

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

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

РАСУЛЕВ АЛИАКБАР ХАМИДУЛЛАЕВИЧ

**СТОХАСТИК ҲОЛАТ КУЗАТУВЧИЛАРИ АСОСИДА ТЕХНОЛОГИК
ОБЪЕКТЛАРНИ АДАПТИВ БОШҚАРИШ СИСТЕМАЛАРИНИ
СИНТЕЗЛАШНИНГ АЛГОРИТМЛАРИ**

**05.01.08 - Технологик жараёнлар ва ишлаб чиқаришларни автоматлаштириш
ва бошқариш**

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент– 2019

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)

Content of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)

Расулев Алиакбар Хамидуллаевич

Стохастик ҳолат кузатувчилари асосида технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлашнинг алгоритмлари.....3

Расулев Алиакбар Хамидуллаевич

Алгоритмы синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами на основе стохастических наблюдателей состояния21

Rasulev Aliakbar Hamidullayevich

Synthesis algorithms of adaptive control systems of technological objects based on stochastic state observers39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works42

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

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

РАСУЛЕВ АЛИАКБАР ХАМИДУЛЛАЕВИЧ

**СТОХАСТИК ҲОЛАТ КУЗАТУВЧИЛАРИ АСОСИДА ТЕХНОЛОГИК
ОБЪЕКТЛАРНИ АДАПТИВ БОШҚАРИШ СИСТЕМАЛАРИНИ
СИНТЕЗЛАШНИНГ АЛГОРИТМЛАРИ**

**05.01.08 - Технологик жараёнлар ва ишлаб чиқаришларни автоматлаштириш
ва бошқариш**

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида №В2017.3.PhD/Т312 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.ziyounet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар: **Игамбердиев Хусан Закирович**
техника фанлари доктори, профессор, академик

Расмий оппонентлар: **Каипбергенов Батирбек Тулепбергенович**
техника фанлари доктори, профессор
Туляганов Шухрат Дильшатович
техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)

Етакчи ташкилот: **Тошкент кимё-технология институти**

Диссертация ҳимояси Тошкент давлат техника университети ҳузуридаги DSc.27.06.2017.Т.03.02 рақамли Илмий кенгашнинг 2019 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@tdtu.uz).

Диссертация билан Тошкент давлат техника университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (86 рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100095, Тошкент шаҳри, Университет кўчаси, 2. Тел.: (99871) 246-03-41.

Диссертация автореферати 2019 йил «___» _____ куни тарқатилди.
(2019 йил «___» _____ даги ___ рақамли реестр баённомаси).

Н.Р.Юсупбеков

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

У.Ф.Мамиров

Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш илмий котиби,
техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)

А.М.Назаров

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

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда технологик жараёнлар ва ишлаб чиқаришларни автоматлаштириш соҳасида турли функционал вазифалардаги технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлаш алгоритмлари ва усулларини ишлаб чиқишга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Сўнгги бир неча йилларда ушбу талаблар, қарор қабул қилиш бўйича юқори даражали имкониятларга эга янада мукамалроқ бошқариш системаларини яратишни талаб қиладиган, динамикаси тўлиқ ёки қисман маълум жараёнларни тадқиқ қилишга нисбатан ўзгармоқда. Бу борада стохастик ҳолат кузатувчилари асосида технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлаш алгоритмларини ишлаб чиқиш муҳим масалалардан бири ҳисобланмоқда. Ривожланган мамлакатларда технологик жараёнларни идентификациялаш, динамик баҳолаш, адаптив бошқаришнинг назарий масалаларини ечиш ва уларни турли саноат соҳаларида амалий қўлланилишига катта эътибор қаратилмоқда.

Жаҳонда турли технологик жараёнларни бошқариш сифатини оширишга йўналтирилган илмий тадқиқот ишлари амалга оширилмоқда. Бу борада, стохастик ҳолат кузатувчилари асосида технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини ишлаб чиқишга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Республикамизда бугунги кунда автоматлаштириш ва бошқариш йўналишига, жумладан турли технологик жараёнлар ва ишлаб чиқаришларни автоматлаштириш ва бошқаришда энергия ва ресурс тежамкорликни таъминловчи такомиллаштирилган бошқариш системаларини яратишга алоҳида эътибор қаратилмоқда. 2017–2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан, «... иқтисодиётнинг энергия ва ресурс сарфини қисқартириш, ишлаб чиқаришга энергия тежамкор технологияларни жорий этиш, иқтисодиёт тармоқларидаги меҳнат унумдорлигини ошириш»¹ вазифалари белгилаб берилган. Шу жиҳатдан, стохастик ҳолат кузатувчилари асосида технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини яратиш ниҳоятда долзарб ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ–4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони ҳамда 2012 йил 21 мартдаги ПҚ–1730-сон «Замонавий ахборот-коммуникация технологияларини янада жорий этиш ва ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги ва 2018 йил 27 апрелдаги ПҚ–3682-сон «Инновацион ғоялар, технологиялар ва лойиҳаларни амалий жорий қилиш тизимини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ–4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони

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

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Стохастик ҳолат кузатувчилари асосида технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлашнинг усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш тадқиқотларига тааллуқли сўнгги йиллардаги илмий-техник адабиётлар таҳлили ушбу соҳада салмоқли назарий ва амалий натижаларга эришилганлигидан дарак беради. Адаптив бошқариш системаларини синтезлаш муаммоларига бағишланган кўп сондаги ишлар нашр этилган бўлиб, уларда ишлаб чиқилган умумназарий концепциялар, ечилган амалий масалалар сони ортиб бормоқда. Адаптив бошқариш системалари ривожига Т.Çimen, Т.Науакawa, R.Kalman, M.Perrier, A.Robertsson, N.P.Semichevskaya, L.Xu, Е.В.Александров, Г.М.Бакан, Д.В.Баландин, Б.Л.Бимбиреков, А.А.Бобцов, Д.А.Даденков, Д.В.Ефимов, А.Н.Жирабок, И.Е.Зубер, А.Г.Ильина, М.М.Коган, С.К.Коровин, В.В.Косьянчук, С.А.Краснова, Н.Т.Кузовков, Ю.В.Михеев, В.О.Никифоров, А.Е.Поляков, К.А.Поляков, Б.И.Прокопов, А.А.Пиркин, В.В.Сахаров, В.А.Уткин, В.В.Фомичев, И.Б.Фуртат, А.В.Шилов, А.А.Шлопак каби кўплаб хорижлик олимлар, шунингдек мамлакатимиздан Б.М.Азимов, Т.Ф.Бекмуратов, Ш.М.Гулямов, О.О.Зарипов, Х.З.Игамбердиев, А.А.Кадиров, Н.З.Камалов, М.М.Камилов, А.Р.Марахимов, И.Х.Сиддиқов, Ш.Х.Фозилов, Н.Р.Юсупбеков ва бошқа олимлар ўзларининг улкан ҳиссаларини кўшишган.

Шу билан биргаликда, илмий тадқиқотлар доирасининг доимий кенгайиши ва мураккаблашуви адаптив ҳолат кузатувчиларини синтезлашнинг самарали янги усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқишни талаб этади. Юқорида келтирилганлардан стохастик ҳолат кузатувчилари асосида технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлашнинг самарадор алгоритмларини яратиш ва янада такомиллаштиришнинг ниҳоятда долзарблиги 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 ЁФ-4-06 – «Созланувчи модели адаптив бошқариш системаларини синтезлашнинг мунтазам усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш» (2012-2013); А-5-42 – «Априор ноаниқлик шароитларида технологик объектларни автоматлаштирилган бошқариш ва мониторингини интеллектуаллаштиришни дастурий-инструментал воситалари» (2015-2017); ОТ-Ф4-78 – «Идентификацион ёндашув асосида динамик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлашнинг назарий асослари ва мунтазам усуллари ишлаб чиқиш» (2017-2020) лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади стохастик ҳолат кузатувчилари асосида технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлаш

алгоритмлари ва уларни амалга оширишнинг ҳисоблаш схемаларини ишлаб чиқиш иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

стохастик ҳолат кузатувчилари асосида технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлаш усуллари ва алгоритмлари ривожланишини тизимли таҳлил қилиш;

чизиқли системалар ғалаёнларини кузатувчи қурилма учун бошланғич шартларни барқарор баҳолашни ишлаб чиқиш;

пасайтирилган тартибли кузатувчини синтезлашнинг мунтазам алгоритмларини ишлаб чиқиш;

ташқи таъсирларни операторли акс эттириш асосида кузатувчи қурилмаларни синтезлашнинг итерацион алгоритмларини ишлаб чиқиш;

чизиқли стационар системалар учун адаптив кузатувчини мунтазам синтезлаш алгоритмларини ишлаб чиқиш;

динамик объектларни бошқариш системаларидаги адаптив кузатувчиларни синтезлашнинг турғун алгоритмларини ишлаб чиқиш;

стохастик ҳолат кузатувчилари асосида технологик объектларнинг адаптив бошқариш системаларини синтезлаш алгоритмлари ва ҳисоблаш схемасини ишлаб чиқилган алгоритмлари ва ҳисоблаш схемаларини амалий синовдан ўтказиш.

Тадқиқотнинг объекти стохастик ҳолат кузатувчилари асосида технологик объектларни адаптив бошқариш системалари ҳисобланади.

Тадқиқотнинг предмети стохастик ҳолат кузатувчилари асосида технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлашнинг мунтазам усуллари ва алгоритмлари ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Диссертация ишида тизимли таҳлил, идентификациялаш, баҳолаш, адаптив бошқариш ва нокоррект қўйилган масалаларни ечиш усулларида фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

етарлича аниқланмаган матрицаларни турғун мавҳум ўзгартириш усуллари асосида динамик системаларнинг ҳолатлари ва ғалаёнларини баҳолаш алгоритмлари ишлаб чиқилган;

соддалаштирилган мунтазамлаштиришнинг ретроспектив ва итерацион усуллари асосида адаптив кузатувчини синтезлашнинг турғун алгоритмлари ишлаб чиқилган;

бошқариш объектининг ҳолат вектори ва номаълум параметрларига мослашувчи кузатувчи қурилмаларни синтезлашнинг турғун алгоритмлари ишлаб чиқилган;

кенгайтирилган матрицаларни меъёрлаштирилган ажратиш асосида бошқарилувчи объектларнинг параметрларини адаптив кузатувчиларини синтезлашнинг мунтазам итерацион алгоритмлари ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

саноат тажрибаларининг натижалари асосида табиий газ ишлаб чиқаришдаги газ аралашмаларини адсорбцион ажратиш жараёнининг математик моделлари ишлаб чиқилган;

газли аралашмаларни адсорбцион ажратишнинг технологик

жараёнларини адаптив бошқариш ва автоматлаштиришнинг структуравий ва функционал схемалари ишлаб чиқилган;

газли аралашмаларни адсорбцион ажратишнинг технологик жараёнини бошқариш системаси, жараён кечишининг технологик режимларини барқарорлаш ва унинг самарадорлигини ошириш имконини берадиган, мос техник таъминот билан таклиф этилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқотнинг олинган натижаларини ишончлилиги услубий асосланган назарий асосларнинг бажарилиши; динамик объектларни адаптив бошқаришнинг назарий асосланган концепцияларини қўлланилиши; замонавий автоматик бошқариш назариясининг синовдан ўтказилган усуллари ва алгоритмларидан фойдаланилиши; адаптив бошқаришнинг таклиф этилган усуллари ва алгоритмларини талаб этилган даражадаги мувофиқлиги; назарий ва амалий тадқиқотлар натижалари ва уларнинг ўзаро мувофиқлиги билан таъминланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти стохастик ҳолат кузатувчилари асосида технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлашнинг, қарор қабул қилиш бўйича юқори даражадаги имкониятларга эга янада такомиллашган бошқариш системаларини синтезлаш имконини берадиган, конструктив алгоритмларини ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти стохастик ҳолат кузатувчилари асосида технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлаш масалаларини математик ва алгоритмик таъминотларини ишлаб чиқиш билан изоҳланади.

Ишлаб чиқилган алгоритмлар узлуксиз характерли технологик жараёнларни адаптив бошқариш системалари функционал структураларини қуриш ва лойиҳаларини автоматлаштиришда кенг қўлланилиши мумкин.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Стохастик ҳолат кузатувчиларидан фойдаланиб, технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлашдан олинган натижалар асосида:

етарлича аниқланмаган матрицаларни турғун мавҳум ўзгартириш усуллари асосида динамик системаларни ҳолат ва ғалаёнларини баҳолашнинг ишлаб чиқилган алгоритмлари «Муборак ГҚИЗ» МЧЖ да жорий қилинган («Ўзнефтгазқазибчиқариш» АЖ нинг 2019 йил 30 январдаги 05/09-56ж-сон маълумотномаси). Натижада ростлагичларнинг параметрларини ҳисоблаш аниқлиги ошган;

соддалаштирилган мунтазамлаштиришнинг ретроспектив ва итерацион усуллари асосида адаптив кузатувчини синтезлашнинг ишлаб чиқилган мунтазам алгоритмлари «Муборак ГҚИЗ» МЧЖ да жорий қилинган («Ўзнефтгазқазибчиқариш» АЖ нинг 2019 йил 30 январдаги 05/09-56ж-сон маълумотномаси). Натижада алгоритмлар газли аралашмаларни адсорбцион ажратиш жараёнини боришининг технологик режимларини барқарорлаш имконини берган;

бошқариш объектининг ҳолат вектори ва номаълум параметрларига мослашувчи кузатиш қурилмаларини синтезлашнинг ишлаб чиқилган турғун

алгоритмлари «Муборак ГҚИЗ» МЧЖ да жорий қилинган («Ўзнефтгазқазибчиқариш» АЖ нинг 2019 йил 30 январдаги 05/09-56ж-сон маълумотномаси). Натижада объектнинг параметрлари ва ғалаёнларни аниқлаш аниқлиги ошган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқот натижалари 8 та халқаро ва 3 та республика илмий-техник анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мазуси бўйича 20 та илмий иш, жумладан, ЎзР ОАК эътироф этган илмий журналларда 9 та мақола, шундан 2 таси хорижий, 7 таси республика журналларида, 11 та тезислар халқаро ва республика анжуманларида чоп этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертация ҳажми 120 бетни ташкил этган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Киришда ўтказилган диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг мақсад ва вазифалари, объект ва предмети тавсифланган, тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш рўйхати, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

«Ҳолат кузатувчилари асосида адаптив бошқариш системаларини синтезлашнинг усуллари ва концепциялари» номли биринчи бобда ҳолат кузатувчилари асосидаги динамик объектларни адаптив бошқариш системалари, ноаниқлик шароитларида динамик системаларнинг ҳолатларини баҳолаш усуллари ва алгоритмлари, ҳолат кузатувчиларига эга адаптив бошқариш системаларини синтезлаш усуллари, тадқиқот мақсади ва вазифаларини қўйилиши келтирилган.

Турли даражадаги модели ноаниқликлар шароитида адаптив алгоритмларни баҳолашни амалга оширилиши кўриб чиқиладиган масалаларнинг ёмон шартланганлиги сабабли юзага келадиган кўпгина ҳисоблаш қийинчиликларига дуч келади ва бу йўналишдан чалғишга олиб келиши мумкин. Бундай шароитларда адаптив стохастик бошқаришнинг типик схемалари иш қобилиятларини таъминлаш ва мослашиш жараёнларини мувофиқлигини таъминловчи, турли функционал вазифалардаги ҳолат кузатувчиларини синтезлаш усуллари ривожланиш масалалари ниҳоятда муҳим аҳамият касб этади.

Шундан келиб чиққан ҳолда, ҳолат кузатувчиларини синтезлаш масалаларини ечишда бошқарилувчи объектлар динамикасининг тесқари масалалари концепциялари ва мунтазам усулларида фойдаланишга асосланувчи ёндашув ниҳоятда сермаҳсул ҳисобланади. Келтирилган ҳолат

стохастик ҳолат кузатувчилари асосида технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини мунтазам синтезлашнинг усуллари ва алгоритмларини яратиш ва уларни амалга оширишнинг ҳисоблаш схемаларини синтезлашнинг зарурлигини кўрсатади. Юқорида баён этилган хулосалар стохастик ҳолат кузатувчилари асосида технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини мунтазам синтезлашнинг усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш ҳамда уларни ишлаб чиқаришнинг аниқ технологик жараёнларини автоматлаштириш ва бошқариш масалаларини ечишда амалий қўллашга бағишланган ушбу диссертация ишининг мақсадини қўйилишини белгилаб берди.

Диссертациянинг «**Бошқариш объектларининг стохастик ҳолат кузатувчиларини синтезлашнинг турғун рекуррент алгоритмларини ишлаб чиқиш**» номли иккинчи боби ғалаёнлар кузатувчиларини синтезлаш, ғалаёнларини кузатувчи қурилмалар учун бошланғич шартларни барқарор баҳолаш, пасайтирилган тартибли кузатувчиларни синтезлаш, ташқи таъсирларни операторли акс эттириш асосида кузатувчи қурилмаларни синтезлашнинг алгоритмларини ишлаб чиқишга бағишланган.

Бошқариш масалаларида жуда кўп ҳолларда чизиқли системаларнинг ғалаёнларини кузатувчи қурилмалари учун бошланғич шартларни барқарор баҳолаш алгоритмларини қуриш масалалари юзага келади. Бундай масалаларни ечишнинг самарадорлиги объект ҳолатини баҳолаш аниқлигига боғлиқ.

Қуйидаги тенглама билан тавсифланадиган бошқариш объектини кўриб чиқамиз:

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k + Fw_k, \\y_k &= Cx_k,\end{aligned}\tag{1}$$

бу ерда: $x_k \in R^n$ – ҳолат ўзгарувчиларининг вектори; $u \in R^m$ – бошқариш таъсирлари вектори; $y \in R^p$ – ўлчанадиган чиқиш ўзгарувчилари вектори; $w \in R^r$ – ташқи муҳит ғалаёнларининг вектор-функцияси; $A \in R^{n \times n}$ – бошқариш объекти динамикасининг матрицаси; $B \in R^{n \times m}$ – бошқарилувчи киришлар матрицаси; $C \in R^{p \times n}$ – чиқишлар матрицаси; $F \in R^{n \times r}$ – ғалаён таъсирлари киришларининг матрицаси.

Ташқи муҳитни тавсифлаш учун одатда унинг қуйидаги модели қабул қилинади:

$$\xi_{k+1} = G\xi_k; \quad w_k = H\xi_k,\tag{2}$$

бу ерда: $\xi \in R^v$ – ташқи муҳит ҳолати ўзгарувчиларининг вектори; $G \in R^{v \times v}$ – динамикасининг матрицаси; $H \in R^{r \times v}$ – ғалаёнлар учун чиқишлар матрицаси.

Унда кузатувчининг тенгламаси қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$z_{k+1} = (G - LH)z_k + [(G - LH)LP - LPA]x_k,\tag{3}$$

бу ерда: $z_k = \hat{\xi}_k - Lf_k$. Қандайдир $z_0 = z(k_0)$ учун (3) тенгламанинг ечими $\hat{\xi}_k = z_k + LPx_k$ дан иборат, демак қидирилаётган баҳо:

$$\hat{w}_k = H\hat{\xi}_k = H[z_k + LPx_k].\tag{4}$$

Унда, юқорида келтирилган ифодалар асосида ҳамда кузатувчи курилмаларни куриш усулига асосланиб, қуйидаги тенгламаларни ёзиш мумкин:

$$\hat{x}_{k+1} = (A - KC)\hat{x}_k + F\hat{w}_k + Ky_k, \quad (5)$$

$$\hat{z}_{k+1} = (G - LH)\hat{z}_k + [(G - LH)LP - LP(A - KC)]\hat{x}_k - LPKy_k, \quad (6)$$

$$\text{ихтиёрий } k \geq k_0 \text{ да } \hat{w}_k = H[\hat{z}_k + LP\hat{x}_k]. \quad (7)$$

(5) ва (6) учун бошланғич шартларни қуйидаги кўринишда берамиз:

$$\hat{x}(t_0) = \hat{x}_0 = C^+ y(k_0) = C^T (CC^T)^{-1} y(k_0), \quad \hat{z}(k_0) = \hat{z}_0 = -LP\hat{x}_0. \quad (8)$$

Шундай қилиб, синтезланаётган кузатувчининг аниқлиги $\hat{x}(t_0)$ ва $\hat{z}(k_0)$ бошланғич маълумотларнинг берилиш аниқлигига боғлиқ бўлади. Матрица C нинг у ёки бу ажратилишидан фойдаланувчи C^+ турғун ҳисоблаш алгоритмини кўриб чиқамиз. Агар $\text{rank}C = p$ ($p \leq n$ бўлганда $C \in R^{p \times n}$) бўлса, матрица C га мавҳум тесқари матрица – Гауссинг иккинчи трансформацияси билан аниқланувчи C^+ эканлигини эътиборга олган ҳолда ёзамиз:

$$C^+ = C^T (CC^T)^{-1}. \quad (9)$$

Матрица C ни ўзгартиришда, шунингдек (9) ифодадаги $Q = CC^T$ ни ҳисоблашга асосланган усулдан ҳам фойдаланиш мумкин. Q матрица $r < p$ рангли $p \times p$ тартибли симметрик номанфий аниқланган матрица эканлигини эътиборга олсак, у ҳолда:

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

Бу ерда мунтазамлаштириш параметри α ни модели мисоллар асосида аниқлаш мақсадга мувофиқдир. Шунингдек (9) тенгламани ечишда шкалаланмаган ковариацион матрица деб номланувчи $Z = (CC^T)^{-1}$, $\text{rank}C = p$ ни ҳисоблаш билан боғлиқ бўлган алгоритмик амаллар ҳам ниҳоятда самарали ҳисобланади.

Келтирилган ифодалар ғалаёнларни кузатувчи курилмалар учун бошланғич шартларни барқарор баҳолашнинг соддалашган ҳисоблаш амалларини синтезлаш имконини беради.

Ташқи таъсирларнинг кузатувчи курилмалари комбинирлашган ва инвариант автоматик системаларнинг бошқарувчи курилмаларида қўлланилади. Бу уларнинг ўтиш ва қарор режимлардаги хоссаларини аҳамиятли даражада яхшилаш имконини беради. Таъсирларни бевосита ўлчашни иложи бўламайдиган ҳолларга ўтган ҳолда, $f(t)$ таъсир тенгламаси оператор шаклида қуйидаги кўринишда ёзилган объектга берилган деб қабул қиламиз:

$$A(D)y(t) = B(D)u(t) + H(D)f(t),$$

бу ерда: $y(t)$, $u(t)$ – чиқиш ўзгаручиси ва объектни бошқаришни мумкин бўлган ўлчашлари; $A(D)$ – n даражали меъёрлаштирилган кўпхад; $B(D)$, $H(D)$ – мос равишда m_0 ва m_1 даражали кўпхадлар, бунда $m_j \leq n$.

$A(D)$, $B(D)$ ва $H(D)$ кўпхадларнинг коэффициентлари доимий ва берилган. Ушбу ҳолда кузатувчи курилманинг тенгламасини қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$R(D)\sigma_i(t) = Q_i(D)A(D)y(t) - Q_i(D)B(D)u(t), \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

Агар кўпхад қуйидаги кўринишга эга бўлса:

$$R(D) = D^{n+1} + \sum_{i=0}^{n+r-1} \rho_i D^i, \quad Q_0(D) = \sum_{i=0}^{r-1} \chi_i D^i, \quad H(D) = \sum_{i=0}^{m_1} \eta_i D^i, \quad M(D) = \sum_{i=0}^n \mu_i D^i, \quad (10)$$

унда кўрсатилган системани қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$\Gamma \theta = \rho, \quad (11)$$

бу ерда:

$$\Gamma = \left[\begin{array}{ccc|cc} \eta_0 & & 0 & \beta_0 & 0 \\ \eta_1 & \eta_0 & & \beta_1 & \beta_0 \\ \cdot & \eta_1 & \cdot & \cdot & \beta_1 & \cdot \\ \eta_{m_1} & & \cdot & \eta_0 & \beta_{r-1} & \cdot & \beta_0 \\ & \eta_{m_1} & & | & 1 & \beta_{r-1} & \beta_1 \\ & & \cdot & | & & 1 & \cdot \\ 0 & & \eta_{m_1} & | & 0 & \cdot & \beta_{r-1} \end{array} \right], \quad \theta = \begin{bmatrix} \chi_0 \\ \chi_1 \\ \cdot \\ \chi_{r-1} \\ \mu_0 \\ \mu_1 \\ \cdot \\ \mu_n \end{bmatrix}, \quad \rho = \begin{bmatrix} \rho_0 \\ \rho_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \rho_{n+r-1} \\ 1 \end{bmatrix}.$$

(11) тенглама ёмон шартланган бўлиши мумкин ва ушбу тенглама ечимини мунтазамлаштириш учун мунтазам итерацион усуллардан фойдаланамиз. (11) системани ечиш учун қуйидаги итерацион схемадан фойдаланамиз:

$$\beta_r = \beta_{r-1} - (\Gamma^T \Gamma)_h \beta_r + (\Gamma^T \rho^T)_\delta + w_r, \quad r \geq 1, \quad M \|w_k - M w_k\|^2 \leq \varepsilon^2, \quad k = 1, \dots, r$$

Фараз қиламиз, қуйидаги силликлантириш шарти бажарилмоқда:

$$\|(\Gamma^T \Gamma)_h - \Gamma^T \Gamma\| \leq h \leq 1, \quad \|(\Gamma^T \rho^T)_\delta - \Gamma^T \rho^T\| \leq \delta \leq 1.$$

Итерацион жараёни тўхтатишнинг турли қоидалари кўриб чиқилди.

Нокоррект қўйилган масалаларни ечишнинг итерацион усуллари назарияси асосида шуни кўрсатиш мумкин-ки, итерацион жараёни тўхтатишнинг қуйидаги қоидаси:

$$\text{П}_0: \mu = a_1 \delta + a_2 \eta, \quad m = \inf (r \geq 1: \|\beta_r - \beta_{r-1}\| \leq \mu),$$

$$\text{П}_1: \mu = d_1 \delta + d_* \eta, \quad m = \inf (r \geq 0: \|(\Gamma^T \Gamma)_h \beta_r - (\Gamma^T \rho^T)_\delta\| \leq \mu),$$

қуйидаги тўхтатиш қоидалари учун мунтазамлаштиришни таъминлайди:

$$\text{П}_0: \varepsilon \leq c(\delta + h)^2, \quad \text{П}_1: \varepsilon \leq c(\delta + h)^3,$$

бу ерда: m – тўхтатиш моменти; $a_1, a_2, d_1, d_* > \|\beta_*\|$, $\inf \emptyset = \infty, \beta_\infty = 0$.

Келтирилган алгоритмлар, ташқи таъсирларни бевосита ўлчаш имкони бўлмаган ҳолларда, динамик объектларни бошқаришнинг инвариант системаларини синтезлаш масаласини самарали ечиш имконини беради. Бунда ўлчанмайдиган таъсирларнинг олинган баҳолари асимптотик турғунлик хоссаларига эга бўлади.

Шунингдек, бу ерда оптимал динамик филтрлаш назарияси асосида ғалаёнларнинг кузатувчи қурилмаларини ва пасайтирилган тартибли кузатувчини синтезлаш масалалари кўриб чиқилган. Уларни амалга оширишда энг кичик вазнли квадратлар ва бўлинган матрицадан фойдаланиш усуллариининг мунтазамлашган ҳисоблаш схемалари самарали эканлиги кўрсатилган.

Диссертациянинг «**Бошқариш объектининг стохастик ҳолат кузатувчиларини синтезлашнинг турғун адаптив алгоритмларини ишлаб чиқиш**» номли учинчи ғалаёнларнинг адаптив кузатувчисини синтезлаш, стационар система учун адаптив кузатувчини синтезлаш, бошқариш системаси контуридаги параметрлар идентификатори ва ҳолат баҳолагичига эга бўлган адаптив кузатувчиларни синтезлаш ҳамда объектнинг параметрлари номаълум бўлганда бошқарувчи адаптив кузатувчиларни синтезлаш алгоритмларини ишлаб чиқишга бағишланган.

Мураккаб автоматик системаларни таҳлил қилиш ва синтезлаш масалаларида ишлатиладиган математик моделлар реал объектнинг фақатгина соддалаштирилган тавсифи ҳисобланади. Бундай шароитларда кузатувчи қурилмаларни қуриш объектнинг меъёрий фаолият кўрсатиш шароитларида унинг ҳолати ва параметрларини баҳолаш билан боғлиқ.

Қуйидаги кўринишга эга стационар системани кўриб чиқамиз:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + bu_k, \quad x(0) = x_0; \\ y_k &= h^T x_k; \end{aligned} \quad (12)$$

бу ерда: x_k – система ҳолатининг $(n \times 1)$ -вектори; u_k – скаляр кириш; y_k – скаляр чиқиш;

$$A = \begin{pmatrix} -a_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -a_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ -a_{n-1} & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}; \quad b = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}; \quad h = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Қўйилган масалани ечиш учун (12) системани қуйидаги эквивалент шаклда ёзамиз:

$$x_{k+1} = Cx_k + y_k E \eta + u_k E \beta, \quad x(0) = x_0; \quad (13)$$

бу ерда: C – хусусий қийматлари A матрицанинг хусусий қийматларидан фарқ қилувчи, маълум, доимий, асимптотик турғун $(n \times n)$ -матрица; E – $(n \times n)$ ўлчамли бирлик матрица; $\eta = (c_1 - a_1, \dots, c_n - a_n)^T$, $\beta = [b_1, b_2, \dots, b_n]^T$ – номаълум параметрлар векторлари. Матрица C матрица A нинг кўринишига ўхшаш кўринишга эга.

(13) тенгламанинг ечимини қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$x_k = \Phi_k x(0) + R_k \eta + S_k \beta; \quad (14)$$

бу ерда матрицанинг ўзгарувчилари Φ_k , R_k , S_k қуйидаги фарқ тенгламаларини қаноатлантиради:

$$\begin{aligned} \Phi_{k+1} &= C \Phi_k, \quad \Phi_0 = E; \\ R_{k+1} &= C R_k + y_k E, \quad R_0 = 0; \\ S_{k+1} &= C S_k + u_k E, \quad S_0 = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Унда қуйидаги кўринишли тенгламалар системасига ўтиш мумкин:

$$G_k \gamma = f_k, \quad G_k : H \rightarrow F; \quad (16)$$

бу ерда: $G_k = q_k q_k^T$; $f_k = q_k \varepsilon_k$; $q_k^T = [\varphi_{1,k}^T, R_{1,k}^T, S_{1,k}^T]$ – дискрет вақтли маълум функцияларнинг $[1 \times (3n-1)]$ -вектори; $\gamma = [x_{2,0}, \dots, x_{n,0}; \eta_1, \dots, \eta_n; \beta_1, \dots, \beta_n]$ – номаълум

доимий параметрларнинг $[(3n-1) \times 1]$ -вектори; $\varepsilon_k = x_{1,k} - \varphi_{11,k}x_{1,0}$ – маълум скаляр ўлчаш.

(12) система x_k ҳолатининг тўла векторини тиклаш учун табиий-ки куйидаги ифодадан фойдаланилади:

$$\hat{x}_k = \Phi_k \hat{x}_0 + R_k \hat{\eta} + S_k \hat{\beta}, \quad (17)$$

бу ерда: \hat{x}_0 , $\hat{\eta}$ ва $\hat{\beta}$ – олдиндан номаълум бўлган x_0 , η ва β параметрларнинг баҳолари.

Нотурғун масала (16) ни ечишда силликлантириш шартини $\|f - \bar{f}\| \leq \delta$ кўринишда қабул қиламиз, бу ерда \bar{f} – (16) тенглама ўнг қисмининг аниқ қиймати. Мавҳум ўзгартириш концепциясидан фойдаланамиз. Ушбу ҳолда мавҳум ўзгартириш γ_{f_k} маъно жиҳатидан $G_k^2 \gamma_{f_k} = G_k f_k$ тенгламани қаноатлантиришини эътиборга олган ҳолда, куйидагиларга эга бўламиз:

$$\gamma_\alpha = (\alpha I + G_k)^{-2} G_k^2 \gamma_{f_k}$$

ва

$$\gamma_{f_k} - \gamma_\alpha = \alpha(\alpha I + 2G_k)(\alpha I + G_k)^{-2} \gamma_{f_k}.$$

Унда $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \|\gamma_{f_k} - \gamma_\alpha\|_H = 0$, яъни мунтазамлаштириш параметри α кераклича танланганида, кўриб чиқиладиган алгоритм мунтазамлашган ҳисобланади.

Келтирилган ифодалар чизиқли стационар системаларнинг ҳолатлари ва номаълум параметрларини соддалаштирилган мунтазамлаштириш асосида турғун баҳолаш амалини амалга ошириш имконини беради.

Ўзида параметрларнинг идентификаторлари, бошланғич ва жорий ҳолат векторини оптимал баҳолагичларини мужассамлаштирувчи ва куйидагича ёзиладиган адаптив кузатувчиларни кўриб чиқамиз:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \quad x(0) = x_0, \quad (18)$$

$$y(k) = Cx(k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (19)$$

бу ерда: $x(k) \in R^n$ – номаълум жорий ҳолат вектори; $x(0) \in R^n$ – номаълум бошланғич ҳолат вектори; $u(k) \in R^r$ – кириш вектори, $r \leq n$; $y(k) \in R^m$ – чиқиш вектори; A ва B – куйидаги кўринишларга эга бўлган номаълум матрицалар:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I_{n-1} \\ a^T \end{bmatrix}, \quad a^T = [a_1, a_2, \dots, a_n], \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ B^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ b_1 & b_2 & \dots & b_r \end{bmatrix}, \quad C = [I_m : 0_{n-m}]$$

бунда: I_{n-1} – бирлик $(n-1) \times (n-1)$ матрица; $b_i^T = [b_{i,m+1}, b_{i,m+2}, \dots, b_{i,n}]$, $1 \leq i \leq r$; I_m – бирлик $m \times m$ матрица; 0_{n-m} – нулли $m \times (n-m)$ матрица.

Объект параметрларини идентификациялаш амалларини кўриб чиқамиз. Шу мақсадда, дастлаб объектнинг моделлари (18) ва (19) асосида кириш-чиқиш маълумотларининг векторлари ва матрицалари шакллантирилади:

$$\begin{aligned} & y_i(0), \quad i = 1, 2, \dots, m; \\ & Y_j^T = [y_j(0), y_j(1), \dots, y_j(n-1+Nr)], \quad j = 1, 2, \dots, m; \\ & \bar{Y}_m^T = [y_m(1), y_m(2), \dots, y_m(n+N(r+1))]; \end{aligned}$$

$$U_{1i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ u_i(0) & 0 & \dots & 0 & 0 \\ u_i(1) & u_i(0) & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_i(N-2) & u_i(N-3) & \dots & u_i(0) & 0 \end{bmatrix}, U_{1i}, (1 \leq i \leq r) - N \times N;$$

$$U_{2i} = \begin{bmatrix} u_i(N-1) & u_i(N-2) & \dots & u_i(0) \\ u_i(N) & u_i(N-1) & \dots & u_i(1) \\ u_i(N+1) & u_i(N) & \dots & u_i(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_i(n-2+N(r+1)) & u_i(n-3+N(r+1)) & \dots & u_i(n-1+Nr) \end{bmatrix}, U_{2i}, (1 \leq i \leq r);$$

$$Y_{m,m+1} = \begin{bmatrix} y_m(1) & y_m(2) & \dots & y_m(N) \\ y_m(2) & y_m(3) & \dots & y_m(N+1) \\ y_m(3) & y_m(4) & \dots & y_m(N+2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_m(n+Nr) & y_m(n+1+Nr) & \dots & y_m(n-1+N(r+1)) \end{bmatrix}.$$

Кейин $\hat{h}_1, \hat{h}_2, \dots, \hat{h}_r, \hat{a}$ ва $\hat{\eta}(0)$ векторлар, бу ерда: $\hat{h}_i^T = [\hat{h}_{i,m+1}, \hat{h}_{i,m+2}, \dots, \hat{h}_{i,n}]$, $1 \leq i \leq r$, $\hat{a}^T = [\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_n]$, $\hat{h}^T = [\hat{h}_1(0), \hat{h}_2(0), \dots, \hat{h}_N(0)]$ лар қуйидаги кўринишга эга бўлган чизикли алгебраик тенгламлар системаси ёрдамида ҳисобланади:

$$\Omega \hat{\Theta} = \bar{Y}_m, \quad (20)$$

бу ерда: $\Omega_1 = \left[\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c|c|c} U_{11} & U_{12} & \dots & U_{1r} & 0_{1,r+1} & & & I_{1,r+2} & & \\ \hline U_{21} & U_{22} & \dots & U_{2r} & Y_1 & Y_2 & \dots & Y_m & Y_{m,m+1} & 0_{2,r+2} \end{array} \right]$ – квадрат матрица, $0_{1,r+1}$ – нулли $N \times (N+m)$ матрица, $I_{1,r+2}$ – $N \times N$ матрица, $0_{2,r+2}$ – ўлчами $\hat{\Theta}^T = [\hat{h}_1^T : \hat{h}_2^T : \dots : \hat{h}_r^T : \hat{a}^T : \hat{\eta}^T(0)]$ бўлган нулли матрица.

Векторлар \hat{b}_i (бунда $(1 \leq i \leq r)$, $\hat{b}_i^T = [\hat{b}_{i,m+1}, \hat{b}_{i,m+2}, \dots, \hat{b}_{i,n}]$) қуйидаги алгебраик тенгламалар системаси ёрдамида ҳисобланади:

$$T \hat{b}_i = \hat{h}_i, \quad (1 \leq i \leq r),$$

бу ерда: T – чап учбурчакли $N \times N$ теплицева матрица.

(20) системани ечиш учун қуйидаги мунтазам итерацион схемадан фойдаланамиз. (20) тенгламалар системасидаги матрица Ω тартиби $p = N(r+1) + n$ бўлган матрица деб ҳисоблаймиз. Матрица Ω ни қуйидаги кўринишда ифодалаймиз:

$$R \Omega = L Q^T; \quad (21)$$

бу ерда: R – ўзгартиришларнинг натижавий матрицаси; Q – ортогонал $p \times p$ -матрица; L – чап учбурчакли матрица.

Ўнг қисми учун векторлар кетма-кетлигини курамиз:

$$d_1 = (0, \dots, 0, 1)^T, \quad d_2 = \mu_1 d_1 - s_1 t_1, \quad \dots, \quad d_{p+1} = \mu_p d_p - s_p t_p.$$

d_{p+1} ни бирлик сўнги компонентга меъёрлаштириб, вектор $\tilde{\theta}$ – (20)

система ечимига яқинлашишни топамиз. Ечим $\tilde{\theta}$ ни аниқлаштириш учун қуйидаги итерацион жараённи қўллаш мақсадга мувофиқ:

$$z_{k+1} = \alpha(\Omega + \alpha I)^{-1} z_k + (\Omega + \alpha I)^{-1} \bar{Y}_m, \quad z_0 = \tilde{\theta}, \quad k = 0, 1, \dots, \quad \alpha > 0. \quad (22)$$

(22) итерацион схема система учун кетма-кет яқинлашиш усулини амалга оширади:

$$(\Omega + \alpha I)z = \alpha z + \bar{Y}_m.$$

Келтирилган алгоритмлар бошқариш объектларининг параметрларини мунтазам ҳисоблаш амаллари асосида турғун идентификациялаш ва шу билан биргаликда адаптив кузатувчи қурилмаларнинг ишлаш сифатини ошириш имконини беради.

Шунингдек, бу ерда динамик объектларни бошқариш системаларидаги ғалаёнларнинг адаптив кузатувчиларини ва объектнинг параметрлари номаълум бўлганда бошқарувчи адаптив кузатувчиларни синтезлаш масалалари кўриб чиқилган. Уларни амалга оширишда функционалларни минималлаштиришнинг ҳисоблаш схемалари самарали эканлиги кўрсатилган.

Диссертациянинг «Синтезлашнинг ишлаб чиқилган алгоритмларини газли аралашмаларни адсорбцион ажратиш технологик жараёнини бошқариш масалаларида қўлланилиши» номли тўртинчи бобида стохастик ҳолат кузатувчилари асосида ишлаб чиқилган алгоритмларни қўллаш натижалари келтирилган.

Адсорбция жараёни учун бошқариш ва ғалаён каналида кечикишли модель олинган. Дифференциал тенгламанинг параметрлари аниқ номаълум бўлиб, улар кўпгина омиллар (адсорбернинг геометрик ўлчамлари, концентрация ва босимни ўлчаш аниқлиги, термодинамик параметрларнинг доимий эмаслиги, адсорбер ташкил этувчиларининг эскириши ва ишдан чиқиши) га боғлиқ. Шунингдек параметрларни априор тасаввурлар ёки назарий (жадвалий маълумотларни ва адсорбер параметрларини ҳисоблаш йўли билан) танлаш ҳамда уларнинг ўзгаришини етарли аниқликда кузатишнинг имкони йўқ. Шу билан биргаликда, адсорбция жараёнини ўтказилган таҳлили таъсирларни узатиш каналларининг динамик моделларини структуралари ҳақидаги баъзи априор ахборотларни олиш имконини беради.

Газни қуритиш жараёнини тавсифловчи асосий кўрсаткичлар сифатида қуйидаги ўзгарувчилар кўриб чиқилди:

Бошқариш параметрлари $u=(u_1, u_2)$, бу ерда u_1 – адсорбер киришида газли аралашманинг сарфи; u_2 – адсорбер киришида газли аралашманинг босими;

Чиқиш параметрлари $y=(y_1, y_2)$, бу ерда y_1 – сорбентнинг концентрацияси; y_2 – адсорбердан чиқишда газли аралашманинг ҳарорати.

Қуйида, тадқиқотнинг тажрибавий усуллари асосида таъсирларни узатишни асосий каналлари бўйича олинган, адсорбция жараёнининг динамик тавсифлари келтирилган.

$$1. u_1 \rightarrow y_1: \frac{0,021}{(16,5p+1)(12,7p+1)(8,6p+1)} = \frac{0,021}{1802p^3 + 460,7p^2 + 37,8p + 1},$$

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} -0.2556 & -0.0839 & -0.07103 \\ 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0.03125 & 0 \end{bmatrix} \tilde{x} + \begin{bmatrix} 0.03125 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \sqrt{\Delta p(t-5)};$$

$$2. u_1 \rightarrow y_2: \frac{0,005}{(21,3p+1)(18,2p+1)(13,0p+1)} = \frac{0,005}{5040p^3 + 901,2p^2 + 52,5p+1},$$

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} -0.1788 & -0.08334 & -0.0508 \\ 0.125 & 0 & 0 \\ 0 & 0.03125 & 0 \end{bmatrix} \tilde{x} + \begin{bmatrix} 0.01563 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \sqrt{\Delta p(t-5)};$$

$$3. u_2 \rightarrow y_1: \frac{0,17}{(15p+1)(9p+1)(4p+1)} = \frac{0,17}{540p^3 + 231p^2 + 28p+1},$$

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} -0.4278 & -0.2074 & -0.1185 \\ 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0625 & 0 \end{bmatrix} \tilde{x} + \begin{bmatrix} 0.125 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \sqrt{\Delta p(t-5)};$$

$$4. u_2 \rightarrow y_2: \frac{0,0035}{(18,4p+1)(16,7p+1)(11,3p+1)} = \frac{0,0035}{3472p^3 + 703,9p^2 + 46,4p+1},$$

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} -0.2027 & -0.1069 & -0.03686 \\ 0.125 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0625 & 0 \end{bmatrix} \tilde{x} + \begin{bmatrix} 0.01563 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \sqrt{\Delta p(t-5)}.$$

Олинган динамик моделларни таҳлил қилиш, кўриб чиқиладиган объектнинг энг муҳим канали $u_2 \rightarrow y_1$ – «адсорбер киришида газ босими – адсорбер чиқишида газдаги суюқлик (сорбент) концентрацияси» эканлигини кўрсатди. Бу ҳолат, ушбу канал энг катта кучайтириш коэффициентини ва энг кичик инерционликка эга эканлиги билан белгиланади. Шу сабабдан системани синтезлашни адсорбер киришидаги газ босими – бошқариш параметри асосида амалга оширамиз.

Қаралаётган жараёни адаптив бошқариш масаласини кўриб чиқамиз. Адсорберда жараёни кечишини қуйидаги тенгламалар орқали ифодалаш мумкин:

$$\begin{aligned} Q(p)y(t) + F(p)y(t-\tau) &= kR(p)u(t); \\ p^i y(\lambda) &= \theta_i(\lambda), \lambda \in [-\tau, 0], i = 0, 1, \dots, n-1; \end{aligned} \quad (23)$$

бу ерда: $u(t) \in R$, $y(t) \in R$, $Q(p)$, $R(p)$, $k > 0$, $F(p)$ – дифференциал оператор; $\tau > 0$ – кечикиш вақти; $\theta_i(\lambda) \in C_\tau$.

(23) объектнинг ростланадиган чиқиш катталиклари ўтиш жараёнларини талаб этилган сифатини эталон модели тенглама билан берамиз:

$$Q_m(p)y_m(t) = k_m R_m(p)r(t); \quad (24)$$

бу ерда: $y_m(t) \in R$ – эталон моделнинг чиқиши; $r(t) \in R$ – топшириқ таъсири; $Q_m(p)$, $R_m(p)$ – маълум доимий коэффициентли чизикли операторлар.

Кузатиш хатолиги $e(t) = y(t) - y_m(t)$ учун тенгламани қуйидаги кўринишда берамиз:

$$Q_m(p)e(t) = kR_m(p) \left[u(t) + \frac{\Delta R(p)}{R_m(p)} u(t) - \frac{\Delta Q(p)}{kR_m(p)} y(t) - \frac{F(p)}{kR_m(p)} y(t-\tau) - \frac{k_m}{k} r(t) \right]; \quad (25)$$

бу ерда: $\Delta Q(p) = Q(p) - Q_m(p)$, $\Delta R(p) = R(p) - R_m(p)$.

Бошқариш қонунини қуйидаги кўринишда қабул қиламиз:

$$u(t) = T(p)\bar{v}(t), \quad v(t) = c^T(t)w(t); \quad (26)$$

бу ерда: $T(p)$ – чизикли оператор; $\bar{v}(t)$ – ёрдамчи бошқариш таъсир $v(t)$ нинг

баҳоси; $w(t)$ – регрессия вектори.

Бошқариш қонуни (26), филтърлар (25) ва вектор $w(t)$ ни эътиборга олган ҳолда (25) ифодани қуйидаги кўринишда ёзамиз:

$$Q_m(p)e(t) = kT(p)R_m(p)[(c(t) - c_0)^T w(t) + \Delta(t)]; \quad (27)$$

бу ерда: c_0 – номаълум параметрлар вектори; $\Delta(t) = \bar{v}(t) - v(t)$.

Бошқариш қонуни (26) ни амалга ошириш учун кузатувчидан фойдаланамиз ва фақат кузатувчининг киришига $v(t)$ сигнал берилади:

$$\dot{\xi}(t) = G_0 \xi(t) + D_0(\bar{v}_2(t) - v_2(t)), \quad \bar{v}_2(t) = L \xi(t). \quad (28)$$

Унда, $\dot{\eta}(t) = \mu^{-1} G \eta(t) + b \dot{v}_2(t)$, $\bar{\Delta}(t) = \mu^{\gamma-2} L \eta(t)$ натижаларни эътиборга олган ҳолда (27) ни қуйидаги кўринишда ёзамиз:

$$\dot{\varepsilon}(t) = A \varepsilon(t) + B[(c(t) - c_0)^T w(t) + \mu^{\gamma-2} L \eta(t)]; \quad e(t) = L \varepsilon(t); \quad (29)$$

бу ерда: $\varepsilon(t) \in R^n$ – (29) нинг ҳолат вектори; A , B ва L – (27) дан (29) га ўтишда олинган, мос ўлчамлардаги матрицалар.

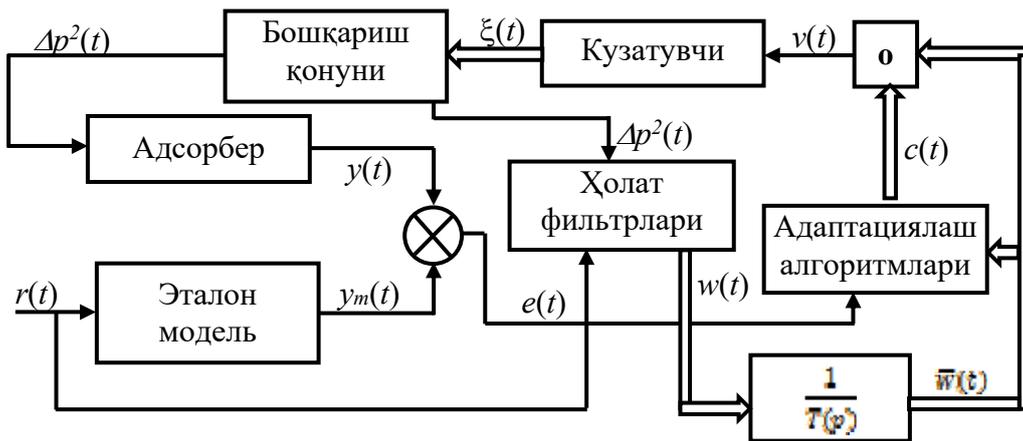
Маълум $\alpha > 0$, $\beta > 0$ ва $\mu \leq \mu_0$ қийматларда, бошқариш қонуни (26), филтърлар (25), кузатувчи (28) ва мослашиш алгоритми $\dot{c}(t) = \alpha e(t)w(t) - \beta e^2(t)c(t)$ дан иборат бўлган бошқариш системаси мақсадли шарт (29) ни таъминлашини кўрсатиш мумкин.

Агар бошқариш қонуни ва параметрларни созлаш алгоритми қуйидаги кўринишга эга бўлса, бошқариш жараёнларини сифатини ошириш мумкин:

$$\Delta p(t) = u^2(t) = (\dot{\xi}_2(t) + 2\xi_2(t) + \xi_1(t))^2; \\ \dot{c}(t) = -0,3e_1(t)\bar{w}(t - 300);$$

бу ерда: $T(p)\bar{w}(t) = w(t)$.

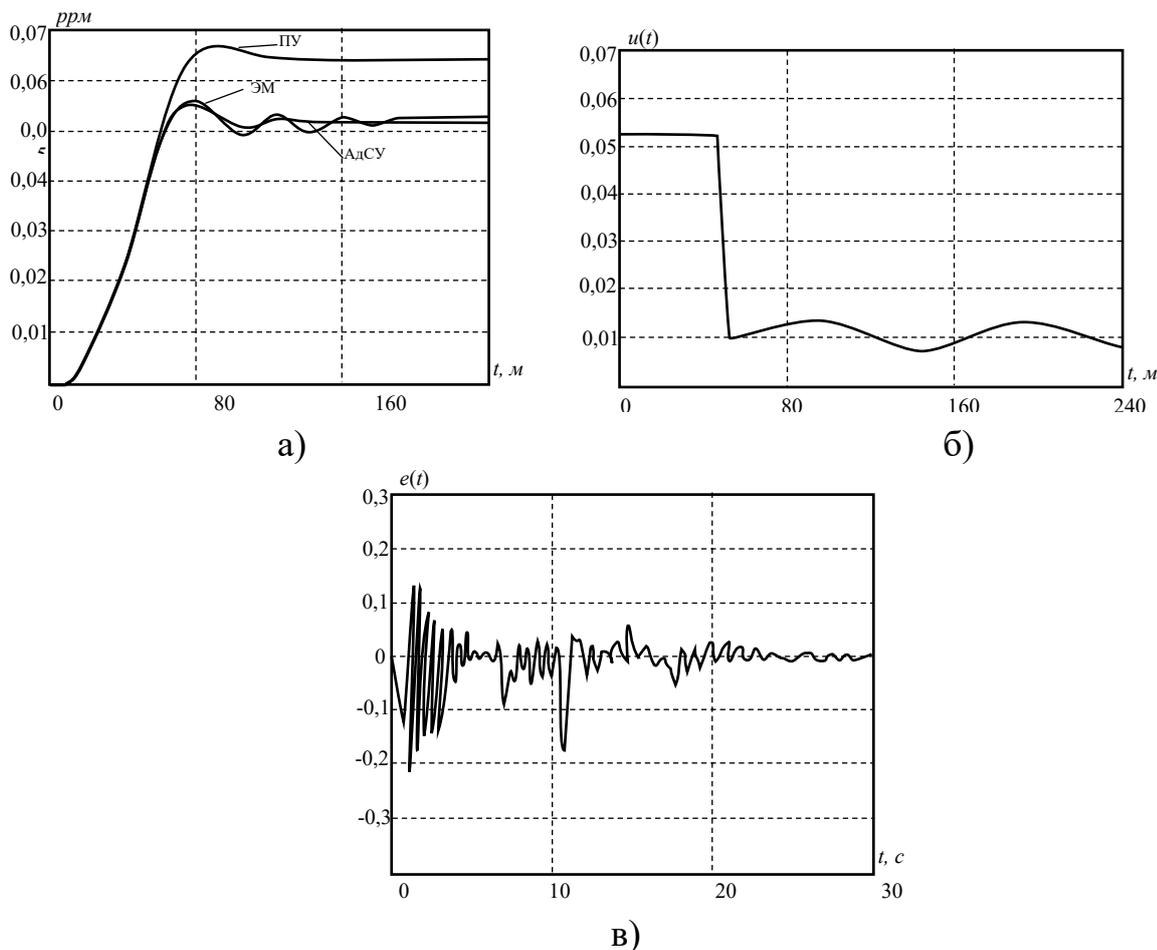
Газларни адсорбциялаш жараёнини адаптив бошқариш системасини, келтирилган ифодаларга мос равишда, қуйидаги кўринишда акс эттириш мумкин:



1-расм. Адсорбция жараёнини адаптив бошқариш системаси

2,а-расмда канал $u_2 \rightarrow y_1$ бўйича моделлар учун мавжуд дастурий бошқариш (ДБ), тақлиф этилган адаптив бошқариш системаси (АдБС) ва эталон модел (ЭМ) да концентрация $y(t)$ бўйича ўтиш жараёнларининг натижалари келтирилган. Адсорберда бошланғич шартлар нолга тенг, яъни $y(0) = \dot{y}(0) = \ddot{y}(0) = 0$ деб қабул қилинди. 2,б-расмда бошқариш таъсирини

амалга ошириш келтирилган, 2,в-расмда эса кузатиш хатолиги $e(t)$ бўйича ўтиш жараёни келтирилган.



2-расм. Чиқиш ўзгарувчилари бўйича ўтиш жараёни (а); бошқариш таъсирини амалга ошириш (б); кузатиш хатолиги $e(t)$ (в) бўйича ўтиш жараёни.

2-расмдан кўринади-ки, ишлаб чиқилган бошқариш системаси кўриб чиқилаётган жараён учун етарлича аниқликка, шунингдек бошқариш каналида кечикиш вақти мавжуд бўлганда, ростлашнинг динамик жараёнларини қаноатлантирувчи сифатга эга. Олинган ўтиш жараёнлари топшириқ таъсирига жавобларида катта бўлмаган ростлаш вақтини намоён этмоқда. Ростлаш вақтининг камайиши жараён инерционлиги ва бошқариш таъсирини чегараланганлиги кўринишидаги қийинчиликларни акс эттиради.

ХУЛОСА

Диссертацияда тизимли таҳлил, автоматик бошқариш системалари назарияси, динамик филтрлаш ва нокоррект қўйилган масалаларни ечиш усуллари асосида стохастик ҳолат кузатувчилари асосида технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлаш алгоритмлари ишлаб чиқилган.

Тадқиқот нўҳоясида қуйидаги илмий натижалар олинган:

1. Кириш сигналлари номаълум бўлган шароитда, оптимал динамик филтрлаш назарияси асосида таъсирларни кузатиш қурилмаларини

синтезлашнинг турғун алгоритмлари ишлаб чиқилган. Олинган алгоритмлар динамик бошқариш объектларининг номаълум кириш таъсирларини тиклаш амалларини самардорлигини ошириш ҳамда ушбу баҳоларнинг ҳақиқий қийматларга мувофиқлигини таъминлаш имконини беради.

2. Аниқланмаган матрицаларни турғун мавҳум ўзгартириш усули асосида динамик системаларнинг ҳолати ва ғалаёнларини баҳолаш алгоритмлари ишлаб чиқилган. Таклиф этилган алгоритмлар кузатувчи қурилмалар учун бошланғич шартларни барқарор баҳолашнинг соддалашган ҳисоблаш амалларини синтезлаш имконини беради.

3. Оптимал стохастик кузатувчилар назарияси асосида пасайтирилган тартибли кузатувчини синтезлашнинг мунтазам алгоритмлари таклиф этилган. Ушбу алгоритмлар филтрлаш жараёнининг номувофиқлик ҳодисасини бартараф этиш ва системанинг ўзгарувчан ҳолатларини баҳолаш аниқлигини ошириш имконини беради.

4. Соддалашган мунтазамлаштиришнинг ретроспектив ва итерацион усуллари асосида адаптив кузатувчини синтезлашнинг мунтазам алгоритмлари ишлаб чиқилган. Таклиф этилган алгоритмлар ташқи таъсирларни бевосита ўлчашни имкони бўлмаган ҳолларда динамик объектларни инвариант бошқариш системаларини синтезлаш масаласини самарали ечиш имконини беради.

5. Динамик объектларни бошқариш системаларида моделларни кенгайтириш тамойили асосида ғалаёнлар адаптив кузатувчиларини синтезлаш алгоритмлари таклиф этилган. Жараёнини адаптив барқарорлашнинг олинган алгоритмлари, аниқланмаган ташқи ғалаёнлар мавжуд бўлганда, кўрилаётган жараёнини бошқариш системалари сифат кўрсаткичларини ошириш имконини беради.

6. Бошқариш объектининг ҳолат вектори ва номаълум параметрларга мослашувчан бўлган кузатувчи қурилмаларни синтезлашнинг турғун алгоритмлари ишлаб чиқилган. таклиф этилган алгоритмлар чизиқли стационар системаларнинг ҳолатлари ва номаълум параметрларини баҳолашнинг турғун амалларини амалга ошириш имконини беради.

7. Динамик объектларни бошқариш системаларидаги адаптив кузатувчиларни синтезлашнинг мунтазам алгоритмлари ишлаб чиқилган. Таклиф этилган алгоритмлар бошқариш объектларининг параметрларини турғун идентификациялашни амалга ошириш ва шу билан биргаликда адаптив кузатувчи қурилмаларни ишлаш сифатини ошириш имконини беради.

8. Объектни номаълум параметрлари билан бошқарувчи адаптив кузатувчининг барқарор синтезлаш алгоритмлари ишлаб чиқилган. Ушбу алгоритмларда объектнинг номаълум параметрлари объектни адаптив кузатиш жараёнидан фойдаланишга имкон берадиган ростлагич параметрларининг «зарурий» қийматига мос келади.

9. Стохастик ҳолат кузатувчиларини синтезлашнинг ишлаб чиқилган алгоритмлари асосида газни адсорбциялаш жараёнини адаптив бошқариш системаси ишлаб чиқилган. Таклиф этилган адаптив бошқариш системаси жараёнини кечишининг технологик режимини барқарорлаш ҳамда унинг ишлаш сифати ва самардорлигини 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**

РАСУЛЕВ АЛИАКБАР ХАМИДУЛЛАЕВИЧ

**АЛГОРИТМЫ СИНТЕЗА СИСТЕМ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ НА ОСНОВЕ
СТОХАСТИЧЕСКИХ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ СОСТОЯНИЯ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент – 2019

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за №В2017.3.PhD/Т312.

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.ziyo.net.

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

Официальные оппоненты: **Каипбергенов Батирбек Тулепбергенович**
доктор технических наук, профессор

Туляганов Шухрат Дильшатович
доктор философии (PhD) по техническим наукам

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

Защита диссертации состоится «__» _____ 2019 года в __ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017.Т.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 №86). Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: 246-03-41.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2019 года.
(реестр протокола рассылки №__ от «__» _____ 2019 года)

Н.Р.Юсупбеков

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

У.Ф.Мамиров

Ученый секретарь научного совета по
присуждению учёных степеней,
доктор философии (PhD) по техническим наукам

А.М.Назаров

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

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире в области автоматизации технологических процессов и производств особое внимание уделяется разработке методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления технологическими объектами различного функционального назначения. В последние несколько лет эти требования стали смещаться в сторону исследования процессов с полностью или частично неизвестной динамикой, которые требуют создания более совершенных систем управления с высоким уровнем возможностей по принятию решений. В этой области разработка алгоритмов синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами на основе стохастических наблюдателей состояния является одной из важных задач. В развитых странах большое внимание уделяется решению теоретических задач идентификации, динамического оценивания, адаптивного управления технологическими процессами и их практическому применению в различных отраслях промышленности.

В мире осуществляются научные исследования, направленные на повышение качества управления различными технологическими процессами. В этой связи особое значение уделяется разработке систем адаптивного управления технологическими объектами на основе стохастических наблюдателей состояния.

В настоящее время в Республике уделяется большое внимание направлениям автоматизации и управлению, в том числе созданию систем усовершенствованного управления, обеспечивающих энерго- и ресурсосбережение при автоматизации и управлении различными технологическими процессами и производствами. В Стратегии по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 годы обозначены задачи «...сокращения энергоемкости и ресурсоемкости экономики, широкого внедрения в производство энергосберегающих технологий, повышения производительности труда в отраслях экономики»¹. В этом аспекте создание систем адаптивного управления технологическими объектами на основе стохастических наблюдателей состояния является весьма актуальной.

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-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,

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

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 республики IV. «Информатизация и развитие информационно-коммуникационных технологий».

Степень изученности проблемы. Анализ научно-технической литературы последних лет, касающихся исследований по разработке методов и алгоритмов синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами на основе стохастических наблюдателей состояния, свидетельствует о достижении значительных теоретических и практических результатов в этой области. Опубликовано большое количество работ, посвященных проблемам синтеза систем адаптивного управления, разработаны общетеоретические концепции, возрастает число решенных практических задач. Большой вклад в развитие систем адаптивных управления внесли многие зарубежные ученые, такие как Çimen T, Hayakawa T., Kalman R., Perrier M., Robertsson A., Semichevskaya N.P., Xu L., Александров Е.В., Бакан Г.М., Баландин Д.В., Бимбиреков Б.Л., Бобцов А.А., Даденков Д.А., Ефимов Д.В., Жирабок А.Н., Зубер И.Е., Ильина А.Г., Коган М.М., Коровин С.К., Косьянчук В.В., Краснова С.А., Кузовков Н.Т., Михеев Ю.В., Никифоров В.О., Поляков А.Е., Поляков К.А., Прокопов Б.И., Пыркин А.А., Сахаров В.В., Уткин В.А., Фомичев В.В., Фуртат И.Б., Шилов А.В., Шлопак А.А. а также отечественные ученые Азимов Б.М., Бекмуратов Т.Ф., Гулямов Ш.М., Зарипов О.О., Игамбердиев Х.З., Кадыров А.А., Камалов Н.З., Камилов М.М., Марахимов А.Р., Сиддиқов И.Х., Фозилов Ш.Х., Юсупбеков Н.Р. и др.

Вместе с тем, постоянное усложнение и расширение круга научных исследований требует разработки новых эффективных методов и алгоритмов синтеза адаптивных наблюдателей состояния. В связи с вышеотмеченным возникает настоятельная необходимость дальнейшей модификации и создания эффективных алгоритмов синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами на основе стохастических наблюдателей состояния.

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

Целью исследования является разработка алгоритмов синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами на основе стохастических наблюдателей состояния и вычислительных схем их практической реализации.

Задачи исследования:

системный анализ развития методов и алгоритмов синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами на основе стохастических наблюдателей состояния;

разработка стабильного оценивания начальных условий для наблюдающего устройства возмущений линейной системы;

разработка регулярных алгоритмов синтеза наблюдателя пониженного порядка;

разработка итерационных алгоритмов синтеза наблюдающих устройств на основе операторного представления внешних воздействий;

разработка алгоритмов регулярного синтеза адаптивного наблюдателя для линейной стационарной системы;

разработка устойчивых алгоритмов синтеза адаптивных наблюдателей в системах управления динамическими объектами;

практическая апробация разработанных алгоритмов и вычислительных схем синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами на основе стохастических наблюдателей состояния.

Объектом исследования являются системы адаптивного управления технологическими объектами на основе стохастических наблюдателей состояния.

Предметом исследования являются регулярные методы и алгоритмы синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами на основе стохастических наблюдателей состояния.

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

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработаны алгоритмы оценивания состояния и возмущений динамических систем на основе методов устойчивого псевдообращения недоопределенных матриц;

разработаны устойчивые алгоритмы синтеза адаптивного наблюдателя на основе ретроспективных и итерационных методов упрощенной регуляризации;

разработаны устойчивые алгоритмы синтеза наблюдающих устройств с адаптацией к неизвестным параметрам и вектору состояния объекта управления.

разработаны регулярные итерационные алгоритмы синтеза адаптивных наблюдателей параметров управляемых объектов на основе нормализованного разложения расширенной матрицы.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

на основе результатов промышленного эксперимента разработаны математические модели процесса адсорбционного разделения газовой смеси

в производстве природного газа;

разработаны структурные и функциональные схемы автоматизации и адаптивного управления технологическим процессом адсорбционного разделения газовой смеси;

предложена система управления технологическим процессом адсорбционного разделения газовой смеси с соответствующим техническим обеспечением, позволяющая стабилизировать технологические режимы протекания процессов и повысить эффективность его.

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

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования состоит в разработке конструктивных алгоритмов синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами на основе стохастических наблюдателей состояния, позволяющих синтезировать более совершенные системы управления с высоким уровнем возможностей по принятию решений.

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке математического и алгоритмического обеспечения задач синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами на основе стохастических наблюдателей состояния. Разработанные алгоритмы могут найти широкое применение при построении функциональной структуры и автоматизации проектирования адаптивных систем управления технологическими процессами с непрерывным характером производства.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами с использованием стохастических наблюдателей состояния:

разработанные алгоритмы оценивания состояния и возмущений динамической системы на базе методов устойчивого псевдообращения недоопределенных матриц внедрены на ООО «Мубарекский ГПЗ» (Справка АО «Ўзнефтьгазқазибчиқариш» №05/09-56ж от 30 января 2019 года). В результате повышается точность вычисления параметров регуляторов;

разработанные регулярные алгоритмы синтеза адаптивного наблюдателя на основе ретроспективных и итерационных методов упрощенной регуляризации внедрены на ООО «Мубарекский ГПЗ» (Справка АО «Ўзнефтьгазқазибчиқариш» №05/09-56ж от 30 января 2019 года). В результате разработанные алгоритмы позволяют стабилизировать технологические режимы протекания процесса адсорбционного разделения газовой смеси;

разработанные устойчивые алгоритмы синтеза наблюдающих устройств с адаптацией к неизвестным параметрам и вектору состояния объекта

управления внедрены на ООО «Мубарекский ГПЗ» (Справка АО «Ўзнефтвазказибчиқариш» №05/09-56ж от 30 января 2019 года). В результате повышается точность определения параметров объекта и возмущений.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были обсуждены на 8 международных и 3 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, из них 9 – в журнальных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан, в том числе 2 в иностранных и 7 в республиканских журналах, 11 тезисов на международных и республиканских конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 120 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 теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены перечень внедрений в практику результатов исследования, результаты апробации работы, сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе «**Методы и концепции синтеза систем адаптивного управления на основе наблюдателей состояния**» приводятся системы адаптивного управления динамическими объектами на основе наблюдателей состояния, методы и алгоритмы оценивания состояния динамических систем в условиях неопределенности, методы синтеза адаптивных систем управления с наблюдателями состояния, постановка цели и задачи исследования.

Практическая реализация адаптивных алгоритмов оценивания в условиях различной степени модельной неопределенности встречает значительные вычислительные трудности, порождаемые плохой обусловленностью рассматриваемых задач, что может привести к расходимости рекурсий. В этих условиях вопросы обеспечения условий работоспособности типовых схем адаптивного стохастического управления и развития методов синтеза наблюдателей состояния различного функционального назначения, обеспечивающих сходимость процессов адаптации, приобретают весьма важное значение.

В этой связи при решении задач синтеза наблюдателей состояния весьма плодотворным оказывается подход, основанный на использовании концепций обратных задач динамики управляемых объектов и регулярных

методов. Отмеченные обстоятельства указывают на необходимость создания методов и алгоритмов регулярного синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами на основе стохастических наблюдателей состояния и синтеза вычислительных схем их практической реализации. Вышеизложенные выводы обусловили постановку цели настоящей диссертационной работы, посвященной разработке методов и алгоритмов регулярного синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами на основе стохастических наблюдателей состояния и их практическом применении при решении задач автоматизации и управления конкретными технологическими процессами производств.

Вторая глава диссертации «**Разработка устойчивых рекуррентных алгоритмов синтеза стохастических наблюдателей состояния объектов управления**» посвящена разработке алгоритмов синтеза наблюдателей возмущений, стабильного оценивания начальных условий для наблюдающего устройства возмущений, синтеза наблюдателя пониженного порядка, синтеза наблюдающих устройств на основе операторного представления внешних воздействий.

Весьма часто в задачах управления возникает задача построения алгоритмов стабильного оценивания начальных условий для наблюдающего устройства возмущений линейной системы. От эффективности решения данной задачи зависит точность оценивания состояния объекта.

Рассмотрим управляемый объект, описываемый уравнениями

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k + Fw_k, \\y_k &= Cx_k,\end{aligned}\tag{1}$$

где $x_k \in R^n$ – вектор переменных состояния, $u \in R^m$ – вектор управляющих воздействий, $y \in R^p$ – вектор измеряемых переменных выхода, $w \in R^r$ – вектор-функция возмущений внешней среды; $A \in R^{n \times n}$ – матрица динамики объекта управления, $B \in R^{n \times m}$ – матрица управляющих входов, $C \in R^{p \times n}$ – матрица выходов, $F \in R^{n \times r}$ – матрица входов возмущающих воздействий.

Для описания внешней среды обычно принимается ее следующая модель:

$$\xi_{k+1} = G\xi_k; \quad w_k = H\xi_k,\tag{2}$$

где $\xi \in R^v$ – вектор переменных состояния внешней среды, $G \in R^{v \times v}$ – матрица динамики, а $H \in R^{r \times v}$ – матрица выходов для возмущений.

Уравнение наблюдателя тогда будет иметь вид:

$$z_{k+1} = (G - LH)z_k + [(G - LH)LP - LPA]x_k,\tag{3}$$

где $z_k = \hat{\xi}_k - Lf_k$. Решение уравнения (3) для некоторого $z_0 = z(k_0)$ доставляет $\hat{\xi}_k = z_k + LPx_k$ и, стало быть, искомую оценку:

$$\hat{w}_k = H\hat{\xi}_k = H[z_k + LPx_k].\tag{4}$$

Тогда, на основе вышеприведенных выражений и следуя методам построения наблюдающих устройств, можно записать следующие уравнения:

$$\hat{x}_{k+1} = (A - KC)\hat{x}_k + F\hat{w}_k + Ky_k,\tag{5}$$

$$\hat{z}_{k+1} = (G - LH)\hat{z}_k + [(G - LH)LP - LP(A - KC)]\hat{x}_k - LPKy_k, \quad (6)$$

$$\hat{w}_k = H[\hat{z}_k + LP\hat{x}_k] \text{ при любых } k \geq k_0. \quad (7)$$

Начальные условия для (5) и (6) будем задавать в виде:

$$\hat{x}(t_0) = \hat{x}_0 = C^+ y(k_0) = C^T (CC^T)^{-1} y(k_0), \quad \hat{z}(k_0) = \hat{z}_0 = -LP\hat{x}_0. \quad (8)$$

Таким образом, точность синтезируемого наблюдателя существенным образом зависит от точности задания начальных данных $\hat{x}(t_0)$ и $\hat{z}(k_0)$. Рассмотрим алгоритмы устойчивого вычисления C^+ , использующие те или иные разложения матрицы C . Принимая во внимание, что если $\text{rank}C = p$ ($C \in R^{p \times n}$ с $p \leq n$), то псевдообратной к матрице C является матрица C^+ , определяемая второй трансформацией Гаусса:

$$C^+ = C^T (CC^T)^{-1}. \quad (9)$$

При обращении матрицы C также можно использовать прием, основанный на вычислении $Q = CC^T$ в выражении (9). Принимая во внимание, что Q является симметричной неотрицательно определенной матрицей порядка $p \times p$ ранга $r < p$, то

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

Параметр регуляризации α здесь целесообразно определять на основе способа модельных примеров. Весьма эффективным при решении уравнения (8), также являются алгоритмические процедуры, связанные с вычислением $Z = (CC^T)^{-1}$, $\text{rank}C = p$, которую часто называют нешкалированной ковариационной матрицей.

Приведенные выражения позволяют синтезировать упрощенные вычислительные процедуры стабильного оценивания начальных условий для наблюдающего устройства возмущений.

Наблюдающие устройства внешних воздействий применяются в управляющих устройствах комбинированных и инвариантных автоматических системах. Это позволяет значительно улучшить свойства последних, как в переходных, так и в установившихся режимах. Переходя к случаю недоступных прямому измерению воздействий, примем, что воздействие $f(t)$ приложено к объекту, уравнение которого в операторной форме имеет вид:

$$A(D)y(t) = B(D)u(t) + H(D)f(t),$$

где $y(t)$, $u(t)$ – доступные измерению выходная переменная и управление объекта; $A(D)$ – нормированный полином степени n ; $B(D)$, $H(D)$ полиномы степени m_0 и m_1 соответственно, причем, $m_j \leq n$.

Коэффициенты полиномов $A(D)$, $B(D)$ и $H(D)$ постоянны и заданы. Уравнения наблюдающего устройства в этом случае можно записать в виде:

$$R(D)\sigma_i(t) = Q_i(D)A(D)y(t) - Q_i(D)B(D)u(t), \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

Если полиномы имеют вид:

$$R(D) = D^{n+1} + \sum_{i=0}^{n+r-1} \rho_i D^i, \quad Q_0(D) = \sum_{i=0}^{r-1} \chi_i D^i, \quad H(D) = \sum_{i=0}^{m_1} \eta_i D^i, \quad M(D) = \sum_{i=0}^n \mu_i D^i, \quad (10)$$

то указанную систему можно записать в виде:

$$\Gamma\theta = \rho, \quad (11)$$

где

$$\Gamma = \left[\begin{array}{ccc|cc} \eta_0 & & 0 & \beta_0 & 0 \\ \eta_1 & \eta_0 & & \beta_1 & \beta_0 \\ \cdot & \eta_1 & \cdot & \cdot & \beta_1 \\ \eta_{m_1} & & \cdot & \eta_0 & \beta_{r-1} & \cdot & \beta_0 \\ & \eta_{m_1} & & | & 1 & \beta_{r-1} & \beta_1 \\ & & \cdot & | & & 1 & \cdot \\ 0 & & \eta_{m_1} & | & 0 & \cdot & \beta_{r-1} \end{array} \right], \quad \theta = \begin{bmatrix} \chi_0 \\ \chi_1 \\ \cdot \\ \chi_{r-1} \\ \mu_0 \\ \mu_1 \\ \cdot \\ \mu_n \end{bmatrix}, \quad \rho = \begin{bmatrix} \rho_0 \\ \rho_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \rho_{n+r-1} \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Система уравнений (11) может быть плохо обусловленной и для регуляризации решения уравнения (11) будем использовать регулярные итерационные методы. Для решения системы (11) будем использовать следующую итерационную схему:

$$\beta_r = \beta_{r-1} - (\Gamma^T \Gamma)_h \beta_r + (\Gamma^T \rho^T)_\delta + w_r, \quad r \geq 1, \quad M \|w_k - Mw_k\|^2 \leq \varepsilon^2, \quad k = 1, \dots, r$$

Предположим, что выполняются следующие условия аппроксимации:

$$\|(\Gamma^T \Gamma)_h - \Gamma^T \Gamma\| \leq h \leq 1, \quad \|(\Gamma^T \rho^T)_\delta - \Gamma^T \rho^T\| \leq \delta \leq 1.$$

Рассматривались различные правила останова итерационного процесса.

На основе теории итерационных методов решения некорректных задач можно показать, что следующие правила останова итерационного процесса

$$\text{П}_0: \mu = a_1 \delta + a_2 \eta, \quad m = \inf (r \geq 1: \|\beta_r - \beta_{r-1}\| \leq \mu),$$

$$\text{П}_1: \mu = d_1 \delta + d_* \eta, \quad m = \inf (r \geq 0: \|(\Gamma^T \Gamma)_h \beta_r - (\Gamma^T \rho^T)_\delta\| \leq \mu),$$

обеспечивают регуляризацию для следующих правил останова

$$\text{П}_0: \varepsilon \leq c(\delta + h)^2, \quad \text{П}_1: \varepsilon \leq c(\delta + h)^3,$$

где m – момент останова, $a_1, a_2, d_1, d_* > \|\beta_*\|$, $\inf \emptyset = \infty, \beta_\infty = 0$.

Приведенные алгоритмы позволяют эффективно решать задачу синтеза инвариантных систем управления динамическими объектами в случае недоступных прямому измерению внешних воздействий. Получаемые при этом оценки неизмеряемых воздействий обладают свойствами асимптотической устойчивости.

Здесь также рассмотрены вопросы синтеза наблюдающих устройств воздействий на основе теории оптимальной динамической фильтрации и наблюдателя пониженного порядка. Показано, что при их практической реализации эффективными оказываются регуляризованные вычислительные схемы метода наименьших взвешенных квадратов и обращения расщепленной матрицы.

Третья глава диссертации «**Разработка устойчивых адаптивных алгоритмов синтеза стохастических наблюдателей состояния объектов управления**» посвящена разработке алгоритмов синтеза адаптивного наблюдателя возмущений, адаптивного наблюдателя для стационарной системы, адаптивных наблюдателей с идентификатором параметров и

оценителем состояния в контуре системы управления, и управляющего адаптивного наблюдателя при неизвестных параметрах объекта.

Математические модели, используемые в задачах анализа и синтеза сложных автоматических систем, являются лишь упрощенными описаниями реального объекта. Построение наблюдающих устройств в этих условиях связано с оцениванием параметров и состояния объекта в условиях его нормального функционирования.

Рассмотрим стационарную систему следующего вида:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + bu_k, \quad x(0) = x_0, \\ y_k &= h^T x_k. \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь x_k – $(n \times 1)$ -вектор состояния системы; u_k – скалярный вход; y_k – скалярный выход

$$A = \begin{pmatrix} -a_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -a_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ -a_{n-1} & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}, \quad h = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Для решения поставленной задачи представим систему (12) в следующей эквивалентной форме:

$$x_{k+1} = Cx_k + y_k E \eta + u_k E \beta, \quad x(0) = x_0. \quad (13)$$

Здесь C – известная, постоянная, асимптотически устойчивая $(n \times n)$ -матрица с собственными значениями, отличающимися от собственных значений матрицы A ; E – единичная матрица размера $(n \times n)$; $\eta = (c_1 - a_1, \dots, c_n - a_n)^T$, $\beta = [b_1, b_2, \dots, b_n]^T$ – векторы неизвестных параметров. Матрица C имеет вид, аналогичный виду A .

Решение уравнения (13) можно записать в виде:

$$x_k = \Phi_k x(0) + R_k \eta + S_k \beta, \quad (14)$$

где переменные матрицы Φ_k , R_k , S_k удовлетворяют разностным уравнениям

$$\begin{aligned} \Phi_{k+1} &= C\Phi_k, \quad \Phi_0 = E; \\ R_{k+1} &= CR_k + y_k E, \quad R_0 = 0; \\ S_{k+1} &= CS_k + u_k E, \quad S_0 = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Тогда можно прийти к системе уравнений вида:

$$G_k \gamma = f_k, \quad G_k : H \rightarrow F, \quad (16)$$

где $G_k = q_k q_k^T$, $f_k = q_k \varepsilon_k$; $q_k^T = [\varphi_{1^*,k}^T, R_{1,k}^T, S_{1,k}^T]$ – $[1 \times (3n-1)]$ – вектор известных функций дискретного времени; $\gamma = [x_{2,0}, \dots, x_{n,0}; \eta_1, \dots, \eta_n; \beta_1, \dots, \beta_n]$ – $[(3n-1) \times 1]$ – вектор неизвестных постоянных параметров; $\varepsilon_k = x_{1,k} - \varphi_{11,k} x_{1,0}$ – известное скалярное измерение.

Для восстановления полного вектора состояния x_k системы (12) естественно воспользоваться выражением

$$\hat{x}_k = \Phi_k \hat{x}_0 + R_k \hat{\eta} + S_k \hat{\beta}, \quad (17)$$

где \hat{x}_0 , $\hat{\eta}$ и $\hat{\beta}$ – оценки ранее неизвестных параметров x_0 , η , β .

При решении неустойчивой задачи (16) условия аппроксимации примем в виде $\|f - \bar{f}\| \leq \delta$, где \bar{f} – точное значение правой части уравнения (16). Будем использовать концепции псевдообращения. Принимая во внимание, что в данном случае псевдорешение γ_{f_k} удовлетворяет в обычном смысле уравнению $G_k^2 \gamma_{f_k} = G_k f_k$, будем иметь

$$\gamma_\alpha = (\alpha I + G_k)^{-2} G_k^2 \gamma_{f_k}$$

и

$$\gamma_{f_k} - \gamma_\alpha = \alpha(\alpha I + 2G_k)(\alpha I + G_k)^{-2} \gamma_{f_k}.$$

Тогда $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \|\gamma_{f_k} - \gamma_\alpha\|_H = 0$, т.е. при надлежащем выборе параметра регуляризации α рассмотренный алгоритм является регуляризирующим.

Приведенные выражения позволяют реализовать устойчивую процедуру оценивания неизвестных параметров и состояния линейной стационарной системы на основе упрощённой регуляризации.

Рассмотрим адаптивные наблюдатели, включающие идентификаторы параметров, оптимальные оценщики начального и текущего вектора состояния, которые запишем в виде:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \quad x(0) = x_0, \quad (18)$$

$$y(k) = Cx(k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (19)$$

где $x(k) \in R^n$ – неизвестный текущий вектор состояния, $x(0) \in R^n$ – неизвестный начальный вектор состояния, $u(k) \in R^r$ – вектор входа, $r \leq n$, $y(k) \in R^m$ – вектор выхода, A и B – неизвестные матрицы вида

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \vdots & I_{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a^T & \vdots & \vdots \end{bmatrix}, \quad a^T = [a_1, a_2, \dots, a_n], \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ B^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_1 & \vdots & b_2 & \vdots & \dots & \vdots & b_r \end{bmatrix}, \quad C = [I_m \ : \ 0_{n-m}]$$

где I_{n-1} – единичная $(n-1) \times (n-1)$ матрица, $b_i^T = [b_{i,m+1}, b_{i,m+2}, \dots, b_{i,n}]$, $1 \leq i \leq r$, I_m – единичная $m \times m$ матрица, 0_{n-m} – нулевая $m \times (n-m)$ матрица.

Рассмотрим процедуру идентификации параметров объекта. С этой целью вначале на основе модели объекта (18) и (19) формируются векторы и матрицы вход–выходных данных

$$\begin{aligned} & y_i(0), \quad i = 1, 2, \dots, m; \\ & Y_j^T = [y_j(0), y_j(1), \dots, y_j(n-1+Nr)], \quad j = 1, 2, \dots, m; \\ & \bar{Y}_m^T = [y_m(1), y_m(2), \dots, y_m(n+N(r+1))]; \\ & U_{li} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ u_i(0) & 0 & \dots & 0 & 0 \\ u_i(1) & u_i(0) & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_i(N-2) & u_i(N-3) & \dots & u_i(0) & 0 \end{bmatrix}, \quad U_{li}, \quad (1 \leq i \leq r) \quad - N \times N; \end{aligned}$$

$$U_{2i} = \begin{bmatrix} u_i(N-1) & u_i(N-2) & \cdots & u_i(0) \\ u_i(N) & u_i(N-1) & \cdots & u_i(1) \\ u_i(N+1) & u_i(N) & \cdots & u_i(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_i(n-2+N(r+1)) & u_i(n-3+N(r+1)) & \cdots & u_i(n-1+Nr) \end{bmatrix}, U_{2i}, (1 \leq i \leq r);$$

$$Y_{m,m+1} = \begin{bmatrix} y_m(1) & y_m(2) & \cdots & y_m(N) \\ y_m(2) & y_m(3) & \cdots & y_m(N+1) \\ y_m(3) & y_m(4) & \cdots & y_m(N+2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_m(n+Nr) & y_m(n+1+Nr) & \cdots & y_m(n-1+N(r+1)) \end{bmatrix}.$$

Далее векторы $\hat{h}_1, \hat{h}_2, \dots, \hat{h}_r$, \hat{a} и $\hat{\eta}(0)$, где $\hat{h}_i^T = [\hat{h}_{i,m+1}, \hat{h}_{i,m+2}, \dots, \hat{h}_{i,n}]$, $1 \leq i \leq r$, $\hat{a}^T = [\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_n]$, $\hat{h}^T = [\hat{h}_1(0), \hat{h}_2(0), \dots, \hat{h}_N(0)]$, вычисляются с помощью системы линейных алгебраических уравнений вида

$$\Omega \hat{\Theta} = \bar{Y}_m, \quad (20)$$

где

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & \cdots & U_{1r} & 0_{1,r+1} & \cdots & I_{1,r+2} \\ U_{21} & U_{22} & \cdots & U_{2r} & Y_1 & Y_2 & \cdots & Y_m & \bar{Y}_{m,m+1} & 0_{2,r+2} \end{bmatrix}$$

– квадратная, $0_{1,r+1}$ – нулевая $N \times (N+m)$ матрица, $I_{1,r+2}$ – $N \times N$ матрица, $0_{2,r+2}$ – нулевая матрица соответствующей размерности, $\hat{\Theta}^T = [\hat{h}_1^T : \hat{h}_2^T : \dots : \hat{h}_r^T : \hat{a}^T : \hat{\eta}^T(0)]$.

Векторы \hat{b}_i , ($1 \leq i \leq r$), где $\hat{b}_i^T = [\hat{b}_{i,m+1}, \hat{b}_{i,m+2}, \dots, \hat{b}_{i,n}]$, вычисляются с помощью системы линейных алгебраических уравнений

$$T \hat{b}_i = \hat{h}_i, \quad (1 \leq i \leq r),$$

где T – левая треугольная $N \times N$ матрица.

Для решения системы (20) будем использовать следующую регулярную итерационную схему. Будем использовать, что матрица Ω в системе уравнений (20) является неособенной порядка $p = N(r+1) + n$. Представим матрицу Ω в следующем виде

$$R\Omega = LQ^T, \quad (21)$$

где R – результирующая матрица перестановок, Q – ортогональная $p \times p$ -матрица, L – левая треугольная матрица.

Для правой части построим последовательности векторов:

$$d_1 = (0, \dots, 0, 1)^T, \quad d_2 = \mu_1 d_1 - s_1 t_1, \quad \dots, \quad d_{p+1} = \mu_p d_p - s_p t_p.$$

Нормируя d_{p+1} к единичной последней компоненте, найдем вектор $\tilde{\theta}$ – приближение к решению системы (20). Для уточнения решения $\tilde{\theta}$ целесообразно применить также следующий итерационный процесс:

$$z_{k+1} = \alpha(\Omega + \alpha I)^{-1} z_k + (\Omega + \alpha I)^{-1} \bar{Y}_m, \quad z_0 = \tilde{\theta}, \quad k = 0, 1, \dots, \quad \alpha > 0. \quad (22)$$

Итерационная схема (22) реализует метод последовательных приближений для системы

$$(\Omega + \alpha I)z = \alpha z + \bar{Y}_m.$$

Приведенные алгоритмы позволяют осуществлять устойчивую идентификацию параметров управляемых объектов на основе использования регулярных вычислительных процедур и тем самым повысить качество функционирования адаптивного наблюдающего устройства.

Здесь также рассмотрены вопросы синтеза адаптивных наблюдателей возмущений в системах управления динамическими объектами и управляющего адаптивного наблюдателя при неизвестных параметрах объекта. При их практической реализации эффективными оказываются вычислительные схемы минимизации функционалов.

В четвертой главе диссертации «**Применение разработанных алгоритмов синтеза в задачах управления технологическим процессом адсорбционного разделения газовой смеси**» приводятся результаты применения разработанных алгоритмов на основе стохастических наблюдателей состояния.

Итак, для процесса адсорбции получена модель с запаздыванием в канале управления и возмущением. Причем параметры дифференциального уравнения точно неизвестны, поскольку зависят от многих факторов (геометрических размеров адсорбера, точности измерения концентрации и давления, непостоянства термодинамических параметров, старение и износ составляющих адсорбера и т.п.). Также подобрать параметры исходя из априорных соображений или теоретически (путем расчета табличных данных и параметров адсорбера) и отслеживать их изменение с достаточной точностью практически невозможно. Вместе с тем проведенный анализ процесса адсорбции позволил получить некоторую априорную информацию о структуре динамической модели каналов передачи воздействия.

В качестве основных показателей, характеризующих процесс осушки газа, рассматривались следующие переменные:

Управляющие параметры $u=(u_1, u_2)$, где u_1 – расход газовой смеси на входе в адсорбер; u_2 – давление газовой смеси на входе в адсорбер;

Выходные параметры $y=(y_1, y_2)$, где y_1 – концентрация сорбита; y_2 – температура газовой смеси на выходе из адсорбера.

Ниже приведены динамические характеристики процесса адсорбции по основным каналам передачи воздействий на основе экспериментальных методов исследования.

$$1. \quad u_1 \rightarrow y_1: \quad \frac{0,021}{(16,5p+1)(12,7p+1)(8,6p+1)} = \frac{0,021}{1802p^3 + 460,7p^2 + 37,8p+1},$$

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} -0.2556 & -0.0839 & -0.07103 \\ 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0.03125 & 0 \end{bmatrix} \tilde{x} + \begin{bmatrix} 0.03125 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \sqrt{\Delta p(t-5)};$$

$$2. \quad u_1 \rightarrow y_2: \quad \frac{0,005}{(21,3p+1)(18,2p+1)(13,0p+1)} = \frac{0,005}{5040p^3 + 901,2p^2 + 52,5p+1},$$

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} -0.1788 & -0.08334 & -0.0508 \\ 0.125 & 0 & 0 \\ 0 & 0.03125 & 0 \end{bmatrix} \tilde{x} + \begin{bmatrix} 0.01563 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \sqrt{\Delta p(t-5)};$$

$$3. u_2 \rightarrow y_1: \frac{0,17}{(15p+1)(9p+1)(4p+1)} = \frac{0,17}{540p^3 + 231p^2 + 28p + 1},$$

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} -0.4278 & -0.2074 & -0.1185 \\ 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0625 & 0 \end{bmatrix} \tilde{x} + \begin{bmatrix} 0.125 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \sqrt{\Delta p(t-5)};$$

$$4. u_2 \rightarrow y_2: \frac{0,0035}{(18,4p+1)(16,7p+1)(11,3p+1)} = \frac{0,0035}{3472p^3 + 703,9p^2 + 46,4p + 1},$$

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} -0.2027 & -0.1069 & -0.03686 \\ 0.125 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0625 & 0 \end{bmatrix} \tilde{x} + \begin{bmatrix} 0.01563 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \sqrt{\Delta p(t-5)}.$$

Анализ полученных динамических моделей показывает, что наиболее значимым каналом рассматриваемого объекта является канал $u_2 \rightarrow y_1$ «давление газа на входе в адсорбер – концентрация жидкости в газе (сорбита) на выходе из адсорбера». Это обусловлено тем, что этот канал обладает наибольшим коэффициентом усиления и наименьшей инерционностью. По этой причине синтез системы будем производить на основе управляющего параметра – давления газа на входе адсорбера.

Рассмотрим задачу адаптивного управления рассматриваемым процессом. Процессы, протекающие в абсорбере можно описать уравнением:

$$\begin{aligned} Q(p)y(t) + F(p)y(t-\tau) &= kR(p)u(t), \\ p^i y(\lambda) &= \theta_i(\lambda), \lambda \in [-\tau, 0], i = 0, 1, \dots, n-1, \end{aligned} \quad (23)$$

где $u(t) \in R$, $y(t) \in R$, $Q(p)$, $R(p)$, $k > 0$, $F(p)$ – дифференциальный оператор, $\tau > 0$ время запаздывания, $\theta_i(\lambda) \in C_\tau$.

Требуемое качество переходных процессов регулируемой выходной величины объекта (23) будем задавать уравнением эталонной модели

$$Q_m(p)y_m(t) = k_m R_m(p)r(t), \quad (24)$$

где $y_m(t) \in R$ – выход эталонной модели, $r(t) \in R$ – задающее воздействие, $Q_m(p)$, $R_m(p)$ – линейные операторы с известными постоянными коэффициентами.

Выражение для ошибки слежения $e(t) = y(t) - y_m(t)$ будем задавать в виде:

$$Q_m(p)e(t) = kR_m(p) \left[u(t) + \frac{\Delta R(p)}{R_m(p)} u(t) - \frac{\Delta Q(p)}{kR_m(p)} y(t) - \frac{F(p)}{kR_m(p)} y(t-\tau) - \frac{k_m}{k} r(t) \right]. \quad (25)$$

где $\Delta Q(p) = Q(p) - Q_m(p)$, $\Delta R(p) = R(p) - R_m(p)$.

Закон управления примем в виде:

$$u(t) = T(p)\bar{v}(t), \quad v(t) = c^T(t)w(t), \quad (26)$$

где $T(p)$ – линейный оператор, $\bar{v}(t)$ – оценка вспомогательного управляющего воздействия $v(t)$, $w(t)$ – вектор регрессии.

Принимая во внимание закон управления (26), фильтры (25) и вектор $w(t)$, перепишем (25) в виде:

$$Q_m(p)e(t) = kT(p)R_m(p)[(c(t) - c_0)^T w(t) + \Delta(t)], \quad (27)$$

где c_0 – вектор неизвестных параметров, $\Delta(t) = \bar{v}(t) - v(t)$.

Для реализации закона управления (26) воспользуемся наблюдателем

$$\dot{\xi}(t) = G_0\xi(t) + D_0(\bar{v}_2(t) - v_2(t)), \quad \bar{v}_2(t) = L\xi(t), \quad (28)$$

где только на вход наблюдателя подается сигнал $v(t)$. Тогда, с учетом результата

$$\dot{\eta}(t) = \mu^{-1}G\eta(t) + b\dot{v}_2(t), \quad \bar{\Delta}(t) = \mu^{\gamma-2}L\eta(t)$$

перепишем (27) в виде:

$$\dot{\varepsilon}(t) = A\varepsilon(t) + B[(c(t) - c_0)^T w(t) + \mu^{\gamma-2}L\eta(t)], \quad e(t) = L\varepsilon(t), \quad (29)$$

где $\varepsilon(t) \in R^n$ – вектор состояния (29), A , B и L – матрицы соответствующих размерностей, полученные при переходе от (27) к (29).

Можно показать, что при определенных значениях $\alpha > 0$, $\beta > 0$ и $\mu \leq \mu_0$ управляющая система, состоящая из закона управления (26), фильтров (25), наблюдателя (28) и адаптационного алгоритма

$$\dot{c}(t) = \alpha e(t)w(t) - \beta e^2(t)c(t),$$

приводит к выполнению условия (29).

Качественные показатели процессов управления можно повысить, если закон управления и алгоритм настройки параметров принять в виде:

$$\Delta p(t) = u^2(t) = (\dot{\xi}_2(t) + 2\xi_2(t) + \xi_1(t))^2, \\ \dot{c}(t) = -0,3e_1(t)\bar{w}(t - 300),$$

где $T(p)\bar{w}(t) = w(t)$.

В соответствии с приведенными выражениями систему адаптивного управления процессом адсорбции газа можно представить в виде:

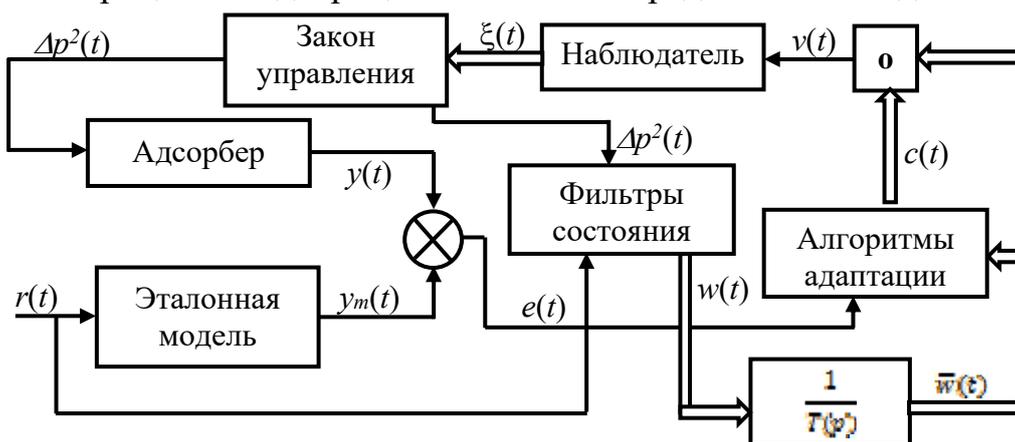


Рис. 1. Адаптивная система управления процессом адсорбции.

На рис. 2(а) для модели по каналу $u_2 \rightarrow y_1$ приведены результаты переходных процессов по концентрациям $y(t)$ при существующем программном управлении (ПУ), предложенной адаптивной системы управления (АДСУ) и эталонной модели (ЭМ). Начальные условия в адсорбере принимались нулевыми, т.е. $y(0) = \dot{y}(0) = \ddot{y}(0) = 0$. На рис. 2(б)

приведена реализация управляющего воздействия; на рис.2(в) приведен переходный процесс по ошибке слежения $e(t)$.

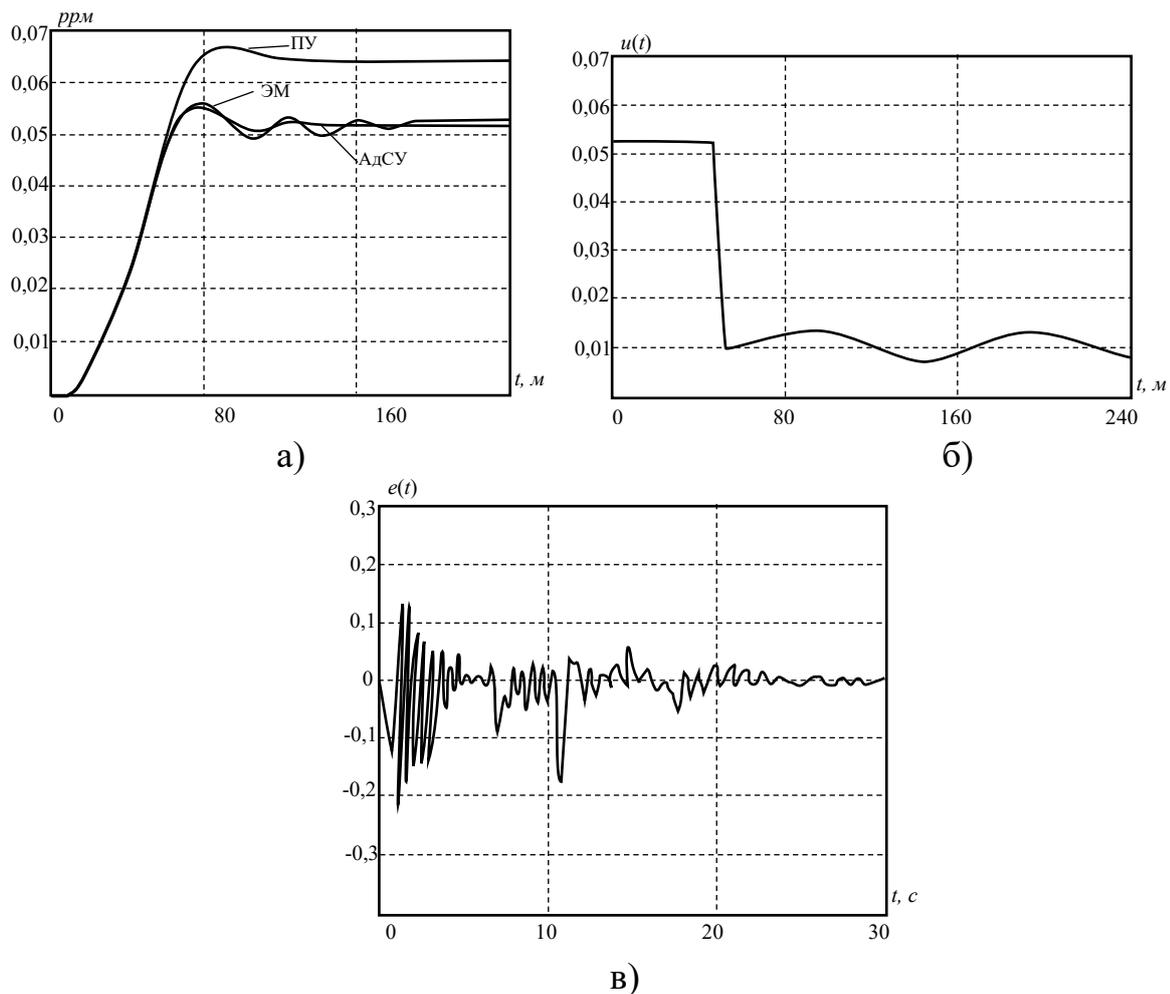


Рис. 2. Переходные процессы по выходной переменной (а); реализация управляющего воздействия (б); переходный процесс по ошибке слежения $e(t)$ (в).

Как видно из рис. 2. разработанная система управления обладает достаточной для рассматриваемого процесса точностью, удовлетворительным качеством динамических процессов регулирования при наличии времени запаздывания в объекте. Полученные переходные процессы демонстрируют небольшое время регулирования при отработке реакций на задающее воздействие. Дальнейшее уменьшение времени регулирования представляет трудности в виду инерционности процесса и ограниченности управляющего воздействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основе методов системного анализа, теории систем автоматического управления, динамической фильтрации и решения некорректных задач разработаны алгоритмы синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами на основе стохастических наблюдателей состояния.

В итоге получены следующие научные результаты:

1. Разработаны устойчивые алгоритмы синтеза наблюдающих устройств

воздействий на основе теории оптимальной динамической фильтрации. Полученные алгоритмы позволяют повысить эффективность процедуры восстановления неизвестных входных воздействий динамических объектов управления и обеспечивают сходимость этих оценок к истинным значениям.

2. Разработаны алгоритмы оценивания состояния и возмущений динамической системы на основе методов устойчивого псевдообращения недоопределенных матриц. Предложенные алгоритмы позволяют синтезировать упрощенные вычислительные процедуры стабильного оценивания начальных условий для наблюдающего устройства.

3. На основе теории оптимальных стохастических наблюдателей предложены устойчивые алгоритмы синтеза наблюдателя пониженного порядка. Эти алгоритмы позволяют предотвратить явление расходимости процесса фильтрации и повысить точность оценивания переменных состояния системы.

4. Разработаны регулярные алгоритмы синтеза адаптивного наблюдателя на основе ретроспективных и итерационных методов упрощенной регуляризации. Предложенные алгоритмы позволяют эффективно решать задачу синтеза инвариантных систем управления динамическими объектами в случае недоступных прямому измерению внешних воздействий.

5. Предложены алгоритмы синтеза адаптивных наблюдателей возмущений в системах управления динамическими объектами на основе принципа расширения моделей. Полученные алгоритмы адаптивной стабилизации процесса способствуют повышению качественных показателей системы управления рассматриваемым процессом при наличии неопределенных внешних возмущений.

6. Разработаны устойчивые алгоритмы синтеза наблюдающих устройств с адаптацией к неизвестным параметрам и вектору состояния объекта управления. Предложенные алгоритмы позволяют реализовать устойчивую процедуру оценивания неизвестных параметров и состояния линейной стационарной системы на основе упрощенной регуляризации.

7. Разработаны регулярные алгоритмы синтеза адаптивных наблюдателей в системах управления динамическими объектами. Предложенные алгоритмы позволяют осуществлять устойчивую идентификацию параметров управляемых объектов и тем самым повысить качество функционирования адаптивного наблюдающего устройства.

8. Разработаны устойчивые алгоритмы синтеза управляющего адаптивного наблюдателя при неизвестных параметрах объекта. В данном алгоритме неизвестные параметры объекта совпадают с «желаемыми» значениями параметров регулятора, что позволяет использовать процедуру адаптивного наблюдения за объектом.

9. На основе разработанных алгоритмов регулярного синтеза стохастических наблюдателей состояния разработана адаптивная система управления процессом адсорбции газа. Предложенная адаптивная система управления позволит стабилизировать технологические режимы протекания процесса и повысить качество и 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

RASULEV ALIAKBAR HAMIDULLAYEVICH

**SYNTHESIS ALGORITHMS OF ADAPTIVE CONTROL SYSTEMS OF
TECHNOLOGICAL OBJECTS BASED ON STOCHASTIC STATE
OBSERVERS**

05.01.08 - Automation and control of technological processes and manufactures

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

Tashkent – 2019

The theme of doctor of philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number №B2017.3.PhD/T312.

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 adviser: **Igamberdiev Khusan Zakirovich**
Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician

Official opponents: **Kaipbergenov Batirbek Tulebergenovich**
Doctor of Technical Sciences, Professor

Tulyaganov Shukhrat Dilshatovich
PhD in technical science

Leading organization: **Tashkent Institute of Chemical Technology**

Defense of dissertation will take place in «__» _____ 2019 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 86). Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel. : (99871) 246-03-41.

Abstract of dissertation sent out on «__» _____ 2019 year.
(mailing report № __, on «__» _____ 2019 year).

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

U.F.Mamirov
Scientific Secretary of Scientific Council,
on awarding scientific degrees,
PhD in technical science

A.M.Nazarov
Vise-Chairman of the Academic Seminar
under the Scientific Council on awarding scientific degrees,
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the research work algorithms for the synthesis of systems for adaptive control of technological objects based on stochastic state observers and computational schemes for their practical implementation.

The object of the research are the system of adaptive control of technological objects based on stochastic state observers.

Scientific novelty of the research work is as follows:

algorithms have been developed for estimating the state and disturbances of a dynamic system based on the methods of stable pseudoinversion of undetermined matrices;

developed regular algorithms for the synthesis of an adaptive observer based on retrospective and iterative methods of simplified regularization;

developed robust algorithms for the synthesis of monitoring devices with adaptation to unknown parameters and the state vector of the control object;

regular iterative algorithms have been developed for the synthesis of adaptive observers of the parameters of controlled objects based on the normalized decomposition of the extended matrix.

Implementation of the research results. On the basis of the results of the synthesis of systems for adaptive control of technological objects using stochastic state observers, the following were implemented:

The developed algorithms for estimating the state and disturbances of the dynamic system based on the methods of stable pseudo-reversal of undetermined matrices were introduced at «MUBAREK GAS PROCESSING PLANT» LLC (Reference of JSC «Uzneftgazqazibchiqarish» №05/09-56ж of January 30, 2019) As a result, the accuracy of calculating the parameters of the regulators is improved;

developed regular algorithms for the synthesis of an adaptive observer based on retrospective and iterative methods of simplified regularization were introduced at «MUBAREK GAS PROCESSING PLANT» LLC (Reference of JSC «Uzneftgazqazibchiqarish» №05/09-56ж of January 30, 2019). Algorithms allow to stabilize the technological modes of the process of adsorption separation of the gas mixture;

developed robust synthesis algorithms for observing devices with adaptation to unknown parameters and the vector of the state of the control object were introduced at «MUBAREK GAS PROCESSING PLANT» LLC (Reference of JSC «Uzneftgazqazibchiqarish» №05/09-56ж of January 30, 2019). As a result, the accuracy of determining object parameters and disturbances is increased.

The structure and volume of the dissertation. The thesis consists of an introduction, four chapters, conclusion, list of references and applications. The dissertation volume is 120 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (Часть I; Part I)

1. Расулев А.Х. Алгоритмы синтеза наблюдателей возмущений в системах управления динамическими объектами // Научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». Ташкент, ТашГТУ. №4(28), 2009. -С.71-72. (05.00.00; №12)
2. Игамбердиев Х.З., Юсупбеков А.Н., Расулев А.Х. Алгоритмы синтеза динамических систем управления с использованием наблюдающих устройств воздействий // Вестник ТашГТУ, №3, 2010. –С.47-50. (05.00.00; №16)
3. Игамбердиев Х.З., Юсупбеков А.Н., Расулев А.Х. Итерационные алгоритмы синтеза наблюдающих устройств на основе операторного представления внешних воздействий // Международный научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». Ташкент, ТашГТУ. №1(37), 2011. -С.86-89. (05.00.00; №12)
4. Расулев А.Х. Регулярные алгоритмы синтеза наблюдателя пониженного порядка // Международный научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». Ташкент, ТашГТУ. №4(40), 2011. – С.91-94. (05.00.00; №12)
5. Зарипов О.О., Расулев А.Х. Адаптивные редуцированные алгоритмы оценивания состояния динамических систем // Вестник ТашГТУ. – Ташкент, ТашГТУ, №4, 2014. -С.71-74. (05.00.00; №16)
6. Abduganiyev A.Kh., Rasulev A.Kh., Gulmatov Z.M., Akhmedov D.A. Regular synthesis algorithms of the local multilayered control systems of technological objects // International scientific and technical journal «Chemical Technology. Control and Management» and Journal of Korea Multimedia Society, Special Issue, South Korea, Seoul – Uzbekistan, Tashkent, №3-4. 2015. –PP. 168-171. (05.00.00; №12)
7. Игамбердиев Х.З., Расулев А.Х. Устойчивые алгоритмы синтеза адаптивных наблюдателей в системах управления динамическими объектами // Международный научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». Ташкент, ТашГТУ. №1-2 (79-80). 2018. -С. 138-142. (05.00.00; №12)
8. Igamberdiev H.Z., Rasulev A.Kh., Mamirov U.F., Algorithms of Stable Evaluation of Initial Conditions for the Observing Device of Perturbations of the Linear System // International Journal of Research in Science, Engineering and Technology, Vol.5, Issue 3, March 2018. -PP. 5373-5377. (05.00.00; №8)
9. Расулев А.Х. Алгоритмы регулярного синтеза адаптивного наблюдателя для линейной стационарной системы // Международный научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». Ташкент, ТашГТУ. №3(81), 2018. -С.69-73. (05.00.00; №12)

II бўлим (Часть II; Part II)

10. Расулев А.Х. Алгоритмы синтеза наблюдающих устройств в системах управления технологическими объектами // Материалы международной научно-технической конференции «Современные техника и технологии горно-металлургической отрасли и пути их развития». -Навоий, 12-14 мая, 2010. –С. 494-495.
11. Yusupbekov A.N., Rasulev A.H., Magrupov D.T. Regular algorithms of the syntheses managerial system with the usage of observing devices // Seventh World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation “WCIS-2012”. Tashkent, Volume II, 2012. -pp.76-79.
12. Zaripov O.O., Rasulev A.H., Abduganiyev A.H., Akhmedov D.A. Regular algorithm of adaptive filtering based on scalar measurement // Eight World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation. Tashkent, Uzbekistan. November 25-27, 2014. –PP. 283-286.
13. Расулев А.Х., Мамиров У.Ф. Алгоритмы синтеза наблюдающих устройств в условиях неопределенности // Материалы VIII-Международной научно-технической конференции горно-металлургический комплекс: «Достижения проблемы и современные тенденции развития». Навои. 19-21 ноября, 2015. –С.514.
14. Abduganiyev A.Kh., Rasulev A.Kh., Gulmatov Z.M., Akhmedov D.A. Regular synthesis algorithms of the local multilayered control systems of technological objects // Conference Proceedings MITA-2015 the 11th International Conference on Multimedia Information Technology and Applications (MITA2015), June 30 - July 2, 2015, Tashkent, Uzbekistan. –pp.149-152.
15. Игамбердиев Х.З., Расулев А.Х., Мамиров У.Ф. Алгоритмы синтеза асимптотических наблюдателей состояния динамических объектов управления // «Ишлаб чиқариш корхоналарининг энергиятежамкорлик ва энергия самарадорлик муаммоларини ечишда инновацион технологияларнинг аҳамияти» мавзусидаги Республика илмий-амалий анжумани. 1-китоб, Қарши, 2016. –С. 155-157.
16. Игамбердиев Х.З., Расулев А.Х., Мамиров У.Ф. Алгоритмы синтеза наблюдающего устройства внешних воздействий в системах управления // III Международная научно-практическая конференция: «Современные материалы, техника и технологии в машиностроении». Андижан, 19-21 апреля, III, IV-секция, 2016. -С. 34-35.
17. Игамбердиев Х.З., Расулев А.Х. Устойчивые алгоритмы синтеза наблюдателей состояния динамических систем // Abstracts of the Republic scientific conference with participation foreign scientists “Modern problems of dynamical systems and their applications”. Tashkent, May 1-3, 2017. –PP.306-307.
18. Расулев А.Х. Алгоритмы устойчивого оценивания внешних воздействий в динамических системах // Материалы IX-Международной научно-технической конференции горно-металлургический комплекс: «Достижения, проблемы и современные тенденции развития горно-

- металлургического комплекса». Навои. 12-14 июня, 2017. –С. 515.
19. Расулев А.Х. Алгоритмы построения наблюдателей состояния и внешних воздействий в динамических системах // «Инновацион ривожланиш муаммолари: ишлаб чиқариш, таълим, илм-фан» мавзусидаги вазирлик миқёсидаги илмий-техникавий анжуман материаллари тўплами. – Андижон, 2017. –С.423-424.
 20. Rasulev A.Kh. Synthesis algorithms of observers in control systems of dynamic objects / International scientific review of the problems and prospects of modern science and education, Boston, USA. April 22-23, 2019. –PP. 26-27.

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

Бичими 60x84^{1/16}. Рақамли босма усули. Times гарнитураси.
Шартли босма табоғи: 2,75. Адади 100. Буюртма № 72.

Гувоҳнома реестр № 10-3719
«Тошкент кимё технология институти» босмахонасида чоп этилган.
Босмахона манзили: 100011, Тошкент ш., Навоий кўчаси, 32-уй.