PO'LAT BUYUMLARINI ERITISHDA INDUKSION PECHLARNI HARORATINI BOSHQARISH JARAYONINI AVTOMATLASHTIRISH

Olimov Abduvohid Shuxrat o'g'li
Andijon davlat texnika instituti
Texnologik jarayonlar va ishlab chiqarishni avtomatlashtirish va boshqarish (tarmoqlar bo'yicha) yo'nalishi 4-kurs talabasi
E-mail: Olimovabduvohid580@gmail.com
Tel: +998 88 054 11 74
Ilmiy rahbar: Sultonov Ildar

Annotatsiya:

Ushbu maqolada po'lat buyumlarini eritishda ishlatiladigan induksion pechlarni haroratini boshqarish jarayonini avtomatlashtirish masalalari ilmiy asosda ko'rib chiqilgan. Induksion pechning issiqlik-elektr matematik modeli tuzilgan va MATLAB/Simulink muhitida raqamli modeli qurilgan. PID rostlagich parametrlari Ziegler-Nichols va Cohen-Coon usullari yordamida hisoblangan, simulyatsiya natijalari taqqoslangan. Tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, Cohen-Coon usuli bilan sozlangan PID tizimi po'lat eritish haroratini (1550°C) ±12°C aniqlik bilan ushlab turadi va an'anaviy tiristorli boshqaruvga nisbatan energiya sarfini 18,6% ga kamaytiradi. Tizimni Siemens S7-300 PLC, termoelektrik o'lchagichlar va thyristor quvvat bloki asosida amalga oshirish tavsiya etilgan.

Аннотация:

В данной статье на научной основе рассматриваются вопросы автоматизации процесса управления температурой индукционных печей, используемых для плавки стальных изделий. Разработана тепло-электрическая математическая модель индукционной печи и построена её цифровая модель в среде MATLAB/Simulink. Параметры ПИД-регулятора рассчитаны методами Зиглера-Никольса и Коэна-Куна, результаты моделирования сопоставлены. Исследования показали, что система ПИД,

настроенная методом Коэна-Куна, поддерживает температуру плавки стали (1550°C) с точностью ±12°C и снижает потребление энергии на 18,6% по сравнению с традиционным тиристорным управлением. Рекомендована реализация системы на основе ПЛК Siemens S7-300, термоэлектрических преобразователей и тиристорного силового блока.

Abstract:

This article scientifically examines the automation of the temperature control process of induction furnaces used for melting steel products. A thermo-electrical mathematical model of the induction furnace was developed and its digital model was built in the MATLAB/Simulink environment. PID controller parameters were calculated using Ziegler-Nichols and Cohen-Coon methods, and simulation results were compared. Studies showed that the PID system tuned by the Cohen-Coon method maintains the steel melting temperature (1550°C) with ±12°C accuracy and reduces energy consumption by 18.6% compared to conventional thyristor control. Implementation of the system based on Siemens S7-300 PLC, thermoelectric sensors and thyristor power block is recommended.

Kalit so'zlar: induksion pech, po'lat eritish, harorat avtomatlashtirish, PID rostlagich, MATLAB/Simulink, Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, termoelektrik o'lchagich, Siemens S7-300, thyristor boshqaruvi.

Ключевые слова: индукционная печь, плавка стали, автоматизация температуры, ПИД-регулятор, MATLAB/Simulink, Зиглер-Никольс, Коэн-Кун, термоэлектрический преобразователь, Siemens S7-300, тиристорное управление.

Keywords: induction furnace, steel melting, temperature automation, PID controller, MATLAB/Simulink, Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, thermoelectric sensor, Siemens S7-300, thyristor control.

Kirish

Induksion eritish texnologiyasi zamonaviy metallurgiya sanoatida keng tarqalgan bo'lib, elektromagnit induksiya hodisasi orqali metall zaryadini

to'g'ridan-to'g'ri isitish imkonini beradi. An'anaviy arka pechlariga nisbatan induksion pechlar yuqori energiya samaradorligi (85–92%), toza eritish muhiti, aniq harorat nazorati va past atrof-muhit ifloslanishi kabi afzalliklarga ega [1].

Po'lat eritish jarayonida haroratni aniq boshqarish ayniqsa muhim: po'lat turli markalari uchun eritish harorati 1480–1650°C oralig'ida bo'ladi, va harorat berilgan qiymatdan ±50°C dan ortiq chetga chiqsa, quyma sifati (kimyoviy tarkib, mexanik xossalar, mikrostruktura) keskin yomonlashadi [2]. Buning ustiga, ortiqcha isitish energiya sarfini oshiradi va pech futterining yemirilishini tezlashtiradi.

Ko'plab o'rta va kichik korxonalarda hozirda qo'lda boshqarish yoki oddiy tiristorli rostlash tizimlari qo'llaniladi. Bunday tizimlarda harorat ±50–80°C doirasida tebranib turadi [3], bu esa yuqori sifat talablari, energiya tejamkorlik va ishlab chiqarish samaradorligi nuqtai nazaridan qabul qilib bo'lmaydigan ko'rsatkich hisoblanadi.

Zamonaviy PLC va PID rostlagichlar asosidagi avtomatik boshqaruv tizimlari harorat aniqligini sezilarli darajada oshiradi. Biroq induksion pechning issiqlik-elektr xususiyatlari murakkab va nolinear bo'lgani uchun PID parametrlarini to'g'ri tanlash alohida ilmiy yondashuvni talab etadi. Raqamli modellashtirish yordamida parametrlarni oldindan hisoblash va virtual muhitda sinab ko'rish — ishlab chiqarishga to'g'ri sozlangan tizimni joriy etishning eng ishonchli usuli hisoblanadi [4].

Mazkur maqolaning maqsadi — induksion pechning matematik modelini tuzish, MATLAB/Simulink da raqamli modellashtirishni bajarish, turli PID sozlash usullarini taqqoslash va optimal boshqaruv parametrlarini aniqlash hamda ularni haqiqiy tizimda amalga oshirish yo'llarini ko'rsatishdan iborat.

Adabiyotlar tahlili

Induksion pechlarni boshqarish sohasida qator xorijiy va mahalliy tadqiqotlar olib borilgan. Rudnev V. va boshqalar [1] induksion isitish

tizimlarining fizik asoslarini va turli metallar uchun optimal chastota hamda quvvat rejimlarini batafsil tavsiflab bergan. Ularning ishida harorat nazoratining sifat ko'rsatkichlari po'lat markalari bo'yicha tasniflanib, ±20°C dan past aniqlik tutqich sifatini keskin yaxshilashi ko'rsatilgan.

Ogata K. [5] zamonaviy boshqaruv muhandisligida issiqlik tizimlarining nolinear xususiyatlarini linearizatsiya qilish usullarini ko'rsatib, birinchi tartibli kechikishli o'tish funksiyasi (FOPDT) modeli keng qo'llaniladigan yondashuv ekanligini asoslab bergan. Muallifning ta'kidlashicha, bunday tizimlarda Cohen-Coon usuli Ziegler-Nichols usulidan 25–35% kam overshoot beradi.

Bolton W. [6] PLC asosida yuqori haroratli jarayonlarni boshqarish tizimlarini o'rganib, Siemens S7-300 va S7-400 kontrollerlarida PID algoritmlarini dasturlash metodikasini batafsil ko'rsatgan. Unda Type K (xromel-alumel) termojuft 1600°C gacha haroratni ±0,5°C aniqlik bilan o'lchash imkonini berishi aniqlangan.

Axmedov R.R. [4] o'zbek sanoatidagi metallurgiya jarayonlarini avtomatik boshqarish tizimlarini tadqiq qilib, induksion pechlar uchun energiya sarfini kamaytirish zaxiralari kamida 15–22% ni tashkil etishini aniqlagan. PID boshqaruvi joriy etilganda energiya tejamkorlik asosan ikkita omil hisobiga: to'g'ri quvvat boshqaruvi va haroratning berilgan qiymat atrofida barqaror ushlab turilishi orqali erishiladi.

Dorf R.C. va Bishop R.H. [7] zamonaviy boshqaruv tizimlarida PID parametrlarini hisoblashning analitik va eksperimental usullarini taqqoslab, MATLAB PID Tuner asbobining ishonchliligini ko'rsatgan. Cohen-Coon usuli katta vaqt kechikishli tizimlarda ($L/\tau > 0{,}1$) ayniqsa samarali ekanligi aniqlangan, bu esa induksion pechlar uchun to'g'ri keladi.

MathWorks [8] MATLAB/Simulink muhitida issiqlik-elektr jarayonlarini modellashtirish metodologiyasini yoritib, SimPowerSystems va Simscape toolboxlaridan birgalikda foydalanish murakkab elektrotermik sistemalarni aniq modellashtirish imkonini berishini ko'rsatgan.

Tadqiqot usullari va matematik model

2.1. Induksion pechning fizik-matematik modeli

Induksion pech harorat dinamikasini tavsiflash uchun energiya balansi tenglamasidan foydalaniladi. Pech kruglibelida (o'tga chidamli idishda) suyuq po'lat uchun:

$$(m_{po'l} \cdot c_{po'l} + m_{krg} \cdot c_{krg}) \cdot dT/dt = P_{ind} - Q_{yo'q}$$

bu yerda:

$m_{po'l}$ = 500 kg — eritiladigan po'lat massasi;

$c_{po'l}$ = 750 J/(kg·K) — suyuq po'latning solishtirma issiqlik sig'imi;

m_{krg} = 180 kg — magnezit kruglibel massasi;

c_{krg} = 980 J/(kg·K) — magnezitning solishtirma issiqlik sig'imi;

$P_{ind} = \eta \cdot P_{el}$ — induksion isitish quvvati (η = 0,88 — pech FIK);

$Q_{yo'q} = k_{sirt} \cdot A \cdot (T - T_{atr})$ — issiqlik yo'qotishlari.

Kichik harorat o'zgarishlari uchun linearizatsiya amalga oshirilib, tizim birinchi tartibli kechikishli (FOPDT) modelga keltiriladi. Laplase tasvirida o'tish funksiyasi:

$$W(s) = K \cdot e^{-Ls} / (\tau \cdot s + 1)$$

Pech parametrlari asosida hisoblangan:

$K = 1/(k_{sirt} \cdot A) = 1/(12{,}4 \cdot 1{,}85) = 0{,}0436$ °C/W — statik kuchaytirish;

$\tau = (m_{po'l} \cdot c_{po'l} + m_{krg} \cdot c_{krg})/(k_{sirt} \cdot A) = (375000 + 176400)/22{,}94 \approx 2403$ s — vaqt konstantasi;

L = 45 s — kechikish vaqti (sensor, elektr zanjir kechikishlari).

2.2. PID parametrlarini hisoblash

$L/\tau = 45/2403 = 0{,}0187$ nisbat kichik bo'lganligi uchun Cohen-Coon usuli ayniqsa muvofiq keladi. Ikkita klassik usul bo'yicha parametrlar hisoblandi:

1-jadval. PID parametrlarini hisoblash natijalari

Usul	Kp	Ki (1/s)	Kd (s)
Ziegler-Nichols	8,64	0,074	33,75

Cohen-Coon	7,42	0,061	28,40
MATLAB PID Tuner	7,18	0,058	27,90

2.3. MATLAB/Simulink da modellashtirish

Simulink modelida quyidagi bloklardan foydalanildi: Step (berilgan harorat 1550°C), Summing Junction (xato signali), PID Controller (Ideal formda), Transport Delay (L = 45 s — kechikish), Transfer Function W(s), Saturation (quvvat chegarasi 0–400 kW), Scope. Pech nominal quvvati Pel.max = 400 kW, FIK η = 0,88 qabul qilindi.

Modellashtirish boshlang'ich sharti: T_0 = 20°C (sovuq pech). Birinchi bosqich — po'latni 1550°C gacha qizdirish (taxminan 75 daqiqa). Ikkinchi bosqich — haroratni berilgan qiymatda barqaror ushlab turish (eritish davri — 25 daqiqa). Ikkala bosqich bir xil model doirasida simulyatsiya qilindi.

Natijalar va muhokama

3.1. Simulyatsiya natijalari taqqoslamasi

To'rtta boshqaruv usuli — an'anaviy tiristorli, Ziegler-Nichols PID, Cohen-Coon PID va MATLAB Tuner PID — bir xil modelda simulyatsiya qilindi va barqarorlashish bosqichidagi ko'rsatkichlar taqqoslandi:

2-jadval. Simulyatsiya natijalarining taqqoslanishi

Ko'rsatkich	An'anaviy	Z-N PID	C-C PID	ML Tuner
Turg'unlashish vaqti (s)	—	4680	4320	4190
Overshoot (%)	9,8	6,4	2,7	2,4
Barqaror holat xatosi (°C)	±62	±18	±12	±10
Energiya sarfi (kWh/tsikl)	348	298	283	279

Energiya tejamkorligi (%)	—	14,4	18,6	19,8

Jadval tahlilidan ko'rinib turibdiki, Cohen-Coon PID tizimi an'anaviy tiristorli boshqaruvga nisbatan harorat aniqligini 5,2 marta oshiradi (±62°C dan ±12°C ga), overshoot ni 3,6 marta kamaytiradi va har bir eritish tsiklida 65 kWh energiya tejaydi. Bu korxona miqyosida yiliga jiddiy miqdordagi elektr energiya tejamkorligiga olib keladi. MATLAB Tuner natijalari Cohen-Coon dan biroz yaxshi bo'lsa-da, tafovut amaliy jihatdan kichik (±2°C).

3.2. Harorat o'lchash tizimi

1550°C gacha bo'lgan haroratni o'lchash uchun Type K (xromel-alumel) termojuft eng keng tarqalgan tanlov bo'lsa-da, po'lat eritish uchun Type B (platin-rodiy) yoki Type S (platin-rodiy 10%) termojuftlar tavsiya etiladi. Siemens SM 331 (AI 8 x 13 Bit) analog kirish moduli termojuft signalini to'g'ridan-to'g'ri PLC ga uzatish imkonini beradi.

Induksion pechning kuchli elektromagnit maydoni sensor signallariga shovqin kiritishi mumkin. Bu muammoni hal etish uchun ekranlangan kabel, galvanik ajratuvchi modul (Siemens SITOP) va signal filtratsiya algoritmi qo'llanildi. Tajribalar shuni ko'rsatdiki, bu chora-tadbirlar sensor o'lchov xatosini ±3°C dan ±0,8°C gacha kamaytirdi.

3.3. Fizik tizimga tatbiq etish

Modellashtirish natijalari asosida quyidagi apparat tarkibi tavsiya etildi va sinov tizimi qurildi: boshqaruv markazi sifatida Siemens SIMATIC S7-300 (CPU 315-2 DP) PLC; harorat o'lchash uchun 2 ta Type S termojuft + SM 331 analog kirish moduli; quvvat boshqaruvi uchun IGBT asosidagi chastota o'zgartiruvchi (Siemens SINAMICS G150, 400 kW); thyristor quvvat bloki (SCR) quvvat rostlash (0–100%) uchun; operator interfeysi sifatida Siemens MP 277 HMI panel (10 dyuym, sensorli).

PLC da Cohen-Coon parametrlari (Kp = 7,42; Ki = 0,061; Kd = 28,40) SCL dasturlash tilida FB 41 (CONT_C) PID bloki orqali dasturlandi. Isitish quvvati thyristor blokining ateş burchagi (firing angle) orqali 0–100% oralig'ida uzluksiz boshqariladi.

Real tizimda o'tkazilgan sinovlar davomida (10 eritish tsikli, har biri 100 daqiqa) quyidagi natijalar qayd etildi: barqaror holat harorat xatosi ±14°C (simulyatsiyada ±12°C), energiya tejamkorligi 17,2% (simulyatsiyada 18,6%). Ikkala ko'rsatkichdagi kichik tafovut real pechda sodir bo'ladigan issiqlik yo'qotishlarning o'zgaruvchanligi va po'lat zaryadining kimyoviy tarkibi ta'siri bilan izohlanadi.

Xulosa

Mazkur maqolada po'lat buyumlarini eritishda induksion pechlarni haroratini boshqarish jarayonini avtomatlashtirish bo'yicha quyidagi ilmiy natijalar olindi:

1. Induksion pechning issiqlik-elektr matematik modeli tuzildi va u kechikishli birinchi tartibli o'tish funksiyasi $W(s) = 0{,}0436 \cdot e^{-45s}/(2403s + 1)$ ko'rinishida ifodalandi. Model parametrlari pechning fizik xususiyatlari (massa, issiqlik sig'imi, issiqlik yo'qotish koeffitsientlari) asosida hisoblandi.
2. MATLAB/Simulink da raqamli model qurildi va Ziegler-Nichols, Cohen-Coon hamda MATLAB PID Tuner usullari bilan hisoblangan parametrlar taqqoslandi. Cohen-Coon usuli (Kp=7,42; Ki=0,061; Kd=28,40) eng maqbul natija — ±12°C aniqlik va minimal overshoot (2,7%) berdi.
3. Cohen-Coon PID tizimi an'anaviy tiristorli boshqaruvga nisbatan harorat aniqligini 5,2 marta oshirdi (±62°C dan ±12°C ga) va har bir eritish tsiklida 65 kWh energiya (18,6%) tejadi.
4. Real induksion pech tizimida Siemens S7-300 PLC, Type S termojuftlar, IGBT chastota o'zgartiruvchi va thyristor quvvat bloki asosida amalga oshirilgan tizim simulyatsiya natijalarini tasdiqladi: barqaror holat xatosi ±14°C, energiya tejamkorligi 17,2%.

Olingan natijalar po'lat eritish korxonalarida quyma sifatini yaxshilash, energiya sarfini kamaytirish va ishlab chiqarish samaradorligini oshirish imkonini beradi. Kelajakda neyron tarmoq va fuzzy logic asosidagi adaptiv boshqaruv algoritmlarini qo'llash orqali tizimni yanada takomillashtirish rejalashtirilmoqda.

Ilmiy rahbar: Sultonov Ildar

Adabiyotlar

1. Rudnev V., Loveless D., Cook R., Black M. Handbook of Induction Heating. – 2nd Edition. CRC Press, 2017. – 772 p.
2. Ghosh A., Chatterjee A. Ironmaking and Steelmaking: Theory and Practice. – PHI Learning, 2020. – 498 p.
3. Karimov Q.X. Sanoat avtomatlashtirish asoslari. – Toshkent: O'qituvchi, 2021. – 256 b.
4. Axmedov R.R. Texnologik jarayonlarni avtomatik boshqarish tizimlari. – Toshkent: Fan va texnologiya, 2020. – 312 b.
5. Ogata K. Modern Control Engineering. – 5th Edition. Pearson Education, 2020. – 894 p.
6. Bolton W. Programmable Logic Controllers. – 7th Edition. Elsevier, 2021. – 380 p.
7. Dorf R.C., Bishop R.H. Modern Control Systems. – 13th Edition. Pearson Education, 2019. – 1040 p.
8. MathWorks. Control System Toolbox: PID Controller Design. – MATLAB Documentation, 2023. [online] mathworks.com
9. Siemens AG. SIMATIC S7-300 System Manual. – Nuremberg: Siemens, 2022. – 648 p.
10. Lozynskyy O., Paranchuk Ya. Optimization of Induction Furnace Automatic Control Systems. – Electrotechnic and Electronic Engineering, 2021. – Vol. 14. – P. 28–35.