

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.27.06.2017.Т.03.02 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

СЕВИНОВ ЖАСУР УСМОНОВИЧ

**ИДЕНТИФИКАЦИОН ЁНДАШУВ МЕЗОНЛАРИ АСОСИДА
ТЕХНОЛОГИК ОБЪЕКТЛАРНИ АДАПТИВ БОШҚАРИШ
СИСТЕМАЛАРИНИ СИНТЕЗЛАШ УСУЛЛАРИ ВА АЛГОРИТМЛАРИ**

05.01.08 - Технологик жараёнлар ва ишлаб чиқаришларни
автоматлаштириш ва бошқариш

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси
Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации
Contents of the Doctoral (DSc) Dissertation Abstract

Севинов Жасур Усмонович

Идентификацион ёндашув мезонлари асосида технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлаш усуллари ва алгоритмлари3

Севинов Жасур Усмонович

Методы и алгоритмы синтеза адаптивных систем управления технологическими объектами на основе концепций идентификационного подхода29

Sevinov Jasur Usmonovich

Methods and algorithms of synthesis of adaptive control systems of technological objects on the basis of the concepts of the identification approach55

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works59

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.27.06.2017.Т.03.02 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

СЕВИНОВ ЖАСУР УСМОНОВИЧ

**ИДЕНТИФИКАЦИОН ЁНДАШУВ МЕЗОНЛАРИ АСОСИДА
ТЕХНОЛОГИК ОБЪЕКТЛАРНИ АДАПТИВ БОШҚАРИШ
СИСТЕМАЛАРИНИ СИНТЕЗЛАШ УСУЛЛАРИ ВА АЛГОРИТМЛАРИ**

05.01.08 - Технологик жараёнлар ва ишлаб чиқаришларни
автоматлаштириш ва бошқариш

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2018

Докторлик (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2017.3.DSc/T141 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (www.tdtu.uz) ҳамда «ZiyoNet» Ахборот таълим порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:

Игамбердиев Хусан Закирович

техника фанлари доктори, профессор, академик

Расмий оппонентлар:

Марахимов Авазжон Рахимович

техника фанлари доктори, профессор

Назаров Улугбек Султанович

техника фанлари доктори, профессор

Абдукадыров Абдузариф Абдурауфович

техника фанлари доктори

Етакчи ташкилот:

«Ximavtomatika» МЧЖ

Диссертация ҳимояси Тошкент давлат техника университети ҳузуридаги DSc.27.06.2017.T.03.02 рақамли Илмий кенгашнинг 2018 йил «___» _____ соат ___ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100095, Тошкент шаҳри, Университет кўчаси, 2. Тел.: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@edu.uz).

Диссертация билан Тошкент давлат техника университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (62-рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100095, Тошкент шаҳри, Университет кўчаси, 2. Тел.: (99871) 246-03-41.

Диссертация автореферати 2018 йил «___» _____ куни тарқатилди.
(2018 йил «___» _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси).

Н.Р.Юсупбеков

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш
раиси, т.ф.д., профессор, академик

Ш.М.Гулямов

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш
илмий котиби, т.ф.д., профессор

А.М.Назаров

Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш қошидаги илмий семинар раиси,
т.ф.д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (DSc) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда сўнги вақтларда технологик жараёнлар ва ишлаб чиқаришларни автоматлаштириш соҳасида технологик объектларнинг турли вазифаларга мўлжалланган адаптив бошқариш системаларини синтезлаш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқишга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Бу соҳада берк бошқариш контуридаги динамик объектларнинг параметрларини адаптив идентификациялашнинг мунтазам алгоритмларини ишлаб чиқиш муҳим масалалардан бири ҳисобланади. Шу жиҳатдан динамик объектларни идентификациялаш ва бошқаришнинг хилма-хил усуллари ишлаб чиқиш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади. Хорижий мамлакатларда, жумладан АҚШ, Россия, Германия, Япония, Жанубий Корея ва бошқа мамлакатларда технологик жараёнларни идентификациялаш, динамик баҳолаш, адаптив бошқаришнинг назарий масалаларини ечиш ва уларни саноатнинг турли тармоқларида амалий тадбиқ этишга катта аҳамият берилмоқда.

Жаҳонда динамик объектларни адаптив бошқариш масалаларини ечишга йўналтирилган берк системалардаги объектларни идентификациялашга универсал ёндашувни яратишга йўналтирилган илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда. Бу борада, жумладан динамик объектларни бошқаришнинг адаптив системаларини синтезлаш усуллари ва алгоритмларини идентификацион ёндашув мезонлари асосида такомиллаштириш ва уларни модификациялаш, берк бошқариш системасидаги объект ва бошқариш қурилмаларининг параметрларини турғун баҳолаш алгоритмларини ишлаб чиқиш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади. Шу билан бирга параметрлари номаълум ва ўлчанмайдиган ғалаёнли динамик объектни адаптив барқарорлаш усуллари ва алгоритмларини яратиш зарур ҳисобланади.

Ҳозирги вақтда республикамизда автоматлаштириш ва бошқариш йўналишига, хусусан, турли технологик жараёнлар ва ишлаб чиқаришларни автоматлаштириш ва бошқаришда энергия ва ресурс тежамкорликни таъминловчи, такомиллашган бошқариш системаларини яратишга катта эътибор қаратилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан «... иқтисодиётнинг энергия ва ресурс сарфини қисқартириш, ишлаб чиқаришга энергия тежамкор технологияларни жорий этиш, иқтисодиёт тармоқларидаги меҳнат унумдорлигини ошириш, ... иқтисодиёт, ижтимоий соҳа, бошқарув тизимига ахборот-коммуникация технологияларини жорий этиш»¹ вазифалари белгилаб берилган. Мазкур вазифаларни амалга ошириш, жумладан, идентификацион ёндашув мезонлари асосида технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлашнинг самарали усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқишга имкон берувчи тескари алоқа

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини 2017-2021 йилларда янада ривожлантиришнинг Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони

контурида идентификатори бўлган адаптив бошқариш системаларини яратиш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги, 2017 йил 29 ноябрдаги ПФ-5264-сон «Ўзбекистон Республикаси инновацион ривожлантириш вазирлигини ташкил этиш тўғрисидаги» Фармонлари, 2012 йил 21 мартдаги ПҚ-1730-сон «Замонавий ахборот-коммуникация технологияларини жорий этиш ва янада ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги, 2014 йил 3 апрелдаги ПҚ-2158-сон «Ахборот-коммуникация технологияларини иқтисодийнинг реал секторига янада жорий этиш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялари ривожланишининг IV. «Ахборотлаштириш ва ахборот-коммуникация технологиялари ривожлантириш» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи². Техник ва технологик объектларни адаптив бошқариш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқишга йўналтирилган илмий тадқиқотлар жаҳоннинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасаларида, жумладан «Honeywell», SIMSCI-Simulation ва University of California, Massachusetts Institute of Technology (АҚШ), «Siemens» ва Technical University Munich, Karlsruhe Institute of Technology, Technical University Darmstadt (Германия), Imperial College London, The University of Edinburgh (Буюк Британия), University of Chemical Technology in Prague (Чехия), The University of Tokyo, Tokyo Institute of Technology (Япония), Seoul National University, Korea Advanced Institute of Science and Technology (Жанубий Корея), «Alstom» (Франция), «Simatek-Energo» (Беларуссия), Автоматлаштириш институти (Хитой), Н.Э.Бауман номидаги Москва давлат техника университети, Санкт-Петербург информатика ва автоматлаштириш институтиларида (Россия Федерацияси) кенг қамровли илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда.

Динамик объектларни бошқаришнинг адаптив системаларини синтезлаш усуллари ва алгоритмларини яратиш, уларни бошқариш системаларини такомиллаштиришга оид жаҳонда олиб борилган тадқиқотлар натижасида қатор, жумладан қуйидаги илмий натижалар олинган: адаптив параметрик идентификациялаш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқилган (University of California, Massachusetts Institute of Technology, George Mason

²Диссертация мавзуси бўйича илмий тадқиқотлар шарҳи <https://elibrary.ru>,
<http://ieeexplore.ieee.org/document/824819>, <http://www.mathnet.ru/rus/agreement>, www.asucontrol.ru,
www.sial.iias.spb.su, <http://www.ipu.ru>, <http://cyberleninka.ru>, <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/?p=21073>,
https://nl.wikipedia.org/wiki/Pieter_Eykhoof, https://books.google.ru/books/about/Optimum_systems_control.html,
https://books.google.ru/books/about/System_identification.html, <http://terraelectronica.ru>, http://uk.farnell.com/static/findings/DF10/findings10_aducs.htm ва бошқа манбалар асосида ишлаб чиқилган.

University, АҚШ; Linksping University, Швеция; Россия Фанлар Академияси (РФА) Бошқариш муаммолари институти, Россия Федерацияси); параметрик ва структуравий идентификациялаш усуллари ва алгоритмлари ишлаб чиқилган (Massachusetts Institute of Technology, АҚШ; Linksping University, Швеция; Technische Universiteit Eindhoven, Нидерландия; РФА Бошқариш муаммолари институти, Н.Б.Жуковский номидаги Харбий-ҳаво муҳандислари академияси, Россия Федерацияси); баҳолаш назарияси асосида идентификациялаш алгоритмлари ишлаб чиқилган (George Mason University, АҚШ; РФА Бошқариш муаммолари институти, Санкт-Петербург информатика ва автоматлаштириш институти, Россия Федерацияси); динамик системаларнинг параметрлари ва вектор ҳолатларини умумлашган баҳолаш алгоритмлари ишлаб чиқилган (РФА Бошқариш муаммолари институти, Н.Э.Бауман номидаги Москва давлат техника университети, Санкт-Петербург информатика ва автоматлаштириш институти, Россия Федерацияси); вақт қаторлари ва фазо ҳолати усуллари асосида идентификациялаш усуллари ва алгоритмлари ишлаб чиқилган (Massachusetts Institute of Technology, АҚШ; Linksping University, Швеция; РФА Бошқариш муаммолари институти, Россия Федерацияси); тескари алоқа контурида идентификаторли адаптив бошқариш системаларини синтезлаш усуллари ишлаб чиқилган (Linksping University, Швеция; РФА Бошқариш муаммолари институти, Россия Федерацияси).

Дунёда динамик объектларнинг адаптив бошқариш системаларини синтезлаш усуллари ва алгоритмларини яратиш бўйича қатор, жумладан қуйидаги устувор йўналишларда тадқиқотлар олиб борилмоқда: талаб этилган ростлаш аниқлиги ва сифатини таъминловчи мураккаб динамик системаларнинг идентификациялаш, баҳолаш ва бошқариш усулларини такомиллаштириш; ички ва ташқи ғалаён таъсирларига боғлиқ бўлмаган адаптив ва робастли бошқариш системаларини ишлаб чиқиш; берк бошқариш контурида динамик объектларни адаптив идентификациялаш ва бошқаришнинг турғун усулларини ишлаб чиқиш; ростлагичларни алмаштириш ва ҳалақитлар таъсири «чегараси»да мослашиш алгоритмларини ажратиш функцияларини синтезлаш алгоритмларини ишлаб чиқиш; турли ҳалақит сигналли шароитлар учун калман типдаги динамик филтрлар ва мунтазамлаштирилган ҳолат кузатувчиларини куриш.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Идентификацион ёндашув асосида технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлаш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш бўйича ўтказилган тадқиқотларга тегишли бўлган, сўнгги йиллардаги илмий-техник адабиётлар таҳлили ушбу соҳада аҳамиятли даражадаги назарий ва амалий натижаларга эришилганлигидан дарак беради. Адаптив бошқариш системаларини синтезлаш муаммоларига бағишланган кўп сондаги ишлар нашр этилган, умумназарий мезонлар ишлаб чиқилган, ечилган амалий масалалар сони ортиб бормоқда. Адаптив бошқариш системаларининг ривожига кўплаб хорижлик олимлари, жумладан Astrom K.J., Brayson A., Eukhoff P., Izerman R., Kalman R., Kashyap P.L., Ljung L., Melsa J., Rao A.R., Sage E., Simon D., Андриевский Б.Р., Антонов В.Н., Балонин Н.А., Буков В.Н., Бунич А.Л.,

Ворчик Б.Г., Жиров М.В., Земляков С.Д., Зыбин Е.Ю., Карабутов Н.Н., Коган М.М., Красовский А.А., Ломов А.А., Мирошник И.В., Мышляев Л.П., Неймарк Ю.И., Никифоров В.О., Петров Б.Н., Поляк Б.Т., Райбман Н.С., Рубан А.И., Рутковский В.Ю., Семенов А.Д., Сысоев Л.П., Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Цыпкин Я.З., Штейнберг Ш.Е., Ядыкин И.Б., Якубович В.А. ва бошқалар ҳамда мамлакатимиз олимлари, жумладан Абдукадиров А.А., Азимов Б.М., Бекмуратов Т.Ф., Гулямов Ш.М., Жуманов И.И., Зарипов О.О., Игамбердиев Х.З., Исмаилов М.А., Кадыров А.А., Камалов Н.З., Камиллов М.М., Марахимов А.Р., Нурмухамедов Т.Р., Рахматуллаев М.А., Сиддиқов И.Х., Фозилов Ш.Х., Юсупбеков Н.Р. ва бошқалар ўзларининг улкан хиссаларини қўшишган.

Бироқ илмий-тадқиқот объектлари доирасининг кенгайиши ва доимий мураккаблашуви ноаниқлик шароитида адаптив идентификациялаш, ҳолатларни баҳолаш ва бошқаришнинг янги самарали усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқишни талаб этади. Шу билан биргаликда, берк бошқариш системалари синфида идентификациялаш ва бошқаришнинг мунтазам усуллари ва алгоритмлари етарлича ишлаб чиқилмаган. Шунингдек, идентификацион ёндашув асосида адаптив бошқаришнинг мунтазам усуллари ўз ривожини талаб этмоқда. Бундан ташқари берк бошқариш системасида объект ва ростлагич параметрларини идентификациялашнинг мунтазам усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш, жумладан локал-оптимал ва субоптимал адаптив бошқариш системаларида бошқарувчи таъсирларни шакллантириш ҳам мақсадга мувофиқ бўлиб, ноаниқлик шароитидаги динамик объектларни бошқаришнинг адаптив системаларини қуриш ва амалга оширишнинг алгоритмик амаллари спектрини кенгайтиради ва системаларнинг фаолият кўрсатиш самарадорлигини ошириш имконини беради. Юқорида келтириб ўтилганлардан идентификацион ёндашув мезонлари асосида динамик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлашнинг самарали мунтазам усуллари ва алгоритмларини яратиш ва келгусида такомиллаштиришнинг жуда зарурлиги келиб чиқади.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Тошкент давлат техника университети илмий-тадқиқот ишлари режаларининг №ОТ-Ф1-080-«Мураккаб технологик жараёнлар ва ишлаб чиқаришларни бошқаришнинг интеллектуал системаларини қуришнинг концепциялари ва тамойилларини ишлаб чиқиш» (2007-2011); №ЁФ-4-06-«Созланувчи модели адаптив бошқариш системаларини синтезлашнинг мунтазам усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш» (2012-2013); №А-5-42-«Априор ноаниқлик шароитида технологик объектларни автоматлаштирилган мониторинги ва бошқаришни интеллектуаллаштиришнинг дастурий инструментал воситаси» (2015-2017); №ОТ-Ф4-78-«Идентификацион ёндашув асосида динамик объектларни адаптив бошқариш системалари синтезининг назарий асослари ва мунтазам усуллари ишлаб чиқиш» (2017-2020) мавзуларидаги лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади идентификацион ёндашув мезонлари асосида технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлаш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

идентификацион ёндашув мезонлари асосида динамик объектларни бошқаришнинг адаптив системаларини синтезлаш усуллари ва алгоритмларининг ривожланишини тизимли таҳлил қилиш;

динамик бошқариш объектларини турғун адаптив параметрик идентификациялаш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш;

динамик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлашнинг турғун усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш;

берк бошқариш контурида динамик объектлар ва бошқариш қурилмалари параметрларини адаптив идентификациялашнинг турғун усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш;

динамик объектларни бошқаришнинг локал-оптимал адаптив системаларида бошқариш таъсирларини шакллантиришнинг турғун усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш;

аниқ технологик объектларни бошқаришнинг адаптив системаларини синтезлаш масалаларини ечишда объект ва бошқариш қурилмалари параметрларини турғун идентификациялаш ва уларнинг алгоритмлари ва ҳисоблаш схемаларини ишлаб чиқиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида тескари алоқа контурида идентификатори бўлган адаптив бошқариш системалари олинган.

Тадқиқотнинг предмети берк бошқариш системаларидаги объектлар ва ростлагичларнинг параметрларини мунтазам адаптив идентификациялаш усуллари ва алгоритмларидан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида тизимли таҳлил, идентификациялаш, динамик баҳолаш, адаптив бошқариш ва нокоррект қуйилган масалаларни ечишнинг умумий услубиятларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

мувофиқлаштириш талабларидан келиб чиққан ҳолда мунтазамлаштириш параметрининг оптимал қийматини ошқора танлаш имконини берувчи турли модели структуралар учун идентификациялаш тенгламасининг бошланғич маълумотлари топшириқлари хатоликларининг баҳолари олинган;

кальман типигаги мунтазамлашган фильтр асосида дисперсиялар минимумлиги мезони бўйича динамик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлашнинг турғун субоптимал алгоритмлари ишлаб чиқилган;

соддалашган мунтазамлаштиришнинг ретроспектив ва итерацияли вариантлари асосида динамик объектларни субоптимал адаптив-локал бошқаришнинг турғун алгоритмлари ишлаб чиқилган;

сингуляр ёйишга асосланган мунтазамлаштириш ва псевдомурожаат усуллари асосида динамик бошқариш объектларини идентификациялашнинг турғун алгоритмлари ишлаб чиқилган;

тўпламли моделлар ва уларнинг параметрларини гаусс тақсимотининг чекли йиғиндиси кўринишидаги силликлантиришдан фойдаланиш асосида мослаштириш ёрдамида рекуррент идентификациялаш алгоритмлари ишлаб чиқилган;

ортогонал бўлмаган факторизациялаш ва ёмон шартланган ёки хос квадрат матрицаларни псевдотескари тартибда ёзиш асосида динамик объектларни локал-оптимал адаптив бошқариш системаларида бошқариш таъсирларини шакллантиришнинг турғун алгоритмлари ишлаб чиқилган;

вариацион тенгсизликлар усулидан фойдаланиб, итератив мунтазамлаштириш тамойили асосида берк бошқариш системасида объект ва ростлагич параметрларини идентификациялашнинг турғун алгоритмлари ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

динамик системаларни идентификациялаш ва адаптив бошқариш масалаларини ечишни дастурий-алгоритмик қўллаб-қувватлашга мўлжалланган дастурий модуллардан тузилган IARE (Identification, Adaptation, Regularization, Estimation) дастурий мажмуаси ишлаб чиқилган;

саноат тажрибаси натижалари асосида меъёрий иш шароитида калий хлоридни қуритиш жараёнининг математик моделлари ишлаб чиқилган;

калийли ўғитлар ишлаб чиқаришда калий хлоридни қуритишнинг технологик жараёнини адаптив бошқариш ҳамда автоматлаштиришнинг структуравий ва функционал схемалари ишлаб чиқилган;

жараёнлар юз беришининг технологик режимларини барқарорлаштириш ва уларнинг фаолияти самарадорлигини ошириш имконини берувчи техник таъминотга мувофиқ ҳолда калий хлоридни қуритишнинг технологик жараёнини бошқариш системаси ишлаб чиқилган;

техник таъминотга мос келувчи буферли танкерда босимни автоматик ростловчи система ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Олинган тадқиқот натижаларининг ишончлилиги услубий жиҳатдан асосланган назарий ҳисоб-китобларни амалга оширилиши, идентификацион ёндашув асосида динамик объектларни адаптив бошқаришнинг назарий асосланган мезонларини қўлланилиши, замонавий автоматик бошқаришнинг амалий синовдан ўтган усуллари ва алгоритмларини ишлатилиши, назарий ва амалий тадқиқотларнинг олинган натижалари ва уларнинг ўзаро мувофиқлиги билан таъминланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти бошқариш жараёнлари сифатини оширишга имкон берувчи тескари алоқа контурида идентификаторли динамик объектларни адаптив бошқаришнинг конструктив турғун усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти берк бошқариш контурида кенг синфдаги технологик объектларни адаптив бошқаришнинг турли масалаларини математик ва алгоритмик таъминотини ишлаб чиқиш ва технологик жараёнларини автоматлаштиришнинг ишлаб чиқилган функционал схемалари узлуксиз характерли ишлаб чиқаришнинг технологик

жараёнларини бошқаришнинг адаптив системалари функционал структураларини қуриш ва лойиҳалашни автоматлаштиришда кенг қўллаш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Идентификацион ёндашув мезонлари асосида технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини қуриш бўйича ишда олинган илмий натижалар асосида:

адаптив бошқариш системаларини синтезлашнинг ишлаб чиқилган усуллари ва мезонлари, берк бошқариш системасида объект ва ростлагич параметрларини идентификациялашнинг мунтазам алгоритмлари, динамик объектларни субоптимал адаптив-локал бошқариш системаси «Дехқонобод калийли ўғитлар заводи» УҚда жорий қилинган («ЎЗКИМЁСАНОАТ» АЖнинг 2018 йил 20 февралдаги 01-736/А-сон маълумотномаси). Натижада калий ўғитини ишлаб чиқаришдаги калий хлоридни қуришиш жараёнидаги технологик режимларини барқарорлаштириш ва унинг ишлаш самарадорлигини ошириш имконини берган;

динамик системаларни идентификациялаш ва адаптив бошқариш масалаларини ечишни дастурий-алгоритмик қўллаб-қувватлашга мўлжалланган дастурий модуллардан тузилган IARE (Identification, Adaptation, Regularization, Estimation) дастурий мажмуаси «Дехқонобод калийли ўғитлар заводи» УҚда жорий қилинган («ЎЗКИМЁСАНОАТ» АЖнинг 2018 йил 20 февралдаги 01-736/А-сон маълумотномаси). Натижада калий хлоридни қуришиш технологик жараёнини идентификациялаш ва бошқаришнинг дастурий-алгоритмик таъминоти амалга оширилган ва бу қуришиш жихозини ишлаш самарадорлигини ошириш имконини берган;

автоматик ростлаш системасининг ишлаб чиқилган синтезлаш алгоритмлари буферли танкернинг босимини стабиллаш учун «IMIR-TRADE GROUP» МЧЖда жорий қилинган («ЎЗКИМЁСАНОАТ» АЖнинг 2018 йил 20 февралдаги 01-736/А-сон маълумотномаси). Натижада буферли танкерда босимни ростлаш жараёнининг сифат кўрсаткичларини ошишига эришилган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқотнинг назарий ва амалий натижалари 17 та халқаро ва 11 та республика илмий-амалий анжуманларида маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 60 та илмий иш, шулардан – 1 та монография, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 21 та мақола, жумладан, 16 таси республика ва 5 таси хорижий журналларда нашр этилиб, ЭҲМ лар учун дастурий маҳсулотларга Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигидан рўйхатдан ўтган 10 та гувоҳнома олинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертация ҳажми 185 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг мақсад ва вазифалари, объект ва предмети тавсифланган, тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги асосланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиқ берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, тадқиқот натижаларини апробацияси, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Динамик объектларни бошқаришнинг адаптив системаларини қуриш ва синтезлаш усуллари ривожланишини тизимли таҳлили**» деб номланган биринчи бобда динамик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлаш ва қуриш усуллари ривожини тизимли таҳлили натижалари, динамик объектларни адаптив бошқариш системаларини қуришга идентификацион ёндашувни шакллантириш, динамик объектларни идентификациялаш ва адаптив бошқариш масалаларидаги муаммоли вазиятларни таҳлили, тадқиқот мақсади ва вазифаларини қўйилиши келтирилган. Ҳозирги вақтда техник тараққий этиш билан боғлиқ ҳолда бошқариш объектлари, ишлаб чиқиладиган ва лойиҳаланаётган бошқариш системаларининг мураккаблашуви сезиларли ортишига сабаб бўлмоқда. Ноаниқлик шароитларда бошқариш масалаларини ечиш учун системаларнинг ишочилигини оширишга, шунингдек лойиҳалашда технологик талабларни камайтиришга имкон берувчи адаптив ва робастли ёндашувлар асосидаги бошқариш системаси мавжуд бўлиши керак. Идентификациялаш ва бошқариш масалаларини ечиш тегишли алгоритмларнинг турғунлик муаммолари билан боғлиқ. Бундай шароитларда идентификациялаш ва бошқаришнинг маълум усуллари кўпинча нотурғун ва ишга ярамайдиган бўлиб қолади. Ҳозирги вақтда шундай фикрга келиндикки, объектнинг модели қаторида ўхшаш объектлар ҳақида тўпланган билимлар ва ҳар хил қўшимча маълумотларга асосланган, объектнинг модели билан боғланган модель ҳам туриши керак. Идентификациялаш ва адаптив бошқариш масаласи тесқари масалаларнинг алоҳида синфи бўлиб, уларда оператор тенгламанинг ечимини, гарчи маълум бўлса-да, қидиришдан кўра операторнинг ўзи – структураси ва параметрлари қидирилади. Ўрганиладиган системанинг аниқ таърифини ўзида қафолатли сақлаган моделлар тўпланими ёзиб чиқишга ҳамма вақт ҳам эришилмайди. Нокорректлилик омили яхши маълум, лекин у юзага келадиган шароитларни аниқлаш ва мувофиқлашган ечимларни қуриш усуллари тадқиқотлар учун, айниқса, маълумотларнинг чекланганлиги аниқ шароитларида долзарб бўлиб қолаверади. Нокорректлилик бундай синф масалаларининг асосий хусусияти бўлганлиги учун у идентификациялаш ва бошқариш масалаларини қайси усул билан ечилишидан қатъий назар юзага келаверади. Таъкидлаш мумкинки, адаптив бошқариш контурида объектни идентификациялаш ва бошқариш мақсадига

хизмат қиладиган воситалар бир-бирига зид бўлади. Агар идентификациялашнинг мақсади объектнинг хусусиятлари, яъни объектнинг бошқарувчи таъсирларга кўрсатадиган ўзига хос реакциялари қандай ривожланишига қараб аниқлаш мумкинлигини ўрганишдан иборат бўлса, бошқаришнинг мақсади, аксинча – турли объектлардаги фарқларни йўқотишдан, объектларга ўтиш жараёнларини мажбурлаб ўз хусусиятлари зарарига юргизишдан иборат.

Юзага келган ҳолат идентификацион ёндашув мезонлари асосида динамик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлаш муаммоларига янгича ёндашувларни ривожлантиришни талаб этади. Шундан келиб чиққан ҳолда, бошқариш объектлари динамикасининг тескари масалалари концепцияси ва мунтазам усулларни жалб этишга асосланган адаптив системаларни синтезлаш масалаларини тизимли изчиллик услубияти муваффақиятли кўринади. Кўриб ўтилган ҳолатлар идентификацион ёндашув мезонлари асосида динамик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлаш усуллари ва алгоритмларини яратиш, уларни саноат ишлаб чиқаришининг муайян технологик жараёнларини автоматлаштириш ва бошқариш масалаларини ечишда амалга оширувчи ҳисоблаш схемаларини синтезлашнинг зарурийлигини кўрсатади.

Диссертациянинг «**Динамик бошқариш объектларини турғун параметрик идентификациялаш алгоритмларини ишлаб чиқиш**» деб номланган иккинчи бобида чизикли бошқариш объектларини параметрик баҳолаш алгоритмлари, берилган дастлабки маълумотларнинг хатолик баҳоларини ишлаб чиқишга, динамик бошқариш объектлари параметрларини адаптив баҳолаш алгоритмларининг мувофиқлигини таҳлил қилишга бағишланган.

Айирмали чизикли тенглама билан ифодаланган динамик системани кўриб чиқамиз:

$$y(t) = \sum_{j=1}^p A_j y(t-j) + \sum_{j=1}^q B_j u(t-j) + v(t), \quad t = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

ёки

$$y(t) = A_1 y(t-1) + \dots + A_p y(t-p) + B_1 u(t-1) + \dots + B_q u(t-q) + v(t),$$

бунда: кириш сигнали $u(t)$ – m ўлчамли вектор, чиқиш сигнали $y(t)$ эса – l ўлчамли вектор, A_i – $(l \times l)$ ўлчамли матрица, B_i – $(l \times m)$ ўлчамли матрица, $v(t)$ – ғалаён.

$A_1, \dots, A_p; B_1, \dots, B_q$ матрицаларнинг элементларини аниқлаш учун (1) тенгламани параметрлаш зарур. Бунинг бир йўли – матрицанинг ҳамма элементларини (ҳаммасининг сони – $(pl + qm) \times l$) (1) дан θ векторга киритишдан иборат. Шунда $((pl + qm) \times l)$ матрицани

$$\theta = [A_1, A_2, \dots, A_p, B_1, \dots, B_q]^T$$

ва $(pl + qm)$ ўлчамли вектор-устунни

$$\varphi(t) = [y^T(t-1) \mid \dots \mid y^T(t-p) \mid u^T(t-1) \mid \dots \mid u^T(t-q)]^T,$$

аниқлаш ва (1) ни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$y(t) = \theta^T \varphi(t) + v(t), \quad (2)$$

бунда $v(t)$ – ўлчашлар халақитлари.

Параметрлашнинг бошқа варианты d ўлчамли вектор-устун θ ва $(l \times d)$ ўлчамли матрица $\varphi^T(t)$ ни шундай шакллантиришдан иборат-ки, (1) ни қуйидагича ёзиш мумкин бўлсин:

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta + v(t). \quad (3)$$

(2) ва (3) тенгламалар ечимлари баҳосини мос равишда қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$\hat{\theta}_N = \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t)\varphi^T(t) + \alpha I \right]^{-1} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t)y^T(t),$$

$$\hat{\theta}_N = \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t)\Lambda^{-1}\varphi^T(t) + \alpha I \right]^{-1} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t)\Lambda^{-1}y(t),$$

бунда Λ – вазн матрицаси, $\alpha > 0$ – мунтазамлаштириш параметри, I – бирлик матрица; бу ерда мунтазамлаштириш параметри α ни квазиоптималлик усули асосида аниқлаш мақсадга мувофиқдир.

θ баҳоларни ҳисоблаб топиш учун динамик филтрлаш усулига асосланган ёндашув ҳам жуда самарали ҳисобланади. Бунинг учун регрессиянинг чизиқли модели (3) ни қуйидаги кўринишда ёзамиз:

$$\theta(t+1) = \theta(t) + w(t), \quad y(t) = \varphi^T(t)\theta(t) + v(t), \quad (4)$$

бунда

$$E[w(t)w^T(j)] = Q(t)\delta(tj), \quad E[v(t)v^T(j)] = R(t)\delta(tj).$$

(4) га нисбатан Кальманнинг адаптив филтрини қўллаб, қуйидагиларни ҳосил қиламиз:

$$\hat{\theta}(t|t-1) = \hat{\theta}(t-1|t-1), \quad (5)$$

$$\hat{\theta}(t|t) = \hat{\theta}(t|t-1) + K(t)[y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t|t-1)], \quad (6)$$

$$K(t) = P(t|t-1)\varphi(t)G_\alpha(D(t)), \quad (7)$$

$$P(t|t-1) = K(t-1)M(v(t)v^T(t))K^T(t-1) + P(t-1), \quad (8)$$

$$P(t) = P(t|t-1) - P(t|t-1)\varphi(t)G_\alpha(D(t))\varphi^T(t)P(t|t-1), \quad (9)$$

бунда $G_\alpha(D(t)) = [D(t) + \alpha I]^{-1}$, $D(t) = \varphi^T(t)P(t|t-1)\varphi(t)$ – мунтазамлаштириш усули учун функцияларни ишлаб чиқариш системаси.

(5)–(9) муносабатларни амалга оширишда мунтазамлаштириш параметри α ни, шунингдек, модели мисоллар усули асосида аниқлаш мақсадга мувофиқдир.

Нокоррект масалаларни ечишда мунтазамлаштириш параметри α ни тўғри аниқлаш учун операторнинг хатолик даражаси ва ўнг қисмини баҳолаш керак. Ушбу мақсадда (3) модели структуранинг матрицали оператори $\varphi^T(t)$, параметрлари вектори θ ва ўнг қисми $y(t)$ ни қуйидаги кўринишда ифодалаймиз:

$$\varphi^T(t) = [y(t-1) \otimes I_l | y(t-2) \otimes I_l | \dots | y(t-p) \otimes I_l | u(t-1) \otimes I_l | u(t-2) \otimes I_l | \dots | u(t-q) \otimes I_l],$$

бунда

$$y(t-i) \otimes I_l = [y_1^1(t-i) | y_2^2(t-i) | \dots | y_l^l(t-i)], \quad \forall i = 1, 2, \dots, p,$$

$$y_1^1(t-i) = \begin{bmatrix} y_1(t-i) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & y_1(t-i) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & y_1(t-i) \end{bmatrix}, \dots, y_l^l(t-i) = \begin{bmatrix} y_l(t-i) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & y_l(t-i) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & y_l(t-i) \end{bmatrix},$$

$$u(t-j) \otimes I_l = [u_1^1(t-j) \mid u_2^2(t-j) \mid \dots \mid u_m^m(t-j)], \forall j=1,2,\dots,q,$$

$$u_1^1(t-j) = \begin{bmatrix} u_1(t-j) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & u_1(t-j) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & u_1(t-j) \end{bmatrix}, \dots, u_m^m(t-j) = \begin{bmatrix} u_m(t-j) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & u_m(t-j) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & u_m(t-j) \end{bmatrix};$$

$$\theta = [a \mid b]^T,$$

бунда

$$a = [a_{11}^1 \dots a_{l1}^1 a_{12}^1 \dots a_{l2}^1 \dots a_{1l}^1 \dots a_{ll}^1 \dots a_{11}^p \dots a_{l1}^p a_{12}^p \dots a_{l2}^p \dots a_{1l}^p \dots a_{ll}^p],$$

$$b = [b_{11}^1 \dots b_{l1}^1 b_{12}^1 \dots b_{l2}^1 \dots b_{1m}^1 \dots b_{lm}^1 \dots b_{11}^q \dots b_{l1}^q b_{12}^q \dots b_{l2}^q \dots b_{1m}^q \dots b_{lm}^q];$$

$$y(t) = [y_1(t) \mid y_2(t) \mid \dots \mid y_l(t)]^T.$$

$$h = \left\{ l^2 \left(\sum_{i=1}^l \delta_{y_i}^2(t) + \sum_{j=1}^m \delta_{u_j}^2(t) \right) \right\}^{1/2}, \quad \sigma = \left\{ l \sum_{i=1}^l \delta_{y_i}^2(t) \right\}^{1/2},$$

бу ерда $\delta_{y_i}^2(t)$ ва $\delta_{u_j}^2(t)$ – кириш ва чиқиш ўзгарувчилари векторлари $u_j(t), j=1,2,\dots,m$ ва $y_i(t), i=1,2,\dots,l$ нинг тегишли дисперциялари хатоликлари.

Бошқа модели структуралар учун ҳам шу каби баҳолаш олинган. Модели структураларнинг бошланғич маълумотларини топшириқлари хатоликларини баҳолаш учун олинган ифодалар бевосита ҳисоблаш ишларини бажарилмай туриб, изланаётган ечим хатосини баҳолаш имконини беради.

Динамик бошқариш объектларининг параметрларини адаптив баҳолаш алгоритмлари самарадорлигини баҳолаш учун уларнинг мувофиқлигини таҳлил қилиш керак. Тасодифий ғалаёнлар мавжудлигида Кальман фильтри асосида оптимал стохастик огоҳлантиргич қўллаш мақсадга мувофиқдир. Огоҳлантиргичнинг кириш-чиқиш бўйича ҳаракати қуйидаги тенглама билан ифодаланади:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})w(t),$$

бунда $\{w(t)\}$ оқ шовқиннинг инновацияли кетма-кетлиги, $C(q^{-1})$ эса барқарор Кальман фильтрининг махражидаги кўпҳади бўлиб, у қуйидаги шартни қаноатлантиради:

$$|C(z^{-1})| \neq 0 \text{ при } |z| \geq 1,$$

(z – ўзгарувчи, Z – ўзгартиришлар).

Градиентли схемага нисбатан параметрлар ва ҳолатларни баҳолаш қуйидаги алгоритм ёрдамида амалга оширилиши мумкин:

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \frac{\phi(t-1)}{r(t-1)} [y(t) - \phi(t-1)^T \hat{\theta}(t-1)],$$

бунда

$$r(t-1) = r(t-2) + \phi(t-1)^T \phi(t-1), \quad \hat{\theta}(t) = [\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_n, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_m, \hat{c}_1, \dots, \hat{c}_n],$$

$$\begin{aligned}\phi(t-1)^T &= [-y(t-1), \dots, -y(t-n), \dots, u(t-d-m), e(t-1), \dots, e(t-n)], \\ e(t) &= y(t) - \phi(t-1)^T \hat{\theta}(t-1).\end{aligned}$$

Бунда $e(t)$ ни огоҳлантириш хатоси $\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) - \theta_0$ параметрларнинг баҳолаш хатоси билан қуйидаги нисбат орқали боғланган:

$$C(q^{-1})e(t) = -\phi(t-1)^T \tilde{\theta}(t-1).$$

Олинган ифодалар Кальман филтрити базасидаги оптимал стохастик огоҳлантиргичдан фойдаланиб, градиентли схемалар асосида динамик объектларни алоҳида ва биргаликда адаптив баҳолаш ва бошқариш алгоритмларининг мувофиқлигини баҳолаш имконини беради.

Диссертациянинг «**Динамик объектларни адаптив бошқаришнинг турғун алгоритмларини ишлаб чиқиш**» деб номланган учинчи бобда адаптив бошқаришнинг турғун алгоритмларини ишлаб чиқиш, ростлагич параметрларини баҳолаш, динамик объектларни адаптив бошқариш жараёнларини дисперсиянинг минимумлиги мезони бўйича синтезлаш, башоратловчи моделлар асосида динамик объектларни субоптимал адаптив-локал бошқариш, адаптив баҳолаш ва бошқариш алгоритмларини синтезлаш натижалари келтирилган.

Қуйидаги модель билан ифодаланган чизиқли системани кўриб чиқамиз:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + \xi(t), \quad (10)$$

бунда $A(q^{-1}) = I - \sum_{j=1}^p A_j(q^{-1})^j$, $B(q^{-1}) = \sum_{j=1}^q B_j(q^{-1})^j$, $u(t)$ – $(m \times 1)$ ўлчамли кириш, $y(t)$ – $(l \times 1)$ ўлчамли чиқиш, $\xi(t)$ – $(l \times 1)$ ўлчамли тасодифий кетма-кетлик.

Кўрсатиш мумкинки, барқарор ҳолатдаги оптимал огоҳлантиргич $z(t) = \zeta(q)y(t)$ учун қуйидаги тенгламани қаноатлантиради:

$$\bar{C}(q^{-1})\hat{z}(t) = \bar{\beta}(q^{-1})u(t) + \bar{\alpha}(q^{-1})y(t),$$

бунда

$$\begin{aligned}\bar{C}(q^{-1}) &= I + \bar{C}_1 q^{-1} + \dots + \bar{C}_n q^{-n}, \quad \bar{\beta}(q^{-1}) = \bar{\beta}_0 + \bar{\beta}_1 q^{-1} + \dots + \bar{\beta}_l q^{-l}, \quad \bar{\beta}_0 = V, \\ \bar{\alpha}(q^{-1}) &= \bar{\alpha}_0 + \dots + \bar{\alpha}_r q^{-r}.\end{aligned}$$

$\zeta(q)y(t)$ нинг $\zeta(q)y^*(t)$ га нисбатан ростлашнинг минимал ковариациясини таъминлайдиган ростлагич қуйидаги тенглама ёрдамида аниқланади:

$$\bar{\beta}(q^{-1})u(t) + \bar{\alpha}(q^{-1})y(t) = \bar{C}(q^{-1})\zeta(q)y^*(t),$$

бунда $\{y^*(t)\}$ берилган зарурий траекторияни ўзида акс эттиради; шунинг учун чиқиш $y(t) - y^*(t)$ ни кузатиш бўйича хатолиги қуйидаги тенгламани қаноатлантиради:

$$\bar{C}(q^{-1})\zeta(q)[y(t) - y^*(t)] = \bar{C}(q^{-1})F(q)\xi(t).$$

(10) моделни огоҳлантириш хатосидан бир қадам олдинги огоҳлантиргич деб қараш мумкин:

$$\xi(t) = y(t) - \hat{y}(t),$$

бунда

$$\hat{y}(t) = E\{y(t) | F_{t-1}\}.$$

(10) тенглама ёрдамида d қадам олдин огоҳлантириш хатосини қуйидаги айниятдан фойдаланиб олишимиз мумкин:

$$I = \tilde{F}(q^{-1})A(q^{-1}) + q^{-d}\tilde{G}(q^{-1}), \quad (11)$$

бунда

$$\tilde{F}(q^{-1}) = \tilde{F}_0 + \tilde{F}_1q^{-1} + \dots + \tilde{F}_{d-1}q^{-d+1}, \quad \tilde{G}(q^{-1}) = \tilde{G}_0 + \tilde{G}_1q^{-1} + \dots$$

(10) ни $\tilde{F}(q^{-1})$ га кўпайтириб ва (11) айниятдан фойдаланиб, қуйидаги тенгламани ҳосил қиламиз:

$$E\{y(t+d) | F_t\} = \tilde{G}(q^{-1})y(t) + \Gamma_2(q^{-1})\xi(t) + \tilde{\beta}(q)u(t),$$

бунда

$$\tilde{\beta}(q) = q^d\tilde{F}(q^{-1})B(q^{-1}) = \tilde{\beta}_0 + \tilde{\beta}_1q + \dots + \tilde{\beta}_{d-1}q^{d-1} + \beta'(q^{-1}),$$

$$\beta'(q^{-1}) = \beta'_1q^{-1} + \beta'_2q^{-2} \dots, \quad \Gamma_2(q^{-1}) = \Gamma_{20} + \Gamma_{21}q^{-1} + \dots$$

$E\{y(t+d) | F_t\}$ ни нолга келтирадиган ва энг кичик энергияга эга бўладиган бошқариш қонунини қуйидаги ифода орқали топиш мақсадга мувофиқ:

$$u(t+j) = -\tilde{L}_j[\tilde{G}(q^{-1})y(t) + \Gamma_2(q^{-1})\xi(t)]; \quad j=0, \dots, d-1, \quad (12)$$

бунда

$$\tilde{L}_j = [\tilde{\beta}_j]^T \left[\sum_{k=0}^{d-1} \tilde{\beta}_k \tilde{\beta}_k^T + \alpha I \right]^{-1},$$

$\alpha > 0$ – мунтазамлаштириш параметри.

Келтирилган (12) субоптималь бошқариш қонунини (10) моделга кирган $A(q^{-1})$ ва $B(q^{-1})$ матрицаларни бирор бир алгоритмдан фойдаланиб, адаптивга айлантириш мумкин.

Оптималь адаптив системалар назариясида объектга тегишли қатор жиддий параметрлар ва омиллар номаълум бўлган шароитлар учун динамик объектларни бошқариш усуллари ишлаб чиқилмоқда. Бундай ҳолларда бошқаришнинг локал-оптималь алгоритмларидан фойдаланиш мақсадга мувофиқдир.

Динамик объектни локал-оптималь бошқариш қуйидаги тенгламалар билан ифодаланади:

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t + \xi_{t+1},$$

$$y_t = H^T x_t, \quad t=0,1,\dots,$$

бу ерда $x_t \in R^n$ – ҳолат вектори; $u_t \in R^m$ – бошқариш таъсирлари; $y_t \in R^l$ – кузатиладиган чиқиш; A, B, H – тегишли ўлчамдаги матрицалар; ξ_1, ξ_2, \dots – $V(x) = x^T Cx$, $C^T = C \geq 0$ мезонга жавоб берадиган тасодифий векторлар кетма-кетлиги бўлиб, қуйидаги тенглама ёрдамида аниқланади:

$$u_t^* = \underset{u_t}{\operatorname{argmin}} E[\Delta V(x_t, u_t) / x_0^t, u_0^{t-1}],$$

бунда $\Delta V(x_t, u_t) = V(Ax_t, Bu_t) - V(x_t)$.

$E(\xi_{t+1} / x_0^t, u_0^t) = 0$, $E(\xi_{t+1} \xi_{t+1}^T / x_0^t, u_0^t) = K = \text{const}$ шарт бажарилганда бошқариш u_t^* ни қуйидаги тенгламадан аниқланади:

$$B^T C B u_t^* = -B^T C A x_t, \quad (13)$$

шунинг учун $\Delta V(x_t, u_t^*) = -x_t^T Q x_t$, $Q = C - A^T C A + A^T C B (B^T C B)^+ B^T C A$.

Шундай қилиб, (13) асосида бошқариш u_t^* қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$u_i^* = \theta^T x_i,$$

бунда θ^T куйидаги ифода орқали топилади:

$$B^T C B \theta^T = -B^T C A. \quad (14)$$

(13) ёки (14) тенгламалар системаси ёмон шартланган бўлиши мумкин. Ёмон шартланган ва хос системалар берилган аниқлик чегараларида яхши кўринмайдиган бўлиши мумкин. (14) тенглама асосида бошқариш қонунини баҳолайдиган мунтазам алгоритмни келтирамиз. $B^T C B = D$, $-B^T C A = S$ деб қабул қиламиз.

Шунда

$$D \theta^T = S. \quad (15)$$

Силликлантириш учун куйидаги шартларни киритамиз:

$$\|D - \bar{D}\| \leq h, \|s_j - \bar{s}_j\| \leq \delta,$$

бунда \bar{D} , \bar{s}_j – матрица D ва S матрицанинг j -устунининг ($j=1,2,\dots,n$) аниқ қийматлари.

(15) тенгламанинг псевдоечими $\theta_j^* = D^+ s_j$ га яқинлашувни куйидаги кўринишда тузамиз:

$$\theta_{j,r} = g_r(D) s_j, \quad (16)$$

$$\bar{\theta}_{j,r} = g_r(D) D \theta_{j,r}, \quad (17)$$

бунда θ_j – матрицалар θ^T ($j=1,2,\dots,n$) нинг j -чи устуни; s_j – матрицалар S нинг j -чи устуни.

Матрицали операторлар D ўз-ўзидан тутташишини ҳисобга олиб, (16) тенгламанинг ечимини мунтазамлаштириш учун М.М.Лаврентьев усулидан фойдаланамиз. М.М.Лаврентьев усулига тегишли функциялар:

$$g_r(\lambda) = (\alpha + \lambda)^{-1}, \quad \alpha = r^{-1}, \quad 0 \leq \lambda < \infty.$$

Шунда (16) ва (17) яқинлашишлар куйидагича кўринишга келади:

$$\theta_{j,\alpha} = (D + \alpha I)^{-1} s_j, \quad \bar{\theta}_{j,\alpha} = (D + \alpha I)^{-1} D \theta_{j,\alpha}.$$

Кўрилатган усулнинг итератив вариантыга ўтиб, куйидагича ёзиш мумкин:

$$\begin{aligned} \theta_0 &= 0, \quad \theta_j^{(l)} = \theta_j^{(l-1)} - B_\alpha (D \theta_j^{(l-1)} - s_j), \quad l=1,\dots,r, \\ \bar{\theta}_0 &= 0, \quad \bar{\theta}_j^{(l)} = \bar{\theta}_j^{(l-1)} - \bar{B}_\alpha (D \bar{\theta}_j^{(l-1)} - D \theta_{j,r}), \quad l=1,\dots,r. \\ B_\alpha &= g(D), \quad \bar{B}_\alpha = B_\alpha D B_\alpha. \end{aligned}$$

r параметрни танлаш куйидаги кўринишдаги муносабат орқали амалга оширилса, мақсадга мувофиқдир:

$$\|D \theta_{j,r} - s_j\| = b(\delta + \|\theta_{j,r}\| h), \quad b > 1.$$

Бобда шунингдек, башоратловчи моделлар асосида динамик объектларни адаптив баҳолаш ва бошқаришнинг алгоритмлари, адаптив бошқариш системаларининг диссипативлиги ҳақидаги масалаларда ростлагич параметрларини баҳолаш, адаптив бошқаришнинг мунтазамлаштирилган рекуррент алгоритмларини куриш саволлари кўриб чиқилган.

Диссертациянинг «Берк бошқариш контуридаги динамик объектларнинг параметрларини адаптив идентификациялашни турғун усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш» деб номланган тўртинчи бобида берк бошқариш контурида адаптив идентификациялашнинг турғун усуллари ва алгоритмлари, моделлар тўплами ва ростлагич параметрлари ёрдамида объектларни рекуррент идентификациялаш, динамик объектларни локал-оптимал адаптив бошқариш системаларида бошқариш таъсирларини шакллантириш алгоритмларини ишлаб чиқишга бағишланган.

Берк системада бошқариш объекти n -тартибли айирмали тенглама билан ифодаланган бўлсин:

$$x[k] = \sum_{i=1}^p a_i x[k-i] + \sum_{j=1}^q b_j \eta[k-j],$$

$$y[k] = x[k] + v[k]; \quad \eta[k] = u[k] + w[k],$$

бунда $\eta[k]$ ва $x[k]$ – объектнинг кириш ва чиқишлари; $w[k]$ ва $v[k]$ – мос равишда чиқишни ўлчагандаги ғалаён таъсири ва хатолик; $u[k]$ ва $y[k]$ – идентификациялаш амалиётида кириш ва чиқиш маълумотлари сифатида фойдаланиладиган чиқишни ўлчагандаги бошқариш таъсири ва натижа; a_i, b_j – объектнинг номаълум параметрлари. $v[k]$ ларнинг кетма-кетлиги ғалаён $w[k]$, сигналлар $u[k]$ ва $y[k]$ нинг олдинги қийматлари билан корреляцияланмаган.

Ростлагичнинг айирмали тенгламаси куйидагича:

$$u[k] = \sum_{i=1}^{l_1} c_i u[k-i] + \sum_{j=0}^{l_2} d_j \varepsilon[k-j],$$

$$\varepsilon[k] = y^*[k] - y[k],$$

бунда $y^*[k]$ – топшириқнинг жорий қиймати; $\varepsilon[k]$ – номутаносиблик сигнали; c_i, d_j – ростлагичнинг маълум параметрлари.

Идентификациялашнинг кўриб чиқилаётган масаласини ечишда объект параметрларининг θ векторини куйидаги тенглама асосида аниқлаш керак

$$H \cdot \theta = Y,$$

бу ерда H матрица ва Y вектор бошқариш таъсирлари $u[k]$ ва чиқиш $y[k]$ ларни амалга ошириш асосида шакиллантирилади, $\theta = [a_1 \dots a_p \mid b_1 \dots b_p]^T$.

Ушбу масалани ечими А.Н.Тихоновнинг мунтазамлаштириш ва матрицани сингуляр ёйишга асосланган самарали псевдотескари тартибда ёзиш усуллари асосида амалга оширилди. Мунтазамлаштириш тамойили изланаётган ечим $\hat{\theta}$ ни куйидаги тенглама асосида баҳолашга олиб келади:

$$\hat{\theta}_\alpha = (H^T H + \alpha I)^{-1} H^T Y,$$

бунда $\alpha > 0$ – мунтазамлаштириш параметри, I – бирлик матрица.

Агар бошланғич маълумотларнинг хатолик даражаси маълум бўлса

$$h = \|H - \bar{H}\|, \quad \delta = \|Y - \bar{Y}\|,$$

унда мунтазамлаштириш параметри α ни умумлашган хатолик тамойили асосида аниқлаш мумкин, бунда \bar{H} ва \bar{Y} – матрицали оператор H ва ўнг қисм вектори Y нинг аниқ қийматлари. Агар h ва δ нинг қийматлари

номаълум бўлса, мунтазамлаштириш параметри α ни квазиоптималлик усули асосида аниқлаш мақсадга мувофиқдир:

$$\|\hat{\theta}_{\alpha_{i+1}} - \hat{\theta}_{\alpha_i}\| = \min, \quad \alpha_{i+1} = \kappa\alpha_i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, \quad 0 < \kappa < 1.$$

Агар матрица H лар рангини $r = p$ белгиласак, у ҳолда $\hat{\theta}$ параметрларнинг вектор баҳосини самарали псевдотескари тартибда ёзиш усуллари асосида аниқлаш мақсадга мувофиқ:

$$\hat{\theta}_\tau = VS_\tau U^T Y = \sum_{i=1}^{r'} \frac{1}{\mu_i} v_i \cdot u_i^T,$$

бунда S_τ^+ – самарали псевдотескари матрица $S = \text{diag}(s_{1\tau}^+, \dots, s_{n\tau}^+)$; агар $\mu_i > \tau$ бўлса, $r' < r$, $s_{i\tau}^+ = 1/\mu_i$ ва агар $\mu_i = 0$ бўлса, $s_{i\tau}^+ = 0$.

Бошқариш жараёнларини сифатини таҳлил қилиш учун яқинлашув шартларини таҳлил қилиш керак. Кириши $u(t)$ ва чиқиши $y(t)$ тенглама билан ифодаланган бошқариш объектини кўриб чиқамиз:

$$A(d)y(t) = B(d)u(t) + \xi(t),$$

бунда A ва B – тескари суриш оператор d ли кўпхадлар бўлиб,

$$(1 + a_1 d + \dots + a_n d^n)y(t) = (b_1 d + \dots + b_m d^m)u(t) + \xi(t),$$

$$y(t) = -a_1 y(t-1) - \dots - a_n y(t-n) + b_1 u(t-1) + \dots + b_m u(t-m) + \xi(t),$$

ёки

$$y(t) = \theta^T \varphi(t) + \xi(t),$$

бунда:

$$\theta = [a_1 \dots a_n : b_1 \dots b_m]^T, \quad \varphi(t) = [-y(t-1) \dots -y(t-n) : u(t-1) \dots u(t-m)]^T.$$

Стационар оқ шовқин $\xi(t)$ нинг математик кутилмаси ва дисперсияси σ_ξ^2 нолга тенг, деб фараз қилинади. Параметрлари ўзгарувчан идентификацияланадиган системани ҳолатлар фазосида қуйидаги динамик моделлар билан ифодалаш мумкин:

$$\left. \begin{aligned} \theta(t-1) &= \theta(t) + w(t) \\ y(t) &= \varphi^T(t) \hat{\theta}(t) + \xi(t) \end{aligned} \right\}^2$$

бунда $\xi(t)$ ва $w(t)$ – кўзғалишлар, $w(t)$ система параметрларининг ўзгариш жараёнларини моделлаштиради.

Агар параметрларнинг ўзгариш жараёнини коварицион матрицаси ўзгарадиган гаусс тақсимотидан фойдаланиш билан боғлиқ бўлса, унда классик Кальман филтритдан фойдаланиш мумкин. Ушбу ҳолатда $w(t)$ гаусс тақсимотига оид бўлмагани сабабали Кальман филтри оптимал баҳолашни таъминлайди. Бундай ҳолда қуйидаги кўринишдаги алгоритмдан фойдаланиш мақсадга мувофиқ:

$$P_i(t) = P_i(t-1) - \frac{P_i(t-1)\varphi^T(t)\varphi(t)P_i(t-1)}{R_2 + \varphi^T(t)P_i(t-1)\varphi(t)}, \quad i = 1, 2, \dots, M,$$

$$\varepsilon_i(t) = y(t) - \varphi^T(t)\bar{\theta}_i(t-1), \quad \bar{\theta}_i(t) = \bar{\theta}_i(t-1) + \frac{1}{R_2} P_i(t)\varphi(t)\varepsilon_i(t),$$

бунда R_2 – шовқин дисперсияси.

Параметрлар вектори $\theta(t)$ нинг баҳоси $\hat{\theta}(t)$ қуйидагича топилади:

$$\hat{\theta}(t) = \sum_{i=1}^M \beta_i(t) \bar{\theta}_i(t).$$

Амалий масалаларда кенг қўлланадиган объектида ва бошқариш қурилмасида шовқинли моделлар синфини кўриб чиқамиз. Шовқинли бошқариш системасининг бу синфини қуйидаги кўринишдаги тенгламалар билан ифодалаш мумкин:

$$y_n = \sum_{i=1}^p a_i y_{n-i} + \sum_{i=1}^q b_i u_{n-i} + \sigma_1 v_{1n},$$

$$u_n = \sum_{i=1}^{\mu} c_i y_{n-i} + \sum_{i=1}^{\nu} d_i u_{n-i} + \sigma_2 v_{2n},$$

бунда $\{u_n\}$, $\{y_n\}$ – мос равишда объектнинг кириш ва чиқишида кузатиладиган кетма-кетликлар; $\{v_{1n}\}$, $\{v_{2n}\}$ – қўшма тақсимоли бўйича математик кутилмаси нолга тенг ва бирлик дисперсияли гаусс кетма-кетликлари. Бунда:

$$M[v_{1k} v_{1j}] = M[v_{2k} v_{2j}] = \delta_{kj}, \quad M[v_{1n} y_{n-j}] = M[v_{2n} y_{n-j}] = 0, \quad M[v_{1n} u_{n-j}] = M[v_{2n} u_{n-j}] = 0,$$

$$M[v_{1n} u_{2m}] = \rho \delta_{nm} \quad (j \geq 1), \quad 1 > \rho > -1, \quad \delta_{nm} \text{ – Кронекер белгиси.}$$

Объект ва бошқариш қурилмасининг изланаётган параметрларини аниқлаш учун қуйидаги тенгламалар системасини ечиш зарур:

$$S \cdot \theta = y, \quad (18)$$

ёки кенгайтирилган шаклда:

$$S = \begin{bmatrix} \alpha_{11} S_1^T S_1 & \alpha_{11} S_1^T S_2 & \alpha_{12} S_1^T S_1 & \alpha_{12} S_1^T S_3 \\ \alpha_{11} S_2^T S_1 & \alpha_{11} S_2^T S_2 & \alpha_{12} S_2^T S_1 & \alpha_{12} S_2^T S_3 \\ \alpha_{12} S_3^T S_1 & \alpha_{12} S_3^T S_2 & \alpha_{22} S_3^T S_1 & \alpha_{22} S_3^T S_3 \\ \alpha_{12} S_1^T S_1 & \alpha_{12} S_1^T S_2 & \alpha_{22} S_1^T S_1 & \alpha_{22} S_1^T S_3 \end{bmatrix}, \quad \theta = \begin{bmatrix} \hat{\theta}_1 \\ \hat{\theta}_2 \\ \hat{\theta}_3 \\ \hat{\theta}_4 \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} \alpha_{11} S_1^T Y_N + \alpha_{12} S_1^T S_N \\ \alpha_{11} S_2^T Y_N + \alpha_{12} S_2^T S_N \\ \alpha_{12} S_3^T Y_N + \alpha_{22} S_3^T S_N \\ \alpha_{12} S_1^T Y_N + \alpha_{22} S_1^T S_N \end{bmatrix}.$$

бу ерда Y_N , S_N векторлар ва S_1, S_2 матрицалар $\{u_n\}$, $\{y_n\}$, $n = 0, 1, \dots, N$ кириш ва чиқиш сигналларини амалга ошириш асосида шакллантирилади; $\alpha_{11} = \sigma_2^2$, $\alpha_{12} = -\rho \sigma_1 \sigma_2$, $\alpha_{22} = \sigma_1^2$; θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 параметрлар қуйидаги ифодалар орқали аниқланади:

$$\theta_1^T = (a_1, \dots, a_k, b_1, \dots, b_l), \quad \theta_2^T = (a_{k+1}, \dots, a_p, b_{l+1}, \dots, b_q),$$

$$\theta_3^T = (c_1, \dots, c_k, d_1, \dots, d_l), \quad \theta_4^T = (c_{k+1}, \dots, c_\mu, d_{l+1}, \dots, d_\nu).$$

(18) турдаги оператор матрицали тенгламани ечиш масаласини хатолик функционалини минималлаштириш масаласига айлантириш мумкин, яъни В.К.Иванов усули бўйича берк Q тўпламда тенгламанинг квазиечимини топишга келтирилади. Қолдиқ сифатида қуйидаги квадратик функционални олишимиз мумкин:

$$\Phi(\theta) = \|S\theta - y\|_H^2.$$

У ҳолда $\hat{\theta}_r$ учун итератив кетма-кетлигини қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$\hat{\theta}_{r+1} = P_Q(\hat{\theta}_r - \alpha_r (F_\delta(\hat{\theta}_r) + \varepsilon_r \hat{\theta}_r)), \quad r = 0, 1, \dots,$$

бунда P_Q – метрик проектор; $\partial\Phi = F$, r – итерация рақами; мунтазамлаштириш параметрлари $\alpha_r > 0$, $\varepsilon_r > 0$ қуйидаги тенгламадан аниқланади:

$$\alpha_r = (1+r)^{-1/2}, \quad \varepsilon_r = (1+r)^{-p}, \quad 0 < p < 1/2.$$

Кўриб чиқилаётган итерация жараёнини қуйидаги шаклдаги ўзаро муносабат асосида амалга ошириш мумкин:

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \delta / \varepsilon_{r(\delta)} = 0, \quad \lim_{\delta \rightarrow 0} \delta^{1/2} / \varepsilon_{r(\delta)}^2 = 0,$$

$$\rho(F_\delta - F) \leq \delta, \quad \delta \geq 0, \quad F_\delta \in \mathcal{F}.$$

Шу билан биргаликда:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \|\theta_\varepsilon - \theta^*\| = 0,$$

бунда $\theta^* \in \Xi$ – (18) масаласига тегишли вариацион тенгсизлик ($M(\theta), \theta - d \leq 0$, $\forall d \in \Xi$ нинг ягона ечими, Ξ – ечимлар тўплами.

Берк системаларда ростлагични синтезлашда локал-оптимал адаптив бошқариш усуллари жуда кўп қўлланилади. Берилган шаклдаги бошқариш объектини кўриб чиқамиз:

$$A(z^{-1})y_{t+1} = B(z^{-1})u_t + w_{t+1},$$

бунда $y_t \in R^l$ – ўлчанадиган чиқишлар; $u_t \in R^m$ – бошқариш.

Шунда, қуйидагиларни ҳисобга олганда

$$u_t = \theta^T (\Omega_t) \eta_t, \quad \eta_t^T = (y_{t-n+1}^T, \dots, y_t^T, u_{t-n+1}^T, \dots, u_t^T), \quad (19)$$

$$\Omega^T = (-A^{(n)}, \dots, -A^{(1)}, B^{(n-1)}, \dots, B^{(0)}), \quad \Phi_t^T = (y_{t-n+1}^T, \dots, y_t^T, u_{t-n+1}^T, \dots, u_t^T), \quad (20)$$

локал-оптимал бошқариш қонуни қуйидаги кўринишни олади:

$$u_t = (H^T B^{(0)})^{-1} [(A^{(1)} + S^{(1)})y_t + \dots + (A^{(n)} + S^{(n)})y_{t-n+1} + (-B^{(1)} + D^{(1)})u_{t-1} + \dots + (-B^{(n-1)} + D^{(n-1)})u_{t-n+1}], \quad (21)$$

бунда $S^{(i)}$, $i = \overline{1, n}$ ва $D^{(j)}$, $j = \overline{1, n-1}$ – мос равишда $l \times l$ ва $l \times m$ ўлчамли ихтиёрий матрицалар; H – $m \times l$ ўлчамли шундай матрица-ки, унда $\det H^T B^{(0)} \neq 0$.

(21) ифодада $G^{(0)} = H^T B^{(0)}$ кўринишдаги квадрат матрица аввалги ҳолатига қайтади. Бу матрицалар ёмон шартланган бўлиши мумкин. Қуйида (21) тенгламадаги тесқари матрица G^{-1} ни турғун баҳолаш алгоритмини келтирамиз.

Псевдотесқари матрица учун яқинлашиш қуйидаги муносабат ёрдамида аниқланиши мумкин:

$$G_\varepsilon^+ = R_k^+ U_k^+, \quad (22)$$

бунда R_k , U_k – қуйидаги ифодалар ёрдамида аниқланади:

$$G_\varepsilon = U_k R_k, \quad U_k^T = [U_1^T : U_2^T], \quad R_k = [R_1 : R_2], \quad U_2 = G_{21}^{(k)}, \quad (23)$$

$$R_2 = G_{12}^{(k)}, \quad U_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ g_{21}^{(k)} & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{k1}^{(k)} & g_{k2}^{(k)} & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad R_1 = \begin{bmatrix} g_{11}^{(k)} & g_{12}^{(k)} & \dots & g_{1k}^{(k)} \\ 0 & g_{22}^{(k)} & \dots & g_{2k}^{(k)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & g_{kk}^{(k)} \end{bmatrix}. \quad (24)$$

Диссертациянинг «Калий хлоридни қуритиш технологик жараёнини автоматлаштириш ва бошқариш масалаларида ишлаб чиқилган усуллар ва алгоритмларни жорий қилиш» деб номланган бешинчи бобда идентификацион ёндашув мезонлари асосида динамик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлашнинг ишлаб чиқилган усуллари ва алгоритмларини калий хлоридни қуритиш технологик жараёнининг автоматлаштириш ва бошқаришда қўлланиш натижалари келтирилган.

Бошқариш объекти сифатида калий хлоридни қуритиш жараёни расмийлаштирилиб, кўриб чиқиладиган жараёни тавсифловчи асосий кўрсаткичлар сифатида қуйидаги асосий ўзгарувчилар олинган: бошқариш параметрлари $U = (u_1, u_2)$, бу ерда u_1 – қуритиш барабани киришидаги иссиқлик ташувчининг ҳарорати, u_2 – қуритиш барабани киришидаги иссиқлик ташувчи сарфи; чиқиш параметрлари $Y = (y_1, y_2)$, бу ерда y_1 – қуритиш барабани чиқишидаги қуритилган материал намлиги, y_2 – қуритиш барабани чиқишидаги иссиқлик ташувчи ҳарорати; назорат қилинмайдиган ғалаён таъсирлари $W = (w_1, w_2, w_3)$, где w_1 – қуритиш барабани киришида қуритиладиган материал сарфи, w_2 – қуритиш барабани киришида қуритиладиган материалнинг бошланғич намлиги, w_3 – қуритиладиган материалнинг заррачаларини тарқалиш таркиби.

Кўриб чиқиладиган калий хлоридни қуритиш жараёнининг чизикли ностационар кўп ўлчамли моделини қуйидаги кўринишда ифодалаймиз:

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k, \quad (25)$$

$$y_k = C_k x_k + v_k, \quad (26)$$

бунда x , y , u – мос равишда объектнинг n , m , m ўлчамли вектор ҳолати, чиқиши ва бошқариш; A , B ва C – объектнинг $[n \times n]$, $[n \times m]$, $[m \times n]$ ўлчамли ҳақиқий параметрлари матрицаси; w , v – мос равишда математик кутилмалари нолга тенг бўлган маълум жадаллашуви $Q_i \delta_{ij}$, $R_i \delta_{ij}$ объектнинг оқ гауссли шовқини ва ўлчаш ҳалақити.

Калий хлоридни қуритиш жараёнини бошқариш объекти сифатида дастлабки тадқиқ қилиниши шуни кўрсатди-ки, объект параметрларининг муносабатида квазистационарлик мезонларини қабул қилишимиз мумкин, объектнинг ўзи эса тўлиқ бошқарилувчан ва идентификацияланувчан ҳисобланади. Математик моделларни олиш ва амалиётда ишлатиш учун «Деҳқонобод калийли ўғитлар заводи» УҚда калий хлоридни қуритиш технологик жараёнини нормал шароитда ишлашида саноат тажрибаси ўтказилган. Параметрларни қайд этиш вақти T ва жараён ўзгарувчанларининг амалга оширилиши тўғрисида маълумотларни олиш интервали Δt у ёки бу параметрларни ўлчашни амалга ошириш хусусиятлари ва тавсияларни мослигини инобатга олган ҳолда танланганлар. Кузатиладиган тасодифий жараёнларни амалга оширилишини қайд этиш вақти ва дискретлаштириши қуйидагига тенг бўлган: $T = 5$ соат, $\Delta t = 2$ мин. Жами 150 ўлчашлар амалга оширилган.

(25) тенгламада A_i ва B_i матрицаларнинг изланаётган қиймати квазистационарликнинг турли интерваллари учун Мейна баҳолагичи асосида ҳисобланди. Масалан, квазиостационарликнинг биринчи иккита интервали учун улар қуйидаги кўринишда бўлади:

биринчи интервал учун (1-50 рақамли ўлчашлар)

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0,748 & | & 0,187 \\ \hline -0,564 & | & 0,671 \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0,644 & | & -0,771 \\ \hline 0,597 & | & 0,327 \end{bmatrix}.$$

иккинчи интервал учун (51-100 рақамли ўлчашлар)

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0,683 & | & 0,296 \\ \hline -0,351 & | & 0,723 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0,732 & | & 0,352 \\ \hline 0,882 & | & 0,612 \end{bmatrix}.$$

Ишлаб чиқилган моделнинг монандлиги қолдиқ хоссаларини таҳлилига асосланган мезон асосида ўрнатилган. Ишлаб чиқилган математик моделлар асосида калий хлоридни қуритиш жараёнининг адаптив бошқариш системасини синтезлаш масаласини кўриб чиқамиз. Бошқариш қонунини қуйидаги кўринишда қабул қиламиз:

$$u_t = \theta^T(\Omega_t)x_t,$$

бунда $\theta(\Omega)$ – берилган матрицали функция, Ω_t – Майна баҳолагичи асосида олинадиган $\Omega^T = (A, B)$ матрицаларнинг дастлабки баҳоси.

Объектнинг ҳолат вектори x_t ни баҳолаш учун анъанавий Кальман филтритдан фойдаланилган.

Кўриб чиқилаётган объектнинг ўзига хос хусусиятларини инобатга олган ҳолда бошқаришда кечикиш мавжуд бўлганда, бошқариш системасини синтезлаш масаласини кўриб чиқамиз. Бошқариш объекти ўзида кечикиш тўпламлари $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_J$ ни тавсифлайди деб, фараз қилсак, (25) тенглама ўрнига объект тенгламаси қуйидаги кўринишда бўлади:

$$x_{k+1} = A_k x_k + \sum_{j=1}^J B_{j,k} u_{k-\theta_j} + w_k, \quad (k = 0, 1, \dots, N-1; x_0, u_{-1}, \dots, u_{-\theta_J}, \text{топшириқлар}),$$

бунда θ_j – қулай бўлиши учун ортиб бориш тартибида жойлаштириб ҳисобланадиган турлича бутун сонлар ва барча $B_{j,k}$ матрицалар $n \times m$ ўлчамга эга бўлади.

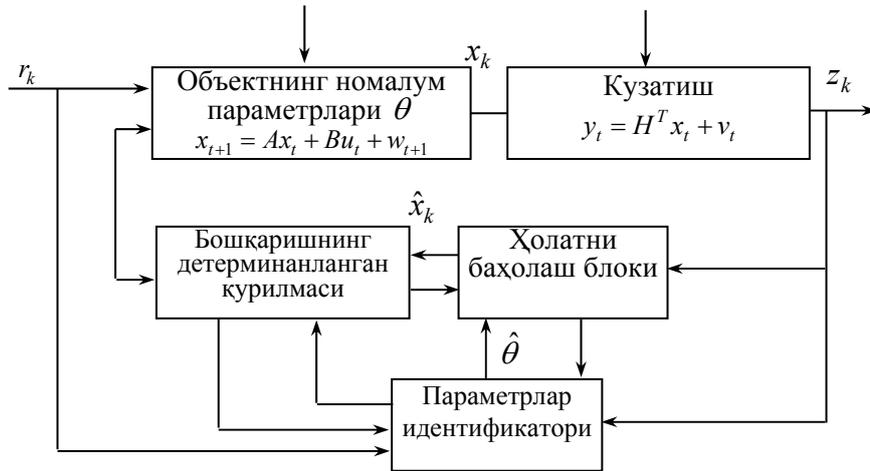
Кўпинча, кириш сигнали w_k корреляцияланадиган кетма-кетлик ҳисоблансин. Бундай ҳолларда компенсацияловчи бошқаришни қуйидаги кўринишда танлаш мақсадга мувофиқ:

$$u_k = -[H_k + B_k^T P_{k+1} B_k + \alpha I]^{-1} B_k^T P_{k+1} A_k x_k,$$

$$P_k = A_k^T P_{k+1} [A_k + B_k Y_k] + G_k, \quad P_N = G_N.$$

Ушбу керакли компенсациялаш матрицасини қўллаган ҳолда кечикишли берк системани ҳолат вектори x_k маъносида эквивалент келтирилган кечикишсиз берк система деб қабул қиламиз. Калий хлоридни қуритиш жараёнини адаптив бошқариш системасини синтезлашда кўриб чиқилган алгоритмларни қўллаш, бошқариш бўйича кечикишни ҳисобга олган ҳолда бошқариш жараёнининг сифатини яхшилашга ёрдам беради.

Олинган ифодалар асосида адаптив бошқариш системасини қуйидаги структурасини таклиф қилиш мумкин:



1-расм. Ҳолат бўйича адаптив бошқариш системасининг структураси.

Саноат ишлаб чиқаришида ноаниқлик шароитида бошқариш объектнинг ҳолат векторларини тикланишда жиддий қийинчиликларга дуч келинмоқда. Бундай ҳолатларда объектни ифодалаш учун қуйидаги тенгламадан фойдаланиш мақсадга мувофиқ бўлади:

$$A_*(z^{-1})y_{t+1} = B_*(z^{-1})u_t + \xi_{t+1},$$

бунда $y_t \in R^2$ – ўлчанадиган чиқишлар, $u_t \in R^2$ – бошқариш.

Унда (19), (20) кўринишидаги муносабатларга асосан, $n = 2$ бўлганда бошқариш қонуни (21) қуйидаги шаклда танланади:

$$u_t = (H^T B_*^{(0)})^{-1} [(A_*^{(1)} + S^{(1)})y_t + (A_*^{(2)} + S^{(2)})y_{t-1} + (-B_*^{(1)} + D^{(1)})u_{t-1}], \quad (27)$$

бунда $S^{(1)}, S^{(2)}$ ва $D^{(1)}$ – ихтиёрий 2×2 ўлчамли матрица, H – 2×2 ўлчамли матрица бўлиб, $\det H^T B_*^{(0)} \neq 0$.

(5) – (9) идентификациялаш алгоритмлари асосида $A_*^{(1)}, A_*^{(2)}, B_*^{(0)}, B_*^{(1)}$ матрицаларни идентификациялаш натижалари уларни сон қийматларини олиш имконини берди:

$$A_*^{(1)} = \begin{bmatrix} 0,812 & | & 0,257 \\ \hline 0,645 & | & -0,691 \end{bmatrix}, \quad A_*^{(2)} = \begin{bmatrix} 0,713 & | & 0,566 \\ \hline -0,478 & | & 0,288 \end{bmatrix}, \quad B_*^{(0)} = \begin{bmatrix} 0,431 & | & 0,619 \\ \hline 0,384 & | & -0,293 \end{bmatrix}, \quad B_*^{(1)} = \begin{bmatrix} -0,334 & | & 0,516 \\ \hline 0,418 & | & 0,497 \end{bmatrix}.$$

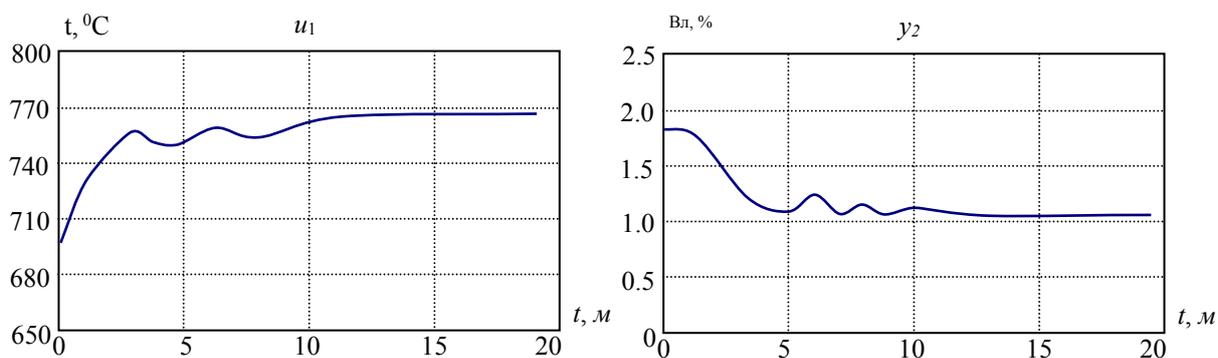
(27) да матрица $G^{(0)} = H^T B_*^{(0)}$ ни тесқари тартибда ёзиш амаллари сонли турғунлигини ошириш мақсадида Гауссинг мунтазамлаштириш усулидан фойдаланамиз.

У ҳолда

$$(G_\varepsilon^{(0)})^+ = R_k^+ U_k^+.$$

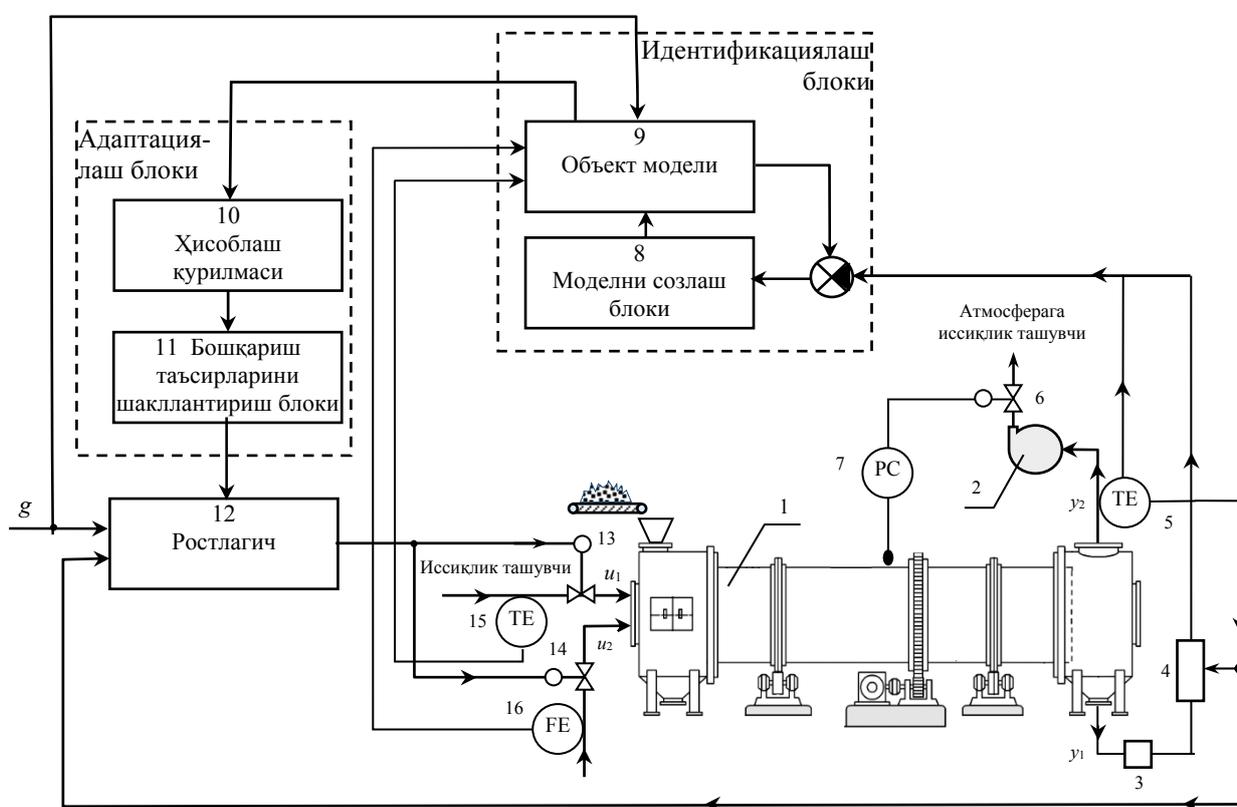
бунда R_k, U_k – (23), (24) ифодалар ёрдамида аниқланади.

Ишлаб чиқилган дастурий таъминот асосида (22) ни ҳисобга олиб, (27) алгоритм асосида бошқариш қонунининг сонли моделлаштирилиши амалга оширилди. Мисол учун, 2-расмда $u_1 \rightarrow y_1$ канал бўйича кўриб чиқилаётган жараённинг бошқариш таъсирлари ва чиқиш ўзгарувчиларини амалга оширилиши кўрсатилган.



2-расм. $u_1 \rightarrow y_1$ канал бўйича кўриб чиқиладиган жараённинг бошқариш таъсирлари ва чиқиш ўзгарувчиларини амалга оширилиши.

Ўтказилган тадқиқот асосида адаптив бошқариш системасининг қуйидаги структурасини таклиф қилиш мумкин.



3-расм. Чиқиш ўзгарувчилари бўйича калий хлоридни қуритиш жараёнини адаптив бошқариш системасининг структураси.

Идентификацион ёндашув асосида бошқариш таъсирларини шакллантиришнинг ишлаб чиқилган мунтазамлаштириш алгоритмлари калий ўғитини ишлаб чиқаришда калий хлоридни қуритиш жараёнини адаптив бошқариш системасида бошқариш таъсирларини ҳисоблаш аниқлигини ошириш имконини беради.

ХУЛОСА

Диссертацияда тизимли таҳлил, автоматик бошқариш системалари назарияси, динамик филтрлаш ва нокоррект масалаларни ечиш усуллари асосида идентификацион ёндашув мезонлари асосида динамик объектларни адаптив бошқариш системаларини мунтазам синтезлашнинг конструктив услубияти ишлаб чиқилган ва қуйидаги илмий натижалар олинган:

1. Турли модели структуралар учун идентификациялаш тенгламасининг бошланғич маълумотлари топшириқларини хатоликлари баҳолари олинган. Ушбу алгоритмлар ҳеч қандай ҳисоблаш алгоритмларини бажармай туриб, ечимларнинг хатолик даражаси ҳақида априор ахборотга эга бўлиш имконини беради ва системанинг кейинги ҳисобларини қанақа аниқлик билан бажариш маъқуллиги ва мослашиш талабларидан келиб чиққан ҳолда, мунтазамлаштириш параметрининг оптимал қийматини тезкор танлаш ҳақида сифатли хулосалар чиқаришга хизмат қилади.

2. Кальман филтри базасидаги оптимал стохастик огоҳлантиргичдан фойдаланиб, градиентли схемалар асосида динамик объектларни алоҳида ва биргаликда адаптив баҳолаш ва бошқариш учун алгоритмларни шакллантиришда ифодалар олинган. Олинган ифодалар параметрларни баҳолаш амалига эга бўлган тескари алоқа шаклидаги бошқариш қонунини бирлаштириш асосида адаптив алгоритмларнинг мувофиқлигини баҳолаш имконини беради.

3. Динамик филтрлаш мезони асосида стохастик объектларни адаптив бошқариш системаларининг диссипативлиги ҳақидаги масалада барқарорловчи ростлагич параметрларини турғун баҳолаш алгоритмлари таклиф қилинган. Ишлаб чиқилган алгоритмлар бир маромдаги оптималлик хусусиятларига эга бўлган баҳоларни олиш имконини беради.

4. Кальман типидagi мунтазамлашган филтр асосида дисперсиянинг минимумлиги мезони бўйича динамик объектларни адаптив бошқариш системасини синтезлашнинг турғун субоптимал алгоритмлари таклиф этилган. Олинган алгоритмлар ростлашнинг минимал ковариациясини таъминлайди.

5. Соддалашган мунтазамлаштиришнинг ретроспектив ва итерацияли вариантлари асосида динамик объектларни субоптимал адаптив-локал бошқаришнинг турғун алгоритмлари ишлаб чиқилган. Таклиф этилаётган алгоритмлар бошқариш қонуни параметрларини аниқлигини ошириш имконини беради.

6. Сингуляр ажратишга асосланган мунтазамлаштириш ва псевдотескари тартибда ёзиш усуллари асосида динамик бошқариш объектларини идентификациялашнинг турғун алгоритмлари ишлаб чиқилган. Ушбу алгоритмлар бошқариш контуридаги динамик объектларни маълум халақит-сигналлар шароитида турғун идентификациялашга имкон беради.

7. Тўпламли моделлар ва уларнинг параметрларини гаусс тақсимотининг чекли йиғиндиси кўринишида силлиқлантиришдан фойдаланиш асосида мослаштириш ёрдамида рекуррент идентификациялаш алгоритмлари ишлаб чиқилган. Олинган алгоритмлар берк бошқариш системаларида бошқариш жараёнлари сифатини ошириш имконини берадиган ва салмоқли баҳоларга олиб келади.

8. Вариацион тенгсизликлар усулидан фойдаланиб, итератив мунтазамлаштириш тамойили асосида берк бошқариш системасидаги объект ва ростлагич параметрларини идентификациялашнинг турғун алгоритмлари ишлаб чиқилган. Ушбу алгоритмлар объект ва ростлагич параметрларининг изланаётган баҳоларини деярли ҳақиқий қийматларга мувофиқлигини таъминлайди.

9. Ортогонал бўлмаган факторизациялаш ва ёмон шартланган ёки хос квадрат матрицаларни псевдотескари тартибда ёзиш асосида динамик объектларни локал-оптимал адаптив бошқариш системаларида бошқариш таъсирларини шакллантиришнинг турғун алгоритмлари таклиф этилган. Алгоритмлар берк бошқариш контурида бошқариш таъсирини шакллантириш аниқлигини оширишга имкон беради.

10. Таклиф этилаётган адаптив идентификациялашнинг мунтазам алгоритмлари асосида калий ўғитини ишлаб чиқаришда калий хлоридни қуриштириш технологик жараёнини адаптив бошқариш системаси синтезланган. Қаралаётган жараён учун таклиф этилган бошқаришнинг адаптив тизими жараён юз беришининг технологик режимини барқарорлаштириш ва унинг фаолияти самарадорлигини ошириш имконини беради.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017.Т.03.02
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ
ТАШКЕНТСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

СЕВИНОВ ЖАСУР УСМОНОВИЧ

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ СИНТЕЗА АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ НА ОСНОВЕ
КОНЦЕПЦИЙ ИДЕНТИФИКАЦИОННОГО ПОДХОДА**

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

**АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ (DSc)
ДИССЕРТАЦИИ ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент – 2018

Тема докторской (DSc) диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за №B2017.3.DSc/T141

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете.
Автореферат диссертации на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице по адресу (www.tdtu.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу www.ziynet.uz.

Научный консультант:	Игамбердиев Хусан Закирович доктор технических наук, профессор, академик
Официальные оппоненты:	Марахимов Авазжон Рахимович доктор технических наук, профессор Назаров Улугбек Султанович доктор технических наук, профессор Абдукадыров Абдузариф Абдурауфович доктор технических наук
Ведущая организация:	ООО «Ximavtomatika»

Защита диссертации состоится «__» _____ 2018 года в __ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017.T.03.02 при Ташкентском государственном техническом университете по адресу: 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 №62). Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: 246-03-41.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2018 года.
(реестр протокола рассылки №__ от «__» _____ 2018 года)

Н.Р.Юсупбеков

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

Ш.М.Гулямов

Ученый секретарь научного совета по
присуждению учёных степеней, д.т.н., профессор

А.М.Назаров

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

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора наук (DSc))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире в последнее время в области автоматизации технологических процессов и производств особое внимание уделяется разработке методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления технологическими объектами различного функционального назначения. В этой области разработка регулярных алгоритмов адаптивной идентификации параметров динамических объектов в замкнутом контуре управления является одной из важных задач. Поэтому разработка разнообразных методов идентификации и управления динамическими объектами является одной из важнейших задач. В зарубежных странах, в том числе в США, России, Германии, Японии, Южной Корее и др., большое внимание уделяется решению теоретических задач идентификации, динамического оценивания, адаптивного управления технологическими процессами и их практическому применению в различных отраслях промышленности.

В мире ведутся научно-исследовательские работы по созданию универсального подхода к идентификации объектов в замкнутых системах, ориентированных на решение задач адаптивного управления динамическими объектами. В связи с этим, важной задачей являются усовершенствование и модификация методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами на основе концепций идентификационного подхода; разработка алгоритмов устойчивого оценивания параметров объекта и управляющего устройства в замкнутой системе управления; создание методов и алгоритмов адаптивной стабилизации динамического объекта с неизвестными параметрами и неизмеряемым возмущением.

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 действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 гг. отмечены задачи, в том числе, по «... сокращению энергоемкости и ресурсоемкости экономики, широкого внедрения в производство энергосберегающих технологий, повышению производительности труда в отраслях экономики, ... внедрению информационно-коммуникационных технологий в экономику, социальную сферу, системы управления»¹. Для реализации подобных задач важным является создание систем адаптивного управления с идентификатором в контуре обратной связи, что обуславливает необходимость разработки эффективных методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления технологическими объектами на основе концепций идентификационного подхода.

¹ Указ Президента Республики Узбекистан «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» ПФ-4947 от 7 февраля 2017 года.

Данное диссертационное исследование в определённой степени служит выполнению задач, предусмотренных Указом Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» и Постановлениями №ПП-3151 от 27 июля 2017 года «О мерах по дальнейшему расширению участия отраслей и сфер экономики в повышении качества подготовки специалистов с высшим образованием», №ПП-1730 от 21 марта 2012 года «О мерах по дальнейшему внедрению и развитию современных информационно-коммуникационных технологий» и №ПП-3682 от 27 апреля 2018 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов», а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий IV. “Развитие информатизации и информационно-коммуникационных технологий”.

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации². Научные исследования, направленные на разработку методов и алгоритмов адаптивного управления техническими и технологическими объектами, осуществляются в ведущих научных центрах мира и высших образовательных учреждениях, в том числе, в «Honeywell», SIMSCI-Simulation и University of California, Massachusetts Institute of Technology (США), «Siemens» и Technical University Munich, Karlsruhe Institute of Technology, Technical University Darmstadt (Германия), Imperial College London, The University of Edinburgh (Великобритания), University of Chemical Technology in Prague (Чехия), The University of Tokyo, Tokyo Institute of Technology (Япония), Seoul National University, Korea Advanced Institute of Science and Technology (Южная Корея), «Alstom» (Франция), «Simatek-Energo» (Беларусь), Институте автоматизации (Китай), Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана, Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации (Российская Федерация).

В результате исследований, проведенных в мире по созданию методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами, а также совершенствованию систем управления, получен ряд результатов, в том числе созданы методы и алгоритмы адаптивной параметрической идентификации (University of California, Massachusetts Institute of Technology, George Mason University, США; Linksping University, Швеция; Институт проблем управления РАН, Российская Федерация);

² Обзор научных исследований по теме диссертации составлен на основании <https://elibrary.ru>, <http://ieeexplore.ieee.org/document/824819>, <http://www.mathnet.ru/rus/agreement>, www.asucontrol.ru, www.sial.iias.spb.su, <http://www.ipu.ru>, <http://cyberleninka.ru>, <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/?p=21073>, https://nl.wikipedia.org/wiki/Pieter_Eykhoff, https://books.google.ru/books/about/Optimum_systems_control.html, https://books.google.ru/books/about/System_identification.html, <http://terraelectronica.ru>, http://uk.farnell.com/static/findings/DF10/findings10_aducs.htm и других источников.

разработаны методы и алгоритмы параметрической и структурной идентификации (Massachusetts Institute of Technology, США; Linksping University, Швеция; Technische Universiteit Eindhoven, Нидерланды; Институт проблем управления РАН, Военно-воздушная инженерная академия имени Н.Б. Жуковского, Российская Федерация); разработаны алгоритмы идентификации на основе теории оценивания (George Mason University, США; Институт проблем управления РАН, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, Российская Федерация); разработаны алгоритмы обобщенного оценивания параметров и вектора состояния динамических систем (Институт проблем управления РАН, Московский государственный технический университет им.Н.Э.Баумана, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации, Российская Федерация); разработаны методы и алгоритмы идентификации на основе теории временных рядов и методов пространства состояний (Massachusetts Institute of Technology, США; Linksping University, Швеция; Институт проблем управления РАН, Российская Федерация); разработаны методы синтеза адаптивных систем управления с идентификатором в контуре обратной связи (Linksping University, Швеция; Институт проблем управления РАН, Российская Федерация).

В мире дальнейшее развитие существующих и созданию новых методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами осуществляется по следующим перспективным направлениям: совершенствование методов идентификации, оценивания и управления сложными динамическими системами обеспечивающих требуемые точность и качество регулирования; разработка адаптивных и робастных систем управления не зависящих от внешних и внутренних возмущающих воздействий; разработка устойчивых методов адаптивной идентификации и управления динамическими объектами в замкнутом контуре управления; разработка алгоритмов синтеза функций отключения алгоритмов адаптации в «зоне» действия помех и переключения регуляторов; построение регуляризованных наблюдателей состояния и динамических фильтров калмановского типа для различных помехосигнальных условий.

Степень изученности проблемы. Анализ научно-технической литературы последних лет, касающихся исследований по разработке методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления технологическими объектами на основе концепций идентификационного подхода, свидетельствует о достижении значительных теоретических и практических результатов в этой области. Опубликовано большое количество работ, посвященных проблемам синтеза адаптивных систем управления, разработаны общетеоретические концепции, возрастает число решенных практических задач. Большой вклад в развитие адаптивных систем управления внесли многие зарубежные ученые, такие как Astrom K.J., Brayson A., Eukhoff P., Izerman R., Kalman R., Kashyap P.L., Ljung L., Melsa J., Rao A.R., Sage E., Simon D., Андриевский Б.Р., Антонов В.Н., Балонин Н.А., Буков В.Н., Бунич А.Л., Ворчик Б.Г., Жиров М.В., Земляков С.Д., Зыбин Е.Ю., Карабутов Н.Н., Коган М.М., Красовский А.А., Ломов А.А.,

Мирошник И.В., Мышляев Л.П., Неймарк Ю.И., Никифоров В.О., Петров Б.Н., Поляк Б.Т., Райбман Н.С., Рубан А.И., Рутковский В.Ю., Семенов А.Д., Сысоев Л.П., Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Цыпкин Я.З., Штейнберг Ш.Е., Ядыкин И.Б., Якубович В.А. и др., а также отечественные ученые – Абдукадиров А.А., Азимов Б.М., Бекмуратов Т.Ф., Гулямов Ш.М., Жуманов И.И., Зарипов О.О., Игамбердиев Х.З., Исмаилов М.А., Кадыров А.А., Камалов Н.З., Камиллов М.М., Марахимов А.Р., Нурмухамедов Т.Р., Рахматуллаев М.А., Сиддиқов И.Х., Фозилов Ш.Х., Юсупбеков Н.Р. и др.

Однако постоянное усложнение и расширение круга научных исследований требует разработки новых эффективных методов и алгоритмов адаптивной идентификации, оценивания состояния и управления в условиях неопределенности. В неполной мере разработаны регулярные методы и алгоритмы идентификации и управления в классе замкнутых систем управления. Требуют своего развития также регулярные методы адаптивного управления на основе идентификационного подхода. Кроме того, оказывается целесообразным осуществлять разработку регулярных методов и алгоритмов идентификации параметров объекта и регулятора в замкнутой системе управления, а также формирования управляющих воздействий в локально-оптимальных и субоптимальных адаптивных системах управления, что позволит расширить спектр алгоритмических процедур построения и реализации адаптивных систем управления динамическими объектами в условиях неопределенности и повысить эффективность их функционирования. В связи с вышеотмеченным возникает настоятельная необходимость дальнейшей модификации и создания эффективных регулярных методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами на основе концепций идентификационного подхода.

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 по следующим темам: ОТ-Ф1-080: «Разработка концепций и принципов построения интеллектуальных систем управления сложными технологическими процессами и производствами» (2007-2011); 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).

Цель исследования состоит в разработке методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления технологическими объектами на основе концепций идентификационного подхода.

Задачи исследования:

системный анализ развития методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами на основе концепций идентификационного подхода;

разработка методов и алгоритмов устойчивой адаптивной параметрической идентификации динамических объектов управления;

разработка устойчивых методов и алгоритмов синтеза систем адаптивного управления динамическими объектами;

разработка устойчивых методов и алгоритмов адаптивной идентификации параметров динамических объектов и управляющего устройства в замкнутом контуре управления;

разработка устойчивых методов и алгоритмов формирования управляющих воздействий в локально-оптимальных адаптивных системах управления динамическими объектами;

практическая апробация разработанных алгоритмов и вычислительных схем устойчивой идентификации параметров объекта и управляющего устройства при решении задач синтеза адаптивных систем управления конкретными технологическими объектами.

Объектом исследования являются системы адаптивного управления технологическими объектами с идентификатором в контуре обратной связи.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы регулярной адаптивной идентификации параметров объектов и регуляторов в замкнутых системах управления.

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

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

получены оценки погрешности задания исходных данных уравнений идентификации для различных модельных структур, позволяющие явным образом осуществлять выбор оптимального значения параметра регуляризации исходя из требования согласования;

разработаны устойчивые субоптимальные алгоритмы синтеза системы адаптивного управления динамическими объектами по критерию минимума дисперсии на основе регуляризованного фильтра калмановского типа;

разработаны устойчивые алгоритмы субоптимального адаптивно-локального управления динамическими объектами на основе ретроспективных и итерационных вариантов упрощенной регуляризации;

разработаны устойчивые алгоритмы идентификации динамических объектов управления на основе методов регуляризации и псевдообращения, основанные на сингулярном разложении;

разработаны алгоритмы рекуррентной идентификации с помощью множественных моделей и адаптации их параметров на основе

использования аппроксимаций в виде конечной суммы гауссовских распределений;

разработаны устойчивые алгоритмы формирования управляющих воздействий в локально-оптимальных адаптивных системах управления динамическими объектами на основе неортогональных факторизациях и псевдообращениях плохообусловленных или вырожденных квадратных матриц;

разработаны устойчивые алгоритмы идентификации параметров объекта и регулятора в замкнутой системе управления на основе принципа итеративной регуляризации с привлечением метода вариационных неравенств.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработан программный комплекс IARE (identification, adaptation, regularization, estimation), состоящий из программных модулей, предназначенный для программно-алгоритмической поддержки решения задач идентификации и адаптивного управления динамическими системами;

на основе результатов промышленного эксперимента в условиях нормального функционирования разработаны математические модели процесса сушки калия хлорида;

разработаны структурные и функциональные схемы автоматизации и адаптивного управления технологическим процессом сушки калия хлорида в производстве калийных удобрений;

разработаны системы управления технологическим процессом сушки калия хлорида с соответствующим техническим обеспечением, позволяющие стабилизировать технологические режимы протекания процессов, повысить эффективность их функционирования.

разработана система автоматического регулирования давления в буферном танке с соответствующим техническим обеспечением.

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

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования состоит в разработке конструктивных устойчивых методов и алгоритмов адаптивного управления динамическими объектами с идентификатором в контуре обратной связи, позволяющих повысить качество процессов управления.

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке математического и алгоритмического обеспечения разнообразных задач идентификации и адаптивного управления широким классом технологических объектов в замкнутом контуре управления и 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 в работе результатов синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами на основе концепций идентификационного подхода внедрены:

Разработанные методы и концепции синтеза адаптивных систем управления; регулярные алгоритмы идентификации параметров объекта и регулятора в замкнутой системе управления; субоптимального адаптивно-локального управления динамическими объектами, внедрены на унитарном предприятии «Дехканабадский завод калийных удобрений» (Справка ГАК «УЗКИМЁСАНОАТ» №01-736/А от 20 февраля 2018 года). Полученные результаты позволяют стабилизировать технологические режимы протекания процесса сушки калия хлорида в производстве калийных удобрений и повысить эффективность его функционирования.

разработанный программный комплекс IARE (identification, adaptation, regularization, estimation), состоящий из программных модулей, предназначенный для программно-алгоритмической поддержки решения задач идентификации и адаптивного управления динамическими системами внедрен на унитарном предприятии «Дехканабадский завод калийных удобрений» (Справка ГАК «УЗКИМЁСАНОАТ» №01-736/А от 20 февраля 2018 года). Комплекс способствует повышению эффективности функционирования сушильного оборудования.

Разработанные алгоритмы синтеза систем автоматического регулирования внедрены на ООО «IMIR-TRADE GROUP» (справка ГАК «УЗКИМЁСАНОАТ» о внедрении за №01-736/А от 20.02.2018 г.) для стабилизации давления в буферном танке. В результате достигнуто повышение качества процессов регулирования.

Апробация результатов исследования. Теоретические и практические результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на 17 международных и 11 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 60 научных работ, из них – 1 монография, 21 научных статей, в том числе 16 в республиканских и 5 в зарубежных журналах, рекомендованных ВАК РУз для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, 28 тезисов докладов на международных и республиканских научных конференциях, получены 10 свидетельств об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 185 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 «**Системный анализ развития методов построения и синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами**» приводятся результаты системного анализа развития методов построения и синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами, формализации идентификационного подхода к построению адаптивных систем управления динамическими объектами, анализа проблемных ситуаций в задачах идентификации и адаптивного управления динамическими объектами, постановка цели и задачи исследования. В настоящее время в связи с развитием техники сложность управляемых объектов в разрабатываемых и проектируемых системах управления значительно повышается. Для решения задач управления в условиях неопределенности предназначены системы управления на основе адаптивных и робастных подходов, позволяющих повысить надежность систем, а также снизить технологические требования при проектировании. Решение задач идентификации и управления связано с проблемой устойчивости соответствующих алгоритмов. В данных условиях большинство известных методов идентификации и управления оказываются неустойчивыми и часто неработоспособными. В настоящее время возникло понимание того, что наряду с моделями объекта, должны существовать и находиться с ним во взаимодействии модели, представляющие накопленные знания, описывающие поведение аналогичных объектов, а также разнообразные дополнительные данные. Задачи идентификации и адаптивного управления представляют особый класс обратных задач, в которых ищется не столько решение операторного уравнения, хотя оно неизвестно, сколько сам оператор, как его структура, так и параметры его определяющие. Не всегда удается записать множество моделей, которое гарантированно содержит точное описание изучаемой системы. Факт некорректности хорошо известен, однако установление условий, при которых она возникает, и способы построения регуляризованных решений остаются актуальными для исследований, особенно в условиях ограниченной определенности в данных. Поскольку свойство некорректности является фундаментальной особенностью этого класса задач, оно проявляется независимо от того, каким методом решаются задачи идентификации и управления. Можно утверждать,

что в контуре адаптивного управления средства достижения цели идентификации и управления объектом противоположны по существу. Если цель идентификации состоит в изучении собственных свойств объекта, которые только и можно выявить в развитии характерных для него реакций на управляющие воздействия, то цель управления состоит, наоборот, в нивелировании всяких отличий у разных объектов, в навязывании им типичных переходных процессов в ущерб проявлению их собственных свойств.

Сложившееся положение требует развития новых подходов к проблеме синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами на основе концепций идентификационного подхода. Удачной в этой связи видится методология системной градации задач синтеза адаптивных систем, основанная, в частности, на привлечении концепций обратных задач динамики управляемых объектов и регулярных методов. Отмеченные обстоятельства указывают на необходимость создания методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами на основе концепций идентификационного подхода и синтеза вычислительных схем их практической реализации при решении задач автоматизации и управления конкретными технологическими процессами промышленных производств.

Вторая глава диссертации «**Разработка алгоритмов устойчивой параметрической идентификации динамических объектов управления**» посвящена разработке алгоритмов параметрического оценивания линейных объектов управления, оценивания погрешности задания исходных данных, анализа сходимости алгоритмов адаптивного оценивания параметров динамических объектов управления.

Рассмотрим динамическую систему, описываемую разностным уравнением вида:

$$y(t) = \sum_{j=1}^p A_j y(t-j) + \sum_{j=1}^q B_j u(t-j) + v(t), \quad t = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

или

$$y(t) = A_1 y(t-1) + \dots + A_p y(t-p) + B_1 u(t-1) + \dots + B_q u(t-q) + v(t),$$

где входной сигнал $u(t)$ является m -мерным вектором, а выходной сигнал $y(t)$ – l -мерным вектором, A_i – $(l \times l)$ -матрицы, а B_i – $(l \times m)$ -матрицы, $v(t)$ – возмущение.

Для определения элементов матриц $A_1, \dots, A_p; B_1, \dots, B_q$ необходимо произвести параметризацию уравнения (1). Один из вариантов параметризации состоит во включении всех элементов матриц из (1) общим числом $(pl + qm) \times l$ в вектор θ . Тогда можно определить $((pl + qm) \times l)$ -матрицу

$$\theta = [A_1, A_2, \dots, A_p, B_1, \dots, B_q]^T$$

и $(pl + qm)$ -мерный вектор-столбец

$$\varphi(t) = [y^T(t-1) \mid \dots \mid y^T(t-p) \mid u^T(t-1) \mid \dots \mid u^T(t-q)]^T,$$

и переписать (1) в виде

$$y(t) = \theta^T \varphi(t) + v(t), \quad (2)$$

где $v(t)$ – помеха измерений.

Другой вариант параметризации состоит в формировании такого d -мерного вектора-столбца θ и $(l \times d)$ -матрицы $\varphi^T(t)$ таким образом, чтобы представить (1) в виде

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta + v(t). \quad (3)$$

Оценки решений уравнений (2) и (3) можно записать соответственно в виде:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_N &= \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t)\varphi^T(t) + \alpha I \right]^{-1} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t)y^T(t), \\ \hat{\theta}_N &= \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t)\Lambda^{-1}\varphi^T(t) + \alpha I \right]^{-1} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t)\Lambda^{-1}y(t), \end{aligned}$$

где Λ – весовая матрица, $\alpha > 0$ – параметр регуляризации, I – единичная матрица; здесь параметр регуляризации α целесообразно определять на основе способа квазиоптимальности.

Для вычисления оценки θ также весьма эффективным оказывается подход, основанный на методе динамической фильтрации. Для этого линейную модель регрессии вида (3) запишем в виде:

$$\theta(t+1) = \theta(t) + w(t), \quad y(t) = \varphi^T(t)\theta(t) + v(t), \quad (4)$$

где

$$E[w(t)w^T(j)] = Q(t)\delta(tj), \quad E[v(t)v^T(j)] = R(t)\delta(tj).$$

Применяя к (4) адаптивный фильтр Калмана получим:

$$\hat{\theta}(t|t-1) = \hat{\theta}(t-1|t-1), \quad (5)$$

$$\hat{\theta}(t|t) = \hat{\theta}(t|t-1) + K(t)[y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t|t-1)], \quad (6)$$

$$K(t) = P(t|t-1)\varphi(t)G_\alpha(D(t)), \quad (7)$$

$$P(t|t-1) = K(t-1)M(v(t)v^T(t))K^T(t-1) + P(t-1), \quad (8)$$

$$P(t) = P(t|t-1) - P(t|t-1)\varphi(t)G_\alpha(D(t))\varphi^T(t)P(t|t-1), \quad (9)$$

где $G_\alpha(D(t)) = [D(t) + \alpha I]^{-1}$, $D(t) = \varphi^T(t)P(t|t-1)\varphi(t)$ – порождающая система функций для метода регуляризации.

При реализации соотношений (5)-(9) параметр регуляризации α целесообразно также определять на основе способа модельных примеров.

Для правильного определения параметра регуляризации α при решении некорректной задачи необходимо оценить уровень погрешности оператора и правой части. С этой целью матричный оператор $\varphi^T(t)$, вектор параметров θ и правую часть $y(t)$ модельной структуры (3) представим в виде:

$$\varphi^T(t) = [y(t-1) \otimes I_l | y(t-2) \otimes I_l | \dots | y(t-p) \otimes I_l | u(t-1) \otimes I_l | u(t-2) \otimes I_l | \dots | u(t-q) \otimes I_l],$$

где

$$y(t-i) \otimes I_l = [y_1^l(t-i) \mid y_2^l(t-i) \mid \dots \mid y_l^l(t-i)], \quad \forall i = 1, 2, \dots, p,$$

$$y_1^1(t-i) = \begin{bmatrix} y_1(t-i) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & y_1(t-i) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & y_1(t-i) \end{bmatrix}, \dots, y_l^l(t-i) = \begin{bmatrix} y_l(t-i) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & y_l(t-i) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & y_l(t-i) \end{bmatrix},$$

$$u(t-j) \otimes I_l = [u_1^1(t-j) \mid u_2^2(t-j) \mid \dots \mid u_m^m(t-j)], \forall j=1,2,\dots,q,$$

$$u_1^1(t-j) = \begin{bmatrix} u_1(t-j) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & u_1(t-j) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & u_1(t-j) \end{bmatrix}, \dots, u_m^m(t-j) = \begin{bmatrix} u_m(t-j) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & u_m(t-j) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & u_m(t-j) \end{bmatrix};$$

$$\theta = [a \mid b]^T,$$

где

$$a = [a_{11}^1 \dots a_{l1}^1 a_{12}^1 \dots a_{l2}^1 \dots a_{1l}^1 \dots a_{ll}^1 \dots a_{11}^p \dots a_{l1}^p \dots a_{12}^p \dots a_{l2}^p \dots a_{1l}^p \dots a_{ll}^p],$$

$$b = [b_{11}^1 \dots b_{l1}^1 b_{12}^1 \dots b_{l2}^1 \dots b_{1m}^1 \dots b_{lm}^1 \dots b_{11}^q \dots b_{l1}^q b_{12}^q \dots b_{l2}^q \dots b_{1m}^q \dots b_{lm}^q];$$

$$y(t) = [y_1(t) \mid y_2(t) \mid \dots \mid y_l(t)]^T.$$

$$h = \left\{ l^2 \left(\sum_{i=1}^l \delta_{y_i}^2(t) + \sum_{j=1}^m \delta_{u_j}^2(t) \right) \right\}^{1/2}, \quad \sigma = \left\{ l \sum_{i=1}^l \delta_{y_i}^2(t) \right\}^{1/2},$$

где $\delta_{y_i}^2(t)$ и $\delta_{u_j}^2(t)$ – дисперсии погрешности составляющих $u_j(t), j=1,2,\dots,m$ и $y_i(t), i=1,2,\dots,l$ векторов входных и выходных переменных.

Аналогичные оценки получены и для других модельных структур. Полученные выражения для оценивания погрешности исходных данных модельных структур позволяют не производя непосредственного решения оценивать сверху погрешность решения этих уравнений.

Для оценки эффективности алгоритмов адаптивного оценивания параметров динамических объектов управления необходимо провести анализ их сходимости. При наличии случайных возмущений целесообразно применить оптимальный стохастический упредитель на основе калмановского фильтра. Поведение такого упредителя по входу-выходу описывается уравнением:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})w(t),$$

где $\{w(t)\}$ представляет собой инновационную последовательность белого шума, а $C(q^{-1})$ – полином знаменателя установившегося фильтра Калмана, удовлетворяющий условию:

$$|C(z^{-1})| \neq 0 \text{ при } |z| \geq 1,$$

(z – переменная Z – преобразования).

Применительно к градиентной схеме оценивание параметров и состояния можно осуществить с помощью следующего алгоритма:

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \frac{\phi(t-1)}{r(t-1)} [y(t) - \phi(t-1)^T \hat{\theta}(t-1)],$$

где

$$r(t-1) = r(t-2) + \phi(t-1)^T \phi(t-1), \quad \hat{\theta}(t) = [\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_n, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_m, \hat{c}_1, \dots, \hat{c}_n],$$

$$\phi(t-1)^T = [-y(t-1), \dots, -y(t-n), \dots, u(t-d-m), e(t-1), \dots, e(t-n)],$$

$$e(t) = y(t) - \phi(t-1)^T \hat{\theta}(t-1).$$

При этом ошибка упреждения $e(t)$ связана с ошибкой оценивания параметров $\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t) - \theta_0$ следующим соотношением:

$$C(q^{-1})e(t) = -\phi(t-1)^T \tilde{\theta}(t-1).$$

Полученные выражения позволяют оценивать сходимость адаптивных алгоритмов раздельного и совместного адаптивного оценивания и управления динамическими объектами на основе градиентной схемы с использованием оптимального стохастического упредителя на базе калмановского фильтра.

В третьей главе диссертации «Разработка устойчивых алгоритмов адаптивного управления динамическими объектами» приводятся результаты разработки устойчивых алгоритмов адаптивного управления, оценивания параметров регулятора, синтеза процедуры адаптивного управления динамическими объектами по критерию минимума дисперсии, алгоритмы синтеза субоптимального адаптивно-локального управления и адаптивного оценивания и управления динамическими объектами на основе прогнозирующих моделей.

Рассмотрим линейную систему, описываемую следующей моделью:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + \xi(t), \quad (10)$$

где $A(q^{-1}) = I - \sum_{j=1}^p A_j(q^{-1})^j$, $B(q^{-1}) = \sum_{j=1}^q B_j(q^{-1})^j$, $u(t)$ - $(m \times 1)$ - мерный вход, $y(t)$ представляет собой $(l \times 1)$ - мерный выход, $\xi(t)$ - $(l \times 1)$ - мерная случайная последовательность.

Можно показать, что оптимальный упредитель в установившемся состоянии $\hat{z}(t)$ для $z(t) = \zeta(q)y(t)$ удовлетворяет уравнению вида:

$$\bar{C}(q^{-1})\hat{z}(t) = \bar{\beta}(q^{-1})u(t) + \bar{\alpha}(q^{-1})y(t),$$

где

$$\bar{C}(q^{-1}) = I + \bar{C}_1 q^{-1} + \dots + \bar{C}_n q^{-n}, \quad \bar{\beta}(q^{-1}) = \bar{\beta}_0 + \bar{\beta}_1 q^{-1} + \dots + \bar{\beta}_l q^{-l}, \quad \bar{\beta}_0 = V,$$

$$\bar{\alpha}(q^{-1}) = \bar{\alpha}_0 + \dots + \bar{\alpha}_r q^{-r}.$$

Регулятор, обеспечивающий минимальную ковариацию регулирования $\zeta(q)y(t)$ относительно $\zeta(q)y^*(t)$, определяется уравнением:

$$\bar{\beta}(q^{-1})u(t) + \bar{\alpha}(q^{-1})y(t) = \bar{C}(q^{-1})\zeta(q)y^*(t),$$

где $\{y^*(t)\}$ представляет собой заданную желаемую траекторию, при этом ошибка слежения по выходу $y(t) - y^*(t)$ удовлетворяет уравнению:

$$\bar{C}(q^{-1})\zeta(q)[y(t) - y^*(t)] = \bar{C}(q^{-1})F(q)\xi(t).$$

Модель (10) можно рассматривать как упредитель на один шаг с ошибкой упреждения

$$\xi(t) = y(t) - \hat{y}(t),$$

где

$$\hat{y}(t) = E\{y(t) | F_{t-1}\}.$$

Упреждение на d шагов можно получить с помощью уравнения (10), используя тождество:

$$I = \tilde{F}(q^{-1})A(q^{-1}) + q^{-d}\tilde{G}(q^{-1}), \quad (11)$$

где

$$\tilde{F}(q^{-1}) = \tilde{F}_0 + \tilde{F}_1q^{-1} + \dots + \tilde{F}_{d-1}q^{-d+1}, \quad \tilde{G}(q^{-1}) = \tilde{G}_0 + \tilde{G}_1q^{-1} + \dots$$

Умножая (10) на $\tilde{F}(q^{-1})$ и используя тождество (11), получаем уравнение:

$$E\{y(t+d) | F_t\} = \tilde{G}(q^{-1})y(t) + \Gamma_2(q^{-1})\xi(t) + \tilde{\beta}(q)u(t),$$

где

$$\tilde{\beta}(q) = q^d\tilde{F}(q^{-1})B(q^{-1}) = \tilde{\beta}_0 + \tilde{\beta}_1q + \dots + \tilde{\beta}_{d-1}q^{d-1} + \beta'(q^{-1}),$$

$$\beta'(q^{-1}) = \beta'_1q^{-1} + \beta'_2q^{-2} \dots, \quad \Gamma_2(q^{-1}) = \Gamma_{20} + \Gamma_{21}q^{-1} + \dots$$

Закон управления, приводящий $E\{y(t+d) | F_t\}$ к нулю и имеющий наименьшую энергию, целесообразно определить выражением

$$u(t+j) = -\tilde{L}_j[\tilde{G}(q^{-1})y(t) + \Gamma_2(q^{-1})\xi(t)]; \quad j=0, \dots, d-1, \quad (12)$$

где

$$\tilde{L}_j = [\tilde{\beta}_j]^T \left[\sum_{k=0}^{d-1} \tilde{\beta}_k \tilde{\beta}_k^T + \alpha I \right]^{-1},$$

$\alpha > 0$ - параметр регуляризации.

Субоптимальный закон управления (12) можно превратить в адаптивный, если воспользоваться каким-либо алгоритмом оценивания матриц $A(q^{-1})$ и $B(q^{-1})$, входящих в модель (10).

В теории оптимальных адаптивных систем разрабатываются методы управления динамическими объектами в условиях, когда неизвестен ряд существенных параметров и факторов, определяющих их поведение. В таких случаях целесообразно использовать локально-оптимальные алгоритмы управления. Локально-оптимальное управление динамическим объектом, описываемым уравнениями вида

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t + \xi_{t+1},$$

$$y_t = H^T x_t, \quad t=0,1,\dots,$$

где $x_t \in R^n$ - вектор состояния; $u_t \in R^m$ - управление; $y_t \in R^l$ - наблюдаемый выход; A, B, H - матрицы соответствующих размерностей; ξ_1, ξ_2, \dots - последовательность случайных векторов, в смысле критерия $V(x) = x^T Cx$, $C^T = C \geq 0$, определяется выражением:

$$u_t^* = \operatorname{argmin}_{u_t} E[\Delta V(x_t, u_t) / x_0^t, u_0^t],$$

где $\Delta V(x_t, u_t) = V(Ax_t, Bu_t) - V(x_t)$.

Управление u_t^* при выполнении условий $E(\xi_{t+1} / x_0^t, u_0^t) = 0$, $E(\xi_{t+1} \xi_{t+1}^T / x_0^t, u_0^t) = \text{const}$, определяется из уравнения:

$$B^T C B u_t^* = -B^T C A x_t, \quad (13)$$

при этом $\Delta V(x_t, u_t^*) = -x_t^T Q x_t$, $Q = C - A^T C A + A^T C B (B^T C B)^+ B^T C A$.

Таким образом, управление u_t^* на основе (13) имеет вид:

$$u_i^* = \theta^T x_i,$$

где θ^T определяется из выражения

$$B^T C B \theta^T = -B^T C A. \quad (14)$$

Системы уравнений (13) или (14) могут быть плохо обусловленными. Плохо обусловленные и вырожденные системы могут быть неразличимыми в рамках заданной точности. Приведем регулярный алгоритм оценивания закона управления на основе уравнения (14). Примем $B^T C B = D$, $-B^T C A = S$.

Тогда

$$D \theta^T = S. \quad (15)$$

Введем следующие условия аппроксимации:

$$\|D - \bar{D}\| \leq h, \|s_j - \bar{s}_j\| \leq \delta,$$

где \bar{D} , \bar{s}_j – точные значения матрицы D и j -го столбца матрицы S , $j=1,2,\dots,n$.

Приближения к псевдорешению $\theta_j = D^+ s_j$ уравнения (15) будем строить в виде

$$\theta_{j,r} = g_r(D) s_j, \quad (16)$$

$$\bar{\theta}_{j,r} = g_r(D) D \theta_{j,r}, \quad (17)$$

где θ_j – j -ый столбец матрицы θ^T , $j=1,2,\dots,n$; s_j – j -ый столбец матрицы S .

Принимая во внимание, что матричный оператор D является самосопряженным, для регуляризации решения уравнения (16) будем использовать метод М.М.Лаврентьева. Метод М.М.Лаврентьева соответствует функциям

$$g_r(\lambda) = (\alpha + \lambda)^{-1}, \quad \alpha = r^{-1}, \quad 0 \leq \lambda < \infty.$$

Тогда приближения (16), (17) примут вид

$$\theta_{j,\alpha} = (D + \alpha I)^{-1} s_j, \quad \bar{\theta}_{j,\alpha} = (D + \alpha I)^{-1} D \theta_{j,\alpha}.$$

Переходя к итерированному варианту рассматриваемого метода можно написать

$$\begin{aligned} \theta_0 &= 0, \quad \theta_j^{(l)} = \theta_j^{(l-1)} - \mathbf{B}_\alpha (D \theta_j^{(l-1)} - s_j), \quad l=1,\dots,r, \\ \bar{\theta}_0 &= 0, \quad \bar{\theta}_j^{(l)} = \bar{\theta}_j^{(l-1)} - \bar{\mathbf{B}}_\alpha (D \bar{\theta}_j^{(l-1)} - D \theta_{j,r}), \quad l=1,\dots,r. \end{aligned}$$

$$\mathbf{B}_\alpha = g(D), \quad \bar{\mathbf{B}}_\alpha = \mathbf{B}_\alpha D \mathbf{B}_\alpha.$$

Выбора параметра r целесообразно осуществлять на основе соотношения вида

$$\|D \theta_{j,r} - s_j\| = b(\delta + \|\theta_{j,r}\| h), \quad b > 1.$$

В главе также рассмотрены вопросы построения регуляризованных рекуррентных алгоритмов адаптивного управления, оценивания параметров регулятора в задаче о диссипативности адаптивной системы управления, алгоритмы адаптивного оценивания и управления динамическими объектами на основе прогнозирующих моделей.

Четвертая глава диссертации «Разработка устойчивых методов и алгоритмов адаптивной идентификации параметров динамических объектов в замкнутом контуре управления» посвящена разработке

устойчивых методов и алгоритмов адаптивной идентификации в замкнутом контуре управления, рекуррентной идентификации объекта с помощью множественных моделей и параметров регулятора, формирования управляющих воздействий в локально-оптимальных адаптивных системах управления динамическими объектами.

Пусть объект управления в замкнутой системе описывается разностным уравнением n -го порядка:

$$x[k] = \sum_{i=1}^p a_i x[k-i] + \sum_{j=1}^q b_j \eta[k-j],$$

$$y[k] = x[k] + v[k]; \quad \eta[k] = u[k] + w[k],$$

где $\eta[k]$ и $x[k]$ – вход и выход объекта; $w[k]$ и $v[k]$ – возмущающее воздействие и погрешность измерения выхода соответственно; $u[k]$ и $y[k]$ – управляющее воздействие и результат измерения выхода, используемые в качестве входных и выходных данных в процедуре идентификации; a_i, b_j – неизвестные параметры объекта. Последовательность $v[k]$ некоррелирована с возмущением $w[k]$, предысторией сигналов $u[k]$ и $y[k]$.

Разностное уравнение регулятора имеет вид:

$$u[k] = \sum_{i=1}^{l_1} c_i u[k-i] + \sum_{j=0}^{l_2} d_j \varepsilon[k-j],$$

$$\varepsilon[k] = y^*[k] - y[k],$$

где $y^*[k]$ – текущее значение задания; $\varepsilon[k]$ – сигнал рассогласования; c_i, d_j – известные параметры регулятора.

При решении рассматриваемой задачи идентификации возникает необходимость определения вектора параметров объекта θ на основе уравнения

$$H \cdot \theta = Y,$$

где матрица H и вектор Y формируются на основе реализаций управляющего воздействия $u[k]$ и выхода $y[k]$, $\theta = [a_1 \dots a_p \mid b_1 \dots b_p]^T$.

Решение этой задачи произведено на основе метода регуляризации А.Н.Тихонова и эффективного псевдообращения, базирующийся на сингулярном разложении матриц. Принцип регуляризации приводит к оценке искомого решения $\hat{\theta}$ на основе уравнения

$$\hat{\theta}_\alpha = (H^T H + \alpha I)^{-1} H^T Y,$$

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

Если известны уровни погрешности исходных данных

$$h = \|H - \bar{H}\|, \quad \delta = \|Y - \bar{Y}\|,$$

то параметр регуляризации α можно определить на основе принципа обобщенной невязки, где \bar{H} и \bar{Y} – точные значения матричного оператора H и вектора правой части Y . Если же числа h и δ неизвестны, то параметр регуляризации α целесообразно определять на основе способа квазиоптимальности:

$$\|\hat{\theta}_{\alpha_{i+1}} - \hat{\theta}_{\alpha_i}\| = \min, \quad \alpha_{i+1} = \kappa\alpha_i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, \quad 0 < \kappa < 1.$$

Показано, что если ранг матрицы H $r = p$, то оценку вектора параметров $\hat{\theta}$ целесообразно определять на основе эффективных псевдообратных матриц:

$$\hat{\theta}_\tau = VS_\tau^+ U^T Y = \sum_{i=1}^{r'} \frac{1}{\mu_i} v_i \cdot u_i^T,$$

где S_τ^+ – эффективная псевдообразная матрица $S = \text{diag}(s_{1\tau}^+, \dots, s_{n\tau}^+)$; $r' < r$, $s_{i\tau}^+ = 1/\mu_i$, если $\mu_i > \tau$, и $s_{i\tau}^+ = 0$, если $\mu_i = 0$.

Для анализа качества процессов управления необходимо проанализировать условия сходимости. Рассмотрим объект управления с входом $u(t)$ и выходом $y(t)$, описываемый уравнением:

$$A(d)y(t) = B(d)u(t) + \xi(t),$$

где A и B – полиномы с оператором обратного сдвига d :

$$(1 + a_1 d + \dots + a_n d^n)y(t) = (b_1 d + \dots + b_m d^m)u(t) + \xi(t),$$

$$y(t) = -a_1 y(t-1) - \dots - a_n y(t-n) + b_1 u(t-1) + \dots + b_m u(t-m) + \xi(t),$$

или

$$y(t) = \theta^T \varphi(t) + \xi(t),$$

где

$$\theta = [a_1 \dots a_n : b_1 \dots b_m]^T, \quad \varphi(t) = [-y(t-1) \dots -y(t-n) : u(t-1) \dots u(t-m)]^T.$$

Предполагается, что стационарный белый шум $\xi(t)$ имеет нулевое математическое ожидание и дисперсию σ_ξ^2 . Идентифицируемая система с изменяющимися параметрами может быть представлена в виде следующей динамической модели в пространстве состояния:

$$\left. \begin{aligned} \theta(t-1) &= \theta(t) + w(t) \\ y(t) &= \varphi^T(t) \hat{\theta}(t) + \xi(t) \end{aligned} \right\},$$

где $\xi(t)$ и $w(t)$ – возмущения, причем $w(t)$ моделирует процесс изменения параметров системы.

В случае, если процесс изменения параметров связан с использованием гауссовского распределения с изменяющейся ковариационной матрицей, то может быть использован классический фильтр Калмана. Можно показать, что в случае, когда $w(t)$ не является гауссовским, то калмановский фильтр не обеспечивает оптимальной оценки. В этом случае, целесообразно использовать алгоритм вида:

$$P_i(t) = P_i(t-1) - \frac{P_i(t-1)\varphi(t)\varphi^T(t)P_i(t-1)}{R_2 + \varphi^T(t)P_i(t-1)\varphi(t)}, \quad i = 1, 2, \dots, M,$$

$$\varepsilon_i(t) = y(t) - \varphi^T(t)\bar{\theta}_i(t-1),$$

$$\bar{\theta}_i(t) = \bar{\theta}_i(t-1) + \frac{1}{R_2} P_i(t)\varphi(t)\varepsilon_i(t),$$

где R_2 – дисперсия шума.

Оценка $\hat{\theta}(t)$ вектора параметров $\theta(t)$ определяется соотношением

$$\hat{\theta}(t) = \sum_{i=1}^M \beta_i(t) \bar{\theta}_i(t).$$

Рассмотрим класс моделей с шумами в объекте и управляющем устройстве, имеющий широкое распространение в практических задачах. Такой класс систем управления с шумами в объекте и управляющем устройстве можно описать уравнениями вида:

$$y_n = \sum_{i=1}^p a_i y_{n-i} + \sum_{i=1}^q b_i u_{n-i} + \sigma_1 v_{1n},$$

$$u_n = \sum_{i=1}^{\mu} c_i y_{n-i} + \sum_{i=1}^{\nu} d_i u_{n-i} + \sigma_2 v_{2n},$$

где $\{u_n\}$, $\{y_n\}$ – наблюдаемые последовательности на входе и на выходе объекта соответственно; $\{v_{1n}\}$, $\{v_{2n}\}$ – гауссовские последовательности с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией, совместное распределение гауссовское. При этом

$$M[v_{1k} v_{1j}] = M[v_{2k} v_{2j}] = \delta_{kj}, \quad M[v_{1n} y_{n-j}] = M[v_{2n} y_{n-j}] = 0, \quad M[v_{1n} u_{n-j}] = M[v_{2n} u_{n-j}] = 0,$$

$$M[v_{1n} u_{2m}] = \rho \delta_{nm} \quad (j \geq 1), \quad 1 > \rho > -1, \quad \delta_{nm} \text{ – символ Кронекера.}$$

Для определения искомых параметров объекта и управляющего устройства необходимо решить следующую систему уравнений:

$$S \cdot \theta = y, \quad (18)$$

или в развернутой форме:

$$S = \begin{bmatrix} \alpha_{11} S_1^T S_1 & \alpha_{11} S_1^T S_2 & \alpha_{12} S_1^T S_1 & \alpha_{12} S_1^T S_3 \\ \alpha_{11} S_2^T S_1 & \alpha_{11} S_2^T S_2 & \alpha_{12} S_2^T S_1 & \alpha_{12} S_2^T S_3 \\ \alpha_{12} S_3^T S_1 & \alpha_{12} S_3^T S_2 & \alpha_{22} S_3^T S_1 & \alpha_{22} S_3^T S_3 \\ \alpha_{12} S_1^T S_1 & \alpha_{12} S_1^T S_2 & \alpha_{22} S_1^T S_1 & \alpha_{22} S_1^T S_3 \end{bmatrix}, \quad \theta = \begin{bmatrix} \hat{\theta}_1 \\ \hat{\theta}_2 \\ \hat{\theta}_3 \\ \hat{\theta}_4 \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} \alpha_{11} S_1^T Y_N + \alpha_{12} S_1^T S_N \\ \alpha_{11} S_2^T Y_N + \alpha_{12} S_2^T S_N \\ \alpha_{12} S_3^T Y_N + \alpha_{22} S_3^T S_N \\ \alpha_{12} S_1^T Y_N + \alpha_{22} S_1^T S_N \end{bmatrix}.$$

где векторы Y_N , S_N и матрицы S_1, S_2 формируются на основе реализаций входных и выходных сигналов $\{u_n\}$, $\{y_n\}$, $n = 0, 1, \dots, N$; $\alpha_{11} = \sigma_2^2$, $\alpha_{12} = -\rho \sigma_1 \sigma_2$, $\alpha_{22} = \sigma_1^2$; параметры $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ определяются следующими выражениями:

$$\theta_1^T = (a_1, \dots, a_k, b_1, \dots, b_l), \quad \theta_2^T = (a_{k+1}, \dots, a_p, b_{l+1}, \dots, b_q),$$

$$\theta_3^T = (c_1, \dots, c_k, d_1, \dots, d_l), \quad \theta_4^T = (c_{k+1}, \dots, c_\mu, d_{l+1}, \dots, d_\nu).$$

Решение операторного матричного уравнения типа (18) можно свести к задаче минимизации функционала невязки, то есть нахождению квазирешения уравнения на замкнутом выпуклом множестве Q в смысле В.К.Иванова. В качестве невязки можно брать квадратичный функционал вида:

$$\Phi(\theta) = \|S\theta - y\|_H^2.$$

Тогда итеративную последовательность для $\hat{\theta}_r$ можно записать в следующем виде:

$$\hat{\theta}_{r+1} = P_Q(\hat{\theta}_r - \alpha_r (F_\delta(\hat{\theta}_r) + \varepsilon_r \hat{\theta}_r)), \quad r = 0, 1, \dots,$$

где P_Q – метрический проектор; $\partial\Phi = F$, r – номер итерации; параметры регуляризации $\alpha_r > 0$, $\varepsilon_r > 0$ определяются выражениями:

$$\alpha_r = (1+r)^{-1/2}, \quad \varepsilon_r = (1+r)^{-p}, \quad 0 < p < 1/2.$$

Останов рассматриваемого итерационного процесса можно осуществлять на основе соотношений вида:

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \delta / \varepsilon_{r(\delta)} = 0, \quad \lim_{\delta \rightarrow 0} \delta^{1/2} / \varepsilon_{r(\delta)}^2 = 0, \\ \rho(F_\delta - F) \leq \delta, \quad \delta \geq 0, \quad F_\delta \in \mathcal{F}.$$

При этом

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \|\theta_\varepsilon - \theta^*\| = 0,$$

где $\theta^* \in \Xi$ – единственное решение вариационного неравенства $(\theta, \theta - d) \leq 0, \quad \forall d \in \Xi, \quad \Xi$ – множество решений (18).

Весьма часто при синтеза регулятора в замкнутых системах используются методы локально-оптимального адаптивного управления. Рассмотрим объект управления, заданный в форме

$$A(z^{-1})y_{t+1} = B(z^{-1})u_t + w_{t+1},$$

где $y_t \in R^l$ – измеряемые выходы, $u_t \in R^m$ – управление.

Тогда с учетом того, что

$$u_t = \theta^T(\Omega_t)\eta_t, \quad \eta_t^T = (y_{t-n+1}^T, \dots, y_t^T, u_{t-n+1}^T, \dots, u_t^T), \quad (19)$$

$$\Omega^T = (-A^{(n)}, \dots, -A^{(1)}, B^{(n-1)}, \dots, B^{(0)}), \quad \Phi_t^T = (y_{t-n+1}^T, \dots, y_t^T, u_{t-n+1}^T, \dots, u_t^T), \quad (20)$$

локально-оптимальный закон управления примет вид:

$$u_t = (H^T B^{(0)})^{-1} [(A^{(1)} + S^{(1)})y_t + \dots + (A^{(n)} + S^{(n)})y_{t-n+1} + \\ + (-B^{(1)} + D^{(1)})u_{t-1} + \dots + (-B^{(n-1)} + D^{(n-1)})u_{t-n+1}], \quad (21)$$

где $S^{(i)}, i = \overline{1, n}$ и $D^{(j)}, j = \overline{1, n-1}$ – произвольные матрицы размерности $l \times l$ и $l \times m$ соответственно, H – матрица $m \times l$ такая, что $\det H^T B^{(0)} \neq 0$.

В выражении (21) обращается квадратная матрица вида $G^{(0)} = H^T B^{(0)}$. Данная матрица может быть плохо обусловленной. Ниже приводится алгоритм устойчивого оценивания обратной матрицы $G^{(0)-1}$ в (21).

Приближение для псевдообратной матрицы можно определить при помощи соотношения:

$$G_\varepsilon^+ = R_k^+ U_k^+, \quad (22)$$

где R_k, U_k – определяются при помощи выражений:

$$G_\varepsilon = U_k R_k, \quad U_k^T = [U_1^T : U_2^T], \quad R_k = [R_1 : R_2], \quad U_2 = G_{21}^{(k)}, \quad (23)$$

$$R_2 = G_{12}^{(k)}, \quad U_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ g_{21}^{(k)} & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{k1}^{(k)} & g_{k2}^{(k)} & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad R_1 = \begin{bmatrix} g_{11}^{(k)} & g_{12}^{(k)} & \dots & g_{1k}^{(k)} \\ 0 & g_{22}^{(k)} & \dots & g_{2k}^{(k)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & g_{kk}^{(k)} \end{bmatrix}. \quad (24)$$

В пятой главе «Применение разработанных методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления в задачах автоматизации и управления технологическим процессом сушки калия хлорида» приводятся результаты применения разработанных методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами на основе

концепций идентификационного подхода при автоматизации и управлении технологическим процессом сушки калия хлорида.

Произведенная формализация процесса сушки калия хлорида как объекта управления позволила выделить следующие основные переменные, характеризующие рассматриваемый процесс: управляющие параметры $U = (u_1, u_2)$, где u_1 – температура теплоносителя на входе сушильного барабана, u_2 – расход теплоносителя на входе сушилки; выходные параметры $Y = (y_1, y_2)$, где y_1 – влажность сушильного материала на выходе сушильного барабана, y_2 – температура теплоносителя на выходе сушилки; неконтролируемые возмущающие воздействия $W = (w_1, w_2, w_3)$, где w_1 – расход сушимого материала на входе в сушильный барабан, w_2 – начальная влажность сушимого материала на входе в сушилку, w_3 – дисперсный состав частиц сушимого материала.

Рассматриваемый процесс сушки калия хлорида будем описывать линейной нестационарной многомерной моделью в следующем виде:

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k, \quad (25)$$

$$y_k = C_k x_k + v_k, \quad (26)$$

где x , y , u – соответственно векторы состояния объекта, выхода объекта и управления; A , B и C – неизвестные матрицы вещественных параметров объекта соответствующих размерностей; w , v – векторы белых гауссовских шумов объекта и помех измерений с известными матрицами интенсивностей $Q_i \delta_{ij}$, $R_i \delta_{ij}$ с нулевыми математическими ожиданиями соответственно.

Предварительные исследования процесса сушки калия хлорида как объекта управления показали, что в отношении параметров объекта можно принять гипотезу квазистационарности, а сам объект является полностью управляемым и идентифицируемым. Для получения и практического использования математической модели был проведен промышленный эксперимент в условиях нормального функционирования технологического процесса сушки калия хлорида на Дехканабадском заводе калийных удобрений. Время регистрации параметров T и интервал съема информации Δt реализаций переменных процесса выбирались с учетом особенностей проведения замеров тех или иных параметров и в соответствии с имеющимися рекомендациями. Необходимые значения времени регистрации и дискретизации реализаций наблюдаемых случайных процессов оказались соответственно равными: $T=5$ час, $\Delta t = 2$ мин. Всего было произведено 150 измерений.

Искомые значения матриц A_i и B_i в уравнении (25) рассчитывались на основе оценщика Мейна для различных интервалов квазистационарности. Так, например, для первых двух интервалов квазистационарности они имеют вид:

для первого интервала (измерения с номерами 1-50)

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0,748 & | & 0,187 \\ \hline -0,564 & | & 0,671 \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0,644 & | & -0,771 \\ \hline 0,597 & | & 0,327 \end{bmatrix}.$$

для второго интервала (измерения с номерами 51-100)

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0,683 & | & 0,296 \\ \hline -0,351 & | & 0,723 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0,732 & | & 0,352 \\ \hline 0,882 & | & 0,612 \end{bmatrix}.$$

Адекватность разработанных моделей была установлена на основе критерия, основанного на анализе свойств остатков. Рассмотрим задачу синтеза адаптивной системы управления процессом сушки калия хлорида на основе разработанных математических моделей. Закон управления примем в виде:

$$u_t = \theta^T(\Omega_t)x_t,$$

где $\theta(\Omega)$ – заданная матричная функция, а Ω_t – текущая оценка матрицы $\Omega^T = (A, B)$, получаемая на основе оценщика Мейна.

Для оценивания вектора состояния x_t объекта был использован традиционный фильтр Калмана.

С учетом специфических особенностей рассматриваемого объекта рассмотрим задачу синтеза системы управления при наличии запаздываний в управлениях. Будем полагать, что объект управления характеризуется целым набором запаздываний $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_J$, т.е. вместо (25) имеем следующее уравнение объекта:

$$x_{k+1} = A_k x_k + \sum_{j=1}^J B_{j,k} u_{k-\theta_j} + w_k,$$

$$(k = 0, 1, \dots, N-1; x_0, u_{-1}, \dots, u_{-\theta_J}, \text{ заданы}),$$

где θ_j – различные целые числа, которые для удобства будем считать расположенными в порядке возрастания, и все матрицы $B_{j,k}$ имеют размер $n \times m$.

Весьма часто входной сигнал w_k является коррелированной последовательностью. В таких случаях компенсирующее управление целесообразно выбирать в виде:

$$u_k = -[H_k + B_k^T P_{k+1} B_k + \alpha I]^{-1} B_k^T P_{k+1} A_k x_k,$$

$$P_k = A_k^T P_{k+1} [A_k + B_k Y_k] + G_k, \quad P_N = G_N.$$

При использовании этой желательной матрицы компенсации замкнутая система с запаздываниями будет вести себя, в смысле вектора состояния x_k , эквивалентно приведенной замкнутой системе без запаздывания. Применение рассмотренных алгоритмов при синтезе системы адаптивного управления процессом сушки калия хлорида будет способствовать повышению качества процессов управления с учетом запаздывания по управлению.

На основе полученных выражений можно предложить следующую структуру адаптивной системы управления:

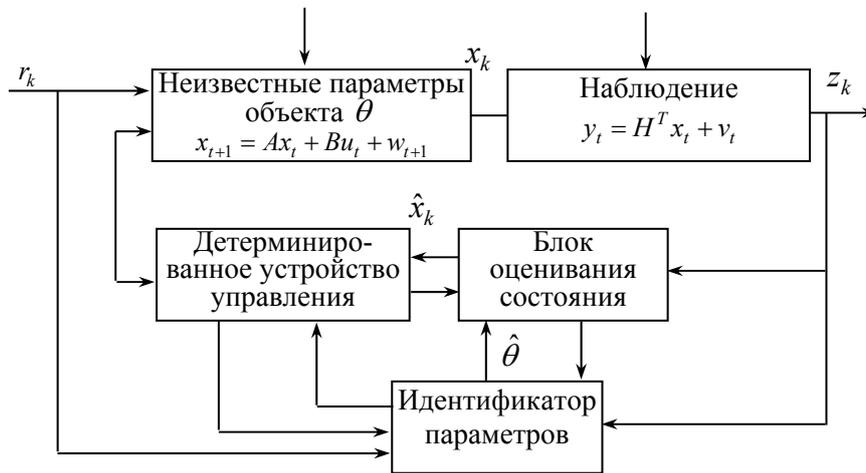


Рис. 1. Структура адаптивной системы управления по состоянию

В условиях промышленного производства восстановление вектора состояния объектов управления в условиях неопределенности встречает значительные трудности. В таких случаях для описания объекта представляется целесообразным использовать следующее уравнение:

$$A_*(z^{-1})y_{t+1} = B_*(z^{-1})u_t + \xi_{t+1},$$

где $y_t \in R^2$ – измеряемые выходы, $u_t \in R^2$ – управление.

Тогда на основе соотношений вида (19), (20) закон управления (21) при $n = 2$ выберем в виде:

$$u_t = (H^T B_*^{(0)})^{-1} [(A_*^{(1)} + S^{(1)})y_t + (A_*^{(2)} + S^{(2)})y_{t-1} + (-B_*^{(1)} + D^{(1)})u_{t-1}], \quad (27)$$

где $S^{(1)}, S^{(2)}$ и $D^{(1)}$ – произвольные матрицы размерности 2×2 , H – матрица 2×2 такая, что $\det H^T B_*^{(0)} \neq 0$.

Результаты идентификации матриц $A_*^{(1)}, A_*^{(2)}, B_*^{(0)}, B_*^{(1)}$ на основе алгоритма идентификации (5)-(9) позволили получить их численные значения:

$$A_*^{(1)} = \begin{bmatrix} 0,812 & 0,257 \\ 0,645 & -0,691 \end{bmatrix}, \quad A_*^{(2)} = \begin{bmatrix} 0,713 & 0,566 \\ -0,478 & 0,288 \end{bmatrix},$$

$$B_*^{(0)} = \begin{bmatrix} 0,431 & 0,619 \\ 0,384 & -0,293 \end{bmatrix}, \quad B_*^{(1)} = \begin{bmatrix} -0,334 & 0,516 \\ 0,418 & 0,497 \end{bmatrix}.$$

С целью повышения численной устойчивости процедуры обращения матриц $G^{(0)} = H^T B_*^{(0)}$ в (27) будем использовать регулярный метод Гаусса.

Тогда

$$(G_\varepsilon^{(0)})^+ = R_k^+ U_k^+.$$

где R_k, U_k – определяются при помощи выражений (23), (24).

На основе разработанного программного обеспечения было произведено численное моделирование закона управления на основе алгоритма (27) с учетом (22). Так, например, на следующих рисунках представлены реализации управляющего воздействия и выходной переменной рассматриваемого процесса по каналу $u_1 \rightarrow y_1$.

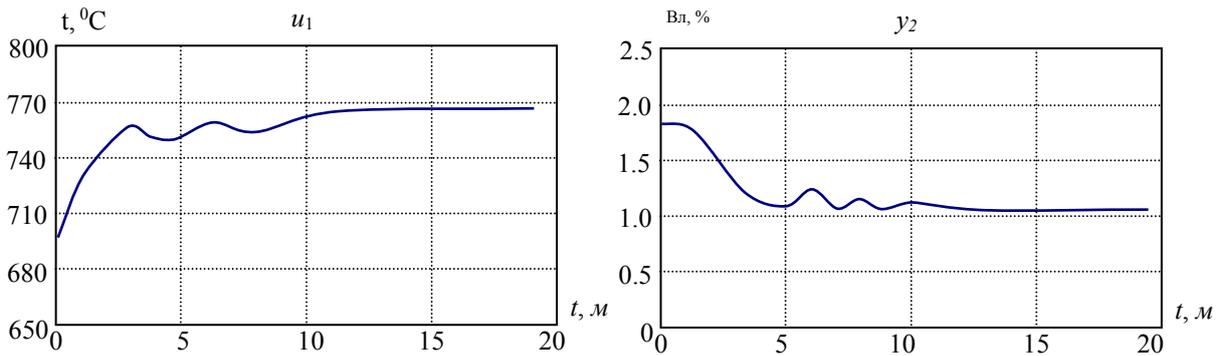


Рис. 2. Реализации управляющего воздействия и выходной переменной рассматриваемого процесса по каналу $u_1 \rightarrow y_1$

На основе проведенных исследований можно предложить следующую структуру системы адаптивного управления.

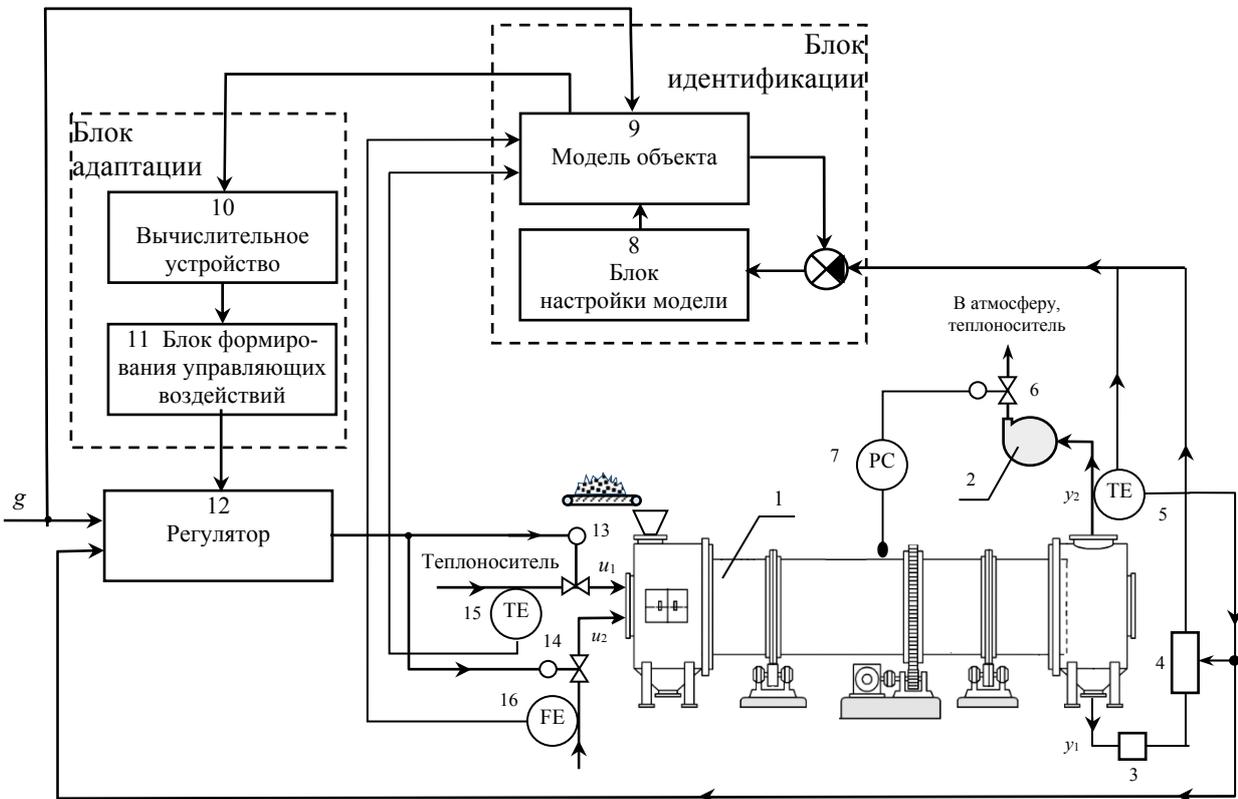


Рис.3. Структура адаптивной системы управления процессом сушки калия хлорида по выходным переменным

Разработанные регуляризованные алгоритмы формирования управляющих воздействий на основе идентификационного подхода способствуют повышению точности вычисления управляющих воздействий в адаптивной системе управления процессом сушки калия хлорида в производстве калийных удобрений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основе методов системного анализа, теории систем автоматического управления, динамической фильтрации и решения некорректных задач разработана конструктивная методология регулярного синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами на основе концепций идентификационного подхода.

В итоге получены следующие научные результаты:

1. Получены оценки погрешности задания исходных данных уравнений идентификации для различных модельных структур. Эти алгоритмы позволяют не производя непосредственного решения приобретать априорную информацию о порядке погрешности решения для получения качественных выводов о том, с какой точностью разумно далее решать систему, и оперативно осуществлять выбор оптимального значения параметра регуляризации исходя из требования согласования.

2. При формировании алгоритмов отдельного и совместного адаптивного оценивания и управления динамическими объектами на основе градиентной схемы с использованием оптимального стохастического упредителя на базе калмановского фильтра получены выражения, позволяющие оценивать сходимость адаптивных алгоритмов на основе объединения закона управления в форме обратной связи с процедурой оценивания параметров.

3. Предложены алгоритмы устойчивого оценивания параметров стабилизирующего регулятора в задаче о диссипативности адаптивной системы управления стохастическими объектами на основе концепций динамической фильтрации. Разработанные алгоритмы позволяют получать оценки, обладающие свойствами равномерной оптимальности.

4. Предложены устойчивые субоптимальные алгоритмы синтеза системы адаптивного управления динамическими объектами по критерию минимума дисперсии на основе регуляризованного фильтра калмановского типа. Полученные алгоритмы обеспечивают минимальную ковариацию регулирования.

5. Разработаны устойчивые алгоритмы субоптимального адаптивно-локального управления динамическими объектами на основе ретроспективных и итерационных вариантов упрощенной регуляризации. Предложенные алгоритмы способствуют повышению точности определения параметров закона управления.

6. Разработаны устойчивые алгоритмы идентификации динамических объектов управления на основе методов регуляризации и псевдообращения, основанные на сингулярном разложении. Настоящие алгоритмы позволяют при определенных помехосигнальных условиях осуществлять устойчивую идентификацию динамических объектов в замкнутом контуре управления.

7. Разработаны алгоритмы рекуррентной идентификации с помощью множественных моделей и адаптации их параметров на основе использования аппроксимаций в виде конечной суммы гауссовских распределений. Полученные алгоритмы приводят к состоятельным оценкам и позволяют повысить качество процессов управления в замкнутых системах управления.

8. Предложены устойчивые алгоритмы формирования управляющих воздействий в локально-оптимальных адаптивных системах управления динамическими объектами на основе неортогональных факторизациях и псевдообращения плохообусловленных или вырожденных квадратных матриц. Алгоритмы способствуют повышению точности формирования управляющих воздействий в замкнутом контуре управления.

9. Разработаны устойчивые алгоритмы идентификация параметров объекта и регулятора в замкнутой системе управления на основе принципа итеративной регуляризации с привлечением метода вариационных неравенств. Предложенные алгоритмы обеспечивают сходимость искомых оценок параметров объекта и регулятора почти наверное к истинным значениям.

10. На основе предложенных регулярных алгоритмов адаптивной идентификации синтезирована адаптивная систем управления технологическим процессом сушки калия хлорида в производстве калийных удобрений. Предложенная адаптивная система управления рассматриваемым процессом позволяет стабилизировать технологические режимы протекания процесса и повысить эффективность его функционирования.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.27.06.2017.T.03.02 ON THE ADMISSION OF
SCIENTIFIC DEGREES AT THE TASHKENT STATE TECHNICAL
UNIVERSITY**

TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY

SEVINOV JASUR USMONOVICH

**METHODS AND ALGORITHMS OF SYNTHESIS OF ADAPTIVE
CONTROL SYSTEMS OF TECHNOLOGICAL OBJECTS ON THE BASIS
OF THE CONCEPTS OF THE IDENTIFICATION APPROACH**

05.01.08 - Automation and control of technological processes and manufactures

**ABSTRACT OF THE DISSERTATION OF
DOCTOR OF SCIENCE (DSc) ON TECHNICAL SCIENCES**

Tashkent – 2018

The theme of doctoral (DSc) dissertation is registered at the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2017.3.DSc/T141.

The dissertation has been prepared at 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:

Igamberdiev Khusan Zakirovich
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Academician

Official opponents:

Marakhimov Avazjon Rakhimovich
Doctor of Technical Sciences, Professor

Nazarov Ulugbek Sultanovich
Doctor of Technical Sciences, Professor

Abdukadirov Abduzarif Abduraufovich
Doctor of Technical Sciences

Leading organization:

LLC «Ximavtomatika»

Defense of dissertation will take place in «__» _____ 2018 at ____ o'clock at a meeting of the scientific council DSc.27.06.2017.T.03.02 at the Tashkent state technical university (Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: (99871) 246-46-00; fax: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz).

The doctoral dissertation could be reviewed at the Information-resource center of Tashkent state technical university (registration number 62). Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel. : (99871) 246-03-41.

Abstract of the dissertation distributed «__» _____ 2018 year.
(mailing report № ___, on «__» _____ 2018 year).

N.R.Yusupbekov

Chairman of Scientific Council on awarding scientific degrees, Doctor of technical sciences, Professor, Academician

Sh.M.Gulyamov

Scientific Secretary of Scientific Council,
on awarding scientific degrees, the Candidate of
Technical Sciences, Associate Professor

A.M.Nazarov

Chairman of the Academic Seminar
under the Scientific Council on awarding scientific degrees,
Doctor of Technical Sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of DSc thesis)

The aim of the research work is to develop methods and algorithms of synthesis of adaptive process control systems based on the concepts of the identification approach.

The tasks of research:

system analysis of the development of methods and algorithms of synthesis of adaptive control systems for dynamic objects based on the concepts of the the identification approach;

development of methods and algorithms for sustainable adaptive parametric identification of dynamic control objects;

development of reliable methods and algorithms of synthesis of systems for adaptive control of dynamic objects;

development of reliable methods and algorithms of adaptive identification of parameters of dynamic objects and a control device in a closed control loop;

development of sustainable methods and algorithms for the formation of control actions in local-optimal adaptive control systems for dynamic objects;

practical approbation of the developed algorithms and computational diagrams for stable identification of the parameters of an object and a control device for solving problems of synthesis of adaptive control systems for specific technological objects.

The objects of the research work are adaptive control systems with identifier in the feedback loop.

Scientific novelty of the research work is as follows:

estimates of error of initial data of the identification equations for various model structures are obtained that make it possible to explicitly choose the optimal value of the regularization parameter based on the requirement of correlation;

stable suboptimal algorithms for the synthesis of an adaptive control system for dynamic objects by criterion of minimum of variance based on a regularized Kalman type filter are proposed;

stable algorithms for suboptimal adaptive-local control of dynamic objects based on retrospective and iterative variants of simplified regularization are developed;

stable algorithms of identifying dynamic control objects based on regularization and pseudo-inversion methods based on singular decomposition are proposed;

recurrent identification algorithms using multiple models and adapting their parameters based on application of approximations in the form of a finite sum of Gaussian distributions are developed;

stable algorithms for the formation of control impacts in local-optimal adaptive control systems for dynamic objects based on non-orthogonal factorizations and pseudo-inversions of poorly conditioned or degenerate square matrices are developed;

robust algorithms for identifying the parameters of the object and the controller in a closed control system based on the principle of iterative regularization involving the method of variational inequalities are developed.

Implementation of the research results. The results of synthesis of the adaptive control systems for technological objects based on the concepts of the identification approach obtained in the framework of the dissertation work are implemented in the following projects:

The developed methods and concepts of synthesis of adaptive control systems; regular algorithms of identifying the parameters of an object and a controller in a closed control system; suboptimal adaptive-local control of dynamic objects, allowing to stabilize the technological regimes of the potassium chloride drying process in the production of potash fertilizers are implemented in the Unitary Enterprise "Dehkanabad Potash Plant" (the reference letter of JSC "UZKIMYOSANOAT" №01-736/A, February 20, 2018) and overall improve the efficiency of its functioning.

The developed IARE software package (Identification, Adaptation, Regularization, Estimation), which allows for software and algorithmic support of identification and process control of potassium chloride drying are implemented in the Unitary Enterprise "Dehkanabad Potash Plant" (reference letter of JSC "UZKIMYOSANOAT" №01-736/A, February 20, 2018). The software package contributes to the efficiency of drying equipment.

the developed algorithms of synthesis of process control systems are implemented in the pressure control system in the buffer tank at IMIR-TRADE GROUP LLC (the reference letter of JSC "UZKIMYOSANOAT" №01-736/A, February 20, 2018). As a result, the increase in the quality of regulatory processes has been achieved.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation thesis consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of used literature and applications. The volume of the thesis is 185 pages of typewritten text.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (Часть I; Part I)

1. Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У., Зарипов О.О. Регулярные методы и алгоритмы синтеза адаптивных систем управления с настраиваемыми моделями // Монография, – Т.: ТашГТУ, 2014. – 160 стр.

2. Севинов Ж.У. Регулярный рекуррентный алгоритм адаптивного управления линейным динамическим объектом // Вестник ТашГТУ, 2010. - №1-2. -С.60-64. (05.00.00; №16)

3. Севинов Ж.У., Холходжаев Б.А. Регуляризованные алгоритмы синтеза адаптивного управления динамическими объектами по критерию минимума дисперсии // Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2011. – №2. -С.89-91. (05.00.00; №12)

4. Алимова У.Р., Севинов Ж.У., Холходжаев Б.А. Алгоритмы синтеза субоптимального адаптивного управления динамическими системами // Химическая технология. Контроль и управление. –Ташкент, 2011. – №3. - С.67-69. (05.00.00; №12)

5. Зарипов О.О., Севинов Ж.У., Кодиров Д.Т. Регулярные алгоритмы синтеза информационно-управляющих систем на основе концепций стохастического управления // Химическая технология. Контроль и управление. –Ташкент, 2011. – №4. – С.75-78. (05.00.00; №12)

6. Зарипов О.О., Севинов Ж.У., Кодиров Д.Т. Регулярные алгоритмы синтеза динамических систем на основе принципов замкнутого стохастического управления // Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2011, – №5. –С.70-74. (05.00.00; №12)

7. Холходжаев Б.А., Севинов Ж.У. Алгоритмы устойчивого оценивания параметров динамических объектов управления // Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2012, – №2. –С.67-69. (05.00.00; №12)

8. Севинов Ж.У., Холходжаев Б.А., Гулматов З.М. Анализ сходимости алгоритмов адаптивного управления динамическими объектами // Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2012, – №4. – С.77-79. (05.00.00; №12)

9. Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У. Регулярные алгоритмы оценивания погрешности задания исходных данных уравнения идентификации // Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2012, – №6. – С.54-57. (05.00.00; №12)

10. Севинов Ж.У., Зарипов О.О., Широнова Л.В. Регулярное адаптивное оценивание параметров векторной регрессионной модели с коррелированными ошибками измерений // Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2013, – №3. –С.64-67. (05.00.00; №12)

11. Севинов Ж.У., Игамбердиев Ж.Х. Регулярные алгоритмы синтеза субоптимального адаптивно-локального управления динамическими

объектами // Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2013, – №4. – С.79-82. (05.00.00; №12)

12. Севинов Ж.У., Холходжаев Б.А. Алгоритмы рекуррентной идентификации с помощью множественных моделей и адаптация параметров // Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2014, – №3. – С.86-89. (05.00.00; №12)

13. Sevinov J.U., Zaripov O.O., Makhmudov M.I., Kholkhodjayev B.A. Regular algorithm of adaptive estimation and control of dynamic objects based on predictive models // International scientific and technical journal «Chemical Technology. Control and Management» and Journal of Korea Multimedia Society, Special Issue, South Korea, Seoul – Uzbekistan, Tashkent, 2015, №3-4. –PP. 97-100. (05.00.00; №12)

14. Igamberdiyev H.Z., Sevinov J.U. The Dynamic Systems Adaptive Identification Algorithms on the Basis of the Regularity Principle // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering (website: www.ijetae.com, ISSN 2250-2459, ISO 9001:2008 Certified Journal), July 2015. - Volume 5, Issue 7, –pp.365-369. (05.00.00; №14)

15. Севинов Ж.У., Холходжаев Б.А. Алгоритмы устойчивого параметрического оценивания линейных объектов управления // Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2016, – №2. – С.75-78. (05.00.00; №12)

16. Sevinov J.U. Estimation of initial data errors in the tasks of dynamic control objects identification // International scientific and technical journal «Chemical Technology. Control and Management» and Journal of Korea Multimedia Society, Special Issue, South Korea, Seoul – Uzbekistan, Tashkent, 2016, №5. –PP. 96-99. (05.00.00; №12)

17. Севинов Ж.У., Ботиров Т.В. Устойчивое оценивание параметров регулятора в системах адаптивного управления технологическими объектами // Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2016, – №4. – С. 69-73. (05.00.00; №12)

18. Юсупбеков Н.Р., Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У. Формализация процедур идентификации объектов управления как процесса в замкнутой динамической системе и синтеза адаптивных регуляторов // Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2017. – №4. – С.59-72. (05.00.00; №12)

19. Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У., Юсупбеков А.Н. Регулярные алгоритмы идентификация параметров объекта и регулятора в замкнутой системе управления // Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2017. – №6. – С. 50-54. (05.00.00; №12)

20. H.Z.Igamberdiyev, A.N.Yusupbekov, O.O.Zaripov, J.U.Sevinov. Algorithms of adaptive identification of uncertain operated objects in dynamical models // Procedia Computer Science, Volume 120, 2017. –pp.854–861. ((3) Scopus)

21. Sevinov J.U. Algorithms of Sustainable Identification of Dynamic Objects in the Closed Control Line // International Journal of Advanced Research in

Science, Engineering and Technology (website: www.ijarset.com, ISSN: 2350-0328, India), Vol. 5, Issue 4, April 2018. –pp5655-5658. (05.00.00; №8)

22. Sevinov J.U. Regularized Algorithms for the Formation of Control Actions in Locally Optimal Control Systems for Dynamic Objects // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology (website: www.ijarset.com, ISSN: 2350-0328, India), Vol. 5, Issue 5, May 2018. –PP. 5853-5857. (05.00.00; №8)

II бўлим (Часть II; Part II)

23. Alimova U.R., Sevinov J.U., Kholkhodjaev B.A. Regular iteration algorithms of identification multidimensional control objects // Sixth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation “WCIS- 2010”. Tashkent-Samarqand, 2010, November, 25-27. pp.163-165.

24. Севинов Ж.У. Алгоритмы синтеза адаптивных систем управления с настраиваемыми моделями на основе принципа регулярности // «Фан ва инновация фаолиятини ривожлантиришда ёшларнинг роли» илмий-амалий анжумани, Тошкент, 22 октябрь 2010. –С.105-106.

25. Севинов Ж.У., Абдурахманов А.Г. Регулярные алгоритмы синтеза адаптивных систем управления технологическими объектами // Материалы международной научно-технической конференции «Istiqlol» «Современная техника и технология горно-металлургической отрасли и пути их развития». - Навоий, 2010. –С. 495.

26. Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У., Холходжаев Б.А. Регулярные алгоритмы адаптивной идентификации динамических объектов управления // Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий – Аль-Хорезми 2012», Том №1, 2012. –С.295-298.

27. Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У. К задаче оценки уровня погрешности исходных данных при идентификации динамических объектов управления // Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий – Аль-Хорезми 2012», Том №1, 2012. –С.292-294.

28. Sevinov J.U., Holkhodjaev B.A., Karimov D.R. Antijamming algorithm of adaptive authentication of management objects // Seventh World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation “WCIS- 2012”. Tashkent, Volume I, 2012. -pp.325-328.

29. Севинов Ж.У. Алгоритмы адаптивного субоптимального управления динамическими объектами в условиях неопределенности // Материалы XIII Республиканской научной конференции молодых ученых Каракалпакстана. - Нукус: «Илим», 2013. –С.21-22.

30. Севинов Ж.У., Холходжаев Б.А. Регулярные алгоритмы оценивания параметров нелинейных динамических систем // «Ишлаб чиқариш ва олий таълимда инновациялар ва инновацион технологиялар» илмий-амалий анжумани. Андижон, 2013, 16-17 май.

31. Шукурова О.П., Севинов Ж.У. Алгоритмы идентификации динамических объектов управления на основе регулярных методов // «Ёқилғи-энергетика ресурсларидан самарали фойдаланиш муаммолари ва ечимлари» Республика илмий-амалий анжумани, 22-23 декабрь, -Қарши, 2013. –С.309-310.

32. Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У. Регуляризованные алгоритмы адаптивной идентификации динамических систем // «Ишлаб чиқаришдаги машиналар ва мехник жихозлар инновацион технологиялари, ютуқ ва вазифалар» республика илмий ва илмий-техник анжумани матеериаллари, 17 апрел 2013 йил, Фарғона. –С.17-18.

33. Sevinov J.U., Holkhodjaev B.A., Shukurova O.P. Algorithm of steady estimation of parameters of the stabilizing regulator in the task about dissipativity of the adaptive control system // Eighth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation «WCIS- 2014». Tashkent, 2014. -pp.271-273.

34. Севинов Ж.У., Холходжаев Б.А. Регулярные рекуррентные алгоритмы идентификации динамических объектов управления // Международная научно-техническая конференция «Перспективы науки и производства химической технологии в Узбекистане», Навои. 2014. – С.202-203.

35. Зарипов О.О., Севинов Ж.У., Игамбердиев Ж.Х., Мамиров У.Ф. Регулярные алгоритмы адаптивного оценивания состояния технологических объектов управления // Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы отраслей химической технологии», Бухара, 10-12 ноября 2015 г.

36. Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У. Алгоритмы синтеза адаптивных систем управления с идентификатором // Материалы VIII Международной научно-технической конференции Горно-металлургический комплекс: достижения, проблемы и современные тенденции развития. 19-21 ноября 2015 года. Навои. – С. 452-453.

37. Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У. Регуляризованные алгоритмы адаптивной идентификации динамических объектов в замкнутом контуре управления // Сборник научных статей международной научно-практической конференции «Инновация-2015», –Ташкент, 23-24 октября, 2015. –С.248-250.

38. Igamberdiev Kh.Z., Abdurakhmanov I.Yu., Sevinov J.U., Zaripov O.O. Algorithms of estimation parameters of dynamic systems on the basis of regular methods // Eighth International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control. September 3-4, 2015. Antalya, Turkey. –pp.383-390.

39. Севинов Ж.У. Устойчивое оценивание параметров объекта и регулятора в замкнутой системе управления // Доклады Республиканской научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы применения информационных технологий в управлении». – Ташкент, 7-8 сентября 2015 г. – С. 71-74.

40. Севинов Ж.У., Холходжаев Б.А., Расулев А.Х. Алгоритмы идентификации линейных динамических объектов в условиях априорной неопределенности // Фан, таълим ва ишлаб чиқариш интеграциясида

ахборот-коммуникация технологияларини қўллашнинг ҳозирги замон масалалари Республика илмий-техник анжуманининг маърузалар тўплами, 3-қисм, Нукус. 2015. –С.279-281.

41. Севинов Ж.У. Исследование и анализ алгоритмов идентификации объектов в адаптивных системах управления // Фан, таълим ва ишлаб чиқариш интеграциясида ахборот-коммуникация технологияларини қўллашнинг ҳозирги замон масалалари Республика илмий-техник анжуманининг маърузалар тўплами, 3-қисм, Нукус. 2015. –С.277-279.

42. Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У., Мамиров У.Ф. Регуляризованные алгоритмы оценивания и управления динамическими системами // Труды конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий – Аль-Хоразми 2016», Бухара, 9-10 ноября 2016. –С.347-350.

43. Sevinov J.U. Estimation of initial data errors in the tasks of dynamic control objects identification // Ninth World Conference “Intelligent Systems for Industrial Automation”, WCIS-2016, 25-27 October 2016, Tashkent, Uzbekistan.

44. Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У. Алгоритмы параметрической идентификации объектов управления в замкнутых системах // Сборник научных статей международной научно-практической конференции «Инновация-2016», –Ташкент, 26-27 октября, 2016. –С.208-209.

45. Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У. Регуляризованные алгоритмы идентификации динамических объектов в замкнутом контуре управления // «Ишлаб чиқариш корхоналарининг энергиятежамкорлик ва энергия самарадорлик муаммоларини ечишда инновацион технологияларнинг аҳамияти» Республика илмий-амалий анжумани, 1-китоб, Қарши-2016, 151-152 б.

46. Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У. Алгоритмы регулярной идентификации объектов в замкнутом контуре управления // III Международная научно-практическая конференция: «Современные материалы, техника и технологии в машиностроении», III, IV-секции, 19-21 апреля 2016 года, Андижан. –С.36-37.

47. Севинов Ж.У. Помехоустойчивые алгоритмы идентификации объектов в замкнутом контуре управления // Сборник научных статей международной научно-практической конференции «Инновация-2017», – Ташкент, 26-27 октября, 2017. –С.213-214.

48. Севинов Ж.У. Устойчивые алгоритмы идентификации линейных объектов в замкнутом контуре в режиме нормальной эксплуатации // Материалы IX Международной научно-технической конференции: «Достижения, проблемы и современные тенденции развития горно-металлургического комплекса». Навоий. 12-14 июня, 2017. –С.491.

49. Севинов Ж.У. Устойчивые алгоритмы идентификации объектов в замкнутом контуре управления // Республиканской научно-технической конференции «Актуальные проблемы энергосбережение при использования альтернативных источников энергии», 28-29 апреля 2017 года, Карши. – С.425.

50. Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У. Регулярные алгоритмы идентификации динамических объектов в замкнутом контуре управления // Abstracts of the Republic scientific conference with participation foreign scientists "Modern problems of dynamical systems and their applications". May 1-3, 2017. – pp.307-309.

51. Игамбердиев Х.З., Зарипов О.О. Севинов Ж.У. Программное обеспечение для решения задач синтеза адаптивных стохастических систем управления непрерывными технологическими объектами. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. DGU 02343, 27.09.2011.

52. Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У., Зарипов О.О. Программное обеспечение для решения задач синтеза адаптивных систем управления с настраиваемыми моделями. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. DGU 02741, 12.03.2013.

53. Игамбердиев Х.З., Мамиров У.Ф., Севинов Ж.У. Программное обеспечение задачи регулярной непараметрической идентификации динамических объектов управления. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. DGU 04164, 17.11.2016.

54. Мамиров У.Ф., Зарипов О.О., Севинов Ж.У. Программное обеспечение задач параметрического оценивания в системах адаптивного управления. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. DGU 04755, 27.09.2017.

55. Зарипов О.О., Севинов Ж.У., Мамиров У.Ф. Программное обеспечение задач параметрической идентификации объектов управления в реальном времени. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. DGU 04756, 27.09.2017.

56. Зарипов О.О., Севинов Ж.У., Мамиров У.Ф. Программное обеспечение задач рекуррентной и итерационной параметрической идентификации объектов управления. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. DGU 04757, 27.09.2017.

57. Ботиров Т.В., Зарипов О.О., Севинов Ж.У., Мамиров У.Ф. Программное обеспечение задачи параметрической идентификации объектов управления. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. DGU 04758, 27.09.2017.

58. Ботиров Т.В., Зарипов О.О., Севинов Ж.У., Мамиров У.Ф. Программное обеспечение задач определения передаточной функции объектов управления. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. DGU 04759, 27.09.2017.

59. Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У., Мамашев Ж.Т., Омонова М.Ш. Программное обеспечение задачи оценивания возмущений в системах управления. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. DGU 04981, 15.01.2018.

60. Игамбердиев Х.З., Зарипов О.О. Севинов Ж.У. Регулярные методы и алгоритмы синтеза адаптивных систем управления с настраиваемыми моделями. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. DGU 05288, 29.03.2018.

Автореферат “ТошДТУ хабарлари” илмий журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди ҳамда ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларини мослиги текширилди.

Бичими: 84x60 ¹/₁₆. «Times New Roman» гарнитура рақамли босма усулда босилди.
Шартли босма табағи: 4. Адади 100. Буюртма № .

«Тошкент кимё-технология институти» босмахонасида чоп этилди.
100011, Тошкент, Навоий кўчаси, 32-уй.