

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

**ISLOM KARIMOV NOMIDAGI
TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI**

SOTVOLDIYEV XUSNIDDIN IBRAGIMOVICH

**NOSTATSIONAR TEXNOLOGIK OBYEKTЛАRNI MUNTАZАM
USULLAR ASOSIDA IDENTIFIKАTSIYALASH VA BOSHQARISH
ALGORITMLARI**

**05.01.08 - Texnologik jarayonlar va ishlab chiqarishlarni
avtomatlashtirish va boshqarish**

**TEXNIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD) DISSERTATSIYASI
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2023

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi
Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)
Content of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)

Sotvoldiyev Xusniddin Ibragimovich

Nostatsionar texnologik obyektlarni muntazam usullar asosida identifikatsiyalash
va boshqarish algoritmlari 3

Сотволдиев Хусниддин Ибрагимович

Алгоритмы идентификации и управления нестационарными
технологическими объектами на основе регулярных методов 21

Sotvoldiyev Khusniddin Ibragimovich

Algorithms for identification and control of non-stationary technological
objects based on regular methods39

E‘lon qilingan ishlar ro‘yxati

Список опубликованных работ
List of published works42

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

**ISLOM KARIMOV NOMIDAGI
TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI**

SOTVOLDIYEV XUSNIDDIN IBRAGIMOVICH

**NOSTATSIONAR TEXNOLOGIK OBYEKTЛАRNI MUNTАZАM
USULLAR ASOSIDA IDENTIFIKАTSIYALASH VA BOSHQARISH
ALGORITMLARI**

**05.01.08 - Texnologik jarayonlar va ishlab chiqarishlarni
avtomatlashtirish va boshqarish**

**TEXNIKA FANLARI BO'YICHA FАLSАFА DOKTORI (PhD) DISSERTАTSIYASI
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2023

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida №B2022.2.PhD/T2846 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Toshkent davlat texnika universitetida bajarilgan.
Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasida (www.dtu.uz) hamda «ZiyoNet» Axborot ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:	Igamberdiyev Xusan Zakirovich texnika fanlari doktori, professor, O'zR FA akademigi
Rasmiy opponentlar:	Baratov Dilshod Xamidullayevich texnika fanlari doktori, professor Varlamova Lyudmila Petrovna texnika fanlari doktori, professor
Yetakchi tashkilot:	Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti

Dissertatsiya himoyasi Toshkent davlat texnika universiteti huzuridagi DSc.03/30.12.2019.T.03.02 raqamli Ilmiy kengashning 2023-yil «15» 11 soat 10⁰⁰ daqiqa dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100095, Toshkent shahri, Universitet ko'chasi, 2. Tel.: (99871) 246-46-00; faks: (99871) 227-10-32; e-mail: tsu_info@dtu.uz).

Dissertatsiya bilan Toshkent davlat texnika universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (346 raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100095, Toshkent shahri, Universitet ko'chasi, 2. Tel.: (99871) 207-14-70.)

Dissertatsiya avtoreferati 2023-yil «2» 11 kuni tarqatildi.
(2023-yil «6» 10 daqiqa 23 raqamli reyestr bayonnomasi).



N.R. Yusupbekov
N.R. Yusupbekov
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash raisi,
texnika fanlari doktori, professor, akademik

U. Mamirov
U. Mamirov
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash ilmiy kotibi,
texnika fanlari doktori, dotsent

Sevinov J.U.
Sevinov J.U.
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar rais o'rinbosari,
texnika fanlari doktori, professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda zamonaviy axborot texnologiyalarning rivojlanishi, ishlab chiqarish jarayonlarini avtomatik boshqarish, nazorat qilish sohasida turli funksional mo'ljallanishli nostatsionar texnologik obyektlarni identifikatsiyalash, boshqarish usullarini yangilash va ularga algoritmlar ishlab chiqish bo'yicha ko'plab izlanishlar olib borilmoqda. Texnologik jarayonlarni boshqarish tizimlarining keng klassi har xil tipdagi ishdan chiqishlar, tashqi muhitning o'zgarishlari, to'liq bo'lmagan va noaniq boshlang'ich va joriy axborotda ichki transformatsiyalanishlar sharoitlarida faoliyat ko'rsatish bilan tavsiflanadi. Bunday obyektlar klassini boshqarish tizimlarini qurishning qiyinligi obyekt parametrlarining nostatsionarliligi bilan bog'lanadigan muammolarni hal qilish zarurligi bilan bog'lanadi. Mazkur sohada nostatsionar texnologik obyektlarni identifikatsiyalash va boshqarish algoritmlarini ishlab chiqish muhim masalalardan biri bo'lib hisoblanadi.

Jahonda ilmiy hamjamiyat tomonidan turli ko'rinishdagi nostatsionar texnologik jarayonlarni boshqarish va nazorat qilish tizimlari sifatini o'zgartirishga qaratilgan ahamiyatli ilmiy izlanishlar olib borilmoqda. Shu munosabat bilan nostatsionar texnologik obyektlarni moslashuvchan identifikatsiyalash uslublari va algoritmlarini takomillashtirish va modifikatsiyalash, nostatsionar texnologik obyektlarni moslashuvchan boshqarish algoritmlarini ishlab chiqish muhim masala bo'lib hisoblanadi.

Hozirgi ulkan o'zgarishlar bo'layotgan davrda mamlakatimizda ishlab chiqarish jarayonlarini avtomatlashtirish va boshqarish tarmoqlarida, jumladan turli ko'rinishdagi nostatsionar texnologik obyektlarni avtomatlashtirish va boshqarish tizimlarida energiyatejamkorlikni ta'minlashga xizmat qiluvchi, takomillashtirilgan boshqarish tizimlarini yaratish muhim vazifalardan biri bo'lib qolmoqda. 2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida O'zbekiston Respublikasi Prezidentining farmonida "... 2026-yilga qadar qayta tiklanuvchi energiya manbalari ulushini 25% ga yetkazish, O'zbekiston energetika tizimining qo'shni davlatlar energetika tizimlari bilan barqaror ishlashini ta'minlash, sanoat tarmoqlarida yo'qotishlarni kamaytirish va resurslarni ishlatish samaradorligini oshirish" bo'yicha qator vazifalar belgilab berilgan¹. Mazkur vazifalarni bajarishda, jumladan, nostatsionar texnologik obyektlarni identifikatsiyalash va boshqarish jarayonlarining aniqligi va sifat ko'rsatkichlarini oshirishga ko'maklashuvchi usullar va algoritmlarni yaratish dolzarb vazifalardan biri hisoblanadi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF- 60-son "2022-2026 yillarda Yangi O'zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni, 2018-yil 27-apreldagi PQ-3682-son "Innovatsion g'oyalar, texnologiyalar va loyihalarni amalga joriy qilish tizimini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi, 2017-yil 23-avgustdagi PQ-3238-son "Zamonaviy energiya samarador va energiya tejaydigan texnologiyalarni yanada joriy etish chora-tadbirlari to'g'risida" gi, 2019-yil 22-avgustdagi PQ-4422-son "Iqtisodiyot

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF-60 «2022 — 2026 yillarga mo'ljallangan yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida» Farmoni.

tarmoqlari va ijtimoiy sohaning energiya samaradorligini oshirish, energiya tejevchi texnologiyalarni joriy etish va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirishning tezkor chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi Qarorlari 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. Keyingi yillarda nostatsionar texnologik obyektlarni identifikatsiyalash va boshqarish usullari va algoritmlarini ishlab chiqishni tadqiq qilishga bag‘ishlangan adabiyotlar tahlili mazkur sohada kattagina nazariy va amaliy yutuqlarga erishilganini ko‘rsatadi. Nostatsionar texnologik obyektlarni identifikatsiyalash va boshqarish algoritmlari bo‘yicha juda ko‘plab ishlar bajarilgan bo‘lib, bu ishlarni rivojlantirishga xorijiy olimlardan N.N.Karabutov², Yang Jian-Bo³, I.B.Furtat⁴, A.M.Skunov⁴, M.V.Jirov⁵, V.V.Makarov⁵, G.P.Pletnev⁶, Yu.S.Tverskoy⁷, va boshqalar hamda mamlakatimiz olimlaridan N.R.Yusupbekov⁸, X.Z.Igamberdiyev^{8,9,10,11}, A.R.Maraximov⁹, I.X.Siddikov⁹, O.O.Zaripov¹⁰, A.N.Yusupbekov^{9,10}, J.U.Sevinov¹¹, U.F.Mamirov⁸ va boshqalar o‘zlarining ulkan hissalarini qo‘shganlar.

Bundan tashqari, ilmiy izlanishlar ko‘laming muntazam murakkablashib va rivojlanib turishi nostatsionar texnologik obyektlarni identifikatsiyalash va boshqarishning takomillashgan, samarali yangi usul va algoritmlarini ishlab chiqishni taqozo etadi. Shuningdek, nostatsionar dinamik obyektlarni barqaror identifikatsiyalash va moslashuvchan boshqarish algoritmlarini ishlab chiqishni amalga oshirish, mavjudlarini takomillashtirish zarurati yuzaga kelmoqda.

Shu jihatdan, tadqiqot ishlarida zamonaviy axborot texnologiyalaridan foydalanish nostatsionar dinamik obyektlarning moslashuvchan boshqarish tizimlarini qurish va amalga oshirishning algoritmik protseduralari spektrini kengaytirish imkonini beradi. Tahlil qilingan ilmiy ishlar asosida shuni ta‘kidlash

2 Карабутов Н.Н. Адаптивная идентификация систем: Информационный синтез. Изд.стереотип. 2016.- 384 с.

3 Yang Jian-Bo; Li, Duan Normal Vector Identification and Interactive Tradeoff Analysis Using Minimax Formulation in Multiobjective Optimization./In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A:Systems and Humans., Vol. 32, No. 3, 05.2002, p. 305-319.

4 Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Робастное управление нестационарными объектами с неизвестной переменной относительной степенью // Управление большими системами, 2011, Выпуск 33, –С. 91-112.

5 Жиров М.В., Макаров В.В., Солдатов В.В. Идентификация и адаптивное управление технологическими процессами с нестационарными параметрами. -М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. -208 с.

6 Плетнев Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: учебник для студентов вузов / Г. П. Плетнев - Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. -360 с.

7 Тверской, Ю.С. Автоматизация пылеугольных котлов электростанций [Электронный ресурс]: монография / Ю.С. Тверской. — Электрон.дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2018. — 472 с.

8 Yusupbekov N., Igamberdiev H., Mamirov U. (2022) Algorithms for Robust Stabilization of a Linear Uncertain Dynamic Object Based on an Iterative Algorithm. In: Kahraman C., Cebi S., Cevik Onar S., Oztaysi B., Tolga A.C., Sari I.U. (eds) Intelligent and Fuzzy Techniques for Emerging Conditions and Digital Transformation. INFUS 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 307. Springer

9 Марахимов А.Р., Игамбердиев Х.З., Юсупбеков А.Н., Сидиков И.Х. Нечетко множественные модели и интеллектуальное управление технологическими процессами. –Т.: ТашГТУ, 2014. –240 с.

10 Игамбердиев Х.З., Юсупбеков А.Н., Зарипов О.О. Регулярные методы оценивания и управления динамическими объектами в условиях неопределенности. – Т.: ТашГТУ, 2012. –320 с.

11 Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У., Зарипов О.О. Регулярные методы и алгоритмы синтеза адаптивных систем управления с настраиваемыми моделями. - Т.: ТашГТУ, 2014.

kerak-ki, nostatsionar texnologik obyektlarni identifikatsiyalash va boshqarishning samarali algoritmlarini yaratish va modifikatsiyalashda muntazamlashtirish usullaridan foydalanish zarurati vujudga kelmoqda.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti ilmiy-tadqiqot ishlari rejasining OT-F4-78 – “Identifikatsion yondashuv asosida dinamik obyektlarni adaptiv boshqarish tizimlari sintezining nazariy asoslari va muntazam usullarini ishlab chiqish” (2017-2020 yy.) mavzusidagi loyiha doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi nostatsionar texnologik obyektlarni muntazam usullar asosida identifikatsiyalash va boshqarish algoritmlarini ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

nostatsionar dinamik obyektlarni identifikatsiyalash va boshqarish usullarining hozirgi kundagi holati va rivojlanishini tizimli tahlil qilish;

kuzatish ma'lumotlari bo'yicha nostatsionar dinamik tizim holati xarakteristikalarini turg'un identifikatsiyalash algoritmlarini ishlab chiqish;

tasodifiy parametrlarga ega bo'lgan chiziqli dinamik obyektning parametrik identifikatsiyalashning muntazam algoritmini ishlab chiqish;

chiziqli nostatsionar tizimlarni moslashuvchan identifikatsiyalashning muntazam algoritmlarini ishlab chiqish;

noaniqlik sharoitlarida nostatsionar tizimlarni moslashuvchan boshqarish algoritmlarini ishlab chiqish;

ishlab chiqilgan algoritmlarni sanoat nostatsionar obyektlarini boshqarish tizimlarini sintezlash masalalarida amaliy qo'llash.

Tadqiqotning obyekti sifatida nostatsionar texnologik obyektlar olingan.

Tadqiqotning predmeti nostatsionar dinamik obyektlarni muntazam usullar asosida identifikatsiyalash va boshqarish usullari va algoritmlaridan iborat.

Tadqiqotning usullari. Dissertatsiya ishida tizimli tahlil, identifikatsiyalash, baholash, adaptiv boshqarish va nokorrekt qo'yilgan masalalarni yechish usullaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

chiqish matritsasiga psevdoteskari reja matritsasini hisoblash asosida nostatsionar dinamik tizim holatining xarakteristikalarini muntazam identifikatsiyalash algoritmlari ishlab chiqilgan;

matritsa operatorini o'ngdan elementar ortogonal aylanish matritsalariga va chap tomonda almashtirish matritsalariga yoyishlar asosida nostatsionar tizimlarni turg'un parametrik identifikatsiyalash algoritmlari ishlab chiqilgan;

boshqarish jarayonlarining sifat ko'rsatkichlarini oshirishga yordam beruvchi pseudoag'darish konsepsiyasi asosida nostatsionar obyektlarni adaptiv suboptimal boshqarishni sintezlash algoritmi ishlab chiqilgan;

yuqori darajali aprior noaniqligi mavjud jarayonlarni klassik boshqarish usullarining samarasizligi sharoitlarida boshqarish qarorlarini optimallashtirishga imkon beruvchi nostatsionar obyektlarni boshqarishning turg'un algoritmlari o'yin usullari konsepsiyasi asosida ishlab chiqilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

nostatsionar texnologik obyektlarni adaptiv boshqarish tizimlarini turg'un sintezlash masalalarini yechishni algoritmik qo'llab quvvatlash uchun mo'ljallangan dasturiy modullar yaratilgan;

o'tkazilgan texnik eksperiment natijalari asosida normal faoliyat ko'rsatish sharoitlarida issiqlik elektrstansiyalaridagi qozonga ko'mir kukunini to'g'ridan-to'g'ri puflaydigan tizimning matematik modeli ishlab chiqilgan;

qozonga ko'mir kukunini to'g'ridan-to'g'ri puflash texnologik jarayonini avtomatlashtirish va adaptiv boshqarishning strukturaviy va funksional sxemalari ishlab chiqilgan;

mos keluvchi texnik ta'minotga ega bo'lgan qozonga ko'mir kukunini to'g'ridan-to'g'ri puflaydigan tizimlarda kukunni berish texnologik jarayonining kechishi va ularni turg'unlashtirish imkonini beruvchi boshqarish tizimi taklif qilingan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi uslubiy jihatdan asoslangan nazariy hisob-kitoblarning amalga oshirilishi, nostatsionar texnologik obyektlarni identifikatsiyalash va adaptiv boshqarish konsepsiyalarining nazariy asoslangan mezonlarining qo'llanilishi, zamonaviy avtomatik boshqarish nazariyasining amaliy sinovdan o'tgan usullari va algoritmlarining ishlatilishi, adaptiv boshqarishning taklif etilgan usullari va algoritmlarining talab darajadagi yaqinligi, nazariy va amaliy tadqiqotlarning olingan natijalari va ularning o'zaro muvofiqligi bilan ta'minlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati nostatsionar texnologik obyektlarni identifikatsiyalash va adaptiv boshqarish tizimlarini sintezlashning konstruktiv algoritmlari ishlab chiqilganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati nostatsionar texnologik obyektlarni adaptiv boshqarish tizimlarining funksional strukturalarini qurish va loyihalashni avtomatlashtirishda keng qo'llanilishi mumkin bo'lgan adaptiv identifikatsiyalash va boshqarish tizimlarini turg'un sintezlash masalalarining matematik va algoritmik ta'minotining ishlab chiqilganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Nostatsionar texnologik obyektlarni muntazam usullar asosida identifikatsiyalash va boshqarish algoritmlarini ishlab chiqish bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

nostatsionar dinamik tizim holatining xarakteristikalarini turg'un identifikatsiyalash algoritmlari "Yangi-Angren IES" da joriy qilingan ("Issiqlik elektr stansiyalari" AJning 2023-yil 7-fevraldagi 04-25/456-son ma'lumotnomasi). Natija kuzatish ma'lumotlari bo'yicha nostatsionar dinamik tizim holatini baholash aniqligini oshirish imkonini bergan;

nostatsionar tizimlarni turg'un parametrik identifikatsiyalash algoritmlari "Yangi-Angren IES" da joriy qilingan ("Issiqlik elektr stansiyalari" AJning 2023-yil 7-fevraldagi 04-25/456-son ma'lumotnomasi). Natija real vaqtda obyekt parametrlarini turg'un identifikatsiyalash imkonini bergan;

nostatsionar obyektlarni turg'un boshqarish algoritmlari "Yangi-Angren IES" da joriy qilingan ("Issiqlik elektr stansiyalari" AJning 2023-yil 7-fevraldagi 04-25/456-son ma'lumotnomasi). Natija jarayonlarning aprior noaniqligining yuqori darajasida klassik boshqarish usullari samarasiz bo'lgan sharoitlarda boshqarish qarorlarini optimallashtirish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Ushbu tadqiqot natijalari jami 5 ta xalqaro va 3 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami bo'lib 24 ta ilmiy ishlar e'lon qilingan. Shulardan 8 ta maqola O'zbekiston Respublikasi OAK tomonidan falsafa doktori (PhD) dissertatsiyalarining asosiy natijalarini e'lon qilish tavsiya qilingan jurnallarda, jumladan 3 ta ish xorijiy jurnallarda e'lon qilingan. Shuningdek EHM uchun dasturiy mahsulotlarning rasman ro'yxatga olinganligi to'g'risida 5 ta guvohnoma olingan.

Dissertatsiyaning strukturasi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan tashkil topgan. Dissertatsiyaning hajmi 107 betdan iborat.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurligi asoslab berilgan, dissertatsiya mavzusi bo'yicha xorijdagi ilmiy tadqiqotlarning sharhi va muammoning o'rganilganlik darajasi ifodalangan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, obykti va predmeti tavsiflangan, respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, ilmiy jihatdan yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, natijalarning amaliyotga joriy qilinishi, nashr qilingan ishlar hamda dissertatsiyaning tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

“Nostatsionar dinamik obyektlarni identifikatsiyalash va boshqarish usullarining bugungi kundagi holati va rivojlanishini tizimli tahlil qilish” deb nomlangan birinchi bobida nostatsionar dinamik boshqarish obyektlarining o'ziga xos xususiyatlari keltirilgan, nostatsionar dinamik obyektlarni identifikatsiyalash va boshqarish usullari va algoritmlari ko'rib chiqilgan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari qo'yilgan.

Zamonaviy sanoat ishlab chiqarishida materialga/moddaga ishlov berishning har qanday bosqichida yuqori avtomatlashtirish darajasi o'z o'rniga ega bo'lib bormoqda. Ishlab chiqarish jarayonlarini avtomatik boshqarish tizimlaridan foydalanish texnologik jarayon kechishining xavfsizlik darajasini oshirish zarurligi, shuningdek qurilmalar va umuman ishlab chiqarishning iqtisodiy ko'rsatkichlarining ortishi bilan shartlanadi. Qoidaga ko'ra, sanoatda uchraydigan texnologik jarayonlarning (qurilmalarning) ko'pchiligi o'zida nostatsionar boshqarish obyektlarini namoyon qiladi.

Nostatsionarlik boshqarish obykti sifatidagi texnologik jarayonning muhim tavsifi bo'lib hisoblanadi va birinchi navbatda atrof-muhit sharoitlarining o'zgarishlari, kirib kelayotgan xomashyo xususiyatlarining o'zgarishlari, texnologik jarayonda uskunalarni qayta sozlash va almashtirish, ularning yedirilishi va eskirishi bilan bog'lanadigan ichki o'zgarishlar ta'siri ostida texnologik jarayonning xususiyatlarining o'zgarishi bilan shartlanadi.

Texnologik jarayonlarda qaysidir nazorat qilinadigan kirish kattaligi ko'pligiga va qaysidir bir nazorat qilinadigan chiqish kattaligi ko'pligi mos keladi. Ko'p o'lchamli texnologik jarayonlarda esa bir nechta kirishlar va bir nechta chiqishlarga ega bo'lganligi bois ularni nostatsionar dinamik obyektlar sifatida qarash lozim

bo'ladi.

Yuqorida keltirilgan xulosalar asosida mazkur dissertatsiya ishida chiziqli va nochiziqli nostatsionar texnologik obyektlarni adaptiv identifikatsiyalash va boshqarish algoritmlarini ishlab chiqishda muntazamlashtirish usullaridan foydalanish zaruratini keltirib chiqaradi. Tadqiqot ishi bo'yicha belgilan masalalarning hal qilinishi nostatsionar parametrlar texnologik jarayonlarni moslashuvchan boshqarish tizimlarining faoliyat ko'rsatishining samaradorligini oshirishga ko'maklashuvchi hisoblash sxemalarini ishlab chiqish imkonini beradi.

Dissertatsiyaning **“Nostatsionar texnologik obyektlarni adaptiv identifikatsiyalash algoritmlari”** nomli ikkinchi bobi kuzatish ma'lumotlari bo'yicha nostatsionar boshqarish obyektlarini parametrik identifikatsiyalashning muntazam algoritmlarini ishlab chiqishga bag'ishlangan.

Texnologik jarayonlarni boshqarish masalalarini hal qilishda ko'pincha nostatsionar dinamik tizimlarning quyidagi ko'rinishga ega modellaridan foydalaniladi

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t; b_f, \varphi(x, t)), \quad (1)$$

bu yerda x – tizimning holat $m \times 1$ o'lchamga ega vektori; t – vaqt; $f(\cdot)$ - ma'lum nochiziqli vektor funksiyasi; b_f – tizim parametrlarining $p_f \times 1$ o'lchamga ega vektori; $\varphi(x, t)$ – tizimning faza koordinatalari va vaqtiga nochiziqli bog'liq bo'lgan noma'lum tavsiflarning vektori. $x_0 = x(t_0)$ (1) dinamik tizimning boshlang'ich shartlari, t_0 – tizimni kuzatish boshlangan vaqt.

O'lchami $q \times 1$, $q = m + p_f + p_\varphi$ bo'lgan $a = [x_0^T b_f^T b_\varphi^T]^T$ -vektor belgilashni barcha parametrlarni baholash maqsadida kiritamiz.

Shunda o'lchashlar modeli quyidagi xarakterga ega bo'ladi:

$$z_i = g_i(a) + \omega_i,$$

bu yerda ω_i – o'lchashlar xatolarining tasodifiy vektori, $g_i(a) = g_i(x(t_i, a), t_i)$ – baholanadigan parametrlarning nochiziqli vektor-funksiyasi.

Kvadratlik funksionalni ko'rib chiqamiz

$$Q(a) = (g(a) - z^u)^T P (g(a) - z^u) = \|g(a) - z^u\|_P^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

bu yerda $g(a) = [g_1^T(a) \dots g_n^T(a)]^T$, $z^u = [(z_1^u)^T \dots (z_n^u)^T]^T$, $D_i^{-1}, i = 1, 2, 3, \dots, n = \text{diag} P$.

(2) funksionalning a bo'yicha minimumining zaruriy sharti asosida q nochiziqli algebraik tenglamalar tizimini yozishimiz mumkin, bu esa a^* – baholanadigan parametrlar vektorining optimal bahosini aniqlash imkonini beradi. Parametrik identifikatsiyalash masalalarida parametr bo'yicha analitik davom ettirish uslubining har bir qadami tartib bo'yicha ishga tushiriladigan tutashgan gradiyentlar uslubining protseduralari va Gauss-Nyuton usuliga asoslangan kombinatsiyalangan iteratsion hisoblash protsedurasidan foydalanadi.

Tutashgan gradiyentlar usulining har bir qadami

$$C \Delta a = d,$$

ko'rinishdagi normal chiziqli algebraik tenglamalar tizimini yechish yo'li bilan

baholanadigan parametrlarga tuzatmalar vektorini aniqlaydi, ya'ni $\Delta a = C^+ d$, bu yerda $C = H^T P H$; $d = H^T P(z^u - g(a))$.

C matritsa yomon shartlangan yoki buzilgan matritsa bo'lsa, u holda psevdoylantirish protsedurasining barqarorligini oshirish uchun quyidagi ko'rinishdagi muntazam protseduralardan foydalanish maqsadga muvofiq bo'ladi

$$C^+ = T^T (T T^T + \alpha I)^{-2} T.$$

Bu yerda α muntazamlashtirish parametrini modelli misollar usuli asosida aniqlash maqsadga muvofiq bo'ladi. Keltirilgan algoritmlar reja matritsasini teskarisiga aylantirish protsedurasini barqarorlashtirishga va shu tariqa kuzatishlar ma'lumotlari bo'yicha nostatsionar dinamik tizim holatining tavsiflarini identifikatsiyalash algoritmlarining aniqligini oshirishga ko'maklashadi.

Nostatsionar tizimlar uchun bo'lakli-chiziqli parametrlarni identifikatsiyalash masalasini ko'rib chiqamiz. Aytaylik, tasodifiy koeffitsiyentlarga ega bo'lgan, quyidagi tenglamalar bilan tasvirlanadigan chiziqli dinamik tizim mavjud bo'lsin:

$$\begin{aligned} x_k &= a_1(k)x_{k-1} + \dots + a_p(k)x_{k-p} + b_1(k)u_{k-1} + \dots + b_q(k)u_{k-q} + \sigma_0 \varepsilon_k, \quad k = 1, 2, \dots, \\ a_i(k) &= a_i + \sigma_i \eta_i(k), \quad b_j(k) = b_j + \Delta_j \gamma_j(k), \quad k = 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (3)$$

bu yerda $\{\varepsilon_k\}, \{\eta_i(k)\}, i = \overline{1, p}, \{\gamma_j(k)\}, j = \overline{1, p}$, - nolli o'rtacha va birlik dispersiyaga ega bo'lgan bir xil taqsimlangan mustaqil tasodifiy kattaliklarning mustaqil ketma-ketliklarini tasvirlaydi; $\{u_k\}$ - kiruvchi ta'sirlarning ma'lum bir ketma-ketligi;

$X_0 = (x_0, x_{-1}, \dots, x_{-p+1})$ vektor $E\|X_0\|^2 < +\infty$ dan $\{\varepsilon_k\}, \{\eta_i(k)\}, \{\lambda_j(k)\}$ ketma-ketliklarga bog'liq bo'lmagan boshlang'ich ta'sirlarni tasvirlaydi; $\sigma_0 > 0, \sigma_i \geq 0, \Delta_i \geq 0$ - doimiy parametrlar.

$\{x_k\}$ jarayonni kuzatish natijasida noma'lum bo'lib hisoblanadigan $\theta = (a_1, \dots, a_p, b_1, \dots, b_q)^T$ parametrlar vektorining bahosi aniqlanishi lozim. Quyidagi belgilashlardan foydalanamiz: $X_{k-1} = (x_{k-1}, \dots, x_{k-p})^T, U_{k-1} = (u_{k-1}, \dots, u_{k-q})^T$ $\xi_k = (\sigma_0 \varepsilon_k, 0, \dots, 0)^T$, shunda (3) tenglamani vektor ko'rinishda yozish mumkin:

$$X_k = A_k X_{k-1} + B_k U_{k-1} + \xi_k,$$

bu yerda A_k va B_k - mos ravishda $p \times p$ va $p \times q$ o'lchamlarga ega bo'lgan matritsalar

$$A_k = A + \Gamma_k, \quad B_k = B + R_k,$$

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & \dots & a_p \\ \dots & \dots & \dots \\ I_{p-1} & & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_1 & \dots & b_q \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad \Gamma_k = \begin{bmatrix} \sigma_1 \eta_1(k) & \dots & \sigma_p \eta_p(k) \\ 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad R_k = \begin{bmatrix} \Delta_1 \gamma_1(k) & \dots & \Delta_q \gamma_q(k) \\ 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix},$$

bu yerda I_{p-1} - $p-1$ tartibli birlik matritsa.

Yuqorida aytilganidek, $\theta = (a_1, \dots, a_p, b_1, \dots, b_q)^T$ (1) dinamik tizimning noma'lum parametrlar vektorini hisoblanadi, uni baholash uchun EKKU baholarining ketma-ket variantidan foydalanamiz. Bu quyidagi tenglamalar tizimi bilan

ifodalanuvchi yangi ma'lumotlar kelishi bilan parametrlarni baholashni ketma-ket yangilashga asoslangan:

$$M_n \cdot \theta(n) = c, \quad (4)$$

bu yerda

$$M_n = \sum_{k=1}^n Y_{k-1} Y_{k-1}^T, \quad Y_{k-1} = (X_{k-1}^T, U_{k-1}^T)^T, \quad c = \sum_{k=1}^n Y_{k-1} x_k, \quad n \geq n_0, \quad n_0 = \inf \{l \geq 1; \lambda_{\min}(M_l) > 0\},$$

$\lambda_{\min}(A)$ – A matritsaning minimal o'zining qiymatini bildiradi, keltirilgan hol uchun approksimatsiyalash sharti $\|\tilde{c} - \bar{c}\| \leq \delta$, $\|\tilde{M}_n - \bar{M}_n\| \leq h$.

(4) tenglamalar tizimida boshlang'ich ma'lumotlarning kichik o'zgarishlarida yechimning katta o'zgarishlari sodir bo'ladi, ya'ni tizim yomon shartlangan bo'ladi.

Shunga muvofiq, real vaqt mobaynida obyekt parametrlarini turg'un identifikatsiyalashga imkon beradigan, EKKU baholashlarining ketma-ket varianti asosida kafolatlangan o'rtakvadratlik aniqlik bilan tasodifiy parametrlarga ega bo'lgan chiziqli dinamik obyektini tasodifiy parametrlar bilan parametrlilik identifikatsiyalashning muntazam algoritmlari ishlab chiqilgan.

Bu yerda, shuningdek Kachmaj proyeksiya algoritmi asosida monoton va doimiy parametrlarga ega splaynlardan foydalanib, nostatsionar tizimlarni ortogonal polinomlar asosida barqaror parametrik identifikatsiyalash algoritmlari hamda chiziqli nostatsionar tizimlarning parametrlarini aniqlash uchun ishlab chiqilgan muntazamlashgan algoritmlar ishlab chiqilgan.

Dissertatsiyaning «**Nostatsionar texnologik obyektlarni adaptiv boshqarish algoritmlarini ishlab chiqish**» nomli uchinchi bobida axborotlar to'liq bo'lmaganda va noaniqliklar sharoitida nostatsionar tizimlarni moslashuvchan (adaptiv) boshqarish tizimlarini sintezlash algoritmlarini ishlab chiqish natijalari keltirilgan.

Moslashuvchan boshqarish tizimlari klasslari orasida statik algoritmlar asosida ichki konturning parametrlarini identifikatsiyalash va rostlagichning parametrlarini qayta qurishga asoslangan etalon modeli bilvosita moslashuvchan boshqarish tamoyiliga asoslangan klass o'zining amaliy natijaviyligi bilan ajralib turadi.

Boshqariladigan va kuzatiladigan obyekt quyidagi tenglama ko'rinishida taqdim qilinadi deb faraz qilamiz:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_0(t)x(t) + B_0(t)u(t) + w(t), \quad x(t_0) = x_0, \\ y(t) &= Cx(t) + v(t), \end{aligned} \quad (5)$$

bu yerda

$$\begin{aligned} M[x_0] &= 0, \quad M[x_0 x_0^T] = X_0, \quad M[w(t)] = M[v(t)] = 0, \quad M[x_0 v^T(t)] = 0, \\ M[x_0 w^T(t)] &= 0, \quad M\left[\begin{pmatrix} w(t) \\ v(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w^T(\tau) & v^T(\tau) \end{pmatrix}\right] = \begin{bmatrix} W & G \\ G^T & V \end{bmatrix} \delta(t - \tau). \end{aligned}$$

Tenglamada x_0 – ko'p o'lchovli normal taqsimlanishga ega bo'lgan tasodifiy vektor (Gauss vektori); $A_0(t)$, $B_0(t)$, W , V va G – noma'lum matritsalar bo'lib hisoblanadi. Sifat funksionalining minimumi uchun suboptimal bo'lib hisoblanadigan $u(t)$ boshqarishni qurish zarur

$$J(x, u) = \frac{1}{2} M \left[x^T(T) F x(T) + \int_{t_0}^T \begin{pmatrix} x^T(t) & u^T(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q & 0 \\ 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(t) \\ u(t) \end{pmatrix} dt \right], \quad (6)$$

bu yerda Q – $(n \times n)$ o‘lchamga ega bo‘lgan va musbat yarim aniqlangan matritsa bo‘lib hisoblanadigan matritsa, F, R – mos ravishda $(n \times n)$ va $(m \times m)$ o‘lchamlarga ega bo‘lgan va musbat aniqlangan matritsalar bo‘lib hisoblanadigan matritsalar, $T - t_0$ berilgan bo‘lib hisoblanadi va obyektning vaqt doimiysidan ancha katta, $u(t)$ chegaralanmagan bo‘lib hisoblanadi. $x(t)$ obyektning holatini kuzatish xatosini kiritamiz va uni $\varepsilon(t)$ orqali belgilaymiz: $\varepsilon(t) = x(t) - \hat{x}(t)$.

Aytaylik A^0 va B^0 parametrlarning etalon qiymatlari oldindan berilgan bo‘lsin. Ular parametrik g‘alayonlantiruvchilar bo‘lmaganda obyektning dinamikasini belgilaydi, ya’ni (5) uchun parametrlar bo‘lib hisoblanadigan $A_0(t)$ va $B_0(t)$ quyidagi ko‘rinishga ega bo‘ladi:

$$A_0(t) = A^0 + a(t), \quad B_0(t) = B^0 + b(t).$$

Moslashuvchan rostlagich ishlashi davomida vaqtning har bir onida quyidagi ko‘rsatilganidek ba’zi shartlarning bajarilishini ta’minlash zarur:

$$B_0(t)H_1(t) = \Delta a(t), \quad B_0(t)H_2(t) = \Delta b(t),$$

bu yerda $\Delta a(t)$ va $\Delta b(t)$ quyidagi tenglamaning parametrlari bo‘lib hisoblanadi:

$$\dot{x}(t) = (A^0 + a(t) + \Delta a(t))x(t) + (B^0 + b(t) + \Delta b(t))u(t) + w(t), \quad x(t_0) = x_0.$$

Bundan tenglamaning parametrlari quyidagi shartlarni qanoatlantirishi kelib chiqadi:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [A^0 + a(t) + \Delta a(t)] = A^0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} [B^0 + b(t) + \Delta b(t)] = B^0.$$

$\Delta a(t)$ va $\Delta b(t)$ uchun bunday shartlar bajarilishi uchun moslashuvchanlik shartlarini amalga oshirish zarur bo‘ladi. Moslashuvchan rostlagichning koeffitsiyentlarini aniqlash uchun quyidagi bog‘lanishlardan foydalanish mumkin:

$$H_1(t) = B_0^+(t)\Delta a(t), \quad H_2(t) = B_0^+(t)\Delta b(t), \quad (7)$$

bu yerda $B_0^+(t) = B_0(t)$ matritsaga nisbatan psevdoteskari matritsa.

(7) dagi $B_0(t)$ matritsa $k < m$ to‘liq bo‘lmagan rangli matritsa bo‘lib hisoblanadi deb taxmin qilamiz. Shunda ortogonal $n \times n$ – Q matritsa, ortogonal $m \times m$ – W matritsa va diagonal $n \times m$ – R matritsa mavjud bo‘ladi

$$Q^T B W = R, \quad B = Q R W^T, \quad (8)$$

bu yerda

$$R = \left[\begin{array}{c|c} R_{11} & 0 \\ \hline 0 & 0 \end{array} \right], \quad (9)$$

bunda R_{11} – buzilmagan uchburchak $k \times k$ – matritsa.

Shunday qilib, $B = Q R W^T$ ortogonal yoyilma uchun psevdoteskari matritsa $B^+ = W R^+ Q^T$ ifoda bilan aniqlanadi, bu yerda R^+ quyidagi formula bilan beriladi:

$$R^+ = \left[\begin{array}{c|c} R_{11}^{-1} & 0 \\ \hline 0 & 0 \end{array} \right], \quad B^+ = W \left[\begin{array}{c|c} R_{11}^{-1} & 0 \\ \hline 0 & 0 \end{array} \right] Q^T.$$

Agar B uchun (8) singulyar qiymatga yoyilsa va (9) dagi R_{11} ning bosh diogonalida nollik elementlar mavjud bo‘lmasa, u holda yetarlicha kichik $\|B_0(t) - B^0\|$ da yaqinlashtirilgan nisbatlardan foydalanish mumkin.

(6) funksionalning yuqorida tasvirlangan separabellik xususiyatidan foydalanish bilan boshqarish tizimini moslashuvchan koordinatali boshqarishni qo'llash bilan optimallashtiramiz $u(t) = -R^{-1}B_{\phi}^T(t)S_{\phi}(t)\hat{x}(t)$.

Moslashuvchan koordinatali boshqarishni qurish uchun moslashuvchan filtrdan foydalanamiz

$$\hat{\dot{x}}(t) = A_{\phi}(t)\hat{x}(t) + B_{\phi}(t)u(t) + K_{\phi}(t)[y(t) - C\hat{x}(t)], \quad \hat{x}(t_0) = 0.$$

Ushbu filtr filtrlashning minimal o'rtacha kvadratik xatosini ta'minlaydi.

Keltirilgan turg'un psevdoylantirish usullari asosida nostatsionar obyektlarni moslashuvchan suboptimal boshqarishni sintezlash algoritmlari boshqarish jarayonining sifat ko'rsatkichlarini oshirish imkonini beradi.

O'yin usullari tushunchalari asosida nostatsionar obyektlarni boshqarishning turg'un algoritmlarini qurish savollarini ko'rib chiqamiz. Nostatsionar boshqarish obyektining matematik ifodasi quyidagi ko'rinishda berilgan:

$$x_{i+1} = A_i v + B_i \bar{u}_{1i}, \quad i = 1, 0, \dots, I, \quad (10)$$

bu yerda $A_i = \|a_{in}\|$ - matritsa $a_{in}, n = 1, 2, \dots, N$ koeffitsiyentlardan tashkil topgan matritsa-qatori, $v = (v_1, v_2, \dots, v_N)^T$ - g'alayonlar vektori; $B_i = \|b_{ir}\|$ - matritsa $b_{ir}, r = 1, 2, \dots, x$ koeffitsiyentlardan tashkil topgan matritsa-qatori; \bar{u}_{1i} - ta'sirlar u_1, u_2, \dots, u_i vaqt bo'yicha boshqarishlarning ketma-ketligi. Ushbu holatda (10) tizimning u_0 boshqarish ta'siri uchun boshlang'ich shart yo'q, bu masalaning murakkabligiga olib keladi.

Boshqarishda quyidagi tengsizlik bajarilishi lozim:

$$|u_i| \leq U_i, \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad (11)$$

bu yerda U_i - qiymat u_i absolyut kattalikning maksimal qiymati.

G'alayonlar va o'lchash xatolarining kattalıkları mos ravishda $V_n, n = 1, 2, \dots, N$ va $H_i, i = 1, 2, \dots, I$ quyidagi absolyut qiymatlardan katta emas:

$$|v_n| \leq V_n, \quad |h_i| \leq H_i. \quad (12)$$

U holda obyekt tenglamasini quyidagicha yozamiz:

$$\bar{x}_{i+1}^* = A_i v, \quad i = 0, 1, \dots, I, \quad (13)$$

bu yerda $A_i - A_r, r = 0, 1, \dots, i$ qatorlardan tuzilgan matritsa bo'lib hisoblanadi.

Dinamik dasturlash tamoyilidan foydalanib, dastavval I diskret moment uchun u_i^* boshqarishni aniqlaymiz. Mezonni quyidagi ko'rinishda yozamiz

$$\inf_{u_i \in \omega_k} \sup_{v, \bar{h}_i \in \omega_n} \left| A_i v + \sum_{r=1}^{I-1} b_{ir} u_r + b_{ii} u_i \right|. \quad (14)$$

Shunda u_i kattalikni (11) chegaralash bo'lmaganda (14) mezon va (13) ifodani hisobga olish bilan quyidagi ko'rinishda taqdim qilish mumkin:

$$u_i^* = -\frac{1}{b_{ii}} \left(G_i \bar{y}_i^* + \sum_{r=1}^{I-1} b_{ir} u_r \right), \quad (15)$$

bu yerda $G_i = \|g_{ii}\|$ - optimal boshqarishning qidirilayotgan koeffitsiyentlarining

matritsa-qatori bo‘lib hisoblanadi; u_i^* ; $\bar{y}_i^* - x_i^*, i = 1, 2, \dots, I$ kattaliklarning o‘lchangan qiymatlaridan tuzilgan vektor bo‘lib hisoblanadi.

(15) mezonni hisobga olish bilan (14) ni quyidagicha yozish mumkin:

$$\inf_{G_l} \sup_{v, \bar{h}_l \in \omega_n} |A_l v + G_l \bar{y}_l^*|,$$

shunda:

$$\Gamma v = z, \quad (16)$$

bu yerda $\Gamma = \theta^{(l)} A_{l-1}$, $z = \theta^{(l)} \bar{x}_l^*$, $\theta^{(l)} = \|\mathcal{G}_{nl}^{(l)}\|$ – ixtiyoriy koeffitsiyentlarning matritsasi $\mathcal{G}_{nl}^{(l)}$, $n = 1, 2, \dots, N$; $l = 1, 2, \dots, I$.

(16) tenglamani approksimatsiyalash shartlarini quyidagi ko‘rinishda qabul qilamiz:

$$\|\tilde{\Gamma} - \Gamma\| \leq h, \quad \|\tilde{z} - z\| \leq \delta.$$

(16) tenglamani yechish jarayonining noto‘g‘riligini hisobga olish bilan A.N.Tixonovning muntazamlashtirish uslubini qo‘llash mumkin:

$$M_\alpha[v] = \|\Gamma_h v - z_0^*\|^q + \alpha \|v\|^r, \quad q \geq 1, \quad r > 1.$$

Kuzatiladigan qiymatlar va bashorat qilingan qiymatlar orasidagi kvadratik farqlar yig‘indisini minimallashtirish orqali $\alpha \geq 0$ muntazamlashtirish parametrini tanlab, quyidagini olamiz: $\psi(\alpha) = \|\Gamma_h v_\alpha - z_0^*\| + h \|z_\alpha\| \rightarrow \min$, $v_\alpha = \arg \min_{v \in Z} M_\alpha[v]$.

Ishda kengaytirilgan muntazamlashtirilgan normal tenglamalar tizimidan ham foydalanilgan:

$$\begin{bmatrix} \omega I_m & \Gamma \\ \Gamma^T & -\omega I_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z^* \\ 0 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \tilde{\Gamma}_\omega v = \tilde{z}_\omega^*, \quad (17)$$

bu yerda $u = \omega^{-1} r$, $r = z^* - \Gamma v$, $\omega = \alpha^{1/2}$.

(17) kengaytirilgan muntazamlashtirilgan tizimning $v_\omega = \begin{bmatrix} u_\omega \\ v_\omega \end{bmatrix}$ yechimi

mavjud, bittayu-bitta va quyidagiga teng: $v_\omega = (\Gamma^T \Gamma + \omega^2 I_n)^{-1} \Gamma^T z^*$ va $u_\omega = \omega^{-1} r_\omega$, bu yerda $r_\omega = z^* - \Gamma v_\omega$.

Ishda, shuningdek noaniqlik sharoitlarida nostatsionar tizimlarni moslashuvchan boshqarish tizimlarini sintezlashning muntazam algoritmlarini qurish savollari ham ko‘rilgan. Ushbu algoritmlar nostatsionar tizimlarni ma’lum bir klassi uchun, masalan etalon modeli va optimal chiziqli-kvadratik masala uchun nostatsionar tizimlarni moslashuvchan boshqarish algoritmlarini sintezlash imkonini beradi.

Dissertatsiyaning «**Ishlab chiqilgan algoritmlarni sanoat nostatsionar obyektlarini boshqarish tizimlarini sintezlash masalalarida amaliy qo‘llash**» nomli to‘rtinchi bobida ishlab chiqilgan algoritmlarni ko‘mir kukunini to‘g‘ridan-to‘g‘ri puflaydigan energoblokdagi jarayonlar texnologik rejimini avtomatlashtirish va boshqarishda qo‘llash natijalari keltirilgan.

Energoblokni tadqiq qilishda uning tuzilishini yuqorida keltirilganlarga asosan

tahlil qilib, boshqarish obyekti sifatida o‘zida o‘ta murakkab, o‘zaro bog‘langan strukturani taqdim qiladi. Shu jihatdan ushbu ko‘rinishdagi murakkab strukturalarning matematik ifodasi o‘zida noxiziqli, nostatsionar, ko‘p bog‘lanishli, ko‘ndalang va teskari parazit bog‘lanishlarga ega bo‘lgan harakterni namoyon qiladi. Tadqiq qilish obyekti sifatida “Yangi-Angren IES”dagi ko‘mir kukunida ishlaydigan PK64-2 qozonlar va K-300-240-3 tipidagi turbinaga ega bo‘lgan dublblok tanlangan (o‘rnatilgan quvvati 300 MVt). Qozonlar to‘g‘ri oqimli va sanoat ortiqcha qizdirilishiga ega. Har bir qozon shaxta tegirmonli va yoqilg‘ini havo bilan quritadigan to‘g‘ri puflaydigan kukun tizimlari bilan jihozlangan.

Shunday qilib to‘g‘ri oqimli qozonning soddalashgan noxiziqli modeli quyidagicha bo‘ladi.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(x) + B(x)u, \\ y &= C(x) + D(x)u, \end{aligned} \quad (18)$$

bu yerda

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_B \\ p_m \\ h_m \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_B \\ D_{fm} \\ u_t \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{st} \\ h_m \\ N_e \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{c_0} & 0 & 0 \\ \frac{k_0}{c_1} & 0 & 0 \\ \frac{k_0}{c_2} & 0 & 0 \\ c_2 & & \end{bmatrix},$$

$$B(x) = \begin{bmatrix} \frac{1(t-\tau)}{c_0} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{h_{fw} - d_1}{c_1} & \frac{f[x_2 - g(x_2)](d_1 - lx_3)\{h[x_2 - g(x_2)] - h_{fw}\}}{c_1(lx_3 - h_{fw})} \\ 0 & \frac{h_{fw} - d_2}{c_2} & \frac{f[x_2 - g(x_2)](d_2 - lx_3)\{h[x_2 - g(x_2)] - h_{fw}\}}{c_2(lx_3 - h_{fw})} \end{bmatrix},$$

$$C(x) = \begin{bmatrix} x_2 - g(x_2) \\ x_3 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad D(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_2 f[x_2 - g(x_2)]\{h[x_2 - g(x_2)] - h_{fw}\} \end{bmatrix},$$

bunda $x = [x_1, x_2, x_3]^T$ -holat vektori, $y = [y_1, y_2, y_3]^T$ -chiqish vektori, $u = [u_1, u_2, u_3]^T$ - boshqaruvchi vektor. x_1 , x_2 va x_3 lar mos ravishda, o‘txonada yoqilg‘ining massa bo‘yicha sarf holati (kg/s), separatoridagi bug‘ning bosim bo‘yicha holati (MPa) va separatoridagi solishtirma entalpiya bo‘yicha holat (kJ/kg). u_1 , u_2 va u_3 lar mos ravishda yonilg‘i sarfi (kg/s) bo‘yicha buyruq, oqova suvning massa bo‘yicha sarfi (kg/s) buyrug‘i, drossel klapanini ochish bo‘yicha buyrug‘i ($0 \leq u_3 \leq 1$). Shu bilan birga y_1 , y_2 va y_3 lar mos ravishda bug‘ bosimining drossel sarfi (MPa), separatoridagi solishtirma entalpiya holati (kJ/kg) va aktiv quvvat (MVt).

Shunda parametrlar o‘ziga xos qiymatlarini almashtirgandan so‘ng, quvvati 300 MVt bo‘lgan to‘g‘ri oqimli qozonning tizim modeli quyidagicha yoziladi.

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= -0,049x_1 + 0,0049u_1; \\ \dot{x}_2 &= \frac{(42,71x_2 - 4,91x_2^{0,872} - 30,14)(-8,64x_2 + 1,072x_2^{0,872} + 2481,5)(500 - 1,29x_3)}{1059000(1,29x_3 - 1162)}u_3 + \\ &+ 0,0148x_1^{1,029} + 0,000566u_2; \\ \dot{x}_3 &= \frac{(42,71x_2 - 4,91x_2^{0,872} - 30,14)(-8,64x_2 + 1,072x_2^{0,872} + 2481,5)(3000 - 1,29x_3)}{59700(1,29x_3 - 1162)}u_3 + \\ &+ 0,264x_1^{1,029} + 0,029u_2; \end{aligned} \right\} :$$

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= x_2 - 0,12x_2^{0,872}; \\ y_2 &= x_3; \\ y_3 &= 0,00049u_3(42,71x_2 - 4,91x_2^{0,872} - 30,14)(-8,64x_2 + 1,072x_2^{0,872} + 2481,5): \end{aligned} \right\}$$

Model o'rnatilgan qiymatlarni aniq bashoratlashi muhim. Bu modelni Matlab paketi yordamida qurdik. Uchta "chiqish"ning hisoblangan va o'lchangan qiymatlari, "kirish"lardagi pog'onali o'zgarishlarga teskari aloqasi bo'lmagan holat aniqlangan.

Bu tajribalarning natijalari ko'rsatishicha modellashtirilgan reaksiyalar o'lchangan reaksiyalarga to'la muvofiq keladi. Bu model haqiqiy obyekt ega bo'lgan hamma xususiyatlarga egaligini ko'rsatadi. Tekshiruvchi ikkala testning ko'rsatishicha modelning aniqligi qoniqarli, undan rostlagichlarni loyihalashda foydalanish mumkin. Chiqish ta'sirlaridagi og'ishlarni bir-nechta sabab bilan izlash mumkin: ko'mir sifatining o'zgarishi, isitkichning dinamikasiz ishlashi, ekonomayzerning kirish entalpiyasining o'zgarish deb qabul qilgan taxminlar, topilgan xatolardagi kamchiliklar.

Dastlabki tizim tenglamasi (18)ni quyidagicha yondosh (affin) nochiziqli tizim ko'rinishda ko'chirib yozamiz.

$$\dot{x} = f(x) + g_1(x)u_1 + g_2(x)u_2 + g_3(x)u_3, \quad (19)$$

bu yerda

$$\begin{bmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \\ x_3(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 \\ P_0 \\ H_0 \end{bmatrix}, \quad f(x) = \begin{bmatrix} -0,0049x_1 \\ 0,0148x_1^{1,029} \\ 0,264x_1^{1,029} \end{bmatrix}, \quad g_1(x) = \begin{bmatrix} 0,0049 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad g_2(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,000566 \\ -0,029 \end{bmatrix},$$

$$g_3(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{(42,71x_2 - 4,91x_2^{0,872} - 30,14)(-8,64x_2 + 1,072x_2^{0,872} + 2481,5)(500 - 1,29x_3)}{1059000(1,29x_3 - 1162)} \\ \frac{(42,71x_2 - 4,91x_2^{0,872} - 30,14)(-8,64x_2 + 1,072x_2^{0,872} + 2481,5)(3000 - 1,29x_3)}{59700(1,29x_3 - 1162)} \end{bmatrix}.$$

Hisoblashlardan ma'lumki, (19) tizimning r vektoriga tegishli nisbiy daraja $n=3$ ga teng. Bog'lanmagan matritsa ham buzilmagan matritsa bo'lib amaldagi zarur va yetarli shartlarni qoniqtiradi, holat bo'yicha teskari aloqani chiziqlantirishga xizmat qiladi.

Endi nochiziqli tizim (19)ni optimal boshqarish masalasini chiziqli tizimning

chiziqli kvadratik rostlagich masalasi sifatida ko‘rish mumkin. Konstruksiyalangan optimal boshqarish qonuni v^* , chiziqli tizim (19) uchun chiziqli kvadratik rostlagich ma’nosida quyidagicha bo‘ladi

$$\begin{cases} v_1^* = -k_1^* z, \\ v_2^* = -k_2^* z, \\ v_3^* = -k_3^* z. \end{cases} \quad (20)$$

Bundan yuqoridagi tenglamalarga muvofiq tegishli chiziqli boshqarish qonuni quyidagi ko‘rinishda yozilishi mumkin

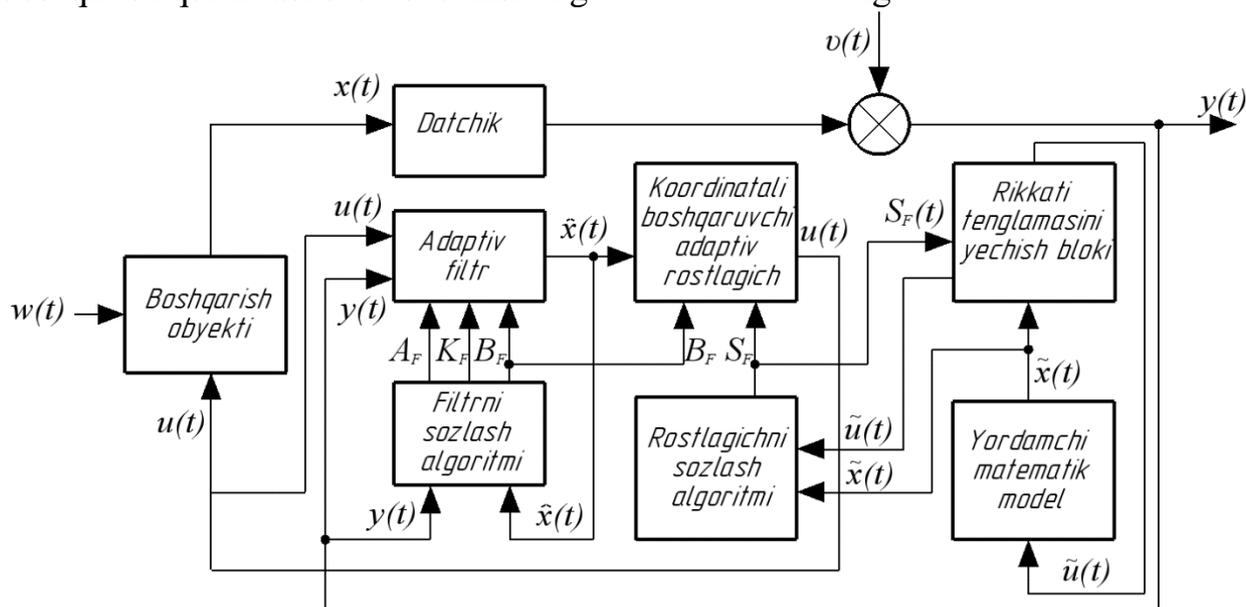
$$u^* = -b^{-1}(x)a(x) + b^{-1}(x)v^* = \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ \frac{(0.3681x_3 + 16397.21)x_1^{1.029}}{1.29x_3 - 1162} \\ 16805.1x_1^{1.029} \\ \frac{1}{(42.71x_2 - 4.91x_2^{0.872} - 30.14)(-8.64x_2 + 1.072x_2^{0.872} + 2481.5)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & \alpha \\ 0 & 0 & \frac{1}{\beta} \end{bmatrix} \times K^* \times z,$$

bu yerda $K^* = \begin{bmatrix} k_{11}^* & k_{12}^* & k_{13}^* \\ k_{21}^* & k_{22}^* & k_{23}^* \\ k_{31}^* & k_{32}^* & k_{33}^* \end{bmatrix}$, $z = [z_1 \ z_2 \ z_3]^T$. K^* - teskari aloqani kuchaytirish

koefitsiyentlaridan iborat matritsa.

(20) dagi K^* ning elementlari Rikkating tenglamasi bo‘yicha hisoblab topiladi. Taklif etilayotgan nochiziqli to‘g‘ridan-to‘g‘ri purkaydigan qozonni boshqarish qurilmasi blok-sxemasining 1-rasmda ko‘rsatilgan.

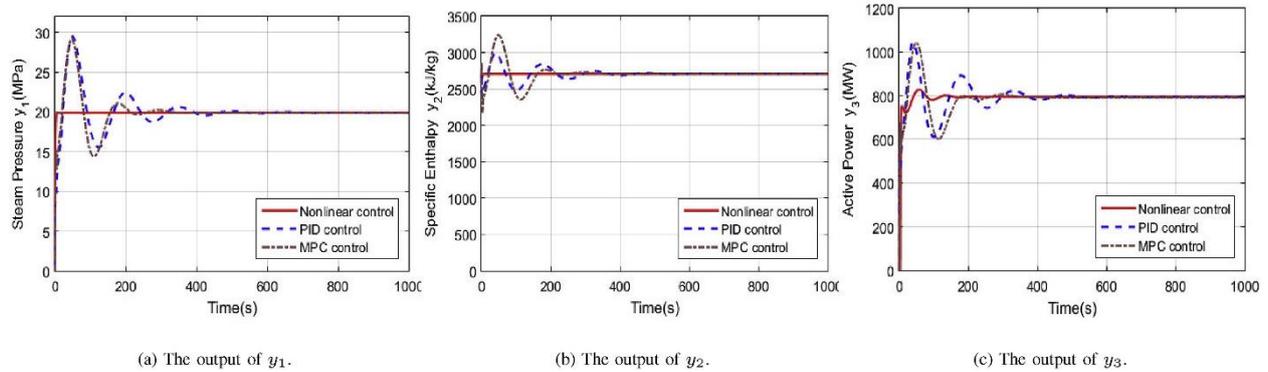


1-rasm. (18) Obyektning adaptiv koordinatali boshqarish (21) bilan stabillash tizimining strukturaviy sxemasi. MO-matematik obyekt, R – rostlagich

Optimal boshqaruv qonuni (21) to‘g‘ri oqimli qozonni boshqarish jarayonining

barcha o'tishi davomida optimal bo'ladi. Yoki unga ekvivalent bo'lgan nohiziqli modelni yuklamalariga teng ko'lamda o'zgarishdan kelib chiqqan istalgan holatdan statsionar optimal holatga qaytarish optimal bo'ladi. Buning sababi tizim (18) yoki unga yondosh tizim (19) ekvivalent, chiziqli tizim aniq va global, boshqaruv u^* ga ega, (18) tizim yoki yondosh nohiziqli (19) tizim uchun chiziqli kvadratik rostlagich ma'nosida optimal.

2-rasmda yuklama 80% bo'lganda boshqarishning uchta usuliga tegishli chiqishlarning dinamik xarakteristikalarini berilgan. Nohiziqli modellashtirish natijalari chiziqli PID boshqaruv va BBM boshqaruv natijalari bilan qiyoslanadi. Shundan keyin uchta boshqaruv strategiyasining farqlari ko'rinadi.



2-rasm. Yuklama 80% bo'lganda uchta boshqaruv usulining chiqishdagi o'tkinchi xarakteristikalarini

Boshqariluvchi tizim dinamik xarakteristikalarini uchta boshqaruv strategisi bo'yicha tahlil qilib quyidagi xulosani chiqarish mumkin.

PID-rostlagich va BBM boshqaruv usullarini chiziqli boshqaruv usullari bilan taqqoslaganda nohiziqli usul samarali boshqarishni ta'minlashi mumkin. Nohiziqli boshqarish usulini qo'llash jarayonida tizimni nohiziqli optimal boshqarish algoritmi yuqori aniqlik bilan ishlab chiqildi. Shuning uchun to'g'ri oqimli qozonning dinamik harakteristikasi nohiziqli boshqarish usuli chiziqli boshqarish usuliga qaraganda yaxshiroq natija beradi.

Shunday yuklamada boshqarish vaqti nohiziqli boshqaruv vaqti BBM usuli sozlash vaqtidan taxminan 4% ga, PID-rostlashning vaqtidan 3,5% kamni tashkil etadi. Bu to'g'ridan-to'g'ri ko'rsatib turibdiki, nohiziqli boshqarish usuli PID-rostlash va BBM usuliga qaraganda vaqt bo'yicha rostlashda nisbatan yaxshiroq.

Ushbu bajarilgan hisob-kitoblar natijasida tadqiqotda nohiziqli boshqarish qonuni ishlab chiqilgan bo'lib, 300 MVt quvvatli nohiziqli boshqarish obyektlarini optimal boshqarish masalalari uchun yondosh tizimlar nazariyasi aniqlandi. Koeffitsiyentlar va teskari aloqa o'zgarish yo'li bilan nohiziqli boshqarishning optimal qonuni ishlab chiqildi. Boshqaruvning bu nohiziqli strategiyasi qisqa vaqtda sozlanadi, chiqish signali barqaror bo'ladi va isrofgarchilik oz bo'ladi. Natijada boshqaruv samarali bo'lib, keyingi boshqaruvlarga yaxshi yo'naladi. Chiziqli boshqaruvning cheklovlari ko'rsatadiki, bunday nohiziqli yondosh tizim bilan ishlaganda nohiziqli boshqaruv tizim amalga oshadi. Nohiziqli boshqarish usuli chiziqli boshqaruv usulidan ko'ra kengroq imkoniyatlarga ega ekanligi ko'rsatildi.

XULOSA

Dissertatsiyada tizimli tahlil, avtomatik boshqarish nazariyasi usullari, nohiziqli sistemalarni sintezlash, dinamik filtrlash va nokorrekt masalalarni yechish usullari asosida noaniqlik sharoitida nohiziqli dinamik obyektlarni adaptiv baholash va boshqarish algoritmlari ishlab chiqilgan.

Natijada quyidagi ilmiy natijalar olingan:

1. Tutashgan gradiyentlar uslubi va va Gauss-Nyuton uslubi protseduralarini ketma-ket ishga tushirishdan foydalanish bilan parametr bo'yicha analitik davom ettirish uslubi asosida nostatsionar dinamik tizim holatining xarakteristikalarini muntazam identifikatsiyalash algoritmlari ishlab chiqilgan. Keltirilgan algoritmlar plan matritsasini aylantirishni hisoblash protsedurasini turg'unlashtirishga va shu tariqa identifikatsiyalash algoritmlarining aniqligini oshirishga ko'maklashadi.

2. EKKU baholarining ketma-ket variantlari asosida kafolatlangan o'rtacha kvadratik aniqlikdagi tasodifiy parametrlarga ega bo'lgan chiziqli dinamik obyektning parametrlarini real vaqtda identifikatsiyalash imkonini beruvchi muntazam parametrik identifikatsiyalash algoritmlari ishlab chiqilgan.

3. Matritsa operatorini o'ngdan elementar ortogonal aylanish matritsalariga va chapdan almashtirib qo'yishlar matritsalariga yoyishlar asosida nostatsionar tizimlarni barqaror parametrik identifikatsiyalash algoritmlari ishlab chiqilgan.

4. Kachmaj proyeksion algoritmi asosida monoton va doimiy belgili parametrlarga ega bo'lgan chiziqli nostatsionar tizimlarni iteratsion algoritmdan foydalanish bilan oraliq hisoblashlarning aniqligini nazorat qilishni osonlashtirish imkonini beruvchi moslashuvchan parametrik splayn-identifikatsiyalash muntazam algoritmlari ishlab chiqilgan.

5. Nostatsionar differensial tenglamalar, kuzatuvchilar va holatlar kengligi uslubi atamalaridagi umumlashtirilgan tenglamalar shaklidagi modellar asosida noaniqlik sharoitlarida nostatsionar tizimlarni boshqarish qonunlarining ma'lum bir klassi uchun, masalan etalon modeli va optimal chiziqli-kvadratik masala uchun nostatsionar tizimlarni moslashuvchan boshqarish algoritmlarini sintezlash imkonini beruvchi moslashuvchan boshqarish algoritmlari ishlab chiqilgan.

6. Barqaror psevdoylantirish uslublari asosida nostatsionar obyektlarni boshqarish jarayonlarining sifat ko'rsatkichlarining ortishiga ko'maklashuvchi moslashuvchan suboptimal boshqarishni sintezlash algoritmlari ishlab chiqilgan.

7. O'yin uslublari konsepsiyalari asosida nostatsionar obyektlarni klassik uslublarning samarasizligi va jarayonlarning yuqori aprior noaniqligi sharoitlarida boshqarish qarorlarini optimallashtirish imkonini beruvchi barqaror boshqarish algoritmlari ishlab chiqilgan.

8. Ishlab chiqilgan algoritmlar asosida ko'mir kukunini to'g'ridan-to'g'ri puflaydigan energoblokdagi jarayonlar texnologik rejimini turg'unlashtirish va uning faoliyat ko'rsatishining samaradorligini oshirish imkonini beruvchi moslashuvchan boshqarish tizimi taklif qilingan.

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

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

СОТВОЛДИЕВ ХУСНИДДИН ИБРАГИМОВИЧ

**АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ
НЕСТАЦИОНАРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ НА
ОСНОВЕ РЕГУЛЯРНЫХ МЕТОДОВ**

**05.01.08 - Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами**

**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 №В2022.2.PhD/Г2846.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете.

Автореферат диссертации на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице (www.tdtu.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyoonet.uz).

Научный руководитель: Игамбердиев Хусан Закирович
доктор технических наук, профессор, академик АН РУз

Официальные оппоненты: Баратов Дилшод Хамидуллаевич
доктор технических наук, профессор
Варламова Людмила Петровна
доктор технических наук, профессор

Ведущая организация: Навоийский государственный горно-технологический университет

Защита диссертации состоится «15» 11 2023 года в 10⁰⁰ 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).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (зарегистрировано №310) (Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: (99871) 207-14-70).

Автореферат диссертации разослан «2» 11 2023 года.
(реестр протокола рассылки №23 от «6» 10 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, доцент

Ж.У.Сеитнов

Заместитель председателя научного семинара при научном совете по присуждению учёных степеней, д.т.н., профессор

Актуальность и необходимость темы диссертации. В мире происходит развитие современных информационных технологий в области автоматического управления и контроля производственными процессами, идентификации нестационарных технологических объектов различного функционального назначения, обновления методов управления и разработки алгоритмов для них. Широкий класс систем управления технологическими процессами характеризуется работой в условиях различного рода отказов, изменений внешней среды, неполных и неопределенных исходных и внутренних преобразований текущей информации. Сложность построения систем управления для такого класса объектов состоит в необходимости решения проблем, связанных с нестационарностью параметров объекта.

Значительные научные исследования, направленные на изменение качества систем управления и контроля нестационарных технологических процессов различного типа, проводятся научным сообществом во всем мире. Поэтому важными вопросами являются совершенствование и модификация методов и алгоритмов идентификации нестационарных технологических объектов, разработка алгоритмов адаптивного управления нестационарными технологическими объектами.

В современную эпоху больших перемен создание усовершенствованных систем управления, которые служат обеспечению энергоэффективности при автоматизации и управлении производственными процессами в нашей стране, в том числе систем автоматизации и управления нестационарными технологическими объектами различного типа, остается одной из важнейших задач. Согласно постановлению Президента Республики Узбекистан «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы», необходимо «увеличить к 2026 году долю возобновляемых источников энергии до 25%, интегрировать энергетическую систему Узбекистана с энергетическими системами соседних стран, обеспечить их стабильную работу»¹. При выполнении этих задач актуальным является создание методов и алгоритмов, позволяющих повысить точность и качественные показатели контроля процессов идентификации и управления нестационарными технологическими объектами.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит для выполнения задач, предусмотренных в Указами Президента Республики Узбекистан №УП-60 от 28.01.2022 г. «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы», №ПП-3682 от 27 апреля 2018 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов», № ПП-3238 от 23 августа 2017 года «О мерах по дальнейшему внедрению современных энергоэффективных и энергосберегающих технологий», №ПП-4422 от 22 августа 2019 года «Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии» и других нормативных и правовых документах, принятых в данной сфере.

¹ Указ Президента Республики Узбекистан №УП-60 от 28 января 2022 года “О стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы”

Соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и техники в республике. Это исследование является IV по развитию науки и техники в Республике. Проводилось по направлению “Развитие информации и информационно-коммуникационных технологий”, которое является приоритетным.

Степень изученности проблемы. Анализ литературы, посвященной исследованию разработки алгоритмов и методов идентификации и контроля нестационарных технологических объектов за последние годы, показывает, что в этой области достигнут большой теоретический и практический прогресс. Значительный вклад в развитие алгоритмов идентификации и управления нестационарными технологическими объектами внесли многие зарубежные ученые, такие как Н.Н.Карабутов², Yang Jian-Bo³, И.Б.Фуртат⁴, А.М.Цыкунов⁴, М.В.Жиров⁵, В.В.Макаров⁵, Г.П.Плетнев⁶, Ю.С.Тверской⁷ а также отечественные ученые, в том числе Н.Р.Юсупбеков⁸, Х.З.Игамбердиев^{8,9,10,11}, А.Р.Марахимов⁹, И.Х.Сидиков⁹, О.О.Зарипов¹⁰, А.Н.Юсупбеков^{9,10}, Ж.У.Севинов¹¹, У.Ф.Мамиров⁸ и др.

Кроме того, постоянное усложнение и расширение масштабов научных исследований требует разработки более совершенных, эффективных новых методов и алгоритмов идентификации и управления нестационарными технологическими объектами. Также имеется необходимость реализации разработки алгоритмов устойчивой идентификации и адаптивного управления нестационарными динамическими объектами и совершенствование существующих алгоритмов.

В связи с этим использование современных информационных технологий в исследовательской работе позволяет расширить спектр алгоритмических процедур построения и реализации гибких систем управления нестационарными динамическими объектами. На основании проанализированных научных работ следует отметить необходимость использования методов регуляризации при создании и модификации эффективных алгоритмов идентификации и управления нестационарными технологическими объектами.

Связь темы диссертации с научно-исследовательской работой вуза, где выполнена диссертация. Диссертация выполнена в рамках научно-

² Карабутов Н.Н. Адаптивная идентификация систем: Информационный синтез. Изд. стереотип. 2016.-384с.

³ Yang Jian-Bo; Li, Duan Normal Vector Identification and Interactive Tradeoff Analysis Using Minimax Formulation in Multiobjective Optimization./In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A:Systems and Humans., Vol. 32, No. 3, 05.2002, p. 305-319.

⁴ Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Робастное управление нестационарными объектами с неизвестной переменной относительной степенью // Управление большими системами, 2011, Выпуск 33, –С. 91-112.

⁵ Жиров М.В., Макаров В.В., Солдатов В.В. Идентификация и адаптивное управление технологическими процессами с нестационарными параметрами. -М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. -208 с.

⁶ Плетнев Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: учебник для студентов вузов / Г. П. Плетнев - Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. -360 с.

⁷ Тверской, Ю.С. Автоматизация пылеугольных котлов электростанций [Электронный ресурс]: монография / Ю.С. Тверской. — Электрон.дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2018. — 472 с.

⁸ Yusupbekov N., Igamberdiev H., Mamirov U. (2022) Algorithms for Robust Stabilization of a Linear Uncertain Dynamic Object Based on an Iterative Algorithm. In: Kahraman C., Cebi S., Cevik Onar S., Oztaysi B., Tolga A.C., Sari I.U. (eds) Intelligent and Fuzzy Techniques for Emerging Conditions and Digital Transformation. INFUS 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 307. Springer

⁹ Марахимов А.Р., Игамбердиев Х.З., Юсупбеков А.Н., Сидиков И.Х. Нечетко множественные модели и интеллектуальное управление технологическими процессами. –Т.: ТашГТУ, 2014. –240 с.

¹⁰ Игамбердиев Х.З., Юсупбеков А.Н., Зарипов О.О. Регулярные методы оценивания и управления динамическими объектами в условиях неопределенности. – Т.: ТашГТУ, 2012. –320 с.

¹¹ Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У., Зарипов О.О. Регулярные методы и алгоритмы синтеза адаптивных систем управления с настраиваемыми моделями. - Т.: ТашГТУ, 2014.

исследовательских работ Ташкентского государственного технического университета им.Ислама Каримова №ОТ-Ф4-78: «Разработка теоретических основ и регулярных методов синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами на основе идентификационного подхода» (2017-2020).

Цель исследования заключается в разработке методов и алгоритмов идентификации и управления нестационарными технологическими объектами на основе регулярных методов.

Задачи исследования:

разработка устойчивых алгоритмов идентификации характеристик состояния нестационарной динамической системы по данным наблюдений;

разработка регулярных алгоритмов параметрической идентификации линейных динамических объектов со случайными параметрами;

разработка алгоритмов устойчивой параметрической идентификации нестационарных систем на основе ортогональных полиномов;

разработка регулярных алгоритмов адаптивной идентификации линейных нестационарных систем;

разработка алгоритмов синтеза адаптивных систем управления нестационарными системами при неполной информации;

разработка алгоритмов адаптивного управления нестационарными системами в условиях неопределенности;

синтез адаптивного субоптимального управления нестационарными объектами;

разработка устойчивых алгоритмов управления нестационарными объектами на основе игровых методов.

Объектом исследования являются нестационарные технологические объекты управления.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы идентификации и управления нестационарными динамическими объектами на основе регулярных методов.

Методы исследования. В диссертационной работе использованы методы системного анализа, идентификации, оценивания, адаптивного управления и решения некорректно поставленных задач.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработаны алгоритмы регулярной идентификации характеристик состояния нестационарной динамической системы на основе вычисления матрицы плана, псевдообратной к матрице выходов;

разработаны алгоритмы устойчивой параметрической идентификации нестационарных систем на основе разложений матричного оператора справа на элементарные ортогональные матрицы вращения и слева на матрицы перестановок;

разработаны алгоритмы синтеза адаптивного субоптимального управления нестационарными объектами на основе концепции псевдообращения, способствующие повышению качественных показателей процессов управления;

разработаны устойчивые алгоритмы управления нестационарными объектами на основе концепций игровых методов, позволяющие проводить оптимизацию управленческих решений в условиях неэффективности

классических методов управления и высокого уровня априорной неопределенности процессов.

Практические результаты исследования состоят в следующем:

созданы программные модули, которые предназначены для поддержки алгоритмического решения задач устойчивого синтеза гибких систем управления нестационарными технологическими объектами;

проведен технический эксперимент, в результате которого разработаны математическая модель системы, которая естественно продувается при нормальных условиях эксплуатации;

разработаны структурно-функциональные схемы автоматизации технологических процессов подачи порошка и адаптивного управления систем вдувания;

предложена система управления, позволяющая стабилизировать процессы и технологические режимы процесса подачи порошка в угольных установках прямого вдувания.

Достоверность результатов исследования. Достоверность полученных результатов исследования обеспечивается выполнением методически обоснованных теоретических выкладок; применением теоретически обоснованных концепций идентификации и адаптивного управления нестационарными динамическими объектами; использованием апробированных методов и алгоритмов современной теории автоматического управления; требуемой степенью сходимости предлагаемых методов и алгоритмов адаптивного управления; результатами теоретических и прикладных исследований и их взаимной согласованностью.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования состоит в разработке конструктивных алгоритмов идентификации и синтеза систем адаптивного управления нестационарными технологическими объектами.

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке математического и алгоритмического обеспечения задач устойчивого синтеза систем адаптивной идентификации и управления нестационарными объектами, которые могут найти широкое применение при построении функциональной структуры и автоматизации проектирования адаптивных систем управления нестационарными технологическими объектами.

Внедрение результатов исследований. Полученные научные результаты и алгоритмы идентификации и управления нестационарными технологическими объектами внедрены в следующих формах:

алгоритмы регулярной идентификации характеристик состояния нестационарной динамической системы внедрены на АО «Янги Ангрен ИЭС» (Справка АО «Тепловые электрические станции» №04-25/456 от 7 февраля 2023 года). В результате удалось повысить точность оценивания состояния нестационарной динамической системы на основе данных наблюдений;

алгоритмы устойчивой параметрической идентификации нестационарных систем внедрены на АО «Янги Ангрен ИЭС» (Справка АО «Тепловые электрические станции» №04-25/456 от 7 февраля 2023 года). В результате произведена устойчивая идентификация параметров объекта в реальном времени;

алгоритмы устойчивого управления нестационарными объектами внедрены на АО «Янги Ангрен ИЭС» (Справка АО «Тепловые электрические

станции» №04-25/456 от 7 февраля 2023 года). В результате произведена оптимизация управленческих решений в условиях неэффективности классических методов управления при высоком уровне априорной неопределенности процессов.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований были доложены на 5 международных и 3 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. Всего по теме диссертации опубликовано 24 научные работы. В том числе 3 работы в зарубежных журналах и 8 работ в журналах, рекомендованных ВАК Республики Узбекистан. Получено 5 свидетельств об официальной регистрации программных продуктов для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений, объем диссертации составляет 107 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, выявлены объект и предмет исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыты теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены перечень внедрений в практику результатов исследования, результаты апробации работы, сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе “Системный анализ современного состояния и развития методов идентификации и управления нестационарными динамическими объектами” рассматриваются свойства и характеристики управляемых нестационарных динамических объектов, а также различные методы и алгоритмы для их идентификации и управления. Определяется цель, и формулируются задачи данного исследования.

В современной промышленности высокий уровень автоматизации присутствует на всех стадиях обработки материалов и веществ. Системы автоматического управления в производственных процессах необходимы для обеспечения безопасности технологических процессов, а также для высокой экономической эффективности технологических установок и всего производства. Значительная часть технологических процессов и установок в промышленности - это объекты управления с изменчивыми нестационарными свойствами.

Изменчивость является важным аспектом технологического процесса (ТП) в качестве объекта управления, поскольку его свойства могут меняться вследствие воздействия изменяющихся условий внешней среды, свойств исходного сырья, а также внутренних изменений, связанных с переналадкой, заменой оборудования, старением и износом. Нестационарность - это существенная характеристика ТП, влияющая на управление им. С помощью методов идентификации и управления нестационарными объектами можно решить значительное количество задач.

Обычно технологический процесс (ТП) определяется набором входных параметров, подлежащих контролю (наблюдению), и набором выходных

параметров, также подлежащих контролю. В этой связи ТП исследуется как нестационарная динамическая система с несколькими входами и выходами.

Представленные выводы свидетельствуют о целесообразности построения алгоритмов адаптивного управления линейными и нелинейными нестационарными технологическими объектами, а также создания вычислительных схем, позволяющих эффективно реализовать эти алгоритмы. Это позволит обеспечить надлежащую стабильность решений и будет способствовать достижению повышения эффективности функционирования адаптивных систем управления технологическими процессами с нестационарными параметрами.

Вторая глава диссертации «Разработка алгоритмов адаптивной идентификации нестационарных технологических объектов» посвящена разработке регулярных алгоритмов параметрической идентификации нестационарных объектов управления по данным наблюдений.

При решении задач управления технологическими процессами очень часто используются модели нестационарной системы вида:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t; b_f, \varphi(x, t)), \quad (1)$$

здесь x - является вектором состояния, имеющим размерность $m \times 1$; $f(\cdot)$ - является нелинейной вектор-функцией, которая известна; b_f - является вектором параметров системы, имеющим размерность $p_f \times 1$; $\varphi(x, t)$ - является вектором неизвестных характеристик системы, который зависит от фазовых координат и времени системы. Начальные условия для динамической системы (1) имеют вид $x_0 = x(t_0)$, здесь t_0 - время начального наблюдения за системой.

Введем обозначения $a = [x_0^T b_f^T b_\varphi^T]^T$ - это вектор, который оценивает все параметры, имеет размер $q \times 1$, $q = m + p_f + p_\varphi$.

Теперь модель измерений примет вид

$$z_i = g_i(a) + \omega_i,$$

здесь $g_i(a) = g_i(x(t_i, a), t_i)$ - это вектор-функция параметров, подлежащих оцениванию, которая нелинейна, ω_i - случайный вектор ошибок измерений.

Рассмотрим квадратичный функционал

$$Q(a) = (g(a) - z^u)^T P (g(a) - z^u) = \|g(a) - z^u\|_P^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $g(a) = [g_1^T(a) \dots g_n^T(a)]^T$, $z^u = [(z_1^u)^T \dots (z_n^u)^T]^T$, $D_i^{-1}, i = 1, 2, 3, \dots, n = \text{diag} P$.

На основании минимума функционала (2) для a можем записать систему q нелинейных алгебраических уравнений, на основании которой можно определить вектор оцениваемых параметров a^* . При решении рассматриваемой задачи идентификации каждый шаг процедуры метода аналитического продолжения по параметру использует комбинированную итерационную вычислительную процедуру методов сопряженных градиентов и Гаусса-Ньютона.

Каждый шаг метода сопряженных градиентов определяет вектор поправок к оцениваемым параметрам на основе решения системы линейных алгебраических уравнений вида

$$C \Delta a = d,$$

где $\Delta a = C^+ d$, где $C = H^T P H$; $d = H^T P (z^u - g(a))$.

Если матрица C имеет плохую обусловленность или является вырожденной, то для улучшения устойчивости псевдоинверсии рекомендуется применить регуляризационную процедуру вида:

$$C^+ = T^T (TT^T + \alpha I)^{-2} T.$$

Определение параметра регуляризации α в данном случае целесообразно определять на основе модельных примеров. Представленные алгоритмы, которые используются для регуляризации, помогают стабилизировать процесс вычисления обратной матрицы плана. Стабилизация процесса увеличивает точность алгоритмов идентификации.

Рассмотрим задачу идентификации кусочно-линейных параметров для нестационарных систем. Пусть имеется линейная динамическая система со случайными коэффициентами, которая описывается уравнениями

$$\begin{aligned} x_k &= a_1(k)x_{k-1} + \dots + a_p(k)x_{k-p} + b_1(k)u_{k-1} + \dots + b_q(k)u_{k-q} + \sigma_0 \varepsilon_k, \quad k = 1, 2, \dots, \\ a_i(k) &= a_i + \sigma_i \eta_i(k), \quad b_j(k) = b_j + \Delta_j \gamma_j(k), \quad k = 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\{u_k\}$ - определенная последовательность входных воздействий; вектор $X_0 = (x_0, x_{-1}, \dots, x_{-p+1})$ описывает начальные воздействия с $E\|X_0\|^2 < +\infty$, не зависящие от последовательностей независимых случайных величин $\{\varepsilon_k, \dots\}$, $\{\eta_i(k)\}$, $\{\lambda_j(k)\}$; $\sigma_0 > 0$, $\sigma_i \geq 0$, $\Delta_i \geq 0$ - постоянные параметры.

В результате наблюдения процесса $\{x_k\}$ должна быть определена оценка вектора параметров $\theta = (a_1, \dots, a_p, b_1, \dots, b_q)^T$, являющимися неизвестными. Используем следующие обозначения $X_{k-1} = (x_{k-1}, \dots, x_{k-p})^T$, $U_{k-1} = (u_{k-1}, \dots, u_{k-q})^T$, $\xi_k = (\sigma_0 \varepsilon_k, 0, \dots, 0)^T$, тогда уравнение (3) можно записать в векторном виде:

$$X_k = A_k X_{k-1} + B_k U_{k-1} + \xi_k,$$

здесь A_k и B_k - матрицы, которые имеют размеры $p \times p$ и $p \times q$ соответственно

$$A_k = A + \Gamma_k, \quad B_k = B + R_k,$$

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & \dots & a_p \\ \dots & \dots & \dots \\ I_{p-1} & & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_1 & \dots & b_q \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad \Gamma_k = \begin{bmatrix} \sigma_1 \eta_1(k) & \dots & \sigma_p \eta_p(k) \\ 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad R_k = \begin{bmatrix} \Delta_1 \gamma_1(k) & \dots & \Delta_q \gamma_q(k) \\ 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 \end{bmatrix},$$

здесь I_{p-1} - единичная матрица порядка $p-1$.

Как было отмечено выше, $\theta = (a_1, \dots, a_p, b_1, \dots, b_q)^T$ - является вектором неизвестных параметров динамической системы (1), для его оценки используется последовательный вариант оценок МНК, основывающийся на последовательном обновлении оценок параметров по мере поступления новых данных:

$$M_n \cdot \theta(n) = c, \quad (4)$$

где

$$M_n = \sum_{k=1}^n Y_{k-1} Y_{k-1}^T, \quad Y_{k-1} = (X_{k-1}^T, U_{k-1}^T)^T, \quad c = \sum_{k=1}^n Y_{k-1} x_k, \quad n \geq n_0, \quad n_0 = \inf \{l \geq 1; \lambda_{\min}(M_l) > 0\},$$

$\lambda_{\min}(A)$ обозначает минимальное собственное значение матрицы A , условия аппроксимации исходных данных примем в виде $\|\tilde{c} - \bar{c}\| \leq \delta$, $\|\tilde{M}_n - \bar{M}_n\| \leq h$.

В системе уравнений (4) при малых изменениях исходных данных

происходят большие изменения решения, то есть система плохо обусловлена.

В соответствии с этим разработаны регулярные алгоритмы параметрической идентификации линейного динамического объекта со случайными параметрами с гарантированной среднеквадратической точностью на основе последовательного варианта оценок МНК, позволяющего производить устойчивую идентификацию параметров объекта в реальном времени.

Здесь также рассмотрены вопросы построения алгоритмов устойчивой параметрической идентификации нестационарных систем на основе ортогональных полиномов, а также регулярные алгоритмы методов, разработанных для определения параметров линейных нестационарных систем, использующих сплайны с монотонными и знакопостоянными параметрами на основе проекционного алгоритма Качмажа.

В третьей главе диссертации «**Разработка алгоритмов адаптивного управления нестационарными технологическими объектами**» приводятся результаты разработки алгоритмов синтеза адаптивных систем управления нестационарными системами при неполной информации и в условиях неопределенности.

Среди классов адаптивных систем управления своей практической результативностью выделяется класс, основанный на принципе непрямого адаптивного управления с эталонной моделью, основанный на идентификации параметров внутреннего контура и перестройке параметров регулятора на основе статических алгоритмов.

Предположим, что управляемый и наблюдаемый объект представляется в виде следующего уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_0(t)x(t) + B_0(t)u(t) + w(t), \quad x(t_0) = x_0, \\ y(t) &= Cx(t) + v(t), \end{aligned} \quad (5)$$

здесь

$$\begin{aligned} M[x_0] &= 0, \quad M[x_0 x_0^T] = X_0, \quad M[w(t)] = M[v(t)] = 0, \quad M[x_0 v^T(t)] = 0, \\ M[x_0 w^T(t)] &= 0, \quad M\left[\begin{pmatrix} w(t) \\ v(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w^T(\tau) & v^T(\tau) \end{pmatrix}\right] = \begin{bmatrix} W & G \\ G^T & V \end{bmatrix} \delta(t - \tau). \end{aligned}$$

В уравнении x_0 – случайный вектор, имеющий многомерное нормальное распределение; $A_0(t)$, $B_0(t)$, W , V и G – являются неизвестными матрицами. Необходимо построить $u(t)$ – управление, являющееся субоптимальным для минимума функционала качества

$$J(x, u) = \frac{1}{2} M \left[x^T(T) F x(T) + \int_{t_0}^T \begin{pmatrix} x^T(t) & u^T(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q & 0 \\ 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(t) \\ u(t) \end{pmatrix} dt \right], \quad (6)$$

здесь Q – матрица, имеющая размерность $(n \times n)$ и являющаяся положительно полуопределенной матрицей, F , R – матрицы соответствующих размеров $(n \times n)$ и $(m \times m)$, являющиеся положительно определенными матрицами, $T - t_0$ является заданным и гораздо больше постоянной времени объекта, $u(t)$ является неограниченным. Введем ошибку наблюдения состояния объекта $x(t)$ и обозначим ее через $\varepsilon(t)$: $\varepsilon(t) = x(t) - \hat{x}(t)$.

Пусть эталонные значения параметров A^0 и B^0 задаются заранее. Они определяют динамику объекта в отсутствие параметрических возмущений, то есть $A_0(t)$ и $B_0(t)$, являющиеся параметрами для (5), имеют следующий вид:

$$A_0(t) = A^0 + a(t), \quad B_0(t) = B^0 + b(t).$$

Адаптивный регулятор имеет своей задачей в каждый момент времени обеспечивать выполнение следующих условий:

$$B_0(t)H_1(t) = \Delta a(t), \quad B_0(t)H_2(t) = \Delta b(t),$$

здесь $\Delta a(t)$ и $\Delta b(t)$ являются параметрами уравнения

$$\dot{x}(t) = (A^0 + a(t) + \Delta a(t))x(t) + (B^0 + b(t) + \Delta b(t))u(t) + w(t), \quad x(t_0) = x_0.$$

Из этого следует, что параметры уравнения удовлетворяют условию:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [A^0 + a(t) + \Delta a(t)] = A^0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} [B^0 + b(t) + \Delta b(t)] = B^0.$$

При выполнении таких условий для $\Delta a(t)$ и $\Delta b(t)$ необходима реализация условий адаптируемости. Для определения коэффициентов адаптивного регулятора можно воспользоваться зависимостями:

$$H_1(t) = B_0^+(t)\Delta a(t), \quad H_2(t) = B_0^+(t)\Delta b(t), \quad (7)$$

где $B_0^+(t)$ – псевдообратная по отношению к $B_0(t)$ матрица.

Допустим, что в матрице $B_0(t)$ в (7) существует k линейно независимых столбцов (или строк), при этом общее количество столбцов (или строк) равно m и $k < m$, то есть $B_0(t)$ – матрица неполного ранга. Тогда на основе методов вычисления псевдообратных матриц можно записать

$$Q^T B W = R, \quad B = Q R W^T, \quad (8)$$

где Q – ортогональная $n \times n$ – матрица, W – ортогональная $m \times m$ – матрица, R – диагональная $n \times m$ – матрица

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & \vdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \vdots & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

причем R_{11} – невырожденная треугольная $k \times k$ – матрица.

Для $B = Q R W^T$ имеет место $B^+ = W R^+ Q^T$,

$$R^+ = \begin{bmatrix} R_{11}^{-1} & \vdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \vdots & 0 \end{bmatrix}, \quad B^+ = W \begin{bmatrix} R_{11}^{-1} & \vdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \vdots & 0 \end{bmatrix} Q^T$$

В том случае, если B раскладывается на сингулярные значения (8) и R_{11} в (9) не имеет нулевых элементов на главной диагонали, тогда можно воспользоваться приближенными соотношениями при достаточно малой $\|B_0(t) - B^0\|$.

Воспользовавшись описанным выше свойством сепарабельности функционала (6), оптимизируем систему управления, применив адаптивное координатное управление $u(t) = -R^{-1} B_\phi^T(t) S_\phi(t) \hat{x}(t)$.

Для построения адаптивного координатного управления будем использовать адаптивный фильтр:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A_\phi(t) \hat{x}(t) + B_\phi(t) u(t) + K_\phi(t) [y(t) - C \hat{x}(t)], \quad \hat{x}(t_0) = 0.$$

Данный фильтр позволит обеспечить минимальную среднеквадратическую ошибку фильтрации. Приведенные алгоритмы синтеза адаптивного субоптимального управления нестационарными объектами на основе методов устойчивого псевдообращения способствуют повышению качественных показателей процессов управления.

Рассмотрим вопросы построения устойчивых алгоритмов управления нестационарными объектами на основе концепций игровых методов.

Пусть нестационарный объект управления описывается уравнением:

$$x_{i+1} = A_i v + B_i \bar{u}_i, \quad i = 1, 0, \dots, I, \quad (10)$$

где $A_i = \|a_{in}\|$ – матрица-строка коэффициентов $a_{in}, n = 1, 2, \dots, N$; $v = (v_1, v_2, \dots, v_N)^T$ – является вектором возмущений, который действует на объект; $B_i = \|b_{ir}\|$ – является матрицей-строкой коэффициентов $b_{ir}, r = 1, 2, \dots, i$; \bar{u}_i – является временной последовательностью управлений u_1, u_2, \dots, u_i . При этом в (10) нет начального управления u_0 , обоснованно выбрать которое в условиях поставленной задачи невозможно.

При управлении должно выполняться неравенство:

$$|u_i| \leq U_i, \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad (11)$$

здесь U_i – является максимально допустимым значением абсолютной величины u_i .

Считается, что возмущения и ошибки измерения по абсолютной величине не больше величин $V_n, n = 1, 2, \dots, N$ и $H_i, i = 1, 2, \dots, I$:

$$|v_n| \leq V_n, \quad |h_i| \leq H_i. \quad (12)$$

Тогда запишем уравнения объекта в виде:

$$\bar{x}_{i+1}^* = A_i v, \quad i = 0, 1, \dots, I, \quad (13)$$

здесь A_i – является матрицей, которая составлена из строк $A_r, r = 0, 1, \dots, i$.

Используя принцип динамического программирования, сначала определим управление u_i^* для дискретного момента I . Определим критерий в виде

$$\inf_{u_i \in \omega_k} \sup_{v, \bar{h}_i \in \omega_n} \left| A_i v + \sum_{r=1}^{I-1} b_{ir} u_r + b_{II} u_I \right|. \quad (14)$$

Учитывая критерий (13), выражение (14) и отсутствие ограничений (11), величина u_i будет выражаться как:

$$u_i^* = -\frac{1}{b_{II}} \left(G_I \bar{y}_I^* + \sum_{r=1}^{I-1} b_{ir} u_r \right), \quad (15)$$

где $G_I = \|g_{II}\|$ – матрица-строка, которая содержит значения коэффициентов, определяющих оптимальное управление в системе управления u_i^* ; измеренные значения величин $x_i^*, i = 1, 2, \dots, I$ формируют вектор \bar{y}_I^* .

С учетом (15) критерий (14) примет следующий вид:

$$\inf_{G_I} \sup_{v, \bar{h}_i \in \omega_n} |A_i v + G_I \bar{y}_I^*|,$$

тогда:

$$\Gamma v = z, \quad (16)$$

где $\Gamma = \theta^{(I)} A_{I-1}$, $z = \theta^{(I)} \bar{x}_I^*$, $\theta^{(I)} = \|g_{nl}^{(I)}\|$ – матрица произвольных коэффициентов $g_{nl}^{(I)}$, $n = 1, 2, \dots, N$; $l = 1, 2, \dots, I$.

Условия аппроксимации уравнения (16) примем в виде:

$$\|\tilde{\Gamma} - \Gamma\| \leq h, \quad \|\tilde{z} - z\| \leq \delta.$$

Далее, используя метод регуляризации А.Н.Тихонова и учитывая некорректность процесса решения (16), имеем:

$$M_\alpha [v] = \|\Gamma_h v - z_0^*\|^q + \alpha \|v\|^r, \quad q \geq 1, \quad r > 1.$$

Выбрав параметр регуляризации $\alpha \geq 0$ путем минимизации суммы квадратов разностей между наблюдаемыми значениями и предсказанными значениями,

получим: $\psi(\alpha) = \| \Gamma_h v_\alpha - z_0^* \| + h \| z_\alpha \| \rightarrow \min, \quad v_\alpha = \arg \min_{v \in Z} M_\alpha [v]$.

В работе также используется расширенная регуляризованная нормальная система уравнений вида

$$\begin{bmatrix} \omega I_m & \Gamma \\ \Gamma^T & -\omega I_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z^* \\ 0 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \tilde{\Gamma}_\omega v = \tilde{z}_\omega^*, \quad (17)$$

где $u = \omega^{-1} r$, $r = z^* - \Gamma v$, $\omega = \alpha^{1/2}$.

При этом решение $v_\omega = \begin{bmatrix} u_\omega \\ v_\omega \end{bmatrix}$ расширенной регуляризованной системы (17)

существует, единственно и равно: $v_\omega = (\Gamma^T \Gamma + \omega^2 I_n)^{-1} \Gamma^T z^*$, а $u_\omega = \omega^{-1} r_\omega$, где $r_\omega = z^* - \Gamma z_\omega$.

Здесь также рассмотрены вопросы построения регулярных алгоритмов синтеза адаптивных систем управления нестационарными системами в условиях неопределенности, позволяющие синтезировать алгоритмы адаптивного управления нестационарными системами для определенного класса законов управления, например, с эталонной моделью и оптимальной линейно-квадратичной задачей.

В четвертой главе диссертации **«Практическое применение разработанных алгоритмов в задачах синтеза систем управления промышленными нестационарными объектами»** рассматриваются вопросы автоматизации управления прямоточными котлами, оснащенными пылесистемами прямого вдувания, шахтными мельницами и воздушной сушкой топлива.

Энергоблок как объект управления представляет собой весьма сложную, взаимосвязанную структуру. Его можно охарактеризовать как нелинейный, нестационарный, многосвязный объект с паразитными поперечными и обратными связями. В качестве объекта исследований выбран дубль блок с пылеугольными котлами ПК64-2 и турбиной типа К-300-240-3 Ново-Ангренской ТЭС (установленная мощность 300 МВт). Котлы прямоточные с промперегревом. Каждый котел оборудован пылесистемами прямого вдувания с шахтными мельницами и воздушной сушкой топлива.

Таким образом, упрощенная нелинейная модель прямоточного котла имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(x) + B(x)u, \\ y &= C(x) + D(x)u, \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_B \\ p_m \\ h_m \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_B \\ D_{fm} \\ u_t \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{st} \\ h_m \\ N_e \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{c_0} & 0 & 0 \\ \frac{k_0}{c_1} & 0 & 0 \\ \frac{k_0}{c_2} & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B(x) = \begin{bmatrix} \frac{1(t-\tau)}{c_0} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{h_{fw} - d_1}{c_1} & \frac{f[x_2 - g(x_2)](d_1 - lx_3)\{h[x_2 - g(x_2)] - h_{fw}\}}{c_1(lx_3 - h_{fw})} \\ 0 & \frac{h_{fw} - d_2}{c_2} & \frac{f[x_2 - g(x_2)](d_2 - lx_3)\{h[x_2 - g(x_2)] - h_{fw}\}}{c_2(lx_3 - h_{fw})} \end{bmatrix},$$

$$C(x) = \begin{bmatrix} x_2 - g(x_2) \\ x_3 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad D(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_2 f[x_2 - g(x_2)]\{h[x_2 - g(x_2)] - h_{fw}\} \end{bmatrix},$$

здесь $x = [x_1, x_2, x_3]^T$ – вектор состояния, $y = [y_1, y_2, y_3]^T$ – выходной вектор, и $u = [u_1, u_2, u_3]^T$ – управляющий вход; x_1 , x_2 а также x_3 представляют состояние по массовому расходу топлива в топке (кг/с), состояние по давлению пара в сепараторе (МПа) и состояние по удельной энтальпии в сепараторе (кДж/кг) соответственно, u_1 , u_2 а также u_3 обозначают команду расхода топлива (кг/с), команду массового расхода питательной воды (кг/с) и открытие дроссельной заслонки ($0 \leq u_3 \leq 1$), соответственно. А также y_1 , y_2 , а также y_3 представляют дроссельный расход пара, давление пара (МПа), удельную энтальпию состояния в сепараторе (кДж/кг) и активную мощность (МВт) соответственно.

Тогда после подстановки конкретных значений параметров системная модель установки прямоточного котла с нагрузкой 300 МВт будет записана в виде

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= -0,049x_1 + 0,0049u_1; \\ \dot{x}_2 &= \frac{(42,71x_2 - 4,91x_2^{0,872} - 30,14)(-8,64x_2 + 1,072x_2^{0,872} + 2481,5)(500 - 1,29x_3)}{1059000(1,29x_3 - 1162)}u_3 + \\ &+ 0,0148x_1^{1,029} + 0,000566u_2; \\ \dot{x}_3 &= \frac{(42,71x_2 - 4,91x_2^{0,872} - 30,14)(-8,64x_2 + 1,072x_2^{0,872} + 2481,5)(3000 - 1,29x_3)}{59700(1,29x_3 - 1162)}u_3 + \\ &+ 0,264x_1^{1,029} + 0,029u_2; \end{aligned} \right\} :$$

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= x_2 - 0,12x_2^{0,872}; \\ y_2 &= x_3; \\ y_3 &= 0,00049u_3(42,71x_2 - 4,91x_2^{0,872} - 30,14)(-8,64x_2 + 1,072x_2^{0,872} + 2481,5); \end{aligned} \right\}$$

Важно, чтобы модель точно предсказывала установившиеся значения. Эта модель построена с помощью Matlab. Были определены вычисленные и измеренные отклики трех выходов без обратной связи на определенные ступенчатые изменения входов.

Все эти эксперименты показывают, что смоделированные реакции полностью соответствуют измеренным реакциям. Эта модель обладает теми же качественными свойствами, что и реальная единица. Оба проверочных теста показывают, что эта модель имеет удовлетворительную точность и может быть использована для проектирования контроллера. Расхождения в выходных характеристиках можно объяснить несколькими причинами, такими как изменение качества угля, отсутствие динамики подогревателя, компромиссы в допущениях о постоянной входной энтальпии экономайзера и ошибка обнаружения данных.

Перепишем уравнение состояния исходной системы (18), моделируемой

в виде аффинной нелинейной системы, в следующем виде

$$\dot{x} = f(x) + g_1(x)u_1 + g_2(x)u_2 + g_3(x)u_3 \quad (19)$$

где

$$\begin{bmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \\ x_3(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 \\ P_0 \\ H_0 \end{bmatrix}, \quad f(x) = \begin{bmatrix} -0.0049x_1 \\ 0.0148x_1^{1.029} \\ 0.264x_1^{1.029} \end{bmatrix}, \quad g_1(x) = \begin{bmatrix} 0.0049 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad g_2(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.000566 \\ -0.029 \end{bmatrix},$$

$$g_3(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{(42.71x_2 - 4.91x_2^{0.872} - 30.14))(-8.64x_2 + 1.072x_2^{0.872} + 2481.5)(500 - 1.29x_3)}{1059000(1.29x_3 - 1162)} \\ \frac{(42.71x_2 - 4.91x_2^{0.872} - 30.14))(-8.64x_2 + 1.072x_2^{0.872} + 2481.5)(3000 - 1.29x_3)}{59700(1.29x_3 - 1162)} \end{bmatrix}.$$

Из расчетов видно, что относительная степень вектора r системы (19) равна размеру вектор состояния системы $n=3$. При этом несвязанная матрица невырождена в некоторой области, которая удовлетворяет практически необходимым и достаточным условиям для точной линеаризации обратной связи по состоянию.

Теперь задачу оптимального управления нелинейной системой (19) можно рассматривать как задачу синтеза линейного квадратного регулятора системы. Сконструированный закон оптимального управления u^* для приведенной выше линейной системы (19) будет иметь вид

$$\begin{cases} u_1^* = -k_1^* z, \\ u_2^* = -k_2^* z, \\ u_3^* = -k_3^* z. \end{cases} \quad (20)$$

Следовательно, согласно уравнению с приведенным выше соответствующими нелинейными законами управления можно записать в виде

$$u^* = -b^{-1}(x)a(x) + b^{-1}(x)v^* = \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ \frac{(0.3681x_3 + 16397.21)x_1^{1.029}}{1.29x_3 - 1162} \\ \frac{16805.1x_1^{1.029}}{(42.71x_2 - 4.91x_2^{0.872} - 30.14))(-8.64x_2 + 1.072x_2^{0.872} + 2481.5)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{0.029} & \frac{\alpha}{0.029\beta} \\ 0 & 0 & \frac{1}{\beta} \end{bmatrix} \times K^* \times z,$$

где $K^* = \begin{bmatrix} k_{11}^* & k_{12}^* & k_{13}^* \\ k_{21}^* & k_{22}^* & k_{23}^* \\ k_{31}^* & k_{32}^* & k_{33}^* \end{bmatrix}$, $z = [z_1 \ z_2 \ z_3]^T$. K^* – матрица коэффициентов усиления обратной связи.

В уравнении (20) значение матрицы коэффициентов усиления обратной связи K^* рассчитывается по уравнению Риккати. Блок-схема предлагаемой схемы нелинейного управления установкой проточного котла представлена на рис.1.

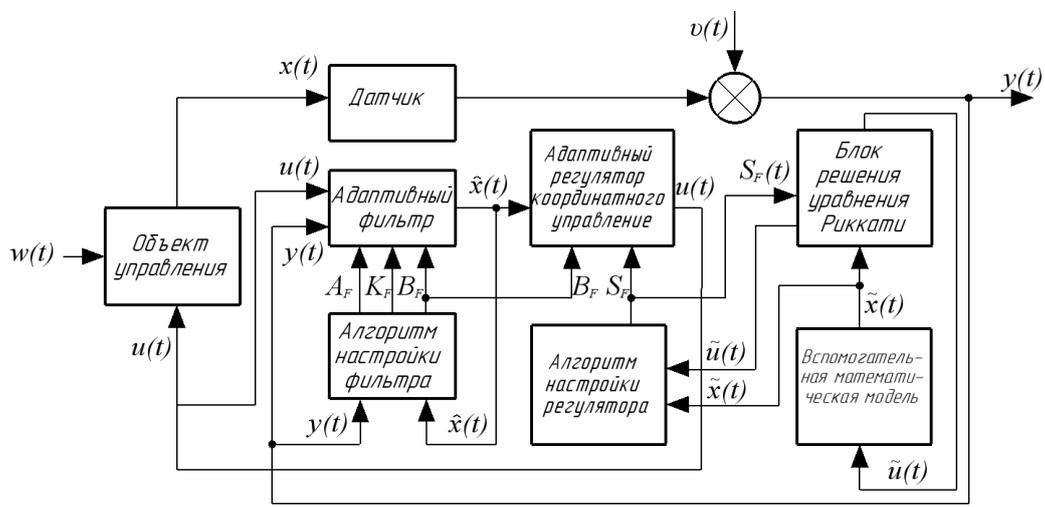


Рис. 1. Структурная схема системы стабилизации объекта (18) с адаптивным координатным управлением (21). МО – математический объект, Р – регулятор

Закон управления (21) является оптимальным в течение всего переходного процесса управляемой установкой прамоточного котла (18) или эквивалентной ей нелинейной моделью, а значит, вернет систему обратно в стационарное состояние «оптимально» из любого состояния, вызванного широкодиапазонными колебаниями нагрузки. Это связано с тем, что система (18) или аффинная нелинейная система (19) является точным и глобальным эквивалентом линейной системы (19), а управление u^* является оптимальным в смысле ЛКР для системы (18) или аффинно-нелинейной системы (19).

Динамическая характеристика выхода трех методов управления при нагрузке 80 % показана на рис.2. Результаты моделирования нелинейного управления сравниваются с результатами линейного ПИД-управления и управления МРС, после чего можно получить различия трех стратегий управления.

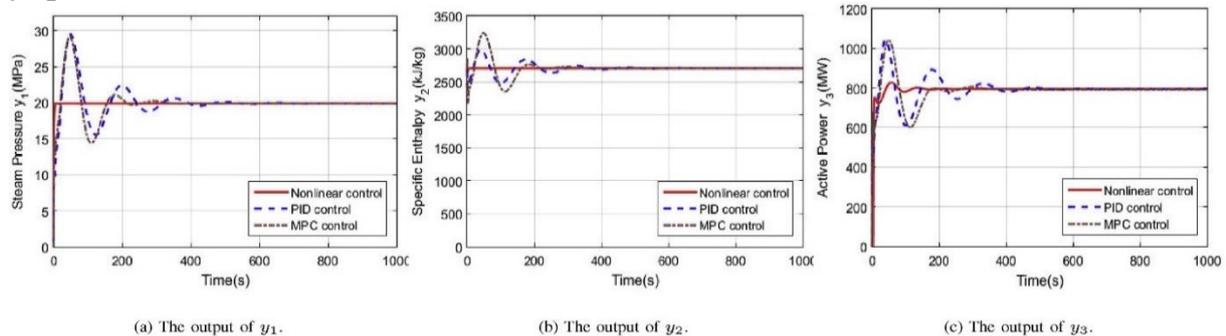


Рис. 2. Выходная симуляционная диаграмма трех методов управления при нагрузке 80%.

Анализируя динамические характеристики управляемой системы при трех стратегиях управления, можно сделать следующие выводы.

По сравнению с линейным методом ПИД-регулирования и методом управления МРС, нелинейный метод управления может обеспечить лучший эффект управления. В процессе решения нелинейного метода управления алгоритм оптимального управления нелинейными характеристиками системы был обработан более точно, поэтому нелинейный метод управления динамическими характеристиками установки прамоточного котла лучше, чем у линейного метода управления.

При той же нагрузке время настройки нелинейного метода управления

составляет около 4% времени метода управления МРС и 3,5% времени стратегии ПИД-регулирования соответственно. Это прямо показывает, что нелинейный метод управления намного лучше, чем метод ПИД-регулирования и метод управления МРС.

Таким образом, разработан закон нелинейного управления, основанный на теории аффинных нелинейных систем, для решения нелинейных задач оптимального управления с развязкой нелинейного объекта управления мощностью 300 МВт. Оптимальный закон нелинейного управления может быть получен путем преобразования координат и обратной связи по условию, а исследование может быть проведено для разумных экспериментов и анализа. Эта нелинейная стратегия управления имеет быстрое время настройки, так что выходной сигнал может достигать стабильности, и имеет меньший выброс. Это может обеспечить хороший эффект управления и хорошее направление для будущего управления нелинейной системой. И ограничения линейного управления также указывают на то, что стратегия нелинейного управления осуществима при работе с такого рода аффинной нелинейной системой, и использование этого метода шире, чем метод линейного управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основе концепций системного анализа, теории адаптивных систем управления, динамической фильтрации и методов решения некорректных задач разработаны алгоритмы идентификации и управления нестационарными технологическими объектами на основе регулярных методов.

В итоге получены следующие научные результаты:

1. Разработаны алгоритмы регулярного оценивания состояния нестационарного динамического объекта на основе метода аналитического продолжения по параметру с использованием последовательного запуска процедур метода сопряженных градиентов и метода Гаусса-Ньютона, способствующие стабилизации вычислительной процедуры обращения матрицы плана.

2. Разработаны регулярные алгоритмы параметрической идентификации линейного динамического объекта со случайными параметрами с гарантированной среднеквадратической точностью на основе последовательного варианта оценок МНК, позволяющие производить устойчивую идентификацию параметров объекта в реальном времени.

3. Разработаны алгоритмы регулярной параметрической идентификации нестационарного объекта управления на основе матричных разложений.

4. Разработаны регулярные алгоритмы адаптивной параметрической идентификации линейных нестационарных объектов с монотонными и знакопостоянными параметрами на основе проекционного алгоритма Качмажа, позволяющие облегчить контроль точности промежуточных вычислений с использованием итерационного алгоритма.

5. Разработаны алгоритмы адаптивного управления нестационарными системами в условиях неопределенности на основе моделей в форме нестационарных дифференциальных уравнений, наблюдателей и обобщенных уравнений в терминах метода пространства состояний, позволяющие синтезировать алгоритмы адаптивного управления нестационарными системами для определенного класса законов управления, например, с эталонной моделью и оптимальной линейно-квадратичной задачей.

6. Разработаны алгоритмы синтеза адаптивного субоптимального управления нестационарными объектами на основе методов устойчивого псевдообращения, способствующие повышению качественных показателей процессов управления.

7. Разработаны устойчивые алгоритмы управления нестационарными объектами на основе концепций игровых методов, позволяющие проводить оптимизацию управленческих решений в условиях неэффективности классических методов управления при высоком уровне априорной неопределенности процессов.

8. Разработанные алгоритмы регулярного синтеза были положены в основу построения адаптивной системы управления пылеугольным энергоблоком с прямым вдуванием пыли, позволяющие стабилизировать технологические режимы протекания процесса и повысить эффективность его функционирования.

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

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY
NAMED AFTER ISLAM KARIMOV**

SOTVOLDIYEV XUSNIDDIN IBRAGIMOVICH

**ALGORITHMS FOR IDENTIFICATION AND CONTROL OF NON-
STATIONARY TECHNOLOGICAL OBJECTS BASED ON REGULAR
METHODS**

05.01.08 - Automation and control of technological processes and manufactures

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

Tashkent – 2023

INTRODUCTION (abstract to PhD dissertation)

The aim of the research work is to develop methods and algorithms for identifying and controlling non-stationary technological objects based on regular methods.

The object of the study was non-stationary technological objects.

The scientific novelty of the research work:

algorithms have been developed for regular identification of the characteristics of the state of a non-stationary dynamic system based on the calculation of the plan matrix, pseudo-inverse to the output matrix;

algorithms for stable parametric identification of non-stationary systems have been developed based on expansions of the matrix operator on the right into elementary orthogonal rotation matrices and on the left into permutation matrices;

algorithms have been developed for the synthesis of adaptive suboptimal control of non-stationary objects based on the concept of pseudo-inversion, which contribute to improving the quality indicators of control processes;

stable algorithms for managing non-stationary objects have been developed based on the concepts of game methods, allowing for the optimization of management decisions in conditions of the ineffectiveness of classical management methods and a high level of a priori uncertainty of processes.

Implementation of Research Results:

The obtained scientific results and algorithms for identifying and managing non-stationary processes of object implementation in the following forms:

algorithms for regularly determining the characteristics of the state of a non-stationary dynamic implementation system at JSC “Yangi Angren TPP” (Certificate of JSC Thermal Power Plants No. 04-25/456 dated February 7, 2023). As a result, it was possible to increase the accuracy of measuring the state of a non-stationary dynamic system based on observation data;

algorithms for stable parametric identification of non-stationary inclusion systems at JSC “Yangi Angren TPP” (Certificate of JSC Thermal Power Plants No. 04-25/456 dated February 7, 2023). As a result, stable identification of object parameters was carried out in the shortest possible time;

algorithms for determining the control of non-stationary inclusion objects at JSC “Yangi Angren TPP” (Certificate of JSC Thermal Power Plants No. 04-25/456 dated February 7, 2023). As a result, management decisions are optimized in conditions of ineffectiveness of classical management methods at a high level of a priori uncertainty of processes.

Structure and volume of the dissertation: The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and appendices, the volume of the dissertation is 107 pages.

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

I бўлим (Часть I; Part I)

1. Сотволдиев Х.И. Алгоритмы устойчивого оценивания вектора параметров объекта и стабилизирующего регулятора в адаптивных системах с настраиваемыми моделями // Научно-технический журнал ФерПИ, №4, 2013 г. –С. 62-65. (05.00.00, №20)

2. Сотволдиев Х.И., Зарипов О.О., Азамхонов Б.С. Алгоритмы устойчивого оценивания вектора состояния и параметров объектов управления // Научно-технический и информационно-аналитический журнал “Вестник ТУИТ”, №3, 2013 г. –С. 84-89. (05.00.00, №31)

3. Игамбердиев Х.З., Сотволдиев Х.И., Гафуров Ю.И. Алгоритмы устойчивого оценивания параметров настроек регуляторов в адаптивных системах управления с эталонными моделями // Международный научно-технический журнал “Химическая технология. Контроль и управление”, №1, 2015 г. –С. 71-74. (05.00.00, №12)

4. Сотволдиев Х.И., Мамиров У.Ф. Алгоритмы адаптивного управления нестационарными системами в условиях неопределенности // Научно-технический журнал ФерПИ, Т.24, спец.вып. №2, 2020 г., –С. 271-274. (05.00.00, №20)

5. Sotvoldiev Kh.I. Algorithms for stable parametric identification of non-stationary systems based on orthogonal polynoms // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology Vol. 7, Issue 12 , December 2020, Page: 16177-16181. (05.00.00, №8)

6. Igamberdiev H.Z., Yusupov E.A., Sotvoldiev H.I., Azamxonov B.S. Sustainable algorithms for the synthesis of a suboptimal dynamic object management system // Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020, Prague, Czech Republic. -PP. 902-907. (3, Scopus, IF=0.585)

7. Igamberdiyev H.Z., Sotvoldiev H.I., Mamirov U.F. Regular algorithms for adaptive identification of linear non-stationary systems // International scientific and technical journal “Chemical technology. control and management”, 2021, №6 (102) -PP: 49-54. (05.00.00, №12)

8. Сотволдиев Х.И. Синтез адаптивного субоптимального управления нестационарными объектами // Узбекский журнал “Проблемы информатики и энергетики”, №1, 2022 г., –С. 10-16. (05.00.00, №5)

9. Сотволдиев Х.И. Регулярный алгоритм параметрической идентификации линейного динамического объекта со случайными параметрами // Научно-технический журнал “Технические науки и инновации”, №4(14), 2022 г., –С. 125-129. (05.00.00, №16)

10. Igamberdiyev H.Z., Sotvoldiev H.I., Mamirov U.F. Stable control algorithms for non-stationary objects based on game methods // ICMSIT-III-2022 Journal of Physics: Conference Series 2373 (2022), Page: 16177-16181. (3, Scopus, IF=0,21 , 41, SCImago, IF 0.108)

11. Сотволдиев Х.И. Устойчивые алгоритмы идентификации характеристик состояния нестационарной динамической системы по данным

II бўлим (Часть II; Part II)

12. Igamberdiyev H.Z., Yusupov E.A., Sotvoldiev H.I. Algorithms for Identifying the Controllable Objects Based On Dynamic Estimation / Seventh world conference on intelligent systems for industrial automation, WCIS – 2012, 2012 y. -PP: 139-141.

13. Сотволдиев Х.И. Алгоритмы идентификации нестационарных объектов управления на основе методов динамической фильтрации калмановского типа / Международной научно-технической конференции на тему: “Современные материалы, техника и технологии в машиностроении”, Андижан 19-20 апреля 2014 г. –С. 400-402.

14. Azamhonov B.S., Sotvoldiev H.I., Yusupov E.A. Identification algorithm and diagnosis in problems suboptimal control of transient objects / Seventh world conference on intelligent systems for industrial automation, WCIS – 2014, 2014 г. Page: 274-276.

15. Сотволдиев Х.И., Гафуров Ю.И. Алгоритмы оценивания параметров настроек регуляторов в адаптивных системах управления на основе эталонных моделей / Республиканская научно-техническая конференция “Современные проблемы использования информационно-коммуникационных технологий в интеграции науки, образования и производства”, Часть 3, Нукус 2015 г. –С. 285-287.

16. Сотволдиев Х.И. Алгоритмы идентификации нестационарных объектов с использованием модели дрейфа параметров объекта / III Международной научно-практической конференции: “Современные материалы, техника и технологии в машиностроении”. 19-21 апреля, Андижан-2016 г. –С. 589-591.

17. Сотволдиев Х.И., Юсупов Ё.А., Азамхонов Б.С. Устойчивые алгоритмы адаптивной идентификации и функционального диагностирования систем управления динамическими объектами / WORLD SOCIAL SCIENCE Scientific – practical journal Scientific-practical journal of “Science of world” «World social science» №6(6), Наманган- 2018. –С. 129-130.

18. Игамбердиев Х.З., Сотволдиев Х.И. Устойчивый алгоритм идентификации линейной динамической системы со случайными параметрами / Республиканская научно-техническая конференция “Роль и задачи производства систем автоматизации технологических процессов в разработке”, ФерПИИ. 2021 г.–С. 219-222.

19. Игамбердиев Х.З., Сотволдиев Х.И. Синтез алгоритмов адаптивного управления нестационарными объектами в условиях неопределенности / Республиканская научно-техническая конференция «Использование современных информационных и коммуникационных технологий в реализации реформ в новом Узбекистане», АндМИ, Андижан. 2021 г. –С. 357-359.

20. Сотволдиев Х.И., Азамхонов Б.С., Юсупов Ё.А. Программное обеспечение для решения задачи адаптивной стабилизации нестационарного

объекта регулирования / Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, № DGU 03809, 21.06.2016.

21. Сотволдиев Х.И., Азамхонов Б.С., Юсупов Ё.А. Программный продукт для оптимальной линейной фильтрации / Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, № DGU 03810, 21.06.2016.

22. Игамбердиев Х.З., Сотволдиев Х.И. Программный продукт для оптимальной линейной фильтрации / Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, № DGU 04742, 21.09.2017.

23. Игамбердиев Х.З., Сотволдиев Х.И. Программное обеспечение для разработанного алгоритма синтеза адаптивного субоптимального управления нестационарными объектами на основе концепции псевдообращения / Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, № DGU 21818, 01.02.2023.

24. Игамбердиев Х.З., Сотволдиев Х.И., Мамиров У.Ф. Программное обеспечение для разработанного устойчивого алгоритма управления нестационарными объектами на основе концепций игровых методов / Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, № DGU 21820, 01.02.2023.

Avtoreferat «Texnika fanlari va innovatsiya» ilmiy jurnali tahririyatida tahrirdan o'tkazilib, o'zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlar o'zaro muvofiqlashtirildi.

Bosmaxona litsenziyasi:



9338

Bichimi: 84x60 ¹/₁₆. «Times New Roman» garniturası.
Raqamli bosma usulda bosildi.
Shartli bosma tabog‘i: 2,75. Adadi 100 dona. Buyurtma № 53/23.

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