

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ОСТРОВЕРХОВ МИКОЛА ЯКОВИЧ



УДК 621.771.23

**ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ БЕЗКОНТАКТНИХ
ВИКОНАВЧИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
ПАРАМЕТРАМИ ШТАБИ В ХОДІ НЕПЕРЕРВНОЇ ПРОКАТКИ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора
технічних наук

Харків - 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації електромеханічних систем та електроприводу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Попович Микола Гаврилович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», професор
кафедри автоматизації електромеханічних систем та
електроприводу

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кузнецов Борис Іванович,
Науково-технічний центр магнетизму технічних
об'єктів Національної академії наук України,
завідувач відділу проблем управління магнітним
полем

доктор технічних наук, професор
Садовой Олександр Валентинович,
Дніпродзержинський державний технічний
університет, проректор з наукової роботи

доктор технічних наук, професор
Чорний Олексій Петрович,
Кременчуцький національний університет імені
Михайла Остроградського, директор Інституту
електромеханіки, енергозбереження і систем
управління

Захист відбудеться «17» 01 2013 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.04 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул.Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «14» 12 2012 р.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради



О.В.Осичев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Електротехнічний комплекс неперервного штабoproкатного стану, складовими якого є електромеханічні системи автоматичного керування параметрами штаби, забезпечує відповідність геометричних показників прокату вимогам технологічного процесу та чинним стандартам. Вимоги до якості листового прокату за критеріями форми та профілю постійно посилюються у зв'язку з підвищенням вимог до якості виробів з нього та наполегливим прагненням споживачів листової продукції знижувати товщину та збільшувати ширину застосовуваного у виробках листа, а в таких умовах штаба стає більш чутливою до збурень у прокатній кліті, що призводить до збільшення обсягу дефектного прокату. Вказане обумовило, починаючи з 80-х років ХХ століття, розвиток прокатних станів IV, а в теперішній час V покоління, технологічна схема, конструкція основних елементів та системи керування яких в першу чергу направлені на вирішення питань підвищення якості форми й профілю прокату. Для керування формою та профілем штаби застосовуються різні види систем автоматичного керування вигином, осьовим зміщенням, перехрещенням та зміною профілю валків кліті. Таке використання валків, які об'єднують в собі виконання декількох технологічних операцій (керування товщиною, профілем, формою тощо), суттєво ускладнює конструкцію кліті, вдвоє-троє зменшує термін служби валків, призводить до їх інтенсивного зносу, як головного робочого інструменту технологічного процесу прокатки.

Зважаючи на це, актуальним є вирішення на основі електротехнічних безконтактних виконавчих пристроїв біжучого електромагнітного поля науково-прикладної проблеми підвищення якості форми та профілю штабового прокату шляхом немеханічної електродинамічної дії безпосередньо на штабу в ході прокатки. Таке винесення виконавчих пристроїв систем керування параметрами штаби за межі кліті та їх конструктивне виконання у вигляді безконтактних електроіндукційних елементів біжучого магнітного поля, що не зношуються, відкриває перспективу подальшого підвищення якості штаби, дає можливість впровадити системи на діючих прокатних станах попередніх поколінь.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі автоматизації електромеханічних систем та електроприводу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» в рамках Державної науково-технічної програми «Екологічно чиста енергетика та ресурсозберігаючі технології» в ході виконання держбюджетних науково-дослідних тем МОНмолодьспорту України: «Принципи створення та дослідження оптимальних, енергозберігаючих електроприводів і електромеханічних систем автоматичного керування» (№ ДР 0198U001317); «Теоретичні основи енергозберігаючих електромеханічних систем автоматичного керування складними об'єктами з асинхронними електродвигунами обертового і лінійного руху» (№ ДР 0100U000590); «Основи теорії керування енергозберігаючими електромеханічними системами з електроприводами змінного струму на основі принципу пасивності» (№ ДР 0103U000145) та «Основи теорії високоефективних систем автоматичного керування складними технологічними об'єктами з векторно-керуваними електродвигунами» (№ ДР 0106U002145), в яких

здобувач був відповідальним виконавцем за напрям дослідження електромеханічних систем автоматичного керування з безконтактними виконавчими пристроями.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розвиток наукових основ електромеханічних систем на основі безконтактних виконавчих пристроїв біжучого електромагнітного поля для автоматичного керування параметрами штаби, що забезпечує підвищення якості форми та профілю листопрокатної продукції.

Для досягнення вказаної мети поставлені наступні задачі:

- Аналіз процесів в електротехнічному комплексі формоутворення штаби в ході неперервної прокатки та існуючих систем автоматичного керування формою та профілем штаби. Обґрунтування вирішення на основі безконтактних виконавчих пристроїв біжучого електромагнітного поля проблеми підвищення якості форми та профілю штабового прокату;
- Теоретичне обґрунтування на основі безконтактних виконавчих пристроїв біжучого електромагнітного поля методу керування параметрами штаби шляхом зміни по ширині штаби величини на напряму електродинамічних зусиль і відповідно розподілу механічних напружень;
- Узагальнення та дослідження математичних моделей електромеханічних процесів в електротехнічному комплексі з безконтактними виконавчими пристроями в ході формування параметрів штабового прокату;
- Розробка та дослідження на основі безконтактних виконавчих пристроїв законів керування параметрами штаби, які забезпечують задану якість форми і профілю в умовах пружно-деформованого взаємозв'язку між електромеханічними системами неперервного прокатного стану;
- Розробка та дослідження на основі безконтактних виконавчих пристроїв перспективних видів електромеханічних систем автоматичного керування параметрами штаби прокату.
- Проведення на прокатному стані випробувань та експериментальних досліджень методу на основі безконтактних виконавчих пристроїв для керування параметрами штаби прокату.

Об'єкт дослідження – електромеханічні процеси в електротехнічному комплексі формоутворення штаби на неперервних прокатних станах.

Предмет дослідження – електромеханічні системи на основі безконтактних виконавчих пристроїв біжучого електромагнітного поля для автоматичного керування параметрами штаби.

Методи дослідження. Розробка моделей безконтактних виконавчих пристроїв біжучого електромагнітного поля здійснювалася на основі фундаментальних положень теоретичних основ електротехніки, теорії електропривода та електричних машин. При розробці на основі безконтактних виконавчих пристроїв моделей процесів формування розподілу механічних напружень по ширині штаби, її форми та профілю використовувалися методи теорії автоматичного керування, теоретичної та прикладної механіки. Складання структурних схем систем автоматичного керування параметрами штаби прокату та законів керування регуляторів проводилося на основі методів теорії автоматичного керування та теорії електропривода. Дослідження процесів та систем здійснювалося шляхом

випробувань на прокатному стані, експериментів на дослідній установці та комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів:

- *Вперше* теоретично обґрунтовано застосування безконтактних виконавчих пристроїв біжучого електромагнітного поля для керування параметрами штаби шляхом зміни по її ширині величини та напряму електродинамічних зусиль і відповідно розподілу механічних напружень, що забезпечує підвищення якості форми та профілю листопрокатної продукції;
- *Вперше* отримано динамічні залежності між електродинамічними зусиллями безконтактних виконавчих пристроїв та процесами формування розподілу механічних напружень по ширині штаби, форми та профілю штаби у вигляді багатовимірного та нелінійного об'єкту, що дозволяє розробляти закони керування параметрами штаби в умовах пружно-деформованого взаємозв'язку між електромеханічними системами прокатного стану;
- *Отримали подальший розвиток* наукові основи перспективних електромеханічних систем на основі безконтактних виконавчих пристроїв біжучого електромагнітного поля для автоматичного керування параметрами штаби, що забезпечує підвищення якості керування з кількісними показниками кращими, ніж регламентують чинні стандарти;
- *Отримали подальший розвиток* теоретичні положення розробки законів керування взаємозв'язаних, багатовимірних та нелінійних об'єктів на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій, що дозволяє на відміну від традиційних методів отримати задану якість систем автоматичного керування параметрами штаби в умовах зміни сортаменту прокату та координатних збурень без перелаштування регуляторів і додаткових алгоритмів адаптації чи ідентифікації;
- *Вперше* запропоновано на основі безконтактних виконавчих пристроїв біжучого електромагнітного поля теоретичні засади електромеханічної системи автоматичного керування формою штаби з використанням інформації про розподіл механічних напружень та швидкостей металу по ширині штаби, що на відміну від систем на основі відомих критеріїв рівності механічних напружень та рівності швидкостей дає змогу підвищити точність керування.

Практичне значення одержаних результатів для прокатного виробництва металургійної галузі полягає у розробці перспективних електромеханічних систем на основі безконтактних виконавчих пристроїв біжучого електромагнітного поля для автоматичного керування параметрами штаби в ході неперервної прокатки, впровадження яких забезпечує підвищення якості форми та профілю прокату. Основними перевагами запропонованих систем є створення керуючої дії без механічного контакту за допомогою електромагнітного поля; пряма дія на штабу без проміжних елементів; можливість впровадження на діючих прокатних станах, бо конструкція кліті залишається без змін.

Отримали розвиток теоретичні основи законів керування нелінійними, багатовимірними та взаємозв'язаними системами автоматичного керування параметрами штаби, які забезпечують високу динамічну точність та слабку

чутливість до зміни сортаменту прокату. Дослідження на прикладі стану 2000 гарячої прокатки штаби з алюмінієвих сплавів показали, що допустимі стандартами порушення форми штаби у вигляді хвиль амплітудою біля 25 мм, система керування на основі критерію рівності механічних напружень зменшує до 0,18..0,13 мм, на основі критерію рівності швидкостей – до 0,018..0,014 мм, а на основі інформації про розподіл механічних напружень та швидкостей металу – до 0,01 мм. Система керування профілем штаби зменшує поперечну різнотовщинність з 6,2 % до нуля при максимальній різнотовщинності під час перехідного процесу біля 0,1 %.

Створена система векторного керування електродинамічним зусиллям безконтактного виконавчого пристрою з опорним вектором головного потокозчеплення, що забезпечує астатичне керування з максимальною динамічною похибкою в межах 0,04..0,1 % в умовах зменшення та збільшення на порядок розрахункового значення електричного опору штаби.

Результати виконаних досліджень впроваджені в ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (м. Краматорськ), ДП НВК «Київський інститут автоматики» (м. Київ), ВАТ «Київпромелектропроект» (м. Київ), ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації та управління» (м. Київ), ТОВ НВО «Дніпрофмаш» (м. Дніпродзержинськ) та в навчальний процес кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу НТУУ «Київський політехнічний інститут». Технічна новизна результатів досліджень підтверджена 8 патентами України.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення та результати, що представлені в дисертації, отримані здобувачем особисто. Серед них: аналіз проблеми подальшого підвищення якості листопрокатної продукції та перспективи розвитку відповідних систем автоматичного керування; розвиток наукових основ електромеханічних систем на основі безконтактних виконавчих пристроїв біжучого електромагнітного поля для автоматичного керування параметрами штаби шляхом зміни розподілу механічних напружень по ширині штаби; розробка та дослідження на основі безконтактних виконавчих пристроїв математичних моделей електромеханічних процесів формування розподілу напружень по ширині штаби, форми і профілю штаби; розробка на основі безконтактних виконавчих пристроїв методів синтезу систем автоматичного керування формою та профілем штаби з використанням концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень похідних механічної та електромагнітної енергії; проведення узагальнень щодо впровадження перспективних систем на основі безконтактних виконавчих пристроїв для автоматичного керування формою та профілем штаби на прокатних станах.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи докладалися, обговорювалися і отримали схвальні відгуки на Міжнародних науково-технічних конференціях: «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» (м. Одеса, 2003 р., 2006 р., 2011 р.; смт. Миколаївка, 2007 р., 2008 р.; м. Алушта, 2009 р.; смт. Кипарисне, 2010 р.); «Проблеми створення нових машин і технологій» (м. Кременчук, 2001 р., 2003 р.); «Проблеми енерго-ресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (м. Кременчук, 2010 р., 2011 р.); «Керування режимами роботи об'єктів

електричних та електромеханічних систем» (м. Святогірськ, 2011 р.); «Оптимальне керування електроустановками» (м. Вінниця, 2011 р.); «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики» (м. Київ, 2008-2010 рр.); «Международная конференция по электромеханике и электротехнологии» (м. Суздаль, 1994 р.); науково-технічній конференції «Проблеми автоматизації металургії України» (м. Київ, 1995 р.); науково-практичній конференції «Комп'ютерні системи в автоматизації виробничих процесів» (м. Хмельницьк, 2007 р.) та на наукових семінарах Національної академії наук України «Теорія та практика складних багатовимірних електромеханічних систем», що діють при кафедрі автоматизації електромеханічних систем та електроприводу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» (м. Київ, 1999-2011 рр.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено в 38 наукових працях, з них 8 деклараційних патентів України.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновку, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 434 сторінки, з них 155 рисунків по тексту та 57 рисунків на 31 сторінці; 4 таблиці по тексту та 1 таблиця на 1 сторінці; списку використаних джерел з 198 найменувань на 25 сторінках, 6 додатків на 106 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність та доцільність розв'язання проблеми, висвітлено зв'язок з науковими програмами та темами, сформульовано мету досліджень, подано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі проведено аналіз процесів в електротехнічному комплексі формоутворення штаби в ході неперервної прокатки та існуючих систем керування формою та профілем штаби. Обґрунтовано вирішення на основі безконтактних виконавчих пристроїв біжучого електромагнітного поля проблеми підвищення якості форми та профілю штабового прокату.

Аналіз процесів в електротехнічному комплексі формоутворення штаби показав, що керування параметрами штаби може бути здійснено шляхом зміни розподілу механічних напружень по ширині штаби при вході її у валки кліті чи при виході з них. Для зміни розподілу механічних напружень в ході неперервної прокатки перспективним є використання безконтактних виконавчих пристроїв (БВП), що дає можливість створювати керуючі електродинамічні зусилля без механічного контакту зі штабою за допомогою біжучого електромагнітного поля. Це дозволило обґрунтувати вирішення проблеми підвищення якості штаби на основі застосування БВП.

Визначення параметрів БВП, що працюють за принципом подібним роботі індукторів лінійних асинхронних двигунів, виконується з урахуванням вимог конкретного прокатного стану. Для попередньої оцінки габаритів та основних характеристик БВП потрібно мати мінімальну кількість вихідних даних. Необхідна величина електродинамічного зусилля одного БВП $F = \delta\sigma hb/2N$ визначається нерівномірністю механічних напружень по ширині штаби $\delta\sigma$ конкретного прокатного стану (в середньому нерівномірність напружень штаби зі сталі складає 2,5..30 МПа, а із алюмінієвих сплавів 0,5..8 МПа), кількістю пристроїв N , товщиною

h та шириною b штаби. Значення площі активної поверхні БВП становить $S_{акт} = F/F_y k_F$, де $k_F = 0,5..0,95$ – коефіцієнт впливу поздовжнього крайового ефекту внаслідок розімкнутості магнітопроводу в залежності від кількості пар магнітних полюсів. Питоме зусилля на одиницю активної поверхні індуктора становить $F_y = \pi \delta B^2 \varepsilon_0 s_H / 2 \mu_0 \tau$, де δ – немагнітний зазор; τ – полюсний крок; μ_0 – магнітна стала; s_H – номінальне ковзання. Електромагнітна добротність безконтактного виконавчого пристрою знаходиться за виразом $\varepsilon_0 = 2h \mu_0 \gamma f^2 / \pi \delta$, де γ – питома електропровідність металу штаби; f – частота напруги живлення. Квадрат індукції в немагнітному зазорі обчислюється за формулою $B_\delta^2 = (A_j) \mu_0^2 \tau^3 K_G / (1 + \varepsilon_0^2 s_i^2) \delta^2 q$, де q – число пазів на полюс і фази; A_j – фактор нагрівання; K_G – коефіцієнт геометричних параметрів індуктора. Полюсний крок вибирається, виходячи із швидкості штаби V та частоти f напруги живлення $\tau = V/2f(1 - s_H)$. Орієнтовна довжина БВП становить $L_{акт} = S_{акт}/b_1$, а кількість пар магнітних полюсів дорівнює $2p = L_{акт}/\tau$, де b_1 – ширина БВП. Механічна потужність БВП становить $P_{мех} = FV$. Електрична потужність БВП дорівнює $S_{ел} = P_{мех}/\eta \cos \varphi$, де $\eta = 0,55..0,75$; $\cos \varphi = 0,5..0,7$ – попередні значення ККД та коефіцієнта потужності. Величина електричного струму обмотки БВП становить $I = S_{ел} / (\sqrt{3} U_i)$, де $U_n = 380; 660; 1000$ В – ряд номінальних напруг живлення.

Наприкінці розділу сформульовано задачі наукових досліджень дисертаційної роботи для вирішення на основі електротехнічних безконтактних виконавчих пристроїв біжучого електромагнітного поля науково-прикладної проблеми підвищення якості форми та профілю штабового прокату.

У другому розділі теоретично обґрунтовано на основі безконтактних виконавчих пристроїв біжучого електромагнітного поля метод керування параметрами штаби шляхом зміни по ширині штаби величини на пряму електродинамічних зусиль і відповідно розподілу механічних напружень. Узагальнено та досліджено математичні моделі електромеханічних процесів в електротехнічному комплексі з безконтактними виконавчими пристроями в ході формування параметрів штабового прокату, як теоретичного підґрунтя перспективних видів електромеханічних систем керування параметрами штаби.

Метод керування на основі безконтактних виконавчих пристроїв пояснюється функціональною схемою системи автоматичного керування розподілом механічних напружень (рис. 1). Технічна новизна методу підтверджена патентами на спосіб та пристрій керування. Для ліквідації типових порушень форми та профілю штаби використовуються три безконтактні виконавчі пристрої БВП1..БВП3, які встановлюються у центрі та під кромками штаби вздовж її продовжної осі (паралельно осі прокатки), що дозволяє змінювати механічні напруження по середині та кромках штаби. Для більш глибокого керування розподілом напружень кількість БВП по ширині штаби збільшується. Живлення кожного БВП здійснюється від індивідуальних силових перетворювачів частоти ПЧ1..ПЧ3 з функцією рекуперації енергії гальмування, підключених до блоку керування БК, до якого надходять сигнали від датчика розподілу механічних напружень по ширині штаби ДРН, а також сигнал швидкості штаби від датчика швидкості ДШ. Сигнали датчика ДРН U_{n1} , U_{n2} , U_{n3} пропорційні пружним зусиллям у штабі F_1 , F_2 , F_3 на лівій кромці, у середній частині і на правій кромці, величини яких формують характер розподілу

механічних напружень (наприклад, крива 1 на рис. 1). У блоці керування БК розраховується сигнал, пропорційний середньоарифметичному значенню напруження U_{cpF} . Керування здійснюється саме на рівні цього середнього значення (пунктирна лінія 2, рис. 1). Цим забезпечується незмінність загального натягу штаби $F_{ш}$ та відсутність впливу на роботу інших систем регулювання параметрів штаби, наприклад, товщини, ширини, натягу, а також енергоефективність методу керування.

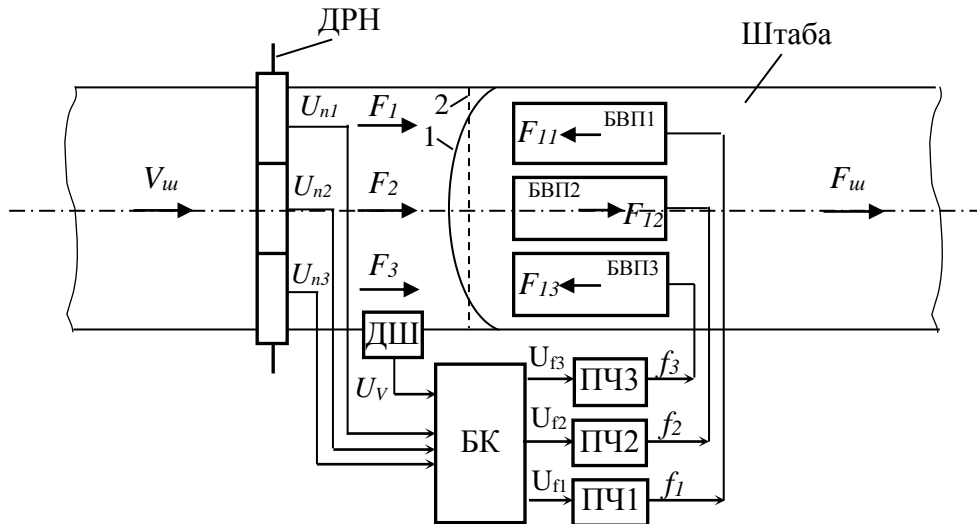


Рис. 1. Функціональна схема безконтактної системи автоматичного керування розподілом механічних напружень по ширині штаби

У блоці БК обчислюються відхилення напружень від середнього значення $\Delta U_1, \Delta U_2, \Delta U_3$ і в залежності від характеру розподілу напружень ці сигнали можуть відрізнятися за величиною, знаком та інтенсивністю. На основі отриманих сигналів та сигналу U_V про швидкість штаби $V_{ш}$ знаходяться сигнали завдання U_{f1}, U_{f2}, U_{f3} для відповідних перетворювачів частоти ПЧ1..ПЧ3. Завдяки цьому до БВП підводяться напруги живлення із частотами f_1, f_2, f_3 і магнітні поля БВП1..БВП3 рухаються із швидкостями $V_{01} = 2\tau_1 f_1; V_{02} = 2\tau_2 f_2; V_{03} = 2\tau_3 f_3$ (де τ_1, τ_2, τ_3 – полюсні кроки пристроїв). Для розглянутого випадку $V_{01} < V_{ш}, V_{02} > V_{ш}, V_{03} < V_{ш}$, тому БВП2 створює спрямоване за рухом штаби рушійне електродинамічне зусилля F_{12} , збільшуючи напруження у середній частині штаби, а БВП1 і БВП3 – продовжні гальмівні зусилля F_{11}, F_{13} , працюючи в генераторному режимі та зменшуючи напруження на кромках штаби до розрахованого середньоарифметичного значення. При відсутності нерівномірності напружень магнітні поля всіх БВП рухаються зі швидкістю штаби $V_{01} = V_{02} = V_{03} = V_{ш}$, забезпечуючи їх роботу в режимі холостого ходу.

У запропонованому методі керування механічні потужності, що витрачаються на збільшення напружень (у розглянутому випадку це потужність БВП2 $P_{12} = F_{12} \cdot V_{ш}$) дорівнюють механічним потужностям, що витрачаються на зменшення напружень (у розглянутому випадку це потужності БВП1 та БВП3 відповідно $P_{13} = F_{13} \cdot V_{ш}$ та $P_{11} = F_{11} \cdot V_{ш}$). В результаті система керування споживає з мережі активну електричну

потужність рівну тільки втратам перетворення $P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^k (P_{i1} / \eta_{i1}) - \sum_{j=k+1}^n (P_{1j} \cdot \eta_{1j})$, чим обумовлюється енергоефективність запропонованого методу (де η_{1i}, η_{1j} – сумарні

ККД систем БВП-ПЧ; k – кількість БВП, що працюють в рушійному режимі; $m=n-k$ – кількість БВП, що працюють в генераторному режимі; n – загальна кількість БВП).

Головні переваги запропонованого методу керування: створення у штабі керуючої дії без механічного контакту; відсутність зносу робочих органів систем керування; пряма дія на штабу; можливість впровадження на діючих прокатних станах без змін конструкції кліті; висока надійність, обумовлена простотою конструкції виконавчих пристроїв; збільшення тривалості роботи валків внаслідок відсутності вигину, зміщення та перехрещення, як в існуючих системах.

Складено математичну модель електромагнітних процесів в безконтактному виконавчому пристрої на основі схеми заміщення із зосередженими параметрами деталізованої до секції й стрижня електричної обмотки та до зубцевого поділу t_z магнітної системи. Розрахункова модель БВП містить три характерні зони: активну зону індуктора 1 та дві умовні зони магнітного шунтування на торцях 2 і 3, що обумовлені розімкнутістю магнітопроводу (рис. 2).

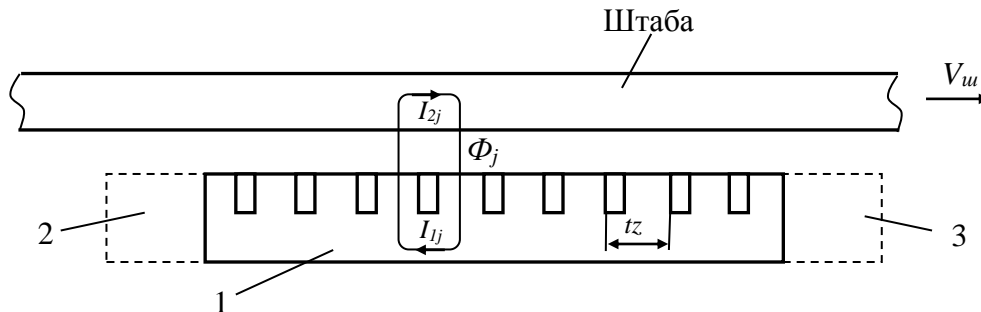


Рис. 2. Розрахункова схема БВП

Структурна схема однієї елементарної ділянки складається з 4-х динамічних ланок. Перша ланка являє собою модель елементарної електричної обмотки, входами якої є миттєві значення напруги джерела живлення U_j та магнітного потоку Φ_j , а виходом – миттєвий струм стрижня I_{1j} . Друга ланка описує елементарну магнітну систему, що створює миттєвий магнітний потік Φ_j . Третя ланка представляє собою модель умовної елементарної короткозамкнутої електричної обмотки, в якості якої виступає метал штаби. Елементарне миттєве значення струму у цій обмотці I_{2j} визначається миттєвими магнітними потоками, а також швидкістю штаби V_{uu} та струмами сусідніх ділянок штаби. Елементарне миттєве електродинамічне зусилля створюється четвертою ланкою. Моделі елементарних ділянок зон 2 та 3 мають аналогічну структуру, проте значення струму I_{1j} прирівнюються до нуля.

Проведене дослідження математичної моделі БВП підтвердило ефективність частотного керування електродинамічним зусиллям у штабі. Проте, при невеликому числі пар магнітних полюсів спостерігаються коливання зусилля на холостому ході внаслідок розімкнутості магнітопроводу. При збільшенні числа пар полюсів ці коливання зменшуються, тому БВП доцільно конструювати з великою кількістю пар полюсів та застосовувати відповідні замкнуті системи керування.

Досліджено також моделі БВП на основі схем заміщення із розподіленими параметрами в нерухомій та рухомій системі координат. Недоліком представлених математичних моделей є залежність їх параметрів в зонах магнітного шунтування від швидкості штаби, яка може змінюватися.

На основі рівняння Лагранжа 2-го роду складено математичну модель процесу формування на основі безконтактних виконавчих пристроїв розподілу механічних напружень по ширині штаби при приведенні параметрів до лінійної швидкості штаби, що представлена системою диференціальних рівнянь (1). Модель є нелінійною, багатовимірною та взаємозв'язаною.

$$\left\{ \begin{array}{ll}
 m_1 \frac{dV_1}{dt} = F_1 + F_{11}^y + F_{12}^y + F_{13}^y - F_{c1} - F_0; & F_{11}^{\acute{o}} = F_{11}^i + F_{11}^{\acute{a}}; \\
 m_2 \frac{dV_2}{dt} = F_2 - F_{21}^y - F_{22}^y - F_{23}^y - F_{c2}; & F_{12}^{\acute{o}} = F_{12}^i + F_{12}^{\acute{a}}; \\
 m_{11} \frac{dV_{11}}{dt} = F_{11} + F_{21}^y - F_{11}^y; & F_{13}^{\acute{o}} = F_{13}^i + F_{13}^{\acute{a}}; \\
 m_{12} \frac{dV_{12}}{dt} = F_{12} + F_{22}^y - F_{12}^y; & F_{21}^{\acute{o}} = F_{21}^i + F_{21}^{\acute{a}}; \\
 m_{13} \frac{dV_{13}}{dt} = F_{13} + F_{23}^y - F_{13}^y; & F_{22}^{\acute{o}} = F_{22}^i + F_{22}^{\acute{a}}; \\
 \frac{dF_{11}^i}{dt} = c_{11} [V_{11} - V_{\phi 1} (1 + \varepsilon_{11})]; & F_{23}^{\acute{o}} = F_{23}^i + F_{23}^{\acute{a}}; \\
 \frac{dF_{12}^i}{dt} = c_{12} [V_{12} - V_{\phi 2} (1 + \varepsilon_{12})]; & \varepsilon_{11} = \frac{F_{11}^y - F_{01}}{c_{11} x_1}; \\
 \frac{dF_{13}^i}{dt} = c_{13} [V_{13} - V_{\phi 3} (1 + \varepsilon_{13})]; & \varepsilon_{12} = \frac{F_{12}^y - F_{02}}{c_{12} x_1}; \\
 \frac{dF_{21}^i}{dt} = c_{21} [V_2 - V_{11} (1 + \varepsilon_{21})]; & \varepsilon_{13} = \frac{F_{13}^y - F_{03}}{c_{13} x_1}; \\
 \frac{dF_{22}^i}{dt} = c_{22} [V_2 - V_{12} (1 + \varepsilon_{22})]; & \varepsilon_{21} = \frac{F_{21}^y}{c_{21} x_2}; \\
 \frac{dF_{23}^i}{dt} = c_{23} [V_2 - V_{13} (1 + \varepsilon_{23})]; & \varepsilon_{22} = \frac{F_{22}^y}{c_{22} x_2}; \\
 F_{11}^{\acute{a}} = \mu_{11} [V_{11} - V_{\phi 1} (1 + \varepsilon_{11})]; & \varepsilon_{23} = \frac{F_{23}^y}{c_{23} x_2}; \\
 F_{12}^{\acute{a}} = \mu_{12} [V_{12} - V_{\phi 2} (1 + \varepsilon_{12})]; & V_{\phi 1} = V_1 (1 + s_{01}); \\
 F_{13}^{\acute{a}} = \mu_{13} [V_{13} - V_{\phi 3} (1 + \varepsilon_{13})]; & V_{\phi 2} = V_1 (1 + s_{02}); \\
 F_{21}^{\acute{a}} = \mu_{21} [V_2 - V_{11} (1 + \varepsilon_{21})]; & V_{\phi 3} = V_1 (1 + s_{03}); \\
 F_{22}^{\acute{a}} = \mu_{22} [V_2 - V_{12} (1 + \varepsilon_{22})]; & F_{23}^{\acute{a}} = \mu_{23} [V_2 - V_{13} (1 + \varepsilon_{23})];
 \end{array} \right. \quad (1)$$

Маса m_1 представляє рухомі частини електромеханічної системи валків прокатної кліти, які під дією зусилля двигуна F_1 рухаються із лінійною швидкістю V_1 . Цьому руху протидіє сила опору F_{c1} , обумовлена силами деформації металу й тертя, а також натяг штаби F_0 від попередньої кліти, що складається з натягу на правій кромці F_{01} , посередині F_{02} та на лівій кромці штаби F_{03} . Маса m_2 характеризує рухомі частини електромеханічної системи моталки, двигун якої створює зусилля F_2 , забезпечуючи рух із лінійною швидкістю V_2 при дії сили опору F_{c2} . Основні маси системи m_1 і m_2 з'єднані за допомогою пружно-в'язків зв'язків з трьома гілками ділянок штаби з масами m_{11} , m_{12} , m_{13} , при застосуванні трьох БВП. Складові F^y_{11} , F^y_{12} , F^y_{13} представляють собою пружно-в'язкі зусилля штаби на виході з валків на її кромках та в центрі, характер яких і визначає процес формування розподілу механічних напружень по ширині штаби. V_{11} , V_{12} , V_{13} – лінійні швидкості ділянок штаби на лівій кромці, в центрі і на правій кромці; F_{11} , F_{12} , F_{13} – керуючі зусилля, створювані електродинамічним способом БВП..БВПЗ; F^y_{21} , F^y_{22} , F^y_{23} – пружно-в'язкі зусилля по ширині штаби між БВП і моталкою; c_{11} , c_{12} , c_{13} та c_{21} , c_{22} , c_{23} та μ_{11} , μ_{12} , μ_{13} та μ_{21} , μ_{22} , μ_{23} , а також ε_{11} , ε_{12} , ε_{13} та ε_{21} , ε_{22} , ε_{23} – еквівалентні жорсткості і коефіцієнти внутрішнього в'язкого тертя, а також відносні подовження кожної з ділянок штаби між валками кліти та БВП, а також між БВП і моталкою відповідно; x_1 , x_2 – відстань між валками кліти та БВП, а також між БВП і моталкою відповідно; s_{01} , s_{02} , s_{03} та V_{u1} , V_{u2} , V_{u3} – випередження та лінійні швидкості металу по ширині штаби при відсутності натягу.

На прикладі стану 2000 гарячої прокатки штаб з алюмінієвих сплавів проведено дослідження математичної моделі процесу формування на основі безконтактних виконавчих пристроїв розподілу механічних напружень по ширині штаби (1) та методу його керування шляхом моделювання на ЕОМ. В процесі створення та керування розподілом механічних напружень по ширині штаби беруть участь декілька взаємозв'язаних систем: електропривод валків, електропривод моталки та запропонована безконтактна система. Тому моделювання режимів роботи всіх систем у часі здійснювалося поетапно: пуск валків вхолосту, початок прокатки, створення натягу штаби моталкою, дія симетричних чи несиметричних збурень напружень чи швидкостей металу, компенсація збурень електродинамічними зусиллями БВП.

На рис. 3 - рис. 5 зображено графіки перехідних процесів пружних зусиль штаби на лівій кромці, в центрі та на правій кромці штаби. На перших двох етапах процесу ($t \leq 4$ с) до створення натягу штаби моталкою ці зусилля дорівнюють нулю. На третьому етапі ($t > 4$ с) пружні зусилля мають однакові значення 12000 Н, що становить третину загального натягу, так як він розподіляється по ширині штаби рівномірно. Збурення в кінці четвертого етапу ($t \leq 10$ с) призводять до усталеної нерівномірності напружень у вигляді симетричної параболи. Пружні зусилля на кромках збільшуються на 96 Н, досягаючи значень 12096 Н. В середині штаби – зменшуються до значення 11808 Н. Для відновлення рівномірного розподілу напружень у відповідності до методу керування на п'ятому етапі ($t > 10$ с) починають діяти керуючі зусилля БВП. Як видно з графіків, пружні зусилля по ширині штаби повертаються до усталених значень 12000 Н, забезпечуючи рівномірний розподіл. На рис. 6 представлено графік перехідного процесу

загального натягу штаби, що створює моталка. Починаючи з третього етапу ($t > 4$ с), натяг залишається незмінним на рівні 36000 Н, що підтверджує ефективність запропонованого методу керування, який забезпечує тільки керування розподілом механічних напружень по ширині штаби не впливаючи на загальний натяг.

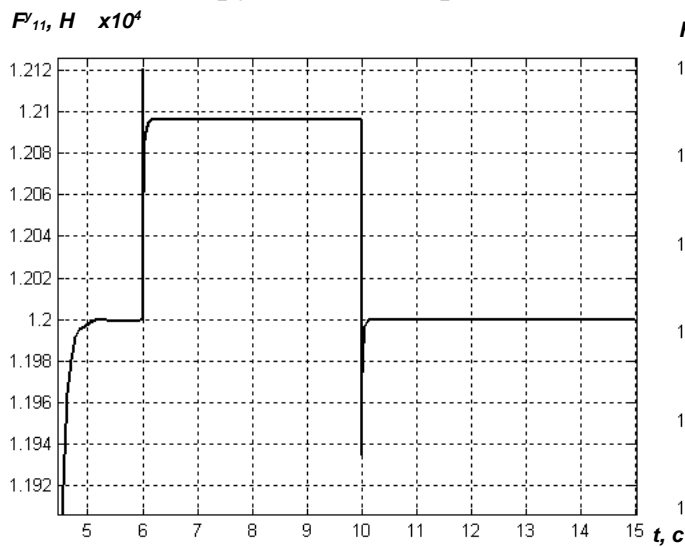


Рис. 3. Графік зусилля на лівій кромці штаби

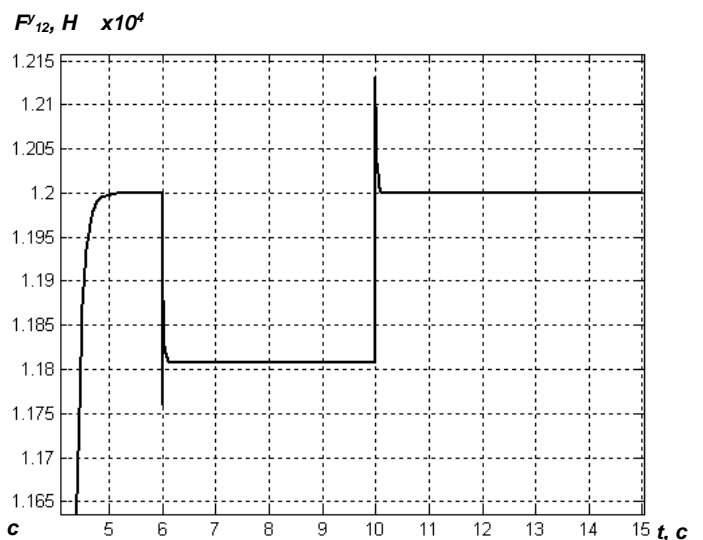


Рис. 4. Графік зусилля в середині штаби

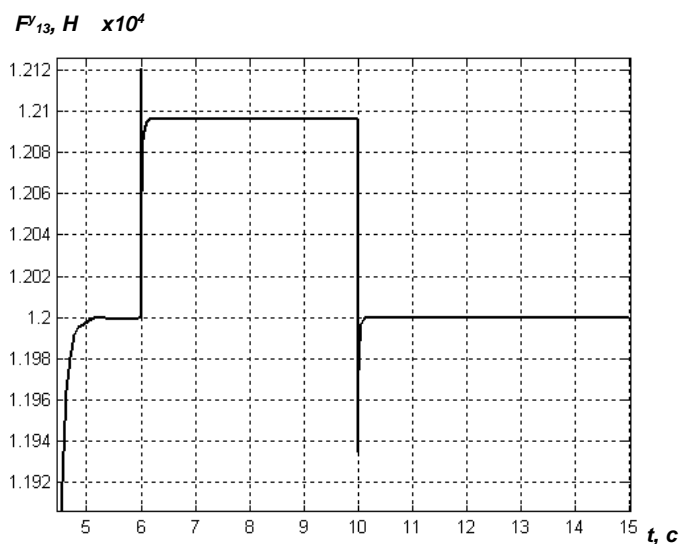


Рис. 5. Графік зусилля на правій кромці штаби

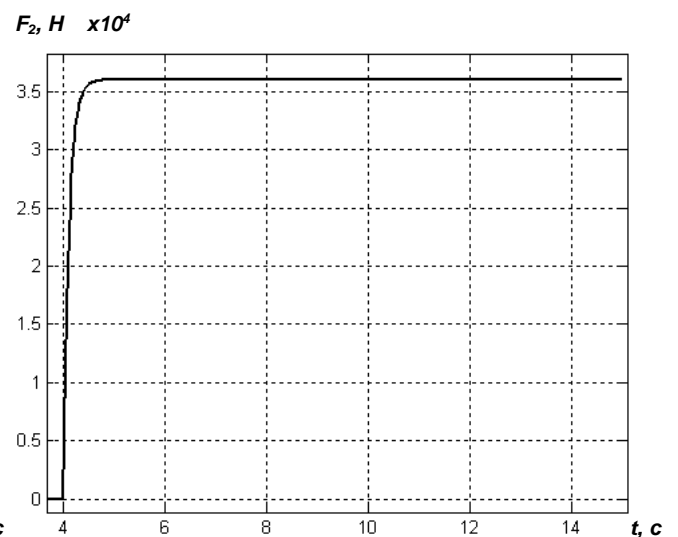


Рис. 6. Графік загального натягу штаби

Результати моделювання підтвердили відповідність математичної моделі основним положенням формоутворення штаби електротехнічним комплексом прокатного стану та ефективність запропонованого методу керування.

У третьому розділі розроблено та досліджено на основі безконтактних виконавчих пристроїв закони керування параметрами штаби, які забезпечують задану якість форми і профілю в умовах пружно-деформованого взаємозв'язку між електромеханічними системами неперервного прокатного стану.

Закони керування розроблено на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій. Як відомо, суттєвою перевагою цього методу є: динамічна декомпозицію взаємозв'язаної нелінійної системи на незалежні лінійні підсистеми; проведення синтезу законів керування координатами взаємозв'язаної нелінійної системи за

лінійними моделями локальних контурів керування; забезпечення слабкої чутливості до параметричних й координатних збурень об'єкту керування.

Відповідно до методу бажана якість керування замкнутого контуру задається за допомогою диференціального рівняння виду, де $m < n$

$$\frac{d^n z}{dt^n} + \dots + \alpha_1 \frac{dz}{dt} + \alpha_0 = \beta_m \frac{d^m x^*}{dt^m} + \dots + \beta_1 \frac{dx^*}{dt} + \beta_0. \quad (2)$$

Порядок n диференціального рівняння (2) дорівнює чи на одиницю вищий від порядку моделі об'єкту локального контуру керування. Структура та параметри рівняння задаються такими, щоб збурений рух був стійким. Коефіцієнти α_i та β_j визначають характер та тривалість перехідного процесу вихідної координати z при русі по заданій траєкторії x^* . Зв'язок між цими коефіцієнтами та показниками якості керування, такими як час регулювання, вид перехідного процесу, перерегулювання, встановлюється за допомогою відомих методів, наприклад, кореневих чи частотних з уточненням шляхом моделювання. Задавши коефіцієнти $\alpha_0 = \beta_0$, система матиме астатизм першого порядку $\nu = 1$, а при $\alpha_0 = \beta_0$ та $\alpha_1 = \beta_1$ – другого порядку $\nu = 2$ і т.д.

Ступінь наближення реального процесу керування до бажаного оцінюється функціоналом, що характеризує енергію прискорення при керуванні масою m

$$G(u) = \frac{m}{2} [\ddot{z}(t) - \ddot{x}(t, u)]^2. \quad (3)$$

Мінімізація функціонала здійснюється за градієнтним законом першого порядку (де λ – константа)

$$\frac{du(t)}{dt} = -\lambda \frac{dG(u)}{du}. \quad (4)$$

На основі цієї концепції з використанням енергії електромагнітного поля для об'єктів локальних контурів 1-го, 2-го та 3-го порядку в залежності від вигляду рівняння бажаної якості керування (2) розроблено 18 законів керування та відповідних регуляторів нетипової структури, частина яких представлена в табл. 1. Показано, що параметри регуляторів вміщують тільки коефіцієнти α_i та β_j бажаного закону керування та не залежать від параметрів об'єкту керування, що характерно для класичних законів керування. При допустимих з точки зору технічної реалізації коефіцієнтах підсилення регуляторів k існує динамічна похибка керування, максимально допустима величина якої встановлюється технічними вимогами. Важливо, що для побудови структури регулятора непотрібна детальна математична модель технологічного процесу в об'єкті керування. Розроблене сімейство регуляторів застосовується в дисертаційній роботі для керування координатами розроблених електромеханічних систем автоматичного керування.

Для отримання електродинамічного зусилля у штабі з високими показниками якості в умовах параметричних збурень внаслідок зміни сортаменту штаби, технологічних умов прокатки та розімкнутості магнітопроводу розроблено та досліджено систему прямого векторного керування з опорним вектором головного потокозчеплення БВП. Функціональна схема системи керування зусиллям БВП показана на рис. 7. Система керування містить датчик струму ДС, за допомогою якого вимірюються три змінні струми i_a , i_b , i_c у фазах обмотки БВП. Ці струми у перетворювачі фаз ПФ2 перераховуються в еквівалентні двофазні змінні струми

нерухомої відносно індуктора БВП системи координат (α, β) . Датчик головного потокозчеплення ДП реалізується на основі двох датчиків Холла. У вектор-фільтрі ВФ сигнали датчиків Холла ψ_{0a}, ψ_{0b} з трифазної системи перераховуються у еквівалентні сигнали двофазної нерухомої системи координат (α, β) та обчислюються модуль головного потокозчеплення і тригонометричні функції. Сигнал модуля головного потокозчеплення використовується як сигнал від'ємного зворотного зв'язку в замкнутому контурі керування з регулятором потокозчеплення РП. Входом регулятора є похибка між заданим потокозчепленням $|\psi_0|^*$ та його поточним значенням $|\psi_0|$. Виходом регулятора є сигнал складової напруги живлення U_{s1} , пропорційної головному потокозчепленню. Тригонометричні функції служать для переходу з нерухомої системи координат (α, β) до рухомої (1,2) і навпаки.

Таблиця 1

Приклади регуляторів нетипової структури

№ п/п	Порядок об'єкту керування	Рівняння бажаної якості керування: порядок п/м/в, вид	Структурна схема регулятора
1	3	3/1/2 $\ddot{z} + \alpha_2 \dot{z} + \alpha_1 \dot{z} + \alpha_0 z = \alpha_1 \dot{x}^* + \alpha_0 x^*$	
2	2	2/0/1 $\ddot{z} + \alpha_1 \dot{z} + \alpha_0 z = \alpha_0 x^*$	
3	1	2/1/2 $\dot{z} + \alpha_1 \dot{z} + \alpha_0 z = \alpha_1 \dot{x}^* + \alpha_0 x^*$	
4	1	2/0/1 $\dot{z} + \alpha_1 \dot{z} + \alpha_0 z = \alpha_0 x^*$	

В перетворювачі координат ПК2 здійснюється переведення струмів до рухомої системи. Складова струму I_{s2} визначає величину зусилля БВП при умові стабілізації головного потокозчеплення $|\psi_0| = \text{const}$. Задане значення струму обчислюється в задатчику струму ЗС на основі заданого зусилля F_{11}^* та поточного значення потокозчеплення. Виходом регулятора струму РС є сигнал складової напруги живлення БВП U_{s2} . У перетворювачі координат ПК1 здійснюється перевід керуючих напруг з рухомої системи координат (1,2) в нерухому. Далі ці напруги вже у формі сигналів змінного струму за допомогою перетворювача фаз ПФ1 перераховуються в еквівалентні трифазні напруги керування силовим перетворювачем частоти. Координатні перетворення здійснюються на основі відомих залежностей. Особливістю функціональної схеми є відсутність традиційних блоків компенсації координатних збурень, необхідність в яких відпала при застосуванні розглянутих законів керування.

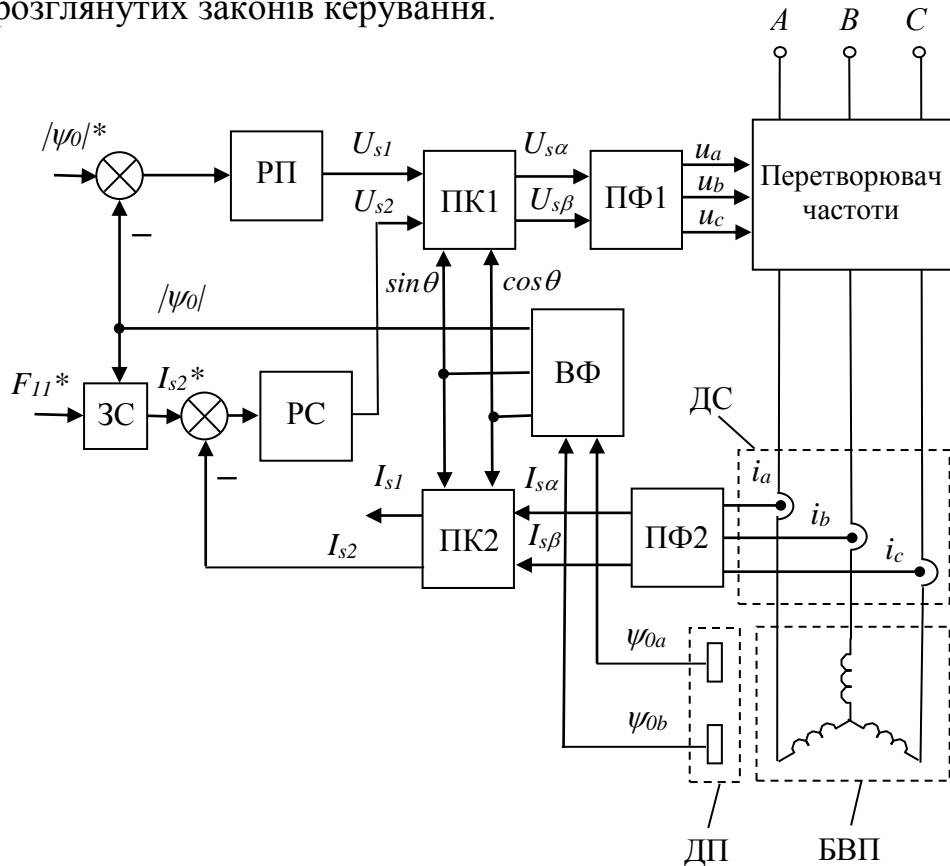


Рис. 7. Функціональна схема системи векторного керування зусиллям БВП

Бажане рівняння замкнутих контурів керування потокозчепленням та струмом виду (2) має тип $n=2$; $m=0$; $\nu=1$. Дослідження системи проведено шляхом моделювання на прикладі стану 2000 гарячої прокатки алюмінієвих сплавів. На рис. 8 показано графік перехідного процесу зусилля у штабі при виході на усталене значення 9000 Н за час біля 0,07 с. На рис. 9 представлено похибки керування зусиллям при дії параметричного збурення у вигляді зменшення та збільшення на порядок розрахункового значення електричного опору металу штаби $R_2=0,0022$; $0,022$; $0,22$ Ом. Система забезпечує астатичне керування зусиллям з максимальною динамічною похибкою в межах 0,04..0,1 % в умовах суттєвого параметричного збурення.

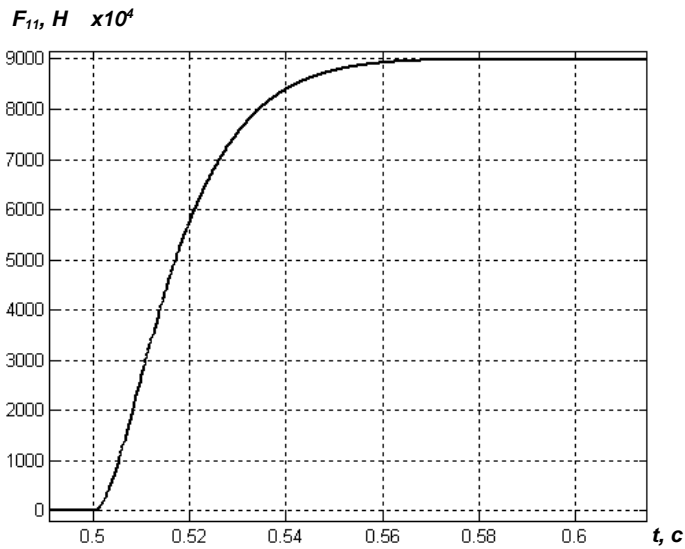


Рис. 8. Перехідний процес зусилля у штабі

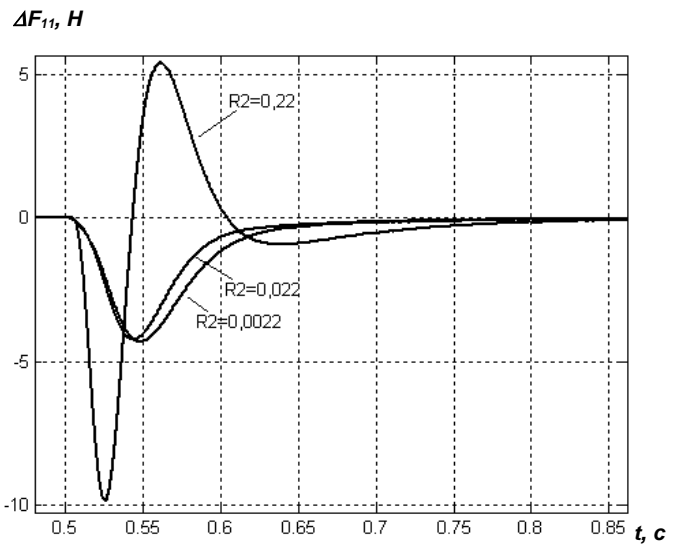


Рис. 9. Похибки керування зусиллям

Розроблено та досліджено закони керування розподілом механічних напружень по ширині штаби для реалізації методу електродинамічної дії на штабу. На рис. 10 представлено графіки пружних зусиль на лівій кромці при відпрацюванні регуляторами типу $n=2$; $m=1$; $\nu=2$ на 8 с процесу збурень розподілу напружень, а на 9 с збурень розподілу швидкостей металу на виході з валків при зменшенні та збільшенні вдвоє розрахункових значень мас та жорсткостей штаби. Регулятори забезпечують астатичне керування пружного зусилля, а зміна параметрів не призводить до погіршення якості керування (три графіки зливаються між собою). Завдяки енергоефективності методу керування система споживає з мережі активну електричну енергію необхідну тільки для покриття втрат. На рис. 11 показано графік механічної потужності, необхідної для відпрацювання збурень, усталене значення якої становить близько 42 кВт. Системі керування потрібно тільки 27 кВт активної електричної потужності при сумарному ККД перетворювача частоти та БВП 55 %.

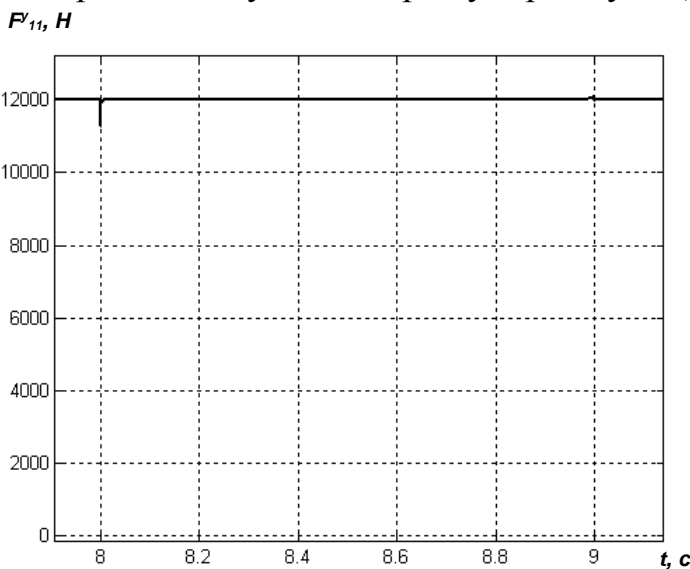


Рис. 10. Графіки пружних зусиль на лівій кромці при зміні параметрів моделі

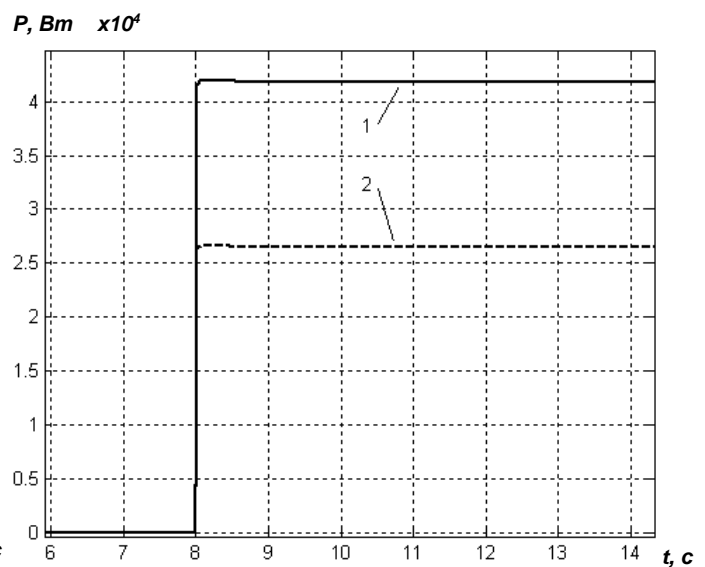


Рис. 11. Графіки потужностей: 1 – механічна; 2 – активна електрична

У четвертому розділі розроблено на основі безконтактних виконавчих пристроїв перспективні види електромеханічних систем автоматичного керування

параметрами штаби прокату. Дослідження систем здійснено шляхом моделювання на прикладі стану 2000 гарячої прокатки штаб з алюмінієвих сплавів.

Створено декілька варіантів електромеханічних систем автоматичного керування формою (САКФ) штаби прокату:

* Система автоматичного керування формою за критерієм рівності механічних напружень по ширині штаби реалізує відому умову, відповідно до якої штаба не має порушень форми, якщо різниця між поточним та середнім напруженням за модулем менша за критичне напруження стискання. Технічна новизна системи підтверджена двома патентами. На основі функціональної схеми системи та моделі (1) розроблено структурну схему САКФ, для випадку типових порушень форми (рис. 12).

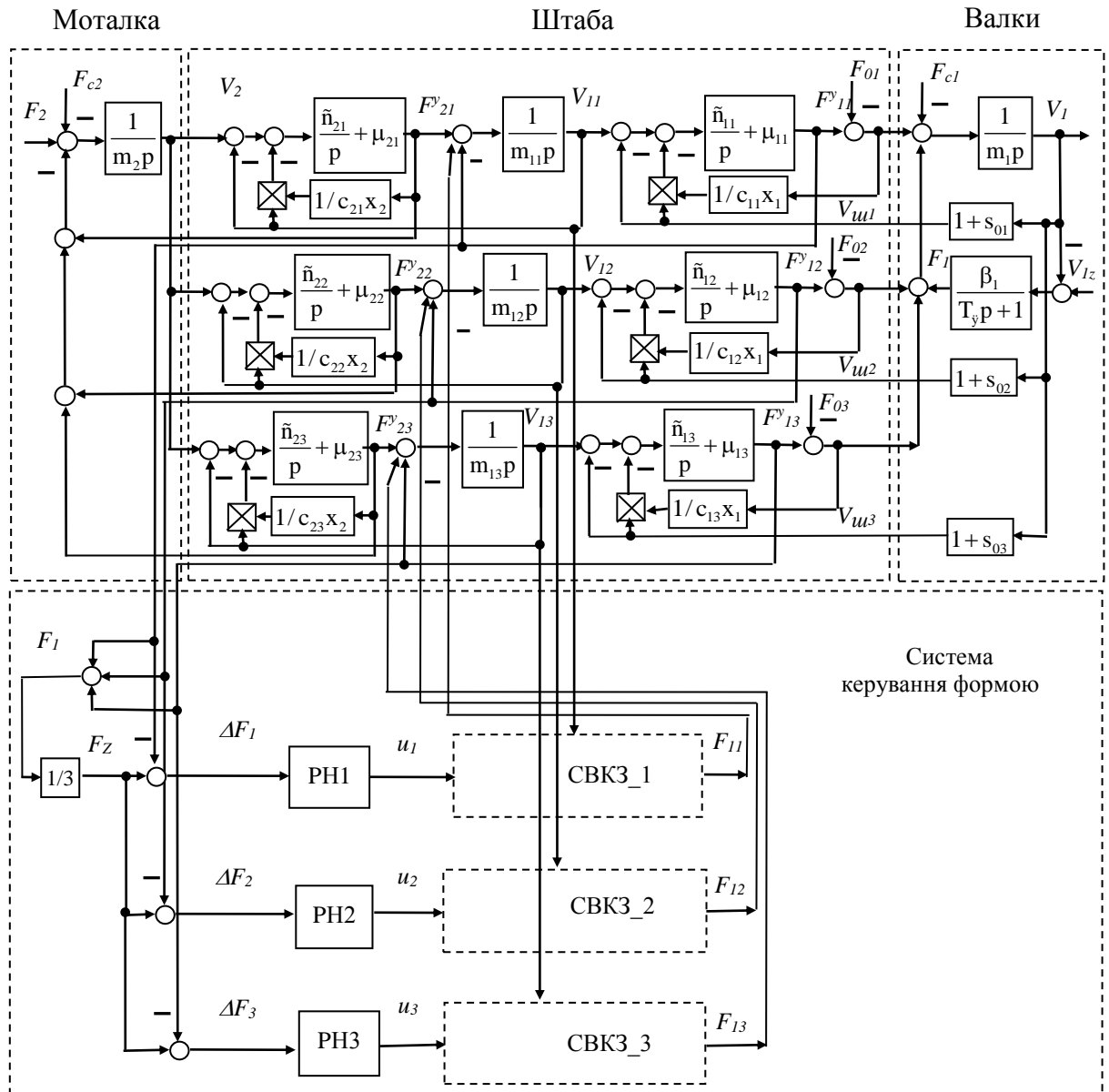


Рис. 12. Структурна схема САКФ за критерієм рівності механічних напружень

Керування формою здійснюється шляхом зміни пружних зусиль на кромках та в середині штаби $F^{y_{11}}, F^{y_{12}}, F^{y_{13}}$ при виході металу з валків кліти за допомогою регуляторів напружень РН1..РН3. Зміна напружень виконується системами векторного керування електродинамічними зусиллями СВКЗ_1..СВКЗ_3

безконтактних виконавчих пристроїв $F_{11}-F_{13}$. Дослідження системи здійснювалося при дії типових збурень у вигляді протилежно направлених лінійнонаростаючих та протифазних гармонічних напружень на кромках та в центрі штаби, які призводять до порушень форми з допустимою стандартами амплітудою біля 25 мм (рис. 13). При дії лінійнонаростаючих збурень максимальна хвиля за час перехідного процесу досягає всього 0,23..1,65 мм. На рис. 14 показано амплітуди хвиль штаби при відпрацюванні гармонічних збурень з різними коефіцієнтами підсилення k регуляторів типу $n=2; m=1; \nu=1$. Амплітуда хвиль суттєво зменшується до рівня 0,27..1,82 мм, проте періодичний характер зміни форми штаби залишається.

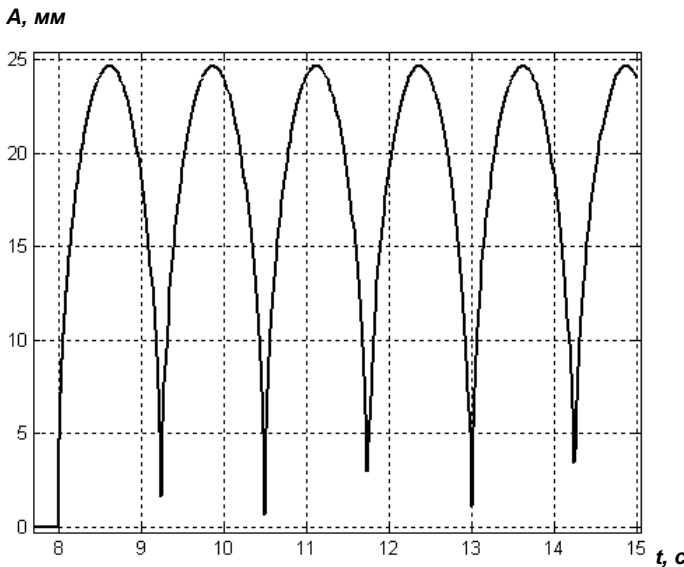


Рис. 13. Амплітуда хвиль штаби при дії гармонічних збурень

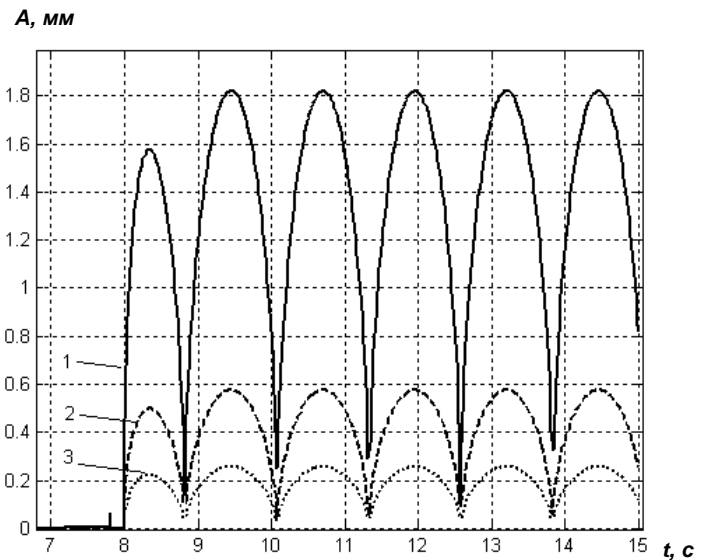


Рис. 14. Амплітуда хвиль штаби при роботі системи: 1 – $k=0,1$; 2 – $k=1$; 3 – $k=5$

* Система автоматичного керування формою за критерієм рівності швидкостей металу по ширині штаби базується на відомому критерії, згідно з яким умовою отримання штаби без дефектів форми є однакова швидкість витікання металу по ширині штаби з валків кліті. Технічна новизна системи підтверджена патентом. Структурна схема системи автоматичного керування формою для випадку типових порушень форми представлено на рис. 15. Керування формою здійснюється шляхом зміни швидкостей металу на кромках та в середині штаби V_{11}, V_{12}, V_{13} за допомогою регуляторів швидкостей РШ1-РШ3. Регулятори відпрацьовують похибки $\Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_3$ між поточними швидкостями на кромках і в центрі штаби та середнім (заданим) значенням швидкості V_z . Встановлено, що керування формою за критерієм рівності швидкостей металу забезпечує кращу якість, ніж за критерієм рівності механічних напружень. Проте закони керування швидкостями ділянок штаби повинні забезпечувати значно вищу швидкодію та меншу динамічну похибку. Найкраща якість керування отримується з регуляторами типу $n=2; m=1; \nu=2$. Як видно з рис. 16, порушення форми штаби при дії лінійнонаростаючих збурень зникають, а за час перехідного процесу максимальна хвиля досягала всього 0,018..0,027 мм в залежності від коефіцієнта підсилення регуляторів, що значно менше допустимих норм. В ході відпрацювання періодичних збурень максимальна амплітуда хвиль становить всього 0,018..0,037 мм, проте періодичний характер зміни форми штаби залишається (рис. 17).

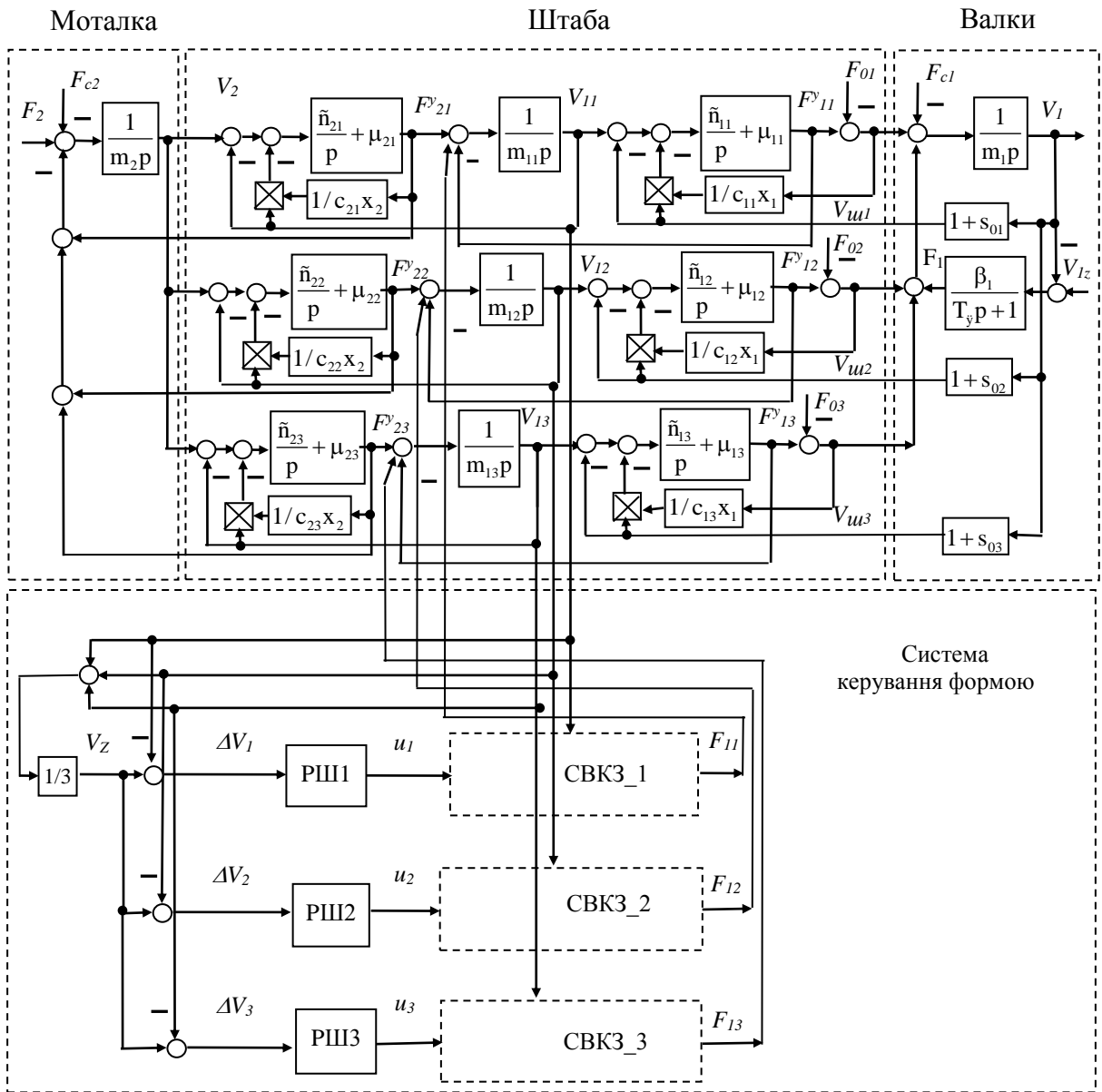


Рис. 15. Структурна схема САКФ за критерієм рівності швидкостей металу

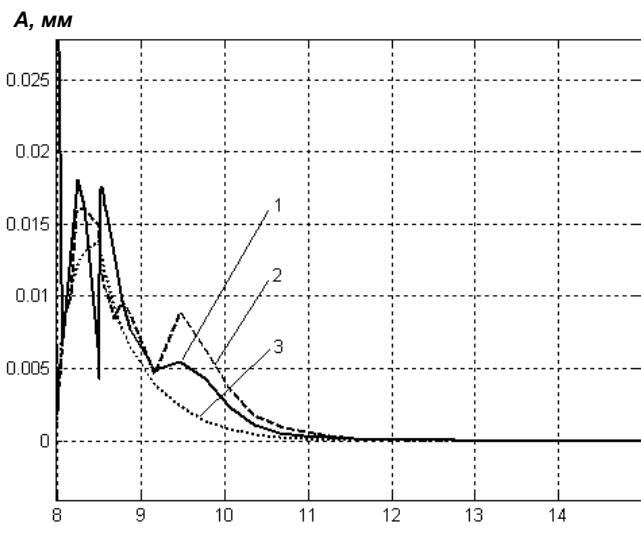


Рис. 16. Амплітуда хвиль штаби при дії лінійнозростаючих збурень: 1 – $k=100$; 2 – $k=300$; 3 – $k=500$

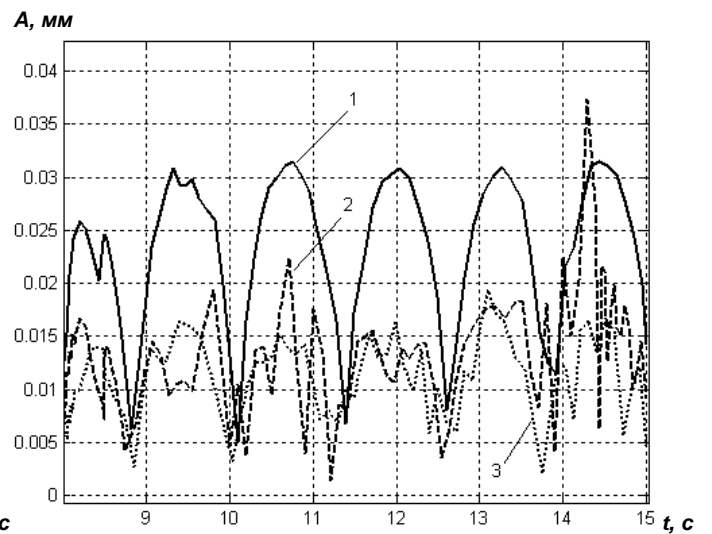


Рис. 17. Амплітуда хвиль штаби при дії гармонічних збурень: 1 – $k=100$; 2 – $k=300$; 3 – $k=500$

* Система автоматичного керування формою з використанням інформації про розподіл механічних напружень і швидкостей металу по ширині штаби реалізує переваги двох критеріїв рівності напружень та швидкостей металу по ширині штаби (рис. 18). Технічна новизна системи підтверджена патентом.

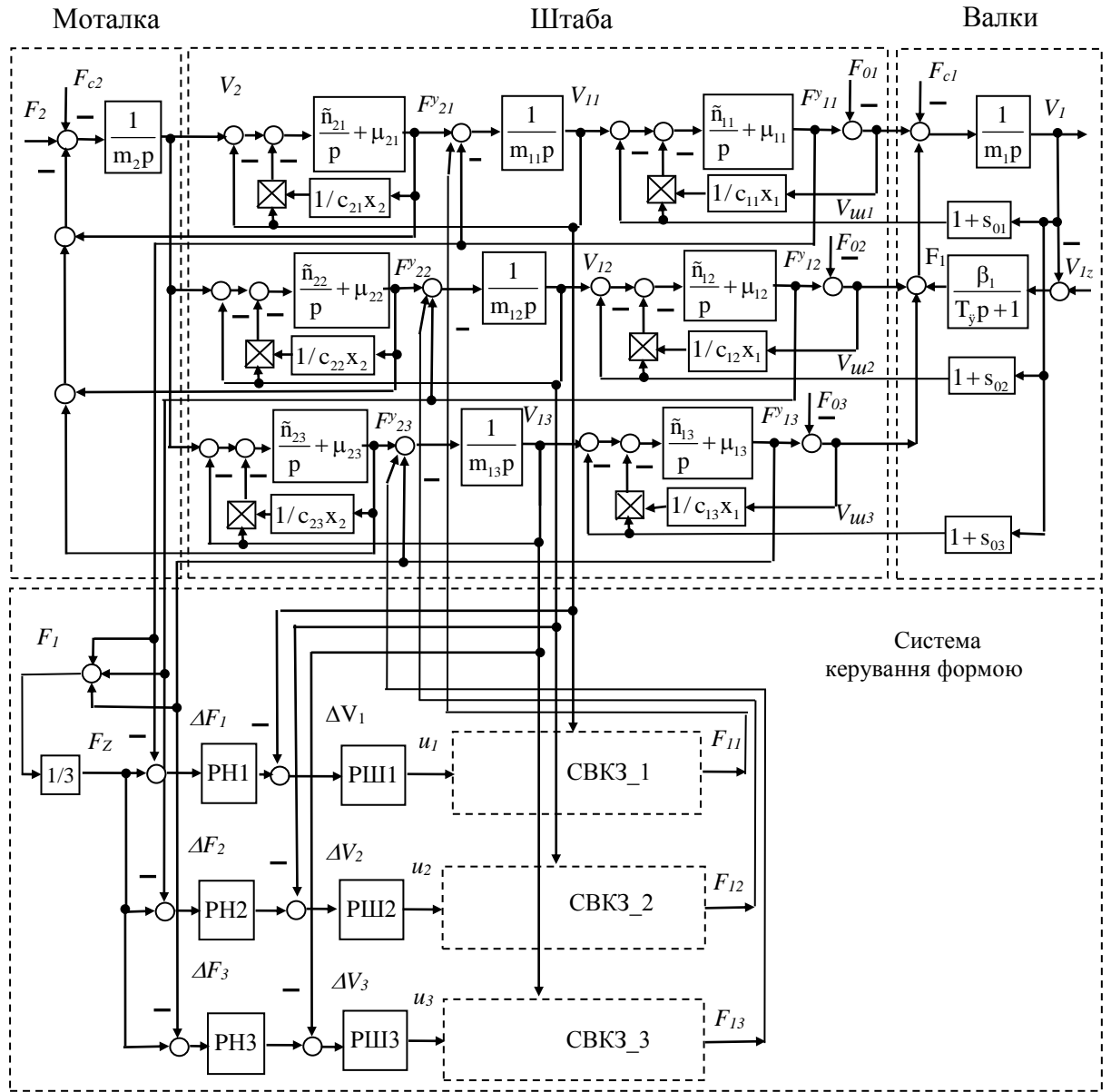


Рис. 18. Структурна схема САКФ з використанням інформації про розподіл механічних напружень і швидкостей металу по ширині штаби

Керування формою здійснюється за системою підпорядкованого регулювання шляхом зміни швидкостей V_{11}, V_{12}, V_{13} та пружних зусиль $F_{y11}, F_{y12}, F_{y13}$ за допомогою внутрішніх регуляторів швидкостей PИ1..PИ3 та зовнішніх регуляторів напружень PH1..PH3 на кромках та в середині штаби при виході металу з кліти. Результати дослідження якості керування системою з регуляторами швидкостей типу $n=2; m=1; v=2$ та регуляторами напружень типу $n=3; m=2; v=3$ наведено на рис. 19 та рис. 20. Максимальна хвиля при відпрацюванні лінійнонаростаючих збурень становить всього 0,009 мм, а при періодичних – біля 0,01 мм. Таким чином, ця система керування формою штаби забезпечує кращу якість, ніж представлені вище

системи за критерієм рівності механічних напружень та критерієм рівності швидкостей по ширині штаби.

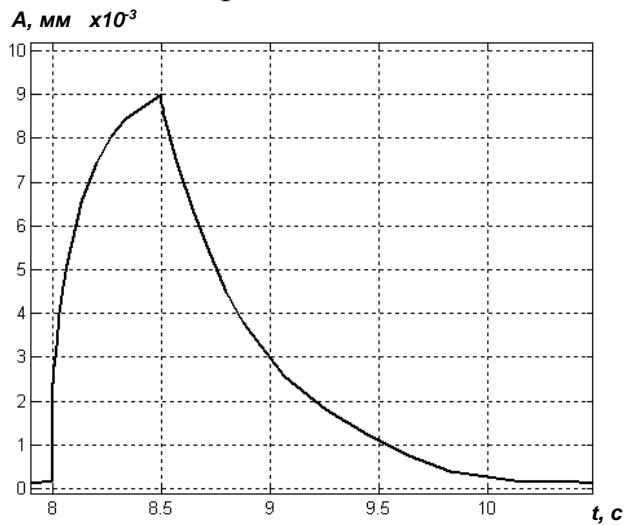


Рис. 19. Характер хвиль штаби при лінійнонаростаючих збуреннях

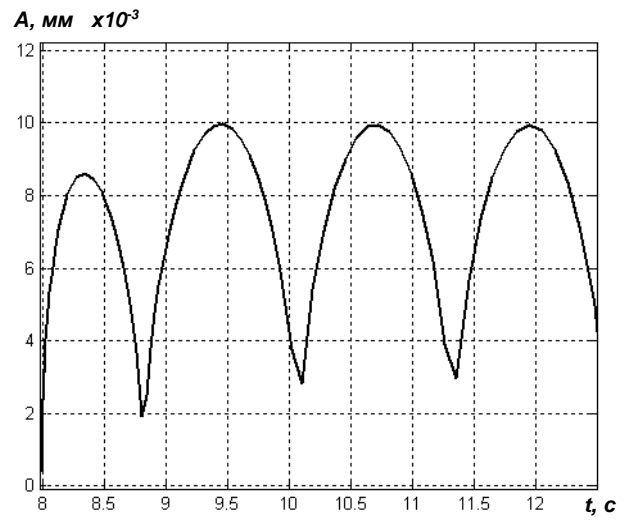


Рис. 20. Характер хвиль штаби при періодичних збуреннях

Система автоматичного керування профілем (САКП) штаби прокату ґрунтується на безконтактному електродинамічному впливі на штабу за допомогою БВП. Технічна новизна цієї системи підтверджена патентом. Структурна схема системи для випадку типових порушень показана на рис. 21.

Керування профілем здійснюється шляхом зміни пружних зусиль F^y_{11} , F^y_{12} , F^y_{13} за допомогою регуляторів товщини РТ1..РТ3. Регулятори відпрацьовують похибки Δh_1 , Δh_2 , Δh_3 між поточною товщиною на кромках і в центрі штаби h_{11} , h_{12} , h_{13} та середнім (заданим) значенням товщини h_z . Функціональні блоки $\Phi(h_{11})$, $\Phi(h_{12})$, $\Phi(h_{13})$ за відомими залежностями теорії прокату визначають товщини h_{11} , h_{12} , h_{13} за величинами відповідних напружень F^y_{11} , F^y_{12} , F^y_{13} , а блоки $\Phi(s_{01})$, $\Phi(s_{02})$, $\Phi(s_{03})$ – швидкості металу на кромках та в центрі штаби V_{u1} , V_{u2} , V_{u3} від величини відповідної товщини штаби h_{11} , h_{12} , h_{13} та лінійної швидкості валків V_1 на основі значень випередження металу s_{01} , s_{02} , s_{03} при відсутності натягу. Важливою особливістю запропонованої системи є збереження незмінною площі поперечного перерізу штаби в ході керування профілю. Проведене дослідження якості керування з регуляторами товщини типу $n=2$; $m=1$; $\nu=2$ при дії лінійнонаростаючих збурень напружень, що призводить до збільшення товщини на кромках з 2 мм до 2,0615 мм, а в середині – зменшення з 2 мм до 1,877 мм, та товщини підкату, що призводить до зменшення товщини на кромках з 2 мм до 1,902 мм, а в середині до збільшення з 2 мм до 2,196 мм. Як видно з рис. 22 та рис. 23, система забезпечує астатичне керування профілем, а за час перехідного процесу при дії лінійнонаростаючих збурень напружень максимальна динамічна похибка в середині штаби становить всього 0,0021 мм, а при нерівномірності товщини підкату – 0,0038 мм.

Таким чином, керування профілем штаби на основі запропонованого методу забезпечує поперечну нерівномірність товщини металу значно меншу за існуючі норми.

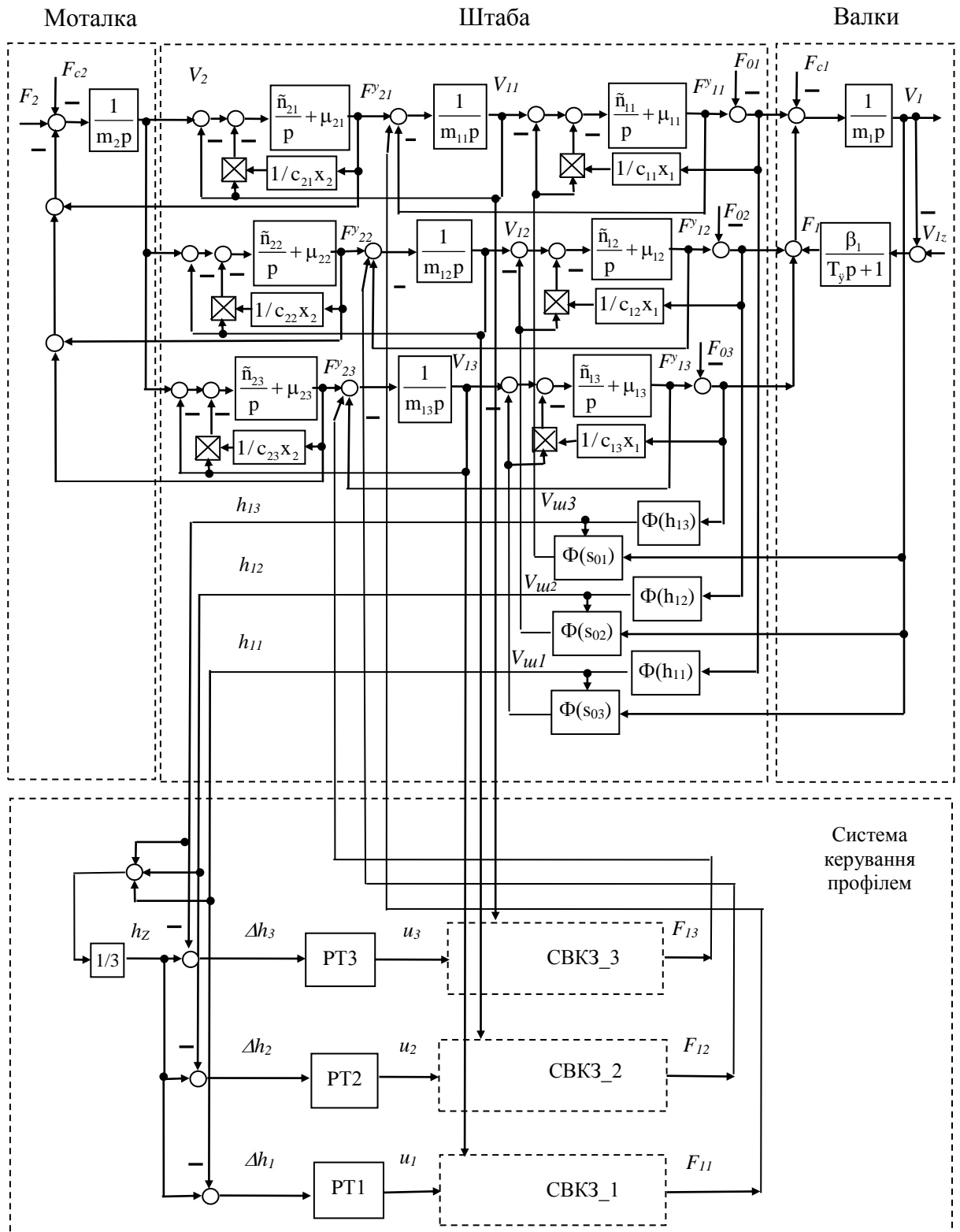


Рис. 21. Структурна схема системи автоматичного керування профілем штаби прокату

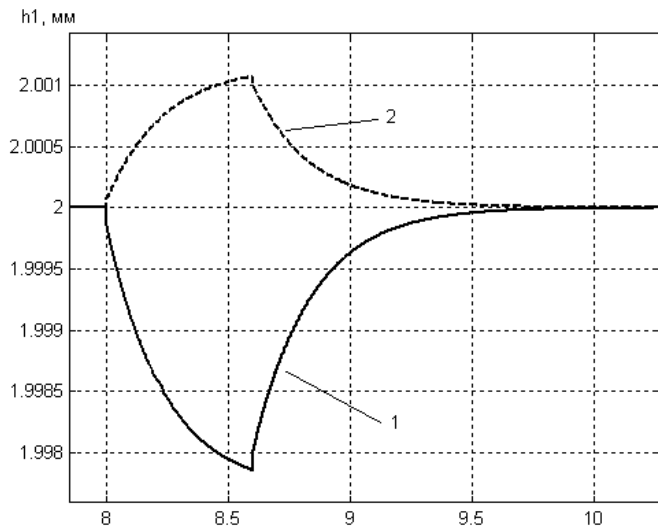


Рис. 22. Перехідний процес товщини штаби при відпрацюванні збурень напружень: 1 – в середині штаби; 2 – на кромках штаби

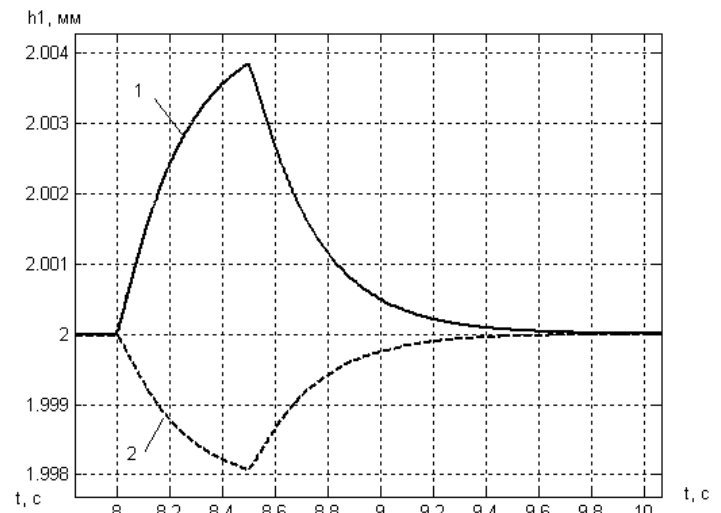


Рис. 23. Перехідний процес товщини штаби при відпрацюванні збурень підкату: 1 – в середині штаби; 2 – на кромках штаби

У п'ятому розділі представлено результати проведення на прокатному стані випробувань та експериментальних досліджень методу керування параметрами штаби прокату на основі безконтактних виконавчих пристроїв.

Проведене на прокатному стані 400 НВО «Дніпрофмаш» (м. Дніпродзержинськ) випробування системи керування формою штаби показало ефективність методу керування параметрами штаби прокату на основі безконтактних виконавчих пристроїв (рис. 24). В результаті роботи розімкнутої системи керування формою хвилястість кромки алюмінієвої штаби шириною 340 мм та товщиною один міліметр зменшилася з 4..5 до 1..2 мм, а центральне короблення – з 5..6 до 2..2,5 мм.



Рис. 24. Випробування системи керування формою штаби на прокатному стані



Рис. 25. Загальний вигляд механічної частини експериментальної установки

Для дослідження методу керування створена експериментальна установка, яка складається з алюмінієвого диска діаметром 1480 мм, що обертаючись із заданою швидкістю імітує рух штаби (рис. 25). На протилежних краях диска встановлено

однакові частотно-керовані безконтактні виконавчі пристрої. Конструктивно БВП виконано у вигляді односторонніх індукторів: довжина 362,5 мм, ширина 81 мм, висота 67 мм, полюсний крок дорівнює 67,2 мм. Проведено дослідження основних положень запропонованого методу керування на основі безконтактних виконавчих пристроїв шляхом створення в рухомому алюмінієвому диску електродинамічних зусиль різної величини та напрямку. Перевірено спосіб переходу безконтактного виконавчого пристрою в рушійний режим роботи, на холостий хід та в режим рекуперативного гальмування за рахунок зміни швидкості магнітного поля БВП відносно лінійної швидкості алюмінієвого диску за допомогою зміни частоти та амплітуди напруги живлення.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено на основі електромеханічних систем з безконтактними виконавчими пристроями біжучого електромагнітного поля науково-прикладну проблему підвищення якості форми та профілю листопрокатної продукції шляхом електродинамічної дії на штабу за межами прокатної кліти в ході неперервної прокатки. Створено на основі безконтактних виконавчих пристроїв метод та перспективні види електромеханічних систем автоматичного керування параметрами штаби, технічна новизна яких підтверджена 8 деклараційними патентами України. Проведене випробування на прокатному стані 400 науково-виробничого об'єднання «Дніпрофмаш» (м. Дніпродзержинськ) системи керування формою штаби показало ефективність методу керування параметрами штаби прокату на основі безконтактних виконавчих пристроїв. Завдяки енергоефективності, яку забезпечує запропонований метод, електромеханічні системи автоматичного керування параметрами штаби споживають з електромережі енергію тільки для покриття втрат.

Основні результати досліджень узагальнені наступними висновками:

1. Проведений аналіз процесів в електротехнічному комплексі формоутворення штаби в ході неперервної прокатки дозволив обґрунтувати вирішення на основі безконтактних виконавчих пристроїв біжучого електромагнітного поля проблему підвищення якості форми та профілю штабового прокату. На відміну від існуючих систем, в яких керування здійснюється за допомогою контактної, механічної дії на осередок деформації металу у прокатній кліті (вигин, зсув, перехрещення валків тощо), що обумовлює суттєве ускладнення конструкції клітей та інтенсивний знос валків як головного робочого інструменту, запропоноване керування на основі безконтактних виконавчих пристроїв здійснюється шляхом електродинамічної дії на штабу за межами прокатної кліти.
2. Обґрунтовані основні переваги керування на основі безконтактних виконавчих пристроїв: створення керуючої дії без механічного контакту зі штабою за допомогою біжучого електромагнітного поля; відсутність елементів, що зношуються та потребують періодичної заміни; пряма дія на штабу без проміжних механічних елементів; відсутність втрат на тертя, елементів з механічними зазорами та температурними деформаціями, які негативно впливають на якість керування; висока надійність, що обумовлена простою конструкції виконавчих пристроїв; можливість впровадження на діючих

прокатних станах без зміни конструкції кліті; збільшення тривалості роботи валків кліті внаслідок відсутності їх вигину, зміщення та перехрещення, як в існуючих системах.

3. Теоретично обґрунтовано на основі безконтактних виконавчих пристроїв новий методу керування параметрами штаби шляхом зміни по ширині штаби величини на напряму електродинамічних зусиль за допомогою зміни швидкостей магнітних полів пристроїв, що дозволяє регулювати розподіл механічних напружень по ширині штаби. Технічна новизна методу керування підтверджена патентами України на спосіб та пристрій керування.
4. Узагальнення та дослідження математичних моделей електромеханічних процесів в електротехнічному комплексі формування параметрів штабового прокату дозволило встановити динамічний зв'язок між змінними безконтактних виконавчих пристроїв та розподілом механічних напружень по ширині штаби, її формою і профілем у вигляді нелінійних, багатовимірних і взаємозв'язаних об'єктів, що створює умови для синтезу систем автоматичного керування параметрами штаби.
5. Дослідження математичних моделей електромагнітних процесів в безконтактних виконавчих пристроях обумовило розробку системи векторного керування електродинамічним зусиллям у штабі для забезпечення високої якості керування в умовах впливу крайових ефектів внаслідок розімкнутості магнітопроводу.
6. Безконтактні виконавчі пристрої повинні відповідати вимогам конкретного прокатного виробництва. Розрахунок безконтактних виконавчих пристроїв доцільно проводити в два етапи. На першому етапі здійснюється попередній вибір основних геометричних розмірів та електромагнітних характеристик, що дозволяє отримати оціночні показники на основі мінімальної кількості вихідних даних – швидкості, товщини, ширини, електричної провідності металу штаби та нерівномірності механічних напружень по ширині штаби, а також частоти та амплітуди напруги живлення. На другому етапі уточнюються прийняті показники та обчислюються номінальні параметри.
7. Розроблено та досліджено закони керування параметрами штаби та електродинамічним зусиллям безконтактних виконавчих пристроїв, які забезпечують задану якість форми і профілю в умовах пружно-деформованого взаємозв'язку між електромеханічними системами неперервного прокатного стану та зміни сортаменту прокату. Закони керування створено на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій, що забезпечує слабку чутливість до параметричних і координатних збурень та не потребує перелаштування регуляторів.
8. Розроблено та досліджено на основі безконтактних виконавчих пристроїв перспективні види електромеханічних систем автоматичного керування параметрами штаби прокату: системи автоматичного керування формою штаби на основі критерію рівності механічних напружень по ширині штаби, на основі критерію рівності швидкостей металу по ширині штаби та з використанням інформації про розподіл механічних напружень і швидкостей металу по ширині штаби; систему автоматичного керування профілем штаби. Представлені

системи забезпечують високу якість керування з кількісними показниками значно меншими за регламентовані стандартами норми. Технічна новизна кожної системи підтверджена патентами України.

9. Проведені на прокатному стані випробування системи керування формою штаби та експериментальні дослідження методу керування показали ефективність вирішення проблеми підвищення якості форми та профілю листопрокатної продукції за допомогою безконтактних виконавчих пристроїв шляхом електродинамічної дії на штабу за межами прокатної кліті.
10. Результати виконаних досліджень електромеханічних систем автоматичного керування формою та профілем штаби прокату впроваджені в ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (м. Краматорськ), ДП НВК «Київський інститут автоматики» (м. Київ), ВАТ «Київпромелектропроект» (м. Київ), ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації та управління» (м. Київ) та в навчальний процес кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу НТУУ «Київський політехнічний інститут».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Островерхов Н.Я. Математическая модель электромеханической системы автоматического управления планшетностью прокатываемых полос металла на основе бесконтактных электромагнитных устройств / Н.Г.Попович, Н.Я.Островерхов, В.В.Боровский // Електромашинобудування та електрообладнання. – Київ: Техніка. – 2002. – вип. 58. – С. 39-44. *Здобувач склав математичну модель електромеханічної системи автоматичного регулювання планшетністю штаби.*
2. Проблема енергозбереження в електромеханічних системах автоматичного керування / М.Г.Попович, С.М.Пересада, М.В.Печеник, М.Я.Островерхов, О.І.Кіселичник // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2003. – Тематичний вип. – С.46-49. *Здобувач представив електромеханічну систему з безконтактними виконавчими пристроями.*
3. Островерхов М.Я. Энергозберігаюча електромеханічна система автоматичного керування планшетністю штаби прокату на основі безконтактних електромагнітних виконавчих пристроїв / М.Г.Попович, М.Я.Островерхов, В.В.Боровський // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2003. – Тематичний вип. – С.50-51. *Здобувач запропонував структурну схему електромеханічної системи.*
4. Островерхов М.Я. Дослідження електромеханічної системи автоматичного керування планшетністю штаби прокату на основі безконтактних електромагнітних виконавчих пристроїв / М.Г.Попович, М.Я.Островерхов, В.В.Боровський // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – 2003. – вип. 2(19). – С. 21-24. *Здобувач провів дослідження електромеханічної системи.*
5. Островерхов М.Я. Синтез електромеханічної системи автоматичного керування кутовою швидкістю з асинхронним двигуном на основі принципу пасивності / М.Г.Попович, О.І.Кіселичник, М.Я.Островерхов // Технічна

електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2004. – Ч.2, Тематичний вип. – С. 89-92. *Здобувач склав структурну схему електромеханічної системи.*

6. Островерхов М.Я. Синтез регуляторів багатоканальної електромеханічної системи автоматичного керування планшетністю штаби прокату з безконтактними електромагнітними виконавчими органами / М.Г.Попович, М.Я.Островерхов, В.В.Боровський // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2004. – № 3. – С. 3-6. *Здобувач отримав закон керування регуляторів електромеханічної системи.*

7. Островерхов М.Я. Енергозберігаюча безконтактна електромеханічна система автоматичного керування планшетністю штаби прокату на основі принципу пасивності / М.Г.Попович, М.Я.Островерхов // Енергетика: економіка, технології, екологія. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2005. – № 2. – С. 86-92. *Здобувач розробив закони керування на основі принципу пасивності.*

8. Островерхов М.Я. Безконтактна ресурсозберігаюча система автоматичного керування планшетністю штаби / М.Г.Попович, М.Я.Островерхов // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2006. – Ч.5, Тематичний вип. – С. 60-65. *Здобувач обґрунтував ресурсозберігаючу структуру системи автоматичного керування.*

9. Островерхов М.Я. Забезпечення якості листопрокатної продукції впровадженням системи безконтактного керування / М.Г.Попович, М.Я.Островерхов // Електромашинобудування та електрообладнання. – Київ: Техніка. – 2006. – Тематичний вип. – С. 116-117. *Здобувач обґрунтував використання систем безконтактного керування.*

10. Островерхов М.Я. Система автоматичного керування розподілом натягу по ширині штаби на основі перетворювачів частоти і безконтактних виконавчих пристроїв / М.Я.Островерхов, К.М.Островерхова, О.М.Халімовський // Електроніка та зв'язок. – Київ: НТУУ «КПІ», ДУІКТ. – 2006. – № 2. – С. 44-48. *Здобувач запропонував структуру системи автоматичного керування розподілом натягу штаби.*

11. Островерхов М.Я. Безконтактна система автоматичного керування профілем штаби прокату / М.Г.Попович, М.Я.Островерхов, Н.Б.Молчанова // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький: ХНУ. – 2007. – Т.1, № 2. – С. 192-195. *Здобувач запропонував структуру системи автоматичного керування профілем.*

12. Островерхов М.Я. Дослідження безконтактної системи автоматичного керування профілем штаби прокату / М.Г.Попович, М.Я.Островерхов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ. – 2007. – Ч.2, вип. 3(44). – С. 40-43. *Здобувач провів дослідження системи автоматичного керування профілем.*

13. Островерхов М.Я. Безконтактні системи автоматичного керування параметрами штаби прокату / М.Я.Островерхов // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Технічні науки. – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2007. – Тематичний вип. – С. 393-396.

14. Островерхов М.Я. Математична модель безконтактних виконавчих пристроїв систем автоматичного керування параметрами штаби прокату / М.Г.Попович, М.Я.Островерхов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного

університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ. – 2008. – Ч.2, вип. 3(50). – С. 124-128. *Здобувач склав математичну модель безконтактного виконавчого пристрою.*

15. Островерхов М.Я. Метод синтезу регуляторів електромеханічних систем на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій руху / М.Я.Островерхов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – вип. 30. – С. 105-110.

16. Островерхов М.Я. Система векторного керування зусиллям у штабі прокату на основі безконтактного виконавчого пристрою / М.Г.Попович, М.Я.Островерхов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – вип. 30. – С. 394-396. *Здобувач запропонував застосувати в якості опорного вектора вектор головного потокозчеплення безконтактного виконавчого пристрою.*

17. Островерхов М.Я. Універсальна система векторного керування швидкістю асинхронного двигуна на основі концепції зворотної задачі динаміки при мінімізації локальних функціоналів миттєвих значень енергій руху / М.Я.Островерхов, О.Л.Сигаєв, М.П.Бурик // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ. – 2009. – Ч.2, вип. 3(56). – С. 31-34. *Здобувач запропонував універсальний закон керування швидкістю асинхронного двигуна з різними паспортними даними.*

18. Островерхов М.Я. Синтез регуляторів системи керування формою штаби прокату на основі концепції зворотної задачі динаміки при мінімізації локальних функціоналів миттєвих значень енергій / М.Г.Попович, М.Я.Островерхов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ. – 2009. – Ч.1, вип. 4(57). – С. 25-28. *Здобувач розробив закони керування регуляторів форми штаби.*

19. Островерхов М.Я. Система автоматичного керування положенням штаби з векторно-керуваними двигунами та властивостями природної адаптації / М.Я.Островерхов, М.П.Бурик // Електроінформ. – Львів: ТОВ «ЕКОінформ». – 2009. – Тематичний вип. – С. 124-125. *Здобувач запропонував структуру системи автоматичного керування.*

20. Ostroverkhov M. Concept of inverse dynamics problems for cascade speed control of direct current motors with field weakening / O.Kiselychnyk, M.Pushkar, M. Ostroverkhov // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ. – 2010. – Ч.1, вип. 3(62). – С. 11-14. *Здобувач розробив закони керування на основі концепції зворотних задач динаміки.*

21. Островерхов М.Я. Система непрямого векторного керування асинхронним двигуном на основі концепції зворотної задачі динаміки / М.Я.Островерхов, О.Л.Сигаєв, М.П.Бурик // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ. – 2010. – Ч.1, вип. 3(62). – С. 29-32. *Здобувач розробив закони керування на основі концепції зворотних задач динаміки.*

22. Островерхов М.Я. Дослідження системи векторного керування асинхронним двигуном на основі концепції зворотної задачі динаміки / М.Я.Островерхов, М.П.Бурик // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – вип. 28. – С. 83-84. *Здобувач проаналізував результати дослідження системи векторного керування.*

23. Островерхов М.Я. Динамічна модель лінійного асинхронного двигуна з урахуванням насичення та кінцевих ефектів / М.Я.Островерхов, М.О.Островерхов // Комунальне господарство міст. Серія «Технічні науки та архітектура». – Харків: ХНАМГ. – 2011. – № 97. – С. 256-260. *Здобувач запропонував метод врахування насичення та кінцевих ефектів.*

24. Островерхов Н.Я. Управление координатами электроприводов на основании концепции обратных задач динамики при минимизации локальных функционалов мгновенных значений энергий / Н.Я.Островерхов, Н.П.Бурик // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2011. – № 1. – С. 41-49. *Здобувач розробив закони керування координатами електроприводів на основі концепції зворотних задач динаміки.*

25. Островерхов М.Я. Система автоматичного керування формою прокату за критерієм рівності швидкостей металу по ширині штаби на основі безконтактних виконавчих пристроїв / М.Я.Островерхов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: ДВНЗ «ДНТУ». – 2011. – вип. 11 (186). – С. 291–294.

26. Островерхов М.Я. Система керування формою штаби прокату за гібридним критерієм на основі безконтактних виконавчих пристроїв / М.Я.Островерхов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ. – 2011. – вип. 2(14). – С. 35-38.

27. Островерхов М.Я. Підпорядкована система керування координатами електропривода на основі концепції зворотних задач динаміки / М.Я.Островерхов, В.М.Пижов, М.П.Бурик // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ. – 2011. – вип. 3(15). – С. 21-25. *Здобувач запропонував закони підпорядкованого керування на основі концепції зворотних задач динаміки.*

28. Островерхов М.Я. Пряме векторне керування швидкістю лінійного асинхронного двигуна на основі концепції зворотних задач динаміки / М.Я.Островерхов, О.І.Яремів // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ. – 2011. – вип. 3(15). – С. 26-30. *Здобувач запропонував закони керування на основі концепції зворотних задач динаміки.*

29. Островерхов М.Я. Дослідження стійкості систем керування, розроблених на основі концепції зворотних задач динаміки / М.Я.Островерхов, М.П.Бурик // Електромеханічні та комп'ютерні системи. – Київ: Техніка. – 2011. – № 03 (79). – С. 17-18. *Здобувач запропонував методика проведення дослідження стійкості систем керування.*

30. Островерхов М.Я. Система векторного керування асинхронним двигуном на основі концепції зворотної задачі динаміки / М.Я.Островерхов, М.П.Бурик // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ. – 2011. – вип. 116. – С. 129-130. *Здобувач розробив закони керування на основі концепції зворотних задач динаміки.*

31. Пат. 14504 Україна, МПК В21В 39/00. Спосіб керування натягом по ширині штаби / Попович М.Г., Островерхов М.Я.; винахідники Попович Микола Гаврилович, Островерхов Микола Якович; власник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u200511322; заявл. 29.11.2005; опубл. 15.05.2006, Бюл. №5. *Здобувач запропонував безконтактний спосіб керування розподілом натягу по ширині штаби.*

32. Пат. 14506 Україна, МПК В21В 39/00. Пристрій для керування розподілом натягу по ширині штаби / Попович М.Г., Островерхов М.Я.; винахідники Попович Микола Гаврилович, Островерхов Микола Якович; власник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u200511324; заявл. 29.11.2005; опубл. 15.05.2006, Бюл. № 5. *Здобувач запропонував застосування безконтактних виконавчих пристроїв для керування розподілом натягу по ширині штаби.*

33. Пат. 14507 Україна, МПК В21В 37/00. Пристрій для автоматичного керування планшетністю штаби прокату / Попович М.Г., Островерхов М.Я.; винахідники Попович Микола Гаврилович, Островерхов Микола Якович; власник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u200511325; заявл. 29.11.2005; опубл. 15.05.2006, Бюл. № 5. *Здобувач запропонував ввести до пристрою додаткові блоки заданого співвідношення частоти і амплітуди напруги живлення.*

34. Пат. 14508 Україна, МПК В21В 37/00. Пристрій для керування планшетністю штаби прокату / Попович М.Г., Островерхов М.Я.; винахідники Попович Микола Гаврилович, Островерхов Микола Якович; власник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u200511326; заявл. 29.11.2005; опубл. 15.05.2006, Бюл. № 5. *Здобувач запропонував ввести до пристрою додатковий блок компенсації.*

35. Пат. 18743 Україна, МПК В21С 47/00. Пристрій для центрування штаби прокату / Попович М.Г., Островерхов М.Я.; винахідники Попович Микола Гаврилович, Островерхов Микола Якович; власник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u200606029; заявл. 31.05.2006; опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11. *Здобувач запропонував виконати виконавчі пристрої у вигляді індукторів лінійних асинхронних двигунів.*

36. Пат. 18745 Україна, МПК В21В 37/00. Пристрій для керування профілем штаби прокату / Попович М.Г., Островерхов М.Я.; винахідники Попович Микола Гаврилович, Островерхов Микола Якович; власник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u200606031; заявл. 31.05.2006; опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11. *Здобувач запропонував виконати виконавчі пристрої у вигляді індукторів лінійних асинхронних двигунів.*

37. Пат. 22004 Україна, МПК В21В 37/00. Пристрій для автоматичного керування планшетністю штаби прокату / Попович М.Г., Островерхов М.Я.; винахідники Попович Микола Гаврилович, Островерхов Микола Якович; власник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u200611769; заявл. 08.11.2006; опубл. 10.04.2007, Бюл. № 4. *Здобувач запропонував ввести до пристрою датчики розподілу напружень та швидкостей металу.*

38. Пат. 22411 Україна, МПК В21В 37/00. Пристрій для автоматичного керування планшетністю штаби прокату / Попович М.Г., Островерхов М.Я.; винахідники Попович Микола Гаврилович, Островерхов Микола Якович; власник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u200611766; заявл. 08.11.2006; опубл. 25.04.2007, Бюл. № 5. *Здобувач запропонував ввести до пристрою датчик розподілу швидкостей металу.*

АНОТАЦІЇ

Островерхов М.Я. Електромеханічні системи на основі безконтактних виконавчих пристроїв для автоматичного керування параметрами штаби в ході неперервної прокатки. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2012.

Дисертацію присвячено розвитку наукових основ електромеханічних систем на основі безконтактних виконавчих пристроїв біжучого електромагнітного поля для вирішення науково-прикладної проблеми підвищення якості форми та профілю листопрокатної продукції. Теоретично обґрунтовано та створено на основі безконтактних виконавчих пристроїв метод керування параметрами штаби за рахунок зміни розподілу механічних напружень по її ширині шляхом безконтактної електродинамічної дії та розглянуто конструктивні особливості безконтактних виконавчих пристроїв для її реалізації. Узагальнено та досліджено математичні моделі безконтактних виконавчих пристроїв та процесів формування параметрів штаби на їх основі, як теоретичного підґрунтя електромеханічних систем автоматичного керування параметрами штаби. Розроблено та досліджено закони керування параметрами штаби, які забезпечують задану якість форми і профілю в умовах пружно-деформованого взаємозв'язку між електромеханічними системами неперервного прокатного стану. Розроблено та досліджено перспективний клас систем автоматичного керування формою та профілем штаби на основі створеного методу, які забезпечують якість керування кращу, ніж регламентують стандарти.

Ключові слова: автоматизація електротехнічного комплексу, електромеханічні системи, системи автоматичного керування параметрами штаби, безконтактні виконавчі пристрої.

Островерхов Н.Я. Электромеханические системы на основе бесконтактных исполнительных устройств для автоматического управления параметрами полосы в ходе непрерывной прокатки. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2012.

Диссертация посвящена развитию научных основ электромеханических систем на основе бесконтактных исполнительных устройств бегущего электромагнитного поля для решения научно-прикладной проблемы повышения качества формы и профиля листопрокатной продукции. В работе теоретически

обоснован и разработан на основе бесконтактных исполнительных устройств метод управления геометрическими параметрами полосового проката с помощью регулирования распределения механических напряжений по ширине полосы путем электродинамического воздействия, что создает предпосылки для дальнейшего повышения качества проката и создания перспективного класса бесконтактных систем автоматического управления параметрами полосы. Предложенный метод управления обеспечивает: создание в полосе управляющего действия без механического контакта с помощью электромагнитного поля, что обеспечивает дальнейшее повышение качества управления, в частности, обусловленное отсутствием износа рабочих органов систем управления; прямое действие на прокат без промежуточных механических элементов кинематической цепи (редукторов, валов, винтов, муфт и т.п.); возможность внедрения на действующих прокатных станах без изменений в конструкции клетей и благодаря незначительному потреблению электроэнергии; обеспечение высокого качества динамических характеристик благодаря отсутствию элементов с механическими зазорами, с температурными и упругими деформациями, которые отрицательно влияют на качество управления; высокую надежность, обусловленную простотой конструкции исполнительных устройств, отсутствием механического контакта между прокатом и элементами системы управления, а также потерь на трение, зон для смазки, элементов, которые снашиваются и нуждаются в периодическом обслуживании и замене; повышение надежности клетки, увеличение продолжительности работы ее валков и подшипниковых узлов вследствие отсутствия действия на них усилий, обусловленных изгибом, смещением и перекрещением, как в существующих системах управления. Благодаря энергоэффективной технологии, которую обеспечивает предложенный метод, система управления распределением механических напряжений по ширине полосы потребляет из сети активную электрическую энергию необходимую только для покрытие потерь.

Разработаны и исследованы математические модели бесконтактных исполнительных устройств и процессов формирования распределения механических напряжений по ширине полосы на их основе. Модели являются нелинейными и взаимосвязанными, параметры которых изменяются при изменении сортамента проката. Впервые теоретически обоснован, разработан и исследован на основе бесконтактных исполнительных устройств перспективный класс систем автоматического управления параметрами проката: формой проката по критерию равенства механических напряжений по ее ширине, формой проката по критерию равенства скоростей металла по ее ширине, формой проката на основе информации о распределении механических напряжений и скорости металла по ширине полосы, а также профилем проката. Системы обеспечивают высокое качество управления формой и профилем с количественными показателями лучшими, чем регламентируют стандарты. В работе получил дальнейшее развитие метод разработки законов управления многосвязных, нелинейных систем на основании концепции обратной задачи динамики при минимизации локальных функционалов мгновенных значений энергий благодаря созданию около двух десятков регуляторов нетиповой структуры, которые обеспечивают динамическую декомпозицию взаимосвязанных систем при слабой чувствительности к изменению сортамента

проката без применения дополнительных алгоритмов адаптации и идентификации параметров. Параметры регуляторов содержат только параметры желаемого закона управления и не зависят от параметров объекта управления, что характерно для классических законов управления. Важно, что для построения структуры регуляторов не нужна детальная математическая модель объекта управления. На примере стана 2000 горячей прокатки цветного металла показано, что система автоматического управления формой проката по критерию равенства механических напряжений по ее ширине уменьшает амплитуду волн с 25 мм до 0,23 мм, система автоматического управления формой по критерию равенства скоростей металла по ее ширине – до 0,018 мм, система автоматического управления формой на основе информации о распределении механических напряжений и скорости металла по ширине полосы – до 0,009 мм. Система автоматического управления профилем проката уменьшает поперечную разнотолщинность полосы с 6,2 % к нулю при максимальной разнотолщинности во время переходного процесса около 0,1 %. На основе концепции обратных задач динамики создана также система векторного управления усилием бесконтактного исполнительного устройства с опорным вектором главного потокосцепления, которая обеспечивает высокое качество управления электродинамическим усилием в полосе при слабой чувствительности к изменению параметров металла проката.

Ключевые слова: автоматизация электротехнического комплекса, электромеханические системы, системы автоматического управления параметрами полосы, бесконтактные исполнительные устройства.

Ostroverkhov M.J. Electromechanical systems on the basis of contactless executive devices for automatic control the parameters of strip hire the continuous rolling. – On rights for a manuscript.

Dissertation on competition of a scientific degree of doctor technical sciences on a specialty 05.09.03 – electrotechnical complexes and systems. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2012.

The dissertation solves a scientifically-applied problem of maintenance of quality of sheet hire. Theoretical bases of systems of automatic control in parameters of hire on the basis of contactless devices are developed. The method of management in parameters of sheet hire due to distribution of mechanical pressure on width of a sheet by means of electromagnetic action is theoretically proved and created. The mathematical models of noncontact executive devices are worked out and investigational, and also the models of processes of forming of distribution of mechanical tensions are worked out on the width of metallic stripe. Systems of automatic control by the form and structure on the basis of this method are developed and researched. Based on the concept of inverse problems of dynamics of a system of vector control actuator force contact with a support vector of the main magnetic flux. The system provides high quality management electrodynamic forces in the band with low sensitivity to changes in the parameters of the metal products.

Keywords: electrotechnical complex automation, electromechanical systems, systems of automatic control parameters strip, contactless actuators.

Підписано до друку 06.12.2012 р. Формат 60x90 1/16.
Папір офсетний. Друк – цифровий. Гарнітура Times New Roman.
Умовн. друк. арк. 1,9. Наклад 100 прим. Зам. № 030357.

Надруковано у СПДФО Креницький В.І.
Свідоцтво № 2264307150 від 17.04.1997 р.
08200, м. Ірпінь, вул. Українська, 12г