

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

TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

AXMEDOV DOMIR AZIMBOYEVICH

**NOANIQLIK SHAROITIDA NOCHIZIQLI DINAMIK OBYEKTЛАRNI
ADAPTIV BAHOLASH VA BOSHQARISH ALGORITMLARI**

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

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

Toshkent – 2023

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi

Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)

Content of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)

Axmedov Domir Azimboyevich

Noaniqlik sharoitida nochiziqli dinamik obyektlarni adaptiv baholash
va boshqarish algoritmlari 3

Ахмедов Домир Азимбоевич

Алгоритмы адаптивного оценивания и управления нелинейными
динамическими объектами в условиях неопределенности 21

Akhmedov Domir Azimboyevich

Algorithms for adaptive estimation and control of nonlinear dynamic objects
in conditions of uncertainty 39

E‘lon qilingan ishlar ro‘uxati

Список опубликованных работ
List of published works 42

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

TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

AXMEDOV DOMIR AZIMBOYEVICH

**NOANIQLIK SHAROITIDA NOCHIZIQLI DINAMIK OBYEKT LARNI
ADAPTIV BAHOLASH VA BOSHQARISH ALGORITMLARI**

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

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

Toshkent – 2023

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2017.3.PhD/T455 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.tdtu.uz) hamda «ZiyoNet» Axborot ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar: **Zaripov Oripjon Olimovich**
texnika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar: **Ismailov Mirxalil Agzamovich**
texnika fanlari doktori, professor

Avazov Yusuf Shodiyevich
texnika fanlari doktori (DSc), dotsent

Yetakchi tashkilot: **Samarqand davlat universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Toshkent davlat texnika universiteti huzuridagi DSc.03/30.12.2019.T.03.02 raqamli Ilmiy kengashning 2023 yil «19» 09 soat 10⁰⁰ 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: tstu_info@tdtu.uz).

Dissertatsiya bilan Toshkent davlat texnika universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (334 raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100095, Toshkent shahri, Universitet ko'chasi, 2. Tel.: (99871) 207-14-70).

Dissertatsiya avtoreferati 2023 yil «25» 08 kuni tarqatildi.
(2023 yil «02» 08 dagi 15 raqamli reestr bayonnomasi).




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


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


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

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda soʻnggi vaqtlarda texnologik jarayonlar va ishlab chiqarishlarni avtomatlashtirish sohasida dinamik obyektlarni boshqarish va holatlarini baholash usullari va algoritmlarini ishlab chiqishga alohida eʼtibor qaratilmoqda. Bu sohada holatlarni adaptiv baholashning muntazam algoritmlarini ishlab chiqish va noxiziqli rostlagichlarni sintezlash muhim masalalardan biri hisoblanadi. Bu, boshqarish jarayonlarining sifatiga boʻlgan yuqori talablarning dinamik obyektlardagi noxiziqli hodisalarni hisobga olishga majbur qilishi bilan belgilanadi. Shuning uchun ham noaniqlik sharoitlarida ishlovchi murakkab texnologik obyektlarni boshqarish va ularning holatlarini adaptiv baholashning samarali noxiziqli algoritmlarini ishlab chiqishning nihoyatda zarurligi yuzaga keladi.

Jahonda noxiziqli modellarni oʻrganish, tahlil qilish va sintezlash asosida boshqarish sistemalarining zamonaviy rostlagichlari va boshqa elementlarini yaratish boʻyicha ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Noxiziqli obyektlarning boshqarish sistemalarini noxiziqli rostlagichlarini sintezlash masalasi chiziqchilari bilan solishtirib boʻlmaydigan darajada murakkab. Shu sababdan, holatlarni adaptiv baholash va noxiziqli rostlagichlarni hamda ular asosida harakatning asimptotik turgʻunligini tortish sohasidagi umumiy yoki katta bahosi bilan taʼminlovchi boshqarish qonunlarini sintezlashning usul va algoritmlarini takomillashtirish va modifikatsiyalash dolzarb masalalardan hisoblanadi.

Respublikada hozirgi kunda avtomatlashtirish va boshqarish yoʻnalishiga, jumladan turli texnologik jarayonlar va ishlab chiqarishlarni avtomatlashtirish va boshqarishda energiya va resurs tejamkorlikni taʼminlovchi takomillashtirilgan boshqarish sistemalarini yaratishga alohida eʼtibor qaratilmoqda. 2022-2026 yillarga moʻljallangan yangi Oʻzbekistonning Taraqqiyot strategiyasida, jumladan «... zamonaviy energiya tejamkor texnologiyalar, jihozlar va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini joriy etish, ... sanoat sohasidagi yoʻqotishlarni kamaytirish va resurslardan foydalanish samaradorligini oshirish, qayta tiklanuvchi energiya qurilmalarini ishlab chiqish va energiya samaradorlikni oshirish boʻyicha loyihalarni moliyalashtirish»¹ vazifalari belgilab berilgan. Mazkur vazifalarni bajarishda, jumladan, boshqarish jarayonlarining sifat koʻrsatkichlarini va aniqligini oshirish imkonini beradigan noxiziqli rostlagichlarni sintezlash va holatlarni adaptiv baholashning samarali algoritmlarini yaratish nihoyatda dolzarb hisoblanadi.

Oʻzbekiston Respublikasi Prezidentining 2017 yil 7 fevraldagi PQ-4947-son «Oʻzbekiston Respublikasini yanada rivojlantirishning Harakatlar strategiyasi toʻgʻrisida»gi Qarori va 2019 yil 3 apreldagi PF-4265-son «Kimyo sanoatini yanada isloh qilish va uning investitsiyaviy jozibadorligini oshirish chora-tadbirlari toʻgʻrisida»gi, 2018 yil 25 oktabrdagi PF-3983-son «Oʻzbekiston Respublikasining kimyo sanoatini tezkor rivojlantirish chora-tadbirlari toʻgʻrisida»gi, 2018 yil 27

¹ Ўзбекистон республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон «2022-2026 йилларга мўлжалланган янги Ўзбекистоннинг Тараққиёт стратегияси тўғрисида»ги Фармони

apreldagi PQ-3682-son «Innovatsion g‘oyalar, texnologiyalar va loyihalarni amaliy joriy qilish tizimini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida»gi Farmonlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishi-ning ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining III. «Axborotlashtirish va axborot-kommunikatsiya texnologiyalarini rivojlantirish» ustuvor yo‘nalishi doirasida bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Nochiziqli obyektlarning holatlarini adaptiv baholash va nochiziqli rostlagichlarni sintezlash usullari va algoritmlarini ishlab chiqish bo‘yicha tadqiqotlarga tegishli, so‘nggi yillardagi ilmiy-texnik adabiyotlar tahlili mazkur sohada ahamiyatli darajadagi nazariy va amaliy natijalarga erishilganligidan darak beradi. Nochiziqli adaptiv boshqarish sistemalarini sintezlash muammolariga bag‘ishlangan ko‘p sonli ishlar nashr etilgan, umumnazariy konsepsiyalar ishlab chiqilgan, yechilgan amaliy masalalar soni ortib bormoqda. Nochiziqli sistemalarni qurishni adaptiv usullari rivojiga xorijlik olimlardan J.Zhou¹, K.S.Narendra², V.F.Sokolov³, V.O.Nikiforov⁴, S.B.Pelsverger⁵, D.Aeyels⁶, B.Widrow⁷ kabilar, mamlakatimizdan B.M.Azimov, T.F.Bekmuratov, Sh.M.Gulyamov, O.O.Zaripov, X.Z.Igamberdiev⁸, M.A.Ismailov, A.A.Kadirov, A.R.Maraximov, I.X.Siddikov⁹, Sh.X.Fozilov, N.R.Yusupbekov¹⁰ va boshqalar o‘zlarining ulkan hissalarini qo‘shishgan.

Biroq ilmiy tadqiqot doirasining muntazam murakkablashuvi va kengayishi nochiziqli rostlagichlarni sintezlash hamda avtomatik boshqarishning nochiziqli sistemalarini tahlil qilishning yangi samarali usullari va algoritmlarini ishlab chiqishni talab etadi. Shuningdek, kvazichiziqli yondashuv va nochiziqli kvazimodal rostlagich asosida nochiziqli rostlagichlarni sintezlashning muntazamlashgan algoritmlari ham o‘zining rivojini talab etmoqda. Bundan tashqari, o‘zgaruvchan holatlarning nochiziqli kuzatuvchilarini sintezlash, nochiziqli obyektlarning o‘lchanadigan o‘zgaruvchilaridan vaqt bo‘yicha olinadigan

¹ Zhou J., Wen C. Adaptive Backstepping Control of Uncertain Systems. Nonsmooth Nonlinearities, Interactions or Time-Variations. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. - 241 pp.

² Narendra K.S., Monopoli R.V. Application of adaptive control. New York: Academic press, 1980.

³ Sokolov V.F. Adaptive l_1 robust control for SISO system // Syst. Control Lett. 2001. V. 42(5). –p. 379-393.

⁴ Никифоров В.О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. - СПб.: Наука, 2003. - 281 с.

⁵ Пельцвергер С.Б. Алгоритмическое обеспечение процессов оценивания в динамических системах в условиях неопределенности. -М.: Наука, 2004. - 116с.

⁶ Aeyels D., Lamnabhi-Lagarrigue F., Van der Schaft A. (Eds.) Stability and Stabilization of Nonlinear Systems. London: Springer, 2003. - 387 pp.

⁷ Widrow B., Walach E. Adaptive Inverse Control. A Signal Processing Approach. - IEEE Press, 2008. – 521 p.

⁸ Игamberдиев Х.З., Севинов Ж.У., Зарипов О.О. Регулярные методы и алгоритмы синтеза адаптивных систем управления с настраиваемыми моделями. - Т.: ТашГТУ, 2014.

⁹ Siddikov, I.X., Izmaylova, R.N., Siddikov, A.I. Structural-Parametric Adaptation of Fuzzy-Logical Control System // AIP Conference Proceedings, 2022.

¹⁰ Юсупбеков Н.Р., Нурмухамедов Х.С., Зокиров С.Г. Кимёвий технология асосий жараён ва қурилмалари. –Т.: «Фан ва технология», 2015. - 848 б.

hosilalarini baholash, shuningdek boshqarishning nohiziqli obyektlari holatlarini turg'un ko'p qadamli baholashning turg'un algoritmlarini ishlab chiqishni amalga oshirish maqsadga muvofiqdir. Yuqorida qayd etilganlardan, noaniqlik sharoitida nohiziqli obyektlarni adaptiv boshqarishning samarali algoritmlarini yanada modifikatsiyalashni nihoyatda zarur ekanligi kelib chiqadi.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Toshkent davlat texnika universiteti ilmiy-tadqiqot ishlari rejalarning OT-F4-78 – «Identifikatsion yondashuv asosida dinamik obyektlarni boshqarishning adaptiv sistemalarini sintezlashni nazariy asoslari va muntazam usullarini ishlab chiqish» (2017-2020) loyihalari doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi noaniqlik sharoitlarida nohiziqli dinamik obyektlarni adaptiv baholash va boshqarish algoritmlari va ularni amalga oshirishning hisoblash sxemalarini ishlab chiqish hisoblanadi.

Tadqiqotning vazifalari:

noaniqlik sharoitida nohiziqli dinamik obyektlarni adaptiv baholash va boshqarish nazariyasi va usullari rivojini tizimli tahlil qilish;

nohiziqli dinamik obyektlarning holatlarini adaptiv baholash va kvazichiziqli aks ettirishlar asosida o'zgaruvchan holatlarning nohiziqli kuzatuvchilarini sintezlash algoritmlarini ishlab chiqish;

variatsion tengsizliklar asosida boshqarish obyektlarining o'tishlar matritsasi va obyekt shovqinining kovariatsion matritsalarini turg'un adaptiv baholash algoritmlarini ishlab chiqish;

nohiziqli boshqarish sistemalarini analitik va ko'p hadli sintezlash algoritmlarini ishlab chiqish;

nohiziqli dinamik obyektlarni asimptotik boshqarish algoritmlarini ishlab chiqish va nohiziqli kvazimodal rostlagichlarni sintezlash;

nohiziqli dinamik jarayonlarni adaptiv baholash va boshqarishning ishlab chiqilgan algoritmlarini texnologik obyektlarni boshqarish masalalarida qo'llash.

Tadqiqotning objekti noaniqlik sharoitida nohiziqli dinamik obyektlarni adaptiv baholash va boshqarishning usullari va algoritmlari hisoblanadi.

Tadqiqotning predmeti noaniqlik sharoitida nohiziqli dinamik obyektlarni adaptiv baholash va boshqarishning muntazam usullari va algoritmlari hisoblanadi.

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

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

kalman turidagi kengaytirilgan dinamik filtr asosida nohiziqli dinamik boshqarish obyektlarining holatlarini turg'un adaptiv baholash algoritmlari ishlab chiqilgan;

iterativ muntazamlashtirish tamoyili doirasidagi variatsion tengsizliklar asosida boshqarish obyektining o'tishlar matritsalarini turg'un adaptiv baholash algoritmlari ishlab chiqilgan;

tenglamalarini kvazichiziqli aks ettirish asosida nochiziqli boshqarish sistemalarini turg'un ko'p hadli sintezlash algoritmlari taklif etilgan;

lokal optimallashtirish asosida nochiziqli dinamik obyektlarni asimptotik boshqarishning turg'un algoritmlari taklif etilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

me'yoriy ishlash sharoitidagi sanoat tajribasi natijalari asosida unni saqlash jarayonining matematik modellari ishlab chiqilgan;

unni saqlash texnologik jarayonini avtomatlashtirish va adaptiv boshqarishning strukturaviy va funksional sxemalari ishlab chiqilgan;

jarayon borishining texnologik rejimlarini barqarorlash va uning samaradorligini oshirish imkonini beradigan mos texnik ta'minot bilan unni saqlash texnologik jarayonini boshqarish sistemasi taklif etilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi. Tadqiqotning olingan natijalarini ishonchliligi uslubiy asoslangan nazariy yechimlarning bajarilishi; holatlarni adaptiv baholashning nazariy asoslangan konsepsiyalarini qo'llash; avtomatik boshqarishning zamonaviy nazariyasini aprobatsiyadan o'tgan usullari va algoritmlaridan foydalanish; adaptiv boshqarishning taklif etilgan usullari va algoritmlari muvofiqligini talab darajasida ekanligi; nazariy va amaliy tadqiqotlar natijalari va ularning o'zaro muvofiqligi bilan ta'minlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati noaniqlik sharoitida nochiziqli dinamik obyektlarni adaptiv baholash va boshqarishning konstruktiv algoritmlarini ishlab chiqilganligidan iborat.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati noaniqlik sharoitida nochiziqli dinamik obyektlarni boshqarish qonunlari, nochiziqli rostlagichlar va nochiziqli kuzatuvchilarni sintezlash, holatlarni adaptiv baholash masalalarining matematik va algoritmik ta'minotlarini ishlab chiqilganligidan iborat. Ishlab chiqilgan algoritmlar uzluksiz xarakterli ishlab chiqarishning texnologik jarayonlarini adaptiv boshqarish sistemalarini avtomatlashtirilgan loyihalash va funksional strukturalarini qurishda keng qo'llanilishi mumkin.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Noaniqlik sharoitida nochiziqli dinamik obyektlarni adaptiv baholash va boshqarish bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

kalman turidagi kengaytirilgan dinamik filtr asosida nochiziqli dinamik boshqarish obyektlari holatlarini turg'un adaptiv baholashning ishlab chiqilgan algoritmlari «Toshkentdonmahsulot» AJda joriy etilgan («O'zdonmahsulot» AKning 2023 yil 3 maydagi №4/200-son ma'lumotnomasi). Natijada rostlagich parametrlarini hisoblash aniqligi ortgan;

tenglamalarini kvazichiziqli aks ettirish asosida nochiziqli boshqarish sistemalarini turg'un ko'p hadli sintezlashning taklif etilgan algoritmlari «Toshkentdonmahsulot» AJda joriy etilgan («O'zdonmahsulot» AKning 2023 yil 3 maydagi №4/200-son ma'lumotnomasi). Algoritmlar unni saqlash jarayoni borishining texnologik rejimlarini barqarorlash imkonini bergan;

lokal optimallashtirish asosida nochiziqli dinamik obyektlarni asimptotik boshqarishning taklif etilgan turg'un algoritmlari «Toshkentdonmahsulot» AJda joriy etilgan («O'zdonmahsulot» AKning 2023 yil 3 maydagi №4/200-son ma'lumotnomasi). Natijada obyekt va g'alayon parametrlarini aniqlash aniqligi ortgan.

Tadqiqot natijalarining aprobsiyasi. Mazkur tadqiqot natijalari 6 ta xalqaro va 4 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha 20 ta ilmiy ish, jumladan, O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi e'tirof etgan ilmiy jurnallarda 7 ta maqola, shundan 3 tasi xorijda chop etilgan. Shuningdek, EHM uchun dasturiy vositalarni qayd qilinganligi to'g'risida 3 ta guvohnoma olingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiya hajmi 102 betni tashkil etgan.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida o'tkazilgan tadqiqotlarning dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning maqsad va vazifalari, obyekt va predmeti tavsiflangan, tadqiqotning O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy qilish, ish natijalarini aprobsiyasi ro'yxatlari keltirilgan, nashr etilgan ishlar va dissertatsiya tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

«Noaniqlik sharoitida nochiziqli dinamik obyektlarni adaptiv baholash va boshqarish masalalari va algoritmlari» deb nomlangan birinchi bobda nochiziqli rostlagichlarni qurish usullari va algoritmlari keltirilgan, nochiziqli sistemalarning holatlarini baholash usullari va algoritmlari ko'rib chiqilgan, tadqiqotning maqsad va vazifalari qo'yilgan.

Hozirgi vaqtda nochiziqli avtomatik boshqarish sistemalarini tahlil qilish va sintezlashning ko'plab usullari ishlab chiqilgan, ammo ularning har biri faqatgina ma'lum bir sinfdagi obyektlar uchungina yechimni bera oladi. Boshqa tomondan, ko'p hollarda nochiziqli sistemalar uchun rostlagichlarni qurish masalasi haligacha o'z yechimini topa olgani yo'q. Ma'lum-ki, texnologik taraqqiyot zamonaviy sistemalarni yaratish uchun ajratilgan vaqtni qisqartirishga olib keladi, bu jarayonlar va boshqarish obyektlarining matematik modellarini yaratishda sezilarli qiyinchiliklarni keltirib chiqaradi. Shuning uchun ham ko'plab zamonaviy avtomatik boshqarish sistemalari aprior noaniqlik sharoitida yaratiladi. Bu, boshqarish obyektining ayrim xususiyatlari oldindan noma'lum bo'lishi yoki uning ishlashi davomida o'zgarishi mumkinligini anglatadi.

Nochiziqli obyektlarni boshqarish masalalarida, agar boshqarish obyektining holat o'zgaruvchilari ma'lum yakuniy holatga o'tishning optimal traektoriyalarining matematik tavsifi parametrlar aniqligida ma'lum bo'lib, g'alayon ta'sirlari esa additiv oq gauss shovqini hisoblansa, ishonchli ekvivalentlik tamoyili bajariladi. Biroq, ma'lum-ki, haqiqiy sistemalarda bu shartlar bajarilmaydi.

Shundan kelib chiqqan holda turli funksional vazifadagi dinamik obyektlarni boshqarish sistemalarini qurish nazariyasi va amaliyotida obyekt shovqini va o'lchashdagi xalaqitlar mavjud bo'lganda boshqariladigan obyektlarning holat vektorini baholash masalalariga nihoyatda muhim ahamiyat qaratiladi.

Yuqorida bayon etilgan xulosalar noaniqlik sharoitida nochiziqli dinamik obyektlarni adaptiv baholash va boshqarish algoritmlarini ishlab chiqish va ularni sanoat ishlab chiqarishi texnologik jarayonlarini avtomatlashtirish va boshqarish masalalarini yechishda amaliy qo'llashning zarurligini ko'rsatadi.

Dissertatsiyaning «**Nochiziqli dinamik obyektlarning holatlarini adaptiv baholashning turg'un algoritmlarini ishlab chiqish**» nomli ikkinchi bobi nochiziqli dinamik boshqarish obyektlari holatlarini adaptiv baholash algoritmlarini ishlab chiqishga bag'ishlangan. Nochiziqli dinamik sistema quyidagicha tavsiflansin:

$$\begin{cases} \dot{z} = f(z, u, p), \\ y = z_1, \end{cases} \quad (1)$$

bu yerda $u(t) \in D_u \subseteq R - R$ fazoda D_u ostfazo bilan cheklanishi mumkin bo'lgan, o'lchanadigan kirish; $y(t) \in R - R$ o'lchanadigan chiqish; $z(t) \in R^n - R^n$ holatlar vektori; $\rho(t) \in D_p \subseteq R^q - R^q$ vaqt bo'yicha o'zgaradigan noma'lum cheklangan parametrlar vektori; $f(\cdot)$ esa n -o'lchamli silliq xilma-xillikdagi silliq vektorli maydon.

$\rho(t)$ parametrlar o'zida $z(t)$ noma'lum funksiyani namoyon etishi va parametrlarning vaqt bo'yicha o'zgaradigan noma'lumlari sifatida ilgari surilishi mumkin. Ko'pincha (1) dagi $z_i(t)$ holatlar va ba'zi noma'lum $\rho_i(t)$ parametrlar sof fizik qiymatga ega bo'ladi. Bunday hollarda (1) berilgan fizik sistema (BFS) deb nomlanadi.

Vaqt bo'yicha invariant foydalanilganda nochiziqli silliq o'zgartirishni keyingi ekvivalent shaklga o'zgartirish mumkin bo'lgan (1) shaklidagi nochiziqli sistemani ko'rib chiqamiz:

$$[x^T : \theta^T]^T = T(z, p, c_2, \dots, c_n) \quad (2)$$

bunday o'zgartirishni adaptiv kuzatuvchining kanonik shakli (AKKSh), deb ataymiz:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Rx(t) + \Omega(\omega(t))\theta(t) + g(t) \\ y(t) = x_1(t). \end{cases} \quad (3)$$

(2) va (3) ifodalarda: $x(t) \in R^n - R^n$ bilan bir xil o'lchamdagi holatlar vektori; $\theta(t) \in R^m - R^m$ avtonom bo'lmagan tarzda baholanishi mumkin bo'lgan, vaqt bo'yicha

o'zgaruvchi parametrlarning noma'lumlari vektori; $\omega(t) \in R^s - u(t)$ va $y(t)$ ma'lum funksiyalar vektori, masalan, $\omega(t) = [u(t), y(t), y^2(t), \sin y(t)]$; $\Omega(\omega(t)) - n \times m$ o'lchamli matritsa bo'lib, barcha elementlari ma'lum o'zgaruvchilar uchun $\Omega_{ij}(\omega(t)) = \alpha_{ij}^T \omega(t)$ shaklga ega va nolga teng bo'lishi mumkin, vektorlari $\alpha_{ij} \in R^s$; $R - n \times m$ o'lchamli matritsaning ma'lum doimiysi. (2) sistema uchun adaptiv kuzatuvchini tavsiflash va (1) BFS da global turg'unlik kafolatlanishi uchun yetarlilik shartlarini olish lozim.

(3) bilan tavsiflanadigan sistema uchun quyidagi adaptiv kuzatuvchini ko'rib chiqamiz:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = R\hat{x}(t) + \Omega(\omega(t))\hat{\theta}(t) + g(t) + \begin{bmatrix} c_1 \tilde{y}(t) \\ \dots \\ V(t)\dot{\hat{\theta}}(t) \end{bmatrix}, & (4) \\ \hat{y}(t) = \hat{x}_1(t), \quad \tilde{y}(t) = y(t) - \hat{y}(t), & (5) \end{cases}$$

bu yerda $c_1 -$ ixtiyoriy musbat o'zgaruvchi, c_2, \dots, c_n esa shunday tanlanadi-ki, $F(c_2, \dots, c_n)$ ning xususiy qiymatlari ochiq chap yarim tekislikda yotadi; yordamchi filtr $V(t) - (n-1) \times m$ -matritsa, $\varphi(t)$ esa m -vektor.

Parametrlar adaptatsiyasi quyidagi ifoda asosida amalga oshiriladi:

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = \Gamma \varphi(t) \tilde{y}(t), \quad (6)$$

bu yerda $G - \Gamma = \text{diag}(v_1, \dots, v_n)$ kabi tanlangan ixtiyoriy musbat aniqlangan matritsa, $v_i > 0$.

Unda, mazkur sistema uchun (4)–(6) adaptiv kuzatuvchilar global turg'un hisoblanishini ko'rsatish mumkin.

Nochiziqli dinamik sistemalarning holatlarini adaptiv baholash, parametrlarini adaptiv identifikatsiyalash va adaptiv kuzatuvchisini qurishning keltirilgan algoritmlari holat vektorini baholash aniqligini va shu bilan birgalikda boshqarish jarayonlarining sifat ko'rsatkichlarini oshirish imkonini beradi.

Nochiziqli dinamik boshqarish obyektlarining holatlarini adaptiv baholash masalalarini yechishda boshqarish obyektlarining o'tish matritsalarini adaptiv baholash algoritmlarini sintezlash masalasi yuzaga keladi. Faraz qilamiz, dinamik sistemaning modeli quyidagi tenglamalar ko'rinishida tavsiflanadi:

$$x_{i+1} = Ax_i + \Gamma w_i, \quad (7)$$

$$z_i = Hx_i + v_i, \quad (8)$$

bu yerda $x_i - n$ o'lchamli sistemaning holat vektori; $z_i - m$ o'lchamli kuzatish vektori; w_i va $v_i -$ mos ravishda q va p o'lchamli obyekt shovqini va kuzatuvchi xalaqitlari vektori bo'lib, $E[w_i] = 0$, $E[w_i w_k^T] = Q \delta_{ik}$, $E[v_i] = 0$, $E[v_i v_k^T] = R \delta_{ik}$, $E[w_i v_k^T] = 0$ tavsifli gauss turidagi oq shovqinlar ketma-ketligi hisoblanadi; A , G va $N -$ mos o'lchamli matritsalar.

Ko'rib chiqilayotgan (7), (8) sistemalar siljishga vaqt bo'yicha invariant va to'la kuzatiladigan bo'lsin:

$$\text{rank}[H^T \mid (HA)^T \mid \dots \mid (HA^{n-1})^T]^T = n,$$

bu yerda « T » matritsalarini transponirlanishini anglatadi.

Matritsalar ketma-ketligi $\{\hat{A}\}_{i=1}^n \rightarrow A$ shaklda, deb faraz qilgan holda quyidagi ko‘rinishli masalani ko‘rib chiqamiz:

$$\hat{A}^T \cdot [H^T \mid (H\hat{A})^T \mid \dots \mid (H\hat{A}^{n-1})^T]^T = [C_1^T \mid C_2^T \mid \dots \mid C_n^T]^T = C^T, \quad (9)$$

bu yerda blokli matritsa S tajriba maxlumotlariga ishlov berish natijasi hisoblanadi.

Shunday qilib, \hat{A} bahoni olish uchun (9) tenglamani yechish lozim. Mazkur masala noxiziqli tenglamalar sistemasini yechishga ekvivalent bo‘lib, uni yechishda iterativ usullarni qo‘llash nazarda tutiladi.

Unda algoritm \hat{A}_n baholarni beradigan quyidagi tenglamani ketma-ket yechishdan iborat bo‘ladi:

$$L_{i,n}(A_i) \cdot A_{i+1} = C, \quad i = 0, \dots, n-1,$$

bu yerda $L_{i,n}(A_i) = [H^T (H\hat{A}_i)^T \dots (H\hat{A}_i^{n-1})^T]^T$.

\hat{a}_j vektorni aniqlashni quyidagi ko‘rinishli funksionalni minimallashtirish asosida amalga oshiramiz:

$$f(a_j) = \sum_{j=1}^{\eta} (\mathbf{L}(a_j) - c_j)^2, \quad \eta = m \cdot n,$$

ya’ni qidirilayotgan \hat{a}_j vektor baho $\hat{a}_j = \arg \inf_{a \in R^n} f(a_j)$.

Shunday qilib, quyidagi shart bajariladigan shunday a_j ni aniqlash lozim:

$$(F(a_j), a_j - d_j) \leq 0, \quad \forall d_j \in Q, \quad (10)$$

bu yerda $F(a_j)$ – ixtiyoriy monoton operator.

(10) tenglamani yechish uchun variatsion tengsizliklar bilan bog‘liq bo‘lgan aks ettirishlar uchun Tixonovning muntazamlashtirish algoritmini yuzaga keltiruvchi iterativ usul nihoyatda samarali hisoblanadi. Agar $a_{j,r}$ berilgan bo‘lsa, unda $a_{j,r+1}$ (10) turdagi “muntazamlashgan” tengsizlikni yechish orqali topiladi:

$$(F(a_{j,r}) + \varepsilon_r a_{j,r} + (F'(a_{j,r}) + \varepsilon_r)(a_j - a_{j,r}), a_j - d_j) \leq 0, \quad \varepsilon_r > 0, \quad \forall d_j \in Q.$$

$\{\varepsilon_r\}$ va boshlang‘ich yaqinlashuv $a_{j,0}$ mos ravishda tanlanganda $\{a_{j,r}\}$ ketma-ketlik $a_{j,*}$ ga, ya’ni (10) ning yechimiga juda kuchli – minimal me’yor bilan yaqinlashadi. Unda quyidagi munosabat o‘rinli bo‘ladi:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \|a_{j,r} - a_{j,*}\| = 0,$$

bu yerda $a_{j,*}$ – (10) ning minimal me’yorga ega bo‘lgan yechimi.

Boshqarish obyektlarining o‘tish matritsalarini iterativ muntazamlashtirish tamoyili doirasidagi variatsion tengsizliklarni yechish usullari asosida adaptiv baholashni keltirilgan turg‘un algoritmlari qidirilayotgan baholarning asoslanganligi va muvofiqligini ta’minlaydi.

Bu yerda shuningdek Gauss-Nyuton usulini modifikatsiyalash asosida obyekt shovqinining kovariatsion matritsalarini kvazichiziqli aks ettirish va turg‘un

baholash asosida o‘zaruvchan holatlarning nohiziqli kuzatuvchilarini sintezlash masalalari ham ko‘rib chiqilgan.

Dissertatsiyaning «**Nohiziqli dinamik obyektlarni adaptiv boshqarishning turg‘un algoritmlarini ishlab chiqish**» nomli uchinchi bobi nohiziqli boshqarish sistemalarini ko‘p hadli sintezlashning muntazam algoritmlarini ishlab chiqishga bag‘ishlangan.

Quyidagi tenglama bilan tavsiflanadigan boshqariladigan nohiziqli sistemani ko‘rib chiqamiz:

$$\dot{x} = f(x, u), \quad (11)$$

bu yerda $x \in R^n$ – sistemaning o‘lchash mumkin bo‘lgan holatlar vektori; $f(x, u) \in C_{x,u}^{n-1}$ – vektor-funksiya bo‘lib, uning uchun $x \in \Omega$ bo‘lganda quyidagi munosabatlar o‘rinli:

$$f(0,0) = 0, \quad \frac{\partial f_i(x, u)}{\partial u} = f_{iu}(x),$$

bu yerda $\Omega = \{x: \|x\| \leq M < \infty\}$ – R^n fazoning biror sohasi. Bunday sharoitlarda (11) tenglama kvachiziqli aks ettirishlarga yo‘l qo‘yadi:

$$\dot{x} = A(x)x + b(x)u, \quad (12)$$

bu yerda $b(x) = [b_1(x)..b_n(x)]^T$ va $A(x) = [a_{ij}(x)]$ – funksional n -vektor va $n \times n$ -matritsa.

(11) berk sistemani $x = 0$ muvozanat holatining asimptotik turg‘unligini, yoki xuddi shunday (12) sistemani $\Omega_0 \in \Omega \in R^n$ sohada quyida keltirilgan shartlar bajarilishini ta‘minlaydigan $u = u(x)$ boshqarishni sintezlash masalasini ko‘rib chiqamiz. Boshqarishni $u = -h^T(x)x$ ko‘rinishida qidiramiz, bunda $h(x) \in R^n$. Shuning uchun (12) ni hisobga olgan holda (11) sistemaning tenglamasi quyidagi ko‘rinishni qabul qiladi:

$$\dot{x} = H(x)x, \quad H(x) = A(x) - b(x)h^T(x).$$

Faraz qilamiz, (11) dagi $f(x, u)$ shunday ko‘rinishga ega-ki, bunda qidirilayotgan $u = u(x)$ boshqarishning $h(x)$ natijalovchi vektori vaqt bo‘yicha olinadigan hosilaga bog‘liq emas. Quyidagi ko‘rinishli ko‘p hadlarni aniqlaymiz:

$$\bar{a}(s, x, \bar{h}) = s^n + \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_i(x, \bar{h}) s^i, \quad (13)$$

$$\bar{v}_i(s, x, \bar{h}) = \sum_{j=0}^{n-1} v_{ij}(x, \bar{h}) s^j, \quad i = \overline{1, n}. \quad (14)$$

Kutilayotgan gurvsi ko‘p hadi quyidagicha bo‘lsin:

$$h^*(s) = s^n + \sum_{i=0}^{n-1} \eta_i^* s^i. \quad (15)$$

(13)–(15) ko‘p hadlar asosida quyidagi sistemani tuzamiz:

$$V\eta = \gamma, \quad (16)$$

bu yerda

$$V = \begin{bmatrix} v_{10} & v_{20} & \cdots & v_{n0} \\ v_{11} & v_{21} & \cdots & v_{n1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{1,n-1} & v_{2,n-1} & \vdots & v_{n,n-1} \end{bmatrix}; \quad \eta = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \end{bmatrix}; \quad \gamma = \begin{bmatrix} \gamma_0 \\ \gamma_1 \\ \vdots \\ \gamma_{n-1} \end{bmatrix},$$

bunda $\gamma_i = \gamma_i(x, \bar{h}) = \eta_i^* - \alpha_i(x, \bar{h})$, $i = \overline{0, n-1}$.

(16) tenglamadagi V matritsa yomon shartlangan bo'lishi mumkin va u (16) tenglamani yechishda muntazamlashtirish usulini qo'llashni talab etadi. (16) tenglamaning taqribiy yechimini qurishda turli xil iteratsion usullar katta rol o'ynaydi. Qulaylik nuqtai-nazaridan qaralsa, A.N.Tixonovning muntazamlashtirish usulini iteratsiyalangan varianti eng qulay hisoblanadi:

$$\alpha \eta_r + V^T V \eta_r = \alpha \eta_{r-1} + V^T \gamma_\delta \quad (r = 1, \dots, m). \quad (17)$$

(9) tenglamaning yechimi quyidagi formula bilan beriladi:

$$\eta_m = (I - V^T V g_{m,\alpha}(V^T V)) \eta_0 + g_{m,\alpha}(V^T V) V^T \gamma_\delta,$$

bu yerda η_0 – boshlang'ich yaqinlashish, $g_{m,\alpha}(\lambda)$ – A.N.Tixonov usulining (17) iteratsiyalangan varianti uchun funksiyalarning natijaviy sistemasi.

Yaqinlashishda parametr $r = r(\delta, h)$ ni quyidagi shartlar bajariladigan qilib, tanlash lozim:

$$\delta \rightarrow 0, \quad h \rightarrow 0 \text{ bo'lganda, } r(\delta, h) \rightarrow \infty, \quad (\delta + h)^2 r(\delta, h) \rightarrow 0.$$

Unda $\delta \rightarrow 0, \quad h \rightarrow 0$ bo'lganda, $\eta_{r(\delta, h)} \rightarrow \eta_*$ bo'ladi, bu yerda $\eta_* - V^T V \eta_* = V^T \gamma$ tenglamaning yechimi.

Nochiziqli boshqarish sistemalarini ko'p hadli sintezlashning keltirilgan algoritmlari ma'lum sharoitlarda tizimli matritsalarining xarakteristik ko'p hadlari koeffitsientlariga chiziqli algebraik tenglamalar sistemasini yechish orqali tegishli ko'rinishlarni berish imkonini yaratadi.

So'nggi vaqtlarda dinamik obyektlarni cheksiz vaqt intervalida optimal boshqarish (asimptotik boshqarish) masalalari ko'p uchramoqda, bunday masalalarda boshqarishning maqsadi sistemaning x_n ($n = 0, 1, \dots$) traektoriyasida aniqlangan funksional yoki berilgan kattalikdan oshib ketmasligi $\varepsilon > 0$ yoki minimal qiymatni qabul qilishi lozimligidan iborat bo'ladi. Dinamik obyekt quyidagi tenglama bilan tavsiflansin:

$$x_{n+1} = f(x_n) + C u_n + \eta_n, \quad (n = 0, 1, \dots), \quad (18)$$

bu yerda $x_n \in R^n$ – obyektning n vaqt momentidagi holatlar vektori; $u_n \in U \subset R^L$ – n vaqt momentidagi boshqarish ta'sirlari vektori, $L \leq N$; $\eta_n \in R^n$ – n -vaqt momentidagi o'lchanmaydigan tasodifiy g'alayonlar vektori; $f(x)$ – R^N da aniqlangan berilgan vektor-funksiya; $S - N \times L$ o'lchamli l rangli doimiy matritsa, $l \leq N$.

Agar har bir n da quyidagi shart bajarilsa, $\{u_n\}$ boshqarish ta'sirlari ketma-ketligini shakllantirish qoidasi «lokal» optimallashtirish algoritmi deyiladi:

$$u_n = \arg \min_{u \in U} \|g(x_n) + C u + \gamma \nabla Q(x_n)\|^2. \quad (19)$$

Boshqarish ta'siriga cheklanishlar bo'lmaganda ($U = R^L$) «lokal» optimallashtirishning (19) algoritmini quyidagi yaqqol ko'rinishda yozish mumkin:

$$u_n = -C^+[g(x_n) + \gamma \nabla Q(x_n)], \quad (20)$$

bu yerda $C^+ - S$ ga psevdoteskari matritsa.

(18) berk sistemaning tenglamasi (20) «lokal» optimallashtirish algoritmiga mos ravishda quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$x_{n+1} = x_n - \gamma \nabla Q(x_n) + (I - D)[g(x_n + \gamma \nabla Q(x_n))] + \eta_n, \quad (21)$$

bu yerda $D = CC^+ -$ matritsa-proektor ($\text{rang} D = l$).

Agar S matritsa buzilmagan ($l = N$) bo'lsa, unda $D = I$ va (21) berk sistemaning tenglamasi $Q(x)$ funksiyalarni xalaqitlar sharoitida minimallashtirishning radientli algoritmiga mos keladi. S matritsani o'zgartirishda (20) ifodadagi $Q = CC^T$ ni hisoblashga asoslangan usuldan foydalanish mumkin. Q matritsa $l \times l$ tartibli $l < N$ rangli simmetrik nomanfiy aniqlangan matritsa ekanligi e'tiborga olinsa, unda quyidagi o'rinli:

$$Q^+ = T^T (TT^T)^{-2} T,$$

bunda $C^+ = C^T Q^+ = C^T T^T (TT^T)^{-2} T$.

Agar Q matritsa yomon shartlangan bo'lsa, bunday hollarda (20) dagi psevdoo'zgartirish amallari turg'unligini oshirish uchun quyidagi ko'rinishli muntazam amallardan foydalanish maqsadga muvofiqdir:

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

bu yerda $\alpha > 0$ – muntazamlashtirish parametri; I – birlik matritsa.

Bu yerda muntazamlashtirish parametri α ni modeli misollar usuli asosida aniqlash maqsadga muvofiq. Agar $Q = CC^T$ matritsa buzilmagan bo'lsa, unda $Q^+ = Q^{-1}$ va (16) ifoda o'rinli bo'ladi.

Keltirilgan ifodalar nochiziqli dinamik obyektlarni barqaror asimptotik boshqarishning soddalashgan turg'un hisoblash amallarini sintezlash imkonini beradi.

Shuningdek, ushbu bobda boshqarish obyektiga xos bo'lgan xossalar va kuzatiladigan o'zgaruvchilarni hisobga olgan holda boshqarish sistemalarini sintezlash imkonini beradigan nochiziqli kvazimodal rostlagichlar va nochiziqli boshqarish sistemalarini analitik sintezlash algoritmlari ham ko'rib chiqilgan.

Dissertatsiyaning «**Ishlab chiqilgan algoritmlarni unni idishsiz saqlash texnologik jarayonini avtomatlashtirish va boshqarish masalalarida qo'llanilishi**» nomli to'rtinchi bobida ishlab chiqilgan algoritmlarni unni idishsiz saqlashning texnologik jarayonlarini avtomatlashtirish va boshqarishda qo'llash natijalari keltirilgan.

Unni idishsiz saqlash jarayonini boshqarish obyektini sifatida amalga oshirilgan ifodalanishi ko'rib chiqilayotgan jarayonni tavsiflovchi quyidagi asosiy o'zgaruvchilarni ajratish imkonini berdi: boshqariluvchi parametrlar: $U = (u_1, u_2, u_3)$,

bu yerda u_1 – isitish tizimidan olinadigan issiqlik sarfi; u_2 – namlash tizimidan olinadigan bug‘ sarfi; u_3 – binoni shamollatish uchun toza havo sarfi; chiqish parametrlari: $Y = (y_1, y_2, y_3)$, bu yerda y_1 – bino ichidagi havo harorati; y_2 – texnologik binodagi havoning namligi; y_3 – texnologik bino havosidagi karbonat angidrid gazi (SO_2) ni konsentratsiyasi; g‘alayon ta’sirlari: $W = (w_1, w_2, w_3)$, bu yerda w_1 – atmosfera havosining harorati; w_2 – atmosfera havosining namligi; w_3 – atmosfera havosining kimyoviy tarkibi.

Noma’lum parametrli dinamik sistemalarni boshqarish masalalarida parametrlarni bilmaslik ortidan kelib chiquvchi noaniqlik o‘rinli bo‘lgan yondashuv keng tarqaldi, bunday noaniqliklar kirish va chiqish signallarini o‘lchash natijalariga ko‘ra obyektning modelini aniqlovchi va real vaqt masshtabida ishlovchi adaptiv identifikator yordamida yumshatiladi. Bunday sistemalarda boshqarishning dual samarasini yo‘qligi berk konturda identifikator ishining sifatini pastligi hisoblanadi.

Faraz qilamiz, ko‘rib chiqilayotgan sistema yetarlicha umumiy ko‘rinishdagi quyidagi nochiqli tenglama bilan tavsiflanishi mumkin:

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= A\varphi(x_n) + Cu_n + \xi_n = Bz_n + \xi_n, \\ x_0 &= 0, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (22)$$

bu yerda $x_n \in R^N$ – obyektning n vaqt momentidagi holatlar vektori; $u_n \in U \subset R^L$ – mumkin bo‘lgan U boshqarishlar to‘plamidagi boshqarish ta’sirlari vektori ($L \leq N$); bunda $\xi_n \in R^N$ – mustaqil tasodifiy g‘alayon (xalaqit)lar vektori bo‘lib, $M\{\xi_n | F_n\} = 0$, $M\{\|\xi_n\|^2 | F_n\} = \sigma_\xi^2 < \infty$, $M\{\xi_n \xi_n^T | F_n\} = P_\xi > 0$; F_n – $\{x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_n\}$ jarayon bilan muvofiqlashgan σ -algebra; $\varphi(x) \in R^k - R^N$ da berilgan qektor-funksiya; $B = (A:C) - (N \times (K + L))$ – tarkibiy matritsa; $R^N - \tilde{z}_n^T = (\varphi^T(x_n):u_n^T)$ kirishlarning umumlashgan vektori. Obyekt parametrlarining matritsalarini A va C noma’lum, deb faraz qilinadi, (22) obyektga nisbatan ham shunday taxmin qabul qilinadi.

Boshqarish maqsadi quyidagi ko‘rinishli bir qadamli mezon bilan beriladi:

$$J_{n+1} = M\{\|x_{n+1}\|_Q^2 + \|u_n\|_R^2 | F_n\}, \quad (23)$$

bu yerda Q va R – musbat aniqlangan simmetrik vazn matritsalarini.

Qabul qilingan yondashuv «ajratish» tamoyilidagi lokal optimallashtirish uslubiyatiga asoslangan bo‘lib, (22) obyektga muvofiq sozlanuvchi model tuziladi:

$$\hat{x}_{n+1} = A_n \varphi(x_n) + C_n u_n = B_n \tilde{z}_n, \quad (24)$$

modelning parametrlari rekurrent eng kichik kvadratlar usuli yordamida aniqlanadi:

$$\begin{aligned} B_{n+1} &= B_n + (x_{n+1} - B_n z_n) z_n^T \Gamma_n, \quad B_0 = B_a, \\ \Gamma_n &= \Gamma_{n-1} - \frac{\Gamma_{n-1} z_n z_n^T \Gamma_{n-1}}{1 + z_n^T \Gamma_{n-1} z_n}, \quad \Gamma_0 = \rho^{-1} I, \quad \rho > 0, \end{aligned} \quad (25)$$

(23) boshqarish maqsadi esa quyidagi mezon bilan almashtiriladi:

$$J_{n+1} = M\{\|\hat{x}_{n+1}\|_Q^2 + \|u_n\|_R^2 \mid F_n\},$$

bu yerda $B_n = (A_n : C_n)$ – parametrlar baholarining (25) algoritm yordamida har bir iteratsiyada qayta tuziladigan tarkibiy matritsasi; $B_a - B$ matritsaning aprior bahosi; $z_n^T = (\varphi^T(x_n) : (u_n + v_n)^T)$ – g‘alayonlangan kirishlarning umumlashgan vektori; $v_n \in R^L$ – identifikatsiyalash jarayoni sifatini oshirish maqsadida boshqarish kanaliga sun‘iy kiritilgan mustaqil tasodifiy g‘alayonlar (zondlangan signallar) vektori bo‘lib, bunda $M\{v_n\} = 0$, $M\{\|v_n\|^2\} = \sigma_v^2 < \infty$, $M\{v_n v_n^T\} = P_v > 0$, $M\{v_n \xi_n^T\} = 0$.

Bunday yondashuv quyidagi ko‘rinishli rostlagichdan foydalaniladigan boshqarish qonuniga olib keladi, bunda obyektning A va S haqiqiy parametrlari A_n va C_n baholarga almashtiriladi:

$$\hat{u}_n^* = -(C_n^T Q C_n + R)^{-1} C_n^T Q A_n \varphi(x_n) = -\alpha_n^{-1} \gamma_n \varphi(x_n).$$

Bu yerda $\alpha_n = (C_n^T Q C_n + R)$, $\gamma_n = C_n^T Q A_n$.

Parametrlar xatoliklari kovariatsiyalarini o‘zgartirilgan matritsasini ko‘rib chiqamiz:

$$P_n = M\{(B - B_n)^T Q (B_a - B_n) \mid F_n\} = M\{\theta_n^T Q \theta_n \mid F_n\} = \begin{pmatrix} P_n^A & \tilde{P}_n^T \\ \tilde{P}_n & P_n^C \end{pmatrix}.$$

Unda boshqarish uchun ifoda quyidagi ko‘rinishda yozilishi mumkinligini ko‘rsatish mumkin:

$$\tilde{u}_n = -(C_n^T Q C_n + P_n^C + R)^{-1} (C_n^T Q A_n + \tilde{P}_n) \varphi(x_n) = -\beta_n^{-1} \delta_n \varphi(x_n). \quad (26)$$

bu yerda $\beta_n = (C_n^T Q C_n + P_n^C + R)$, $\delta_n = C_n^T Q A_n + \tilde{P}_n$, $H_n - u_n$ ga bog‘liq bo‘lmagan hadlar.

(26) algoritmni amalga oshirishda P_n kovariatsion matritsani bilishning zarurligi identifikatsiyalash konturida (25) amalni qo‘llashga imkon bermaydi. Shuning uchun ham maxsus turdagi algoritmni sintezlash masalasi yuzaga keladi, buning uchun parametrlarni sozlashning rekurrent gradientli amalini kiritamiz:

$$B_{n+1} = B_n + (x_{n+1} - B_n z_n) z_n^T D_n \quad (27)$$

yoki xatolikka nisbiy yozamiz:

$$\theta_{n+1} = \theta_n - (\theta_n z_n + \xi_n) z_n^T D_n,$$

bu yerda D_n – algoritmning aniqlanishi kerak bo‘lgan matritsali kuchaytirish koeffitsienti.

Unda (27) algoritmning kuchaytirish koeffitsienti uchun ifodani quyidagi ko‘rinishida olish mumkin:

$$D_n = \frac{P_n}{z_n^T P_n z_n + SpQP_\xi},$$

bu yerda S_p – matritsa izlari belgisi.

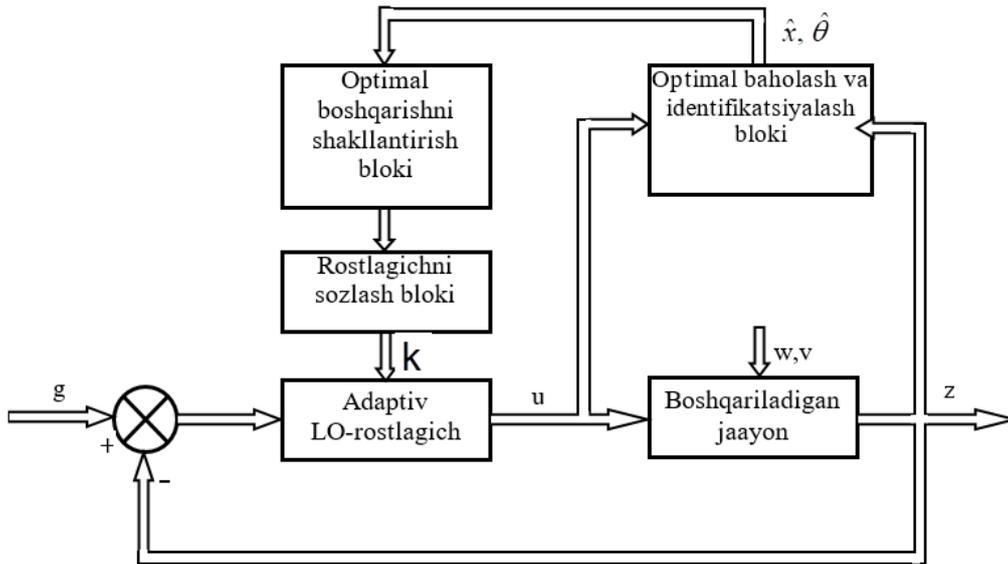
Keltirilganlardan Kalman-Meyn algoritmining modifikatsiyasi hisoblanuvchi identifikatsiyalash algoritmini yozish mumkin:

$$B_{n+1} = B_n + \frac{(x_{n+1} + B_n z_n) z_n^T P_n}{z_n^T P_n z_n + SpQP_\xi}, \quad B_0 = B_a, \quad (28)$$

$$P_{n+1} = P_n - \frac{P_n z_n z_n^T P_n}{z_n^T P_n z_n + SpQP_\xi}, \quad P_0 = (\rho SpQP_\xi)^{-1} I, \quad \rho > 0. \quad (29)$$

Dissertatsiyada ishlab chiqilgan adaptiv baholash va identifikatsiyalashning muntazam algoritmlari asosida unni saqlash jarayonining adaptiv boshqarish sistemasini umumiy strukturasi taklif etish mumkin (1-rasm).

Matematik modelni olish va amalda foydalanish uchun «Toshkentdonmahsulotlari» AJda unni saqlash texnologik jarayonini me'yoriy ishlash ashroitida turli xomashyolar uchun sanoat tajribasi o'tkazildi. Saqlash jarayonining dinamik tavsiflarini dastlabki tahlili asosida kuzatiladigan tasodifiy jarayonlarni qayd etish T va diskretlash Δt vaqti, mos ravishda, 3 soat va 2 minut etib, tanlandi. Hamasi bo'lib, 90 ta o'lchashlar amalga oshirildi.



1-rasm. Unni saqlash jarayonini boshqarishning lokal-optimal adaptiv sistemasini strukturasi:

g – topshiriq ta'siri; w, v – g'alayon ta'sirlari; u – boshqarish ta'siri; D_n – obyekt parametrlarining baholari; \hat{x} – obyektning joriy holatini bahosi; k – rostlagichning sozlanadigan parametrlari; z – obyektning chiqish signali.

(24) tenglamadagi A_n va C_n matritsalarining qidirilayotgan qiymatlari (27)–(29) algoritmlar asosida hisoblandi.

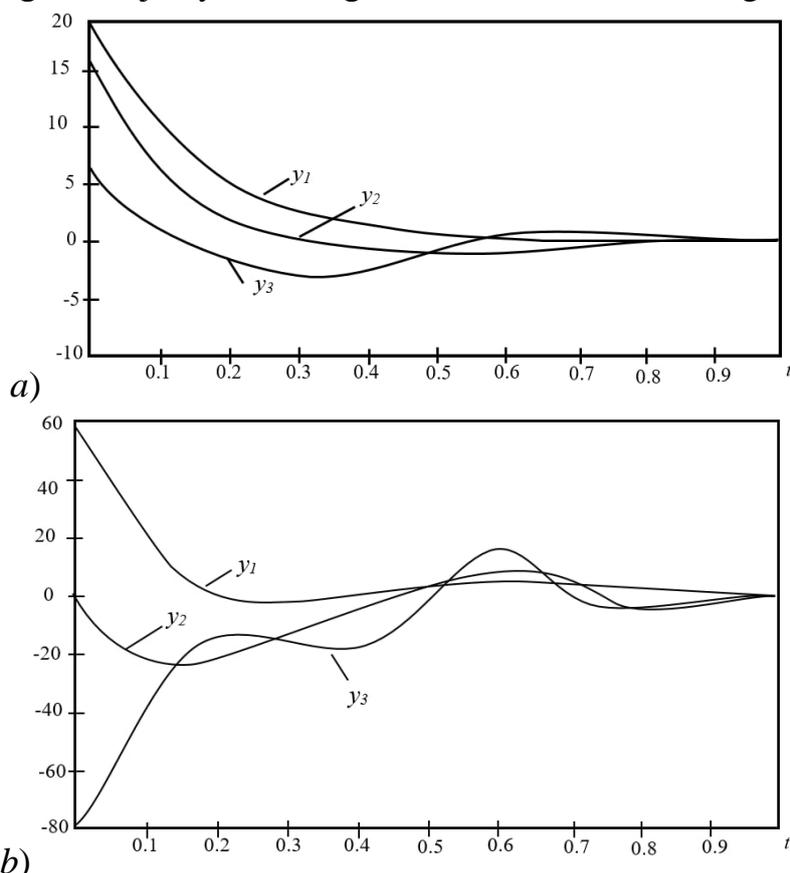
Shunday qilib, A_n va C_n matritsalarining qiymatlari quyidagicha bo'ldi:

$$A = \begin{bmatrix} 0.328 & 0.573 \\ 0.967 & -0.056 \\ 0.081 & 0.522 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0.167 & 0.078 \\ 0.811 & 0.427 \\ 0.308 & 0.591 \end{bmatrix}.$$

Ishlab chiqilgan modellarning monandligi qoldiqlarning xossalarini tahlil qilishga asoslangan mezon asosida o'rnatilgan.

Shunday qilib, unni saqlash jarayonining ishlab chiqilgan modellari asosiy kirish va chiqish o'zgaruvchilari o'rtasidagi miqdoriy nisbatlarni aniqlash, mavjud va tanlanadigan boshqarishda jarayon holatini bashoratlash hamda ko'rib chiqilayotgan jarayon uchun adaptiv boshqarish qonunlarini sintezlash imkonini beradi.

Sistemaning o'tish jarayonlarini grafiklari 2-rasmda keltirilgan.



2-rasm. Sistemaning holati (a) va boshqarish (b) ni o'zgarish grafiklari

Shunday qilib, unni idishsiz saqlash jarayonini boshqarishning ishlab chiqilgan sistemasi rostlashning yuqori sifatini ta'minlaydi va ko'rib chiqilayotgan jarayon uchun yetarli aniqlikka ega.

XULOSA

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

Natijada quyidagi ilmiy natijalar olingan:

1. Kalmanning kengaytirilgan filtri asosida nochiziqli dinamik boshqarish obyektlarining holatlarini turg'un adaptiv baholash algoritmlari ishlab chiqilgan. Adaptiv baholashning taklif etilgan algoritmlari holatlar vektorini baholash aniqligini va shu bilan birgalikda boshqarish jarayonlarining sifat ko'rsatkichlarini oshirish imkonini beradi.
2. Kvachiziqli aks ettirish asosida o'zgaruvchan holatlarning nochiziqli soddalashtirilgan kuzatuvchilarini sintezlash algoritmlari ishlab chiqilgan. Olingan algoritmlar obyektning differensiallanuvchi nochiziqlilikka ega modeli o'lchanmaydigan o'zgaruvchilar chiziqli kiradigan osttizimlardan tarkib topgan hollarda kuzatish amalini bajarish imkonini beradi.
3. Iteratsion algoritmlar asosida obyekt shovqinining kovariatsion matritsalarini turg'un baholash algoritmlari ishlab chiqilgan. Keltirilgan algoritmlar obyekt shovqinining kovariatsion matritsalarini turg'un baholashni amalga oshirish va shu bilan birgalikda adaptiv baholash amalining aniqligini oshirish imkonini beradi.
4. Iterativ muntazamlashtirish tamoyili doirasidagi variatsion tengsizliklar asosida boshqarish obyektining o'tish matritsalarini turg'un adaptiv baholash algoritmlari ishlab chiqilgan. O'tish matritsalarini adaptiv bag'olashning olingan turg'un algoritmlari qidirilayotgan baholarning asoslanganligi va muvofiqligini ta'minlaydi.
5. Nochiziqli boshqarish sistemalarini analitik sintezlash algoritmlari ishlab chiqilgan. Keltirilgan algoritmlar obyektning xususiy xossalari va kuzatiladigan o'zgaruvchilarni hisobga olgan holda chiziqli tenglamalarning algebraik tizimlarini yechish asosida nochiziqli boshqarish sistemalarini sintezlash imkonini beradi.
6. Nochiziqli boshqarish sistemalari sinfi uchun ularning tenglamalarini kvazichiziqli aks ettirish asosida turg'un ko'p hadli sintezlash algoritmlari taklif etilgan. Olingan algoritmlar qidirilayotgan boshqarishni hisoblash aniqligini oshirish imkonini beradi.
7. Lokal optimallashtirish asosida nochiziqli dinamik obyektlarni asimptotik boshqarishning turg'un algoritmlari taklif etilgan. Keltirilgan algoritmlar boshqarish ta'sirlarini berilgan sifat mezoni bo'yicha shakllantirish imkonini beradi.
8. Nochiziqli kvazimodal rostlagichlarni sintezlash algoritmlari ishlab chiqilgan. Olingan algoritmlar o'tish jarayonining sifatiga qo'yilgan talablarni ta'minlash imkonini beradi.
9. Muntazam sintezlashning ishlab chiqilgan algoritmlari asosida unni saqlash jarayonini boshqarishning adaptiv sistemasi taklif etilgan. Taklif etilgan adaptiv boshqarish sistemasi jarayon borishining texnologik rejimlarini barqarorlash hamda uning ishlash samaradorligi va sifatini oshirish imkonini beradi.

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

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

АХМЕДОВ ДОМИР АЗИМБОВЕВИЧ

**АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНОГО ОЦЕНИВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ
НЕЛИНЕЙНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ
В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

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

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

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за №В2017.3.PhD/T455.

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.ziyo.net).

Научный руководитель: Зарипов Орипжон Олимович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Исмаилов Мирхалил Агзамович
доктор технических наук, профессор
Авазов Юсуф Шодиевич
доктор технических наук (DSc), доцент

Ведущая организация: Самаркандский государственный университет

Защита диссертации состоится «19» 09 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 №334) (Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: (99871) 207-14-70).

Автореферат диссертации разослан «15» 08 2023 года.
(реестр протокола рассылки № 15 от «02» 08 2023 года)



Н.Р.Юсупбеков

Председатель научного совета
по присуждению учёных степеней,
доктор технических наук (DSc), профессор, академик АН РУз

У.Ф.Мамиров

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

Х.З.Игамбердиев

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

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире в последнее время в области автоматизации технологических процессов и производств особое внимание уделяется разработке методов и алгоритмов оценивания состояния и управления динамическими объектами. В этой области разработка регулярных алгоритмов адаптивного оценивания состояния и синтеза нелинейных регуляторов является одной из важных задач. Это обусловлено тем, что высокие требования к качеству процессов управления делают обязательным учет нелинейных явлений в динамических объектах. Поэтому возникает настоятельная необходимость разработки эффективных нелинейных алгоритмов адаптивного оценивания состояния и управления сложными технологическими объектами в условиях неопределенности их функционирования.

В мире ведутся научно-исследовательские работы по созданию современных регуляторов и других элементов систем управления на основе изучения, анализа и синтеза нелинейных моделей. Проблема синтеза нелинейных регуляторов систем управления нелинейными объектами в отличие от линейных несравненно более сложная. В связи с этим важной задачей является усовершенствование и модификация методов и алгоритмов адаптивного оценивания состояния и синтеза нелинейных регуляторов и законов управления на их основе, обеспечивающих асимптотическую устойчивость движения в целом или в большом с оценкой области притяжения.

В настоящее время в Республике уделяется большое внимание направлениям автоматизации и управления, в том числе созданию систем усовершенствованного управления, обеспечивающих энерго- и ресурсосбережение при автоматизации и управлении различными технологическими процессами и производствами. В Стратегии развития нового Узбекистана, рассчитанной на 2022-2026 годы, обозначены задачи «Внедрение современных энергосберегающих технологий, оборудования и возобновляемых источников энергии ..., по снижению потерь в промышленных отраслях и повышению эффективности использования ресурсов, производство устройств возобновляемых источников энергии и финансирование проектов по повышению энергоэффективности»¹. В этом аспекте создание эффективных алгоритмов адаптивного оценивания состояния и синтеза нелинейных регуляторов, способствующих повышению точности и качественных показателей процессов управления, является весьма актуальным.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит для выполнения задач, предусмотренных Указами Президента Республики Узбекистан №УП4947 от 7 февраля 2017 года «О стратегии действий по

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

дальнейшему развитию Республики Узбекистан” и №ПП-4265 от 3 апреля 2019 года “О мерах по дальнейшему реформированию и повышению инвестиционной привлекательности химической промышленности”, постановлениями №ПП-3983 от 25 октября 2018 года “О мерах по ускоренному развитию химической промышленности республики Узбекистан” и №ПП-3682 от 27 апреля 2018 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов», а также другими нормативно-правовыми документами, принятыми в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики IV. «Информатизация и развитие информационно-коммуникационных технологий».

Степень изученности проблемы. Анализ научно-технической литературы последних лет, касающихся исследований по разработке методов и алгоритмов адаптивного оценивания состояния нелинейных объектов и синтеза нелинейных регуляторов, свидетельствует о достижении значительных теоретических и практических результатов в этой области. Опубликовано большое количество работ, посвященных проблемам синтеза нелинейных адаптивных систем управления, разработаны общетеоретические концепции, возрастает число решенных практических задач. Большой вклад в развитие адаптивных методов построения нелинейных систем внесли многие зарубежные ученые, такие как Zhou J.¹¹, Narendra K.S.¹², Sokolov V.F.¹³, Никифоров В.О.¹⁴, Пельцвергер С.Б.¹⁵, Aeyels D.¹⁶, Widrow B.¹⁷, Азимов Б.М., Бекмуратов Т.Ф., Гулямов Ш.М., Зарипов О.О., Игамбердиев Х.З.¹⁸, Исмаилов М.А., Кадыров А.А., Марахимов А.Р., Сиддиков И.Х.¹⁹, Фозилов Ш.Х., Юсупбеков Н.Р.²⁰ и др.

Однако постоянное усложнение и расширение круга научных исследований требует разработки новых эффективных методов и алгоритмов синтеза нелинейных регуляторов и анализа нелинейных систем автоматического управления. Требуют своего развития также

¹¹ Zhou J., Wen C. Adaptive Backstepping Control of Uncertain Systems. Nonsmooth Nonlinearities, Interactions or Time-Variations. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. - 241 pp.

¹² Narendra K.S., Monopoli R.V. Application of adaptive control. New York: Academic press, 1980.

¹³ Sokolov V.F. Adaptive l_1 robust control for SISO system // Syst. Control Lett. 2001. V. 42(5). –p. 379-393.

¹⁴ Никифоров В.О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. - СПб.: Наука, 2003. - 281 с.

¹⁵ Пельцвергер С.Б. Алгоритмическое обеспечение процессов оценивания в динамических системах в условиях неопределенности. -М.: Наука, 2004. - 116с.

¹⁶ Aeyels D., Lamnabhi-Lagarrigue F., Van der Schaft A. (Eds.) Stability and Stabilization of Nonlinear Systems. London: Springer, 2003. - 387 pp.

¹⁷ Widrow B., Walach E. Adaptive Inverse Control. A Signal Processing Approach. - IEEE Press, 2008. – 521 p.

¹⁸ Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У., Зарипов О.О. Регулярные методы и алгоритмы синтеза адаптивных систем управления с настраиваемыми моделями. - Т.: ТашГТУ, 2014.

¹⁹ Siddikov, I.X., Izmaylova, R.N., Siddikov, A.I. Structural-Parametric Adaptation of Fuzzy-Logical Control System // AIP Conference Proceedings, 2022.

²⁰ Юсупбеков Н.Р., Нурмухамедов Х.С., Зокиров С.Г. Кимёвий технология асосий жараён ва қурилмалари. – Т.: «Фан ва технология», 2015. - 848 б.

регуляризованные алгоритмы синтеза нелинейных регуляторов на основе квазилинейного подхода и нелинейного квазимодального регулятора. Кроме того, оказывается целесообразным осуществлять разработку устойчивых алгоритмов синтеза нелинейных наблюдателей переменных состояния, оценивания производных по времени измеряемых переменных нелинейных объектов, а также устойчивого многошагового оценивания состояния нелинейных объектов управления. В связи с вышеотмеченным возникает настоятельная необходимость дальнейшей модификации эффективных алгоритмов адаптивного управления нелинейными объектами в условиях неопределенности.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках научно-исследовательских проектов Ташкентского государственного технического университета: ЁФ-4-06 – «Разработка регулярных методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления с настраиваемыми моделями» (2012-2013); А-5-42 – «Программно-инструментальные средства интеллектуализации автоматизированного мониторинга и управления технологическими объектами в условиях априорной неопределенности» (2015-2017); ОТ-Ф4-78 – «Разработка теоретических основ и регулярных методов синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами на основе идентификационного подхода» (2017-2020).

Целью исследования является разработка алгоритмов адаптивного оценивания и управления нелинейными динамическими объектами в условиях неопределенности и вычислительных схем их практической реализации.

Задачи исследования:

системный анализ развития теории и методов адаптивного оценивания и управления нелинейными динамическими объектами в условиях неопределенности;

разработка алгоритмов адаптивного оценивания состояния нелинейных динамических объектов управления и синтеза нелинейных наблюдателей переменных состояния на основе квазилинейного представления;

разработка алгоритмов устойчивого адаптивного оценивания ковариационной матрицы шума объекта и переходной матрицы объектов управления на основе вариационных неравенств;

разработка алгоритмов аналитического и полиномиального синтеза нелинейных систем управления;

разработка алгоритмов асимптотического управления нелинейными динамическими объектами и синтеза нелинейных квазимодальных регуляторов;

применение разработанных алгоритмов адаптивного оценивания и управления нелинейными динамическими процессами в задачах управления технологическими объектами.

Объектом исследования являются методы и алгоритмы адаптивного оценивания и управления нелинейными динамическими объектами в условиях неопределенности.

Предметом исследования являются регулярные методы и алгоритмы адаптивного оценивания и управления нелинейными динамическими объектами в условиях неопределенности.

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

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработаны алгоритмы устойчивого адаптивного оценивания состояния нелинейных динамических объектов управления на основе расширенного динамического фильтра калмановского типа;

разработаны алгоритмы устойчивого адаптивного оценивания переходной матрицы объектов управления на основе вариационных неравенств в рамках принципа итеративной регуляризации;

предложены алгоритмы устойчивого полиномиального синтеза нелинейных систем управления на основе квазилинейного представления их уравнений;

предложены устойчивые алгоритмы асимптотического управления нелинейными динамическими объектами на основе локальной оптимизации.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

на основе результатов промышленного эксперимента в условиях нормального функционирования разработаны математические модели процесса хранения муки;

разработаны структурные и функциональные схемы автоматизации и адаптивного управления технологическим процессом хранения муки;

предложена система управления технологическим процессом хранения муки с соответствующим техническим обеспечением, позволяющая стабилизировать технологические режимы протекания процессов и повысить эффективность его.

Достоверность результатов исследования. Достоверность полученных результатов исследования обеспечивается выполнением методически обоснованных теоретических выкладок; применением теоретически обоснованных концепций адаптивного оценивания состояния; 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 адаптивного оценивания и управления нелинейными динамическими объектами в условиях неопределенности

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке математического и алгоритмического обеспечения задач адаптивного оценивания состояния, синтеза нелинейных регуляторов и нелинейных наблюдателей и законов управления нелинейными динамическими объектами в условиях неопределенности. Разработанные алгоритмы могут найти широкое применение при построении функциональной структуры и автоматизации проектирования адаптивных систем управления технологическими процессами с непрерывным характером производства.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных научных результатов адаптивного оценивания и управления нелинейными динамическими объектами в условиях неопределенности:

разработанные алгоритмы устойчивого адаптивного оценивания состояния нелинейных динамических объектов управления на основе расширенного динамического фильтра калмановского типа внедрены на АО «Toshkentdonmahsulot» (Справка АК «Уздонмахсулот» №4/200 от 3 мая 2023 года). В результате повышается точность вычисления параметров регуляторов;

предложенные алгоритмы устойчивого полиномиального синтеза нелинейных систем управления на основе квазилинейного представления их уравнений внедрены на АО «Toshkentdonmahsulot» (Справка АК «Уздонмахсулот» №4/200 от 3 мая 2023 года)). Алгоритмы позволяют стабилизировать технологические режимы протекания процесса хранения муки;

предложенные устойчивые алгоритмы асимптотического управления нелинейными динамическими объектами на основе локальной оптимизации внедрены на АО «Toshkentdonmahsulot» (Справка АК «Уздонмахсулот» №4/200 от 3 мая 2023 года). В результате повышается точность определения параметров объекта и возмущений.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были обсуждены на 6 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, из них 7 – в журнальных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан, в том числе 3 – в иностранных журналах. Также получены 3 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 102 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована 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 научная и практическая значимость полученных результатов, приведены перечень внедрений в практику результатов исследования, список апробаций результатов работы, сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе **«Задачи и алгоритмы адаптивного оценивания и управления нелинейными динамическими объектами в условиях неопределенности»** приводятся методы и алгоритмы построения нелинейных регуляторов, рассмотрены методы и алгоритмы оценивания состояния нелинейных систем, постановка цели и задачи исследования.

В настоящее время разработано большое число методов анализа и синтеза нелинейных систем автоматического управления, однако каждый из них дает решение лишь для объектов определенного класса. С другой стороны задача построения регуляторов для нелинейных систем во многих случаях еще не получила своего решения. Как правило, технологический прогресс приводит к сокращению времени, которое отводится на создание современных систем, что создает значительные трудности при создании математических моделей процессов и объектов управления. Поэтому многие современные системы автоматического управления создаются в условиях априорной неопределенности. Это означает, что некоторые характеристики объекта управления могут быть заранее неизвестными или меняться в процессе его работы.

В задачах управления нелинейными объектами принцип достоверной эквивалентности выполняется, если математическое описание оптимальных траекторий перехода переменных состояния объекта управления в заданное конечное состояние известно с точностью до параметров, а возмущающие воздействия являются аддитивными белыми гауссовскими шумами. Однако в реальных системах, как правило, эти условия не выполняются.

В связи с этим в теории и практике построения систем управления динамическими объектами различного функционального назначения вопросам оценивания вектора состояния управляемых объектов в условиях наличия шумов объекта и помех измерений придается весьма важное значение.

Вышеизложенные выводы указывают на необходимость разработке алгоритмов адаптивного оценивания и управления нелинейными динамическими объектами в условиях неопределенности и их практическому применению при решении задач автоматизации и управления технологическими процессами промышленных производств.

Вторая глава диссертации «Разработка алгоритмов устойчивого адаптивного оценивания состояния нелинейных динамических объектов» посвящена разработке алгоритмов адаптивного оценивания состояния нелинейных динамических объектов управления. Пусть нелинейная динамическая система описывается следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{z} = f(z, u, p), \\ y = z_1, \end{cases} \quad (1)$$

где $u(t) \in D_u \subseteq R$ – измеримый вход, возможно ограниченный в подпространстве D_u пространства R , $y(t) \in R$ – измеримый выход, $z(t) \in R^n$ – вектор состояний, $p(t) \in D_p \subseteq R^q$ – вектор неизвестных ограниченных изменяющихся во времени параметров, а $f(\cdot)$ есть гладкое векторное поле на гладком n -мерном многообразии.

Параметры $p(t)$ могут представлять собой возможно неизвестные функции $z(t)$, и могут трактоваться как неизвестные изменяющиеся во времени параметры. Наиболее часто состояния $z_i(t)$ и некоторые неизвестные параметры $p_i(t)$ в (1) имеют чисто физическое значение. В таком случае (1) называют заданной физической системой (ЗФС).

Рассмотрим нелинейные системы в форме (1), которые могут быть преобразованы при использовании инвариантного во времени нелинейного преобразования:

$$[x^T : \theta^T]^T = T(z, p, c_2, \dots, c_n), \quad (2)$$

в следующую эквивалентную форму, которую называют канонической формой адаптивного наблюдателя (КФАН):

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Rx(t) + \Omega(\omega(t))\theta(t) + g(t), \\ y(t) = x_1(t). \end{cases} \quad (3)$$

В выражениях (2) и (3): $x(t) \in R^n$ – вектор состояний того же размера, что и $z(t)$; $\theta(t) \in R^m$ – вектор неизвестных изменяющихся во времени параметров, которые могут быть оценены неавтономно; $\omega(t) \in R^s$ есть вектор известных функций $u(t)$ и $y(t)$, например, $\omega(t) = [u(t), y(t), y^2(t), \sin y(t)]$; $\Omega(\omega(t))$ есть $n \times m$ – матрица, все элементы которой имеют форму $\Omega_{ij}(\omega(t)) = \alpha_{ij}^T \omega(t)$ для известной константы, возможно равной нулю, а векторы $\alpha_{ij} \in R^s$; R – известная постоянная $n \times n$ – матрица. Для системы (2) необходимо описать адаптивный наблюдатель и получить достаточные условия для того, чтобы системе ЗФС (1) была бы гарантирована глобальная устойчивость.

Для системы, описываемой (3), рассмотрим следующий адаптивный наблюдатель:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = R\hat{x}(t) + \Omega(\omega(t))\hat{\theta}(t) + g(t) + \begin{bmatrix} c_1 \tilde{y}(t) \\ \dots \\ V(t)\hat{\theta}(t) \end{bmatrix}, \\ \hat{y}(t) = \hat{x}_1(t), \tilde{y}(t) \stackrel{\Delta}{=} y(t) - \hat{y}(t), \end{cases} \quad (4)$$

где c_1 – произвольная положительная константа, а c_2, \dots, c_n выбираются таким образом, что собственные значения $F(c_2, \dots, c_n)$ находятся в открытой левой полуплоскости; Вспомогательный фильтр $V(t)$ есть $(n-1) \times m$ - матрица, а $\varphi(t)$ есть m -вектор.

Адаптация параметров производится на основе выражения

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = \Gamma \varphi(t) \tilde{y}(t), \quad (6)$$

где Γ – произвольная положительно определенная матрица, выбранная как $\Gamma = \text{diag}(v_1, \dots, v_n)$, $v_i > 0$.

Тогда можно показать, что адаптивный наблюдатель (4)-(6) для этой системы является глобально устойчивым.

Приведенные алгоритмы адаптивной оценки состояний, адаптивной идентификации параметров и построения адаптивного наблюдателя нелинейной динамической системы позволяют повысить точность оценивания вектора состояния и тем самым качественные показатели процессов управления.

При решении задач адаптивного оценивания состояния нелинейных динамических объектов управления возникает задача синтеза алгоритмов адаптивного оценивания переходной матрицы объектов управления. Будем предполагать, что модель динамической системы описывается уравнениями вида:

$$x_{i+1} = Ax_i + \Gamma w_i, \quad (7)$$

$$z_i = Hx_i + v_i, \quad (8)$$

где x_i – вектор состояния системы размерности n , z_i – вектор наблюдения размерности m , w_i и v_i – векторы шума объекта и помехи наблюдения размерности q и p соответственно, являющиеся последовательностью типа гауссовского белого шума с характеристиками $E[w_i] = 0$, $E[w_i w_k^T] = Q \delta_{ik}$, $E[v_i] = 0$, $E[v_i v_k^T] = R \delta_{ik}$, $E[w_i v_k^T] = 0$; A , Γ и H – матрицы соответствующих размерностей.

Пусть рассматриваемая система (7), (8) инвариантна к сдвигу во времени и вполне наблюдаема:

$$\text{rank}[H^T \ ; \ (HA)^T \ ; \ \dots \ ; \ (HA^{n-1})^T]^T = n,$$

где « T » обозначает транспонирование матрицы.

Полагая последовательность матриц $\{\hat{A}\}_{i=1}^n \rightarrow A$, будем рассматривать задачу вида:

$$\hat{A}^T \cdot [H^T \ ; \ (H\hat{A})^T \ ; \ \dots \ ; \ (H\hat{A}^{n-1})^T]^T = [C_1^T \ ; \ C_2^T \ ; \ \dots \ ; \ C_n^T]^T = C^T, \quad (9)$$

где блочная матрица C является результатом обработки экспериментальных данных.

Таким образом, для получения оценки \hat{A} необходимо решить уравнение (9). Данная задача эквивалентна решению системы нелинейных уравнений, что предполагает применение итеративных методов решения.

Тогда алгоритм состоит в последовательном решении уравнений:

$$L_{i,n}(A_i) \cdot A_{i+1} = C, \quad i = 0, \dots, n-1,$$

дающих оценку \hat{A}_n , где $L_{i,n}(A_i) = [H^T (H\hat{A}_i)^T \ \dots \ (H\hat{A}_i^{n-1})^T]^T$.

Определение вектора \hat{a}_j будем производить на основе минимизации функционала вида:

$$f(a_j) = \sum_{j=1}^{\eta} (L(a_j) - c_j)^2, \quad \eta = m \cdot n,$$

т.е. искомая оценка вектора \hat{a}_j есть $\hat{a}_j = \arg \inf_{a \in R^n} f(a_j)$.

Таким образом, необходимо определить такие a_j , для которых:

$$(F(a_j), a_j - d_j) \leq 0, \quad \forall d_j \in Q, \quad (10)$$

где $F(a_j)$ – произвольный монотонный оператор.

Для решения уравнения (10) весьма эффективным является итеративный метод, который порождает регуляризующий алгоритм в смысле Тихонова для отображения, связанного с вариационным неравенством (10). Если $a_{j,r}$ уже задано, то $a_{j,r+1}$ находится из решения «регуляризованного» неравенства типа (10):

$$(F(a_{j,r}) + \varepsilon_r a_{j,r} + (F'(a_{j,r}) + \varepsilon_r)(a_j - a_{j,r}), a_j - d_j) \leq 0, \quad \varepsilon_r > 0, \quad \forall d_j \in Q.$$

При подходящем выборе $\{\varepsilon_r\}$ и начального приближения $a_{j,0}$ последовательность $\{a_{j,r}\}$ сильно сходится к $a_{j,*}$ - решению (10) с минимальной нормой. Тогда справедливо соотношение

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \|a_{j,r} - a_{j,*}\| = 0,$$

где $a_{j,*}$ решение (10), обладающее минимальной нормой.

Приведенные устойчивые алгоритмы адаптивного оценивания переходной матрицы объектов управления на основе методов решения вариационных неравенств в рамках принципа итеративной регуляризации позволяют обеспечить состоятельность и сходимость искомых оценок.

Здесь также рассмотрены вопросы синтеза нелинейных наблюдателей переменных состояния на основе квазилинейного представления и устойчивого оценивания ковариационной матрицы шума объекта на основе модификации метода Гаусса-Ньютона.

Третья глава диссертации **«Разработка устойчивых алгоритмов адаптивного управления нелинейными динамическими объектами»** посвящена разработке регулярных алгоритмов полиномиального синтеза нелинейных систем управления.

Рассмотрим нелинейную управляемую систему, которая описывается уравнением

$$\dot{x} = f(x, u), \quad (11)$$

где $x \in R^n$ – доступный измерению вектор состояния системы; $f(x, u) \in C_{x,u}^{n-1}$ – вектор-функция, причем

$$f(0,0) = 0, \quad \frac{\partial f_i(x, u)}{\partial u} = f_{iu}(x),$$

при $x \in \Omega$. Здесь $\Omega = \{x: \|x\| \leq M < \infty\}$ – некоторая область пространства R^n . В этих условиях уравнение (11) допускает квазилинейное представление

$$\dot{x} = A(x)x + b(x)u, \quad (12)$$

где $b(x) = [b_1(x) \dots b_n(x)]^T$ и $A(x) = [a_{ij}(x)]$ – функциональные n -вектор и $n \times n$ - матрица.

Рассмотрим задачу синтеза управления $u = u(x)$, которая обеспечивает асимптотическую устойчивость положения равновесия $x = 0$ замкнутой системы (11) или, что то же самое, (12) в области $\Omega_0 \in \Omega \in R^n$, где выполняются указанные ниже условия. Управление будем искать в виде $u = -h^T(x)x$, где $h(x) \in R^n$. Поэтому с учетом (12) уравнение системы (11) принимает вид

$$\dot{x} = H(x)x, \quad H(x) = A(x) - b(x)h^T(x).$$

Предположим, что $f(x, u)$ в (11) имеет такой вид, что результирующий вектор $h(x)$ искомого управления $u = u(x)$ не зависит от производных по времени. Определим полиномы вида

$$\bar{a}(s, x, \bar{h}) = s^n + \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_i(x, \bar{h}) s^i, \quad (13)$$

$$\bar{v}_i(s, x, \bar{h}) = \sum_{j=0}^{n-1} v_{ij}(x, \bar{h}) s^j, \quad i = \overline{1, n}. \quad (14)$$

Пусть

$$h^*(s) = s^n + \sum_{i=0}^{n-1} \eta_i^* s^i \quad (15)$$

– желаемый гурвицев полином. На основе полиномов (13)-(15) составляем систему

$$V\eta = \gamma, \quad (16)$$

где

$$V = \begin{bmatrix} v_{10} & v_{20} & \dots & v_{n0} \\ v_{11} & v_{21} & \dots & v_{n1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{1, n-1} & v_{2, n-1} & \vdots & v_{n, n-1} \end{bmatrix}; \quad \eta = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \end{bmatrix}; \quad \gamma = \begin{bmatrix} \gamma_0 \\ \gamma_1 \\ \vdots \\ \gamma_{n-1} \end{bmatrix},$$

где $\gamma_i = \gamma_i(x, \bar{h}) = \eta_i^* - \alpha_i(x, \bar{h})$, $i = \overline{0, n-1}$.

В уравнении (16) матрица V может быть плохо обусловленной, что требует применения при решении уравнения (16) методов регуляризации. При построении приближенного решения уравнения (16) большую роль играют разнообразные итерационные методы. С этой точки зрения более удобным является итерированный вариант метода регуляризации А.Н. Тихонова:

$$\alpha \eta_r + V^T V \eta_r = \alpha \eta_{r-1} + V^T \gamma_\delta \quad (r = 1, \dots, m). \quad (17)$$

Решение уравнения (9) дается – формулой

$$\eta_m = (I - V^T V g_{m, \alpha}(V^T V)) \eta_0 + g_{m, \alpha}(V^T V) V^T \gamma_\delta,$$

где η_0 – начальное приближение, а $g_{m, \alpha}(\lambda)$ – порождающая система функций для итерированного варианта (17) метода А.Н. Тихонова.

Параметр $r = r(\delta, h)$ в приближении следует выбирать таким образом, чтобы

$$r(\delta, h) \rightarrow \infty, \quad (\delta + h)^2 r(\delta, h) \rightarrow 0, \quad \text{при } \delta \rightarrow 0, \quad h \rightarrow 0.$$

Тогда $\eta_{r(\delta, h)} \rightarrow \eta_*$ при $\delta \rightarrow 0, h \rightarrow 0$ где η_* – решение уравнения $V^T V \eta_* = V^T \gamma$.

Приведенные алгоритмы полиномиального синтеза нелинейных систем управления позволяют придать при определенных условиях заданный вид коэффициентам характеристического полинома системной матрицы путем решения системы линейных алгебраических уравнений.

В последнее время все чаще встречаются задачи оптимального управления динамическими объектами на бесконечном временном интервале (задачи асимптотического управления), в которых цель управления состоит в том, чтобы некоторый функционал, определенный на траекториях системы x_n ($n=0,1,\dots$), либо не превышал заданной величины $\varepsilon > 0$, либо принимал минимальное значение. Пусть динамический объект описывается уравнением

$$x_{n+1} = f(x_n) + Cu_n + \eta_n, \quad (n=0,1,\dots), \quad (18)$$

где $x_n \in R^n$ – вектор состояний объекта в момент времени n ; $u_n \in U \subset R^L$ – вектор управляющих воздействий в момент времени n , $L \leq N$; $\eta_n \in R^n$ – вектор случайных неизмеряемых в n -й момент времени возмущений; $f(x)$ – заданная вектор-функция, определенная на R^N ; C – постоянная матрица размера $N \times L$ ранга l , $l \leq N$.

Правило формирования последовательности управляющих воздействий $\{u_n\}$ называют алгоритмом «локальной» оптимизации, если при каждом n

$$u_n = \arg \min_{u \in U} \|g(x_n) + Cu + \gamma \nabla Q(x_n)\|^2. \quad (19)$$

При отсутствии ограничений на управляющие воздействия ($U = R^L$) алгоритм (19) «локальной» оптимизации можно выписать в явном виде:

$$u_n = -C^+[g(x_n) + \gamma \nabla Q(x_n)], \quad (20)$$

где C^+ – матрица, псевдообратная к C .

Уравнение системы (18), замкнутой в соответствии с алгоритмом «локальной» оптимизации (20), имеет вид:

$$x_{n+1} = x_n - \gamma \nabla Q(x_n) + (I - D)[g(x_n) + \gamma \nabla Q(x_n)] + \eta_n, \quad (21)$$

где $D = CC^+$ – матрица-проектор ($\text{rang} D = l$).

Если матрица C не вырождена ($l = N$), то $D = I$ и уравнение замкнутой системы (21) совпадает с градиентным алгоритмом минимизации функций $Q(x)$ в условиях помех. При обращении матрицы C можно использовать прием, основанный на вычислении $Q = CC^T$ в выражении (20). Принимая во внимание, что Q является симметричной неотрицательно определенной матрицей порядка $l \times l$ ранга $l < N$, то

$$Q^+ = T^T (TT^T)^{-2} T,$$

при этом

$$C^+ = C^T Q^+ = C^T T^T (TT^T)^{-2} T.$$

В случае, если матрица Q плохо обусловлена, то для повышения устойчивости процедуры псевдообращения в (20) целесообразно использовать регулярные процедуры вида:

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

где $\alpha > 0$ – параметр регуляризации, I – единичная матрица.

Параметр регуляризации α здесь целесообразно определять на основе способа модельных примеров. Если матрица $Q = CC^T$ невырожденная, то $Q^+ = Q^{-1}$ и имеет место выражение (16).

Приведенные выражения позволяют синтезировать упрощенные устойчивые вычислительные процедуры стабильного асимптотического управления нелинейными динамическими объектами.

В главе также рассмотрены алгоритмы аналитического синтеза нелинейных систем управления и нелинейных квазиמודальных регуляторов, позволяющие синтезировать системы управления с учетом свойств собственно объекта управления и наблюдаемых переменных.

В четвертой главе диссертации **«Применение разработанных алгоритмов в задачах автоматизации и управления технологическим процессом бестарного хранения муки»** приводятся результаты применения разработанных алгоритмов при автоматизации и управлении технологическим процессом бестарного хранения муки.

Произведенная формализация процесса бестарного хранения муки как объекта управления позволила выделить следующие основные переменные, характеризующие рассматриваемый процесс: управляющие параметры: $U = (u_1, u_2, u_3)$, где u_1 – расход тепла от системы отопления; u_2 – расход пара от системы увлажнения; u_3 – расход свежего воздуха для вентиляции помещения; выходные параметры: $Y = (y_1, y_2, y_3)$, где y_1 – температура воздуха внутри помещения; y_2 – влажность воздуха в технологическом помещении; y_3 – концентрация углекислого газа CO_2 в воздухе технологического помещения; возмущающие воздействие: $W = (w_1, w_2, w_3)$: где w_1 – температура атмосферного воздуха; w_2 – влажность атмосферного воздуха; w_3 – химический состав воздуха атмосферы.

В задачах управления динамическими системами с неизвестными параметрами широкое распространение получил подход, при котором неопределенность, вызванную незнанием параметров, уменьшают с помощью адаптивного идентификатора, работающего в реальном масштабе времени и уточняющего модель объекта по результатам измерения входных и выходных сигналов. Отсутствие дуального эффекта управления в таких системах является причиной низкого качества работы идентификатора в замкнутом контуре.

Будем полагать, что рассматриваемая система может быть описана следующим нелинейным уравнением достаточного общего вида

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= A\varphi(x_n) + Cu_n + \xi_n = Bz_n + \xi_n, \\ x_0 &= 0, n = 0, 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (22)$$

где $x_n \in R^N$ – вектор состояния объекта в момент времени n , $u_n \in U \subset R^L$ – вектор управляющих воздействий ($L \leq N$) из множества U допустимых управлений, $\xi_n \in R^N$ – вектор независимых случайных возмущений (помех), таких, что $M\{\xi_n | F_n\} = 0$, $M\{\|\xi_n\|^2 | F_n\} = \sigma_\xi^2 < \infty$, $M\{\xi_n \xi_n^T | F_n\} = P_\xi > 0$, $F_n - \sigma$ – алгебра,

согласованная с процессом $\{x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_n\}$, $\varphi(x) \in R^k$ вектор-функция, заданная на R^N , $B = (A:C) - (N \times (K+L))$ – составная матрица, R^N – обобщенный вектор $\tilde{z}_n^T = (\varphi^T(x_n):u_n^T)$ – входов. Матрицы параметров объекта A и C полагаются неизвестными; относительно объекта (22) принимаются те же предположения.

Цель управления задается одношаговым критерием вида

$$J_{n+1} = M\{\|x_{n+1}\|_Q^2 + \|u_n\|_R^2 \mid F_n\}, \quad (23)$$

где Q и R – положительно определенные симметрические весовые матрицы.

Принятый подход базируется на методике локальной оптимизации в принципе «разделения», когда в соответствие объекту (22) ставится настраиваемая модель

$$\hat{x}_{n+1} = A_n \varphi(x_n) + C_n u_n = B_n \tilde{z}_n, \quad (24)$$

параметры которой уточняются с помощью рекуррентного метода наименьших квадратов

$$B_{n+1} = B_n + (x_{n+1} - B_n z_n) z_n^T \Gamma_n, \quad B_0 = B_a, \quad (25)$$

$$\Gamma_n = \Gamma_{n-1} - \frac{\Gamma_{n-1} z_n z_n^T \Gamma_{n-1}}{1 + z_n^T \Gamma_{n-1} z_n}, \quad \Gamma_0 = \rho^{-1} I, \quad \rho > 0,$$

а цель управления (23) заменяется критерием

$$J_{n+1} = M\{\|\hat{x}_{n+1}\|_Q^2 + \|u_n\|_R^2 \mid F_n\},$$

где $B_n = (A_n:C_n)$ – составная матрица оценок параметров, перестраиваемая на каждой итерации с помощью алгоритма (25), B_a – априорная оценка матрицы B , $z_n^T = (\varphi^T(x_n):(u_n + v_n)^T)$ – обобщенный вектор возмущенных входов, $v_n \in R^L$ – вектор независимых случайных возмущений (зондирующих сигналов), искусственно вводимых в канал управления с целью улучшения качества процесса идентификации, таких, что $M\{v_n\} = 0$, $M\{\|v_n\|^2\} = \sigma_v^2 < \infty$, $M\{v_n v_n^T\} = P_v > 0$, $M\{v_n \xi_n^T\} = 0$.

Такой подход приводит к закону управления, когда используется регулятор вида

$$\hat{u}_n^* = -(C_n^T Q C_n + R)^{-1} C_n^T Q A_n \varphi(x_n) = -\alpha_n^{-1} \gamma_n \varphi(x_n)$$

в котором истинные параметры объекта A и C заменяются оценками A_n и C_n . Здесь $\alpha_n = (C_n^T Q C_n + R)$, $\gamma_n = C_n^T Q A_n$.

Введем в рассмотрение взвешенную матрицу ковариаций ошибок параметров

$$P_n = M\{(B - B_n)^T Q (B_a - B_n) \mid F_n\} = M\{\theta_n^T Q \theta_n \mid F_n\} = \begin{pmatrix} P_n^A & \tilde{P}_n^T \\ \tilde{P}_n & P_n^C \end{pmatrix}.$$

Тогда можно показать, что выражение для управления может быть записано в виде

$$\tilde{u}_n = -(C_n^T Q C_n + P_n^C + R)^{-1} (C_n^T Q A_n + \tilde{P}_n) \varphi(x_n) = -\beta_n^{-1} \delta_n \varphi(x_n). \quad (26)$$

где $\beta_n = (C_n^T Q C_n + P_n^C + R)$, $\delta_n = C_n^T Q A_n + \tilde{P}_n$, H_n – члены, не зависящие от u_n .

Необходимость знания ковариационной матрицы P_n при реализации алгоритма (26) не позволяет применить в контуре идентификации процедуру (25). Поэтому возникает задача синтеза алгоритма специального вида, для чего введем рекуррентную градиентную процедуру настройки параметров

$$B_{n+1} = B_n + (x_{n+1} - B_n z_n) z_n^T D_n \quad (27)$$

или относительно ошибок:

$$\theta_{n+1} = \theta_n - (\theta_n z_n + \xi_n) z_n^T D_n,$$

где D_n – матричный коэффициент усиления алгоритма, подлежащий определению.

Тогда можно получить выражение для коэффициента усиления алгоритма (27) в виде

$$D_n = \frac{P_n}{z_n^T P_n z_n + SpQP_\xi},$$

где Sp – символ следа матрицы.

Отсюда можно записать собственно алгоритм идентификации:

$$B_{n+1} = B_n + \frac{(x_{n+1} + B_n z_n) z_n^T P_n}{z_n^T P_n z_n + SpQP_\xi}, \quad B_0 = B_a, \quad (28)$$

$$P_{n+1} = P_n - \frac{P_n z_n z_n^T P_n}{z_n^T P_n z_n + SpQP_\xi}, \quad P_0 = (\rho SpQP_\xi)^{-1} I, \quad \rho > 0, \quad (29)$$

являющийся модификацией алгоритма Калмана – Мейна.

На основе разработанных в диссертации регулярных алгоритмов идентификации и адаптивного управления можно предложить следующую общую структуру системы адаптивного управления процессом хранения муки (рис.1).

Для получения и практического использования математической модели был проведен промышленный эксперимент для различных видов сырья в условиях нормального функционирования технологического процесса хранения муки на АО «Toshkentdonmahsulotlari». На основе предварительного анализа динамических характеристик процесса экстракции время регистрации T и дискретизации реализаций Δt наблюдаемых случайных процессов было выбрано соответственно: $T=3$ час, $\Delta t=2$ мин. Всего было произведено 90 измерений.

Искомые значения матриц A_n и C_n в уравнении (24) рассчитывались на основе алгоритма (27)-(29).

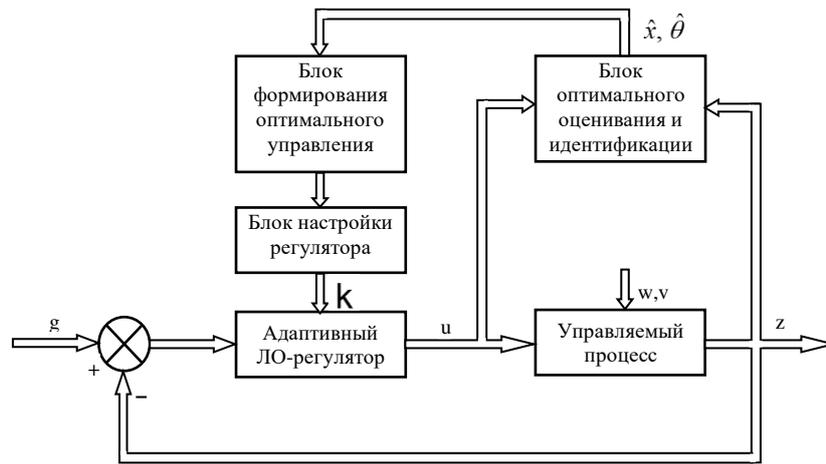


Рис.1. Структура локально-оптимальной адаптивной системы управления процессом хранения муки: g – задающие воздействия, w, v – возмущающие воздействия, u – управляющие воздействия, $\hat{\theta}$ – оценки параметров объекта, \hat{x} – оценки текущего состояния объекта, k – настраиваемые параметры регулятора, z – выходной сигнал объекта

Так, например, значения матриц A_n и C_n оказались равными:

$$A = \begin{bmatrix} 0.328 & 0.573 \\ 0.967 & -0.056 \\ 0.081 & 0.522 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0.167 & 0.078 \\ 0.811 & 0.427 \\ 0.308 & 0.591 \end{bmatrix}.$$

Адекватность разработанных моделей была установлена на основе критерия, основанного на анализе свойств остатков.

Таким образом, разработанные математические модели процесса хранения муки позволяют установить количественные соотношения между основными входными и выходными переменными, прогнозировать состояние процесса при имеющихся или выбираемых управлениях и синтезировать адаптивные законы управления рассматриваемым процессом.

Графики переходных процессов в системе представлены на рис. 2.

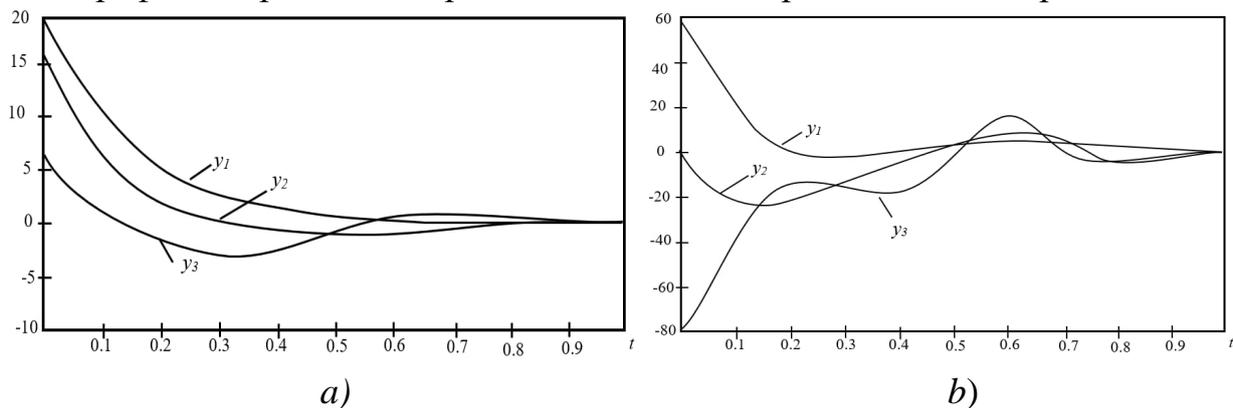


Рис. 2. Графики изменения состояний системы (а) и управления (б)

Таким образом, разработанная система управления процессом бестарного хранения муки обеспечивает высокое качество регулирования и обладает достаточной для рассматриваемого процесса точностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основе методов системного анализа, теории автоматического управления, методов синтеза нелинейных систем, динамической фильтрации, и решения некорректных задач разработаны алгоритмы адаптивного оценивания и управления нелинейными динамическими объектами в условиях неопределенности.

В итоге получены следующие научные результаты:

1. Разработаны алгоритмы устойчивого адаптивного оценивания состояния нелинейных динамических объектов управления на основе расширенного фильтра Калмана. Предложенные алгоритмы адаптивного оценивания позволяют повысить точность оценивания вектора состояния и тем самым качественные показатели процессов управления.
2. Разработаны алгоритмы синтеза нелинейных редуцированных наблюдателей переменных состояния на основе квазилинейного представления. Полученные алгоритмы позволяют осуществлять процедуру наблюдения для случая, когда модель объекта с дифференцируемыми нелинейностями содержит подсистему, в которую неизмеряемые переменные входят линейно.
3. Разработаны алгоритмы устойчивого оценивания ковариационной матрицы шума объекта на основе итерационных алгоритмов. Приведенные алгоритмы позволяют производить устойчивое оценивание ковариационной матрицы шума объекта и тем самым повысить точность процедуры адаптивного оценивания.
4. Разработаны алгоритмы устойчивого адаптивного оценивания переходной матрицы объектов управления на основе вариационных неравенств в рамках принципа итеративной регуляризации. Полученные устойчивые алгоритмы адаптивного оценивания переходной матрицы позволяют обеспечить состоятельность и сходимости искомых оценок.
5. Разработаны алгоритмы аналитического синтеза нелинейных систем управления. Приведенные алгоритмы позволяют синтезировать нелинейные системы управления на основе решения алгебраической системы линейных уравнений с учетом свойств собственно объекта управления и наблюдаемых переменных.
6. Предложены алгоритмы устойчивого полиномиального синтеза для класса нелинейных систем управления на основе квазилинейного представления их уравнений. Полученные алгоритмы позволяют повысить точность вычисления искомого управления.
7. Предложены устойчивые алгоритмы асимптотического управления нелинейными динамическими объектами на основе локальной оптимизации. Приведенные алгоритмы позволяют формировать управляющие воздействия по заданному критерию качества.
8. Разработаны алгоритмы синтеза нелинейных квазимодальных регуляторов. Полученные алгоритмы позволяют обеспечить заданные требования к качеству переходного процесса.
9. На основе разработанных алгоритмов регулярного синтеза предложена адаптивная система управления процессом хранения муки. Предложенная адаптивная система управления позволит стабилизировать технологические режимы протекания процесса и повысить качество и 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

AKHMEDOV DOMIR AZIMBOYEVICH

**ALGORITHMS FOR ADAPTIVE ESTIMATION AND CONTROL
OF NONLINEAR DYNAMIC OBJECTS IN CONDITIONS
OF UNCERTAINTY**

05.01.08 - Automation and control of technological processes and manufactures

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

Tashkent – 2023

The theme of doctor of philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number №B2017.3.PhD/T455.

The dissertation was completed at the Tashkent State Technical University.

The abstract of dissertation is posted in three languages (uzbek, russian, english (resume)) is placed on the web-page of Scientific Council (www.tdtu.uz) and Information and Educational Portal «Ziyonet» (www.ziyonet.uz).

Scientific consultant: **Zaripov Oripjon Olimovich**
Doctor of Technical Sciences, Professor

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

Avazov Yusuf Shodiyevich
Doctor of Technical Sciences, associate professor

Leading organization: **Samarkand State University**

Defense of dissertation will take place in «19» 09 2023 at 10⁰⁰ o'clock at a meeting of the scientific council DSc.03/30.12.2019.T.03.02 at the Tashkent state technical university (Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: (99871) 246-46-00, fax: (99871) 227-10-32; e-mail: tsu_info@tdtu.uz).

The doctoral dissertation could be reviewed at the Information-resource center of Tashkent state technical university (registration number 334). (Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: (99871) 207-14-70)

Abstract of the dissertation distributed «25» 08 2023 year.
(mailing report № 15, on «02» 08 2023 year).



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

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

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

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the research is to develop algorithms for adaptive estimation and control of nonlinear dynamic objects under conditions of uncertainty and computational schemes for practical implementation.

The object of the research is methods and algorithms of adaptive estimation and control of nonlinear dynamic objects under uncertainty.

The scientific novelty of the research is:

algorithms for stable adaptive estimation of the state of nonlinear dynamic control objects based on the extended dynamic Kalman filter have been developed;

algorithms for stable adaptive estimation of the transition matrix of control objects based on variational inequalities within the framework of the iterative regularization principle have been developed;

algorithms for stable polynomial synthesis of nonlinear control systems are proposed based on the quasi-linear representation of their equations;

stable algorithms for asymptotic control of nonlinear dynamic objects based on local optimization are proposed.

Implementation of the research results. Based on the scientific results obtained from adaptive estimation and control of nonlinear dynamic objects under uncertainty:

The developed algorithms for sustainable adaptive estimation of the state of nonlinear dynamic control objects based on the extended dynamic Kalman filter have been implemented at JSC “Toshkentdonmahsulot” (Reference of JSC “Uzdonmahsulot” No. 4/200 dated May 3, 2023). As a result, the accuracy of calculating the parameters of the controllers is increased.

The proposed algorithms for stable polynomial synthesis of nonlinear control systems based on a quasi-linear representation of their equations have been implemented at JSC “Toshkentdonmahsulot” (Reference of JSC “Uzdonmahsulot” No. 4/200 dated May 3, 2023). The algorithms allow for the stabilization of the technological regimes of the flour storage process.

JSC “Toshkentdonmahsulot” has implemented the proposed stable algorithms for asymptotic control of nonlinear dynamic objects based on local optimization (Reference of JSC “Uzdonmahsulot” No. 4/200 dated May 3, 2023). As a result, determining the parameters of the object and disturbances becomes more accurate.

The structure and volume of the dissertation The dissertation includes an introduction, four chapters, a conclusion, references, and appendices. The dissertation has 102 pages.

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

I бўлим (Часть I; Part I)

1. Зарипов О.О., Ахмедов Д.А. Алгоритмы синтеза параметров настроек регуляторов на основе методов активной адаптации // Журнал «Химическая технология. Контроль и управление». Ташкент, 2013, №5. - С.71-75. (05.00.00, №12)
2. Зарипов О.О., Ахмедов Д.А. Устойчивые алгоритмы адаптивного оценивания переходной матрицы объектов управления на основе методов решения вариационных неравенств // Вестник ТашГТУ, 2018, №3 (104). Ташкент, 2018. – С.16-20. (05.00.00, №16)
3. Zaripov O.O., Akhmedov D.A. Stable Estimation of Covariance Noise Matrix Based on Iterative Algorithms // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 6, Issue 9, September 2019. – PP. 10918-10922. (05.00.00, №8)
4. Zaripov O.O., Akhmedov D.A., Mamirov U.F. Adaptive estimation algorithms for the state of nonlinear dynamic systems // International Journal of Psychosocial Rehabilitation. Volume 24, Issue 3, February, 2020. – PP. 247-253. (3, EBSCO, IF 0.028)
5. Igamberdiev H.Z., Zaripov O.O., Akhmedov D.A. Sustainable evaluation of the covariation matrix of an object noise based on iterative processes for the solution of nonlinear operational equations // International Journal of Advanced Science and Technology, IJAST, USA. 2020. - PP.1-5. (3, Scopus, IF 0.472)
6. Zaripov O.O., Akhmedov D.A. Stable algorithms for asymptotic control of nonlinear dynamic objects // Technical science and innovation. – Tashkent, №2, 2021. – PP.111-115. (05.00.00, №16)
7. Zaripov O.O., Akhmedov D.A. Methods of synthesis of regulators for nonlinear dynamic systems // «Chemical Technology. Control and Management». International scientific and technical journal. – Tashkent, 2022, №6. – PP.60-65. (05.00.00, №12)

II бўлим (Часть II; Part II)

8. Ахмедов Д.А. Алгоритмы обнаружения изменений свойств сигналов по выборке наблюдений в управляемых системах / Каракалпакский республиканский совет общественного движения молодежи “Камолот” XIII Республиканской научной конференции молодых ученых Каракалпакстана, 20 декабря, 2013. – С.4-5.
9. Ахмедов Д.А. Алгоритмы адаптации и построения адаптивных фильтров на основе вспомогательного функционала качества / Проблемы и пути решения эффективного использования топливно-

- энергетических ресурсов. Сборник материалов республиканской научно-практической конференции, Карши, 22-23 декабря 2013 г. - С. 305-306.
10. Зарипов О.О., Ахмедов Д.А. Алгоритмы регулярного адаптивного оценивания состояния стохастических объектов управления / Сборник материалов Международной научно-технической конференции: «Современные материалы, техника и технологии в машиностроении», 19-20 апреля 2014 г., Андижан, 2014. - С.364-365.
 11. Игамбердиев Х.З., Зарипов О.О., Ахмедов Д.А. Разработка и исследование эффективности алгоритмов адаптивного оценивания состояния динамических систем / Международная научно-практическая конференция «Инновация-2014», Сборник научных статей, Ташкент, 2014. - С.211-212.
 12. Ахмедов Д.А. Анализ методов обнаружения и оценки нарушений идентификатора на основе динамических фильтров калмановского типа / Навоийский горно-металлургический комбинат. Материалы научно-технической конференции на тему: «Перспективы науки и производства химической технологии в Узбекистане», 23-24 мая 2014 г., Навои, 2014. – С.213-214.
 13. Зарипов О.О., Ахмедов Д.А., Мухамадалиев Д.Х. Регулярное оценивание параметров фильтра калмановского типа в условиях априорной неопределенности / Республиканская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы информационно-коммуникационных технологий в интеграции науки, образования и производства», 3-я часть, Нукус, 21 апреля 2015 г. - С. 251-253.
 14. Ахмедов Д.А. Алгоритмы устойчивого параметрического оценивания моделей для процесса авторегрессии / Кон-металлургия комплекси: Ютуқлар, муаммолар ва ривожланиш истикболлари VIII-халқаро илмий-техникавий анжумани материаллари. Навоий, 19-21 ноябрь, 2015. - 516-517 б.
 15. Зарипов О.О., Ахмедов Д.А., Мухамадалиев Д.Х. Регулярные алгоритмы оценивания в задаче адаптивной фильтрации / Сборник научных статей III Международной научно-практической конференции: «Современные материалы, техника и технологии в машиностроении», 19-21 апреля, Том 3-4, Андижан, 2016. – С.81-82.
 16. Зарипов О.О., Ахмедов Д.А. Сравнительный анализ алгоритмов нелинейной фильтрации в стохастических системах управления / Материалы IX Международной научно-технической конференции: «Достижения, проблемы и современные тенденции развития горно-металлургического комплекса». Навои, 12-14 июня, 2017. – С.487.
 17. Зарипов О.О., Ахмедов Д.А. Оценивание статистических характеристик шума объекта на основе итерационных алгоритмов / Материалы международной научной конференции «Инновационные решения инженерно-технологических проблем современного производства». 2 том. 14-16 ноября 2019 г., Бухара-2019. – С.242-245.

18. Axmedov D.A. Noaniqlik sharoitida nochiziqli dinamik obyektlarni adaptiv baholash va boshqarish dasturi / EHM uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro'yxatdan o'tkazilganligi to'g'risidagi guvohnoma, DGU 11073, 24.02.2021 y.
19. Axmedov D.A. Chiziqli bo'lmagan dinamik boshqarish obyektlarining holatini adaptiv baholash algoritmlari / EHM uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro'yxatdan o'tkazilganligi to'g'risidagi guvohnoma, DGU 24852, 18.04.2023 y.
20. Axmedov D.A., Zaripov O.O. Kvachiziqli ko'rinishlar asosida chiziqli bo'lmagan kuzatuvchilarni o'zgaruvchan holatini sintez qilish algoritmlari / EHM uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro'yxatdan o'tkazilganligi to'g'risidagi guvohnoma, DGU 25999, 04.05.2023 y.

Avtoreferat “Technical science and innovation” ilmiy jurnali tahririyatida tahrirdan o'tkazildi hamda o'zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlarini mosligi tekshirildi.

Bichimi : 84x60 ¹/₁₆. «Times New Roman» garniturasida.
Raqamli bosma usulda bosildi.
Shartli bosma tabog'i: 3,25. Adadi 100 dona. Buyurtma № 50/23.

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

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 № 50/23.**

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