

УДК 658.012.011.56:621.771.06-8-53

М.Г. ІЄВЛЄВ*, Г.Г. ГРАБОВСЬКИЙ**, В.А. БАЖЕНОВ***

СИСТЕМИ ПОЗИЦІЙНОГО УПРАВЛІННЯ МЕХАНІЗМАМИ ПРОКАТНИХ СТАНІВ

*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

**ДНВК «Київський інститут автоматки», м. Київ, Україна

***Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Анотація. У статті розглядаються системи позиційного управління механізмами прокатних станів, що забезпечують автоматичне управління такими механізмами прокатних станів: підйомними столами, штовхачами, приймачами слябів, направляючими лініями, натискними пристроями робочих валків клітей, механізмами переміщення пальників і моста агрегатів вогневого різання, механізмами встановлення розчину моталок, кареток вимірювачів ширини та ін. Системи позиційного управління відіграють важливу роль у забезпеченні точності та стабільності технологічного процесу прокатки. Основа цих систем — слідкуючий привід, який є замкнутою активною динамічною системою, що управляє переміщенням об'єкта регулювання. При цьому регульована величина з тим чи іншим ступенем точності відтворює переміщення, задане управляючим впливом. У багатьох машинах і агрегатах виникає необхідність регулювання положення виконавчих позиційних механізмів, у тому числі в металургійних агрегатах. Основна вимога, яка пред'являється до досліджуваних електроприводів, полягає в забезпеченні необхідної точності установки механізму в задану точку простору та в забезпеченні необхідного характеру руху робочого органу. Це робить актуальним завдання розробки та оптимізації систем автоматичного керування механізмами позиціонування. У статті розглянуто принципи побудови систем позиційного управління механізмами прокатних клітей товстолистових станів, наведені структурна та функціональна схеми системи програмного позиційного управління, описана цифро-аналогова система позиційного програмного автоматичного управління механізмами прокатних станів, розроблена Науково-виробничою корпорацією «Київський інститут автоматки» та застосована на кількох товстолистових станах.

Ключові слова: системи позиційного управління, механізми прокатних станів, цифро-аналогові системи, автоматизований електропривід.

Abstract. The article discusses position control systems for rolling mill mechanisms provide automatic control of the following rolling mill mechanisms: lifting tables, pushers, slab receivers, guide rails, pressure devices for the working rolls of the stands, mechanisms for moving burners and the bridge of flame-cutting units, coiler gap adjustment mechanisms, width gauge carriages, etc. Such systems play an important role in ensuring accuracy and stability of the rolling technological process. The basis of these systems is a servo drive, which is a closed active dynamic system that controls the movement of the controlled object. In this case, the regulated value, with a certain degree of accuracy, reproduces the movement specified by the control impact. In many machines and units, there is a need to regulate the positions of executive positioning mechanisms, including those in metallurgical units. The main requirement for the studied electric drives is to ensure the required accuracy of mechanism installation in a specified point in space and to provide the required motion characteristics of the working element. This makes the task of developing and optimizing automatic control systems for positioning mechanisms relevant. The paper examines the principles of constructing position control systems for mechanisms of heavy plate rolling mill stands, presents structural and functional diagrams of a program-based position control system, describes a digital-analog position program automatic control system for rolling mill mechanisms developed by the Scientific and Production Corporation "Kyiv Institute of Automation", and applied on several heavy plate mills.

1. Вступ

Системи позиційного управління механізмами прокатних станів забезпечують автоматичне управління такими робочими механізмами прокатних станів: підйомними столами, штовхачами, приймачами слябів, направляючими лінійками, натискними пристроями робочих валків клітей, механізмами переміщення пальників і моста агрегатів вогневого різання, механізмами встановлення розчину моталок, кареток вимірювачів ширини та ін. При створенні сучасних АСУ ТП, побудованих за ієрархічним принципом, автоматичну реалізацію уставок на положення робочих механізмів здійснюють локальні системи. До них пред'являються дві основні вимоги: досягнення необхідної точності й висока швидкодія, що передбачає максимальне використання можливостей електроприводу механізму [1–6].

Метою цієї статті є опис принципів побудови систем позиційного управління механізмами прокатних клітей товстолистових станів.

2. Системи позиційного управління механізмами прокатних клітей товстолистових станів (ТЛС)

Розглянемо системи позиційного управління на прикладі управління механізмами ТЛС [7–9]. При управлінні натискними механізмами клітей ТЛС, а також іншими позиційними механізмами, необхідно, щоб система автоматизованого електропривода по заздалегідь заданих програмах або за розрахунковими завданнями відпрацьовувала завдання на переміщення робочих органів механізмів. До систем позиційного управління пред'являються вимоги високої швидкодії (мінімально можливого часу переміщення), великої точності зупинки механізму в заданому положенні, відсутності чи мінімальної величини перерегулювання по керованій координаті.

2.1. Структура позиційної системи

До складу системи позиційного управління (рис. 1 а) входить система автоматизованого електропривода (обведена штриховими лініями), в якій регульованою координатою є швидкість двигуна v , а керуючим впливом — сигнал U_1 .

Регульованою координатою у позиційній системі є шлях переміщення механізму H_ϕ . Тому на виході системи встановлюється датчик положення ДП з інтегральною передавальною функцією, що перетворює швидкість обертання двигуна в шлях:

$$H_\phi(p) = K_{ДП}(p)v(p) = \frac{K_{ДП}}{p}v(p), \quad (1)$$

де H_ϕ — поточний шлях переміщення чи фактичне положення механізму у час роботи; $K_{ДП}$ — коефіцієнт посилення датчика положення механізму, розмірність якого залежить від способів вимірювання та подання шляху переміщення [10, 11].

На вході системи позиційного управління порівнюються задане H_s та фактичне H_ϕ положення механізмів, що характеризують величину неузгодженості

$$h = H_s - H_\phi, \quad (2)$$

яка після відповідних перетворень є керуючим сигналом U_1 на вході системи управління електроприводом. Залежно від способу подання сигналу негативного зворотного зв'язку H_ϕ

відповідним чином перетворюємо сигнал завдання H'_3 . Наприклад, якщо ДП — дискретний перетворювач (імпульсний чи кодовий), то величину завдання H'_3 також подають у цифровому коді. У цьому ж коді отримують величину неузгодженості h' . Перетворювач положення ПП перетворює код h' в аналогову величину неузгодженості (напряга) h , яка потім подається на вхід регулятора положення РП.

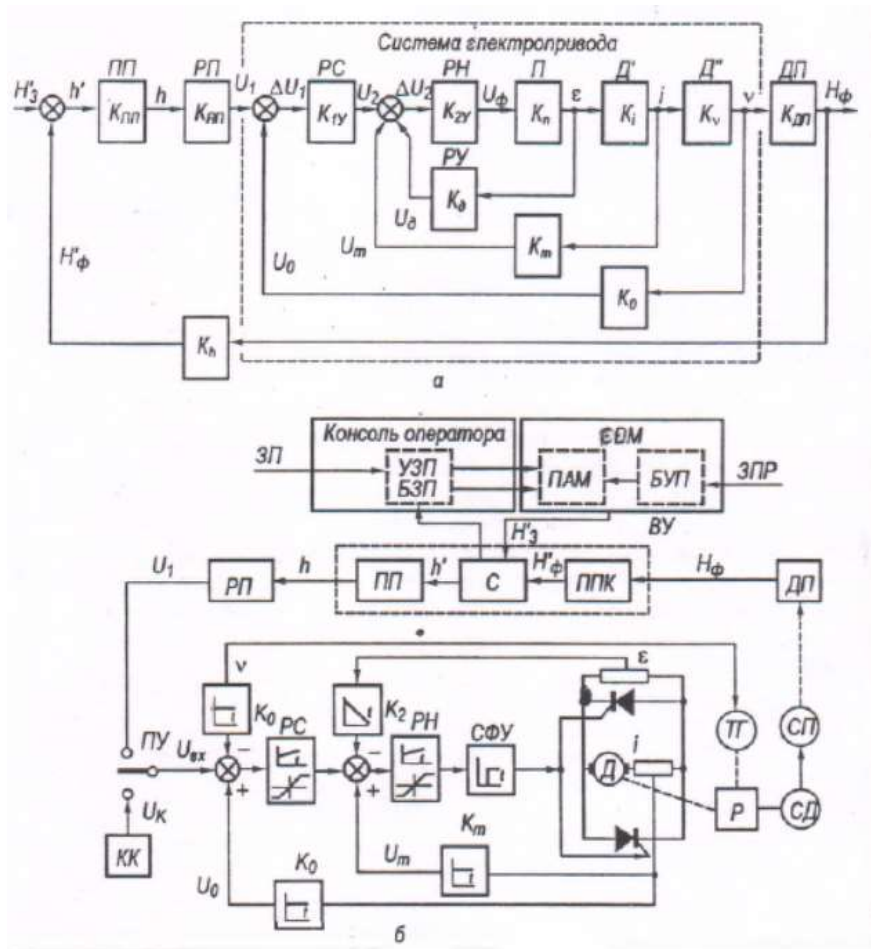


Рисунок 1 — Структурна (а) та функціональна (б) схеми системи програмного позиційного управління:

ПП — перетворювач положення, РП — регулятор положення, РС — регулятор швидкості, Д — двигун, ДП — датчик положення, ПЗУ — пристрій задачі програм, БУП — блок управління прокаткою; УЗП — пристрій запису програм, БЗП — блок запису програм, ПАМ — пам'ять у ПЗУ, ВУ — обчислювальний пристрій у складі суматора С, ПП та перетворювача положення в код ППК, КК — командоконтролер, ЗП — задача програм, ЗПР — задача режимів прокатки

Величина напруги U_1 на вході замкнутого контуру регулювання швидкості v визначає її величину. Тому регулятор положення РП повинен обмежувати U_1 на рівні, відповідному номінальній швидкості двигуна. Крім того, в системі регулювання з обмеженнями координат оптимальний зв'язок між неузгодженістю і швидкістю нелінійний (у межах руху, де швидкість не обмежена):

$$h(\tau) = \frac{v^2(\tau)}{4} \quad (3)$$

і представляє собою квадратичну параболу. Отже, регулятор *РП* для забезпечення оптимальної динаміки у системі позиційного регулювання повинен мати нелінійну характеристику. Нелінійний взаємозв'язок (3) може бути отриманий і при лінійній із насиченням характеристиці регулятора *РП* [10, 11]. Для цього на його вхід, крім сигналу неузгодженості, подається сигнал негативного зворотного зв'язку по квадрату швидкості:

$$h_T = \beta_T v^2(\tau), \quad (4)$$

а якщо система керування електроприводом не інваріантна по відношенню до змін статичного моменту двигуна, то функція (4) у загальному випадку набуде вигляду

$$h_T(v) = \beta_0 + \beta_{T1}v(\tau) + \beta_{T2}v^2(\tau). \quad (5)$$

Цю функцію іноді називають гальмівною. Обидва варіанти введення нелінійності до системи позиційного регулювання еквівалентні. Вибір того чи іншого варіанта визначається технічними міркуваннями при проектуванні системи.

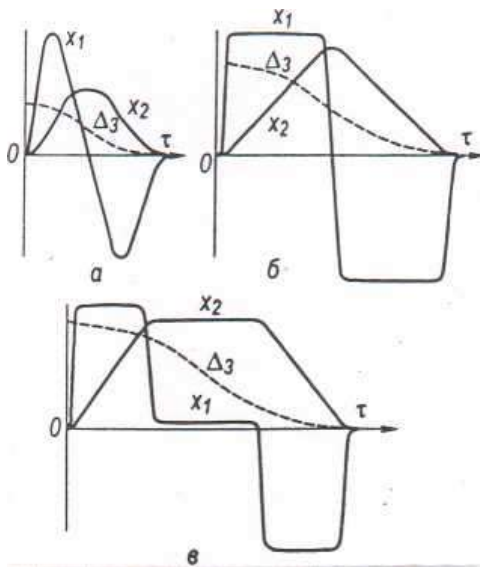


Рисунок 2 — Графіки відпрацювання неузгодженості системою електропривода з обмеженнями

Залежно від величини заданих переміщень (2) система (рис. 1 а) може мати три режими роботи:

а) малих переміщень, коли жодна з керованих координат не досягає величини обмеження (рис. 2 а);

б) середніх переміщень, коли прискорення електродвигуна досягає граничної постійної величини (рис. 2 б);

в) великих переміщень, яким відповідає ділянка руху зі швидкістю, що встановилася (рис. 2 в).

Графіки (рис. 2) відповідають оптимальному настроюванню позиційної системи з нелінійним регулятором положення *РП* для середніх та великих переміщень. При малих переміщеннях нелінійність регулятора *РП* не потрібна, оскільки всі координати змінюються за лінійними законами.

Якби в позиційній системі, що розглядається, був застосований лінійний регулятор положень *РП*, то при середніх і великих величинах заданих переміщень

перехідні процеси виявилися б неоптимальними для всіх завдань, крім одного, якому може відповідати оптимальне налаштування. При цьому відхилення завдань у бік зменшення призведе до їх відпрацювання системою з передчасним уповільненням роботи двигуна та подальшим «підповзанням» механізму до заданого положення. Навпаки, відхилення завдань у бік збільшення викличе їхнє відпрацювання з перерегулюванням.

В обох випадках неоптимальної динаміки відпрацювання неузгодженостей з лінійним регулятором спостерігається додаткова втрата часу, що здебільшого є неприйнятним на практиці. Початкова ділянка нелінійної характеристики регулятора *РП*, яка використовується в системі на ділянках малих переміщень або після закінчення великих переміщень, повинна бути завжди лінеаризована. В іншому випадку порушується оптимальність динаміки на цій ділянці та з'являються значні перерегулювання.

Питання оптимізації динаміки позиційної системи детально розглянуто в [11].

2.2. Цифро-аналогова система позиційного управління

Цифрове подання завдань на переміщення механізму найбільш ефективно, так як програмування позиційного управління або розрахунок оптимальних завдань на переміщення з

урахуванням різних технологічних факторів роботи зазвичай виконуються засобами електронної обчислювальної техніки та ЕОМ. Тому системи позиційного управління найчастіше складаються з цифро-аналогових позиційних слідкуючих систем і цифрових систем програмування переміщень автоматичного розрахунку програм прокатки.

На рис. 1 б зображена цифро-аналогова система програмного автоматичного управління механізмами прокатних станів, розроблена Науково-виробничою корпорацією «Київський інститут автоматики» (НВК «КІА») та застосована на кількох ТЛС: станах 2 250 та 3 600 (Україна), стані 3 600 (Індія). Вона складається з позиційної цифро-аналогової слідкуючої системи та ЕОМ. До складу слідкуючої системи входять аналогова частина (система електропривода) і цифровий обчислювальний пристрій ВУ, за допомогою якого позиційна система в зовнішньому контурі замикається на шляху переміщення механізму [7–9].

До двигуна D через безлюфтовий редуктор P , електричний вал (сельсин-датчик CD і сельсин-приймач CP) приєднано 11-розрядний кодовий дискретний датчик положення $ДП$. Інформація про фактичне становище механізму H_ϕ подана у коді Грея. У блоці $ППК$ код Грея перетворюється на зворотний двійковий код H'_ϕ і надходить у суматор C , де порівнюється із завданням H'_z для наступного переміщення механізму. Після відповідних обчислень двійковий код неузгодженості h' надходить у перетворювач $ПП$, де перетворюється на напругу, пропорційну неузгодженню h . Напруга неузгодженості подається на вхід регулятора положення $РП$.

На вході регулятора швидкості $РС$ у системі електропривода передбачений перемикач управління $ПУ$. Якщо він у нижньому положенні, то на вхід системи надходить сигнал ручного управління U_K від командоконтролера $КК$. Для переходу на автоматичне управління механізмом перемикач $ПУ$ включається вгору, що призводить до замикання системи позиційного регулювання на шляху переміщення. У цьому випадку на вхід регулятора швидкості $РС$ подаватиметься вихідна напруга з регулятора $РП$. Параметри налаштування системи автоматичного керування тиристорним електроприводом, що входять у позиційну слідкуючу систему, залишаються однаковими як при ручному, так і при автоматичному управлінні.

Перетворення коду Грея на двійковий відбувається послідовно в 11 тактів відповідно до кількості розрядів. У суматорі C проводиться порозрядне додавання чисел. Частота обчислень обумовлена величиною максимальної швидкості механізму, тобто найбільшою частотою надходження імпульсів з молодшого розряду кодового датчика. У системі прийнята частота обчислень, що дорівнює 200 Гц. Операція кожного обчислення завершується перезаписом отриманої неузгодженості h' у регістр перетворювача положення $ПП$.

В ЕОМ входять пам'ять $ПАМ$, де фіксуються кілька заздалегідь записаних програм переміщення механізму, блок управління пам'яттю $БУП$, а також пристрої ручного запису $УЗП$ та блока $БЗП$ автоматичного запису програм, що відпрацьовуються оператором при ручному керуванні механізмом (перемикач $ПУ$ в нижньому положенні). Другий спосіб запису програм (через блок $БЗП$) є основним, крім того, він дозволяє в процесі роботи системи програмного управління за бажанням оператора вносити корекцію в раніше записану програму в процесі її відпрацювання.

Дискретні ланки схеми (рис. 1 б) $ДП$, $ППК$ та C можуть вважатися лінійними. Перетворювач коду в напругу $ПП$ у діапазоні неузгодженостей $0 \leq h' \leq 127$ (імпульси) є також приблизно лінійним, а при великих неузгодженостях настає його насичення. Лінійний діапазон перетворення обраний за умовами, щоб за будь-яких швидкостях двигуна в позиційній системі шлях гальмування повністю укладався б у лінійну область. Наявність обмеження в перетворювачі $ПП$ виключає необхідність застосування в регуляторі положення $РП$ обмеження для великих вхідних сигналів h , якщо верхня межа, що обмежує вихідний сигнал $ПП$, відповідає найбільшій робочій швидкості двигуна.

2.3. Особливості цифро-аналогової системи позиційного управління

Система (рис. 1 б) є імпульсною, тому що в каналі управління положенням є імпульсний елемент ДП, що перетворює безперервну величину швидкості двигуна в послідовність імпульсів. Крім того, у ВУ обчислюється різниця величин H'_z і H'_ϕ (неузгодженість h' у дискретному вигляді), яка потім знову перетворюється на аналогову функцію h , що надходить на вхід системи управління електроприводом. Якщо тривалість імпульсів, що посилаються кодовим датчиком ДП, мала в порівнянні з часом перехідних процесів в аналоговій частині системи регулювання, то при її дослідженні нехтують формою імпульсів і принципом модуляції.

При синтезі та дослідженнях цифро-аналогової системи реальні імпульси замінюються послідовністю δ функцій, що модулюються за площею. Реакція аналогової частини на імпульс типу δ функції є, як відомо, ваговою функцією, помноженою на площу імпульсу. Тому можна використовувати Z і W — перетворення для розрахунку систем ефективними частотними методами, розробленими для лінійних аналогових систем.

Вихідна статична характеристика $h = f(h')$ цифро-аналогового перетворювача ПП (рис. 3) є багатоступінчастою релейною характеристикою. Узгодженість h'_0 для ненасиченої ділянки характеристики вибираємо за умовами максимально можливого шляху гальмування механізму $h'_0 \geq h_{T.H}$. Для системи прийнято $h'_0 = 128$ імпульсів. Це означає, що середня ділянка статичної характеристики складається з 128 ступенів. Таку багатоступінчасту



Рисунок 3 — Вихідна статична характеристика цифро-аналогового перетворювача в схемі рис. 1 б

часту характеристику допустимо замінити лінійною, в результаті чого система, яка розглядається, зводиться до лінійної імпульсної, що піддається дослідженню методом логарифмічних частотних характеристик.

Між кількістю рівнів статичної характеристики перетворювача ПП N і числом двійкових розрядів існує взаємозв'язок $N = 2^n - 1$, звідки і кількість розрядів, що укладаються в лінійну ділянку характеристики

$$n = \frac{\lg(N+1)}{\lg 2} = \frac{2,107}{0,301} = 7, \quad (6)$$

а решта — 4 розряди (із загального числа 11) виходять в область насичення перетворювача ПП.

3. Висновки

У багатьох машинах і агрегатах виникає необхідність регулювання положення виконавчих позиційних механізмів, у тому числі в металургійних агрегатах. Основна вимога, яка пред'являється до досліджуваних електроприводів, полягає в забезпеченні необхідної точності установки механізму в задану точку простору та в забезпеченні необхідного характеру

руху робочого органу. Це робить актуальним завдання розробки та оптимізації систем автоматичного керування механізмами позиціонування.

У статті розглянуто принципи побудови систем позиційного управління механізмами прокатних клітей товстолистових станів, описана цифро-аналогова система позиційного програмного автоматичного управління механізмами прокатних станів, розроблена НВК «КІА» та застосована на кількох ТЛС.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Архангельский В.И. Алгоритмы и техническая реализация систем прямого цифрового управления. М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1978. 55 с.
2. Архангельский В.И., Богаенко И.Н., Васичкин В.И. и др. АСУ листопрокатных станов. М.: Металлургия, 1994. 334 с.
3. Грабовский Г.Г., Корбут В.Б., Иевлев Н.Г. Автоматизированное управление осепрокатным станом. *Металл и литье Украины*. 2015. № 1. С. 28–32.
4. Ієвлев М.Г., Грабовський Г.Г. Автоматизована система керування агрегатами вогневого різання плит на товстолистовому стані. *Математичні машини і системи*. 2021. № 1. С. 86–95.
5. Твардовский В.П., Иевлев Н.Г., Ганчич Г.Г., Полещук В.В., Жуков С.В., Калюжный Л.С. Устройство автоматического управления механизмом перемещения нажимных винтов реверсивных станов горячей прокатки. А.с. 1186303 СССР; опубл. 23.10.1985, Бюл. № 39.
6. Твардовский В.П., Иевлев Н.Г., Полещук В.В., Калюжный Л.С., Евдоксин А.В. Устройство для автоматического управления нажимными механизмами листовых станов горячей прокатки. А.с. 1271598 СССР; опубл. 23.11.1986, Бюл. № 43.
7. Бычков С.М., Герзон С.Г., Рудич А.А. Системы цифрового регулирования механизмов прокатных станов. *Автоматизация станов горячей прокатки*. К.: Киевский институт автоматизации, 1980. С. 152–159.
8. Архангельский В.И., Бычков С.М., Герзон С.Г. и др. Цифровой позиционный регулятор для АСУ ТП прокатных станов. *Автоматизация прокатных станов*. М.: Металлургия, 1976. С. 246–250.
9. Бычков С.М., Шуляк В.Д., Гавенда И.Ю., Рудич А.А. Цифровые системы регулирования положения механизмов прокатных станов. *Автоматизированные системы управления технологическими процессами в прокатном производстве*. К.: Киевский институт автоматизации, 1978. С. 115–124.
10. Архангельский В.И. Системы реверсивных электроприводов. К.: Техника, 1972. 328 с.
11. Грабовский Г.Г. ИАСУ толстолистовыми прокатными станами. К.: Техника, 2001. 448 с.

Стаття надійшла до редакції 27.01.2026 / прийнята до друку 28.04.2026