

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МОДЕЛЮВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

На правах рукопису

КРОТ Павло Вікторович

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕДАННЯ  
ЕНЕРГІЇ ТЕРТЯМ ВІД ДЖЕРЕЛ ДО РОБОЧИХ ОРГАНІВ  
(НА ПРИКЛАДІ ПРОКАТНИХ СТАНІВ)

05.13.02 - "Математичне моделювання у наукових дослідженнях"

Автореферат  
дисертації на пошування вченого ступеню  
кандидата технічних наук

Київ - 1996



00754313 (N)

Дисертацією є рукопис. Робота виконана у Дніпропетровському національному університеті імені Григорія Пирогова  
Червоного Прапора госуніверситеті ім. 300-річчя воз'єднання України з Росією.

Науковий керівник: доктор техн. наук, професор МАРЮТА О.М.

Офіційні опоненти: доктор техн. наук, професор ТАРАПОН О.Г.  
канд. техн. наук, доцент МЕЩЕРЯКОВ Л.І.

Провідна установа: ІНСТИТУТ ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ НАН УКРАЇНИ

Захист відбудеться 28 березня 1996 р. о 14 год на засіданні  
Спеціалізованої Ради Д01.91.01 ІПМЕ НАН України за адресою: 252164, м. Київ-164,  
вул. Генерала Наумова, 15, тел. 444-10-63.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту проблем моделювання в  
енергетиці НАН України.

Автореферат розіслан 23 лютого 1996 р.

Вчений секретар  
Спеціалізованої Ради  
Д01.91.01, к.т.н.

Е.П. Семаяна

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ.** У теперішній час все більше уваги приділяється розробці та вдосконаленню методів та засобів дослідження промислових механізмів, здійснюючих передавання енергії від джерел до робочих органів. Прикладом таких систем є прокатні стани, у яких передавання енергії відбувається завдяки сил тертя. Важливе значення при цьому має проблема нелінійних коливань у цих складних механічних системах. Ефективним засобом автоматизації рішення задач керування та поточної діагностики є застосування математичного моделювання. У дисертації пропонується новий підхід до створення динамічної моделі процесу прокатки у вигляді відкритої механічної системи з передаванням енергії тертям і досліджується машинна реалізація моделі для задач діагностики фрикційних коливань та керування прокатним станом.

**МЕТОЮ** дисертаційної роботи є розробка математичної моделі прокатки, адекватно описуючої динамічні процеси у прокатному стані, як відкритої механічної системи, створення алгоритмів та програмних засобів машинної реалізації моделі, ідентифікація параметрів цієї моделі та дослідження її властивостей, статистична обробка даних моделювання з метою відшукування інформативних ознак для задач діагностики фрикційних коливань, керування прокатними станами, поліпшення якості продукції.

**МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.** У роботі застосовуються методи лінійної алгебри, теорії нелінійних диференціальних рівнянь, чисельного інтегрування, елементи теорії математичної статистики, чисельного експерименту та машинного моделювання, теорія статистичної обробки та фільтрації сигналів.

**НАУКОВА НОВИНА.** У роботі одержані такі нові результати:

- розроблена модель нелінійних коливань у процесі прокатки на основі теорії відкритих механічних систем;
- показано, що прокатка є частковим випадком більш широкого класу нелінійних систем з передаванням енергії тертям від джерел до робочих органів, у яких виникають фрикційні коливання;
- розроблені алгоритми та програмні засоби, реалізуючі машинну модель;
- методом планованого експерименту досліджені властивості розробленої моделі;
- досліджені статистичні властивості даних моделювання електромеханічної системи прокатного стану;
- запропоновано спосіб застосування даних моделювання для діагностики та керування прокатними станами;
- розроблено структуру системи діагностики фрикційних коливань та керування прокатними станами.

**ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ** роботи полягає у розробці моделі процесу прокатки, створенні алгоритмічних та програмних засобів для її машинної реалізації, що дозволяють:

- створювати моделі та досліджувати різні прокатні стани у нетривких режимах роботи, що виникають завдяки фрикційним коливанням;
- одержувати статичні характеристики промислового стану на основі планованого експерименту на моделі;
- розробляти системи діагностики та керування, ґрунтовані на застосуванні розробленої моделі прокатки.

Пропонована модель, алгоритми та програмні засоби можуть бути модифіковані та пристосовані для опису більш широкого класу промислових об'єктів.

### **РЕЗУЛЬТАТИ, ЩО ВІНОСЯТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ:**

1. Математична модель баг.гоклітинного прокатного стану у вигляді відкритої механічної системи з переданням енергії тертям та її властивості.
2. Алгоритми та програмні засоби, призначені для розрахунку на моделі та статистичної обробки даних.
3. Спосіб застосування даних моделювання для діагностики фрикційних коливань та керування прокатними станами.
4. Структура системи діагностики та керування швидкісними режимами багатоклітинного прокатного стану.

**АПРОБАЦІЯ РОБОТИ.** Основні положення дисертаційної роботи докладалися автором та обговорювалися на таких конференціях та семінарах: Всесоюзний семінар "Діагностика технологічних процесів в машинобудуванні", м.Москва, 1990; Республіканська науково-технічна конференція "Автоматизація та діагностика технологічних процесів", м.Луцьк, 1990; Друга Всесоюзна конференція "Нелинійні коливання механічних систем", м.Горький, 1990; Перша Всесоюзна школа-семінар "Математичне моделювання в машинобудуванні", м. Куйбишев, 1990; Школа-семінар молодих вчених в інституті кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України, м.Київ, 1991, XVI Конференція з питань розсіювання енергії при коливаннях механічних систем, м.Київ, 1992.

**НАДРУКОВАНО.** За темою дисертації надруковано дев'ять друкованих робіт.

**СТРУКТУРА ТА ОБСЯГ РОБОТИ.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку літератури та додатка. Повний обсяг роботи складає 127 машинописних сторінок, з них основного тексту - 97 сторінки, малюнків - 24 сторінки, таблиць - 1 сторінка, бібліографія - 85 найменувань.

### **ЗМІСТ РОБОТИ**

**У ВСТУПІ** сформульована мета дисертаційної роботи, зазначено коло досліджуваних об'єктів, перераховані застосовані методи рішення та одержані результати.

Основний об'єкт вивчення - розробка та дослідження динамічної моделі процесу прокатки для задач діагностики та керування.

Багато важливих результатів з моделювання прокатки було одержано у роботах низки вітчизняних та закордонних вчених. У теперішній час для складання диференціальних рівнянь руху металу та прокатного обладнання найбільш широко застосовується методика, основана на рівнянні Лагранжа 2-го роду. При опису динамічних процесів у прокатних станах на основі цієї методики залишаються невирішеними деякі проблеми.

1. З огляду того, що прокатні стани є відкритими механічними системами, у яких відбувається безперервне передавання енергії силами тертя від валків (джерела) до стрічки (робочого органу), потрібен підхід, урахувуючий специфіку діючих сил та об'єкту дослідження при складанні рівнянь динаміки.

2. Існуючі моделі коливань при прокатці мають такі обмеження:

- не ураховується розподіленість сил тертя по довжині контакту валків з металом;
- відсутність у зв'язку з цим єдиного стану рівноваги у системі валки-метал, відносно якої прикладаються сили та моменти сил при складанні рівнянь;
- для опису руху системи під час розриву фрикціонного зв'язку валків та полоси потрібно знання виду залежності сил тертя від швидкості ковзання;
- прийняте припущення про "малі" відхилення системи від стану рівноваги не дозволяє досліджувати фрикційні коливання в стані значної амплітуди, що зареєстровані численними дослідженнями.

У дисертаційній роботі для складання диференціальних рівнянь динаміки систем з передавання енергії тертям застосовується закон зберігання кінетичної енергії системи. Такий підхід не накладає ніяких обмежень на характер руху та кількість станів рівноваги системи при складанні рівнянь динаміки. На прикладі прокатних станів показано, що в таких системах існує два стани рівноваги, відносно яких відбуваються нелінійні коливання прокатуємої стрічки під час її руху у валках.

У ПЕРШОМУ розділі наведені приклади промислових механізмів, що здійснюють передавання енергії тертям від джерел до робочих органів, розглянуті існуючі моделі коливань у прокатці. Показано, що застосування рівняння Лагранжа 2-го роду не ефективно для систем з неголономними зв'язками, якими є прокатні стани. У дисертаційній роботі сформульована постановка задачі дослідження: на основі найбільш загального закону механіки - закону зберігання кінетичної енергії, розробити математичну модель прокатки у вигляді відкритої механічної системи, що описує фрикційні коливання у прокатному стані.

У ДРУГОМУ розділі складаються рівняння руху прокатуємого металу у валках. При складанні рівнянь застосовано закон зберігання енергії у диференціальній формі:

$$dW = 2 f_1 P \cos \varphi(\alpha) r d\alpha - P_c S_1 \ln \xi dl + (T_1 - T_0 / \xi) dl. \quad (1)$$

де  $dW$  - елементарне прирощення кінетичної енергії розкату маси  $M$ ;  $P_c S_1 \ln \xi \, dl$  - робота сил опору деформації при прокатці елементарної частки  $S_1 \, dl$ ;  $2 f_1 P \cos \theta \, \varphi(\alpha) \, r \, d\alpha$  - елементарна робота сили тертя  $2 f_1 P \cos \theta \, \varphi(\alpha)$  на дузі  $r \, d\alpha$  фрикційного контакту длт двох валків;  $(T_1 - T_0 / \xi) \, dl$  - робота сил натягнення (підпирання) розкату;  $P_c$  - середній контактний тиск;  $\xi = S_0 / S_1$  - коефіцієнт витяжки, де  $S_0, S_1$  - площа перерізу розкату на вході та виході з області контакту;  $f_1$  - коефіцієнт тертя зчіплення у зоні контакту;  $P$  - повне зусилля прокатки;  $\theta$  - середній кут контакту (середина дуги захоплення);  $r$  - радіус валків (для калібрів обчислюється по катаючому діаметру);  $\varphi(\alpha)$  - функція, апроксимуюча розподілення тиску у зоні контакту;  $T_0$  та  $T_1$  - натягнення (підпирання) розкату на вході та виході з очагу.

Закон розподілення тиску по поверхні контакту валків з металом приймається косинусоїдальним:  $P(\alpha) = P_c \cos \theta \cdot \cos \alpha$ . Інші параметри рівняння (1) розраховуються за відомими у теорії прокатки формулами. Елементарне прирощення кінетичної енергії металу  $dW$  можна уявити таким чином:

$$dW = M u \, du = M (du/dt) u \, dt = M (d^2 l / dt^2) \, dl \quad (2)$$

Припускається, що при захопленні розкату його швидкість  $u$  зростає за лінійним законом від  $u_0$  до  $V = \Omega r$ , де  $\Omega$  - кутова швидкість валків. Тоді прискорення розкату буде  $du/dt = d^2 l / dt^2$  - величина незмінна. Вираз (1) інтегрується вздовж шляху  $l$  та по  $d\alpha$  вздовж всієї дуги контакту  $r \lambda$ , де  $\lambda$  - кут контакту. Одержимо:

$$M (d^2 l / dt^2) l = 2 f_1 P r \sin \lambda - P_c S_1 \ln \xi \, l + (T_1 - T_0 / \xi) l. \quad (3)$$

Диференціальне рівняння (3) описує динаміку руху стрічки у інерціальній (нерухомій) системі координат при зчіпленні з валком. Ковзання стрічки відносно валка слід розглядати у неінерціальній (рухомій) системі координат. Для складання рівняння ковзання у виразі (3) зробимо зміну:

$$d^2 l / dt^2 = -(d^2 l_{\Delta} / dt^2) \quad (4); \quad dl / dt = V - (dl_{\Delta} / dt) \quad (5); \quad l = V t - l_{\Delta} = l^* - l_{\Delta} \quad (6),$$

де  $d^2 l_{\Delta} / dt^2$ ,  $dl_{\Delta} / dt$ ,  $l_{\Delta}$  - прискорення, лінійна швидкість та шлях відносного ковзання листа та валка,  $l^*$  - шлях мета у під час сумісного руху з валком. При застосуванні зміни та переході у відносну систему координат, зникає потреба підбирати характеристики тертя ковзання під час

зміни відносної швидкості руху. Після підстановки (4), (6) ліва частина рівняння (3) буде уявляти собою зміну кінетичної енергії розкату під час ковзання відносно валків:

$$\Delta W = -M(d^2 l_{\Delta}/dt^2)(l^* - l_{\Delta}).$$

Цю зміну  $\Delta W$  можна уявити у вигляді двох доданків  $W_1$  та  $W_2$ .

Перший доданок  $W_1 = -M(d^2 l_{\Delta}/dt^2) l^*$  характеризує частину енергії, яка іде на подолання сил інерції на шляху  $l^*$ . Другий доданок  $W_2 = M(d^2 l_{\Delta}/dt^2) l_{\Delta}$  характеризує частину кінетичної енергії, яка іде на роботу  $A_{w2}$  тертя ковзання між металом та валками. Ця енергія передасться до валків не повністю, а з коефіцієнтом фрикційної взаємодії, тобто  $A_{w2} = f_2 W_2$ . Уявимо цю додаткову роботу тертя таким чином:

$$A_{w2} = f_2 W_2 = f_2 M l (d^2 l_{\Delta}/dt^2) = f_2 M l (du/dt) = f_2 M u dt (du/dt) = f_2 M u du. \quad (7)$$

Ураховуючи, що при ковзанні діє вираз (5), лінійна швидкість розкату буде  $u = dl/dt = V - (dl_{\Delta}/dt)$ , одержимо такий вираз для роботи тертя ковзання:

$$A_{w2} = f_2 M (V - dl_{\Delta}/dt) (dl_{\Delta}/dt). \quad (8)$$

Підставляючи  $W_1$  та роботу тертя  $A_{w2}$  у ліву частину виразу (5), а шлях під час ковзання  $l_{\Delta}$  - у праву частину, одержимо:

$$-M(d^2 l_{\Delta}/dt^2) l^* - f_2 M(V - dl_{\Delta}/dt)(dl_{\Delta}/dt) = 2 f_2 P r \sin \alpha - P_c S_1 \ln \xi (l^* - l_{\Delta}) + (T_1 - T_0/\xi)(l^* - l_{\Delta}) \quad (9)$$

Після перетворювання одержимо диференціальне рівняння системи у рухомій системі координат:

$$d^2 l_{\Delta}/dt^2 - (dl_{\Delta}/dt) f_2 V/l^* + l_{\Delta} (P_c S_1 \ln \xi - T_1 + T_0/\xi) / (M l^*) = (P_c S_1 \ln \xi - T_1 + T_0/\xi) / M - 2 f_2 P r \sin \alpha / M l^* - f_2 (dl_{\Delta}/dt)^2 / V \quad (10)$$

Одержані рівняння (3), (10) описують динаміку нерівномірного поступового руху розкату при прокатці в окремій клітці. Під час руху у системі діє внутрішній додаточний нелінійний (квадратичний) гнучкий обернений зв'язок по швидкості ковзання металу відносно валків (доданок  $f_2 (dl_{\Delta}/dt)^2 / V$  у правій частині рівняння (10)). Наявність оберненого зв'язку викликає нерівномірність руху при прокатці, періодичний перехід системи від зчеплення

метала з валками до їх відносного ковзання. Диференційне рівняння (3) описує рух при зчіпленні, а рівняння (10) - при ковзанні.

Для аналізу зміни швидкості приводу та валків під час коливань навантаження та упрругих коливань приводного валу прокатна клітина та привод уявляються двоохмасовою системою. Рівняння руху приводу мають вигляд:

$$U_{\Gamma} = C_e d\varphi_1/dt + R I_{\text{я}} + L (dI_{\text{я}} / dt); \quad (11)$$

$$d\varphi_1^2 / dt^2 = (C_M I_{\text{я}} (\eta z) - C_{12} (\varphi_1/z - \varphi_2)) / (J_1 + J_2) \quad (12)$$

$$d\varphi_2^2 / dt^2 = (C_{12} (\varphi_1/z - \varphi_2) + C_{23} (\varphi_3/z - \varphi_2) - M_c) / J_2 \quad (13)$$

$$d\varphi_3^2 / dt^2 = (C_M I_{\text{я}} (\eta z) - C_{23} (\varphi_3/z - \varphi_2)) / (J_3 + J_2) \quad (14)$$

де  $J_1, J_2, J_3, J_z$  - приведені моменти інерції одного приводу, робочого валку, іншого приводу та редуктору ( $\text{кг м}^2$ );  $C_{12} (\varphi_1/z - \varphi_2), C_{23} (\varphi_3/z - \varphi_2)$  - моменти пружних сил (Н м);  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  - кути повороту якорю одного приводу, валка та іншого приводу (рад);  $C_{12}, C_{23}$  - жорсткість приводних валів (Н м /рад);  $U_{\Gamma}$  - напруга генератора (В);  $C_e, C_M$  - постійні двигунів приводів;  $I_{\text{я}}$  - струм якоря (А);  $R, L$  - опір та індуктивність якірного ланцюга (Ом, Гн);  $M_c = M_{\text{пр}} + M_{\text{тр}}$  - момент навантаження на валу приводу (Н м);  $M_{\text{пр}} = 2 \text{ г } f_{1,2} P \sin \alpha + (T_0 \xi - T_1) r$  - момент прокатки (Н м);  $M_{\text{тр}}$  - момент тертя у опорах валків (Н м);  $\eta$  - ККД редуктору;  $z$  - передаточне число редуктору.

Для аналізу вертикальних коливань у клітині валкова система уявляється одномасовою схемою. Ураховується не тільки демпфіруючі властивості деталей клітини, але і прокатуемого металу. Рівняння зміни зазору валків від заданого обтиснення під час пружних коливань клітини мають вигляд:

$$d^2(\Delta X) / dt^2 + 2k\beta d(\Delta X) / dt + \beta^2 \Delta X = \Delta P / M_{\text{кл}} \quad (15)$$

де  $\Delta X$  - зміна зазору валків (обтиснення) на виході клітини (м);  $k$  - коефіцієнт демпфування клітини ( $0 < k < 1$ );  $\beta^2 = (C_{\text{кл}} + C_{\text{п}}) / M_{\text{кл}}$  - особиста частота пружних коливань клітини ( $\text{рад}^2 / \text{с}^2$ );  $M_{\text{кл}}$  - приведена маса клітини (кг);  $\Delta P$  - зміна зусилля прокатки у клітині завдяки зміні режиму прокатки (Н);  $C_{\text{кл}}, C_{\text{п}}$  - жорсткість клітини та стрічки (Н м).

Зміна повного зусилля між клітинами описується рівнянням:

$$dT_{12} / dt = E S_1^1 (u_2 / \xi_2^* - u_1) / L_{12} \quad (16)$$

де  $E$  - модуль пружності стрічки;  $S_1^1$  - переріз на виході попередньої клітини;  $\xi$  - витяжка у наступної клітини при свободній прокатці;  $u_1, u_2$  - швидкість металу на виході суміжних клітин;  $L_{12}$  - міжклітинна відстань.

Повна система рівнянь моделі у формі Коші має вигляд:

$$dl / dt = a_1; \quad (17)$$

$$da_1 / dt = (2 f_1 P r \sin \lambda) / (M D) - (P_c S_1 \ln \xi - T_1 + T_0 / \xi) / M; \quad (18)$$

$$dl_{\Delta} / dt = a_2; \quad (19)$$

$$da_2 / dt = f_2 V a_2 / l^* + (P_c S_1 \ln \xi - T_1 + T_0 / \xi) (1 - l_{\Delta} / l^*) - f_2 a_2^2 / l^* - (2 f_2 P r \sin \lambda) / (M l^*); \quad (20)$$

$$dI_{\text{я}} / dt = (U_{\Gamma} - C_e n - R_{\text{я}} I_{\text{я}}) / L_{\text{я}}; \quad (21)$$

$$d\varphi_1 / dt = \Omega_1; \quad (22)$$

$$d\Omega_1 / dt^2 = (C_M I_{\text{я}} (\eta z) - C_{12} (\varphi_1 / z - \varphi_2)) / (J_1 + J_2) \quad (23)$$

$$d\varphi_2 / dt = \Omega_2; \quad (24)$$

$$d\Omega_2 / dt^2 = (C_{12} (\varphi_1 / z - \varphi_2) + C_{23} (\varphi_3 / z - \varphi_2) - M_c) / J_2 \quad (25)$$

$$d\varphi_3 / dt = \Omega_3; \quad (26)$$

$$d\Omega_3 / dt^2 = (C_M I_{\text{я}} (\eta z) - C_{23} (\varphi_3 / z - \varphi_2)) / (J_3 + J_2) \quad (27)$$

$$d\Delta X / dt = b \quad (28)$$

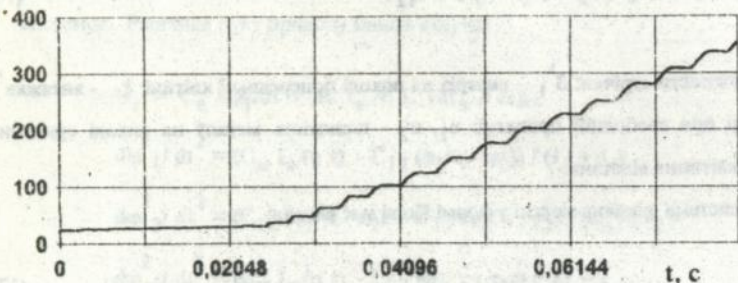
$$db / dt = \Delta P / M_{\text{ккл}} - 2 k \beta b - \beta^2 \Delta X \quad (29)$$

$$dT_{12} / dt = E S_1^1 (u_2 / \xi_2^* - u_1) / L_{12}. \quad (30)$$

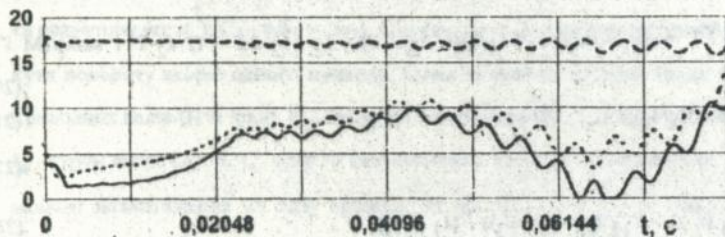
Система рівнянь моделі вирішувалась чисельно. Застосовувався метод Рунге-Кутта.

Описан програмний комплекс, реалізований у СКБ'Д CLIPPER 5.01 для ЦЕОМ типа IBM PC AT. Комплекс програм організований у вигляді системи моделювання та надає користувачеві такі можливості: ввід та коректировка параметрів моделі; моделювання динаміки прокатки; імітація зовнішніх впливів у стані; автоматизація планованого

Витяжка стрічки (мм)

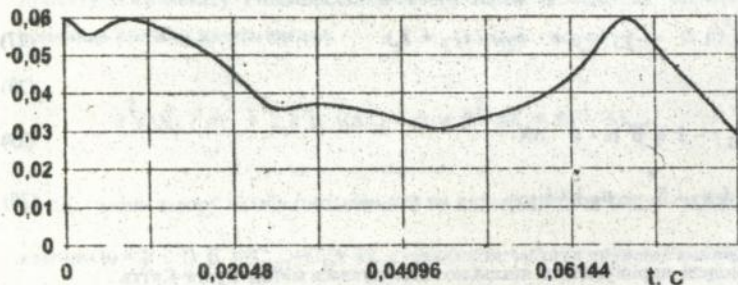


Натягнення та швидкість стрічки

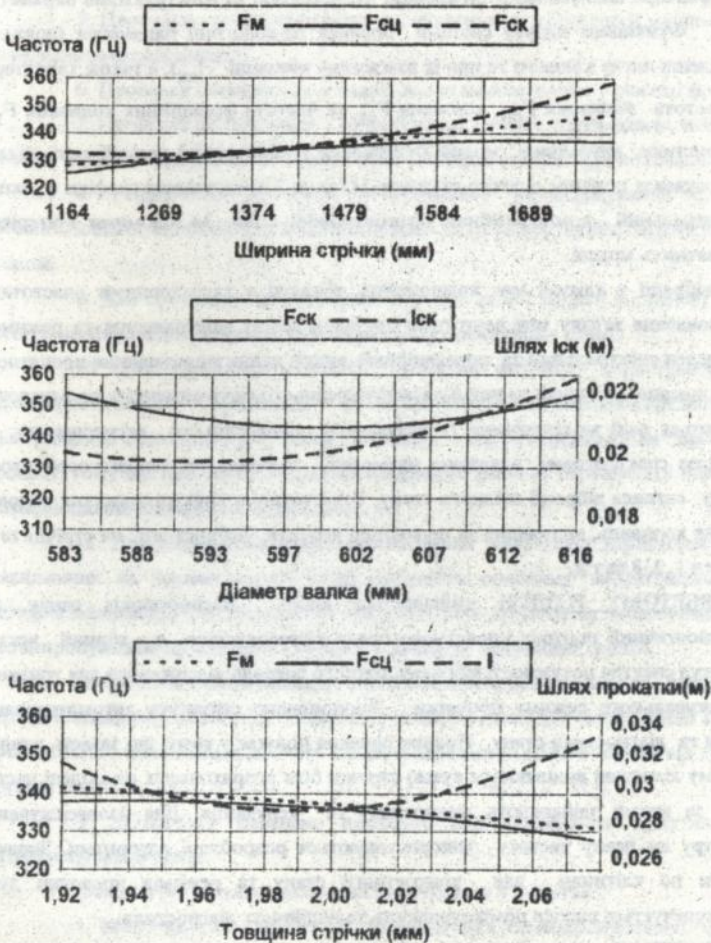


—  $T_0$  (тс)    ·····  $T_1$  (тс)    - - -  $V$  (м/с)

Зміна зазору валків (мм)



Мал. 1. Результати моделювання дресировочного стану 1700.



Мал. 2 Функції відгуку системи у планованому експерименті

експерименту на моделі; обробка даних планованого експерименту; спектральний та кореляційний аналіз даних моделювання; побудування графіків у процесі моделювання (зі змінним масштабом для кожної змієної); ведення бази даних моделі. За допомогою цих програмних засобів досліджені властивості моделі для різних наборів вхідних даних. На мал. 1 приведені графіки зміни параметрів прокатки при моделюванні фрикційних коливань на дресировочному стані 1700.

У ТРЕТЬОМУ РОЗДІЛІ розглянуті питання статистичної обробки даних моделювання. Для ідентифікації параметрів моделі застосовується метод планованого

експерименту. Як фактори планування були вибрані технологічні та конструктивні параметри прокатного стану. Функціями віддуку системи бралися технологічні параметри (довжина шляху  $l_{\text{сц}}$  при зчіпленні листа з валком та при їх взаємному ковзанні -  $l_{\text{ск}}$ ), а також характерні частоти моделі (частота зчіплення  $F_{\text{сц}}$ , ковзання  $F_{\text{ск}}$  та частота фрикційних коливань  $F_{\text{м}}$ ). Статичні характеристики динамічної моделі будувалися у припущенні нелінійності об'єкта дослідження, застосовувався поліном другого ступеню. На мал. 2 представлені графіки функцій. Застосовувався центральний композиційний ротатабельний план. За відомими критеріями перевірялася адекватність моделі.

Спектр вібрації у клітині має компоненти, збігаючи з характерними частотами моделі. Для встановлення зв'язку між частотним составом даних моделювання та режимом прокатки був проведений спектральний та кореляційний аналіз даних моделювання прокатного стану 1700. Далі описана методика та результати попереднього експерименту у промислових умовах. Порівнюються дані моделювання та результати попереднього експерименту. З достатньою точністю спектрограма, одержана на моделі, відбиває усі основні особливості частотного складу сигналу вібрації дійсного стану. У частотному спектрі присутня основна частота фрикційних коливань, відповідна за періодичні дефекти "ребристості" на стрічці та її гармоніки кратності 1, 2, 3 та т.д.

У ЧЕТВЕРТОМУ РОЗДІЛІ здійснюється вибір діагностичних ознак. Як узагальнений діагностичний портрет прокатного стану застосовується  $n$ -мірний вектор відрахунків амплитуд спектра потужності віброакустичного сигналу, одержаного для тривогого оборотно-навантажувального режиму прокатки. Пропоновано структуру автоматизованої системи керування та діагностики стану. Новина рішення полягає у тому, що замість аналізу спектру у широкому діапазоні виділяються вузькі стрічки біля розрахованих на моделі частот  $\omega_0$  їх гармонік, за якими здійснюють діагностику та керування. Для налагоджування стрічкового фільтру на певну частоту використовуються розроблені алгоритми. Завдяки тому, що частоти по клітинам для конкретного стану та режимів прокатки дуже індивідуальні, забезпечується висока поміхотривкість та надійність діагностики.

У ВИСНОВКАХ дисертаційної роботи сформульовані основні результати проведених досліджень.

1. Розроблена модель (моделі) динаміки багатоклітинних прокатних станів у вигляді відкритих механічних систем з переданням енергії від валків до прокатуємої стрічки.
2. Пр складанні рівнянь динаміки замість рівнянь Лагранжу 2-го роду використано закон збереження кінетичної енергії системи у диференціальній формі, який не накладає ніяких обмежень на характер руху системи.
3. Побудована модель (моделі) описує коливальні явища в електромеханічній системі стану та дозволяє визначати як миттєві, так і зосереджені на кінцевому інтервалі часу значення параметрів процесу, залежність динамічних параметрів прокатки та поведінку приводу у сталому та перехідному режимах.

4. Розроблені алгоритми та програмні засоби машинної реалізації моделі.
5. Проведено автоматизоване дослідження властивостей машинної моделі методом планованого експерименту.
6. Проведен спектральний аналіз даних моделювання у режимі фрикційних коливань.
7. Проведен експеримент у промислових умовах, підтверджуючий наявність у спектрі сигналу вібрації компонентів, відповідних частотам фрикційних коливань на моделі.
8. Розроблено алгоритм попереднього налагоджування стану та структура автоматизованої системи для поточної діагностики та керування багатоклітинним прокатним станом.
9. Для ефективного застосування розробленої моделі (моделей) потрібні додаткові експериментальні дослідження на конкретному прокатному стані.
10. Для керування режимом прокатки потрібно користуватися статистичними характеристиками коливальних процесів (авто- та взаємнокореляційними функціями, спектральною щільністю) у суміжних клітинах, а не зосередженими значеннями параметрів процесу, тому що при застосуванні зосереджених значень втрачається інформація про фазові співвідношення під час взаємодії клітин.
11. Для порівняння даних моделювання (статичних характеристик) та результатів дослідження на промисловому стані доцільніше програму випробувань організувати за методом планованого експерименту. Це зменшить витрати на моделювання (машинний час), час випробувань на стані та зодіппить певність одержаних оцінок.
12. Пропонований підхід до моделювання прокатки, модель, алгоритми та програмні засоби її машинної реалізації можуть бути застосовані для інших типів прокатних станів та промислового обладнання, діючого завдяки передавню енергії третям від джерела до робочого органу.

У ДОДАТКУ наведено висновок про можливість практичного застосування результатів досліджень.

Основні результати дисертації надруковані у роботах:

1. Марюта А.Н., Крот П.В. Диагностика технологического процесса прокатки / Диагностика технологических процессов в машиностроении: Материалы семинара. Москва. 1990 г. - М.: МДНТП, 1990. - с. 123-126.
2. Марюта А.Н., Крот П.В. Комплексное решение задачи моделирования и диагностики процессов прокатки / Автоматизация и диагностика технологических процессов: Тезисы докладов Республиканской н.-т. конференции 18-20 окт. 1990 г. - Луцк. 1990. - с. 36-37.
3. Марюта А.Н., Крот П.В. Математическое моделирование процессов прокатки / Нелинейные колебания механических систем: Тезисы докладов Второй Всесоюзной конф. - Горький. - 1990. - с.13-15.

4. Марюта А.Н., Крот П.В. Математическое моделирование фрикционного взаимодействия в транспортных системах / Математическое моделирование в машиностроении: Тезисы докладов Первой Всесоюзной школы-семинара. Куйбышев. - 1990. - с. 31-32.

5. Марюта А.Н., Крот П.В. Особенности моделирования и управления объектами, осуществляющими передачу механической энергии трением. - / В кн.: Методы и программные средства оптимизации, моделирования и создания вычислительных систем. - Киев.: Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова АН Украины, 1990.-с. 72-74.

6. Марюта А.Н., Крот П.В. Моделирование холодной прокатки для задач оптимизации управления. - / В кн.: Моделирование и оптимизация. - Киев.:Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова АН Украины. - 1991. - с. 64-66.

7. Марюта А.Н., Крот П.В. Диссипация энергии при фрикционных колебаниях в прокатных станах / XVI Конференция по вопросам рассеяния энергии при колебаниях механических систем: Тезисы докладов. - Киев: Институт проблем прочности АН Украины, 1992. - с. 24.

8. Марюта А.Н., Крот П.В. Идентификация и моделирование процесса передачи энергии трением при холодной прокатке // Трение и изнашивание. Респ. н.-т. сборник. - Киев.:Изд-во КГИПП. - 1992.- вып. 42. - с. 11-17.

9. Марюта А.Н., Крот П.В. Моделирование и оптимизация скоростных режимов при многоклетевой прокатке // Математическое моделирование задач прочности и оптимальное проектирование конструкций: Сб. научных тр. / АН Украины. Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова, Научный совет АН Украины по проблеме "Кибернетика". - Киев. - 1993. - с.70-73.

У надрукованих роботах використано відомий підхід до описання систем з тертям. Особисто автором у роботах [1-5,9] розроблено модель багатоклітинного стану. У роботі [6] урахована модель електроприводу, у роботах [7,8] проведено планований експеримент на моделі, розроблено програмні засоби моделювання, проведено статистичний та спектральний аналіз даних, запропоновано алгоритми керування станом.

Krot P.V. Mathematic simulation of the energy transferring process from sources to rotating tools by the friction (for example the rolling mills). Candidate thesis of the technical sciences on a speciality 05.13.02 - "Mathematical simulation in the scientific research" Institute of the energetic simulation problems, Ukraine National Academy of Science, Kyiv, 1996.

Thesis manuscript is defending. It contains theoretical research of the vibration phenomenon in the rolling mills. Also it contains results of the cold rolling mill experimental research. It confirmed that periodic marks on the strip surface appears due to friction vibration generated in the strip and rolls contacting zone. Nonlinear differential model and software for

automated model research are designed. Algorithms for multistand mill control and diagnostics are quoted. It allows to avoid periodic marks on the strip surface.

Крот П.В. Математическое моделирование процесса передачи энергии трением от источников к рабочим органам (на примере прокатных станов). Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.02 - "Математическое моделирование в научных исследованиях". Институт проблем моделирования в энергетике НАН Украины, Киев, 1996.

Защищается рукопись диссертации, которая содержит теоретические исследования колебательных процессов в прокатных станах, а также результаты экспериментальных исследований вибрации на стане холодной прокатки. Установлено, что периодические дефекты поверхности полосы являются результатом фрикционных колебаний, возникающих в зоне контакта полосы с валками. Разработана нелинейная дифференциальная модель прокатки и программные средства для автоматизированного исследования на модели. Приведены алгоритмы управления многоклетевым станом, которые дают возможность устранить дефекты на поверхности полосы.

Ключові слова: фрикційні коливання, прокатний стан, нелінійна модель, періодичні дефекти стрічки, вібрація клітини.

*П. Крот*

ЛНБ ім. В. Стефанива  
АН України

мил. ДГУ 2 ак 372-50

44422

AB 34.163

**AB 34.163**