PO‘LAT QUYISH JARAYONLARINI INTELLEKTUAL BOSHQARISH TIZIMI ALGORITMLARI

Hakimova Gulmira Azim qizi

Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti tayanch doktoranti.

E-mail: gulmira.hakimova.17.12@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqolada po‘lat quyish jarayonlarini avtomatlashtirishda sun’iy intellekt algoritmlarini qo‘llashning ilmiy asoslari tahlil qilinadi. Po‘lat quyish jarayoni issiqlik uzatish, metall oqimi, harorat va sath parametrlarining o‘zaro bog‘liqligi sababli murakkab, noaniq va kechikishlarga sezgir tizim hisoblanadi. Shu sababli an’anaviy PID boshqaruv tizimlari bunday jarayonlarda optimal natija bermaydi [11]. Mazkur tadqiqotda fuzzy-neural va model-predictive control (MPC) yondashuvlari asosida intellektual boshqaruv algoritmlari ishlab chiqilgan [1], [2], [5]. Natijalar po‘lat quyish jarayonining barqarorligini oshirish, energiya sarfini kamaytirish va metall sifatini yaxshilash imkonini beradi.

Kalit so‘zlar: po‘lat quyish, avtomatlashtirish, intellektual boshqaruv, fuzzy-neural tizim, model-predictive control, issiqlik jarayoni, optimallashtirish.

Abstract. This article analyzes the scientific foundations of applying artificial intelligence algorithms in the automation of steel casting processes. Due to the interdependence of heat transfer, molten metal flow, temperature, and level parameters, the steel casting process is considered a complex, uncertain, and delay-sensitive system. Therefore, conventional PID-based control systems do not provide optimal performance under such conditions [11]. In this study, intelligent control algorithms based on fuzzy-neural and model-predictive control (MPC) approaches were developed [1], [2], [5]. The results demonstrate that the proposed methods improve the stability of the steel casting process, reduce energy consumption, and enhance metal quality.

Keywords: steel casting, automation, intelligent control, fuzzy-neural system, model-predictive control, thermal process, optimization.

Аннотация. В статье анализируются научные основы применения алгоритмов искусственного интеллекта в автоматизации процессов разливки стали. Из-за взаимосвязанности теплообмена, потока расплавленного металла, параметров температуры и уровня процесс разливки стали относится к сложным, неопределённым и чувствительным к запаздываниям системам. Поэтому традиционные системы управления на основе PID-регуляторов не обеспечивают оптимального результата в таких условиях [11]. В данном исследовании разработаны интеллектуальные алгоритмы управления на основе подходов fuzzy-neural и model-predictive control (MPC) [1], [2], [5]. Полученные результаты показывают, что предложенные методы

ISSN 3030-3907

повышают устойчивость процесса разливки стали, снижают энергопотребление и улучшают качество металла.

Ключевые слова: разливка стали, автоматизация, интеллектуальное управление, fuzzy-neural система, model-predictive control, тепловой процесс, оптимизация.

1. Kirish

So‘nggi yillarda dunyo miqyosida metallurgiya sanoati ishlab chiqarishning strategik tarmoqlaridan biriga aylandi. **World Steel Association (WSA)** ma’lumotlariga ko‘ra, 2024-yilda global po‘lat ishlab chiqarish hajmi **1,89 mlrd tonna**ni tashkil etgan bo‘lib, bu 2019-yilga nisbatan **4,3 % o‘sishni** anglatadi [14]. Eng yirik ishlab chiqaruvchilar — Xitoy (52 %), Hindiston (8 %), Yaponiya (5 %) va Rossiya (4 %) hisoblanadi.

O‘zbekiston metallurgiya sohasi ham so‘nggi besh yilda sezilarli rivojlanish bosqichini bosib o‘tdi. O‘zbekiston Respublikasi Statistika agentligi ma’lumotlariga ko‘ra, 2019–2024-yillar oralig‘ida po‘lat ishlab chiqarish hajmi **1,08 mln tonnadan 1,52 mln tonnagacha** oshgan [15]. Bu ko‘rsatkich o‘rtacha **7,5 % yillik o‘sish** sur’atini aks ettiradi.

Bu o‘sish jarayoni metallurgiya ishlab chiqarishida raqamlashtirish, avtomatlashtirish va intellektual boshqaruv tizimlariga bo‘lgan talabni oshirdi [18], [19]. Po‘lat quyish jarayoni metall ishlab chiqarishning eng muhim bosqichlaridan biri bo‘lib, unda metallning fizik holati, issiqlik rejimi va kristallanish jarayoni bir vaqtda kechadi [4].

An’anaviy PID boshqaruv tizimlari ko‘p parametrli, kechikishlarga sezgir bo‘lgan bunday jarayonlarda yetarli aniqlikni ta’minlamaydi [13]. Shu sababli, sun’iy intellekt texnologiyalariga asoslangan yondashuvlar — fuzzy-neural tizimlar [1], MPC [2], hamda digital twin texnologiyalari [3] so‘nggi yillarda jadal rivojlanmoqda.

2023-yilda “Nippon Steel” kompaniyasining Smart Casting System platformasi real vaqt harorat nazoratini ±0,8 °C aniqlikkacha ta’minlagan [17]. Xitoyning “Baowu Group” kompaniyasi esa sun’iy intellektga asoslangan Surface Quality Control System orqali ishlab chiqarishdagi nuqsonlarni 6,2 % ga kamaytirishga erishgan [16].

O‘zbekiston metallurgiya korxonalari (Bekobod metallurgiya kombinati, O‘zmetkombinat, UzMetallurg) ham avtomatlashtirilgan raqamli boshqaruv tizimlarini joriy qilish bo‘yicha faol ishlamoqda [18], [19]. Ammo mavjud tizimlarning ko‘pchiligi hali to‘liq intellektual darajaga ega emas.

Shuning uchun ushbu tadqiqotning asosiy maqsadi — po‘lat quyish jarayonlarini intellektual boshqarish algoritmlari yordamida optimallashtirishdan iborat.

ISSN 3030-3907

2. Adabiyotlar tahlili (Literature Review)

Po‘lat quyish jarayonlarini avtomatlashtirish bo‘yicha ilmiy izlanishlar izchil rivojlanmoqda. Zhang va Wang fuzzy-logic asosidagi sath boshqaruv algoritmi yordamida sath tebranishlarini 12 % gacha kamaytirishga erishgan [1]. Kim va Lee MPC yordamida po‘lat quyish jarayonidagi kechikishlarni kompensatsiya qilish bo‘yicha samarali model taklif qilgan [2]. Liu esa Digital Twin asosidagi Smart Casting Framework ishlab chiqib, jarayonni to‘liq virtual monitoring qilish imkonini bergan [3].

Petrov kristallizator devorlaridagi issiqlik oqimini quyidagi tenglama bilan ifodalagan:

$$q = -k\frac{\partial T}{\partial n}$$

bu model issiqlik almashinish jarayonining aniqlik darajasini oshirgan [4].

Zhou va Chen inertsiya kechikishlarini kamaytirishga mo‘ljallangan adaptive MPC algoritmini ishlab chiqishgan [5]. Ito tomonidan ishlab chiqilgan ANFIS modeli metall haroratini yuqori aniqlikda boshqarishni ta’minlagan [6].

AI, IoT va CPS texnologiyalari asosida jarayonni masofadan monitoring qilish va tahlil qilish imkoniyatlari ham kengaymoqda [7], [8]. Machine learning asosidagi nuqsonlarni prognozlash modellari so‘nggi yillarda katta samaradorlik ko‘rsatmoqda [9], [10].

O‘zbekiston va MDH mamlakatlarida amalga oshirilayotgan tadqiqotlar ko‘proq klassik boshqaruv tizimlariga asoslangan [11], [12], [13].

Xorijiy tajribalarni tahlil qilish shuni ko‘rsatadiki:

- ❖ Fuzzy-neural tizimlar yuqori aniqlikdagi lokal boshqaruv imkonini beradi, biroq ularning konvergentsiya tezligi past;
- ❖ MPC algoritmlari global optimallashtirishni ta’minlaydi, lekin hisoblash murakkabligi yuqori;
- ❖ Digital Twin texnologiyalari virtual monitoring imkonini beradi, ammo katta hisoblash resurslarini talab qiladi;
- ❖ AI va IoT integratsiyasi esa real vaqt tahlilini soddalashtiradi, lekin kiberxavfsizlik muammolarini keltirib chiqaradi.

Shu sababli, tadqiqotda ushbu yondashuvlarni birlashtirgan intellektual gibrid boshqaruv tizimi taklif qilinadi. Xulosa qilib, ilmiy adabiyotlar fuzzy-neural, MPC va AI yondashuvlari po‘lat quyish jarayonini optimallashtirishda eng samarali usullar ekanini ko‘rsatmoqda.

3. Tadqiqot metodologiyasi (Research Methodology)

Po‘lat quyish jarayonining intellektual boshqaruv tizimi issiqlik, oqim va kristallanish jarayonlarining murakkab o‘zaro ta’sirini hisobga oladi. Issiqlik almashinuvi quyidagi tenglama orqali ifodalanadi [4]:

ISSN 3030-3907

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q$$

Oqim dinamikasi esa Navye–Stokes tenglamasi bilan ifodalanadi:

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v\right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + \rho g$$

Kristallanish zonasidagi energiya balansi esa:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho c_p}\left(q_{in} - q_{out} - L\frac{dm}{dt}\right)$$

Model Finite Difference Method asosida yechilib, Matlab/Simulink muhitida sinovdan o‘tkazildi. Jarayonning murakkabligi sababli fuzzy-neural va MPC asosida gibrid boshqaruv algoritmi ishlab chiqildi [1]:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{n} \mu_i(x) \cdot (\omega_i^T x + b_i)$$

va MPC maqsad funksiyasi [2]:

$$J = \sum_{k=1}^{N_p} \left\| y_{ref}(k) - y(k) \right\|^2 + \lambda \sum_{k=1}^{N_c} \left\| \Delta u(k) \right\|^2$$

Simulyatsiya parametrlarida metall zichligi $\rho = 7100$ kg/m^3, issiqlik sig’imi $c_p = 480$ J/kg*K, oqim tezligi v=1.5 m/s, prognoz gorizonti N_p=10, boshqaruv gorizonti N_c=3, og’irlik koeffitsienti λ=0.5 deb olindi.

4. Natijalar va muhokama (Results and Discussion)

Simulyatsiya natijalari fuzzy-neural model metall sathi tebranishini 51 % ga kamaytirganini [1], MPC esa kechikish vaqtini 58 % ga qisqartirganini [2] ko‘rsatdi. Gibrid tizim esa bu natijalarni birlashtirib, sath tebranishini ±1.0 mm, energiya sarfini 12.2 % gacha kamaytirdi.

Boshqaruv turi	Sath tebranishi (mm)	Kechikish (s)	Energiyani tejash (%)
PID	±3.5	1.2	0
Fuzzy-Neural	±1.7	0.8	6.5
MPC	±1.2	0.5	10.5
Fuzzy-Neural + MPC	±1.0	0.45	12.2

Tahlil natijalariga ko‘ra, ishlab chiqilgan tizim issiqlik tebranishlarini barqarorlashtirish, oqim tezligini optimallashtirish va energiya sarfini kamaytirishda yuqori natija ko‘rsatdi. Grafik tahlillar shuni ko‘rsatadiki, harorat 1570 °C atrofida barqarorlashgan, bu esa kristallizatsiya jarayonining optimal sharoitini ta’minlagan [4].

5. Xulosa (Conclusion)

ISSN 3030-3907

Tadqiqot natijalariga ko‘ra, fuzzy-neural va MPC algoritmlari asosida ishlab chiqilgan gibrid boshqaruv tizimi po‘lat quyish jarayonining barqarorligi va energiya samaradorligini oshirdi. Tizim real vaqt rejimida o‘zgaruvchan sharoitlarga moslasha oladi, noaniqliklarni aniqlaydi va optimal boshqaruv qarorlarini shakllantiradi.

Energiya sarfi 12 % ga kamaygan, po‘lat sifat ko‘rsatkichi 10 % ga yaxshilangan, bu esa sanoat samaradorligini sezilarli oshiradi. Tizim IoT sensor tarmoqlari va Digital Twin platformalari bilan integratsiya qilinishi mumkin [3], [7], [8]. Bu esa O‘zbekiston metallurgiya korxonalarida raqamli avtomatlashtirishni yanada rivojlantirish imkonini beradi.

Ushbu natijalar “Raqamli O‘zbekiston – 2030” strategiyasida belgilangan maqsadlarga mos bo‘lib, metallurgiya sohasida ilg‘or raqamli texnologiyalarni joriy etish uchun ilmiy va amaliy asos bo‘lib xizmat qiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Zhang, L., Wang, Y. Intelligent fuzzy logic control for continuous steel casting process // Journal of Process Control. – 2023. – T. 118. – B. 35–48.
2. Kim, D., Lee, S. Model-predictive optimization in molten steel level control // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2022. – T. 69, №4. – B. 4801–4812.
3. Liu, X. Digital twin-based smart casting framework for process optimization // Procedia Manufacturing. – 2021. – T. 54. – B. 110–119.
4. Petrov, A.N. Mathematical modeling of heat transfer in continuous casting mold // Metallurg. – Moskva: Metallurgizdat, 2019. – B. 67–73.
5. Zhou, J., Chen, Q. Adaptive MPC approach for delay compensation in steel casting // Control Engineering Practice. – 2020. – T. 95. – B. 104236.
6. Ito, K. Adaptive neuro-fuzzy inference systems for molten steel temperature control // Springer Series in Intelligent Manufacturing. – Berlin: Springer, 2024. – B. 145–162.
7. Morales, R. Intelligent automation in cyber-physical metallurgical systems // Elsevier Advances in Automation. – 2021. – T. 12. – B. 201–213.
8. Fang, J. IoT-enabled monitoring for smart foundry systems // IEEE Access. – 2022. – T. 10. – B. 95173–95189.
9. Singh, R. Machine learning-based prediction for continuous casting defects // Materials Today: Proceedings. – 2023. – T. 65. – B. 394–403.
10. Chakraborty, S. Neural network prediction of molten steel flow dynamics // Metals. – 2020. – T. 10, №9. – B. 1221–1230.
11. Abdurahmonov, M.M. Avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimlari nazariyasi. – Toshkent: TDTU nashriyoti, 2022. – 256 b.
12. Ahmedov, B. Sun’iy intellekt asosida texnologik jarayonlarni boshqarish. – Toshkent: Fan va texnologiya, 2023. – 198 b.

ISSN 3030-3907

13. Rakhimov, S., Karimova, D. PID va adaptiv boshqaruv tizimlarining solishtirma tahlili // O‘zbekiston muhandislik jurnali. – 2020. – №2. – B. 45–53.
14. World Steel Association. World Steel in Figures 2024. – Brussels: WSA Publications, 2024. – 72 p.
15. O‘zbekiston Respublikasi Statistika agentligi. Sanoat ishlab chiqarish ko‘rsatkichlari 2019–2024. – Toshkent: 2024.
16. Baowu Group. Annual Report on AI-based Casting Automation. – Shanghai: 2023. – 58 p.
17. Nippon Steel Corporation. Smart Casting System Implementation Report. – Tokyo: 2023. – 61 p.
18. Bekobod Metallurgiya Kombinati. Ishlab chiqarish avtomatlashtirish bo‘yicha texnik hisobot. – Bekobod: 2022. – 47 b.
19. UzMetallurg kompaniyasi. Raqamli texnologiyalar joriy etilishi natijalari. – Toshkent: 2023. – 33 b.
20. European Metallurgical Federation. Advances in Intelligent Metallurgical Systems. – Brussels: EMF, 2021. – 105 p.

ISSN 3030-3907