

**TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI  
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
DSc.03/30.12.2019.T.03.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**NAVOIY DAVLAT KONCHILIK VA TEXNOLOGIYALAR  
UNIVERSITETI**

**BOYBUTAYEV SANJAR BAXRITDINOVICH**

**NOANIQLIK SHAROITIDA RUDANI YANCHISH JARAYONINING  
BOSHQARISH TIZIMINI TAKOMILLASHTIRISH**

**05.01.08 - Texnologik jarayonlar va ishlab chiqarishlarni  
avtomatlashtirish va boshqarish (texnika fanlari)**

**texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
AVTOREFERATI**

**Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)**

**Content of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)**

**Boybutayev Sanjar Baxritdinovich**

Noaniqlik sharoitida rudani yanchish jarayonining  
boshqarish tizimini takomillashtirish .....3

**Бойбутаев Санжар Бахритдинович**

Усовершенствование системы управления процесса измельчения  
руды в условиях неопределенности .....21

**Boybutayev Sanjar Baxritdinovich**

Improvement of ore grinding process control system  
under conditions of uncertainty .....39

**E‘lon qilingan ishlar ro‘uxati**

Список опубликованных работ  
List of published works .....43

**TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI  
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
DSc.03/30.12.2019.T.03.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**NAVOIY DAVLAT KONCHILIK VA TEXNOLOGIYALAR  
UNIVERSITETI**

**BOYBUTAYEV SANJAR BAXRITDINOVICH**

**NOANIQLIK SHAROITIDA RUDANI YANCHISH JARAYONINING  
BOSHQARISH TIZIMINI TAKOMILLASHTIRISH**

**05.01.08 - Texnologik jarayonlar va ishlab chiqarishlarni  
avtomatlashtirish va boshqarish (texnika fanlari)**

**texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
AVTOREFERATI**

**Toshkent – 2023**

**Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.1.PhD/T2483 raqam bilan ro'yxatga olingan.**

Dissertatsiya Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasida ([www.tdtu.uz](http://www.tdtu.uz)) hamda «ZiyoNet» Axborot ta'lim portalida ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)) joylashtirilgan..

**Ilmiy rahbar:**

**Muxitdinov Djalolitdin Paxritdinovich**

texnika fanlari doktori, professor

**Rasmiy opponentlar:**

**Ismailov Mirxalil Agzamovich**

texnika fanlari doktori, professor

**Ivan'yan Arsen Ignat'yevich**

texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

**Yetakchi tashkilot:**

**Toshkent kimyo-texnologiya instituti**

Dissertatsiya himoyasi Toshkent davlat texnika universiteti huzuridagi DSc.03/30.12.2019.T.03.02 raqamli Ilmiy kengashning 2023 yil «16» 12 soat 10<sup>00</sup> dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100095, Toshkent shahri, Universitet ko'chasi, 2-uy. Tel.: (99871) 246-46-00, faks: (99871) 227-10-32, e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz)).

Dissertatsiya bilan Toshkent davlat texnika universiteti huzuridagi Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (355 raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100095, Toshkent shahri, Universitet ko'chasi, 2-uy. Tel.: (99871) 246-46-00, faks: (99871) 227-10-32, e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz)).

Dissertatsiya avtoreferati 2023 yil «4» 12 kuni tarqatildi.  
(2023 yil «6» 11 dagi 25 raqamli reestr bayonnomasi.)



**N.R.Yusupbekov**

Ilmiy darajalar beruvchi  
ilmiy kengash raisi,  
t.f.d., professor, akademik

**U.F. Mamirov**

Ilmiy darajalar beruvchi  
ilmiy kengash ilmiy kotibi,  
texnika fanlari doktori (DSc), dotsent

**Igamberdiyev X.Z.**

Ilmiy darajalar beruvchi  
ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi,  
t.f.d., professor, akademik

## **KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)**

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati.** Jahonda so‘nggi vaqtlarda tegirmon qurilmalarini boshqarish tizimini takomillashtirishga alohida e‘tibor qaratilmoqda. Tegirmonlar va tegirmon qurilmalari tog‘-kon sanoati, sement, kimyo va boshqa turli sohalarda materiallarni yanchishda hamda ma‘lum bir fraksiya yoki sifatidagi yakuniy mahsulotni olishni amalga oshiradi. Tegirmonda yanchish jarayonini boshqarish yuqori natijalarga erishish va ish samaradorligini oshirishning muhim vazifalaridan biri hisoblanadi.

Jahonda ushbu sohada avtomatlashtirilgan boshqarish tizimlarini ishlab chiqishni rivojlantirish bilan bog‘liq muammolarga katta e‘tibor qaratilmoqda va faol o‘rganilmoqda. Tegirmon qurilmalarini boshqarish tizimlarini ishlab chiqish bilan bog‘liq ilmiy ishlarga e‘tibor tobora ortib bormoqda, bu jarayon parametrlarini nazorat qilish, texnologik jarayonlarni boshqarishning aniqligi, samaradorligi va sifatini oshirish imkonini beradi. Bunga zarrachalar o‘lchamini, mahsulotdagi zarrachalarning tarqalishini nazorat qilish, modellarning noaniqligi hamda kirish parametrlarining noaniqligi va yetarli emasligi sharoitida tegirmon elementlarining eskirish darajasini va boshqa parametrlarni boshqarish va sun‘iy intellektni joriy etish orqali erishiladi. Sun‘iy intellekt tegirmonni boshqarish tizimiga sezilarli ta‘sir ko‘rsatishi mumkin. Tegirmonni boshqarish tizimida sun‘iy intellektdan foydalanish ish samaradorligini oshirishi, mahsulot sifatini yaxshilashi, nosozliklar va baxtsiz hodisalarni kamaytirishi hamda ish xavfsizligini yaxshilashi mumkin.

Bugungi kunda mamlakatimizda ushbu sohadagi avtomatlashtirilgan boshqarish tizimlarini ishlab chiqish bilan bog‘liq muammolarga jiddiy e‘tibor qaratilmoqda va faol tadqiqotlar olib borilmoqda. Bu muammolarning barchasi tegirmon qurilmalarini boshqarishning avtomatlashtirilgan tizimlarini ishlab chiqishga kompleks yondashuvni talab qiladi. Ular jarayonlarni avtomatlashtirish sohasidagi tadqiqotlarni, yangi algoritmlar va usullarni ishlab chiqishni, shuningdek boshqarish samaradorligini oshirish, energiya va resurslarni tejashni ta‘minlash uchun boshqa tizimlar va uskunalar bilan integratsiyani o‘z ichiga oladi. 2022-2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan «Sanoat tarmoqlarida yo‘qotishlarni kamaytirish va resurslarni ishlatish samaradorligini oshirish bo‘yicha ..., zamonaviy energiya tejamkor texnologiyalar, asbob-uskunalar va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini joriy etish, qayta tiklanuvchi energiya manbalari qurilmalarini ishlab chiqarish va energiya samaradorlikni oshirish bo‘yicha loyihalarni moliyalashtirish»<sup>1</sup> vazifalari belgilab berilgan. Mazkur vazifalarni bajarish maqsadida noaniqlik sharoitida rudani yanchish jarayonining boshqarish tizimlarini ishlab chiqish va takomillashtirish dolzarb va zaruriy vazifadir.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017-yil 7-fevraldagi PQ-4947-son «O‘zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirishning Harakatlar strategiyasi to‘g‘risida»gi Qarori va 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son «2022 - 2026 yillarga

---

<sup>1</sup> O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF-60-son «2022-2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida»gi Farmoni

mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida»gi, 2021-yil 24-iyundagi PQ-5159-son «Kon-metallurgiya sanoati va unga bog'liq sohalarni rivojlantirish bo'yicha qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida»gi, 2019-yil 17-yanvardagi PQ-4124-son «Kon-metallurgiya tarmog'i korxonalari faoliyatini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida»gi, 2018-yil 27-apreldagi PQ-3682-son «Innovatsion g'oyalar, texnologiyalar va loyihalarni amaliy joriy qilish tizimini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida»gi Farmonlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi.** Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining IV. «Axborotlashtirish va axborot-kommunikatsiya texnologiyalarini rivojlantirish» ustuvor yo'nalishi doirasida bajarilgan.

**Muammoning o'rganilganlik darajasi.** Zamonaviy tadqiqotlar, modellarning noaniqligi hamda kirish parametrlarining noaniqligi va yetarli emasligini hisobga olgan holda, tegirmonlarda yanchish jarayonini boshqarishda yaxshiroq natijalarga erishish uchun sun'iy intellekt va avtomatlashtirish algoritmlarini ishlab chiqishga qaratilgan. Bu yerda asosiy jihatlardan biri noaniqlikni boshqarish hisoblanadi. Bu shuni anglatadiki, boshqarish tizimi o'zgaruvchan sharoit va ma'lumotlarga asoslangan holda moslasha olishi va qaror qabul qilishi kerak. Ushbu muammoni chuqurroq o'rganish uchun olimlar boshqarish tizimlarini sinab ko'rish va optimallashtirish uchun matematik modellashtirish va jarayonlarni simulyatsiya qilish usullaridan faol foydalanmoqdalar. Buning uchun turli xil algoritmlardan, masalan, adaptiv boshqarish, teskari aloqa va bashoratlash kabilardan foydalaniladi.

Mazkur muammolarni kompleks hal qilish samaradorlik, resurslarni tejash va atrof-muhitga ta'sirini kamaytirish nuqtai nazaridan katta foyda keltirishi mumkin. Ushbu muammolarning yechimlariga xorijlik olimlardan K. Nageswararao<sup>2</sup>, M. Ramasamy<sup>3</sup>, X. Chen<sup>4</sup>, P.P.Pilov<sup>5</sup>, N.S.Pryadko, V.N.Bogatikov<sup>6</sup>, K.Ya.Ulitenko<sup>7</sup> va boshqalar o'z hissalarini qo'shishgan. A. Pomerleau<sup>8</sup>, A.J. Niemi<sup>9</sup>, A.A.Tuz<sup>10</sup>,

<sup>2</sup> K. Nageswararao, D. M. Wiseman, and T. J. Napier-Munn, "Two empirical hydrocyclone models revisited," *Minerals Eng.*, vol. 17, no. 5, pp. 671–687, 2004.

<sup>3</sup> M. Ramasamy, S.S. Narayanan, C.D.P. Rao, Control of ball mill grinding circuit using model predictive control scheme, *J. Process Control* 15 (3) (2005) 273–283.

<sup>4</sup> Chen, X., Zhai, J., Li, S., & Li, Q. (2007). Application of model predictive control in ball mill grinding circuit. *Minerals Engineering*, 20(11), 1099–1108.

<sup>5</sup> *Пилов П. И., Прядко Н. С.* Моделирование замкнутых циклов измельчения руд на основе баланса контрольного класса крупности // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – № 6. – С. 75-80.

<sup>6</sup> Богатиков В.Н., Браун-Аквей Виллиам, Форгор Лемпого Аппаратное и программное обеспечения для системы управления технологическим процессом измельчения / Интернет-журнал «Науковедение», 2015 №1 [Электронный ресурс]-М. Науковедение, 2015.

<sup>7</sup> Улитенко К.Я., Морозов В.В. Управление операциями измельчения и классификации на основе типизации руд // *Горный информ.-аналит. бюллетень*, 2014. – №3. - С. 162-167.

<sup>8</sup> A. Pomerleau, D. Hodouin, A. Desbiens, E. Gagnon, A survey of grinding circuit control methods: from decentralized PID controllers to multivariable predictive controllers, *Powder Technol.* 108 (2–3) (2000) 103–115.

<sup>9</sup> A.J. Niemi, L. Tian, R. Ylinen, Model predictive control for grinding systems, *Control Eng. Pract.* 5 (2) (1997) 271–278.

<sup>10</sup> Туз А. А., Богатиков В. Н. Построение модели процесса измельчения в агрегате непрерывного действия с замкнутым циклом ОАО «Ковдорский ГОК» с применением нейросетевых моделей // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2013. №5 (18).

V. Braun-Akvey<sup>11</sup> va boshqalarning ishlari dinamik tizimlarning holat kuzatuvchilari va rostlagichlarini yaratish muommolariga bag‘ishlagan. Shuningdek mazkur muommolarning yechimlariga O‘zbekistonlik olimlardan N.R. Yusupbekov<sup>12</sup>, K. Sanakulov<sup>13</sup>, U.A. Ergashev, X.Z. Igamberdiyev<sup>14</sup>, Z.O. Eshmurodov<sup>15</sup>, D.P. Muxitdinov<sup>16</sup> va boshqalar o‘zlarining muhim hissalarini qo‘shishgan.

Taqdim etilgan adabiyotlarning katta hajmiga qaramasdan, quyidagi muammolarga yetarlicha e‘tibor berilmagan: tegirmon qurilmalarini modellashtirish va boshqarishning asosiy maqsadlaridan biri bo‘lgan yanchish jarayonining samaradorligini oshirish; operatorlarning bevosita ishtirokisiz qaror qabul qila oladigan va rudalarni yanchish jarayonini optimallashtiradigan avtonom boshqarish tizimlarini yaratish; rudani yanchish jarayonini boshqa bir rudaning qayta ishlash jarayonlari bilan integratsiyalash ishlarini olib borish. Shu asosda, ishlab chiqarishni o‘zgaruvchan sharoitlari va talablariga moslasha oladigan hamda yanchish jarayonini natijalarini oldindan bashorat qila oladigan, rudalarni yanchish jarayonining noaniqlik sharoitida bashoratlovchi matematik modeli asosida boshqarish tizimini takomillashtirish muammosi nihoyatda zarur ekanligi kelib chiqadi.

**Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta’lim muassasasi ilmiy-tadqiqot ishlari bilan bog‘liqligi.** Dissertatsiya tadqiqoti Navoiy davlat konchilik instituti ilmiy-tadqiqot ishlari rejalarining BV-Atex-2018-516 – “Modellashtirish asosida mashina va jihozlarning holatlarini zarar yetkazmasdan nazorat qilish usullari va matematik modellarini tadqiq etish va ishlab chiqish” (2018-2020) hamda Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti ilmiy-tadqiqot ishlari rejalarining F-4-56 – “Noaniq-ko‘plik nisbatlari asosida murakkab texnologik obyektlarni intellektual boshqarish tizimlarini strukturaviy-parametrik sintezlash usullari va nazariy asoslarini ishlab chiqish” (2016-2020) mavzuli loyhasi doirasida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi** o‘zgaruvchan sharoitlar va ishlab chiqarish talablariga moslasha oladigan, yanchish jarayoni natijalarini oldindan bashorat qila

---

<sup>11</sup> В. Браун-Аквей, Разработка программного обеспечения для управления контуром помола / А. Н. Чохонелидзе, Ф. Лемпого, В. Браун-Аквей / Интернет-журнал «Науковедение», 2014 №3 (22)

<sup>12</sup> Юсупбеков Н.Р., Нурмухамедов Х.С., Зокиров С.Г. Кимёвий технология асосий жараён ва қурилмалари. – Т.: «Фан ва технология», 2015. - 848 б.

<sup>13</sup> К.Санакулов, У.А.Эргашев, Е.С.Ткаченко Усовершенствование схемы измельчения на гидрометаллургическом заводе №2// Сборник статей по материалам Международной научно-практической конференции «Интеграции науки, образования и производства – залог прогресса и процветания», посвященной 5-летию основания Навоийского отделения АН РУз. 9 -10 июня 2022 года, С131-135, Том-3, г.Навои-2022.

<sup>14</sup> Игамбердиев Х. З., Севинов Ж. У. Алгоритмы адаптивной идентификации динамических систем на основе принципа регулярности //Журнал «Автоматизация. Современные технологии», Издательство" Инновационное машиностроение"(Москва), ISSN. – 2020. – С. 0869-4931.

<sup>15</sup> Эшмуродов З.О. Разработка систем стабилизации питания мельничного блока измельчения руды // Труды международной научной конференции на тему: Наука и образование – ведущий фактор стратегии «Казахстан-2030». – Караганда, 24-25 июня 2008 г. – Выпуск 1. – С. 367-369.

<sup>16</sup> Mukhitdinov, Djalolitdin Pakhritdinovich and Boybutayev, Sanjar (2021) “Problems of modeling and control of the technological process of ore grinding” *Chemical Technology, Control and Management*: Vol. 2021 : Iss. 4 , Article 7.

oladigan hamda rudalarni yanchish jarayonini bashoratlovchi matematik model asosida boshqarish tizimini takomillashtirishdan iborat.

**Tadqiqotning vazifalari:**

chiziqli boshqarish bilan taqqoslaganda rudani yanchish jarayonini yanada moslashuvchan va samarali boshqarish imkonini beradigan takomillashgan nochiziqli boshqaruv uchun bashoratli matematik modelni yaratish;

yanchish texnologik jarayonining matematik tavsifiga kiritilgan tenglamalarning har birining o‘tkinchi xarakteristikalarini hamda yangi turg‘un holatga o‘tish imkoniyati va vaqtini belgilash maqsadida imitatsion modelni tahlil qilish;

nochiziqli model asosida mahsulot zarrachalarining hajmi va ishlashini baholash uchun mustaqil boshqarish tizimini ishlab chiqish;

hisoblash xarajatlarini kamaytiradigan nochiziqli bashoratlovchi modeli va dinamik inversiyaga ega kontrollerlar kombinatsiyasidan tashkil topgan boshqarish tizimini ishlab chiqish.

**Tadqiqotning obyekti** tegirmon qurilmasida sodir bo‘ladigan texnologik jarayonlar, nostatsionar obyektlar va ularni boshqarish tizimlari hisoblanadi.

**Tadqiqotning predmeti** rudani yanchishning texnologik jarayoni; materiallarni tahlil qilish, shu jumladan materiallarning qattiqligi, mustahkamligi, zichligi, zarrachalarning kattaligi va shakli kabi fizik-kimyoviy xususiyatlarini va boshqa parametrlarini o‘rganish va eng samarali yanchish usullari va vositalarini aniqlashga hissa qo‘shish; optimal algoritmlarga asoslangan boshqarish tizimlari hisoblanadi.

**Tadqiqotning usullari.** Dissertatsiya ishida matematik va imitatsion modellashtirish usullari, noaniqlik sharoitida tizimlarni boshqarish, kombinatsiyalangan boshqarish tizimlarini qurish tamoyillari, tizimlarga kirish parametrlarining o‘zgarishiga avtomatik ravishda moslashishga va jarayonni optimallashtirishga imkon beruvchi sun‘iy intellekt usullaridan foydalanilgan.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

boshqarish tizimiga texnologiyaning noaniqliklari va nochiziqligini hisobga olish imkonini beradigan rudalarni yanchish jarayonining emperik tenglamalari asosida bashoratlovchi model ishlab chiqilgan;

zumpfdagi tez harakatlanuvchi jarayonni hisoblash tezligi pasaygan kontroller orqali, rudalarni yanchish konturida sekin o‘tuvchi jarayonlarni nochiziqli bashoratli modelga ega yuqori tezlikda ishlovchi boshqarish qurilmalari asosida ikki konturli kombinatsiyalangan boshqarish tizimi ishlab chiqilgan;

nochiziqli model o‘zgaruvchilarining optimal qiymatlarini aniqlash asosida dinamik inversiyali boshqarish qurilmasi tomonidan aniqlangan yechimni hisobga oluvchi yagona yechimni ishlab chiqish algoritmi ishlab chiqilgan;

bashoratlovchi modelning hisoblangan qiymatlari va eksperimental qiymatlar farqini kompensatsiyalovchi boshqarish ta’sirini taminlash uchun boshqariladigan o‘zgaruvchilar cheklovlari chegaralarida tayyor mahsulot zarrachalarining o‘rnatilgan o‘lchamini va qurilma unumdorligini baholashning mustaqil nazorat qilinishini ta’minlaydigan boshqarish tizimi ishlab chiqilgan.

**Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

φ empirik ravishda aniqlangan reologik koeffitsiyentni o‘z ichiga oladigan algoritm ishlab chiqilgan;

yanchish texnologik jarayonining matematik tavsifiga kiritilgan tenglamalarning har birini o‘tkinchi xarakteristikalari hamda yangi turg‘un holatga o‘tish imkoniyati va vaqtini belgilash maqsadida imitatsion modeli tahlil qilingan;

tegirmonning umumiy yuklanishini uning quvvatiga ta’siri hamda tegirmon quvvatining suspenziyaning reologik holatiga bog‘liqligining hisoblangan qiymatlari olingan;

rudani yanchishning texnologik jarayonini intellektual boshqarish tizimining funksional sxemasi ishlab chiqilgan;

energiya sarfini, reologik omilni va boshqa parametrlarni hisoblashni amalga oshiradigan dasturiy ta’minoti ishlab chiqilgan.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi.** Tadqiqot natijalarining ishonchliligi nazariy asoslangan konsepsiyalar, matematik hamda imitatsion modellashtirish usullaridan foydalanishga asoslangan, hamda ilmiy usullarni to‘g‘ri qo‘llash, jumladan, tadqiqot maqsadlarini aniqlash, gipotezalarni shakllantirish, usullarni ishlab chiqish, tajribalar o‘tkazish va olingan nazariy va ekperimental natijalarning muvofiqligi bilan ta’minlanadi.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati matematik va imitatsion modellashtirish usullarini, shuningdek, dinamik inversiya va nochiziqli bashoratlovchi modeli kontrollerlar kombinatsiyasidan tashkil topgan boshqarish tizimini ishlab chiqilganligidan iborat. Ularning o‘ziga xos xususiyati dinamik inversiya kontrolleri tomonidan ishlab chiqilgan yechimni bashoratlovchi modeli kontrollerda hisobga olinishi hisoblanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati rudani yanchish texnologik jarayoni uchun intellektual boshqarish tizimining funksional sxemasini ishlab chiqishdan iborat bo‘lib, boshqariladigan o‘zgaruvchilar chegaralarida tayyor mahsulotning zarrachalar o‘lchamini va unumdorligini baholashning o‘rnatilgan mustaqil nazorat qilinishini ta’minlanilishini ishlab chiqilganligidan iborat.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** Rudani yanchish jarayonining boshqarish tizimini takomillashtirish natijalari asosida:

boshqariladigan o‘zgaruvchilar cheklovlari chegaralarida tayyor mahsulotning zarracha o‘lchamini va qurilma unumdorligini baholashning o‘rnatilgan mustaqil nazorat qilinishini ta’minlaydigan boshqarish tizimi “2-son gidrometallurgiya zavodi”da joriy etilgan (“Navoiy kon-metallurgiya kombinati” AJning 2023-yil 4-iyulidagi 23/01-01-07/312-son ma’lumotnomasi). Natijada, tayyor mahsulotning zarracha o‘lchamini va qurilmaning unumdorligini yanada aniqroq baholash imkoniyati yaratilgan;

bashoratli model va dinamik inversiya konturi asosida ikki konturli kombinatsiyalangan boshqarish tizimi “2-son gidrometallurgiya zavodi”da joriy etilgan (“Navoiy kon-metallurgiya kombinati” AJning 2023-yil 4-iyulidagi 23/01-01-07/312-son ma’lumotnomasi). Natijada yanchish jarayonida olinadigan tayyor mahsulotning miqdori 6 %ga oshgan.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Tadqiqot natijalari 5 ta xalqaro va 1 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida aprobatsiyadan o'tkazilgan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi.** Tadqiqot mavzusi bo'yicha 14 ta ilmiy ishlar, jumladan, O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi e'tirof etgan ilmiy jurnallarda 5 ta maqola, shundan 3 tasi xorijda chop etilgan, EHM uchun yaratilgan dasturiy vositalarni qayd qilinganligi to'g'risida 5 ta guvohnoma olingan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya kirish, uchta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiya hajmi 118 betni tashkil etib, unda 36 ta rasm va 7 ta jadval keltirilgan.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Kirish** qismida dissertatsiya tadqiqoti mavzusining dolzarbligi va tadqiqotga bo'lgan ehtiyoj asoslab berilgan, tadqiqotning maqsad va vazifalari aniqlangan, tadqiqotning O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy qilish, nashr etilgan ishlar va dissertatsiya tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning "**Qimmatbaho minerallarni ajratish uchun rudani yanchish jarayonini nazorat qilish muammolarining zamonaviy holati**" deb nomlangan birinchi bobida rudani yanchish jarayonini modellashtirish va boshqaruv muammolarining hozirgi holatini tahlil qilish natijalari bayon qilingan. Ushbu maqsadlar uchun sun'iy intellekt usullaridan foydalangan holda tegirmonning unumdorligini aniqroq bashorat qilish va uning samaradorligini oshirish, shuningdek shu asosda boshqaruv tizimlarini takomillashtirish imkonini beradigan modellashtirish muammolarining tahlili berilgan. O'rganilgan materiallar asosida tadqiqotning maqsad va vazifalari aniqlangan.

Dissertatsiyaning "**Noaniqlik sharoitida yanchish sxemasining dinamik bashoratlovchi modelini ishlab chiqish**" deb nomlangan ikkinchi bobida analitik metodlar asosida dinamik bashoratlovchi model qurilgan bo'lib, u boshqaruv tizimida texnologiyaning noaniqliklari va nochiziqliklarini hisobga olish imkonini beradi. Ishlab chiqilgan matematik model rudani yetkazib bergich, yarim o'z-o'zidan yanchish tegirmonining o'zini, zumpf va gidrosiklonni tavsiflovchi bloklar shaklida taqdim etilgan.

Quyida zumpf va tegirmonning ishlashini aks ettiruvchi holat tenglamalari keltirilgan.

Tenglamalardagi birinchi indeks ko'rib chiqilayotgan modul (rudani yetkazib bergich, tegirmon, zumpf yoki gidrosiklon)ni, ikkinchi indeks modda (toshlar, qattiq zarralar, katta zarralar, kichik zarralar, sharlar, suv)ni ko'rsatadi. Sarflardagi indekslar esa oqimning holati: normal oqim, toshib ketish yoki oqimning kamayishini ko'rsatadi.

$$\dot{X}_{tsh} = F_{TBS} - \frac{\varphi V_v X_{sh}}{X_{qzh} + X_{sh}} + V_{ZSO} \cdot \quad (1)$$

$$\dot{X}_{tqzh} = \frac{F_{YaBR}}{\rho_{sh}} (1 - \alpha_r) - \frac{\varphi V_v X_{sh} X_{qzh}}{X_{qzh} + X_{sh}} + V_{ZQZO} + \frac{\varphi P_{teg}}{\rho_{sh} \phi_r} \left( \frac{X_{th}}{X_{th} + X_{qzh}} \right). \quad (2)$$

$$\dot{X}_{tmzo} = \frac{F_{YaBR}}{\rho_{sh}} \alpha_f - \frac{\varphi V_v X_{sh} X_{mzh}}{X_{qzh} + X_{sh}} + V_{ZMZO} + \frac{\varphi P_{teg}}{\rho_{sh} \phi_f} / [1 + \alpha_{\phi_f}] \left( \frac{X_{sh} + X_{th} + X_{qzh} + X_{shh}}{v_{teg}} - v_{p_{max}} \right). \quad (3)$$

$$\dot{X}_{tth} = \frac{F_{YaBR}}{\rho_{sh}} \alpha_r - \frac{\varphi P_{teg}}{\rho_{sh} \phi_r} \left( \frac{X_{th}}{X_{th} + X_{qzh}} \right). \quad (4)$$

$$\dot{X}_{tshh} = \frac{F_{PSh}}{\rho_r} - \frac{\varphi P_{teg}}{\phi_b} \left( \frac{X_{shh}}{\rho_{sh} (X_{th} + X_{qzh}) + \rho_r X_{shh}} \right). \quad (5)$$

$$\dot{X}_{zsh} = \frac{\varphi \cdot V_v \cdot X_{sh}}{X_{qzh} + X_{sh}} - \frac{F_{SAS} \cdot X_{sh}}{X_{sh} + X_{qzh}} + F_{ZBS} \cdot \quad (6)$$

$$\dot{X}_{zqzh} = \frac{\varphi \cdot V_v \cdot X_{sh} \cdot X_{qzh}}{X_{qzh} + X_{sh}} - \frac{F_{SAS} \cdot X_{qzh}}{X_{sh} + X_{qzh}}. \quad (7)$$

$$\dot{X}_{zmzh} = \frac{\varphi \cdot V_v \cdot X_{sh} \cdot X_{mzh}}{X_{qzh} + X_{sh}} - \frac{F_{SAS} \cdot X_{mzh}}{X_{sh} + X_{qzh}}. \quad (8)$$

bu yerda  $X_{tsh}$ ,  $X_{tqzh}$ ,  $X_{tmzh}$ ,  $X_{tth}$ ,  $X_{tshh}$  – mos ravishda tegirmondagi suv, qattiq zarralar, mayda zarrachalar, toshlar va sharlarning hajmi,  $X_{zsh}$ ,  $X_{zqzh}$ ,  $X_{zmzh}$  – mos ravishda zumpfdagi suv, qattiq zarralar va mayda zarrachalar hajmi,  $V_{ZSO}$ ,  $V_{ZQZO}$ ,  $V_{ZMZO}$  – esa mos ravishda: gidrosiklonndagi suv oqimi, qattiq zarralar va mayda zarrachalar oqimidir. Qattiq zarralar mayda va katta ruda aralashmasidan tashkil topganligi sababli, hisoblash jarayonida qattiq va mayda zarrachalarning o‘zgarishini hisoblash qoladi.

Model uchta chiqishga ega: tegirmonning yuk bilan to‘ldirilganlik ulushi, zumpfdagi pulpaning hajmi va gidrosiklonning chiqishidagi zarrachalar o‘lchamini baholash bo‘lib, ular quyidagi munosabatlar bilan aniqlanadi:

$$Y_{TYuHB} = (X_{tsh} + X_{tqzh} + X_{tth} + X_{tshh}) / v_{teg}; \quad (9)$$

$$Y_{ZPH} = X_{zqzh} + X_{zsh}; \quad (10)$$

$$Y_{MZO} = V''_{gmzs} / V''_{gqzs};$$

$$Y_U = V''_{gqzs};$$

bu yerda  $V''_{gmzs}$  va  $V''_{gqzs}$  – gidrosiklonning chiqishidagi mayda va qattiq zarrachalarning hajmiy tezligi. (1-8) tenglamalardagi parametrlar quyidagi tenglamalar orqali aniqlanadi:

$$\varphi = \max \left\{ 0, \left( 1 - \left( \frac{1}{\varepsilon_{q.z.u}} - 1 \right) \cdot \frac{X_{tqzh}}{X_{tsh}} \right) \right\}^{0.5}. \quad (11)$$

Ushbu (11) tenglama suv oqimi tezligiga, shuningdek tegirmondagi qattiq zarrachalar miqdoriga qarab reologik omilning funksional bog‘liqligini aniqlaydi.

$$P_{teg} = P_{max} \left\{ 1 - \delta_{h.p} Z_x^2 - 2 \chi_{max} \delta_{h.p} \delta_{qz.p} Z_x Z_r - \delta_{qz.p} Z_r^2 \right\} \cdot (\alpha_{tez})^{\alpha_{qk}};$$

$$Z_x = \frac{X_{tsh} + X_{tth} + X_{tqzh} + X_{tshh}}{v_{teg} \cdot v_{p_{max}}} - 1;$$

$$Z_r = \frac{\varphi}{\varphi_{P_{\max}}} - 1;$$

bu yerda  $\varphi$  – empirik ravishda aniqlanadigan reologik koeffitsiyent,  $P_{\text{teg}}$  – tegirmonning quvvat sarfi,  $Z_x$  – quvvat sarfiga ta'sir qiluvchi zaryad,  $Z_r$  – esa quvvat sarfiga ta'sir qiluvchi zaryad reologiyasining ta'siri. Empirik tarzda aniqlanadigan koeffitsiyent ( $\varphi$ ) yanchish sxemasi quvvatini suspenziyaning “suyuqligi” va “zichligi” kabi omillarga bog‘liqligini hisobga oladi. Tegirmondagi suv hajmini  $X_{tsh}$  orqali belgilasak, u holda suspenziyaning umumiy miqdori ( $X_{tsh} + X_{tqzh}$ ) summa sifatida ifodalanishi mumkin, bu esa yopishqoq suspenziya uchun  $X_{tsh}/X_{tqzh} = 1,5 = (1/\varepsilon_{q.z.u} - 1)^{-1}$  nisbatiga olib keladi. Agar suspenziya yopishqoq bo‘lmasa, ya’ni toza suvga yaqin bo‘lsa, unda nisbat  $X_{tsh}/X_{tqzh} = 0$  ga teng bo‘ladi. Quyidagi (11) tenglama ushbu mezonlarning barchasiga mos keladi:

$$\varphi = \max \left\{ 0, \left( 1 - \left( \frac{1}{\varepsilon_{q.z.u}} - 1 \right) \cdot \frac{X_{tqzh}}{X_{tsh}} \right) \right\}^{0.5}.$$

Siklonning ishlashini aks ettiruvchi va modelni yechish uchun zarur bo‘lgan oraliq parametrlar quyidagi tenglamalar orqali aniqlanadi:

$$V'_{gqzs} = \frac{F_{SAS}(X_{zqzh} - X_{zmzh})}{X_{zsh} + X_{zqzh}} \left( 1 - C_1 \exp \left( \frac{-F_{SAS}}{\varepsilon_c} \right) \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{X_{zqzh}}{C_2(X_{zsh} + X_{zqzh})} \right)^{C_3} \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{X_{zmzh}}{X_{zqzh}} \right)^{C_4} \right);$$

$$F_{gqzu} = 0.6 - \left( 0.6 - \frac{X_{zqzh}}{X_{zsh} + X_{zqzh}} \right) \cdot \exp \left( \frac{-V'_{gkzs}}{\alpha_{q.z.u} \varepsilon_c} \right);$$

$$V'_{gss} = \frac{X_{zsh}(V'_{gkzs} - F_{gqzu} \cdot V'_{gkzs})}{F_{gqzu} \cdot X_{zsh} + F_{gqzu} \cdot X_{zmzh} - X_{gmzh}};$$

$$V'_{gmzs} = \frac{X_{zmzh}(V'_{gkzs} - F_{gqzu} \cdot V'_{gkzs})}{F_{gqzu} \cdot X_{zsh} + F_{gqzu} \cdot X_{zmzh} - X_{zmzh}};$$

$$V'_{gqzs} = V'_{gkzs} + \frac{X_{zmzh}(V'_{gkzs} - F_{gqzu} \cdot V'_{gkzs})}{F_{gqzu} \cdot X_{zsh} + F_{gqzu} \cdot X_{zmzh} - X_{zmzh}};$$

$$V''_{gqzs} = V_{zqzs} - V'_{gqzs}; \quad (12)$$

$$V''_{gmzs} = V_{zmzs} - V'_{gmzs}; \quad (13)$$

bu yerda:  $V_{gss}$  – gidrotsiklonidagi suv sarfi;  $V_{gqzs}$  – gidrotsiklonidagi qattiq zarralar sarfi;  $V_{gkzs}$  – gidrotsiklonidagi katta zarralar sarfi va  $V_{gmzs}$  – gidrotsiklonning pastki oqimidagi mayda zarrachalar sarfi;  $V_{zqzs}$  va  $V_{zmzs}$  – mos ravishda zumpfnig chiqishidagi qattiq zarralar va mayda zarrachalar sarfi;  $F_{gqzu}$  – gidrotsiklonning pastki oqimidagi qattiq zarralar ulushi.

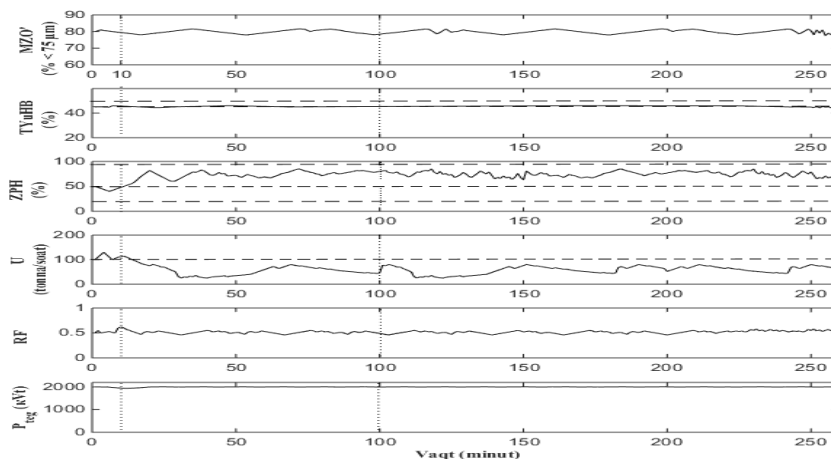
Modelning ishlashini tekshirish uchun parametrlarning qiymatlari, shuningdek yanchish sxemasining ishchi qiymatlari Navoiy kon-metallurgiya kombinati 2-son gidrometallurgiya zavodining texnologik reglamentidan olingan.

Faol g‘alayonlardan qat’iy nazar mahsulotning zarracha o‘lchami va tegirmon yuklanishi robastli nochiziqli modelni (RNM) bashoratlovchi boshqaruv tufayli kerakli darajalar (mos ravishda 80% va 45%)da saqlanadi. Tegirmonning asosiy ko‘rsatkichlarining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi 1-rasmda keltirilgan.

Gidrotsiklondan chiqadigan tayyor mahsulotning o'lchami va zichligini modellashtirish samaradorlik egri chizig'i ko'rinishida taqdim etilgan statik nohiziqli modellarni qurish bilan aniqlanadi.

Gidrotsiklonga kiradigan ( $V''_{gkzs}$ ) ( $m^3/soat$ ) toshlarning sarfini quyidagi tenglama yordamida hisoblash mumkin:

$$V'_{gkzs} = (V''_{gqzs} - V''_{gmzs}) \left(1 - C_1 \exp\left(\frac{-F_{SAS}}{\varepsilon_{qzu}}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{F_i}{C_2}\right)^{C_3}\right) (1 - P_i^{C_4}).$$



1 - rasm. Tegirmonning asosiy ko'rsatkichlarini vaqt bo'yicha o'zgarishlari.

Siklondan chiqadigan mahsulot miqdori quyidagi tenglamalar bilan hisoblangan oqimlarning algebraik yig'indisi orqali aniqlanadi:

$$V'_{gss} = \frac{V''_{zss} (V'_{gkzs} - F_{gqzu} V'_{gkzs})}{F_{gqzu} V''_{zss} + F_u V''_{zmzs} - V''_{zmzs}};$$

$$V'_{gmzs} = \frac{V''_{zmzs} (V'_{gkzs} - F_{gqzu} V'_{gkzs})}{F_{gqzu} V''_{zss} + F_{gqzu} V''_{zmzs} - V''_{zmzs}};$$

$$V'_{gqzs} = V'_{gkzs} + V'_{gmzs}.$$

Mahsulotning unumdorligini (MU) ( $m^3/soat$ ) (14) tenglama orqali hisoblash mumkin:

$$Y_{MZO} = \frac{V''_{gmzs}}{V''_{gqzs}}; \quad (14)$$

$$Y_U = V''_{gqzs}.$$

Mayda zarrachalarning o'lchamini tasniflash Plitt tenglamasi asosida hisoblab chiqilgan.

$$(d_{50c}) = \frac{\exp(6.3F_i)}{(F_{SAS})^{0.45}}.$$

Xulosa qilib shuni ta'kidlash mumkinki, tegirmonning unumdorligi murakkab masala bo'lib, unga ta'sir qiluvchi barcha omillar o'zaro bog'liqdir. Unumdorlik to'g'ridan-to'g'ri xom ashyoning turi va xususiyatlariga, uning fizik

xususiyatlariga, motorlarning aylanish tezligiga, ishlatiladigan sharlarning turiga va ularning yemirilishiga, yuklanishning taqsimlanishiga va boshqalarga bog‘liq.

**Bashoratlovchi model asosida yanchish jarayonini boshqarish**” sarlavhali uchinchi bobda o‘z-o‘zini yanchish sharli tegirmonida holat tenglamalaridagi yanchish jarayonining bashoratli modeli quyidagi funksional bog‘liqliklar ko‘rinishida taqdim etilgan:

$$\dot{\mathbf{x}}_p(t) = \mathbf{f}_p(t, \mathbf{x}_p, \mathbf{u}_p);$$

$$\mathbf{y}_p(t) = \mathbf{g}_p(t, \mathbf{x}_p, \mathbf{u}_p);$$

bu yerda  $\mathbf{x}_p$  yanchish sxemasining holatini aks ettiruvchi o‘zgaruvchilarga mos keladi,  $\mathbf{y}_p$  chiqishda o‘lchanadigan o‘zgaruvchilarga mos keladi;  $\mathbf{u}_p$  – esa obyektning boshqariladigan o‘zgaruvchilari. Holatlar, boshqariladigan va o‘lchanadigan qiymatlar quyidagi munosabatlar shaklida taqdim etiladi:

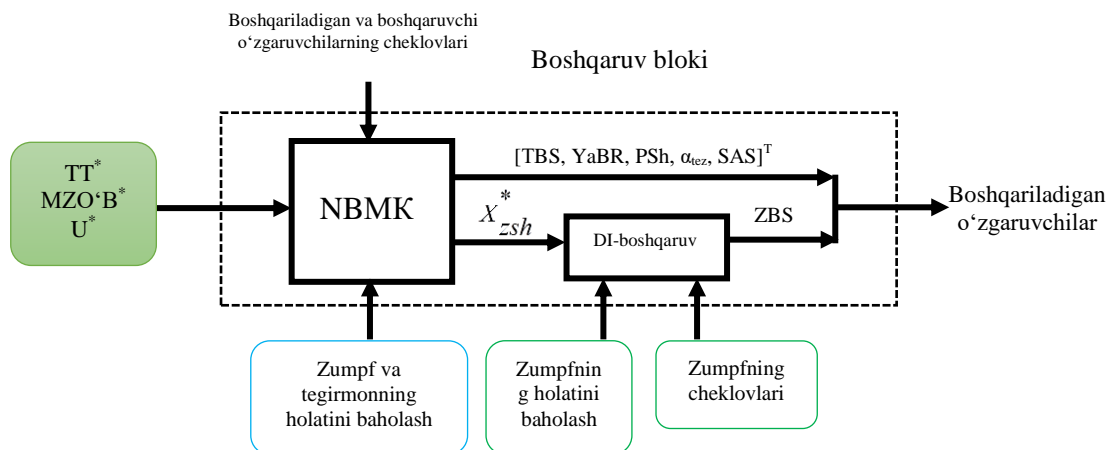
$$\mathbf{x}_p = [X_{tsh}, X_{tqzh}, X_{tmzh}, X_{tth}, X_{tshh}, X_{zsh}, X_{zqzh}, X_{zmzh}]^T;$$

$$\mathbf{u}_p = [TBS, YaBR, PSh, \alpha_{tez}, SAS, ZBS]^T;$$

$$\mathbf{y}_p = [TYuHB, P_{teg}, ZPH, SPZ, MZO', U]^T;$$

$f_p$  funksiya (1) – (8) formulalar orqali aniqlanadi,  $g_p$  funksiya esa (9), (10), (11), (12) va (13) tenglamalar asosida aniqlanadi.

Shu asosda sharli tegirmonda yanchish jarayonini boshqarish arxitekturasi qurilgan. Tegirmonning sxematik boshqarish sxemasi 2-rasmda keltirilgan.



2 - rasm. Yanchish jarayonini boshqarishni aks ettiruvchi prinsipial sxema.

Yanchishga uchun beriladigan ruda (YaBR)ni mahsulotning zarracha o‘lchamini baholashgacha (MZO‘B) yetib borish vaqti oralig‘i 30 minutni tashkil etsa, siklon aralashmasining sarfi (SAS)ni mahsulotning zarracha o‘lchamini baholashgacha (MZO‘B) bo‘lgan vaqt oralig‘i esa 2 minutni tashkil etadi. Shuning uchun ham, tegirmondagi texnologik jarayon zumpfda sodir bo‘ladigan jarayonga nisbatan ancha sekin amalga oshiriladi.

Masalan, agar siklon aralashmasining sarfi (SAS) va zumpfga beriladigan suvning sarflardagi farq  $300 \text{ m}^3/\text{soat}$  bo‘lsa,  $12 \text{ m}^3$  hajmli zumpfdagi pulpa zumpfdan 1 daqiqa ichida o‘tishi mumkin.

Tez va sekin amalga oshiriladigan jarayonlar sxemada ikkita alohida kontur sifatida tasvirlash mumkin bo‘lganligi sababli: a) zumpf uchun ishlatiladigan ma’lumotlarni qayta ishlash tezligi talablari pasaytirilgan yordamchi yuqori

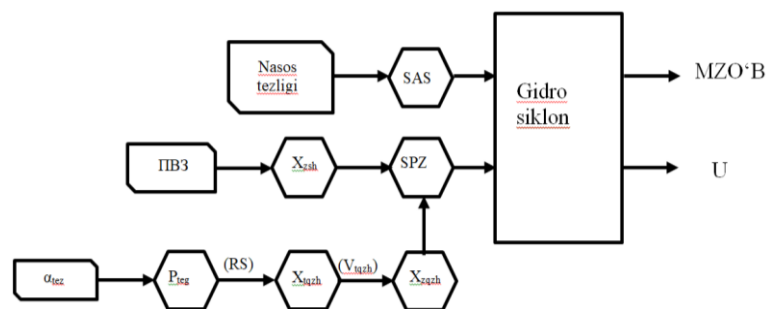
tezlikdagi kontroller va b) optimallashtirish va ma'lumotlarni qayta ishlashning katta yuklamasini amalga oshirish uchun mo'ljallangan asosiy kontrollerni o'z ichiga oladi. 2 - rasmda ko'rsatilgan yanchish jarayonini boshqaruv sxemasida, dinamik inversiyasini (DI) boshqaruv konturi va nohiziqli modeli konturi bilan birlashtirilgan. Dinamik inversiya (DI) kontrolleri zumpfda sodir bo'ladigan jarayonni boshqarish uchun mo'ljallangan. Bu nohiziqli modelga qolgan o'zgaruvchilarning optimal qiymatlarini aniqlash imkonini beradi. Ishlab chiqilgan tizimning o'ziga xos xususiyati shundaki, u dinamik inversiya kontrolleri tomonidan ishlab chiqilgan yechimni hisobga oladigan yagona yechimni ishlab chiqadi.

Statik nohiziqli tenglamalarning analitik yechimini olish uchun quyidagilar talab qilinadi: nohiziqli tenglamalar tizimi shaklida muammoning matematik formulasini aniqlash, tenglamalarni chiziqilashtirish, chegaraviy va boshlang'ich shartlarni hisobga olish kerak, nohiziqli tenglamalarning analitik yechimini olgandan so'ng, uning to'g'riligini va dastlabki muammoga muvofiqligini tekshirish kerak.

Shuni ta'kidlash kerakki, statik nohiziqli tenglamalarni chiziqilashtirish ba'zi salbiy jihatlarga ega: chiziqilashtirishning cheklanishi, nohiziqli effektlar haqidagi ma'lumotlarning yo'qolishi, matematik model murakkabligining oshishi, yechimlarning yaqinlashishini ta'minlay olmasligi.

Nohiziqli boshqarish bir qancha afzalliklarga ega, chunki u chiziqili boshqaruvga nisbatan tizimni yanada moslashuvchan va samarali boshqarish imkonini beradi. Nohiziqli boshqaruvdan voz kechish ayrim salbiy oqibatlarga olib kelishi mumkin, ayniqsa boshqariladigan tizim murakkab nohiziqli xususiyatlarga ega bo'lsa.

Tegirmonning ishlashini boshqaruv darajasi va yanchish darajasi qanchalik mustaqil ekanligini aniqlash uchun ushbu omillarga eng kuchli ta'sir ko'rsatadigan o'zgaruvchilar ro'yxatini tuzish kerak. Buning uchun biz 3 - rasmda keltirilgan sxemani tahlil qilamiz.



3 - rasm. Boshqarilishi mumkin bo'lgan o'zgaruvchilarning blok sxemasi

Mahsulot zarrachalarining o'lchamini baholash va unumdorlik ishlashini baholash siklonga kiradigan pulpa ta'minotini, shuningdek zumpf nasosining motor tezligini o'zgartirish orqali amalga oshiriladigan siklon aralashmasining miqdorini boshqarish imkonini beradi. Siklonga pulpa yetkazib berish zichligi  $X_{zsh}$  va  $X_{zqzh}$  zumpfnig holatiga bog'liq.  $X_{zsh}$  zumpfdagi suv hajmini zumpfga kiradigan suv sarfini rostlash orqali osongina boshqarish mumkin,  $X_{zqzh}$  zumpfdagi

qattiq va mayda zarrachalar hajmi esa tegirmonning qanchalik samarali ishlashiga va ushbu zarralarni zumpfdagi o'zgarishiga bog'liq bo'ladi.  $X_{zqzh}$  ning qiymatini oshirish uchun tegirmondan zumpfdagi ko'proq miqdorda qattiq zarralar kelib tushishi kerak, buni esa  $P_{teg}$  tegirmonning quvvatini o'zgarishiga olib keladigan  $\alpha_{tez}$  tegirmon motorini tezligini o'zgartirish orqali amalga oshirish mumkin bo'ladi. Tegirmon quvvatining ortishi bilan qattiq zarrachalarning sarfi ham oshadi, bu esa  $X_{zqzh}$  qattiq zarralar hajmining oshishiga, o'z navbatida  $X_{zqzh}$  zumpfdagi qattiq va mayda zarralarning umumiy hajmining oshishiga olib keladi. Zumpfdagi qattiq va mayda zarralarning umumiy hajmini oshirish orqali nafaqat siklonga yetkazib berish zichligi, balki konturdan ko'proq miqdordagi qattiq zarralarning chiqib ketishi tufayli unumdorlikni ham oshirish mumkin. Shuningdek,  $\alpha_{tez}$  ni boshqariladigan o'zgaruvchi sifatida ishlatib, unumdorlikni ustidan qo'shimcha nazoratni amalga oshirish mumkin.

Yuqorida bayon etilganlarni umumlashtirib, rudani yanchishning texnologik jarayonini boshqarishning asosiy maqsadlarini shakllantirish mumkin, ular: texnologik parametrlarning o'rnatilgan qiymatlarini joriy nazorat qilish, mahsulotning zarrachalar o'lchamini baholashni va unumdorligini boshqarish, shuningdek, bashoratlovchi modeldan olingan eksperimental va hisoblangan qiymatlar o'rtasidagi chetga chiqishlarni kompensatsiya qilish uchun boshqarish ta'sirlarini ishlab chiqish.

Nochiziqli fazoviy holatdagi boshqaruv tizimining diskret modeli quyidagi funksional bog'liqlik shaklida taqdim etiladi:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{f}_{C_k}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k); \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{g}_{C_k}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k); \end{aligned}$$

Bu (15) funksiyani minimallashtiradigan maqsad funksiyasining optimallik mezonini shakllantirishga imkon beradi:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{u}_k, \dots, \mathbf{u}_{k+N_C-1}} J(\mathbf{u}_k, \dots, \mathbf{u}_{k+N_C-1}, \mathbf{x}_k) \\ \text{s.t. } \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{f}_{C_k}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{g}_{C_k}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \\ \mathbf{u}_l &\leq \mathbf{u}_k \leq \mathbf{u}_u \\ \Delta \mathbf{u}_l &\leq \Delta \mathbf{u}_k \leq \Delta \mathbf{u}_u \\ \mathbf{y}_l &\leq \mathbf{y}_k \leq \mathbf{y}_u \end{aligned} \tag{15}$$

$$q_{21} (2\% \text{TST}_{diap} / 2)^2 = 100 q_{11} \frac{N_P}{N_C} (10\% \text{TYuHB}_{33})^2$$

Zumpfdagi sodir bo'layotgan jarayonni boshqarish uchun mo'ljallangan dinamik inversiya (DI) kontrollerining ishlashini ko'rib chiqamiz. 2 - rasmdan kelib chiqadiki, nochiziqli model  $X_{zsh}$  ning ma'lum bir qiymatini talab qiladi.

Dinamik inversiya kontrolleri zumpfdagi suv miqdorini boshqaradi. Raqamli kirish boshqaruvi PID-rostlagichli turg'un chiziqli tizim shaklida amalga oshiriladigan prinsipga muvofiq ishlaydi. Rostlagichni tanlash tizimning dinamikasini invertlash usuli orqali boshqarish signalining qiymatini hisoblash imkonini beradi.

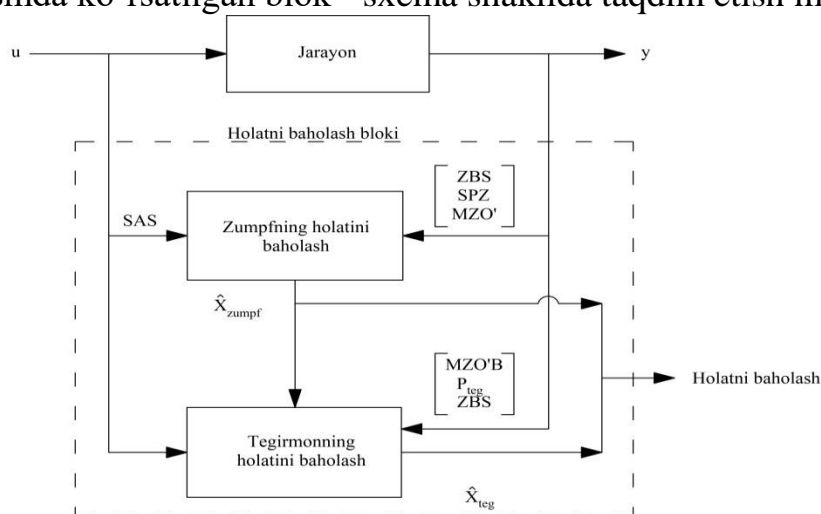
Dinamik inversiya kuchaytirishning proporsional va integral koeffitsiyentlarining qiymatlarini tanlash orqali tizimning kerakli javob trayektoriyasini olishga imkon beradi.

$$eK_p + K_I \int_0^t e d\tau + \dot{e} = 0;$$

bu yerda  $e = \hat{y} - y_{sp} - (\hat{y})$  o'lgan va  $(y_{sp})$  o'rnatilgan qiymatlar o'rtasidagi farq.

Zumpfdagi suv hajmini boshqarish orqali zumpfdagi pulpa hajmining chegaralarini manipulyatsiya qilish mumkin.

Texnologik parametrlarning o'lgan qiymatlari tegirmon va zumpfnig holatini baholash uchun ishlatiladi. Ushbu qurilmalar odatda aylanish tezligi, harorat, tebranish, to'ldirish darajasi va boshqa parametrlar haqida ma'lumot beradigan turli xil datchiklar bilan jihozlangan. Zumpf holatlarini baholash jarayonini 4 – rasmda ko'rsatilgan blok - sxema shaklida taqdim etish mumkin.

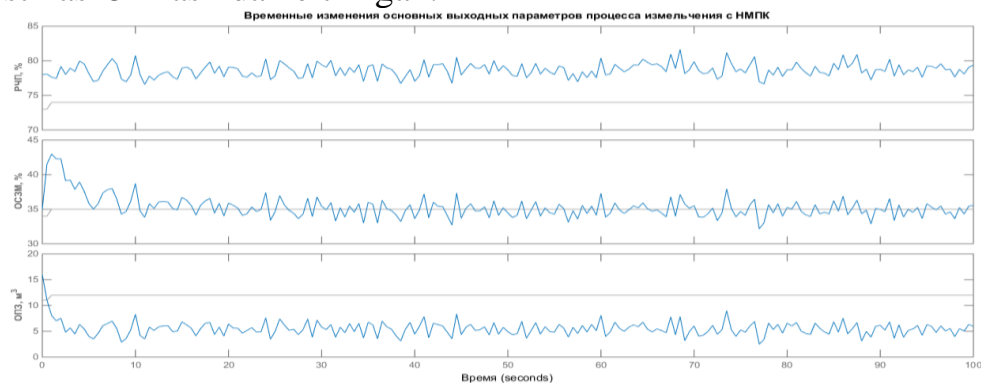


4 – rasm. Zumpf holatlarini baholash jarayonining blok-sxemasi.

Sirkulyatsion aralashmaning umumiy sarfi (SAS) quyidagi ifoda orqali hisoblanadi

$$F_{SAS} = V_{zss} + V_{zqs} .$$

Yuqorida ko'rsatilgan parametrlar asosida Matlab paketida tizimning nohiziqli bashoratlovchi modeli kontrollerning modeli yaratildi va natijalar o'tkinchi xarakteristikalar ko'rinishida olindi. Ishlab chiqilgan modelning o'tkinchi xarakteristikasi 5 - rasmda keltirilgan.



5 - rasm. Yanchish jarayonining chiqish parametrlarini o'tkinchi xarakteristikalari



## XULOSA

Dissertatsiya ishidada matematik va imitatsion modellashtirish usullari, noaniqlik sharoitida tizimlarni boshqarish, kombinatsiyalangan boshqaruv tizimlarini qurish tamoyillari, tizimlarga kirish parametrlarining o'zgarishiga avtomatik ravishda moslashishga va texnologik jarayonni optimallashtirishga imkon beradigan sun'iy intellekt usullari asosida noaniqlik sharoitida nochiziqli dinamik obyektlarni adaptiv baholash va boshqarish algoritmlari ishlab chiqilgan.

Natijada quyidagi ilmiy natijalar olingan:

1. Boshqarish tizimiga texnologiyaning noaniqliklari va nochiziliklarini hisobga olishga imkon beradigan bashoratlovchi model ishlab chiqilgan. Natijada texnologik jarayonni yanada aniqroq tasvirlash imkoniyati paydo bo'lgan.

2. Nochiziqli boshqaruv yanada moslashuvchan hisoblanadi va ma'lum bir tizimning nochiziqli xususiyatlarini, nochiziligini va tizimlar o'rtasidagi murakkab o'zaro ta'sirlarni hisobga olishga imkon beradi, tizimdagi g'alayonlar va noaniqliklarga nisbatan turg'un isbotlandi. Natijada boshqarish jarayoniga sezilarli ta'sir ko'rsatishi mumkin bo'lgan tashqi sharoitlarning o'zgarishini, tizimning nochiziqli xususiyatlarini va boshqa omillarni kompensasiya qilish imkoniyati yaratildi.

3. Tegirmonning umumiy yuklanishini uning quvvatiga ta'siri hamda tegirmon quvvatini suspenziyaning reologik holatiga bog'liqligining hisoblangan qiymatlari olingan. Natijada tegirmonning quvvatini yanada aniqroq boshqarish imkoniyati yaratildi.

4. Tegirmonning energiya iste'moli asosan ikkita qiymatga: suspenziyaning reologik omili va tegirmonning umumiy yuklanishiga bog'liq ekanligi aniqlandi (oshkor qilindi, ochib berildi). Natijada yanchish jarayonining umumiy unumdorligi oshdi.

5. Reologik omilning 0,51 ga teng bo'lgan optimal qiymatida maksimal unumdorlik qiymatiga erishish mumkinligi aniqlanadi. Natijada gidrotsiklonga suspenziya aralashmasi sarfini oshirish imkoniyati yaratilib umumiy unumdorlikning oshishiga erishildi.

6. Gidrotsiklonga kiradigan toshlarning sarfini, zumpfnig quyi oqimidan chiqadigan suv va mayda zarrachalarni miqdorini, gidrotsiklongdan chiqadigan pastki oqim mahsulotining sarfini, suv sarfini, qattiq va mayda zarralar sarfini, shuningdek gidrotsiklon oqimidan chiqadigan kattaliklarni hisoblash uchun empirik tenglamalar olindi. Natijada bashoratlovchi kontrollerning boshqaruv ta'sirlarini aniqligi oshdi.

7. Nochiziqli model asosida mahsulot zarralarining o'lchamini baholash va unumdorligini mustaqil boshqarish tizimi ishlab chiqildi. Natijada boshqarish tizimining parametrlariga ta'sir qiluvchi omillar tarkibi aniqlab olindi.

8. Rudani yanchishning texnologik jarayonini intellektual boshqarish tizimining funksional sxemasi ishlab chiqilgan. Natijada yanchish jarayoni tarkibidagi har bir blokning boshqarish imkoniyati yaratildi.

9. Boshqariladigan o'zgaruvchilar cheklovlari chegaralarida tayyor mahsulotning zarrachalarning o'rnatilgan o'lchamini baholashning va

unumdorligining qiymatini mustaqil nazorat qilinishini ta'minlaydigan boshqarish tizimi ishlab chiqilgan. Natijada, tayyor mahsulotning zarracha o'lchamini va qurilmaning unumdorligini yanada aniqroq baholash imkoniyati yaratildi.

10. Ikkita izolyatsiya qilingan kontrollerdan foydalanilganligiga qaramasdan, boshqaruv tizimining bashoratlovchi kontrolleri dinamik inversiya kontrolleri tomonidan ishlab chiqilgan yechimni hisobga olgan holda yagona yechimni ishlab chiqadi. Natijada texnologik jarayonni yanada aniqroq boshqarish imkoniyati yaratildi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.Т.03.02 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ  
ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

---

**НАВОИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНО-  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**БОЙБУТАЕВ САНЖАР БАХРИТДИНОВИЧ**

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССА  
ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУДЫ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

**05.01.08 - Автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами (технические науки)**

**АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам**

**Ташкент – 2023**

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за №В2023.1.PhD/Т2483.

Диссертация выполнена в Навоийском государственном горно-технологическом университете.

Автореферат диссертации на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице ([www.tdtu.uz](http://www.tdtu.uz)) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» ([www.ziyo.net](http://www.ziyo.net)).

**Научный руководитель:** Мухитдинов Джалолитдин Пахритдинович  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** Исмаилов Мирхалил Агзамович  
доктор технических наук, профессор  
Иваньян Арсен Игнатъевич  
Доктор философии (PhD) по техническим наукам

**Ведущая организация:** Ташкентский химико-технологический институт

Защита диссертации состоится «16» 12 2023 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.T.03.02 при Ташкентском государственном техническом университете (Адрес: 100095, г.Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz)).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (зарегистрировано №319) (Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: (99871) 207-14-70).

Автореферат диссертации разослан «7» 12 2023 года.  
(реестр протокола рассылки №25 от «6» 12 2023 года)



**Н.Р.Юсупбеков**

Председатель научного совета  
по присуждению учёных степеней,  
д.т.н., профессор, академик АН РУз

**У.Ф.Мамиров**

Ученый секретарь научного совета  
по присуждению учёных степеней,  
доктор технических наук (DSc), доцент

**Х.З.Игамбердиев**

Председатель Научного семинара  
при научном совете по присуждению учёных степеней,  
д.т.н., профессор, академик АН РУз

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире в настоящее время много внимания уделяется совершенствованию систем управления мельничными установками. Мельницы и мельничные установки используются в различных отраслях, таких как горнодобывающая, цементная, химическая и другие для измельчения материалов и получения конечного продукта определенной фракции или качества. Управление процессом измельчения в мельнице является ключевым фактором для достижения более высоких результатов и повышения эффективности работы.

В мире проблемы, связанные с разработкой автоматизированных систем управления в этой области, активно исследуются. Все большее внимание уделяется научным работам, связанным с разработкой систем управления мельничными установками, позволяющими осуществлять контроль параметров процесса, повышать точность, эффективность и качество управления технологическими процессами. Это достигается путем контроля размера частиц, распределения их в продукте, управления уровнем износа мельничных элементов и другими параметрами при условии недостаточности и неточности входных данных и неопределенности моделей и внедрения искусственного интеллекта. Искусственный интеллект может иметь значительное влияние на систему управления мельницами. Его использование в системе управления мельницами может повысить эффективность работы, улучшить качество продукции, снизить вероятность отказов и аварийных ситуаций, а также повысить безопасность работы.

Сегодня в нашей стране проблемам, связанным с разработкой автоматизированных систем управления в этой области, уделяется значительное внимание и ведутся активные исследования. Все эти проблемы требуют комплексного подхода к разработке автоматизированных систем управления мельничными установками. Они включают в себя исследования в области автоматизации процессов, разработку новых алгоритмов и методов, а также интеграцию с другими системами и оборудованием, позволяющими повысить эффективность управления и обеспечить энерго- и ресурсосбережение. В Стратегии по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2022–2026 годы четко обозначены задачи «В целях снижения потерь и повышения эффективности использования ресурсов в отраслях промышленности..., финансирование проектов по внедрению современных энергосберегающих технологий, оборудования и возобновляемых источников энергии, производства устройств возобновляемых источников энергии и усовершенствование энергоэффективности.»<sup>1</sup>. Поэтому разработка и усовершенствование систем управления процессами измельчения руды в условиях неопределенности является актуальной и востребованной задачей.

Исследования, выполненные в реферируемой диссертационной работе,

---

<sup>1</sup>Указ Президента Республики Узбекистан «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022 — 2026 годы» УП-60 от 28 января 2022 года.

соответствуют перечню задач, предусмотренных Указами Президента Республики Узбекистан №УП4947 от 7 февраля 2017 года «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» и УП-60 от 28 января 2022 года «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы», №ПП-5159 от 24 июня 2021 года «О дополнительных мерах по развитию горно-металлургической промышленности и смежных отраслей», постановлениями ПП-4124 от 17 января 2019 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности предприятий горно-металлургической отрасли» и №ПП-3682 от 27 апреля 2018 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов», а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики IV. «Развитие информатизации и информационно-коммуникационных технологий».

**Степень изученности проблемы.** Современные исследования, направлены на разработку алгоритмов искусственного интеллекта и автоматизации для достижения более высоких результатов в управлении процесса измельчения в мельницах при условии недостаточности и неточности входных данных и неопределенности моделей. Одним из ключевых аспектов здесь является управление неопределенностью. Это означает, что система управления должна быть способна адаптироваться и принимать решения на основе изменяющихся условий и данных. Для более глубокого исследования этой проблемы учеными активно используются методы математического моделирования и симуляции процессов для тестирования и оптимизации систем управления. Для этого используются различные алгоритмы, такие как адаптивное управление, обратная связь и прогнозирование.

Комплексное решение этих проблем может предопределить значительные преимущества в плане эффективности, экономии ресурсов и снижения воздействия на окружающую среду. Значительный вклад в решение данной проблемы внесли зарубежные ученые: К. Nageswararao<sup>2</sup>, М. Ramasamy<sup>3</sup>, Х. Chen<sup>4</sup>, П.П.Пилов<sup>5</sup>, Н.С.Прядко, В.Н.Богатиков<sup>6</sup>,

---

<sup>2</sup> K. Nageswararao, D. M. Wiseman, and T. J. Napier-Munn, "Two empirical hydrocyclone models revisited," *Minerals Eng.*, vol. 17, no. 5, pp. 671–687, 2004.

<sup>3</sup> M. Ramasamy, S.S. Narayanan, C.D.P. Rao, Control of ball mill grinding circuit using model predictive control scheme, *J. Process Control* 15 (3) (2005) 273–283.

<sup>4</sup> Chen, X., Zhai, J., Li, S., & Li, Q. (2007). Application of model predictive control in ball mill grinding circuit. *Minerals Engineering*, 20(11), 1099–1108.

<sup>5</sup> *Пилов П. И., Прядко Н. С.* Моделирование замкнутых циклов измельчения руд на основе баланса контрольного класса крупности // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – № 6. – С. 75–80.

<sup>6</sup> Богатиков В.Н., Браун-Аквей Виллиам, Форгор Лемпого Аппаратное и программное обеспечения для системы управления технологическим процессом измельчения / Интернет-журнал «Науковедение», 2015 №1 [Электронный ресурс]-М. Науковедение, 2015.

К.Я.Улитенко<sup>7</sup> и др. Проблемам создания регуляторов и наблюдателей за состояниями динамических систем посвящены работы А. Pomerleau<sup>8</sup>, А.А. Niemi<sup>9</sup>, А.А.Туз<sup>10</sup>, В. Браун-Аквей<sup>11</sup>, и другие. Существенный вклад в решение данной проблемы внесли и ученые Узбекистана - Н.Р. Юсупбеков<sup>12</sup>, К. Санакулов<sup>13</sup>, У.А. Эргашев, Х.З. Игамбердиев<sup>14</sup>, З.О. Эшмуродов<sup>15</sup>, Д.П. Мухитдинов<sup>16</sup> и др.

Несмотря на большой объем представленной литературы, недостаточно внимания уделено проблемам: повышение эффективности мельничного процесса, являющейся одной из главных целей моделирования и управления мельничными установками; создание автономных систем управления, которые могут принимать решения и оптимизировать процесс измельчения руды без прямого участия операторов; проведение работ по интеграции процесса измельчения руды с другими её процессами обработки. На этом основании можно считать, что проблема создания прогностической математической модели в условиях неопределенности с целью усовершенствования системы управления процессом измельчения руды, позволяющей предсказывать результаты измельчения еще до его начала и способной адаптироваться к изменяющимся условиям и требованиям производства, является актуальной.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских проектов БВ-Атех-2018-516 «Исследования и разработка математических моделей и методов неразрушающего контроля состояния машин и оборудования на основе

<sup>7</sup> Улитенко К.Я., Морозов В.В. Управление операциями измельчения и классификации на основе типизации руд // Горный информ.-аналит. бюллетень, 2014. – №3. - С. 162-167.

<sup>8</sup> A. Pomerleau, D. Hodouin, A. Desbiens, E. Gagnon, A survey of grinding circuit control methods: from decentralized PID controllers to multivariable predictive controllers, Powder Technol. 108 (2–3) (2000) 103–115.

<sup>9</sup> A.J. Niemi, L. Tian, R. Ylinen, Model predictive control for grinding systems, Control Eng. Pract. 5 (2) (1997) 271–278.

<sup>10</sup> Туз А. А., Богатиков В. Н. Построение модели процесса измельчения в агрегате непрерывного действия с замкнутым циклом ОАО «Ковдорский ГОК» с применением нейросетевых моделей // Труды Кольского научного центра РАН. 2013. №5 (18).

<sup>11</sup> В. Браун-Аквей, Разработка программного обеспечения для управления контуром помола / А. Н. Чохонелидзе, Ф. Лемпого, В. Браун-Аквей / Интернет-журнал «Науковедение», 2014 №3 (22)

<sup>12</sup> Юсупбеков Н.Р., Нурмухамедов Х.С., Зокиров С.Г. Кимёвий технология асосий жараён ва қурилмалари. –Т.: «Фан ва технология», 2015. - 848 б.

<sup>13</sup> К.Санакулов, У.А.Эргашев, Е.С.Ткаченко Усовершенствование схемы измельчения на гидрометаллургическом заводе №2// Сборник статей по материалам Международной научно-практической конференции «Интеграции науки, образования и производства – залог прогресса и процветания», посвященной 5-летию основания Навоийского отделения АН РУз. 9 -10 июня 2022 года, С131-135, Том-3, г.Навои-2022.

<sup>14</sup> Игамбердиев Х. З., Севинов Ж. У. Алгоритмы адаптивной идентификации динамических систем на основе принципа регулярности //Журнал «Автоматизация. Современные технологии», Издательство "Инновационное машиностроение"(Москва), ISSN. – 2020. – С. 0869-4931.

<sup>15</sup> Эшмуродов З.О. Разработка систем стабилизации питания мельничного блока измельчения руды // Труды международной научной конференции на тему: Наука и образование – ведущий фактор стратегии «Казахстан-2030». – Караганда, 24-25 июня 2008 г. – Выпуск 1. – С. 367-369.

<sup>16</sup> Mukhitdinov, Djalolitdin Pakhritdinovich and Boybutayev, Sanjar (2021) "PROBLEMS OF MODELING AND CONTROL OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF ORE GRINDING," *Chemical Technology, Control and Management*: Vol. 2021 : Iss. 4 , Article 7.

моделирования» (2018-2020) и Ташкентского государственного технического университета № Ф-4-56 «Разработка теоретических основ и методов структурно-параметрического синтеза интеллектуальных систем управления сложными технологическими объектами на основе нечетко-множественных отношений» (2016-2020).

**Цель исследования** заключается в усовершенствовании системы управления процессом измельчения руды на основе прогностической математической модели, позволяющей предсказывать результаты процесса измельчения еще до его начала и способной адаптироваться к изменяющимся условиям и требованиям производства.

**Задачи исследования:**

создание прогностической математической модели для усовершенствованного нелинейного управления, позволяющего в сравнении с линейным более гибко и эффективно управлять процессом измельчения руды;

провести анализ переходных характеристик каждого из уравнений, входящих в математическое описание технологического процесса измельчения, и имитационной модели с целью установления возможности и времени перехода на новое устойчивое состояние;

разработать систему независимого управления оценки размера частиц продукта и производительности на основе нелинейной модели;

разработка системы управления из комбинации контроллеров с нелинейной прогнозирующей моделью и динамической инверсией позволяющей снизить вычислительные затраты.

**Объектом исследования** являются технологические процессы, происходящие в мельничной установке, как нестационарные объекты и системы управления ими.

**Предметами исследования** являются: технологический процесс измельчения руды; анализ материалов, включающих изучение физических и химических свойств материалов, таких как твердость, прочность, плотность, размер и форма частиц, и другие параметры, способствующие определению наиболее эффективных методов и инструментов измельчения; системы управления, основанные на оптимальных алгоритмах.

**Методы исследования.** В диссертационной работе применены методы математического и имитационного моделирования, управления системами в условиях неопределенности, принципы построения комбинированных систем управления, методы искусственного интеллекта, позволяющие системам автоматически адаптироваться к изменениям входных параметров и оптимизировать процесс.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

на основе эмпирических уравнений разработана прогностическая модель, позволяющая системе управления учитывать неопределенности и нелинейности технологического процесса измельчения руды;

разработана двухконтурная комбинированная система управления на основе быстродействующего контроллера с пониженными требованиями к

скорости обработки данных, используемого для зумпфа, и на основе высокоскоростных устройств управления с нелинейной прогностической моделью для медленных процессов в контуре измельчения руды;

на основе определения оптимальных значений переменных нелинейной модели разработан алгоритм разработки единого решения, учитывающего решение, определяемое устройством управления динамической инверсии;

для создания управляющих воздействий, компенсирующих отклонения между экспериментальными и рассчитанными значениями, полученными по прогностической модели, разработана система управления, обеспечивающая независимое отслеживание заданного значения дисперсности частиц готового продукта и производительности установки в пределах ограничений управляемых переменных.

**Практические результаты исследования состоят в следующем:**

разработан алгоритм, включающий эмпирически определяемый реологический коэффициент  $\varphi$ ;

проанализированы переходные характеристики всех уравнений, входящих в математическое описание технологического процесса измельчения и имитационной модели в целом, с целью установления возможности и времени перехода на новое устойчивое состояние;

получены расчетные значения влияния общей загрузки мельницы на ее мощность и зависимость мощности мельницы от реологического состояния суспензии;

разработана функциональная схема интеллектуальной системы управления технологическим процессом измельчения руды;

разработаны программные обеспечения, реализующие расчет энергозатрат, реологического фактора и т.д.

**Достоверность результатов исследования.** Достоверность результатов исследования основана на использовании теоретически достоверных концепций, методов математического и имитационного моделирования, а также подтверждается надлежащим применением научных методов, включая определение целей исследования, формирование гипотез, разработку методики, проведение экспериментов и согласованность теоретических и экспериментальных результатов.

**Научная и практическая значимость результатов исследования**

Научная значимость результатов исследования заключается в развитии методов математического и имитационного моделирования, а также систем управления из комбинации контроллеров с нелинейной прогнозирующей моделью и динамической инверсии, отличительной чертой которых является учет прогностической модели решений, выработанных контроллером динамической инверсии.

Практическая значимость результатов исследования заключается в разработке функциональной схемы интеллектуальной системы управления технологическим процессом измельчения руды, обеспечивающей независимое отслеживание заданного значения дисперсности частиц

готового продукта и производительности установки в пределах ограничений управляемых переменных.

**Внедрение результатов исследования.** На основе результатов усовершенствования системы управления процессом измельчения руды:

внедрена система управления, обеспечивающая независимое отслеживание заданного значения дисперсности частиц готового продукта и производительности установки в пределах ограничений управляемых переменных на ГМЗ-2 АО НГМК. (справка АО НГМК № 23/01-01-07/312 от 23.04.2023). В результате появляется возможность более точной оценки размера частиц готового продукта и производительности установки;

внедрена двухконтурная комбинированная система управления на базе прогностической модели и контура динамической инверсии на ГМЗ-2 АО НГМК. (справка АО НГМК № 23/01-01-07/312 от 23.04.2023). В результате количество готовой продукции, получаемой в результате измельчения, увеличилось на 6 %.

**Апробация результатов исследования.** Результаты исследования прошли апробацию на пяти международных и одной республиканской научно-практических конференциях.

**Опубликованность результатов исследования.** По теме исследования опубликованы 14 научных работ, в том числе 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК РУз, из них 3 – за рубежом, получены 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Диссертация содержит 120 страниц, проиллюстрированных 36 рисунками и 7 таблицами.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснованы актуальность темы диссертационного исследования и необходимость проведенных исследований, определены цель и задачи исследования, показано соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий в республике, изложена научная новизна и практические результаты исследований, научная и практическая значимость полученных результатов, показаны результаты внедрения исследований в практику, приведены сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Современное состояние проблем управления процессом измельчения руды с целью освобождения ценных минералов»** изложены результаты анализа современного состояния проблем моделирования и управления процессом измельчения руд. Приведен анализ проблем моделирования, позволяющих более точно прогнозировать производительность мельницы и повышающих ее эффективность с привлечением для этих целей методов искусственного интеллекта, а также

усовершенствования систем управления на этой основе. На основе изученных материалов определены цель и задачи исследования.

Во второй главе диссертации, названной «Разработка динамической прогностической модели схемы измельчения в условиях неопределенности», на основе аналитических приемов построена прогностическая модель, позволяющая системе управления учитывать неопределенности и нелинейности технологии. Разработанная математическая модель представлена в виде блоков, описывающих питатель, собственно мельницу полусамоизмельчения, зумпф и гидроциклон.

Ниже приведены уравнения, отражающие функционирование мельницы с зумпфом в пространстве состояний.

Последний индекс в уравнениях указывает на рассматриваемый модуль (питатель, мельница, зумпф или гидроциклон), второй индекс показывает форму (камни, твердые частицы, крупные частицы, мелкие частицы, шары, вода). Индекс в расходах показывает, чем он является: притоком, пополнением или уменьшением расхода.

$$\dot{X}_{\text{ОВМ}} = F_{\text{ПВМ}} - \frac{\varphi V_v X_{\text{ОВ}} X_{\text{ОВ}}}{X_{\text{ОТЧ}} + X_{\text{ОВ}}} + V_{\text{ПВЗ}} \quad (1)$$

$$\dot{X}_{\text{ОТЧМ}} = \frac{F_{\text{РНИ}}}{\rho_{\text{Ш}}} (1 - \alpha_r) - \frac{\varphi V_v X_{\text{ОВ}} X_{\text{ОТЧ}}}{X_{\text{ОТЧ}} + X_{\text{ОВ}}} + V_{\text{ПТЧЗ}} + \frac{\varphi P_{\text{мель}}}{\rho_{\text{Ш}} \phi_r} \left( \frac{X_{\text{ОК}}}{X_{\text{ОК}} + X_{\text{ОТЧ}}} \right) \quad (2)$$

$$\dot{X}_{\text{ОМЧМ}} = \frac{F_{\text{РНИ}}}{\rho_{\text{Ш}}} \alpha_f - \frac{\varphi V_v X_{\text{ОВ}} X_{\text{ОМЧ}}}{X_{\text{ОТЧ}} + X_{\text{ОВ}}} + V_{\text{ПМЗ}} + \frac{\varphi P_{\text{мель}}}{\rho_{\text{Ш}} \phi_f} / [1 + \alpha_{\text{ф}} \left( \frac{X_{\text{ОВ}} + X_{\text{ОК}} + X_{\text{ОТЧ}} + X_{\text{ОШ}}}{v_{\text{мель}}} - v_{P_{\text{max}}} \right)] \quad (3)$$

$$\dot{X}_{\text{ОКМ}} = \frac{F_{\text{РНИ}}}{\rho_{\text{Ш}}} \alpha_r - \frac{\varphi P_{\text{мель}}}{\rho_{\text{Ш}} \phi_r} \left( \frac{X_{\text{ОК}}}{X_{\text{ОК}} + X_{\text{ОТЧ}}} \right) \quad (4)$$

$$\dot{X}_{\text{ОШМ}} = \frac{F_{\text{СШ}}}{\rho_p} - \frac{\varphi P_{\text{мель}}}{\phi_b} \left( \frac{X_{\text{ОШ}}}{\rho_{\text{Ш}} (X_{\text{ОК}} + X_{\text{ОТЧ}}) + \rho_p X_{\text{ОШ}}} \right) \quad (5)$$

$$\dot{X}_{\text{ОВЗ}} = \frac{\varphi \bullet V_v \bullet X_{\text{ОВ}} \bullet X_{\text{ОВ}}}{X_{\text{ОТЧ}} + X_{\text{ОВ}}} - \frac{F_{\text{РЦС}} \bullet X_{\text{ОВ}}}{X_{\text{ОВ}} + X_{\text{ОТЧ}}} + F_{\text{ПВЗ}} \quad (6)$$

$$\dot{X}_{\text{ОТЧЗ}} = \frac{\varphi \bullet V_v \bullet X_{\text{ОВ}} \bullet X_{\text{ОТЧ}}}{X_{\text{ОТЧ}} + X_{\text{ОВ}}} - \frac{F_{\text{РЦС}} \bullet X_{\text{ОТЧ}}}{X_{\text{ОВ}} + X_{\text{ОТЧ}}} \quad (7)$$

$$\dot{X}_{\text{ОМЧЗ}} = \frac{\varphi \bullet V_v \bullet X_{\text{ОВ}} \bullet X_{\text{ОМЧ}}}{X_{\text{ОТЧ}} + X_{\text{ОВ}}} - \frac{F_{\text{РЦС}} \bullet X_{\text{ОМЧ}}}{X_{\text{ОВ}} + X_{\text{ОТЧ}}} \quad (8)$$

где  $X_{\text{ОВМ}}$ ,  $X_{\text{ОТЧМ}}$ ,  $X_{\text{ОМЧМ}}$ ,  $X_{\text{ОКМ}}$ ,  $X_{\text{ОШМ}}$  – объем мельничной воды, твердых частиц, мелочи, камней и шаров в мельнице таким образом,  $X_{\text{ОВЗ}}$ ,  $X_{\text{ОТЧЗ}}$ ,  $X_{\text{ОМЧЗ}}$  – соответственно объемы воды, твердых частиц и мелких частиц в зумпфе, а  $V_{\text{ПВГ}}$ ,  $V_{\text{ПТЧГ}}$ ,  $V_{\text{ПМГ}}$  – это соответственно: поток воды, твердых частиц и мелочи в гидроциклоне. Поскольку твердые частицы составляют смесь мелкой и крупной руды, остается процесс расчета изменения твердых и мелких частиц.

Модель имеет три выхода: выход мельницы, ОСЗМ (объем состояния загрузки), объем зумпфа, с загрузкой ОПЗ, и оценка дисперсности частиц на выходе из гидроциклона ОРЧП, которые определяются по соотношениям:

$$Y_{\text{ОСЗМ}} = (X_{\text{ОВМ}} + X_{\text{ОТЧМ}} + X_{\text{ОКМ}} + X_{\text{ОШМ}}) / v_{\text{мель}} \quad (9)$$

$$Y_{\text{ОПЗ}} = X_{\text{ОТЧЗ}} + X_{\text{ОВЗ}} \quad (10)$$

$$Y_{\text{ОРЧП}} = V_{\text{РМЧГ}}'' / V_{\text{РЧГ}}''$$

$$Y_{\Pi} = V''_{\text{ргчг}}$$

где  $V''_{\text{рмчг}}$  и  $V''_{\text{ргчг}}$  - объемная скорость мелких и твердых частиц на выходе из гидроциклона. Параметры уравнений (1-8) определяются по уравнениям:

$$\varphi = \max \left\{ 0, \left( 1 - \left( \frac{1}{\varepsilon_{\text{д.т.ч}}} - 1 \right) \cdot \frac{X_{\text{отчм}}}{X_{\text{овм}}} \right) \right\}^{0.5} \quad (11)$$

Данное уравнение (11) определяет функциональную зависимость реологического фактора в зависимости от расхода воды, а также количества твердых частиц в мельнице.

$$P_{\text{мель}} = P_{\text{max}} \left\{ 1 - \delta_{0.3} Z_x^2 - 2\chi_{\text{max}} \delta_{0.3} \delta_{\text{т.ф}} Z_x Z_r - \delta_{\text{т.ф}} Z_r^2 \right\} \cdot (\alpha_{\text{скор}})^{\alpha_{\text{см}}}$$

$$Z_x = \frac{X_{\text{овм}} + X_{\text{окм}} + X_{\text{отчм}} + X_{\text{ошм}}}{v_{\text{мель}} \cdot v_{p_{\text{max}}}} - 1$$

$$Z_r = \frac{\varphi}{\varphi_{p_{\text{max}}}} - 1,$$

где  $\varphi$  - эмпирически определяемый реологический коэффициент,  $P_{\text{мель}}$  - потребляемая мощность мельницы,  $Z_x$  - влияние заряда, влияющего на потребляемую мощность, а  $Z_r$  - влияние реологии заряда, влияющего на потребляемую мощность. Коэффициент ( $\varphi$ ), определяемый эмпирически, учитывает зависимость мощности схемы измельчения от физических свойств суспензии. Обозначим объемное содержание воды -  $X_{\text{овм}}$ . Тогда общее количество суспензии можно выразить в виде суммы ( $X_{\text{овм}} + X_{\text{отчм}}$ ), что приводит к соотношению  $X_{\text{овм}}/X_{\text{отчм}} = 1,5 = (1/\varepsilon_{\text{д.т.ч}} - 1)^{-1}$  для вязкой суспензии. Если суспензия является не вязкой, а близкой к чистой воде, то соотношение  $X_{\text{овм}}/X_{\text{отчм}} = 0$ . Приведенное ниже уравнение (11) соответствует всем этим критериям.

$$\varphi = \max \left\{ 0, \left( 1 - \left( \frac{1}{\varepsilon_{\text{д.т.ч}}} - 1 \right) \cdot \frac{X_{\text{отчм}}}{X_{\text{овм}}} \right) \right\}^{0.5}$$

Промежуточные параметры, отражающие функционирование циклона и необходимые для решения модели, определяются по уравнениям:

$$V'_{\text{ргчг}} = \frac{F_{\text{рлс}}(X_{\text{отчз}} - X_{\text{омчз}})}{X_{\text{овз}} + X_{\text{отчз}}} \left( 1 - C_1 \exp \left( \frac{-F_{\text{рлс}}}{\varepsilon_c} \right) \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{X_{\text{отчз}}}{C_2(X_{\text{овз}} + X_{\text{отчз}})} \right)^{C_3} \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{X_{\text{омчз}}}{X_{\text{отчз}}} \right)^{C_4} \right)$$

$$F_{\text{дтчг}} = 0.6 - \left( 0.6 - \frac{X_{\text{отчз}}}{X_{\text{овз}} + X_{\text{отчз}}} \right) \cdot \exp \left( \frac{-V'_{\text{ргчг}}}{\alpha_{\text{д.т.ч}} \varepsilon_c} \right)$$

$$V'_{\text{рвг}} = \frac{X_{\text{овз}}(V'_{\text{ргчг}} - F_{\text{дтчг}} \cdot V'_{\text{ргчг}})}{F_{\text{дтчг}} \cdot X_{\text{овз}} + F_{\text{дтчг}} \cdot X_{\text{омчз}} - X_{\text{омчз}}}$$

$$V'_{\text{рмчг}} = \frac{X_{\text{омчз}}(V'_{\text{ргчг}} - F_{\text{дтчг}} \cdot V'_{\text{ргчг}})}{F_{\text{дтчг}} \cdot X_{\text{овз}} + F_{\text{дтчг}} \cdot X_{\text{омчз}} - X_{\text{омчз}}}$$

$$V'_{\text{ргчг}} = V'_{\text{рвг}} + \frac{X_{\text{омчз}}(V'_{\text{ргчг}} - F_{\text{дтчг}} \cdot V'_{\text{ргчг}})}{F_{\text{дтчг}} \cdot X_{\text{овз}} + F_{\text{дтчг}} \cdot X_{\text{омчз}} - X_{\text{омчз}}}$$

$$V''_{\text{ргч}} = V_{\text{ргчз}} - V'_{\text{ргч}}$$

$$V''_{\text{рмчг}} = V_{\text{рмчз}} - V'_{\text{рмчг}}$$

где  $V_{\text{рвг}}$  – расход воды в гидроциклоне;  $V_{\text{ргчг}}$  – расход твердых частиц;  $V_{\text{ргчг}}$  – расход грубых частиц и  $V_{\text{рмчг}}$  – мелочи в нижнем потоке гидроциклона;  $V_{\text{ргчз}}$  и  $V_{\text{рмчз}}$  – соответственно, расходы твердых и мелких частиц на выходе из зумпфа;  $F_{\text{дтчг}}$  – доля твердых частиц в нижнем потоке гидроциклона.

Для проверки работоспособности модели значения параметров, а также рабочие моменты схемы измельчения были взяты из технологического регламента ГМЗ-2 Навоийского горно-металлургического комбината.

Размер частиц продукта и нагрузка на мельницу поддерживаются на желаемых уровнях (80% и 45% соответственно) за счет прогнозирующего управления робастной нелинейной моделью (ПУРНМ) независимо от активных возмущений. Временные колебания основных показателей мельницы продемонстрированы на рис. 1.

Моделирование размера и плотности готового продукта, выходящего из гидроциклона, определяется построением статических нелинейных моделей, представляемых в виде кривой эффективности.

Расход камней, поступающих в гидроциклон ( $V'_{\text{ргчг}}$ ) ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ), можно рассчитать по следующему уравнению:

$$V'_{\text{ргчг}} = (V''_{\text{ргчг}} - V''_{\text{рмчг}}) \left(1 - C_1 \exp\left(-\frac{F_{\text{рлс}}}{\varepsilon_{\text{дтч}}}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{F_i}{C_2}\right)^{C_3}\right) (1 - P_i^{C_4})$$

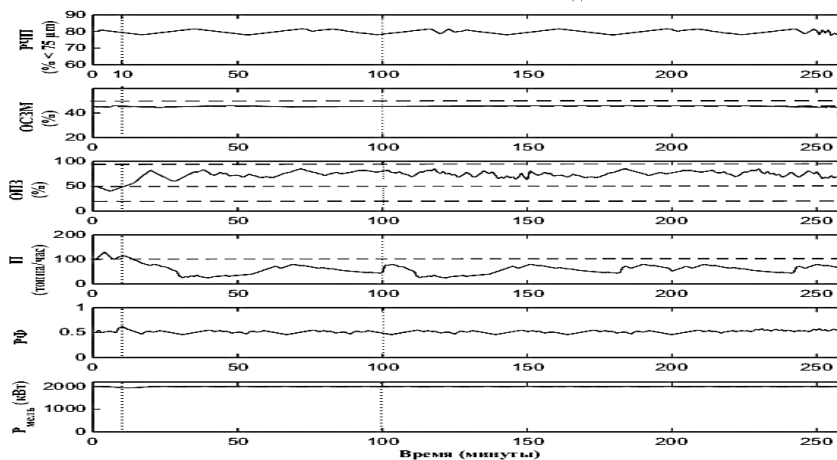


Рис.1. Временные колебания основных показателей мельницы

Количество продукта, покидающего циклон, определяется алгебраической суммой потоков, рассчитываемых по следующим уравнениям:

$$V'_{\text{рвг}} = \frac{V''_{\text{рвз}} (V'_{\text{ргчг}} - F_{\text{дтчг}} V'_{\text{ргчг}})}{F_{\text{дтчг}} V''_{\text{рвз}} + F_{\text{и}} V''_{\text{рмчз}} - V''_{\text{рмчз}}}$$

$$V'_{\text{рмчг}} = \frac{V''_{\text{рмчз}} (V'_{\text{ргчг}} - F_{\text{дтчг}} V'_{\text{ргчг}})}{F_{\text{дтчг}} V''_{\text{рвз}} + F_{\text{дтчг}} V''_{\text{рмчз}} - V''_{\text{рмчз}}}$$

$$V'_{\text{ргчг}} = V'_{\text{рвг}} + V'_{\text{рмчг}}$$

Производительность продукта (ПП) ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) можно рассчитать по уравнению (14):

$$Y_{\text{рчп}} = \frac{V''_{\text{рмчг}}}{V''_{\text{рчг}}} \quad (14)$$

$$Y_{\text{п}} = V''_{\text{рчг}}$$

Классификационный размер мелочи рассчитывался на основе уравнения Плитта.

$$(d_{50_c}) = \frac{\exp(6.3F_i)}{(F_{\text{рцс}})^{0.45}}$$

Подводя итог, можно отметить, что производительность мельницы является комплексным вопросом, и все факторы, влияющие на нее, взаимосвязаны. Производительность напрямую зависит от типа и характеристик сырья, его физических свойств, скорости вращения двигателей, типа используемых шаров и их износа, распределения нагрузки и т.д.

В третьей главе, озаглавленной «**Управление процессом измельчения на основе прогностической модели**», прогностическая модель процесса измельчения в шаровой мельнице самоизмельчения в пространстве состояний представлена в виде следующих функциональных зависимостей:

$$\dot{\mathbf{x}}_p(t) = \mathbf{f}_p(\mathbf{t}, \mathbf{x}_p, \mathbf{u}_p)$$

$$\mathbf{y}_p(t) = \mathbf{g}_p(\mathbf{t}, \mathbf{x}_p, \mathbf{u}_p)$$

где  $\mathbf{x}_p$  соответствует переменным, отражающим состояние контура измельчения,  $\mathbf{y}_p$  соответствует выходным измеряемым переменным, а  $\mathbf{u}_p$  - управляемые переменные объекта. Состояния в управляемых и измеряемых величинах представлены в виде следующих соотношений:

$$\mathbf{x}_p = [X_{\text{овм}}, X_{\text{отчм}}, X_{\text{омчм}}, X_{\text{окм}}, X_{\text{ошм}}, X_{\text{овз}}, X_{\text{отчз}}, X_{\text{омчз}}]^T$$

$$\mathbf{u}_p = [\text{ПВМ}, \text{РНИ}, \text{СП}, \alpha_{\text{скор}}, \text{РЦС}, \text{ПВЗ}]^T$$

$$\mathbf{y}_p = [\text{ОСЗМ}, R_{\text{мель}}, \text{ОПЗ}, \text{ППЦ}, \text{РЧП}, \text{П}]^T$$

Функция  $f_p$  определяется формулами (1) - (8), а функция  $g_p$  определяется на основе уравнений (9), (10), (11), (12) и (13).

На этом основании построена архитектура управления процессом измельчения в шаровой мельнице. Схематическое управление мельницей представлено на рис. 2.

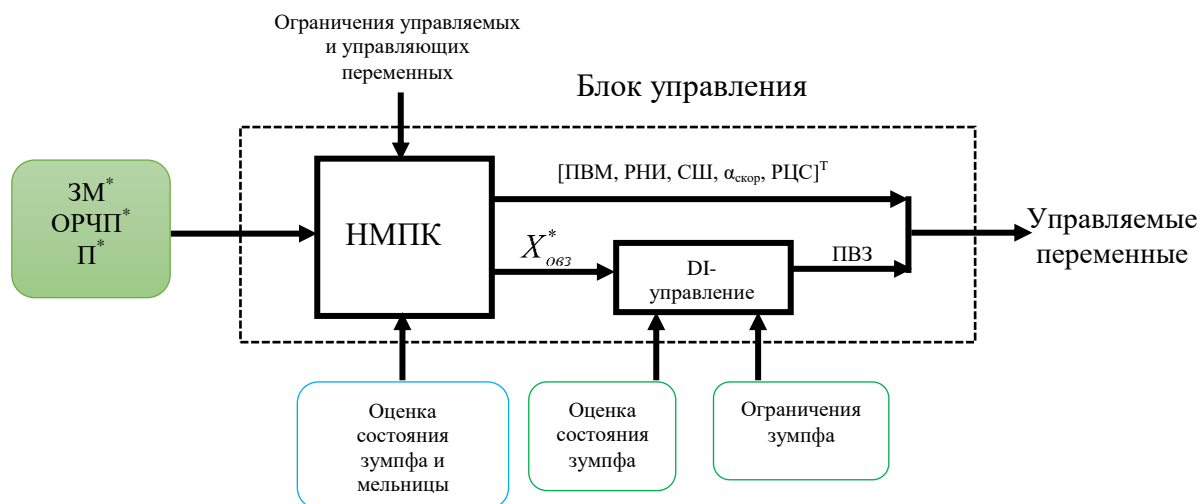


Рис. 2. Принципиальная схема, отражающая управление мельничной установкой.

Диапазон времени, начиная от подачи руды, подаваемой на измельчение до оценки размера частиц продукта, составляет 30 мин, а диапазон времени расхода циркуляционной смеси (РЦС) до ОРЧП составляет 2 мин. К тому же, технологический процесс в мельнице протекает довольно медленно по сравнению с процессом, протекающим в зумпфе.

Допустим, отклонение в количествах РЦС и питательной воды зумпфа (ПВЗ), составляет  $300 \text{ м}^3/\text{ч}$ , пульпа, находящаяся в зумпфе объемом  $12 \text{ м}^3$ , может пройти через него в течение 1 мин.

Поскольку процессы, протекающие быстро и медленно, на схеме можно изобразить в виде двух отдельных контуров: а) включающего вспомогательный быстродействующий контроллер с пониженными требованиями к скорости обработки данных, используемый для зумпфа, и б) включающего основной контроллер, предназначенный для оптимизации и несущий большую нагрузку по обработке данных. Схема управления процессом измельчения, представленная на рис. (2), состоит из контура управления динамической инверсии ДИ, и контура, сочетающегося с нелинейной моделью. Контроллер динамической инверсии (ДИ) предназначен для управления процессом, происходящем в зумпфе. Это позволяет нелинейной модели более точно определять оптимальные значения остальных переменных. Отличительной чертой разработанной системы является то, что она вырабатывает единое решение, учитывающее решение, выработанное контроллером динамической инверсии.

Для получения аналитического решения статических нелинейных уравнений требуется: определить математическую формулировку проблемы в виде системы нелинейных уравнений, линеаризации уравнений, необходимо также учитывать граничные и начальные условия. После получения аналитического решения нелинейных уравнений необходимо проверить его корректность и соответствие исходной проблеме.

Линеаризация подобных уравнений имеет некоторые негативные стороны: ограничения самой линеаризации, потеря информации о



между экспериментальными и рассчитанными значениями, полученными по прогностической модели.

Дискретная модель системы управления в нелинейном пространстве состояний представляется в виде функциональных зависимостей:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{f}_{C_k}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{g}_{C_k}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \end{aligned}$$

Это позволяет сформулировать критерий оптимальности целевой функции, сводящий к минимуму функцию (15):

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{u}_k, \dots, \mathbf{u}_{k+N_C-1}} J(\mathbf{u}_k, \dots, \mathbf{u}_{k+N_C-1}, \mathbf{x}_k) \\ \text{s.t. } \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{f}_{C_k}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{g}_{C_k}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \\ \mathbf{u}_l &\leq \mathbf{u}_k \leq \mathbf{u}_u \\ \Delta \mathbf{u}_l &\leq \Delta \mathbf{u}_k \leq \Delta \mathbf{u}_u \\ \mathbf{y}_l &\leq \mathbf{y}_k \leq \mathbf{y}_u \end{aligned} \tag{15}$$

$$q_{21}(2\% \text{ПВМ}_{\text{диапазон}} / 2)^2 = 100q_{11} \frac{N_p}{N_c} (10\% \text{ОСЗМ}_{33})^2$$

Рассмотрим работу контроллера динамической инверсии (ДИ), предназначенного для управления процессом, происходящим в зумпфе. Из рис. 2 следует, что нелинейная модель требует определенного значения  $X_{\text{овз}}$ .

Контроллер динамической инверсии управляет количеством воды в зумпфе. Управление цифровым входом работает по принципу, согласно которому ПИД регулирование реализуется в виде устойчивой линейной системы.

Динамическая инверсия позволяет получить необходимую траекторию отклика системы подбором значений пропорционального и интегрального коэффициентов усиления, такую, что

$$eK_p + K_I \int_0^t e d\tau + \dot{e} = 0,$$

где  $e = \hat{y} - y_{sp}$  - разница между измеренным ( $\hat{y}$ ) и заданными значениями ( $y_{sp}$ ).

Управлением объема воды в зумпфе можно манипулировать ограничениями на объем пульпы в зумпфе.

Для оценки состояния измельчителя и ЗУМПФа, производимой отдельно для каждой установки, используются измеренные значения технологических параметров. Эти установки обычно оборудованы множеством датчиков, которые могут предоставлять данные о скорости вращения, температуре, вибрации, уровне заполнения и других параметрах. Процесс оценки состояний зумпфа можно представить в виде блок-схемы, представленной на рис. 4.

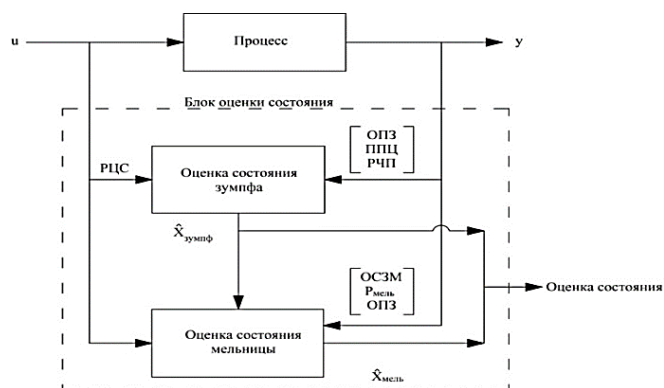


Рис. 4. Блок-схема процесса оценки состояний зумфа.

Общий объем циркуляционной смеси (РЦС) вычисляется из следующего соотношения

$$F_{РЦС} = V_{рвз} + V_{ртчз}$$

На основе выше указанных параметров создана нелинейная прогностическая модель системы в пакете Matlab и получены результаты в виде переходных характеристик. Переходная характеристика разработанной модели приведена на рис. 5.

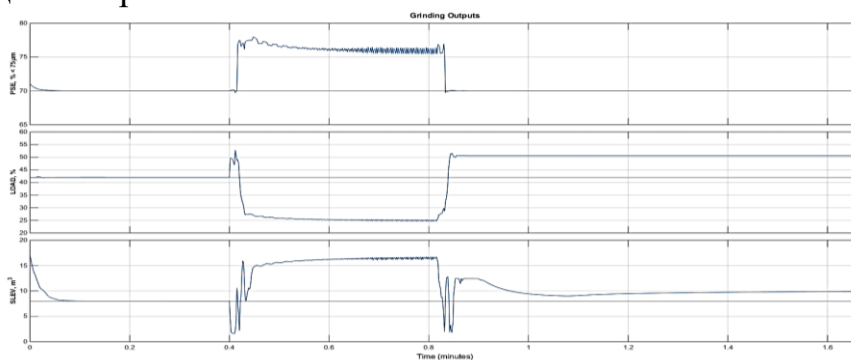


Рис. 5. Переходная характеристика выходных параметров процесса измельчения

На рис. 6 приведена принципиальная схема нелинейной прогностической модели контроллера, применяемая в контуре измельчения шаровой мельницы.

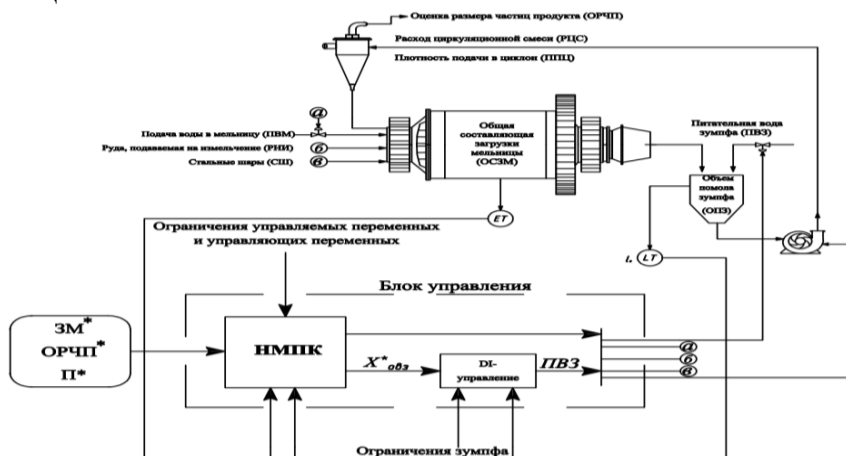


Рис. 6. Принципиальная схема нелинейной прогностической модели контроллера, применяемая в контуре измельчения шаровой мельницы.

В таблице 1. приведены данные, полученные в результате исследования системы управления с ПИД регулятором и с нелинейной прогностической моделью.

Таблица 1

Типы систем управления	ОРЧП	ОСЗМ	ОПЗ
С ПИД регулятором	73 %	36 %	10 м <sup>3</sup>
С нелинейной прогностической моделью	79 %	25 %	5 м <sup>3</sup>

В результате применения нелинейной прогностической модели оценка размера частиц продукта увеличивается на 6 %, что приводит к увеличению объёма готового продукта. Данный фактор влияет на увеличение экономической прибыли, а также уменьшения общей составляющей загрузки мельницы на 5 %, что приводит к уменьшению потребляемой мощности мельницы. Этот фактор тоже может влиять увеличения на экономической прибыли.

Двухконтурная схема управления процессом измельчения позволяет определять более точно оптимальные значения управляемых переменных, что позволяет, вырабатывать единое решение управления. Это приводит к выработке управляющих воздействий по компенсации отклонений между экспериментальными и рассчитанными значениями, полученными по прогностической модели.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе разработаны методы математического и имитационного моделирования, управления системами в условиях неопределенности, принципы построения комбинированных систем управления, алгоритмы адаптивной оценки и управления нелинейными динамическими объектами в условиях неопределенности на основе методов искусственного интеллекта, позволяющие системам автоматически адаптироваться к изменениям входных параметров и оптимизировать технологический процесс.

1. Разработана прогностическая модель, позволяющая системе управления учитывать неопределенности и нелинейности технологии. В результате появилась возможность более точного описания технологического процесса.

2. Нелинейное управление является более гибким и позволяет учитывать нелинейности, нелинейные характеристики конкретной системы и сложные взаимодействия между системами, обладает большей устойчивостью к возмущениям и неопределенностям в системе. В результате появилась возможность компенсировать изменение внешних условий, нелинейных

свойств системы и других факторов, которые могут существенно повлиять на процесс управления.

3. Получены расчетные значения влияния общей загрузки мельницы на ее мощность и зависимость мощности мельницы от реологического состояния суспензии. В результате появилась возможность более точного управления мощностью мельницы.

4. Выявлено, что энергопотребление мельницы в основном зависит от двух величин: реологического фактора суспензии и общей загрузки мельницы. В результате увеличилась общая производительность процесса измельчения.

5. Определено, что максимальное значение производительности может быть достигнуто при оптимальном значении фактора реологии, равного 0.51. В результате был достигнут рост общей производительности за счет увеличения расхода суспензионной смеси на гидроциклон.

6. Выведены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитать расход камней, поступающих в гидроциклон, количество воды и мелкой фракции, выходящих из зумпфа с нижним продуктом, его количество, покидающее циклон, твердодисперсных и мелкодисперсных частиц, а также величины потоков, выходящих из гидроциклона. В результате повышается точность управляющих воздействий прогнозирующего контроллера.

7. Разработана система независимого управления оценкой размера частиц продукта и производительности на основе нелинейной модели. В результате определен список факторов, влияющих на параметры системы управления.

8. Разработана функциональная схема интеллектуальной системы управления технологическим процессом измельчения руды. В результате создана возможность управления каждым блоком в процессе измельчения.

9. Разработана система управления, обеспечивающая независимое отслеживание заданного значения оценки размера частиц готового продукта и производительности в пределах ограничений управляемых переменных. В результате появилась возможность более точного оценивания дисперсности частиц готового продукта и производительности устройства.

10. В отличие от двух изолированных контроллеров прогнозирующий контроллер системы управления вырабатывает единое решение, учитывающее выработанную контроллером динамическую инверсию. В результате получена возможность более точного управления технологическим процессом.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/30.12.2019.T.03.02  
ON THE ADMISSION OF SCIENTIFIC DEGREES AT THE  
TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

---

**NAVOI STATE UNIVERSITY OF MINING AND TECHNOLOGY**

**BOYBUTAYEV SANJAR BAXRITDINOVICH**

**IMPROVEMENT OF ORE GRINDING PROCESS CONTROL SYSTEM  
UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY**

**05.01.08 - Automation and control of technological processes and manufactures**

**DISSERTATION ABSTRACT OF DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)  
ON TECHNICAL SCIENCES**

**Tashkent – 2023**

The theme of doctor of philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number №B2023.1.PhD/T2483.

The dissertation was completed at the Navoi state university of mining and technology.

The abstract of dissertation is posted in three languages (uzbek, russian, english (resume)) is placed on the web-page of Scientific Council ([www.tdtu.uz](http://www.tdtu.uz)) and Information and Educational Portal «Ziynet» ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

**Scientific consultant:** **Mukhitdinov Djalolitdin Paxritdinovich**  
Doctor of Technical Sciences, Professor

**Official opponents:** **Ismailov Mirkhalil Agzamovich**  
Doctor of Technical Sciences, Professor

**Ivanyan Arsen Ignatievich**  
PhD in technical sciences


**Leading organization:** **Toshkent institute of chemical technology**

Defense of dissertation will take place in «16» 12 2023 at 10<sup>00</sup> o'clock at a meeting of the scientific council DSc.03/30.12.2019.T.03.02 at the Tashkent state technical university (Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: (99871) 246-46-00; fax: (99871) 227-10-32; e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz)).


The doctoral dissertation could be reviewed at the Information-resource center of Tashkent state technical university (registration number 359). (Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: (99871) 207-14-70)

Abstract of the dissertation distributed «4» 12 2023 year.  
(mailing report № 25 on «6» 11 2023 year).



  
**N.R. Yusupbekov**  
Chairman of Scientific Council  
on awarding scientific degrees,  
Doctor of technical sciences, Professor, Academician

**U.F. Mamirov**  
Scientific Secretary of Scientific Council,  
on awarding scientific degrees,  
Doctor of Technical Sciences, Professor

  
**H.Z. Igamberdiev**  
Chairman of the Academic Seminar  
under the Scientific Council on awarding scientific degrees,  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician

## INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

**The aim of the research** is to improve the control system for the ore grinding process based on a predictive mathematical model that allows predicting the results of the grinding process even before it starts and is able to adapt to changing conditions and production requirements.

**The object of the research** are the technological processes occurring in the mill installation as non-stationary objects and their control systems.

**The scientific novelty** of the research is:

on the basis of empirical equations a predictive model has been developed that allows the control system consider the uncertainties and nonlinearities of the ore grinding process technology;

a two-loop combined control system was developed based on a fast controller with reduced requirements for data processing speed used for the sump and on high-speed control devices with a nonlinear predictive model for slow processes in the ore grinding circuit;

on the basis of determining the optimal values of the variables of the nonlinear model, an algorithm for developing a single solution that takes into account the solution determined by the dynamic inversion control device has been developed;

to create control actions compensating deviations between experimental and calculated values obtained by the predictive model, a control system has been developed that provides independent tracking of the set value of the particle dispersity of the finished product and the productivity of the plant within the limits of the controlled variables.

**Implementation of the research results.** Based on the results of the development of methods for the synthesis of intelligent control systems for complex technological processes for the production of inorganic substances:

a control system has been introduced that provides independent monitoring of the set value of particle dispersion of the finished product and the performance of the installation within the limits of the controlled variables at GMZ-2 of JSC NMMC. (certificate of JSC NMMC No. 23/01-01-07/312 dated 04/23/2023). As a result, it becomes possible to more accurately assess the particle size of the finished product and the performance of the installation.

a two-circuit combined control system based on a predictive model and a dynamic inversion circuit was introduced at GMZ-2 of JSC NMMC. (certificate of JSC NMMC No. 23/01-01-07/312 dated 04/23/2023). As a result, the amount of finished products obtained from grinding increased by 6%.

**The structure and volume of the dissertation** The dissertation consists of an introduction, three chapters, a conclusion, a list of references and applications. The thesis contains 120 pages, illustrated with 36 figures and 7 tables.

**E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I bo'lim (Часть I; Part I)**

1. Мухитдинов Д.П., Кадыров Ё.Б., Саттаров О.У., Бойбутаев С.Б. ПИД регуляторы в АСУТП // Научно - технический и производственный журнал «Горный вестник Узбекистана», Навои, 2014.-№4, -С.103-106. (05.00.00, № 7)
2. Yusupbekov N.R., Mukhitdinov D.P., Sattarov O.U., Boybutayev S.B. Construction of a Neural Network Using an Approach to a Genetic Algorithm // ISSN: 2350-0328, International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology, India, Vol. 6, Issue 6, June 2019.-PP 9837-9841. (05.00.00, № 8)
3. Пулатов В.Б., Кадиров Ё.Б., Бойбутаев С.Б., Ийдиева Р.Р. Математическое моделирование работы шаровой мельницы в ГМЗ-2 НГМК // Научно - технический и производственный журнал «Горный вестник Узбекистана», Навои, 2020.-№4, -С.103-106. (05.00.00, № 7)
4. Kadirov, Y.B., Boybutayev, S.B., Samadov A.R. Mathematical modeling of a ball mill in GMZ-2 NGMK based on the diffusion model // «Chemical Technology, Control and Management», Tashkent. Vol. 2020: Iss. 5, Article 9. (05.00.00, №12)
5. Mukhitdinov D. P., Boybutayev S. Problems of modeling and control of the technological process of ore grinding // Chemical Technology, Control and Management. Tashkent. – 2021. – №. 4. – С. 49-62. (05.00.00, №12)
6. Мухитдинов Дж. П., Бойбутаев С.Б. Управление процессом измельчения на основе прогностической модели шаровой мелницы // Научно - технический и производственный журнал «Горный вестник Узбекистана», Навои, 2023.-№2, -С.123-125. (05.00.00, № 7)

**II bo'lim (Часть II; Part II)**

7. Бойбутаев С. Б. Система управления процессом измельчения руды // Современные материалы, техника и технологии. – 2016. – №. 5 (8). – С. 20-27.
8. Бойбутаев С. Б., Кадиров Ё. Б., Саттаров О. У. Разработка экспертной системы управления процессом измельчения и классификации на основе нейронных сетей // Современные материалы, техника и технологии. – 2017. – №. 3 (11). – С. 9-16.
9. Бойбутаев С. Б. Применение нейронных сетей в системах автоматического управления процессами измельчения // Журнал достижений в области инженерных технологий. – 2022. – №. 1. – С. 26-30.

10. Djalolitdin Mukhitdinov, Sanjar Boybutayev, Olmosjon Gozиеv, and Javohir Qudratov / Construction of continuous and discrete nonlinear prognostic models of the control system for the process of grinding ore materials // E3S Web of Conferences 417, 05009 (2023) GEOTECH-2023
11. Мухитдинов Дж. П., Бойбутаев С.Б., Мамлиева Ф.Р. Математическое моделирование динамики процесса дробления / Материалы VI-международной научно-технической конференции: Инновации, качество и сервис в технике и технологиях, Юго-Западный государственный университет 02-03 июня 2016 г. -С187-190
12. Бойбутаев С.Б. Разработка системы управления процессом измельчения и классификации на основе нейронных сетей / Материалы IX -международной научно-технической конференции по горно-металлургическому комплексу: достижения, проблемы и современные тенденции развития горно металлургического комплекса. -Навои,12-14 июня 2017 г. -С.509
13. Юсупбеков Н.Р., Мухитдинов Д.П., Саттаров О.У., Бойбутаев С.Б. Разработка моделей и алгоритмов построения интеллектуальных систем автоматического управления для обучения, адаптации или настройки регуляторов / Материалы международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы комплексного инновационного развития Зарафшанского региона». -Навои, 27-28 ноября 2019 г. -С.602-608
14. Boybutayev S.B., Iydiyeva R.R. Yanchish va maydalash jarayonini avtomatlashtirish / “Ilm-fan va ta’limda innovatsiyalar” I Respublika ilmiy-amaliy xalqaro internet-konferensiyasi 2020 y. 83-84 b.
15. S.B.Boybutayev, M.S.Tuxtameshova Improvements in control systems for grinding circuits in a ball mill / International conference on integrated innovative development of zarafshan region: achievements, challenges and prospects. 27-28 October –Navoi 2022. (Uzbekistan) -PP. 116-121
16. Boybutayev S.B. Application of neural networks in systems of automatic regulation of technological processes of grinding / International conference on advance research in humanities, applied sciences and education. New York, USA. October, 28. 2023. – pp. 39-40
17. Мухитдинов Д.П., Уринов Ш.Р., Саттаров О.У., Бойбутаев С.Б. Программа для определения изменения концентрации // Программа для ЭВМ. Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 06924 от 25.07.2019 г.
18. Мухитдинов Д.П., Кадиров Ё.Б., Саттаров О.У., Бойбутаев С.Б. Программа для определения параметров построения и изучения нейронной сети для управления процессом// Программа для ЭВМ. Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 06925 от 25.07.2019 г.
19. Мухитдинов Д.П., Бойбутаев С.Б. Программа контура измельчения шаровой мельницы с непрерывным временем в пространстве состояний

- // Программа для ЭВМ. Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 20984 от 25.12.2022 г.
20. Мухитдинов Д.П., Бойбутаев С.Б. Программа для определения фактора реологии контура измельчения шаровой мельницы // Программа для ЭВМ. Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 23887 от 06.04.2023 г.
21. Мухитдинов Д.П., Бойбутаев С.Б. Программа для определения потребляемой мощности мельницы для процесса измельчения // Программа для ЭВМ. Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 24213 от 17.04.2023 г.

Avtoreferat “Texnika fanlari va innovatsiya” ilmiy jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazildi hamda o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlarini mosligi tekshirildi.

**Bosmaxona litsenziyasi:**



**9338**

Bichimi: 84x60 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. «Times New Roman» garniturası.  
Raqamli bosma usulda bosildi.  
Shartli bosma tabog'i: 2,5. Adadi 100 dona. Buyurtma № 59/23.

Guvohnoma № 851684.  
«Tipograff» MCHJ bosmaxonasida chop etilgan.  
Bosmaxona manzili: 100011, Toshkent sh., Beruniy ko'chasi, 83-uy.