдвигового слоя. Установлено, что основной процесс тонкого измельчения в барабанной мельнице осуществляется в сдвиговом слое благодаря истиранию и раздавливанию.

The model of the actual rotating drum intrachamber filling three-phase flow is proposed. It is pointed out that the chamber cross-section filling flow patterns contain, among familiar solid-state and falling-down phases, the third shifting layer phase, which previously was not taken into account. It is established that the principal fine ball-tube milling is effected into a shifting layer owing to rubbing and crushing.

Процес подрібнення в барабанних млинах носить яскраво виражений випадковий характер. Описати його можна лише за допомогою узагальнених динамічних параметрів, що характеризують реалізацію способів подрібнення і повністю визначаються поведінкою завантаження в обертовій камері.

Хронологія використання барабанних млинів починає відлік від патенту 1891 року. Через декілька десятиліть було започатковано розвиток теорії робочих процесів таких млинів [1]. Надалі цю гіпотезу було покладено в основу