

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ  
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.03/30.12.2019.Т.03.02 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**НАВОИЙ ДАВЛАТ КОНЧИЛИК ИНСТИТУТИ  
ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**БОТИРОВ ТЎЛҚИН ВАФОҚУЛОВИЧ**

**ЭТАЛОН МОДЕЛЛИ АДАПТИВ БОШҚАРИШ ТИЗИМЛАРИНИ  
ТУРГУН СИНТЕЗЛАШ УСУЛЛАРИ ВА АЛГОРИТМЛАРИ**

05.01.08 - Технологик жараёнлар ва ишлаб чиқаришларни  
автоматлаштириш ва бошқариш

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

**Тошкент – 2020**

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

**Ботиров Тўлқин Вафоқулович**

Эталон модели адаптив бошқариш тизимларини турғун синтезлаш усуллари ва алгоритмлари.....3

**Ботиров Тулкин Вафоқулович**

Методы и алгоритмы устойчивого синтеза адаптивных систем управления с эталонными моделями .....29

**Botirov Tulkin Bafokulovich**

Methods and algorithms for sustainable synthesis of adaptive control systems with reference models.....55

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works .....59

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ  
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/30.12.2019.Т.03.02 РАҚАМЛИ  
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**НАВОИЙ ДАВЛАТ КОНЧИЛИК ИНСТИТУТИ  
ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**БОТИРОВ ТЎЛҚИН ВАФОҚУЛОВИЧ**

**ЭТАЛОН МОДЕЛЛИ АДАПТИВ БОШҚАРИШ ТИЗИМЛАРИНИ  
ТУРҒУН СИНТЕЗЛАШ УСУЛЛАРИ ВА АЛГОРИТМЛАРИ**

05.01.08 - Технологик жараёнлар ва ишлаб чиқаришларни  
автоматлаштириш ва бошқариш

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

Докторлик (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2020.2.DSc/T342 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Навоий давлат кончилик институти ва Тошкент давлат техника университетларида бажарилган.

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

**Илмий маслаҳатчи:**

**Игамбердиев Хусан Закирович**  
техника фанлари доктори, профессор, академик

**Расмий оппонентлар:**

**Юсупбеков Азизбек Нодирбекович**  
техника фанлари доктори, профессор

**Каипбергенов Батирбек Тулепбергенович**  
техника фанлари доктори, профессор

**Нурмухамедов Толаниддин Рамзидинович**  
техника фанлари доктори, профессор

**Етакчи ташкилот:**

**Самарқанд давлат университети**

Диссертация химояси Тошкент давлат техника университети ҳузуридаги DSc.03/30.12.2019.T.03.02 рақамли Илмий кенгашнинг 2020 йил «24» 11 соат 10<sup>00</sup> даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100095, Тошкент шаҳри, Университет кўчаси, 2. Тел.: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: [tstu\\_info@edu.uz](mailto:tstu_info@edu.uz)).

Диссертация билан Тошкент давлат техника университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (171 рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100095, Тошкент шаҳри, Университет кўчаси, 2. Тел.: (99871) 246-03-41.

Диссертация автореферати 2020 йил «13» 11 куни тарқатилди.  
(2020 йил «7» 11 даги 27 рақамли реестр баённомаси).



**Н.Р.Юсупбеков**

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

**У.Мамиров**

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

**Севинов Ж.У.**

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

## КИРИШ (фан доктори (DSc) диссертацияси аннотацияси)

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Жаҳонда сўнги вақтларда замонавий автоматик бошқариш назариясининг асосий йўналишларидан бири мураккаб динамик объектларни адаптив бошқариш тизимларини куришда доимий бошқариш, ўзаро боғланган бошқариш контурларида назорат ва бир-бирига боғлиқ кўпликлар бўйича белгиланган параметрларни сақловчи муаммоларни ечиш ҳисобланади. Эталон моделлар асосида турли функционал мақсадлардаги технологик объектларни адаптив бошқариш тизимларини синтез қилиш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқишга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Шу жиҳатдан, динамик объектларни адаптив бошқариш тизимларини синтез қилишнинг турли усуллари ишлаб чиқиш энг муҳим вазифалардан биридир. Хорижий мамлакатларда технологик жараёнларни адаптив бошқаришни синтезлаш, динамик баҳолаш назарий масалаларини ечиш ва уларни саноатнинг турли тармоқларида амалий тадбиқ этишга катта аҳамият берилмоқда.

Жаҳонда бошқариш жараёнларининг юқори сифатини таъминлайдиган адаптив тизимларни куришга йўналтирилган универсал ёндашувни яратиш бўйича илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда. Бу борада, жумладан адаптив бошқариш тизимларини турғун синтезлаш усуллари ва алгоритмларини такомиллаштириш ва уларни модификациялаш; тизимларни синтез қилиш ва таҳлил қилишнинг типик усуллари адаптив бошқариш; бошқариш қурилмаси параметрларини барқарор баҳолаш алгоритмлари; номаълум параметрларга ва ўлчанмайдиган ғалаёнларга эга бўлган динамик объектларни адаптив барқарорлаштириш усуллари ва алгоритмларини яратиш ҳамда бу тизимларни амалга ошириш усуллари ишлаб чиқиш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

Ҳозирги вақтда мамлакатимизда интеллектуал бошқариш тизимларини ривожлантириш бўйича қабул қилинган чора-тадбирлар мажмуи доирасида турли технологик жараёнлар ва ишлаб чиқариш объектларини автоматлаштириш ва бошқаришда энергия ва ресурсларни тежовчи илғор назорат тизимларини яратишга катта эътибор қаратилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан «... иқтисодиётнинг энергия ва ресурс сарфини қисқартириш, ишлаб чиқаришга энергия тежамкор технологияларни жорий этиш, иқтисодиёт тармоқларидаги меҳнат унумдорлигини ошириш, ... иқтисодиёт, ижтимоий соҳа, бошқарув тизимида ахборот-коммуникация технологияларини жорий этиш»<sup>1</sup> вазифалари белгилаб берилган. Мазкур вазифаларни амалга ошириш, жумладан, бевосита адаптив бошқариш концепциялари асосида технологик объектларни адаптив бошқариш тизимларини синтезлашнинг самарали усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқишга имкон берувчи эталон модели адаптив бошқариш тизимларини яратиш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

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

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги, 2017 йил 29 ноябрдаги ПФ-5264-сон «Ўзбекистон Республикаси инновацион ривожлантириш вазирлигини ташкил этиш тўғрисидаги» ва 2018 йил 19 феврал ПФ-5349-сон «Ахборот технологиялари ва коммуникациялари соҳасини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари» Фармонлари, 2017 йил 29 августдаги ПҚ-3245-сон «Ахборот-коммуникация технологиялари соҳасида лойиҳа бошқаруви тизимини янада яхшилашга доир чора-тадбирлар тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

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

**Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи<sup>2</sup>.** Техник ва технологик объектларни адаптив бошқариш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқишга йўналтирилган илмий тадқиқотлар жаҳоннинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасаларида, жумладан «Honeywell», SIMSCI-Simulation ва California Institute of Technology, Massachusetts Institute of Technology, Stanford University, Caltech University (АҚШ), «Siemens» ва Technical University Munich, Karlsruhe Institute of Technology, RWTH Aachen University (Германия), Imperial College London, The University of Edinburgh, University of Cambridge (Буюк Британия), КТН Royal Institute of Technology (Швеция), «Alstom» (Франция), Technical University of Denmark (Дания), KU Leuven (Бельгия), University of Chemical Technology in Prague (Чехия), The University of Tokyo, Tokyo Institute of Technology (Япония), Seoul National University, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Pohang University of Science and Technology (Жанубий Корея), «Simatek-Energo» (Беларуссия), Tsinghua University (Хитой), Н.Э.Бауман номидаги Москва давлат техника университети, Ахборот технологиялари, механика ва оптика миллий илмий тадқиқот институти, Новосибирск давлат техника университетларида (Россия Федерацияси) кенг қамровли илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда.

Динамик объектларни бошқаришнинг адаптив тизимларини синтезлаш усуллари ва алгоритмларини яратиш, уларни бошқариш тизимларини такомиллаштиришга оид жаҳонда олиб борилган тадқиқотлар натижасида қатор, жумладан қуйидаги илмий натижалар олинган: субоптимал адаптив

---

<sup>2</sup>Диссертация мавзуси бўйича илмий тадқиқотлар шарҳи <https://elibrary.ru>,  
<http://ieeexplore.ieee.org/document/824819>, <http://www.mathnet.ru/rus/agreement>, [www.asucontrol.ru](http://www.asucontrol.ru),  
[www.sial.iias.spb.su](http://www.sial.iias.spb.su), <http://www.ipu.ru>, <http://cyberleninka.ru>, <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/?p=21073>,  
[https://nl.wikipedia.org/wiki/Pieter\\_Eykhoof](https://nl.wikipedia.org/wiki/Pieter_Eykhoof), [https://books.google.ru/books/about/Optimum\\_systems\\_control.html](https://books.google.ru/books/about/Optimum_systems_control.html),  
<https://www.itcggroup.ru/ratings/reiting-universitetov-mira-times-2017>, <https://mosiur.org/ranking2019/>,  
<http://terraelectronica.ru>, <http://uk.farnell.com> ва бошқа манбалар асосида ишлаб чиқилган.

ростлагичларни синтезлаш алгоритмларини ишлаб чиқиш усуллари яратилган (University of California, Massachusetts Institute of Technology, George Mason University, АҚШ; Linksping University, Швеция; Россия Фанлар Академияси (РФА) Бошқариш муаммолари институти, Россия Федерацияси); эталон модели адаптив бошқариш алгоритмларини жисмонан тадбиқ қилишни синтезлаш усуллари ишлаб чиқилган (Massachusetts Institute of Technology, АҚШ; Linksping University, Швеция; Technische Universiteit Eindhoven, Нидерландия; РФА Бошқариш муаммолари институти, Н.Б.Жуковский номидаги Харбий-ҳаво муҳандислари академияси, Россия Федерацияси); кечикишли динамик объектлар учун эталон модели адаптив бошқариш алгоритмлари ишлаб чиқилган (George Mason University, АҚШ; РФА Бошқариш муаммолари институти, Санкт-Петербург информатика ва автоматлаштириш институти, Россия Федерацияси); бевосита адаптив бошқариш тизимларини синтезлаш ва таҳлил қилишнинг типик усуллари ишлаб чиқилган (РФА Бошқариш муаммолари институти, Н.Э.Бауман номидаги Москва давлат техника университети, Ахборот технологиялари, механика ва оптика миллий илмий тадқиқот институти, Россия Федерацияси); ғалаёнлар мавжудлигида бевосита адаптив бошқариш усуллари ишлаб чиқилган (Linksping University, Швеция; РФА Бошқариш муаммолари институти, Россия Федерацияси).

Жаҳонда эталон модели адаптив бошқариш тизимларини синтезлаш усуллари ва алгоритмларини яратиш бўйича қатор, жумладан, қуйидаги устувор йўналишларда тадқиқотлар олиб борилмоқда: субоптимал адаптив ростлагичларни синтезлаш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш; адаптив бошқариш алгоритмларини жисмонан тадбиқ қилиш алгоритмларини ишлаб чиқиш; адаптив бошқариш тизимларида бошқарув қурилмасини мунтазам параметрик синтезлаш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш; вазн функцияларидан фойдаланиш асосида эталон модели адаптив бошқариш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Бевосита ёндашув концепцияси асосида технологик объектларни адаптив бошқариш тизимларини синтезлаш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш бўйича ўтказилган тадқиқотларга тегишли бўлган сўнгги йиллардаги илмий-техник адабиётлар таҳлили ушбу соҳада аҳамиятли даражадаги назарий ва амалий натижаларга эришилганлигидан дарак беради. Адаптив бошқариш тизимларини синтезлаш муаммоларига бағишланган кўп сондаги ишлар нашр этилган, умумназарий мезонлар ишлаб чиқилган, ечилган амалий масалалар сони ортиб бормоқда. Адаптив бошқариш тизимларининг ривожига кўплаб хорижлик олимлари, жумладан Astrom K.J., Monopoli R.V., Izerman R., Kalman R., Као Т. Г., Нгуен М., Земляков С. Д., Крутова И.Н., Миркин Е. Л., Бронников А. М., Красовский А.А., Мирошник И.В., Александров А.Г., Неймарк Ю.И., Никифоров В.О., Петров Б.Н., Поляк Б.Т., Тетерин А.В., Белов С.В., Рутковский В.Ю., Артюшок В.П., Круглов С.П., Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Цыпкин Я.З., Ядыкин И.Б., Еремин Е.Л., Якубович В.А., Брусин В.А., Теличенко Д.А. ва бошқалар ҳамда мамлакатимиз олимлари, жумладан –

Бекмуратов Т.Ф., Гулямов Ш.М., Жуманов И.И., Зарипов О.О., Игамбердиев Х.З., Исмаилов М.А., Кадыров А.А., Камиллов М.М., Марахимов А.Р., Нурмухамедов Т.Р., Сиддиков И.Х., Фозилов Ш.Х., Юсупбеков Н.Р. ва бошқалар ўзларининг улкан ҳиссаларини қўшишган.

Бироқ илмий-тадқиқот объектлари доирасининг кенгайиши ва доимий мураккабланиши субоптимал адаптив ростлагичларни синтезлаш, эталон модели адаптив бошқариш алгоритмларини жисмонан тадбиқ қилиш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқишни талаб қилмоқда.

Шу билан биргаликда, динамик тизимларни адаптив бошқаришни мунтазамлаштириш усуллари ва алгоритмлари етарлича ишлаб чиқилмаган. Шунингдек, бевосита адаптив бошқаришнинг мунтазамлаш усуллари ўз ривожини талаб этмоқда. Бундан ташқари локал-оптимал ва матрицали адаптив бошқариш тизимларида бошқариш таъсирларини шакллантиришни мунтазамлаш усуллари ва алгоритмларини ҳам ишлаб чиқиш мақсадга мувофиқ бўлиб, ноаниқлик шароитидаги динамик объектларни бошқаришнинг эталон модели адаптив бошқариш тизимларини қуриш ва амалга оширишнинг алгоритмик амаллари спектрини кенгайтиради ва тизимларнинг фаолият кўрсатиш самарадорлигини ошириш имконини беради. Юқорида келтириб ўтилганлардан бевосита ёндашув концепциялари асосида эталон модели адаптив бошқариш тизимларини синтезлашнинг самарали мунтазамлаш усуллари ва алгоритмларини яратиш ва келгусида такомиллаштиришнинг жуда зарурлиги келиб чиқади.

**Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти Навоий давлат кончилиқ институти ва Тошкент давлат техника университети илмий-тадқиқот ишлари режаларининг №ЕА-5-002 - «Кимё-технологик объектларнинг адаптив бошқариш системасида ростлагичларни параметрик синтезлашнинг алгоритмларини ва дастурий воситаларини ишлаб чиқиш» (2012-2013); №А-5-033 - «Кўмирни бойитишнинг асосий жараёнларини бошқаришнинг автоматлаштириш алгоритмларини ва дастурий воситаларини ишлаб чиқиш» (2015-2017); №ОТ-Ф4-78-«Идентификацион ёндашув асосида динамик объектларни адаптив бошқариш системалари синтезининг назарий асослари ва мунтазам усуллари ишлаб чиқиш» (2017-2020) мавзуларидаги лойиҳалари доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** эталон модели адаптив бошқариш тизимларини турғун синтезлаш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқишдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

эталон модели адаптив бошқариш тизимларини синтезлаш назарияси ва усуллари ривожланишини тизимли таҳлил қилиш;

ташқи ғалаёнларда эталон модели турғун адаптив бошқариш алгоритмларини ишлаб чиқиш;

Ляпуновнинг бевосита усули билан эталон модели адаптив бошқариш тизимларининг асимптотик турғун алгоритмларини синтезлаш;



адаптив бошқариш тизимларида бошқарув қурилмасини турғун параметрик синтезлаш алгоритмларини ишлаб чиқиш;

вазн функцияларидан фойдаланиш асосида адаптив бошқариш алгоритмларини ишлаб чиқиш;

эталон модели адаптив тизимлар учун мослашувчан алгоритмларини ишлаб чиқиш;

соддалаштирилган эталон модели тизимда параметрларни сошлаш жараёнини бошқариш алгоритмларини ишлаб чиқиш;

ҳолат ва бошқариш бўйича кечикишли объектлар учун адаптив тизимни синтезлаш;

ишлаб чиқилган эталон модели адаптив бошқариш усуллари ва алгоритмларини амалий қўллаш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида эталон модели адаптив бошқариш тизимлари олинган.

**Тадқиқотнинг предмети** эталон модели адаптив бошқариш тизимлари турғун синтезлаш усуллари ва алгоритмларидан иборат.

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

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

Ляпуновнинг бевосита усули асосида адаптив бошқариш тизимини синтезлашнинг асимптотик турғун алгоритмлари ишлаб чиқилган;

рекуррент псевдотескари матрицалар асосида адаптив матрицали ростлагичларни синтезлашнинг турғун алгоритмлари ишлаб чиқилган;

динамик филтрлаш тенгламаси қолдиқ векторининг ўзаро боғлиқлик таҳлили асосида ростлагич параметрларини баҳолашнинг турғун алгоритмлари ишлаб чиқилган;

итератив мунтазамлаштириш тамойиллари асосида адаптив бошқариш тизимларида бошқарув қурилмаларини турғун параметрик синтезлаш алгоритмлари ишлаб чиқилган;

рақамли оптималлаштириш усуллари асосида эталон модели адаптив бошқариш тизимларини синтезлаш алгоритмлари ишлаб чиқилган;

бошқариш объектларининг ҳолат векторини баҳолаш асосида ростлагич параметрларини синтезлаш алгоритмлари ишлаб чиқилган;

ҳолат ва бошқариш бўйича кечикишли объектлар учун эталон модели адаптив тизимлар синтез қилинган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

формалин ишлаб чиқариш технологик жараёнини автоматлаштириш ва адаптив бошқаришнинг структуравий ва функционал схемалари ишлаб чиқилган;

жараёнлар боришининг технологик режимларини барқарорлаштириш ва уларнинг фаолият самарадорлигини ошириш имконини берувчи техник таъминотга мувофиқ ҳолда формалин ишлаб чиқариш технологик жараёнини адаптив бошқариш тизими ишлаб чиқилган.

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

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти бошқариш жараёнлари сифатини оширишга имкон берувчи эталон модели адаптив бошқариш тизимларни синтезлашнинг конструктив турғун усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти бевосита адаптив бошқаришнинг турли вазифалари учун математик ва алгоритмик таъминотни ишлаб чиқиш ва уларни узлуксиз характерли ишлаб чиқаришнинг технологик жараёнларини бошқаришнинг адаптив тизимлари функционал структураларини қуриш ва лойиҳалашни автоматлаштиришда кенг қўллаш билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Бевосита ёндашув концепциялари асосида динамик объектларни адаптив бошқариш тизимларини синтезлаш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

ишлаб чиқилган эталон модели адаптив бошқариш тизимларида бошқарув қурилмаларини турғун параметрик синтезлаш алгоритмлари “Навоийазот” АЖда жорий қилинган («ЎЗКИМЁСАНОАТ» АЖнинг 2020 йил 11 августдаги 24-3246-сон маълумотномаси). Натижада, ростлагич параметрларини баҳолаш масаласини мунтазамлаштириш ва қидирилаётган катталикларнинг априор номаълум ташқи ғалаёнларга турғун баҳоларини олиш имконини берган;

ишлаб чиқилган ташқи ғалаёнларда эталон модели турғун адаптив бошқариш алгоритмлари “Навоийазот” АЖда жорий қилинган («ЎЗКИМЁСАНОАТ» АЖнинг 2020 йил 11 августдаги 24-3246-сон маълумотномаси). Натижада, алгоритмлар реал тизим ва унинг математик ифодаси ўртасидаги маълум даражада номунофиқлик мавжуд бўлган ҳолатда баҳолаш масаласини амалга ошириш имконини берган;

ишлаб чиқилган соддалаштирилган эталон модели тизимда жараённи бошқаришнинг параметрини созлаш алгоритмлари “Навоийазот” АЖда жорий қилинган («ЎЗКИМЁСАНОАТ» АЖнинг 2020 йил 11 августдаги 24-3246-сон маълумотномаси). Натижада, адаптив ростлагичдаги созланадиган параметрлар сонини тизимдаги номаълум коэффицентлар сонигача қисқартириш имконини берган;

ишлаб чиқилган эталон модели адаптив бошқариш тизимларида ҳолат векторини баҳолаш асосида ростлагич параметрларини синтезлаш алгоритмлари “Навоийазот” АЖда жорий қилинган («ЎЗКИМЁСАНОАТ»

АЖнинг 2020 йил 11 августдаги 24-3246-сон маълумотномаси). Натижада, жараённинг технологик режимлари ўтишини барқарорлаштириш ва унинг фаолият самарадорлиги ошишига имкон берган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Тадқиқотнинг назарий ва амалий натижалари 7 та халқаро ва 7 та республика илмий-амалий анжуманларида маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси бўйича жами 34 та илмий иш, шулардан – 1 та монография, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 13 та мақола, жумладан, 6 таси хорижий журналларда нашр этилиб, ЭҲМ лар учун дастурий маҳсулотларга Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигидан рўйхатдан ўтган 6 та гувоҳнома олинган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертация ҳажми 182 бетни ташкил этади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

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

Диссертациянинг «**Эталон модели адаптив бошқариш тизимларини синтезлаш назарияси ва усуллари ривожланишининг тизимли таҳлили**» деб номланган биринчи бобида динамик объектларни адаптив бошқариш тизимларини қуриш ва синтезлаш усуллари ривожланишининг тизимли таҳлили натижалари, динамик объектларни адаптив бошқариш тизимларини қуришга бевосита ёндашувни шакллантириш, динамик объектларни адаптив бошқариш масалалари муаммоли вазиятларини таҳлил қилиш, тадқиқот мақсади ва вазифаларини қўйилиши келтирилган.

Автоматик бошқариш назариясининг замонавий босқичдаги ривожланиши бошқариш объектлари ва уларга таъсир қилувчи ғалаёнлар тўғрисидаги билимларимизнинг ноаниқлигини ҳисобга оладиган масалаларни қўйиш ва ечиш билан таърифланади. Амалиётда фақат бошқариш объектининг тартиби ва унинг математик модели тенгламасининг структураси маълум бўлган ҳолатлар учрайди. Шу билан бирга объект параметрларини бир қисми ёки хатто барчасининг сонли қийматлари номаълум бўлади. Баъзан ноаниқ коэффициентларнинг эҳтимолий қийматларининг диапазонлари берилган бўлиши мумкин, аммо ушбу диапазонлар жуда кенг: юқори қийматлари қўйи қийматларидан бир неча бор ошиши мумкин. Одатдаги бошқариш тизимлари

шу шароитларда турғунлигини йўқотиб, бошқариладиган жараённинг нормал кечишини таъминлаб бера олмайди. Бу аслида технологик жараён ёки объектни бошқаришда шаклланган созиламаларга эга типик ростлагичлар сифатида классик бошқариш қурилмаларидан фойдаланиш талаб этиладиган иш сифатини кафолатли таъминлаш имконини бермаслигини англатади.

Бу ҳолатда бошқариш масаларини ечиш учун ҳам бошқариш объектнинг ўзгарувчан иш шароитларига, ҳам унинг математик ифодасида априор ноаниқлик мавжуд бўлганига мослашиш хусусиятига эга тизимларни ишлаб чиқиш талаб этилади. Адаптив бошқариш тизимлари назариясида, уларнинг ишлаш жараёнида, бошқариш структураси ва алгоритмлар параметрларининг ўзгариши ҳисобига тизим сифатини оширишга йўналтирилган ёндашувлар шаклланади. Бунда одатда созиланувчи ёки эталон модели адаптив тизимлардан фойдаланилади.

Созиланувчи модели тизимлардан фарқли равишда эталон модели тизимларда бошқариш ва адаптация мақсадлари мос келиб, тизимнинг ҳаракати, тизимнинг исталган ҳаракатини акс эттирадиган эталонли моделга яқинлигини таъминлашдан иборат бўлади. Эталон модели тизимларда, созиладиган параметрлар бўйича асосий контурни параметрик оптималлаштириш масаласи ечилади. Аммо қидирувсиз оптималлаштириш усулларида фойдаланиш ҳисобига оптималлаштириш масаласи ечими кузатув натижалари ва ростлагич созилаш параметрларининг ўртасидаги қидирилаётган алоқани берадиган бошқа алгебраик масала билан алмаштирилади. Бундан ташқари, созилаш функционалининг ўзи ҳам асосий контур ва унинг эталонли модели тўғрисидаги параметрик фарқнинг ўлчами бўлиб хизмат қилади, бу эса бир қатор ҳолатларда адаптив бошқариш тизимига қўйилган техник талабларни содда йўл билан ҳисобга олиш имконини беради.

Бу борада бевосита адаптив тизимлар назарияси концепцияларида асосланган ва бошқариш объекти ҳамда унинг ишлаш шароитлари тўғрисида тўлиқ априор билимларни талаб қилмайдиган бошқариш тизимларини қуриш йўли қизиқарлидир. Бевосита ёндашув асосида қурилган бошқарув тизими жорий бошқаришдаги объект ҳолатини таҳлил қилиш билан керакли бошқариш қонунини автоматик равишда қидира олади. Кўриб ўтилган ҳолатлар бевосита ёндашув концепциялари асосида динамик объектларни адаптив бошқариш системаларини турғун синтезлаш усуллари ва алгоритмларини яратиш, уларни саноат ишлаб чиқаришининг муайян технологик жараёнларини автоматлаштириш ва бошқариш масалаларини ечишда амалга оширувчи ҳисоблаш схемаларини синтезлашнинг зарурийлигини кўрсатади.

Диссертациянинг «**Субоптимал адаптив ростлагичларни синтезловчи алгоритмларни ишлаб чиқиш**» номли иккинчи боби эталон модел сифатида бошқарувчи адаптив кузатувчини синтезлаш; динамик филтрлаш тенгламаси қолдиқ векторининг ўзаро боғлиқлик таҳлили асосида ростлагич параметрларини мунтазам баҳолаш; эталон модели адаптив тизимнинг асимтотик турғун алгоритмини Ляпуновнинг бевосита усули билан

синтезлаш; динамик объектларни бевосита адаптив бошқариш тизимларида бошқарувчи қурилмаларни мунтазам параметрик синтезлаш; кўпхадлар ёндашуви асосида ноаниқ эталон модели адаптив матрицали ростлагичларни синтезлаш алгоритмларини ишлаб чиқишга бағишланган.

Эталон модели адаптив тизимларда бошқариш объекти параметрларини ўзгартириш кенгайтирилган ҳолат фазосидаги айрим дифференциал тенгламаларга бўйсунди. Дифференциал тенгламалар кенгайтирилган тизимини асимптотик турғунлиги ҳатто бир хил бўлмаган бошланғич шартлар  $x_0 \neq z_0$  да ҳам моделнинг исталган чиқиш сигналинини кузатиш ҳамда бутун тизимнинг турғун бўлишини кафолатлайди.

Кенгайтирилган фазода асимптотик турғунлик Ляпунов функциялари ёрдамида ўрганилиши мумкин:

$$V(e, \delta f_{ij}, \delta b_{ij}) = e^T Q e + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{1}{v_{ij}} \delta f_{ij}^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{1}{w_{ij}} \delta b_{ij}^2 > 0,$$

бу ерда  $Q = Q^T > 0$ ,  $v_{ij} > 0$ ,  $w_{ij} > 0$ ,  $i = 1, \dots, m$ ,  $j = 1, \dots, m$ . Тизим ҳисобига функция  $V$  нинг тўлиқ ҳосиласи қуйидаги формула билан аниқланади:

$$\dot{V}(e, \delta f_{ij}, \delta b_{ij}) = e^T [M^T Q + Q M] e + 2e^T Q \Delta F x + 2e^T Q B r + 2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{1}{v_{ij}} \delta f_{ij} \dot{\delta f}_{ij} + 2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{1}{w_{ij}} \delta b_{ij} \dot{\delta b}_{ij}.$$

Қуйидагилар асосида  $\delta f_{ij}$  ва  $\delta b_{ij}$  танлаб

$$\dot{\delta f}_{ij} = -v_{ij} \left[ \sum_{k=1}^m e_k q_{ki} x_j + \delta f_{ij} \right], \quad \dot{\delta b}_{ij} = -w_{ij} \left[ \sum_{k=1}^m e_k q_{ki} r_j + \delta b_{ij} \right], \quad i = 1, \dots, m, \quad (1)$$

ҳосила  $\dot{V}$  нинг қуйидаги кўринишига эга бўламиз:

$$\dot{V} = e^T [M^T Q + Q M] e - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \delta f_{ij}^2 - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \delta b_{ij}^2. \quad (2)$$

Модел (2) асимптотик турғун деб ҳисоблангани боис, қуйидагилар билан ҳисобланадиган мусбат аниқланган матрица  $P = P^T > 0$  мавжуд

$$M^T Q + Q M = -P < 0.$$

(2) даги икки бошқа аъзоси манфий бўлгани учун  $\dot{V}$  ҳам манфий функция бўлади, демак кенгайтирилган тизим ҳам асимптотик турғундир:  $V > 0$ ,  $\dot{V} < 0$ .

Шундай қилиб, (1) нисбатлар билан параметрлар  $\delta f_{ij}$  ва  $\delta b_{ij}$  ни созлаш учун яқинлашувчи алгоритм аниқланади. Аммо ушбу нисбатлар параметрлар  $\beta$  ни ростлаш учун аниқ алгоритминини ҳали белгилаб бермайдилар. Шу каби алгоритмни олиш учун  $\beta$  га нисбатан қуйидаги тенгламаларни ечиш лозим:

$$\frac{\partial \delta f_{ij}(\beta, \alpha)}{\partial \beta} \dot{\beta} = -v_{ij} \left[ \sum_{k=1}^m e_k q_{ki} x_j + \delta f_{ij}(\beta, \alpha) \right], \quad (3)$$

$$\frac{\partial \delta b_{ij}(\beta, \alpha)^T}{\partial \beta} \dot{\beta} = -w_{ij} \left[ \sum_{k=1}^m e_k q_{ki} r_j + \delta b_{ij}(\beta, \alpha) \right], \quad i, j = 1, \dots, m,$$

Ҳосила  $\dot{\beta}$  ни олиш учун тенгламалар (3) биргаликда ечилиши лозим:

$$\dot{\beta} = - \begin{bmatrix} \{\mathcal{F}^T_{ij}\} \\ \{\mathcal{B}^T_{ij}\} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_{ij} \left[ \sum_{k=1}^m e_k q_{ki} x_j + \mathcal{F}_{ij}(\beta, \alpha) \right] \\ w_{ij} \left[ \sum_{k=1}^m e_k q_{ki} r_j + \mathcal{B}_{ij}(\beta, \alpha) \right] \end{bmatrix}, \quad (\beta(t_0) = \beta), \quad (4)$$

бу ерда (4) тенгликнинг ўнг томонидаги тескари матрица мавжуд деб кўзда тутилган.

(4) ифодадан фойдаланилганда тескари матрицаларни ҳисоблаш бир қанча қийинчиликларни келтириб чиқаради, чунки  $\begin{bmatrix} \{\mathcal{F}^T_{ij}\} \\ \{\mathcal{B}^T_{ij}\} \end{bmatrix}^{-1}$  матрицаларнинг ўлчамлари катта ва бузилган бўлиши мумкин. Бундай матрицаларни ҳисоблашда матрицаларни блоklarга ажратиш усулларида фойдаланиш мақсадга мувофиқдир.

$$M = \begin{bmatrix} \{\mathcal{F}^T_{ij}\} \\ \{\mathcal{B}^T_{ij}\} \end{bmatrix} \quad (|M| \neq 0); \quad M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}, \quad A \in R^{n \times n}, \quad (|A| \neq 0), \quad B \in R^{n \times q}, \quad C \in R^{q \times n}, \quad D \in R^{q \times q}.$$

У ҳолда

$$M^{-1} = \begin{pmatrix} A^{-1} + A^{-1}BH^{-1}CA^{-1} & -A^{-1}BH^{-1} \\ -H^{-1}CA^{-1} & H^{-1} \end{pmatrix}$$

бу ерда  $H = D - CA^{-1}B$ .

Агар  $|D| \neq 0$  деб фараз қилсак, қуйидаги кўринишни ҳосил қиламиз:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} K^{-1} & -K^{-1}BD^{-1} \\ -D^{-1}CK^{-1} & D^{-1} + D^{-1}CK^{-1}BD^{-1} \end{pmatrix},$$

бу ерда  $K = A - BD^{-1}C$ .

Келтирилган алгоритмлар  $M$  матрицаларни тескарисини ҳисоблаш процедурасини барқарорлаштиришга ва шу билан бирга адаптив бошқариш тизимида ростланадиган параметрни баҳолаш аниқлиги ошишига хизмат қилади.

Эталлон модели ростлагичларни куриш усулини матрицали ростлагичларни полиноминал ҳисоблаш асосида синтезлаш нуқтаи-назаридан кўриб чиқамиз. Бу матрицали ростлагичлар, жойлашуви берилган ва эталон модели ростлагичларнинг хусусиятларини ўзида жам қилган.

Бошқариш объекти қуйидаги модел билан ифодаланган бўлсин:

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-k}B(z^{-1})u(t), \quad (5)$$

бу ерда  $A(z^{-1})$  ва  $B(z^{-1}) - z^{-1}$  дан кўпхад матрицалар

$$A(z^{-1}) = I_n + \sum_{i=1}^{\bar{n}} A_i z^{-i}, \quad B(z^{-1}) = I_n + \sum_{i=0}^{\bar{n}} B_i z^{-i},$$

бу ерда  $I_n - [n \times n]$  ўлчамли бирлик матрица;  $A_i \in R, 1, n; B_i \in R^{n \times m}, i = \overline{0, n}$ .

Ростлагич қуйидаги тенглама билан ифодаланилади:

$$R(z^{-1})u(t) = Q(z^{-1})g(t) - S(z^{-1})y(t), \quad (6)$$

бу ерда  $g(t) -$  берилган таъсир,  $g(t) \in R^l, R(z^{-1}), Q(z^{-1})$  ва  $S(z^{-1}) -$  кўпхад матрицалар  $z^{-1}$  дан;  $R_i \in R^{m \times m}, i = \overline{1, n_R}; Q_i \in R^{m \times l}, i = \overline{0, r}; S_i \in R^{m \times n}, i = \overline{0, n_S}$ .

Матрицали узатиш функциясини куйидагича ифодалаш мумкин:

$$W_m(z^{-1}) = z^{-k} H(z^{-1}) / f(z^{-1}), \quad (8)$$

бу ерда  $H(z^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_H} H_i z^{-i}$ ,  $H_i \in R^{n \times l}$ ,  $i = \overline{0, n_H}$ ;  $f(z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{n_f} f_i z^{-i}$  – турғун кўпхадлар.

Ноаниқ эталон моделдан фойдаланиш, лойиҳалашда берилган оптималлик мезонини минималлаштириш маъносида оптимал деб танлаш мумкин бўлган эталон ўтиш жараёнини шакллантириш учун мослашувчан воситани такдим этади. (7) тизим ва унинг ноаниқ эталон модели (8) га тегишли матрицали узатиш функцияларининг яқинлик мезони сифатида  $E(z^{-1})$  матрицанинг Фробениус меъёри квадратидан иборат функционалдан фойдаланамиз:

$$J = \text{tr}(\bar{V}_d L \bar{Q} - \bar{V}_f \bar{H})^T (V_d L \bar{Q} - \bar{V}_f \bar{H}) = \text{tr}(\bar{Q}^T L^T \bar{V}_d^T - 2\bar{Q}^T L^T \bar{V}_d^T \bar{V}_f \bar{H} + \bar{H}^T \bar{V}_f^T \bar{V}_f \bar{H}). \quad (9)$$

$\bar{Q}$  матрицанинг параметрларини аниқлаш учун куйидаги ифодаларни киритамиз:  $R_0 = V_d^T V_d$ ,  $Q^0 = V_d^T V_f$ ,  $S^0 = V_f^T V_f$ .

Шунда  $X$  матрица қолипти ва  $X^{-1} = T(u, v)$ . бўлади. Энди, (9) ни куйидагича ёзиш мумкин:

$$J = \text{tr}(\bar{Q}^T L^T \bar{T}(d, d) L \bar{Q}^T - 2\bar{Q}^T \bar{T}(d, f) \bar{H} + \bar{H}^T \bar{T}(f, f) \bar{H}). \quad (10)$$

Бундан, (8) функционални минимал қилувчи  $\bar{Q}$  матрицани аниқлаймиз:

$$\bar{Q} = (KL)^+ M \bar{H}, \quad (11)$$

бу ерда "+" – псевдоўзгартириш белгиси.

Агар  $m \geq n$  бўлса, (10) ни минимал қилувчи кўпхадли матрица  $Q(z^{-1})$  параметрларини аниқлаш мумкин, бунда тизимнинг чиқиш сигналлари ва ноаниқ эталон модели, ўзгармас топшириқ таъсирга жавобан асимптотик мос тушиши:  $\bar{Q} = U \bar{Q}_1 + \begin{pmatrix} I_n \\ 0 \end{pmatrix} F$ .

Бу ифодани (10) га кўйиб ва функционални матрица параметрлари  $\bar{Q}_1$  бўйича минималлаштириб, оптимал матрицани  $\bar{Q}_1$  топамиз:

$$\bar{Q}_1 = (KLU)^+ (M \bar{H} - K \bar{C} F). \quad (12)$$

Таъкидлаш лозимки,  $K$ ,  $M \bar{H}$  матрицалар (1) объектнинг параметрларига боғлиқ эмас ва тизимни лойиҳалаш босқичида аниқланиши мумкин. Оптимал (11) ва (12) матрицаларни шакллантириш учун  $\Lambda = KL$  ва  $\Omega = KLU$  матрицаларни псевдоўзгартирадиган рекуррент формулалардан фойдаланиш мақсадга мувофиқ. Матрицаларни псевдоўзгартириш назарияси ва усуллари асосида  $\Lambda$  матрицани псевдоўзгартириш алгоритмининг келтирамиз, уни  $\Omega^+$  матрица учун ҳам қўллаш мумкин.

Бунда ноаниқ эталон модел эталон матрицали узатиш функцияси кўринишида берилади; у бошқариш тизимининг чиқишидаги сигналнинг ихтиёрий ҳаракатларини белгилайди. Ростлагичларни синтезлаш кўпхад ҳисоблашнинг маълум усуллари ёрдамида бажарилади, бу усулларда ҳисоблар ҳажми нисбатан катта эмас. Кўпхад факторлаш, матрицали кўпхад тенгламани ва тўғри чизиқли алгебраик тенгламалар тизимини ечишни ўз ичига олади.

Шунингдек, ишда баҳоловчилар фойдаланувчи оптимал башоратчилар асосида ростлагич параметрларини аниқлашнинг соддалаштирилган алгоритмлари келтирилган.

Фараз қиламиз, бошқариш жараёни динамикаси қуйидаги кўринишдаги чизиқли вектор айирмали тенгламалар ёрдамида ифодалансин:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-k) + d + (q^{-1})z(t), \quad (13)$$

бу ерда:  $y$  – чиқиш сигналининг  $m$ -ўлчамли вектори;  $u$  –  $m$ -ўлчамли бошқариш вектори (кириш сигнали);  $d$  – доимий элементлардан ташкил топган  $m$ -ўлчамли вектор, кириш синалининг қиймати нол бўлганда барқарор чиқиш қийматини тавсифлайди;  $z$  – мустақил бир хил тақсимланган тасодикий векторлар хилма-хиллиги, ўртача қийматлари нол ва ковариациялари  $E\{z(t)z^T(t)\} = r$  га тенг;  $E$  – ўртачага қийматга келтирувчи оператор;  $k$  – кечикиш вақти;  $q^{-1}$  - кечикиш (тескари силжиш) оператори  $q^{-1}y(t) = y(t-1)$ .

Адаптив тизимнинг ишлаш сифатини қуйидаги мақсад функционали орқали ифодалаш мумкин:

$$J = E\left\{\|P(q^{-1})y(t+k) - R(q^{-1})w(t)\|^2 + \|Q'(q^{-1})u(t)\|^2\right\}, \quad (14)$$

бу ерда  $P$ ,  $R$  ва  $Q'$  – полиномиал матрицалар.

Адаптив ростлагичнинг структурасига энг кичик квадратлар усули билан ишлайдиган оптимал башоратчи киради, у (13) тенгламадан фойдаланиш натижасида олинади. Бу бошқариш қонунинг параметрларини ҳисоблаш учун баҳоловчидан фойдаланилади. Уни синтезлашда қуйидаги фаразларга асосланилади, яъни параметрларнинг тенгламалари  $\theta(t+1) = \theta(t) + w(t)$  билан апроксимацияланади, ўлчаш тенгламаси эса:

$$z(t) = X(t-\tau)\theta(t) + v(t), \quad z(t) = y(t) - py^d(t-\tau) + lu(t-\tau),$$

бу ерда

$$\theta = [g_{11}^0, \dots, g_{m1}^0, \dots, g_{1m}^{n_g}, \dots, g_{mm}^{n_g}; s_{11}^0, \dots, s_{m1}^0, \dots, s_{1m}^{n_s}, \dots, s_{mm}^{n_s}; d_{1m}^0, \dots, d_{mm}^0, \dots, d_{1d}^{n_d}, \dots, d_{md}^{n_d}; \gamma_1, \dots, \gamma_m]^T;$$

$$X = [U:Y:Y^d:I], \quad U = [u^T(t-\tau) \otimes I : \dots : u^T(t-\tau-n_g) \otimes I],$$

$$Y = [y^T(t-\tau) \otimes I : \dots : y^T(t-\tau-n_s) \otimes I], \quad Y^d = [y^{dT}(t-\tau) \otimes I : \dots : y^{dT}(t-\tau-n_d) \otimes I],$$

$$E[w(t)] = 0, \quad E[w(t)w^T(q)] = Q(t)\delta_{tq}, \quad E[v(t)] = 0, \quad E[v(t)v^T(q)] = R(t)\delta_{tq}, \quad E[w(t)v(q)] = 0.$$

- кечикиш вақти,  $I$  - бирлик матрица.

У ҳолда ростлагич параметрларини баҳолашни Калман фильтри асосида ифодалаш мумкин. Филтрлаш жараёнига катта миқдордаги турғунликни бериш учун реал вақт вазибаларида кўрсатилган алгоритмлар синфини амалга ошириш учун, энг замонавий ахборот технологияларини қўллашга асосланган, замонавий ортоганаллашган блокли алгоритмлардан фойдаланиш мақсадга мувофиқ.

Ростлагич параметрларининг ҳолат тенгламалари қуйидаги ифода кўринишида берилган бўлсин:

$$\theta(k+1) = \theta(k) + w(k), \quad \theta(0) = \theta^0. \quad (15)$$

Ўлчаш тенгламаси қуйидагича:

$$z(k) = H(k)\theta(k) + v(k). \quad (16)$$



Иккала тенгламани қуйидаги кўринишда ёзамиз:

$$A\theta = z, \quad (17)$$

бу ерда  $A$  – масаланинг оператори бўлиб, (15), (16) кўринишида акс эттирилган композициясидан иборат.

(17) тенгламани ечиш масаласи ноаниқ шартланган масалани ифодалайди. Ундаги дастлабки маълумотлар  $\{A, z\}$  тахминан маълум. Аппроксимациялаш шартини қуйидагича қабул қиламиз:

$$\|A_h - A\| \leq h, \quad z_\delta = z + \tilde{z}, \quad \|\tilde{z}\|_F \leq \delta,$$

бу ерда  $U, F$  – қандайдир чизикли меъёрланган фазолар.

(4) тенгламани ечишда итерацион усуллардан фойдаланамиз, у қуйидагича ёзилади:  $\theta_{r+1} = F_A(\theta_r, \tilde{z}, h)$ ,  $r = 0, 1, 2, \dots$ .

Итерацияли алгоритм сифатида қуйидаги усулар кўриб чиқилади: “тезкор тушиш”  $\theta(r+1) = \theta(r) - \beta(r)J'\theta(r)$ ,  $\beta(r) = \|J'\theta(r)\|^2 / \|A_h J'\theta(r)\|^2$ ; минимал хатоликлар  $\theta(r+1) = \theta(r) - \beta(r)J'\theta(r)$ ,  $\beta(r) = \Delta^2(r) / \|J'\theta(r)\|^2$  ва оддий итерация  $\theta(r+1) = \theta(r) - \beta J'\theta(r)$ ,  $\beta > 0$ ,  $r = 0, 1, 2, \dots$ , усуллари; бу ерда  $J(\theta) = 0.5\|A_h\theta - z\|_Z^2 = 0.5\Delta^2(\theta)$ ,  $J'\theta = (A_h)^T(A_h\theta - z)$ ,  $\Delta(\theta) = \|A_h\theta - z\|_Z$ .

Келтирилган алгоритмлар, ростлагич параметрларини баҳолаш масаласини мунтазамлаш ва изланаётган катталикларнинг ташқи, априор номаълум ғалаёнларга турғун баҳосини олиш имконини беради.

Бобда, шунингдек, фойдали сигнал ва ҳалақитнинг статистик характеристикалари априор ноаниқлигини ҳисобга олган ҳолда адаптив бошқариш тизимларида бошқариш қурилмасининг синтези муҳокама қилинган. Олинган ифодалар ўрта квадратик маънода оптимал ёки субоптимал баҳолаш алгаритимларни синтезлаш имконини беради. Бу баҳолашнинг яқинлашиши, аппроксимация қилиш схемалари ва яхлитлаш хатоларига нисбатан турғунлик хусусиятларига эга бўлади.

Диссертациянинг «**Жисмонан амалга ошириладиган эталон модели адаптив бошқариш алгоритмларни ишлаб чиқиш**» номли учинчи боби эталон модели адаптив бошқаришни синтезлаш сонли оптималлаштириш масаласи сифатида; вазн функцияларидан фойдаланиш асосида эталон модели адаптив бошқариш алгоритмлари; кириши тўйинадиган бир каналли объектларни бошқариш учун такомиллашган адаптив тизимлар; жисмонан тадбиқ этиладиган эталон модели адаптив бошқариш тизимларини қуриш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқишга бағишланган.

Бошқариш объекти ва унинг эталон модели қуйидаги дифференциал тенглама билан ифодаланган бўлсин:

$$x^{(n)} + \sum_{i=0}^{n-1} a_i x^{(i)} = \sum_{j=0}^m b_j x^{(j)}, \quad x_M^{(n)} + \sum_{i=0}^{n-1} a_{M,i} x_M^{(i)} = \sum_{j=0}^k b_{M,j} x_0^{(j)}.$$

Шундай бошқарув  $y(t)$  ни танлаш керакки, вақт ўтиши билан тизимнинг ҳаракати эталон модел кўрсатадиган ҳаракатга яқинлашсин. Бу талабни қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} (x_n - x) = 0. \quad (19)$$

Параметрларни созлаш  $I = \varepsilon_1^r$  функционални минимал қилувчи масала сифатида ечилиши мумкин. Бунда тизим, амалда, объектни бошқарувчи экстремал тизим қурилади, ростлагичнинг параметрлари эса, бошқарувчи таъсир вазифасини ўтайди. Умумий ҳолда минималлаштирувчи функционал сифатида  $I = \omega_i^r$  ни олиш мумкин, бу ерда  $\omega_i$  хатолик  $\varepsilon_1$  ва унинг ҳосилаларининг тўғри чизиқли функциясидир  $\omega_i = L_i(p)\varepsilon_1$ ,  $L_i = p^i + \sum_{j=0}^k l_j p^{(j)}$  - турғун оператор. Шунда  $\omega_0 = \varepsilon_1$ ,  $\omega_n = \sigma$ , бажариш тенгламаси эса, қуйидагича:

$$L_i(p)\varepsilon_1 = L_i(p)x - \frac{B_M(p)L_i(p)}{A_M(p)}x_0 = \frac{L_i(p)}{A_M(p)}\sigma. \quad (20)$$

(12) дан кўринишича,  $\omega_i$  хатолик ва параметрларнинг эталондан оғишлари ҳосилалари  $i$  ҳақида ахборот беради. Шундай қилиб, ростлагични созлаш масаласини  $\omega_i$  дан олинган қандайдир функцияни минимал қилиш масаласига келтирилади, бунда, масала  $\omega_i = 0$  да битта минимумга эга бўлиши керак. Шунда  $L_i(p)$  нинг турғунлиги ва  $\omega_i = 0$  шартларидан (3) нинг бажарилиши келиб чиқади. Бунда иккита масала ечилади:

- $\omega_i = 0$  тенглигини ва демак, (3) шартни таъминлаш;
- параметрик номувофиклигини камайтириш.

Биринчиси – яқиндан, иккинчиси узоқ келажакдаги мақсадни билдиради, чунки параметрик номувофикликлар нол бўлганда ростлагич стационар бўлиб қолади.

Бу масалаларни ечишда нокоррект қўйилган масалаларни ечиш усуллари асосида функцияларни минималлаштириш усулларида фойдаланиш мақсадга мувофиқ бўлади.

Кетма-кет глобал қидирув алгоритмларига биноан,  $\varphi(x)$ ,  $x \in [a, b]$  ларнинг ҳақиқий функциясини минималлаштиришда синов нуқтасини танлаш қуйидаги қодалар билан аниқланади. Функциянинг қийматини биринчи ҳисоблаш ихтиёрий  $x^i \in (a, b)$  ички нуқтада, ҳар қандай кейинги  $(k+1) - e$ ,  $k \geq 1$  ларда ҳисоблаш интервали  $(x_{i-1}, x_i)$  да ётувчи

$$x^{k+1} = S(t),$$

$$S(t) = (x_i + x_{i-1})/2 - \begin{cases} (z_i - z_{i-1})/(2r\mu), & 1 < t \leq k, \\ 0, & t = 1 \text{ ёки } t = k + 1, \end{cases} \quad (21)$$

нуқтада амалга оширилади. Бунда максимал характеристикага мос келувчи  $R(t)$ , яъни:  $R(t) \geq R(i)$ ,  $1 \leq i \leq k+1$ , қуйидаги кўринишда ҳисобланади:

$$R(i) = x_i - x_{i-1} + \frac{(z_i - z_{i-1})^2}{\mu^2(x_i - x_{i-1})} - 2(z_i + z_{i-1})/(r\mu), \quad 1 < i \leq k, \quad (22)$$

$$R(1) = 2(x_1 - x_0) - 4z_1/(r\mu), \quad R(k+1) = 2(x_{k+1} - x_k) - 4z_k/(r\mu), \quad (23)$$

$$\mu = \max \{ |z_i - z_{i-1}| / (x_i - x_{i-1}) : 1 < i \leq k \}. \quad (24)$$

Агар (24)даги  $\mu$  аниқланмаган ёки  $\mu=0$  бўлса, унда  $\mu=1$  деб қабул қилинади. Бундай ҳолда аввалги синовларнинг  $x^1, \dots, x^k$  координата нуқталари қийматларининг ўсиши тартибида  $x_i, 1 \leq i \leq k$  катталиклари қайта номерланади, яъни:

$$a = x_0 < x_1 < \dots < x_i < \dots < x_k < x_{k+1} = b, \quad (25)$$

$z_i = \varphi(x_i), 1 \leq i \leq k$  эса – ушбу нуқталарда ҳисобланган минималлаштирилган функция қийматлари.  $(a, b)$  интервалдаги  $(z_0$  ва  $z_{k+1}$  ларнинг қийматлари аниқланмаган) барча  $(x_{i-1}, x_i), 1 \leq i \leq k+1$  субинтервалларнинг бир хил тавсифи учун қўшимча равишда (25) қаторларга  $x_0 = a$  ва  $x_{k+1} = b$  нуқталар қўшилади. (21), (22), (23) лардаги  $r$  коэффицент – усул параметридан аниқланади,  $r > 1$ .

Шундай қилиб, бевосита адаптив бошқариш ва берилган эталон модели узлуксиз автоматик тизим ростлагичини синтезловчи алгоритмларни лойиҳалашда умумлашган ёндашув, оптималлашадиган масалаларни ечишга асосланган адаптив бошқариш усуллари ишлаб чиқишга олиб келди.

Вазн функциялари асосида эталон модели адаптив бошқариш тизимларини синтезлаш алгоритмларини кўриб чиқамиз. Битта кириш ва битта чиқишга эга маълум чизиқли объект қуйидаги тенгламалар ёрдамида ифодаланган бўлсин:

$$dx(t)/dt = Ax(t) + bu(t), \quad (26)$$

$$y = c^T x(t). \quad (27)$$

бу ерда  $x(t) \in R^n, u(t) \in R$  ва  $y(t) \in R$  – мос равишда объектнинг ҳолати, кириш ва чиқиши,  $n$  – объектнинг даражаси.

(27) ни рекурсив дифференциаллаш ва натижани (26) га қўйиш орқали қуйидагини оламиз:  $s^i y(t) = c^T A^i x(t), i: 1 \sim m-1, s^m y(t) = c^T A^m x(t) + c^T A^{m-1} bu(t)$ .

Бунда  $q(s)$  - нормаллаштирилган турғун кўпхад бўлсин:

$$q(s) = s^m + q_{m-1} s^{m-1} + \dots + q_0, \quad q(s)y(t) = f^T x(t) + k_0 u(t), \quad \text{бунда } f^T = c^T q(A), k_0 = c^T A^{m-1} b.$$

Тескари тизимни қуйидагича ифодалаш мумкин

$$u(t) = k \{-f^T x(t) + q(s)y(t)\}, \quad (28)$$

бу ерда  $k = k_0^{-1}$ .

Эталон модели қуйидагича аниқлаймиз:  $y_m(t) = q^{-1}(s)r_m(t)$ , бу ерда  $r_m(t)$  ва  $y_m(t)$  – мос равишда эталонли кириш ва чиқиш.

(26) дифференциал тенгламанинг ечими қуйидаги кўринишда ифодаланиши мумкин:

$$x(t-h) = \exp\{-Ah\}x(t) + \int_t^{t-h} \exp\{A(t-h-\sigma)\}bu(\sigma)d\sigma. \quad (29)$$

$c^T$  кўпайтма билан (29) ифодани қуйидагича қайта ёзиш мумкин:

$$y(t-h) = c^T \exp\{-Ah\}x(t) + \int_t^{t-h} c^T \exp\{A(t-h-\sigma)\}bu(\sigma)d\sigma.$$

Кузатувчи иштирокида тескари тизимни қуйидагича тасвирлаш мумкин:

$$u(t) = \int_0^L \{w_1(\tau)u(t-\tau) + w_2(\tau)y(t-\tau)\}d\tau + kq(s)y(t), \quad (30)$$

бу ерда  $w_i(\tau) = -kf^T v_i(\tau) (i=1,2)$ .

Идентификация хатолиги қуйидагича ифодаланиши мумкин:

$$\varepsilon(t) = \int_0^L [\{\hat{w}_1(\tau) - w_1(\tau)\}\xi_1(t - \tau) + \{\hat{w}_2(\tau) - w_2(\tau)\}\xi_2(t - \tau)]d\tau + (\hat{k} - k)y(t).$$

Бундан ташқари чиқиш хатолиги нолга айланишини кўрсатиш мумкин:

$$e(t) = y(t) - y_m(t)$$

(30) ва (31) дан чиқиш хатолиги  $e(t)$  қуйидагича кўрсатилиши мумкин:

$$\hat{k}q(s)e(t) = \int_0^L [\{\hat{w}_1(\tau) - w_1(\tau)\}u(t - \tau) + \{\hat{w}_2(\tau) - w_2(\tau)\}y(t - \tau)]d\tau + (\hat{k} - k)q(s)y(t). \quad (32)$$

Қачонки  $\hat{w}_i(\tau)$  ( $i=1,2$ ) ва  $\hat{k}$  лар ҳар қандай мувозанат ҳолатида ўтишганда (29) ифода қуйидаги шаклга келади  $\hat{k}e(t) = \varepsilon(t)$ . Агар  $\varepsilon(t)$  нолга тенг бўлса ва  $\hat{k}$  нолга айланмаса  $e(t)$  нолга тенг бўлади.

Шундай қилиб, ишда кўриб чиқилган ёндашув эталон модели адаптив тизимнинг аниқлигини оширади ва унинг барқарорлигини таъминлайди.

Бобда кириш чеклови билан бир каналли объектлар синфидаги бошқариш тизимлари учун адаптив ростлагич коэффициентларини ўз-ўзини созлаш механизмининг модификацияси ҳам муҳокама қилинган.

Диссертациянинг «**Кечикишли динамик объектлар учун эталон модели адаптив бошқариш алгоритмларини ишлаб чиқиш**» номли тўртинчи боби бошқариш, ҳолат бўйича кечикиши бор ва нейтрал типдаги объектларни бошқариш алгоритмларини ишлаб чиқишга бағишланган.

Бошқариш тизимининг узатиш функцияси қуйидаги кўринишда бўлсин:

$$W_0(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = c_p^T (sI - A_p)^{-1} b_p e^{-\tau s} = k_p \frac{B_0(s)e^{-\tau s}}{A_0(s)}, \quad (33)$$

$$A_0(s) = s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s^1 + a_0, \quad B_0(s) = s^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_1s^1 + b_0,$$

бу ерда  $n, m$  – полиномлар - ( $m < n$ );  $a_i$  ( $i = \overline{0, n-1}$ ),  $b_j$  ( $j = \overline{0, m-1}$ ) нинг тартиби  $k_p$  – объектни юқори частотадаги номаълум кучайтириш коэффициентини.

Эталон моделнинг узатиш функцияси  $W_m(s)$  қуйидаги ифода орқали аниқланади:

$$W_m(s) = \frac{y_m(s)}{r(s)} = c_m^T (sI - A_m)^{-1} b_m e^{-\tau s} = k_m \frac{Z(s)e^{-\tau s}}{P(s)},$$

бу ерда  $r \in \mathbb{R}$  – топшириқ тасири.

Мақсад функцияси шарти қуйидаги кўринишга эга:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [e(t) = y(t) - y_m(t)] = 0. \quad (34)$$

Ўзгармас коэффициентлар  $\gamma_j, \alpha_i, \beta_i$  ( $j = \overline{0, N}, i = \overline{1, m}$ ) – қуйидаги параметрлар орқали аниқланади  $a_i$  ( $i = \overline{0, n-1}$ ),  $b_j$  ( $j = \overline{0, m-1}$ ),  $\lambda_k$  ( $k = \overline{1, m}$ ).

Бошқариш қонунини қуйидагича қабул қилсак:

$$u(s) = \frac{1}{k_p} \left[ \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{s + \lambda_i} e^{\tau s} y_m(s) - \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{s + \lambda_i} u(s) \right] + \frac{1}{k_p} \left[ 1 - \left( \eta_0 + \sum_{i=1}^N \frac{\eta_i}{s + \delta_i} \right) \frac{k_I T}{Ts + 1} \right] u_r(s), \quad (35)$$

рослагичнинг тенгламаси (35) қуйидагича кўриниш олади:

$$u(s) = \frac{1}{k_p} \frac{A_0(s)}{B_0(s)R(s)} u_r(s).$$

Бошқариш қонунини қуйидагича танлаймиз:

$$u(t) = \Theta^T \Omega_{mpr}(t), \quad (36)$$

бу ерда  $\Theta \in R^{(n+m+1)}$  – созланадиган параметрлар вектори.

$E_f = X_f - X_{f_m}$  ва  $e = y - y_m$  бўлсин, шунда хатолик тенгламаси қуйидагича бўлади:

$$\dot{E}_f(t) = A_{cf} E_f + B_u [u(t-\tau) - \Theta^{*T} \Omega_{mpr}(t-\tau)], \quad e(t) = C_f^T E_f(t). \quad (37)$$

Хатолик  $e(t)$  нинг тенгламаси, (37) ва (36) ларни ҳисобга олганда қуйидаги кўринишни олади:

$$\dot{E}_{f1}(t) = A_{11} E_{f1}(t) + \hat{B}_{u1} \frac{1}{\rho} [\Theta(t-\tau) - \Theta^{*T}] \Omega_{mpr}(t-\tau), \quad e(t) = C_{f1}^T E_{f1}(t), \quad (38)$$

бу ерда  $\hat{B}_{u1} = \hat{B}_{u1\rho}$ .

$\Theta(t)$  ва  $\psi(t)$  параметрларни созлаш алгоритмларини топиш учун Ляпуновнинг бевосита усулидан фойдаланамиз. Унда:  $A_{11}^T P + P A_{11} = -2Q$ ,  $P \hat{B}_{u1} = C_{f1}$  шартларни ҳисобга олган ҳолда Ляпунов функциясининг ҳосиласи қуйидаги кўринишда эга бўлади:

$$\dot{V}(t) = -E_a^T(t) Q E_a(t) < 0. \quad (39)$$

(39) шартлари бажарилишидан тизим фаолиятининг оралик мақсади бажарилиши келиб чиқади. Шунда:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Theta(t) = \Theta^\circ, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \psi(t) = \psi^\circ,$$

бу ерда  $\Theta^\circ, \psi^\circ$  – доимий вектор ва сон. Бундан ташқари, агар сигнал  $r(t)$  объектни идентификацияланишига мос келса  $\Theta^\circ = \Theta^*$  бўлади ва (38) га мувофиқ (34) тизимнинг дастлабки мақсади қаноатлантиради.

Диссертациянинг «**Технологик объектларни адаптив бошқариш учун ишлаб чиқилган усул ва алгоритмларнинг қўлланилиши**» деб номланган бешинчи боби ишлаб чиқилган адаптив бошқариш тизимини синтезлаш усуллари ва алгоритмлари формалин ишлаб чиқариш технологик жараёнларида қўлланиш натижалари келтирилган.

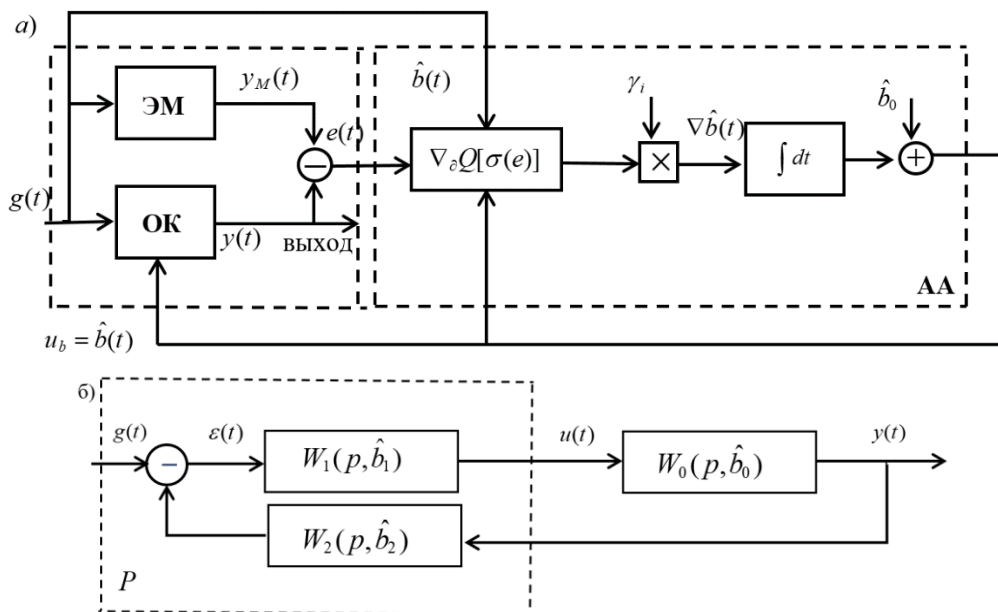
Бошқариш масалалари нуқтаи назаридан кўриб чиқилаётган жараённи дастлабки ўрганиш ва формализациялаш асосида формалин олиш жараёнини ифодаловчи асосий кўрсаткичлар бўлиб, қуйидагилар ҳисобланади: бошқарувчи параметрлар  $\mathcal{U} = (u_1, u_2)$ , бу ерда  $u_1$  – совитадиган сув сарфи,  $u_2$  – контактли аппарат киришидаги термолан ҳарорати; чиқиш параметрлари  $\mathcal{Y} = (y_1, y_2)$ , бу ерда  $y_1$  – таркибида формальдегид ва метанол миқдори берилган формалин чиқиши,  $y_2$  – барботажли совутгичдаги формалин ҳарорати; ғалаён таъсирлари  $\mathcal{W} = (w_1, w_2, w_3)$ , бу ерда  $w_1$  – хом ашё таркиби оғиши,  $w_2$  – катализатор фаоллиги ва селективлигининг пасайиши,  $w_3$  – иссиқлик ташувчининг энтальпияси ва иссиқлик йўқотишлари. Бу ерда бошқаришнинг охириги мақсади бўлиб таркибида  $37 \pm 0,5\%$  ли формальдегид мавжуд формалиннинг белгиланган миқдорини олишдан иборат.

Қуйида тадқиқотнинг экспериментал усуллари асосида таъсирларни узатишнинг асосий каналлари бўйича формалин олиш жараёнининг динамик характеристикалари келтирилган:

1.  $u_1 \rightarrow y_1$ :  $(192p^2 + 63,8p + 1)y_1(t) = 0,021u_1(t)$ ;
2.  $u_1 \rightarrow y_2$ :  $(211,2p^2 + 72,5p + 1)y_2(t) = (0,005p + 1)u_1(t)$ ;
3.  $u_2 \rightarrow y_1$ :  $(131p^2 + 28p + 1)y_1(t) = (0,017p + 1)u_2(t)$ ;
4.  $u_2 \rightarrow y_2$ :  $(148,9p^2 + 67,4p + 1)y_2(t) = 0,0035u_2(t)$ .

Олинган динамик моделларнинг таҳлили энг аҳамиятли канал бўлиб  $u_2 \rightarrow y_1$  «контактли аппарат киришидаги термолан ҳарорати – таркибида формальдегид ва метанол миқдори берилган формалин чиқиши» ҳисобланишини кўрсатмоқда. Бу канал энг катта кучланиш коэффиценти ва энг кичик инерцияга эга бўлгани билан характерланади. Шу сабабли, формалин олиш жараёни бошқариш тизимини синтезлашни бошқарувчи параметр – контактли аппарат киришидаги термолан ҳарорати асосида амалга оширамиз.

Эталон модели адаптив тизимнинг функционал схемаси 1-расмда келтирилган. Тизимнинг асосий контури (АК) таркибида узатиш функциялари  $W_1(p, \hat{b}_1)$  ва  $W_2(p, \hat{b}_2)$  ( $p = d/dt$  - дифференциаллаш оператори) бўлган аниқ структура ва созланадиган параметрлар  $\hat{b}_1$  ва  $\hat{b}_2$  га эга ростлагич (Р)дан иборат. Ростлаш объекти назорат қилинмайдиган даражада ўзгарадиган параметрли  $e \in Q_i$  узатиш функцияси билан берилган.



1-расм. Эталон модели адаптив тизими:

а – адаптациялаш алгоритмлар блокининг структура схемаси;

б – асосий контурнинг структура схемаси.

$u_2 \rightarrow y_1$  канал бўйича кўриб чиқилаётган объект учун тўғри таъсирли адаптив тизимнинг ҳисобини амалга оширамиз:

$$(p^2 + a_1p + a_0)y_2(t) = (b_1p + b_0)u_1(t), \quad pu_1(t) = k_0\varepsilon(t).$$

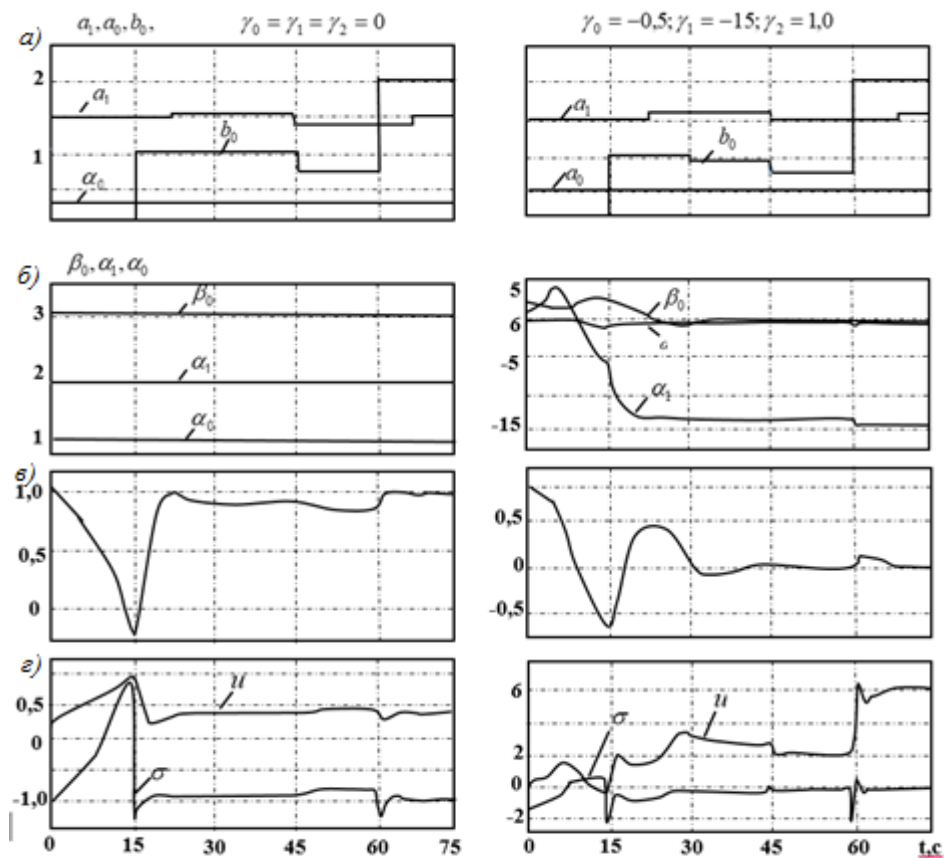
Интегралловчи ёрдамчи юритма (ижро қурилмаси) нинг узатиш коэффиценти  $0,1 \leq k_0 \leq 2,0$ . Ўзгарувчилар  $y, u$  ўлчанади. Эталон модел коэффицентларининг қийматлари  $a_1^M = 1,5$ ;  $a_0^M = 1,0$ ;  $b_1^M = 0,05$ ;  $b_0^M = 1,0$  бўлган

иккинчи даражали дифференциал тенглама билан ифодаланади. Асосий контурдаги ростлагичнинг узатиш функциялари (1,б-расм) ПИ-ростлагичга ва  $W_2(p, \hat{b}_2) = 1; W_1(p, \hat{b}_1) = k = \text{var}$  тўғри келади. Адаптация коэффициенти  $\hat{b}_1 = k$  созлаш йўли билан амалга оширилади, ушбу усулнинг етарлилиги моделлаштиришда  $\sigma(t) \equiv [(a_1 + kb_1)p + (a_0 + kb_0)]e(t)$  кўринишида танланган адаптив бошқаришнинг умумлашган хатолиги  $\sigma(t)$  ифодадан келиб чиқади.

Моделлаштирилаётган схеманинг адаптив ростлагичидаги (1,а-расм) коэффициент  $\dot{k}(t)$  нинг созлаш алгоритми  $\dot{\hat{b}}(t) = -\Gamma \sigma e(b^*, \hat{b}(t), t) (\partial \sigma / \partial \hat{b})$  куйидаги кўринишга эга бўлади:

$$\begin{aligned} \dot{k}(t) &= \gamma [(a_1^M + kb_1)\dot{e}(t)p + (a_0^M + kb_0)e(t)] \frac{\partial \sigma(t)}{\partial k} = \\ &= \gamma [(1,5 + kb_1)\dot{e}(t)p + (1 + kb_0)e(t)] [b_1\dot{e}(t) + b_0e(t)], \quad \gamma > 0; k(0) = 1. \end{aligned}$$

Аниқ эталон модели адаптив тизимдаги жараёнлар боғлиқлиги 2-расмда тасвирланган.



2-расм. Ростлагичнинг асосий контурида пропорционаллик коэффициенти ( $k$ ) нинг ўчирилган ( $\gamma=0$ ) ва ёқилган ( $\gamma=1,1$ ) ўз-ўзини созлаш контурида аниқ эталон модели (1-расм) адаптив тизимда кечаётган жараёнлар:

$a$ ) –  $a_0, a_1$  коэффициентларининг ўзгариши,  $b$ ) – пропорционаллик коэффициенти  $k$  нинг созланиши;  $в$ ) – адаптив бошқаришнинг бошқарувчи таъсири ( $u$ ) ва умумлаштирилган хатолиги ( $\sigma$ ) нинг ўзгариши;  $г$ ) – асосий контурдаги ростлаш хатоликлари ( $\varepsilon$ ) ва адаптациялаш хатолиги ( $e$ ) функцияларининг ўзгариши.

Бундан эталон моделнинг ишлаш принципи объектнинг параметрлари сезиларли даражада кенг диапазонларда ўзгарган ҳолатларда бошқариш мақсадига эришишни таъминлайди. Бевосита 2,а-расмдан ўзгарувчи коэффициентларининг  $a_0, a_1$  диапазони вақт қийматларининг тегишлича 3,85 ва 0,085 с дан 25,0 ва 0,14 с гача ўзгаришига тўғри келишини ҳисоблаб кўриш мумкин. Коэффициенти созланмайдиган  $k(t)$  ( $\gamma = 0$ ) тизим ҳатолиги адаптив тизимга кўра сезиларли даражада юқорирок. Моделлаштиришда коэффициент  $\gamma > 0$  ихтиёрий равишда танланган. Аммо ўтиш жараёнларининг исталган сифатига эришиш учун ушбу танлов бир қатор керакли шартларга бўйсунishi лозим. Масалан, оптимал қиймат  $\gamma > 0$  танланиш йўли билан умумлашган ҳатолик  $\sigma(t)$  сўнишининг табиати экспоненциал бўлиши мумкин. Ушбу масалани ечиш адаптив тизимлардаги оптималлаштириш моҳиятини ташкил қилади.

Худди юқоридаги параметрларга эга асосий контурнинг ноаниқ эталон модели адаптив тизимни синтезлаш масаласини кўриб чиқамиз. Эталон модел:

$$(p^2 + a_1^M p + a_0^M) y_M(t) = (b_1^M p + b_0^M) g(t)$$

тенглама билан берилган, бу ерда барча коэффициентлар - мусбат ва чекли кўплик  $\Omega_c$  га кирадилар. Адаптив бошқаришнинг мақсади бўлиб кириш таъсири  $g(t)$  ни тиклашда чекловли тенглама  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} [y(t) - y_M(t)] = 0$  ни ечиш деб белгилаймиз. Бунинг учун «идеал» ростлаш қонуни

$$(\beta_0 + \beta_1 p) u = (\alpha_0 + \alpha_1 p) y + (b_0 + b_1 p) g$$

тенгламани бажариши керак.

Объект тенгламаси параметрлари маълум бўлганида, бошқариш мақсадига «идеал» ростлагич параметрларини  $\beta_0 = b_0$ ;  $\beta_1 = b_1$ ;  $\alpha_0 = a_0^M - a_0$ ;  $\alpha_1 = a_1^M - a_1$  ва ҳатоликни  $e(t) \equiv 0$  танлаш билан эришилади.

Параметрларнинг жорий қийматлари  $a_0, a_1, b_0, b_1$  номаълумлиги ҳолатида «идеал» ростлагич тенгламасининг параметрлари реал вақтда ҳисобланади, бунинг учун жорий ўлчаш маълумотлари  $y, g$  ва адаптациялаш алгоритмларидан фойдаланилади:

$$\dot{\hat{b}}_1(t) = -\Gamma \sigma_n(t) \frac{\partial \sigma_n(t)}{\partial \hat{b}_1}. \quad (40)$$

Созланиш параметрларининг квадратик функционали  $Q = 0,5 \sigma_2^2(t)$  учун адаптив бошқаришнинг умумлашган ҳатолиги  $\sigma(t)$  қуйидаги формула бўйича ҳисобланади:

$$\sigma_2(t) = \sigma(t) = (p^2 + a_1^M p + a_0^M) y(t) - (b_1^M p + b_0^M) g(t).$$

Ҳатолик  $\sigma(t)$  ни ҳисоблаш учун нафақат сигналларнинг ўлчаниши  $y, g$ , балки уларни вақт бўйича ҳосилаларини  $\ddot{y}, \dot{y}, \dot{g}$  ҳам ҳисоблаш лозим. Умумий алгоритмга (40) кўра «идеал» ростлаш қонунини қуйидаги кўринишда ёзамиз:

$$\hat{b}_j = \text{col}(\alpha_0, \alpha_1, \beta_0, \beta_1),$$

бу ерда



$$\alpha_0 = a_0^M - a_0; \alpha_1 = a_1^M - a_1; \beta_0 = b_0; \beta_1 = b_1,$$

параметрларнинг созланиши куйидаги алгоритм бўйича амалга оширилади:

$$\dot{\hat{b}}_1 = -\Gamma \sigma(t) \frac{\partial \sigma(t)}{\partial \hat{b}_1},$$

бу ерда вектор-устун  $\frac{\partial \sigma}{\partial \hat{b}_1}$  ҳисобланади,  $\Gamma = \Gamma^T > 0$   $(n+m) \times (n+m)$  ўлчамли

матрица. Бунинг учун куйидаги кўринишдаги умумлашган хатоликдан  $\sigma(t)$  фойдаланиш мақсадга мувофиқ:

$$\sigma_n(t) = \left( p^n + \sum_{j=0}^{n-1} a_j^M p^j \right) e(t) = (b_1^* - \hat{b}_1(t))^T z(t),$$

бу ерда ушбу хатолик аниқ созланадиган параметрларга боғлиқ:

$$\hat{b}_1 = \text{col}(\alpha_0, \alpha_1, \beta_0, \beta_1).$$

Созлашнинг квадратик функционали учун вектор-устун:

$$\frac{\partial \sigma_2}{\partial \hat{b}_1} = -z(t) = \text{col}(-y, -\dot{y}, u, \dot{u}).$$

Унда «идеал» адаптив ростлагич параметрларини созлаш алгоритми уч бичизиқли алгоритмга ажратилади:

$$\dot{\alpha}_0(t) = -\gamma_0 \sigma_2(t) y(t); \dot{\alpha}_1(t) = -\gamma_1 \sigma_2(t) \dot{y}(t); \dot{\beta}_0(t) = -\gamma_2 \sigma_2(t) u(t).$$

$b_1^* \neq \hat{b}_1$  да Ляпунов функциясининг таҳлили куйидаги кўринишда бўлади:

$$V = 0,5 \|b_1^* - \hat{b}_1(t)\|^2 = 0,5 \|\delta(t)\|^2 > 0.$$

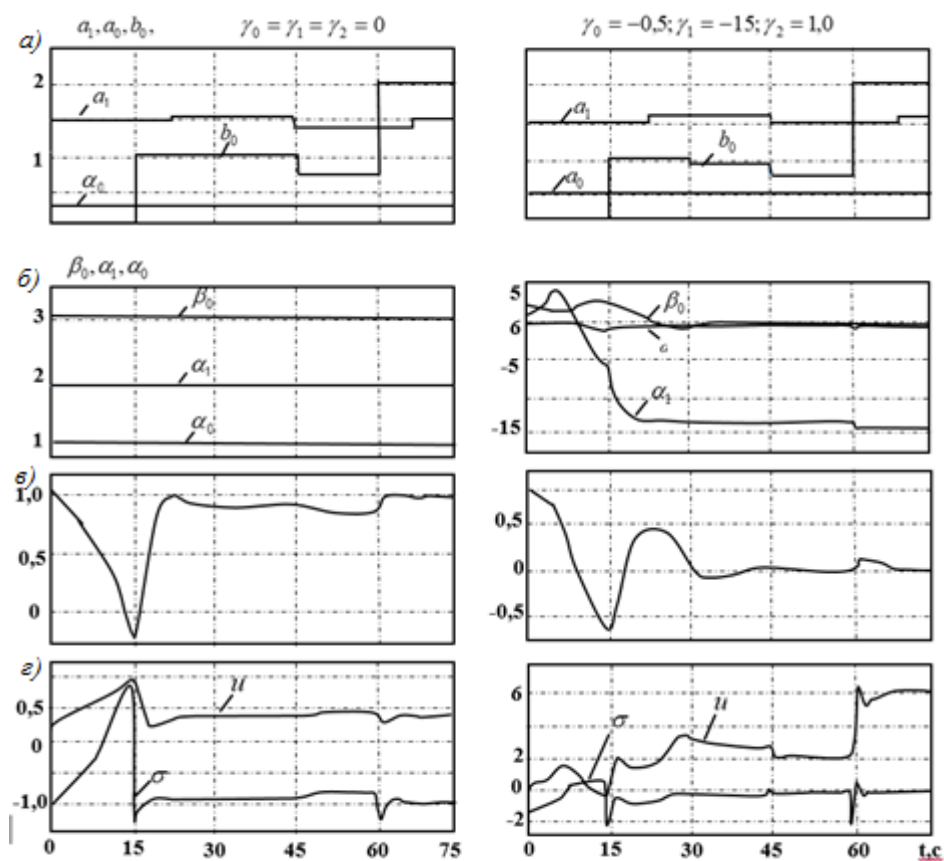
Вақт бўйича ҳосила  $V$  функция куйидагича ҳисобланади:

$$\dot{V}_t = \delta^T \dot{\delta} = \delta^T \dot{\hat{b}}_1(t) \stackrel{\Gamma=\gamma}{=} -\sigma_n(t) \gamma \delta^T z(t) = -\gamma \sigma_n^2(t) \quad (41)$$

шу каби масалалардан олинган бичизиқли алгоритмлар ҳар қандай қийматларда  $\gamma_i > 0$  туташилари келиб чиқади, аммо  $\gamma_i$  қадам қиймати параметрларни созлаш жараёнининг тезлиги ва сифатига таъсир қилади.

Қолдиқ сигнали ҳосиласида  $e(t)$  таркибида қўлланиладиган умумлашган хатолик  $\sigma(t) = \sigma_2(t)$  (индекси даражасини белгилайди) ўрнига ҳисоблаш учун қолдиқнинг биринчи ҳосиласи  $e(t)$  керак бўлади, адаптив бошқариш ҳатолигидан  $\sigma_1(t) = (a_1^M p + a_0^M) y - (b_1^M p + b_0^M) g$  фойдаланилганда моделлаштирилаётган тизим схемасини соддалаштириш мумкин. Аммо ушбу соддалаштиришда Ляпунов бўйича асимптотик турғунликнинг етарли шарти (41) бузилади ва юқорида таърифланган адаптациялаш алгоритмларининг яқинлашиши  $\gamma_i > 0$  ҳар қандай қийматларида таъминланмайди. Аммо бу – АдБТнинг ишга яроқлик шартларининг таҳлил вазифасидир.

Созлашнинг сигналли ва параметрик каналларидаги ўтиш жараёнларнинг боғлиқлиги 3-расмда келтирилган.



3-расм. Ўчирилган ( $\gamma_i = 0, i = 1, 2, 3$ ) ва ёқилган ( $\gamma_i \neq 0, i = 1, 2, 3$ ) ўз-ўзини соzлаш каналларида ноаниқ эталон модели адаптив тизимда кечаётган жараёнлар: а) объект тенгламаси коэффициентларининг ўзгариши  $a_0, a_1, b_0$ ; б) тизимнинг асосий контуридаги ростлагичнинг соzланадиган параметрларининг ўзгариши  $\alpha_0, \alpha_1, \beta_0$ ; в) тизимнинг асосий контуридаги ростлаш ҳатолигининг функцияси ( $\varepsilon$ ); д) асосий контурдаги бошқариш функцияси ( $u$ ) ва адаптив тизимнинг умумлашган ҳатолиги ( $\sigma$ ).

Кўриниб турибди-ки,  $a_0, a_1$  ва  $b_0$  коэффициентлар кескин даврий, турли параметрлар учун ҳар хил даврда ўзгаради, яъни 15 дан 45 с гача берилган чегаралардаги тасодифий қийматларда, бунда параметр  $b_1 = const$ . Адаптив ростлагич 3,б-расмда кўрсатилган боғлиқликларга мувофиқ параметрик бошқариш таъсирларини  $u_1 = \hat{b}_1 = col(\alpha_0, \alpha_1, \beta_0)$  шакллантиради. Бундан ташқари, 3-расмда таққослаш учун адаптациялашнинг очик каналлари, яъни  $\gamma_i = 0 (i = 1, 2, 3)$  ҳамда ростлагичнинг асосий контурида соzланадиган параметрлар, яъни  $\gamma_i \neq 0 (i = 1, 2, 3)$  га эга тизимдаги жараёнларнинг боғлиқликлари келтирилган. Уларнинг сонли қийматлари 3-расмда келтирилган. Келтирилган ўтиш жараёнлари графикларини таққослаш натижасида адаптив тизимнинг юқори сифат кўрсаткичлари намоён бўлди: асосий контурдаги ростлаш ҳатолиги  $\varepsilon(t)$  ва адаптив тизимнинг умумлашган ҳатолиги  $\sigma(t)$  ростлагич параметрларини соzлаш натижасида нолга интилади, шу билан бир вақтда адаптив бўлмаган тизимда ( $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_0 = 0$ ) ушбу ҳатоликлар сигнали нолдан сезиларли фарқ қилади.

## ХУЛОСА

Диссертацияда тизимли таҳлил, автоматик бошқариш тизимлар назарияси, динамик филтрлаш ва ноаниқ масалаларни ечиш усуллари асосида эталонли моделларга эга адаптив бошқариш тизимини турғун синтезлашнинг конструктив услубияти ишлаб чиқилган.

Натижада қуйидаги илмий натижалар олинган:

1. Эталонли моделни берадиган бошқарувчи адаптив кузатувчини синтезлаш алгоритмлари ишлаб чиқилган. Таклиф этилаётган эталон модели адаптив бошқариш алгоритми ростлагич коэффициентларининг мосланиши дархол берк тизим учун амалга оширилиши ҳисобига ростлагич коэффициентларининг созланишидан фойдаланган.

2. Ляпуновнинг бевосита усули ёрдамида олинган эталон модели асимптотик турғун адаптив бошқариш тизимининг алгоритмини синтезлаш алгоритми келтирилган. Таклиф этилган алгоритм ўз ўзини созлашнинг асимптотик турғун алгоритмини синтезлаш ва унинг турғунлиги учун етарли мезон олиш имконини берди.

3. Рекуррент псевдотескари матрица асосида адаптив матрицали ростлагични синтезлашнинг турғун алгоритмлари ишлаб чиқилган. Олинган алгоритмлар ноаниқлик шароитида матрицали объектларни адаптив бошқариш тизимларида бошқарув таъсирларини амалга оширишга имкон беради.

4. Динамик филтрлаш тенгламаси қолдиқ векторининг ўзаро боғлиқлик таҳлили асосида ростлагич параметрларини баҳолашнинг турғун алгоритмлари ишлаб чиқилган. Бошқарув қурилмалари параметрларини баҳолашнинг таклиф этилган рекуррент алгоритмлари объект шовқини ва ўлчашдаги ҳалақитларнинг ковариацион матрицаларини ўрнатишда ноаниқлик шароитида баҳолаш масаласини амалга оширишга имкон беради.

5. Эталон модели адаптив бошқариш тизимлардаги бошқариш қурилмаларини турғун параметрик синтезлаш алгоритмлари ишлаб чиқилган. Келтирилган алгоритмлар кўриб чиқиладиган ростлагич параметрларини баҳолаш масаласини мужассамлаштириш ва қидириладиган катталикларнинг априор номалум ташқи ғалаёнларга турғун баҳоларини олиш имконини берди.

6. Вазн функциялардан фойдаланиш асосида эталон модели адаптив бошқариш алгоритмлари таклиф этилган. Таклиф этилаётган кузатувчи таркибида кузатиш интервалидан сўнг ҳатоликсиз ҳолат векторининг баҳосини олиш имконини берадиган чекли вақт вазн функциялари мавжуд. Кўриб чиқилган ёндашув эталон модели адаптив тизимининг аниқлигини ошириб унинг турғунлигини таъминлаш имконини берди.

7. Кириш бўйича чекловга эга бир каналли объектлар синфи учун адаптив бошқариш тизими ўз ўзини созлаш контури ростлагичи коэффициентларининг модификацияси таклиф этилган. Реал вақт масштабда ишлаб чиқилган алгоритми бир маромдаги асимптотик турғун ҳаракати шартларини текшириш асосида эталон модели адаптив тизимнинг функционал иш қобилиятини таъминлайди.

8. Эталон модели адаптив тизимлар учун алгоритмлар ишлаб чиқилган. Олинган модификацияланган амалий амалга ошириладиган адаптациялаш алгоритмлари объектнинг квазистационар иш режими тўғрисидаги эҳтимолсиз олинган бўлиб кириш таъсирларининг интенсивлиги ва спектрал таркибидан мустақил равишда юқори бошқариш аниқлигини таъминлайди.

9. Соддалаштирилган эталон модели тизимда жараёни бошқаришнинг параметрини созлаш алгоритмлари ишлаб чиқилган. Минимал мураккабликдаги фильтр асосида кириш кечикишга эга таклиф этилган адаптив бошқариш схемаси адаптив ростлагичдаги созланадиган параметрлар сонини тизимдаги номаълум коэффициентлар сонигача қискартириш имконини берган бўлиб шу каби тизимларнинг амалий амалга оширишини соддалаштирадиган таркибида фақат мужассамлашган кечикишга эга блоklar мавжуд.

10. Ҳолат ва бошқариш бўйича кечикишга эга объектлар учун эталон модели адаптив тизим синтезланган. Ҳолат ва бошқариш бўйича кечикишга эга объектларни бошқариш тизимини амалга ошириш имкони кечикишларни компенсациялаш учун қўллаш ва бошқариш жараёнларининг исталган динамикасини – аниқ-ноаниқ эталонли упредител, ўлчаш имкони йўқ бўлган ҳолат фазоси ўрғарувчилар учун ж стационар кузатувчини белгилаш ҳисобига эришилди.

11. Нейтрал турдаги кечикишга эга объектлар учун эталон модели адаптив бошқариш тизими синтезланган. Доимий, номаълум ва ўлчанмайдиган ғалаёнлар таъсири шароитида ишлайдиган бошқариш бўйича кечикишга эга априор ноаниқ скаляр объектлар учун олинган алгоритмлар етарли даражада содда структурага эга бўлиб умумий ҳолатда бошқариш тизимининг яхши сифатини таъминлайди.

12. Таклиф этилган эталон модели адаптив бошқариш тизимини турғун синтезаш усул ва алгоритмлари асосида формалин ишлаб чиқариш технологик жараёнини адаптив бошқариш тизими ишлаб чиқилган. Ишлаб чиқилган адаптив бошқариш тизимида ростлагич параметрлари баҳоланади, яъни адаптациялаш мақсади тизимнинг берилган фаолиятини таъминлайдиган ростлагич коэффициентларини баҳолашга олиб келинади. Қўлланилган ёндашув объект ва ташқи муҳит параметрларининг сезиларли априор ва жорий ноаниқлигида синтезланган адаптив бошқариш тизимининг иш қобилиятини таъминлаш имконини беради. Бошқариш тизимини моделлаштириш асосида олинган натижалар ва ўтиш жараёнларнинг таҳлили адаптив бошқаришда формалиндаги формальдегид ва метанолнинг масса улушлари тегишлича  $36,7 \div 37,2\%$  ва  $0,8 \div 1\%$  чегараларда ушлаб турилгани, бу ерда метанолнинг солиштирма сарфи  $2,5 \div 3,5\%$  камайиб, оптималга яқин режимда жараёни ўтказиш имконини беришини кўрсатмоқда.

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

---

**НАВОИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ  
ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**БОТИРОВ ТУЛКИН ВАФОКУЛОВИЧ**

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ УСТОЙЧИВОГО СИНТЕЗА  
АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ЭТАЛОННЫМИ  
МОДЕЛЯМИ**

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

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

**Ташкент – 2020**

Тема докторской (DSc) диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за №B2020.2.DSc/T342.

Диссертация выполнена в Навоийском государственном горном институте и Ташкентском государственном техническом университете.

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

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

**Официальные оппоненты:** Юсупбеков Азизбек Нодирбекович  
доктор технических наук, профессор

Каипбергенов Батирбек Тулепбергенович  
доктор технических наук, профессор

Нурмухамедов Толаниддин Рамзиддинович  
доктор технических наук, профессор

**Ведущая организация:** Самаркандский государственный университет

Защита диссертации состоится «24» 11 2020 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.T.03.02 при Ташкентском государственном техническом университете (Адрес: 100095, г.Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz)).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (зарегистрировано № 171) (Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: 246-03-41).

Автореферат диссертации разослан «13» 11 2020 года.  
(реестр протокола рассылки № 27 от «7» 11 2020 года)



**Н.Р.Юсупбеков**

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

**У.Ф.Мамиров**

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

**Ж.У.Севинов**

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

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора наук (DSc))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире в настоящее время одним из основных направлений развития современной теории автоматического управления является решение проблемы построения адаптивных систем управления сложными динамическими объектами, требующими постоянного управления, контроля и поддержания заданных параметров по множеству взаимодействующих, взаимосвязанных контуров управления. Особое внимание уделяется разработке методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления технологическими объектами различного функционального назначения на основе эталонных моделей. Поэтому разработка разнообразных методов синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами является одной из востребованных задач. В развитых странах большое внимание уделяется решению теоретических задач динамического оценивания, синтеза адаптивного управления технологическими процессами и их практическому применению в различных отраслях промышленности.

В мире ведутся научно-исследовательские работы по созданию универсального подхода к построению адаптивных систем управления, обеспечивающих высокое качество процессов управления. В связи с этим важной задачей являются усовершенствование и модификация методов и алгоритмов устойчивого синтеза адаптивных систем управления; разработка типовых методов синтеза и анализа такого рода систем, алгоритмов устойчивого оценивания параметров управляющего устройства; создание методов и алгоритмов адаптивной стабилизации динамического объекта с неизвестными параметрами и неизмеряемым возмущением, а также методов реализации этих систем.

В рамках, принятых в Республике Узбекистан комплекса мер по развитию интеллектуальных систем управления большое внимание уделяется созданию систем усовершенствованного управления, обеспечивающих энерго- и ресурсосбережение при автоматизации и управлении различными технологическими процессами и производствами. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 гг. отмечены задачи, в том числе, по «... сокращению энергоемкости и ресурсоемкости экономики, широкого внедрения в производство энергосберегающих технологий, повышению производительности труда в отраслях экономики, ... внедрению информационно-коммуникационных технологий в экономику, социальную сферу, системы управления»<sup>1</sup>. Для реализации подобных задач важным является создание систем адаптивного управления с эталонными моделями, что обуславливает необходимость разработки эффективных методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления

---

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

технологическими объектами на основе концепций прямого адаптивного управления.

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», от 19 февраля 2018 года №УП 5349 «О мерах по дальнейшему совершенствованию информационно-коммуникационных отраслей» и Постановлениями №ПП-3245 от 29 августа 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы управления префектами в сфере информационно-коммуникационных технологий», а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

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

**Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации<sup>2</sup>.** Научные исследования, направленные на разработку методов и алгоритмов адаптивного управления техническими и технологическими объектами, осуществляются в ведущих научных центрах мира и высших образовательных учреждениях, в том числе, в «Honeywell», SIMSCI-Simulation и California Institute of Technology, Massachusetts Institute of Technology, Stanford University, Caltech University (США), «Siemens» и Technical University Munich, Karlsruhe Institute of Technology, RWTH Aachen University (Германия), Imperial College London, The University of Edinburgh, University of Cambridge (Великобритания), KTH Royal Institute of Technology (Швеция), «Alstom» (Франция), KU Leuven (Бельгия), University of Chemical Technology in Prague (Чехия), The University of Tokyo, Tokyo Institute of Technology (Япония), Seoul National University, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Pohang University of Science and Technology (Южная Корея), «Simatek-Energo» (Беларусь), Tsinghua University (Китай), Институте проблем автоматизации РАН, Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана, Национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики, Новосибирском государственном техническом университете (Российская Федерация).

В результате исследований, проведенных в мировых научных центрах по созданию методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами, а также совершенствованию систем управления, получен ряд результатов, в том числе созданы методы разработки алгоритмов синтеза субоптимальных адаптивных регуляторов (University of California,

---

<sup>2</sup> Диссертация мавзуси бўйича илмий тадқиқотлар шарҳи <https://elibrary.ru>, <http://ieeexplore.ieee.org/document/824819>, <http://www.mathnet.ru/rus/agreement>, [www.asucontrol.ru](http://www.asucontrol.ru), [www.sial.iias.spb.su](http://www.sial.iias.spb.su), <http://www.ipu.ru>, <http://cyberleninka.ru>, <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/?p=21073>, [https://nl.wikipedia.org/wiki/Pieter\\_Eykhooff](https://nl.wikipedia.org/wiki/Pieter_Eykhooff), [https://books.google.ru/books/about/Optimum\\_systems\\_control.html](https://books.google.ru/books/about/Optimum_systems_control.html), <https://www.itcgroup.ru/ratings/reiting-universitetov-mira-times-2017>, <https://mosiur.org/ranking2019/>, <http://terraelectronica.ru>, <http://uk.farnell.com> ва бошқа манбалар асосида ишлаб чиқилган.



Massachusetts Institute of Technology, George Mason University, США; Linksping University, Швеция; Институт проблем управления РАН, Российская Федерация); разработаны методы синтеза физически реализуемых алгоритмов адаптивного управления с эталонной моделью (Massachusetts Institute of Technology, США; Linksping University, Швеция; Technische Universiteit Eindhoven, Нидерланды; Институт проблем управления РАН, Военно-воздушная инженерная академия имени Н.Б. Жуковского, Российская Федерация); разработаны алгоритмы адаптивного управления для динамических объектов с последействием (George Mason University, США; Институт проблем управления РАН, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, Российская Федерация); разработаны типовые методы синтеза и анализа систем прямого адаптивного управления (Институт проблем управления РАН, Московский государственный технический университет им.Н.Э.Баумана, Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Российская Федерация); разработаны методы прямого адаптивного управления при наличии возмущений (Linksping University, Швеция; Институт проблем управления РАН, Российская Федерация).

В мире дальнейшее развитие существующих и создание новых методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления с эталонными моделями осуществляется по следующим перспективным направлениям: разработка методов и алгоритмов синтеза субоптимальных адаптивных регуляторов; разработка физически реализуемых алгоритмов адаптивного управления; разработка методов и алгоритмов регулярного параметрического синтеза управляющих устройств в адаптивных системах управления; разработка методов и алгоритмов адаптивного управления с эталонной моделью на основе использования весовых функций.

**Степень изученности проблемы.** Современное состояние развития науки и технологий предопределяет необходимость исследований по разработке методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления технологическими объектами на основе концепций прямого подхода и свидетельствует о достижении значительных теоретических и практических результатов в этой области. Опубликовано большое количество работ, посвященных проблемам синтеза адаптивных систем управления, разработаны общетеоретические концепции, возрастает число решенных практических задач. Большой вклад в развитие адаптивных систем управления внесли многие зарубежные ученые, такие как Astrom K.J., Monopoli R.V., Izerman R., Kalman R., Као Т. Г., Нгуен М., Земляков С. Д., Крутова И.Н., Миркин Е. Л., Бронников А. М., Красовский А.А., Мирошник И.В., Александров А.Г., Неймарк Ю.И., Никифоров В.О., Петров Б.Н., Поляк Б.Т., Тетерин А.В., Белов С.В., Рутковский В.Ю., Артюшок В.П., Круглов С.П., Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Цыпкин Я.З., Ядыкин И.Б., Еремин Е.Л., Якубович В.А., Брусин В.А., Теличенко Д.А. и др., а также отечественные ученые – Бекмуратов Т.Ф., Гулямов Ш.М., Жуманов И.И., Зарипов О.О.,

Игамбердиев Х.З., Исмаилов М.А., Кадыров А.А., Камилов М.М., Марахимов А.Р., Нурмухамедов Т.Р., Сиддиков И.Х., Фозилов Ш.Х., Юсупбеков Н.Р. и др.

Однако постоянное усложнение и расширение круга научных исследований требует разработки новых эффективных методов и алгоритмов синтеза субоптимальных адаптивных регуляторов, физически реализуемых алгоритмов адаптивного управления с эталонной моделью.

В неполной мере разработаны регулярные методы и алгоритмы адаптивного управления динамическими системами. Требуют своего развития также регулярные методы прямого адаптивного управления. Кроме того, оказывается целесообразным осуществлять разработку регулярных методов и алгоритмов формирования управляющих воздействий в локально-оптимальных и матричных адаптивных системах управления, что позволит расширить спектр алгоритмических процедур построения и реализации адаптивных систем управления в условиях неопределенности и повысить эффективность их функционирования. В связи с вышесказанным возникает настоятельная необходимость дальнейшей модификации и создания эффективных регулярных методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления с эталонными моделями на основе концепций прямого подхода.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационное исследование выполнено в рамках научно-исследовательских проектов Навоийского государственного горного института и Ташкентского государственного технического университета по следующим темам: №ЕА-5-002 - «Разработка алгоритмов и программных средств параметрического синтеза регуляторов в адаптивных системах управления химико-технологическими объектами» (2012-2013); №А-5-033 - «Разработка алгоритмов и программных средств автоматизации управления основными процессами обогащения угля» (2015-2017); №ОТ-Ф4-78: «Разработка теоретических основ и регулярных методов синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами на основе идентификационного подхода» (2017-2020).

**Цель исследования** состоит в разработке методов и алгоритмов устойчивого синтеза адаптивных систем управления с эталонными моделями.

**Задачи исследования:**

системный анализ развития теории и методов синтеза адаптивных систем управления с эталонными моделями;

разработка алгоритмов устойчивого адаптивного управления с моделью эталона при внешних возмущениях;

разработка асимптотически устойчивого алгоритма синтеза адаптивной системы управления с моделью эталона прямым методом Ляпунова;

разработка алгоритмов устойчивого параметрического синтеза управляющих устройств в адаптивных системах управления;

разработка алгоритмов адаптивного управления на основе использования весовых функций;

разработка алгоритмов адаптации для адаптивных систем с моделью эталоном;

разработка алгоритмов управления процессом настройки параметров в системе с упрощенной эталонной моделью;

синтез адаптивной системы для объектов с последствием по состоянию и управлению;

практическая реализация разработанных методов и алгоритмов адаптивного управления с эталонными моделями.

**Объектом исследования** являются системы адаптивного управления с эталонными моделями.

**Предметом исследования** являются методы и алгоритмы устойчивого синтеза адаптивных систем управления с эталонными моделями.

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

**Научная новизна диссертационного исследования** заключается в следующем:

разработаны асимптотически устойчивые алгоритмы синтеза адаптивной системы управления прямым методом Ляпунова;

разработаны устойчивые алгоритмы синтеза адаптивных матричных регуляторов на основе рекуррентного псевдообращения матриц

разработаны устойчивые алгоритмы оценивания параметров регуляторов на основе анализа коррелированности вектора невязок уравнения динамической фильтрации;

разработаны алгоритмы устойчивого параметрического синтеза управляющих устройств в адаптивных системах управления на основе принципа итеративной регуляризации;

разработаны алгоритмы синтеза системы адаптивного управления на основе методов численной оптимизации;

разработаны алгоритмы синтеза параметров регуляторов на основе оценивания вектора состояния объектов управления;

синтезирована адаптивная система для объектов с запаздыванием по состоянию и управлению.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

разработаны структурные и функциональные схемы автоматизации и адаптивного управления технологическим процессом производства формалина;

разработаны системы адаптивного управления технологическими процессами производства формалина с соответствующим техническим обеспечением, позволяющих стабилизировать технологические режимы протекания процессов и повысить эффективность их функционирования.

**Достоверность результатов исследования.** Достоверность полученных результатов исследования обеспечивается выполнением методически обоснованных теоретических выкладок; применением теоретически обоснованных концепций адаптивного управления динамическими объектами

на основе прямого подхода; использованием апробированных методов и алгоритмов современной теории автоматического управления; требуемой степенью сходимости предлагаемых методов и алгоритмов адаптивного управления; полученными результатами теоретических и прикладных исследований и их взаимной согласованностью.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследования состоит в разработке конструктивных устойчивых методов и алгоритмов синтеза систем адаптивного управления с эталонными моделями, позволяющих повысить качество процессов управления.

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке математического и алгоритмического обеспечения разнообразных задач прямого адаптивного управления и могут найти широкое применение при построении функциональной структуры и автоматизации проектирования адаптивных систем управления технологическими процессами с непрерывным характером производства.

**Внедрение результатов исследования.** На основе полученных научных результатов синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами на основе концепций прямого подхода:

разработанные алгоритмы устойчивого параметрического синтеза управляющих устройств в адаптивных системах управления с эталонными моделями внедрены на АО «Навоиазот» (Справка АО «УЗКИМЁСАНОАТ» №24-3246 от 11 августа 2020 года). Алгоритмы позволяют регуляризовать рассматриваемую задачу оценивания параметров регулятора и получать устойчивые к априорно неизвестным внешним возмущениям оценки искомых величин;

разработанные алгоритмы устойчивого адаптивного управления с эталонной моделью при внешних возмущениях внедрены на АО «Навоиазот» (Справка АО «УЗКИМЁСАНОАТ» №24-3246 от 11 августа 2020 года). Алгоритмы позволяют реализовать задачу оценивания в случае неадекватности в определенном смысле между реальной системой и ее математическим описанием;

разработанные алгоритмы управления процессом настройки параметров в системе с упрощенной эталонной моделью внедрены на АО «Навоиазот» (Справка АО «УЗКИМЁСАНОАТ» №24-3246 от 11 августа 2020 года). Предложенная схема позволяет сократить число настраиваемых параметров в адаптивном регуляторе до числа неизвестных коэффициентов в системе;

разработанные алгоритмы синтеза параметров регуляторов на основе оценивания вектора состояния в адаптивных системах управления с эталонными моделями внедрены на АО «Навоиазот» (Справка АО «УЗКИМЁСАНОАТ» №24-3246 от 11 августа 2020 года). Полученные результаты позволяют стабилизировать технологические режимы протекания процесса и повысить эффективность его функционирования.

**Апробация результатов исследования.** Теоретические и практические результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на 7 международных и 7 республиканских научно-практических конференциях.

**Опубликованность результатов исследования.** По теме диссертации опубликованы 34 научные работы, из них – 1 монография, 13 научных статей, в том числе 6 в зарубежных журналах, рекомендованных ВАК РУз для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, получены 6 свидетельств об официальной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 184 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

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

В первой главе **«Системный анализ развития теории и методов синтеза адаптивных систем управления с эталонными моделями»** представлены результаты систематического анализа развития методов построения и синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами, формирования прямого подхода к построению адаптивных систем управления динамическими объектами, анализа проблемных ситуаций адаптивного управления динамическими объектами, целей и задач исследования.

Современное состояние методов и алгоритмов управления на нынешнем этапе характеризуется формированием и решением задач, учитывающих неопределенность наших знаний об объектах управления и затрагивающих их нарушениях. На практике известны только случаи, когда известен порядок объекта управления и структура уравнения его математической модели. Однако числовые значения некоторых или даже всех параметров объекта неизвестны. Иногда можно определить диапазон возможных значений неопределенных коэффициентов, но эти диапазоны очень широки: высокие значения могут быть в несколько раз выше меньших значений. Традиционные системы управления остаются нестабильными в этих условиях и не могут обеспечить нормальное прохождение контролируемого процесса. Это означает, что использование классических устройств управления в качестве обычного регулятора с настройками, сформированными в технологическом

процессе или в управлении объектом, не гарантирует требуемого качества работы.

В такой ситуации при решении задач управления требуется разрабатывать системы, обладающие способностью приспосабливаться как к изменяющимся условиям работы объекта управления, так и к наличию априорной неопределенности в его математическом описании. В теории адаптивных систем управления формируются подходы, направленные на улучшение качества систем за счет изменения структуры и параметров алгоритмов управления в процессе их функционирования. При этом обычно используются адаптивные системы с настраиваемыми или эталонными моделями.

В отличие от систем с настраиваемыми моделями в системах с эталонной моделью цель управления и цель адаптации совпадают и состоят в обеспечении близости поведения системы к заданной эталонной модели, отражающей представление о желаемом поведении системы. В системах с эталонной моделью также решается задача параметрической оптимизации основного контура по настраиваемым параметрам. Но, благодаря использованию беспоисковых методов оптимизации, задача оптимизации заменяется иной, алгебраической задачей, решение которой дает искомую связь между результатами наблюдений и параметрами настроек регулятора. Кроме того, сам функционал настройки является мерой параметрического рассогласования основного контура и его эталонной модели, что в ряде случаев позволяет простым путем учесть технические требования к адаптивной системе управления.

В связи с этим весьма заманчивым представляется путь построения управляющих систем, основанных на концепциях теории прямых адаптивных систем с использованием эталонных моделей, и не требующих полного априорного знания объекта управления и условий его функционирования. Управляющая система, построенная на основе прямого подхода, способна автоматически отыскивать нужный закон управления посредством анализа поведения объекта при текущем управлении. Отмеченные обстоятельства указывают на необходимость создания методов и алгоритмов устойчивого синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами на основе концепций прямого подхода и синтеза вычислительных схем их практической реализации при решении задач автоматизации и управления конкретными технологическими процессами промышленных производств.

Вторая глава диссертации **«Разработка алгоритмов синтеза субоптимальных адаптивных регуляторов»** посвящена разработке алгоритмов синтеза управляющего адаптивного наблюдателя, задающего эталонную модель; регулярного оценивания параметров регуляторов на основе анализа коррелированности вектора невязок уравнения динамической фильтрации; асимптотически устойчивого алгоритма синтеза адаптивной системы управления с эталонной моделью прямым методом Ляпунова; устойчивого параметрического синтеза управляющих устройств в системах прямого адаптивного управления динамическими объектами; синтеза

адаптивных матричных регуляторов с неявной эталонной моделью на основе полиномиального подхода.

Изменение параметров объекта управления в адаптивных системах с эталонной моделью подчинено некоторым дифференциальным уравнениям в расширенном пространстве состояний. Асимптотическая устойчивость расширенной системы дифференциальных уравнений гарантирует точное отслеживание желаемого выходного сигнала модели даже при неодинаковых начальных условиях,  $x_0 \neq z_0$ , а также устойчивое функционирование всей системы.

Асимптотическая устойчивость в расширенном пространстве может быть исследована с помощью функции Ляпунова:

$$V(e, \delta f_{ij}, \delta b_{ij}) = e^T Q e + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{1}{v_{ij}} \delta f_{ij}^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{1}{w_{ij}} \delta b_{ij}^2 > 0,$$

где  $Q = Q^T > 0$ ,  $v_{ij} > 0$ ,  $w_{ij} > 0$ ,  $i = 1, \dots, m$ ,  $j = 1, \dots, m$ .

Полная производная функции  $V$  в силу системы определяется формулой:

$$\dot{V}(e, \delta f_{ij}, \delta b_{ij}) = e^T [M^T Q + QM] e + 2e^T Q \Delta F x + 2e^T Q B r + 2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{1}{v_{ij}} \delta f_{ij} \dot{\delta f}_{ij} + 2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{1}{w_{ij}} \delta b_{ij} \dot{\delta b}_{ij}.$$

Выбирая  $\delta f_{ij}$  и  $\delta b_{ij}$  такими, что:

$$\dot{\delta f}_{ij} = -v_{ij} \left[ \sum_{k=1}^m e_k q_{ki} x_j + \delta f_{ij} \right], \quad \dot{\delta b}_{ij} = -w_{ij} \left[ \sum_{k=1}^m e_k q_{ki} r_j + \delta b_{ij} \right], \quad i = 1, \dots, m, \quad (1)$$

получаем следующее представление производной  $V$ :

$$\dot{V} = e^T [M^T Q + QM] e - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \delta f_{ij}^2 - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \delta b_{ij}^2. \quad (2)$$

Поскольку модель (2) предполагается асимптотически устойчивой, всегда существует положительно определенная матрица  $P = P^T > 0$  такая, что

$$M^T Q + QM = -P < 0.$$

Так как два других члена в (2) также отрицательны, можно показать, что  $\dot{V}$  является отрицательной функцией, и, следовательно, расширенная система асимптотически устойчива:  $V > 0$ ,  $\dot{V} < 0$ .

Таким образом, соотношения (1) определяют сходящийся алгоритм для подстройки параметров  $\delta f_{ij}$  и  $\delta b_{ij}$ . Однако эти соотношения еще не задают явный алгоритм для регулирования параметров  $\beta$ . Для того чтобы получить такой алгоритм, необходимо решить следующие уравнения относительно  $\beta$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \delta f_{ij}(\beta, \alpha)}{\partial \beta} \dot{\beta} &= -v_{ij} \left[ \sum_{k=1}^m e_k q_{ki} x_j + \delta f_{ij}(\beta, \alpha) \right], \\ \frac{\partial \delta b_{ij}(\beta, \alpha)}{\partial \beta} \dot{\beta} &= -w_{ij} \left[ \sum_{k=1}^m e_k q_{ki} r_j + \delta b_{ij}(\beta, \alpha) \right], \quad i, j = 1, \dots, m, \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнения (3) должны решаться совместно для получения производной  $\dot{\beta}$ :

$$\dot{\beta} = - \begin{bmatrix} \{\mathcal{F}^T_{ij}\} \\ \{\mathcal{B}^T_{ij}\} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_{ij} \left[ \sum_{k=1}^m e_k q_{ki} x_j + \mathcal{F}_{ij}(\beta, \alpha) \right] \\ w_{ij} \left[ \sum_{k=1}^m e_k q_{ki} r_j + \mathcal{B}_{ij}(\beta, \alpha) \right] \end{bmatrix}, \quad (\beta(t_0) = \beta), \quad (4)$$

при этом предполагается, что обратная матрица в правой части равенства (4) существует.

При использовании выражения (4) вычисление обратной матрицы вызывает трудности, поскольку размер матрицы  $\begin{bmatrix} \{\mathcal{F}^T_{ij}\} \\ \{\mathcal{B}^T_{ij}\} \end{bmatrix}^{-1}$  велик и может быть вырожденной. При вычислении таких матриц целесообразно использовать методы разделения матриц на блоки.

$$M = \begin{bmatrix} \{\mathcal{F}^T_{ij}\} \\ \{\mathcal{B}^T_{ij}\} \end{bmatrix} (|M| \neq 0); \quad M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}, \quad A \in R^{n \times n}, (|A| \neq 0), \quad B \in R^{n \times q}, \quad C \in R^{q \times n}, \quad D \in R^{q \times q}.$$

Следовательно

$$M^{-1} = \begin{pmatrix} A^{-1} + A^{-1} B H^{-1} C A^{-1} & -A^{-1} B H^{-1} \\ -H^{-1} C A^{-1} & H^{-1} \end{pmatrix},$$

здесь  $H = D - C A^{-1} B$ .

Можно также использовать выражение  $|D| \neq 0$

$$M^{-1} = \begin{pmatrix} K^{-1} & -K^{-1} B D^{-1} \\ -D^{-1} C K^{-1} & D^{-1} + D^{-1} C K^{-1} B D^{-1} \end{pmatrix},$$

здесь  $K = A - B D^{-1} C$ .

Приведенные алгоритмы способствуют стабилизации вычислительной процедуры обращения матрицы  $M$ , и тем самым повышению точности оценивания регулируемого параметра в адаптивной системе управления.

Рассмотрим алгоритмы построения регуляторов с эталонной моделью в плане синтеза на основе полиномиального исчисления матричных регуляторов, сочетающих в себе свойства регуляторов с заданным расположением полюсов и эталонной моделью.

Пусть управляемый объект описывается следующей моделью:

$$A(q^{-1})y(t) = z^{-k} B(q^{-1})u(t), \quad (5)$$

где  $A(z^{-1})$  и  $B(z^{-1})$  – функциональные матрицы от  $q^{-1}$  вида:

$$A(q^{-1}) = I_n + \sum_{i=1}^{\bar{n}} A_i A(q^{-1}), \quad B(q^{-1}) = I_n + \sum_{i=1}^{\bar{n}} B_i A(q^{-1}),$$

где  $I_n$  – единичная матрица размерности  $[n \times n]$ ;  $A_i \in R, 1, n$ ;  $B_i \in R^{m \times m}, i = \overline{0, n}$ .

Регулятор описывается уравнением:

$$R(q^{-1})u(t) = Q(q^{-1})g(t) - S(q^{-1})y(t), \quad (6)$$

здесь  $g(t)$  – задающее воздействие,  $g(t) R, R(q^{-1}), Q(q^{-1}), S(q^{-1})$  – полиномиальные матрицы от  $q^{-1}$  вида;  $R_i \in R^{m \times m}, i = \overline{1, n_R}$ ;  $Q_i \in R^{m \times 1}, i = \overline{0, r}$ ;  $S_i \in R^{m \times n}, i = \overline{0, n_S}$ .



Матричную передаточную функцию системы (5), (6) можно выразить в виде:

$$W(q^{-1}) = q^{-k} C(q^{-1}) Q(q^{-1}) / d(q^{-1}). \quad (7)$$

Матричная передаточная функция эталонной модели вида:

$$W_m(q^{-1}) = q^{-k} H(q^{-1}) / f(q^{-1}), \quad (8)$$

где  $H(q^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_H} H_i q^{-i}$ ,  $H_i \in R^{n \times 1}$ ,  $i = \overline{0, n_H}$ ;  $f(q^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{n_f} f_i q^{-i}$  – устойчивый полином.

Использование неявной эталонной модели дает гибкий инструмент для формирования эталонного переходного процесса, который может быть выбран оптимальным в смысле минимизации заданного при проектировании критерия оптимальности. В качестве критерия близости матричных передаточных функций системы (7) и ее неявной эталонной модели (8) используем следующий функционал, представляющий собой квадрат нормы Фробениуса матрицы  $E(q^{-1})$ :

$$J = \text{tr}(\bar{V}_d L \bar{Q} - \bar{V}_f \bar{H})^T (V_d L \bar{Q} - \bar{V}_f \bar{H}) = \text{tr}(\bar{Q}^T L^T \bar{V}_d^T - 2 \bar{Q}^T L^T \bar{V}_d^T \bar{V}_f \bar{H} + \bar{H}^T \bar{V}_f^T \bar{V}_f \bar{H}). \quad (9)$$

Параметры матрицы  $\bar{Q}$  определим, обозначая:

$$R_0 = V_d^T V_d, \quad Q^0 = V_d^T V_f, \quad S^0 = V_f^T V_f.$$

Тогда матрица  $X$  является теплицевой и  $X^{-1} = T(u, v)$ . Теперь функционал (9) можно выразить в виде:

$$J = \text{tr}(\bar{Q}^T L^T \bar{T}(d, d) L \bar{Q} - 2 \bar{Q}^T \bar{T}(d, f) \bar{H} + \bar{H}^T \bar{T}(f, f) \bar{H}). \quad (10)$$

Отсюда матрица  $\bar{Q}$ , минимизирующая функционал, определяется выражением:

$$\bar{Q} = (KL)^+ M \bar{H}, \quad (11)$$

где “+” - знак псевдообращения.

В случае, если  $m \geq n$ , можно определить параметры полиномиальной матрицы  $Q(z^{-1})$ , минимизирующие функционал (10) при условии асимптотического совпадения выходных сигналов системы и ее неявной эталонной модели на постоянное задающее воздействие:  $\bar{Q} = U \bar{Q}_1 + \begin{pmatrix} I_n \\ 0 \end{pmatrix} F$ .

Подставляя это выражение в соотношение (10) и минимизируя функционал по параметрам матрицы  $\bar{Q}_1$ , определяем оптимальную матрицу  $\bar{Q}_1$

$$\bar{Q}_1 = (KLU)^+ (M \bar{H} - K \bar{C} F). \quad (12)$$

Следует заметить, что матрицы  $K$ ,  $M \bar{H}$  не зависят от параметров объекта (5) и могут быть определены заранее на стадии проектирования системы управления. Для формирования оптимальных матриц (11) и (12) целесообразно использовать рекуррентные формулы для псевдообращения матриц  $\Lambda = KL$  и  $\Omega = KLU$ . На основе теории и методов псевдообращения матриц получен алгоритм псевдообращения для матрицы  $\Lambda$ , который может быть использован и при вычислении псевдообратной матрицы  $\Omega^+$ .

Здесь неявная эталонная модель задается в виде эталонной матричной передаточной функции, определяющей желаемое поведение сигнала на выходе системы управления. Синтез управляющих устройств осуществляется

при помощи известных методов полиномиального исчисления и включает в себя полиномиальную факторизацию, решение матричного полиномиального уравнения и системы линейных алгебраических уравнений.

В работе также приведены упрощенные алгоритмы определения параметров регулятора на основе оптимального предсказателя с использованием оценителя.

Будем предполагать, что динамика управляемого процесса может быть описана при помощи линейного векторного разностного уравнения вида:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-k) + d + (q^{-1})z(t), \quad (13)$$

где  $y$  –  $m$ -мерный вектор выходного сигнала (измерение);  $u$  –  $m$ -мерный вектор управления (входной сигнал);  $d$  –  $m$ -мерный вектор, состоящий из постоянных элементов, характеризующий установившееся выходное значение отклика при нулевом значении входного сигнала;  $z$  – последовательность независимых, одинаково распределенных случайных векторов с нулевыми средними значениями и ковариацией  $E\{z(t)z^T(t)\} = r$ ;  $E$  – оператор усреднения;  $k$  – время задержки;  $q^{-1}$  – оператор запаздывания (обратного сдвига):  $q^{-1}y(t) = y(t-1)$ .

Качество функционирования адаптивной системы выражается в виде целевого функционала вида:

$$J = E\left\{\|P(q^{-1})y(t+k) - R(q^{-1})w(t)\|^2 + \|Q'(q^{-1})u(t)\|^2\right\}, \quad (14)$$

где  $P$ ,  $R$  и  $Q$  – полиномиальные матрицы.

Структура адаптивного регулятора включает оптимальный предсказатель по методу наименьших квадратов, полученный в результате использования уравнения (13). В основу синтеза оценителя примем предположение, что уравнение параметров аппроксимируется соотношением  $\theta(t+1) = \theta(t) + w(t)$ , а уравнение измерения имеет вид:

$$z(t) = X(t-\tau)\theta(t) + v(t), \quad y(t) = py^d(t-\tau) + lu(t-\tau),$$

где

$$\theta = [g_{11}^0, \dots, g_{m1}^0, \dots, g_{1m}^{n_g}, \dots, g_{mm}^{n_g}; s_{11}^0, \dots, s_{m1}^0, \dots, s_{1m}^{n_s}, \dots, s_{mm}^{n_s}; d_{1m}^0, \dots, d_{mm}^0, \dots, d_{1l}^{n_d}, \dots, d_{ml}^{n_d}; \gamma_1, \dots, \gamma_m]^T;$$

$$X = [U : Y : Y^d : I], \quad U = [u^T(t-\tau) \otimes I : \dots : u^T(t-\tau-n_g) \otimes I],$$

$$Y = [y^T(t-\tau) \otimes I : \dots : y^T(t-\tau-n_s) \otimes I], \quad Y^d = [y^{dT}(t-\tau) \otimes I : \dots : y^{dT}(t-\tau-n_d) \otimes I],$$

$$E[w(t)] = 0, \quad E[w(t)w^T(q)] = Q(t)\delta_{tq}, \quad E[v(t)] = 0, \quad E[v(t)v^T(q)] = R(t)\delta_{tq}, \quad E[w(t)v(q)] = 0.$$

$r, l$  – взвешивающие коэффициенты,  $\tau$  – время задержки,  $I$  – единичная матрица.

Тогда оценивание параметров регулятора можно осуществлять на основе фильтра Калмана. Для придания большей численной устойчивости процессу фильтрации целесообразно использовать современные ортогонализированные блочные алгоритмы, основанные на применении современных информационных технологий для реализации указанного класса алгоритмов в задачах реального времени.

Пусть уравнение состояния параметров регулятора описывается уравнением:

$$\theta(k+1) = \theta(k) + w(k), \quad \theta(0) = \theta^0. \quad (15)$$

Уравнение измерения имеет вид:

$$z(k) = H(k)\theta(k) + v(k). \quad (16)$$

Запишем (15), (16) в следующем виде:

$$A\theta = z, \quad (17)$$

где  $A$  – оператор задачи, являющийся композицией отображений (15), (16).

Задача решения уравнения (17) представляет собой некорректно поставленную задачу. Исходные данные  $\{A, z\}$  в уравнении (17) известны обычно лишь приближенно. Условия аппроксимации примем в виде:

$$\|A_h - A\| \leq h, \quad z_\delta = z + \tilde{z}, \quad \|\tilde{z}\|_F \leq \delta,$$

и вместо (17) далее будем рассматривать уравнение:

$$A_h\theta = z_\delta, \quad \theta \in U, \quad z_\delta \in F, \quad (18)$$

где  $U, F$  – некоторые линейные нормированные пространства.

Для решения уравнения (18) будем использовать итерационные методы, формируемые соотношением вида:  $\theta_{r+1} = F_A(\theta_r, \tilde{z}, h)$ ,  $r = 0, 1, 2, \dots$

В качестве итерационных алгоритмов рассматривались методы скорейшего спуска  $\theta(r+1) = \theta(r) - \beta(r)J'\theta(r)$ ,  $\beta(r) = \|J'\theta(r)\|^2 / \|A_h J'\theta(r)\|^2$ , минимальных ошибок  $\theta(r+1) = \theta(r) - \beta(r)J'\theta(r)$ ,  $\beta(r) = \Delta^2(r) / \|J'\theta(r)\|^2$  и простой итерации  $\theta(r+1) = \theta(r) - \beta J'\theta(r)$ ,  $\beta > 0$ ,  $r = 0, 1, 2, \dots$ , где  $J(\theta) = 0.5\|A_h\theta - z\|_Z^2 = 0.5\Delta^2(\theta)$ ,  $J'\theta = (A_h)^T(A_h\theta - z)$ ,  $\Delta(\theta) = \|A_h\theta - z\|_Z$ .

Приведенные алгоритмы позволяют регуляризовать рассматриваемую задачу оценивания параметров регулятора и получать устойчивые к априорно неизвестным внешним возмущениям оценки искомых величин.

В главе также рассмотрены вопросы синтеза управляющего устройства в адаптивных системах управления с учетом априорной неопределенности статистических характеристик полезного сигнала и помех. Полученные выражения позволяют синтезировать оптимальные или субоптимальные в среднеквадратическом смысле алгоритмы оценивания, обладающие свойствами сходимости оценок, устойчивости по отношению к ошибкам округления и схемам аппроксимации.

В третьей главе диссертации **«Разработка физически реализуемых алгоритмов адаптивного управления с эталонной моделью»** приводятся результаты разработки алгоритмов синтеза адаптивного управления с эталонными моделями как задачи численной оптимизации, адаптивного управления с эталонной моделью на основе использования весовых функций, модификации адаптивной системы для управления одноканальным объектом с входным насыщением, физически реализуемых методов и алгоритмов построения адаптивных систем управления с эталонными моделями.

Пусть объект управления и ее эталонная модель описываются в виде следующего дифференциального уравнения:

$$x^{(n)} + \sum_{i=0}^{n-1} a_i x^{(i)} = \sum_{j=0}^m b_j x^{(j)}, \quad x_M^{(n)} + \sum_{i=0}^{n-1} a_{M_i} x_M^{(i)} = \sum_{j=0}^k b_{M_j} x_0^{(j)}.$$

Необходимо обеспечить такое управление  $y(t)$ , чтобы с течением времени движение системы приближалось к эталонному. Это можно записать в виде:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} (x_n - x) = 0. \quad (19)$$

Настройка параметров может быть решена как задача минимизации функционала  $I = \varepsilon_1^r$ . При этом система фактически строится как экстремальная система управления объектом, а параметры регулятора являются управляющими воздействиями. В более общем случае в качестве минимизируемого функционала можно взять  $I = \omega_i^r$ , где  $\omega_i$  является линейной функцией погрешности  $\varepsilon_1$  и ее производных  $\omega_i = L_i(p)\varepsilon_1$ ,  $L_i = p^i + \sum_{j=0}^k l_j p^{(j)}$  - устойчивый оператор. Тогда  $\omega_0 = \varepsilon_1$ ,  $\omega_n = \sigma$ , а уравнение для реализации записывается как

$$L_i(p)\varepsilon_1 = L_i(p)x - B_M(p)L_i(p)/A_M(p)x_0 = \sigma L_i(p)/A_M(p). \quad (20)$$

Как видно из уравнения (20),  $\omega_i$  несет информацию об  $i$  производных ошибки и об отклонении параметров от эталонных. Задача настройки регулятора сводится к задаче минимизации некоторой функции от  $\omega_i$ , причем необходимо, чтобы она имела один минимум при  $\omega_i = 0$ . Тогда из устойчивости  $L_i(p)$  и  $\omega_i = 0$  следует выполнение (19). При этом решаются фактически две задачи:

- обеспечение равенства  $\omega_i = 0$  и, следовательно, условия (19);
- уменьшение параметрических рассогласований.

Первая и вторая задачи, соответственно являются ближайшей и дальней целью, так как при нулевых параметрических рассогласованиях регулятор становится стационарным.

Для решения этих задач целесообразно использовать методы минимизации функций на основе методов решения некорректных задач.

Выбор точек испытаний при минимизации вещественной функции  $\varphi(x)$ ,  $x \in [a, b]$ , согласно последовательному алгоритму глобального поиска, определяется следующими правилами. Первое вычисление значения функции осуществляется в произвольной внутренней точке, а любое следующее  $(k+1)-e$ ,  $k \geq 1$  вычисление - в точке:

$$x^{k+1} = S(t),$$

$$S(t) = (x_t + x_{t-1})/2 - \begin{cases} (z_t - z_{t-1})/(2r\mu), & 1 < t \leq k, \\ 0, & t = 1 \text{ или } t = k + 1, \end{cases} \quad (21)$$

лежащей в интервале  $(x_{t-1}, x_t)$ , которому соответствует максимальная характеристика  $R(t)$ , т.е.  $R(t) \geq R(i)$ ,  $1 \leq i \leq k + 1$ :

$$R(i) = x_i - x_{i-1} + \frac{(z_i - z_{i-1})^2}{\mu^2(x_i - x_{i-1})} - 2(z_i + z_{i-1})/(r\mu), \quad 1 < i \leq k, \quad (22)$$

$$R(1) = 2(x_1 - x_0) - 4z_1/(r\mu), \quad R(k+1) = 2(x_{k+1} - x_k) - 4z_k/(r\mu), \quad (23)$$

$$\mu = \max \left\{ |z_i - z_{i-1}| / (x_i - x_{i-1}) : 1 < i \leq k \right\}, \quad (24)$$

причем если  $\mu$  из (24) не определено или  $\mu = 0$ , то принимается, что  $\mu = 1$ . При этом величины  $x_i$ ,  $1 \leq i \leq k$  – перенумерованные в порядке возрастания значений координаты точек  $x^1, \dots, x^k$  предшествующих испытаний, т. е.

$$a = x_0 < x_1 < \dots < x_i < \dots < x_k < x_{k+1} = b, \quad (25)$$

а  $z_i = \varphi(x_i)$ ,  $1 \leq i \leq k$ , – значения минимизируемой функции, вычисленные в этих точках. Точки  $x_0 = a$  и  $x_{k+1} = b$  введены в ряд (25) дополнительно для единообразного описания всех подынтервалов  $(x_{i-1}, x_i)$ ,  $1 \leq i \leq k+1$ , интервала  $(a, b)$  (значения  $z_0$  и  $z_{k+1}$  не определены). Коэффициент  $r$  из (21), (22), (23) – параметр метода,  $r > 1$ .

Таким образом, рассматриваемый обобщенный подход к проектированию алгоритмов синтеза регулятора непрерывной автоматической системы с прямым адаптивным управлением и заданной эталонной моделью, приводит к созданию адаптивных алгоритмов управления, основанных на решении оптимизационных задач.

Рассмотрим алгоритмы синтеза адаптивной системы управления с эталонной моделью на основе весовых функций. Пусть известный линейный объект с одним входом и одним выходом описывается с помощью уравнений:

$$dx(t)/dt = Ax(t) + bu(t), \quad (26)$$

$$y = c^T x(t). \quad (27)$$

где  $x(t) \in R^n$ ,  $u(t) \in R$  и  $y(t) \in R$  – состояние, вход и выход объекта, соответственно, а  $n$  – степень объекта.

В результате рекурсивного дифференцирования (27) и подстановки результата в (26) получим:

$$s^i y(t) = c^T A^i x(t), \quad i: 1 \sim m-1, \quad s^m y(t) = c^T A^m x(t) + c^T A^{m-1} bu(t).$$

Пусть  $q(s)$  будет нормированным устойчивым полиномом:

$$q(s) = s^m + q_{m-1}s^{m-1} + \dots + q_0, \quad q(s)y(t) = f^T x(t) + k_0 u(t), \quad \text{где } f^T = c^T q(A), \quad k_0 = c^T A^{m-1} b.$$

Инверсную систему можно описать как:

$$u(t) = k \{-f^T x(t) + q(s)y(t)\}, \quad (28)$$

где  $k = k_0^{-1}$ .

Эталонную модель определим, как:  $y_m(t) = q^{-1}(s)r_m(t)$ , где  $r_m(t)$  и  $y_m(t)$  – эталонные вход и выход, соответственно.

Решение дифференциального уравнения (26) можно представить в виде:

$$x(t-h) = \exp\{-Ah\}x(t) + \int_t^{t-h} \exp\{A(t-h-\sigma)\}bu(\sigma)d\sigma. \quad (29)$$

С помощью умножения на  $c^T$ , выражение (29) можно переписать как:

$$y(t-h) = c^T \exp\{-Ah\}x(t) + \int_t^{t-h} c^T \exp\{A(t-h-\sigma)\}bu(\sigma)d\sigma.$$

При наличии наблюдателя инверсную систему можно описать как:

$$u(t) = \int_0^L \{w_1(\tau)u(t-\tau) + w_2(\tau)y(t-\tau)\}d\tau + kq(s)y(t), \quad (30)$$

где  $w_i(\tau) = -kf^T v_i(\tau)$  ( $i=1,2$ ).

Если параметры объекта  $(A, b, c^T)$  неизвестны, весовые функции  $w_1(\tau), w_2(\tau)$  и параметр  $k$  необходимо оценить, а управляющий вход  $u(t)$  можно сформировать с использованием выражения:

$$u(t) = \int_0^L \{\hat{w}_1(\tau)u(t-\tau) + \hat{w}_2(\tau)y(t-\tau)\}d\tau + \hat{k}r_m(t), \quad (31)$$

где  $\hat{w}_1(\tau), \hat{w}_2(\tau)$  и  $\hat{k}$  оценки  $w_1(\tau), w_2(\tau)$  и  $k$ , соответственно.

Ошибку идентификации можно представить в виде:

$$\varepsilon(t) = \int_0^L [\{\hat{w}_1(\tau) - w_1(\tau)\}\xi_1(t-\tau) + \{\hat{w}_2(\tau) - w_2(\tau)\}\xi_2(t-\tau)]d\tau + (\hat{k} - k)y(t).$$

Кроме того, можно показать, что ошибка выхода сходится к нулю

$$e(t) = y(t) - y_m(t).$$

Из (30) и (31) ошибку выхода  $e(t)$  можно представить как

$$\hat{k}q(s)e(t) = \int_0^L [\{\hat{w}_1(\tau) - w_1(\tau)\}u(t-\tau) + \{\hat{w}_2(\tau) - w_2(\tau)\}y(t-\tau)]d\tau + (\hat{k} - k)q(s)y(t). \quad (32)$$

Когда  $\hat{w}_i(\tau)$  ( $i=1,2$ ) и  $\hat{k}$  сходятся к любому положению равновесия, выражение (32) приводится к виду  $\hat{k}e(t) = \varepsilon(t)$ . Так как  $\varepsilon(t)$  сходится к нулю, то  $e(t)$  сходится к нулю при условии, что  $\hat{k}$  ненулевая.

Таким образом, рассматриваемый подход позволяет повысить точность адаптивной системы с эталонной моделью и обеспечить ее устойчивость.

В главе также рассмотрена модификация контура самонастройки коэффициентов адаптивного регулятора для систем управления в классе одноканальных объектов с ограничением по входу.

Четвертая глава диссертации «**Разработка алгоритмов адаптивного управления с эталонной моделью для динамических объектов с запаздыванием**» посвящена разработке алгоритмов управления объектами с запаздыванием по управлению, состоянию и нейтрального типа.

Передаточную функцию управляемой системы запишем в виде:

$$W_0(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = c_p^T (sI - A_p)^{-1} b_p e^{-\tau s} = k_p \frac{B_0(s)e^{-\tau s}}{A_0(s)}, \quad (33)$$

$$A_0(s) = s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s^1 + a_0, \quad B_0(s) = s^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_1s^1 + b_0,$$

где  $n, m$  – порядки полиномов ( $m < n$ );  $a_i$  ( $i = \overline{0, n-1}$ ),  $b_j$  ( $j = \overline{0, m-1}$ ) – неизвестные коэффициенты полиномов;  $k_p$  – неизвестный коэффициент усиления объекта на высоких частотах.

Передаточная функция эталонной модели  $W_m(s)$  определится выражением:

$$W_m(s) = \frac{y_m(s)}{r(s)} = c_m^T (sI - A_m)^{-1} b_m e^{-\tau s} = k_m \frac{Z(s)e^{-\tau s}}{P(s)},$$

где  $r \in \mathbb{R}$  – задающий сигнал.

Целевое условие имеет вид:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [e(t) = y(t) - y_m(t)] = 0. \quad (34)$$

Неизменные коэффициенты  $\gamma_j, \alpha_i, \beta_i$  ( $j = \overline{0, N}, i = \overline{1, m}$ ) – определяются через параметры  $a_i$  ( $i = \overline{0, n-1}$ ),  $b_j$  ( $j = \overline{0, m-1}$ ),  $\lambda_k$  ( $k = \overline{1, m}$ )).

При управлении выбрать в виде:

$$u(s) = \frac{1}{k_p} \left[ \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{s + \lambda_i} e^{s\tau} y_m(s) - \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{s + \lambda_i} u(s) \right] + \frac{1}{k_p} \left[ 1 - \left( \eta_0 + \sum_{i=1}^N \frac{\eta_i}{s + \delta_i} \right) \frac{k_I T}{T s + 1} \right] u_r(s), \quad (35)$$

уравнение регулятора (35) приобретает следующий вид:  $u(s) = \frac{1}{k_p} \frac{A_0(s)}{B_0(s)R(s)} u_r(s)$ .

Закон адаптивного управления зададим в виде:

$$u(t) = \Theta^T \Omega_{mpr}(t), \quad (36)$$

где  $\Theta \in R^{(n+m+1)}$  – вектор настраиваемых параметров.

Пусть  $E_f = X_f - X_{fm}$  и  $e = y - y_m$ , тогда получим уравнение для ошибки:

$$\dot{E}_f(t) = A_{cf} E_f + B_u [u(t - \tau) - \Theta^{*T} \Omega_{mpr}(t - \tau)], \quad e(t) = C_f^T E_f(t). \quad (37)$$

Уравнение для ошибки  $e(t)$  с учетом (37) и (36) примет вид:

$$\dot{E}_{f1}(t) = A_{11} E_{f1}(t) + \hat{B}_{u1} \frac{1}{\rho} [\Theta(t - \tau) - \Theta^{*T}] \Omega_{mpr}(t - \tau), \quad e(t) = C_{f1}^T E_{f1}(t), \quad (38)$$

где  $\hat{B}_{u1} = \hat{B}_{u1\rho}$ .

Для поиска алгоритма адаптации настраиваемых параметров  $\Theta(t)$  и  $\psi(t)$  воспользуемся прямым методом Ляпунова. Тогда полная производная по времени от функции Ляпунова с учетом

$$A_{11}^T P + P A_{11} = -2Q, \quad P \hat{B}_{u1} = C_{f1},$$

примет вид:

$$\dot{V}(t) = -E_a^T(t) Q E_a(t) < 0. \quad (39)$$

Из выполнения условий (39) следует выполнение промежуточной цели функционирования системы:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Theta(t) = \Theta^\circ, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \psi(t) = \psi^\circ,$$

где  $\Theta^\circ, \psi^\circ$  – постоянный вектор и число. Если сигнал  $r(t)$  такой, что объект идентифицируем, тогда  $\Theta^\circ = \Theta^*$  и, в соответствии с (38), получим выполнение исходной цели функционирования системы (34).

В пятой главе «**Применение разработанных методов и алгоритмов адаптивного управления технологическими объектами**» приводятся результаты применения разработанных методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления технологическими процессами производства формалина.

На основании предварительного изучения и формализации рассматриваемого процесса с точки зрения задач управления выявлено, что основными показателями, характеризующими процесс получения формалина, являются следующие переменные: управляющие параметры  $\mathcal{U} = (u_1, u_2)$ , где  $u_1$  – расход охлаждающей воды,  $u_2$  – температура термолана на входе в контактный аппарат; выходные параметры  $\mathcal{Y} = (y_1, y_2)$ , где  $y_1$  – выход формалина с заданным содержанием формальдегида и метанола,  $y_2$  – температура формалина в барботажном холодильнике; возмущающие воздействия  $\mathcal{W} = (w_1, w_2, w_3)$ , где  $w_1$  – колебание состава сырья,  $w_2$  – снижение

активности и селективности катализатора,  $w_3$  – энтальпия теплоносителя и теплотери. При этом конечной целью управления является получение заданного количества формалина с содержанием  $37 \pm 0,5\%$  вес. формальдегида.

Ниже приведены динамические характеристики процесса получения формалина по основным каналам передачи воздействий на основе экспериментальных методов исследования, которые адекватно описываются процесс в области экспериментирования:

1.  $u_1 \rightarrow y_1$ :  $(192p^2 + 63,8p + 1)y_1(t) = 0,021u_1(t)$ ;
2.  $u_1 \rightarrow y_2$ :  $(211,2p^2 + 72,5p + 1)y_2(t) = (0,005p + 1)u_1(t)$ ;
3.  $u_2 \rightarrow y_1$ :  $(131p^2 + 28p + 1)y_1(t) = (0,017p + 1)u_2(t)$ ;
4.  $u_2 \rightarrow y_2$ :  $(148,9p^2 + 67,4p + 1)y_2(t) = 0,0035u_2(t)$ .

Анализ полученных динамических моделей показывает, что наиболее значимым каналом рассматриваемого объекта является канал  $u_2 \rightarrow y_1$  «температура термолана на входе в контактный аппарат – выход формалина с заданным содержанием формальдегида и метанола». Это обусловлено тем, что этот канал обладает наибольшим коэффициентом усиления и наименьшей инерционностью. По этой причине синтез системы управления процессом получения формалина будем производить на основе управляющего параметра – температура термолана на входе в контактный аппарат.

Функциональная схема адаптивной системы с эталонными моделями изображена на рис. 1. Основной контур системы включает регулятор с передаточными функциями  $W_1(p, \hat{b}_1)$  и  $W_2(p, \hat{b}_2)$  ( $p = d/dt$  - оператор дифференцирования) с фиксированной структурой и настраиваемыми параметрами  $\hat{b}_1$  и  $\hat{b}_2$ . Объект регулирования задан передаточной функцией с параметрами  $e \in Q_i$  изменяющейся неконтролируемым образом.

Произведем расчет адаптивной системы прямого действия для рассматриваемого объекта по каналу  $u_2 \rightarrow y_1$ :

$$(p^2 + a_1p + a_0)y_2(t) = (b_1p + b_0)u_1(t), \quad pu_1(t) = k_0\varepsilon(t).$$

Коэффициент передачи интегрирующего сервопривода (исполнительного устройства)  $0,1 \leq k_0 \leq 2,0$ . Переменные  $y, u$  измеряются. Эталонная модель описывается дифференциальным уравнением второго порядка со значениями коэффициентов  $a_1^M = 1,5$ ;  $a_0^M = 1,0$ ;  $b_1^M = 0,05$ ;  $b_0^M = 1,0$ . Передаточные функции регулятора в основном контуре (рис.1б) соответствуют ПИ-регулятору и  $W_2(p, \hat{b}_2) = 1$ ;  $W_1(p, \hat{b}_1) = k = \text{var}$ . Адаптация осуществляется путем настройки коэффициента  $\hat{b}_1 = k$ , достаточность этого способа следует из выражения для обобщенной ошибки адаптивного управления  $\sigma(t)$ , принятой при моделировании в виде  $\sigma(t) \equiv [(a_1 + kb_1)p + (a_0 + kb_0)]e(t)$ .



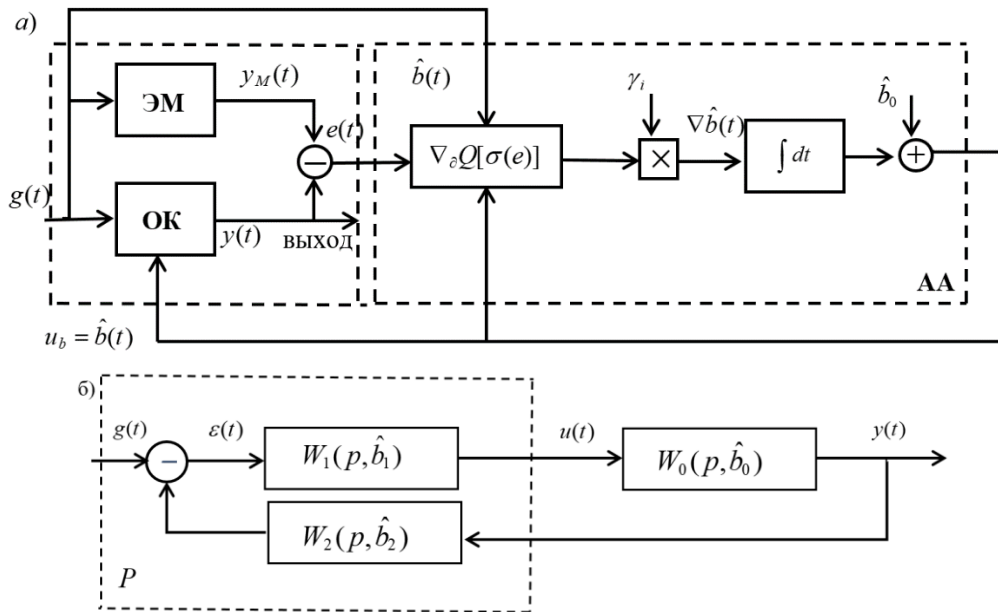


Рис 1. Функциональная схема адаптивной системы с эталонными моделями:  
 а – структурная схема блока алгоритмов адаптации;  
 б – структурная схема основного контура.

Алгоритм настройки  $\dot{\hat{b}}(t) = -\Gamma \sigma \epsilon(b^*, \hat{b}(t), t) (\partial \sigma / \partial \hat{b})$  коэффициента  $k(t)$  в адаптивном регуляторе (рис. 1, а) моделируемой схемы принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{k}(t) &= \gamma \left[ (a_1^M + kb_1) \dot{\epsilon}(t) p + (a_0^M + kb_0) \epsilon(t) \right] \frac{\partial \sigma(t)}{\partial k} = \\ &= \gamma \left[ (1,5 + kb_1) \dot{\epsilon}(t) p + (1 + kb_0) \epsilon(t) \right] [b_1 \dot{\epsilon}(t) + b_0 \epsilon(t)], \quad \gamma > 0; k(0) = 1. \end{aligned}$$

Зависимости процессов в адаптивной системе с явной эталонной моделью изображены на рис. 2.

Из него следует, что принцип действия эталонной модели обеспечивает достижение поставленной цели управления при неконтролируемых изменениях параметров объекта в довольно значительном диапазоне. Непосредственно из рис. 2, а можно подсчитать, что диапазону изменяемых коэффициентов  $a_0, a_1$  соответствуют изменения времени от значений 3,85 и 0,085 с до 25,0 и 0,14 с соответственно. При ненастраиваемом коэффициенте  $k(t)$  ( $\gamma = 0$ ) ошибки существенно больше, чем в адаптивной системе. При моделировании коэффициент  $\gamma > 0$  выбирался произвольно. Однако для достижения желаемого качества переходных процессов этот выбор должен быть подчинен необходимым условиям. Например, путем выбора оптимального значения  $\gamma > 0$  затухание обобщенной ошибки  $\sigma(t)$  может иметь экспоненциальный характер. Решение этой задачи составляет суть оптимизации в адаптивных системах.

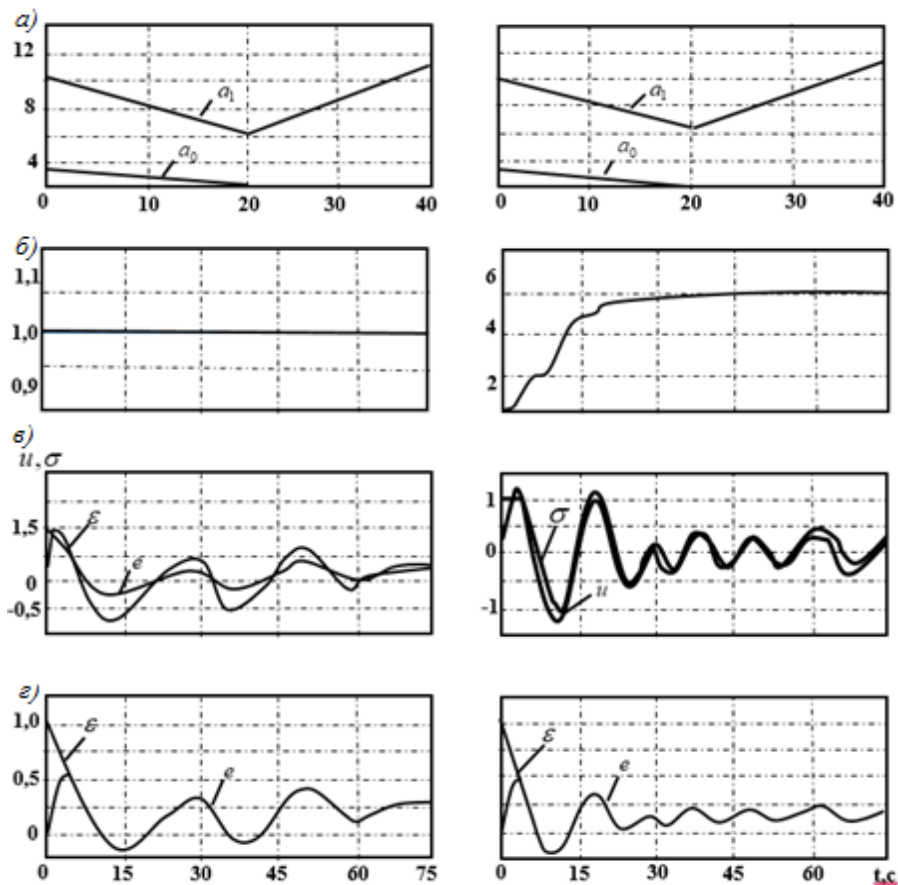


Рис. 2. Процессы, происходящие в адаптивной системе, содержащей явную эталонную модель (рис. 1) с отключенным ( $y = 0$ ) и включенным ( $y = 1,1$ ) контуром самонастройки коэффициента пропорциональности ( $k$ ) регулятора в основном контуре: *a*) – изменение коэффициентов  $a_0, a_1$ ; *б*) – настройка коэффициента пропорциональности  $k$ ; *в*) – изменение управляющего воздействия ( $u$ ) и обобщенной ошибки адаптивного управления ( $\sigma$ ); *з*) – изменения функций ошибок регулирования в основном контуре ( $\varepsilon$ ) и ошибки адаптации ( $e$ ).

Рассмотрим задачу синтеза адаптивной системы с неявной эталонной моделью основного контура с теми же параметрами. Эталонная модель задана уравнением  $(p^2 + a_1^M p + a_0^M) y_M(t) = (b_1^M p + b_0^M) g(t)$ , где все коэффициенты положительные и принадлежат конечному множеству  $\Omega_c$ . Поставим целью адаптивного управления достижение предельного равенства:  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} [y(t) - y_M(t)] = 0$  при воспроизведении входного воздействия  $g(t)$ . Для этого «идеальный» закон регулирования должен удовлетворять уравнению  $(\beta_0 + \beta_1 p)u = (\alpha_0 + \alpha_1 p)y + (b_0 + b_1 p)g$ .

Если параметры уравнения объекта известны, то цель управления достигается выбором параметров «идеального» регулятора  $\beta_0 = b_0$ ;  $\beta_1 = b_1$ ;  $\alpha_0 = a_0^M - a_0$ ;  $\alpha_1 = a_1^M - a_1$  и ошибка  $e(t) \equiv 0$ .

Для случаев, когда текущие значения параметров  $a_0, a_1, b_0, b_1$  неизвестны, параметры уравнения «идеального» регулятора вычисляются в реальном времени, для чего используются текущие измерительные данные  $y, g$  и

алгоритмы адаптации

$$\dot{\hat{b}}_1(t) = -\Gamma \sigma_n(t) \frac{\partial \sigma_n(t)}{\partial \hat{b}_1}. \quad (40)$$

Для квадратичного функционала настройки параметров  $Q = 0,5\sigma_2^2(t)$  обобщенная ошибка адаптивного управления  $\sigma(t)$  вычисляется по формуле:

$$\sigma_2(t) = \sigma(t) = (p^2 + a_1^M p + a_0^M)y(t) - (b_1^M p + b_0^M)g(t).$$

Очевидно, что для вычисления ошибки  $\sigma(t)$  необходимо не только измерение сигналов  $y, g$ , но и вычисление их производных по времени:  $\ddot{y}, \dot{y}, \dot{g}$ . Согласно общему алгоритму (40) настройка параметров в виде «идеального» закона регулирования  $\hat{b}_j = \text{col}(\alpha_0, \alpha_1, \beta_0, \beta_1)$ , причем  $\alpha_0 = a_0^M - a_0$ ;  $\alpha_1 = a_1^M - a_1$ ;  $\beta_0 = b_0$ ;  $\beta_1 = b_1$ , осуществляется по алгоритму  $\dot{\hat{b}}_1 = -\Gamma \sigma(t) \frac{\partial \sigma(t)}{\partial \hat{b}_1}$ , где вычисляется

вектор-столбец  $\frac{\partial \sigma}{\partial \hat{b}_1}$ ,  $\Gamma = \Gamma^T > 0$  матрица размерностью  $(n+m) \times (n+m)$ . Для

этого следует использовать обобщенную ошибку  $\sigma(t)$  в виде:

$$\sigma_n(t) = \left( p^n + \sum_{j=0}^{n-1} a_j^M p^j \right) e(t) = (b_1^* - \hat{b}_1(t))^T z(t), \text{ где эта ошибка явно зависит от}$$

настраиваемых параметров  $\hat{b}_1 = \text{col}(\alpha_0, \alpha_1, \beta_0, \beta_1)$ . Для квадратичного

функционала настройки вектор-столбец  $\frac{\partial \sigma_2}{\partial \hat{b}_1} = -z(t) = \text{col}(-y, -\dot{y}, u, \dot{u})$ . Тогда

алгоритм настройки параметров «идеального» адаптивного регулятора распадается на три билинейных алгоритма:

$$\dot{\alpha}_0(t) = -\gamma_0 \sigma_2(t) y(t); \quad \dot{\alpha}_1(t) = -\gamma_1 \sigma_2(t) \dot{y}(t); \quad \dot{\beta}_0(t) = -\gamma_2 \sigma_2(t) u(t).$$

Из анализа функции Ляпунова в виде:  $V = 0,5 \|b_1^* - \hat{b}_1(t)\|^2 = 0,5 \|\delta(t)\|^2 > 0$  при  $b_1^* \neq \hat{b}_1$ . Производная по времени функция  $V$  вычисляется как:

$$\dot{V}_t = \delta^T \dot{\delta} = \delta^T \hat{b}_1(t) \stackrel{\Gamma=M}{=} -\sigma_n(t) \gamma \delta^T z(t) = -\gamma \sigma_n^2(t), \quad (41)$$

для подобных задач следует, что полученные билинейные алгоритмы сходятся при любых значениях  $\gamma_i > 0$ , однако величина шага  $\gamma_i$  сказывается на скорости и качестве процессов настройки параметров.

Можно упростить схему моделируемой системы, если взамен обобщенной ошибки  $\sigma(t) = \sigma_2(t)$  (индекс указывает на порядок высшей используемой производной сигнала невязки  $e(t)$  в составе  $\sigma(t) = \sigma_2(t)$ ) применить ошибку адаптивного управления  $\sigma_1(t) = (a_1^M p + a_0^M)y - (b_1^M p + b_0^M)g$ , для вычисления которой необходима лишь первая производная невязки  $e(t)$ . Однако при таком упрощении нарушается достаточное условие асимптотической устойчивости (41) по Ляпунову и сходимость алгоритмов адаптации, полученных ранее, уже не обеспечивается при любых значениях  $\gamma_i > 0$ . Но это – задача анализа условий работоспособности АдСУ, здесь она не обсуждается. Зависимости переходных процессов в сигнальных и

параметрических каналах настройки даны на рис. 3.

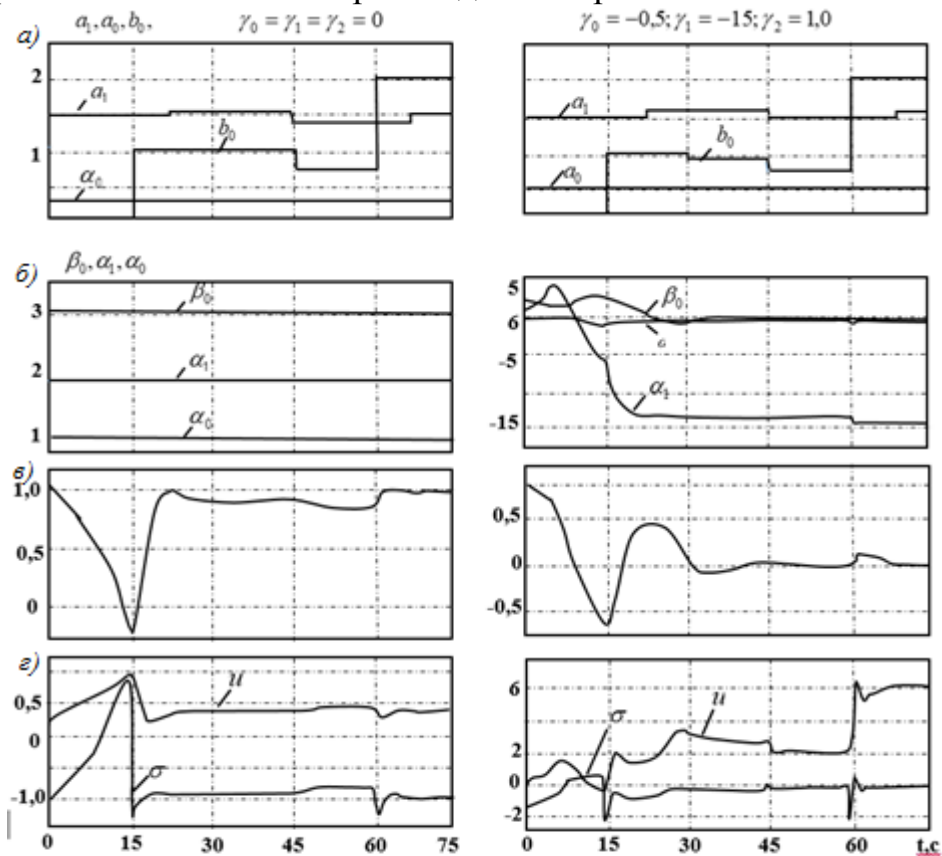


Рис. 3. Процессы, происходящие в адаптивной системе с неявной эталонной моделью при отключенных ( $\gamma_i = 0, i = 1, 2, 3$ ) и включенных каналах самонастройки ( $\gamma_i \neq 0, i = 1, 2, 3$ ); а) – изменение коэффициентов уравнения объекта  $a_0, a_1, b_0$ ; б) – изменение настраиваемых параметров регулятора  $\alpha_0, \alpha_1, \beta_0$  в основном контуре системы; в) – функция ошибки регулирования ( $\epsilon$ ) в основном контуре системы; г) – функция управления ( $u$ ) в основном контуре и обобщенная ошибка адаптивной системы ( $\sigma$ ).

Как видим, параметры  $a_0, a_1$  и  $b_0$  изменяются скачком периодически, с разными периодами для разных параметров: от 15 до 45 с, на случайное значение в заданных пределах; параметр  $b_1 = const$ . Адаптивный регулятор формирует параметрические управляющие воздействия  $u_1 = \hat{b}_1 = col(\alpha_0, \alpha_1, \beta_0)$ ; соответствующие зависимости показаны на рис. 3,б. Кроме того, на рис. 3 для сравнения даны зависимости процессов в системе с разомкнутыми каналами адаптации, когда  $\gamma_i = 0 (i = 1, 2, 3)$ , и с настраиваемыми параметрами регулятора в основном контуре, когда  $\gamma_i \neq 0 (i = 1, 2, 3)$ . Числовые значения  $y$ , указаны на рис. 3. Из сравнения графиков, приведенных для переходных процессов, очевидны более высокие показатели качества адаптивной системы: ошибка регулирования в основном контуре  $\epsilon(t)$  и обобщенная ошибка адаптивной системы  $\sigma(t)$  в результате настройки параметров регулятора достигают нулевых значений, в то время как в неадаптивной системе ( $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_0 = 0$ ) эти же сигналы ошибок существенно отличны от нулевых значений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основе методов системного анализа, теории систем автоматического управления, динамической фильтрации и решения некорректных задач разработана конструктивная методология устойчивого синтеза адаптивных систем управления с эталонными моделями.

В итоге получены следующие научные результаты:

1. Разработаны алгоритмы синтеза управляющего адаптивного наблюдателя, задающего эталонную модель. Предлагаемый алгоритм адаптивного управления с эталонной моделью использует соотношения для подстройки коэффициентов регулятора за счет того, что выражения для подстройки коэффициентов регулятора получаются сразу для замкнутой системы.

2. Приведен алгоритм синтеза асимптотически устойчивого алгоритма адаптивной системы с эталонной моделью прямым методом Ляпунова. Предложенный алгоритм позволяет произвести синтез асимптотически устойчивого алгоритма самонастройки и получить достаточный критерий его устойчивости.

3. Разработаны устойчивые алгоритмы синтеза адаптивных матричных регуляторов на основе рекуррентного псевдообращения матриц. Полученные алгоритмы позволяют реализовать управляющие воздействия в адаптивной системе управления матричным объектом в условиях неопределенности.

4. Разработаны устойчивые алгоритмы оценивания параметров регуляторов на основе анализа коррелированности вектора невязок уравнения динамической фильтрации. Предложенные рекуррентные алгоритмы оценивания параметров управляющих устройств позволяют реализовать задачу оценивания в условиях неточности задания ковариационных матриц шума объекта и помехи измерений.

5. Разработаны алгоритмы устойчивого параметрического синтеза управляющих устройств в адаптивных системах управления с эталонными моделями. Приведенные алгоритмы позволяют регуляризовать рассматриваемую задачу оценивания параметров регулятора и получать устойчивые к априорно неизвестным внешним возмущениям оценки искомых величин.

6. Предложены алгоритмы адаптивного управления с эталонной моделью на основе использования весовых функций. Предлагаемый наблюдатель содержит конечно-временные весовые функции, что позволяет получать оценки вектора состояния без ошибки после интервала наблюдения. Рассмотренный подход позволяет повысить точность адаптивной системы с эталонной моделью и обеспечить ее устойчивость.

7. Предложена модификация контура самонастройки коэффициентов адаптивного регулятора для систем управления в классе одноканальных объектов с ограничением по входу. Разработанный в реальном масштабе времени алгоритм обеспечивает функциональную работоспособность

адаптивной системы с эталонной моделью на основе проверки условий равномерной асимптотической устойчивости движения.

8. Разработаны алгоритмы адаптации для адаптивных систем с эталонной моделью. Предложенные модифицированные физически реализуемые алгоритмы адаптации получены без предположения о квазистационарности режима функционирования объекта и обеспечивают высокую точность управления независимо от интенсивности и спектрального состава входных воздействий.

9. Разработаны алгоритмы управления процессом настройки параметров в системе с упрощенной эталонной моделью. Предложенная схема адаптивного управления для объектов с входным запаздыванием на основе фильтра минимальной сложности позволяет сократить число настраиваемых параметров в адаптивном регуляторе до числа неизвестных коэффициентов в системе и содержит только блоки с сосредоточенным запаздыванием, что упрощает практическую реализацию таких систем.

10. Синтезирована адаптивная система с эталонными моделями для объектов с запаздыванием по состоянию и управлению. Возможность реализации системы управления объектами с запаздыванием по состоянию и управлению достигается за счет использования для компенсации запаздывания и задания желаемой динамики процессов управления – явно-неявного эталонного упреждителя, а для восстановления недоступных измерению переменных пространства состояния – стационарного наблюдателя.

11. Синтезирована адаптивная система управления с эталонными моделями для объектов с запаздыванием нейтрального типа. Полученные алгоритмы для класса априорно неопределенных скалярных объектов с запаздыванием по управлению, функционирующих в условиях действия постоянного, неизвестного и неизмеряемого возмущений, обладают достаточно простой структурой и обеспечивают хорошее качество работы системы управления в целом.

12. На основе предложенных методов и алгоритмов устойчивого синтеза адаптивных систем управления с эталонными моделями разработана адаптивная система управления технологическим процессом производства формалина. В разработанной адаптивной системе управления оцениваются параметры регулятора, т.е. цель адаптации сводится к оценке коэффициентов регулятора, обеспечивающего заданное поведение системы. Используемый подход позволяет обеспечить работоспособность синтезированной адаптивной системы управления при значительной априорной и текущей неопределенности параметров объекта и внешней среды. Полученные результаты и анализ переходных процессов на основе моделирования системы управления показали, что при адаптивном управлении массовые доли формальдегида и метанола в формалине удерживаются в пределах  $36,7 \div 37,2\%$  и  $0,8 \div 1\%$  соответственно, при этом удельный расход метанола уменьшается на  $2,5 \div 3,5\%$ , что позволяет проводить процесс в режиме, близком к оптимальному.

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

---

**NAVOI STATE MINING INSTITUT  
TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

**BOTIROV TULKIN VAFOKULOVICH**

**METHODS AND ALGORITHMS FOR SUSTAINABLE SYNTHESIS OF  
ADAPTIVE CONTROL SYSTEMS WITH REFERENCE MODELS**

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

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

**Tashkent – 2020**

**The theme of doctoral (DSc) dissertation is registered at the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2017.3.DSc/T342.**

The dissertation was completed at the Navoiy State Mining Institute and the Tashkent State Technical University.

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

**Scientific consultant:**

**Igamberdiev Khusan Zakirovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician

**Official opponents:**

**Yusupbekov Azizbek Nodirbekovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor

**Kaipbergenov Batirbek Tulepbergenovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor

**Nurmukhamedov Tolaniddin Ramziddinovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor

**Leading organization:**

**Samarkand state university**

Defense of dissertation will take place in «24» 11 2020 at 10<sup>00</sup> o'clock at a meeting of the scientific council DSc.03/30.12.2019.T.03.02 at the Tashkent state technical university (Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: (99871) 246-46-00; fax: (99871) 227-10-32; e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz)).

The doctoral dissertation could be reviewed at the Information-resource center of Tashkent state technical university (registration number 171). Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: (99871) 246-03-41.

Abstract of the dissertation distributed «13» 11 2020 year.  
(mailing report № 27, on «7» 11 2020 year).



**N.R.Yusupbekov**

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

**U.F.Mamirov**

Scientific Secretary of Scientific Council,  
on awarding scientific degrees,  
PhD in technical sciences

**J.U.Sevinov**

Vice-chairman of the Academic Seminar  
under the Scientific Council on awarding scientific degrees,  
Doctor of Technical Sciences, associative professor



## INTRODUCTION (abstract of DSc thesis)

**The aim of the research** is to develop methods and algorithms for sustainable synthesis of adaptive control systems with reference models.

**The object of the research** is adaptive control systems with reference models.

**The scientific novelty** of the dissertation research is as follows:

asymptotically stable synthesis algorithms for an adaptive control system with a reference model by the direct Lyapunov method have been developed;

algorithms for the synthesis of adaptive matrix controllers with an implicit reference model based on the polynomial approach have been developed;

algorithms for stable adaptive control with a reference model under external disturbances have been developed;

algorithms for stable parametric synthesis of control devices in adaptive control systems with reference models have been developed;

algorithms for the synthesis of an adaptive control system with reference models based on numerical optimization methods have been developed;

algorithms for the synthesis of controller parameters based on the estimation of the state vector in adaptive control systems with a reference model have been developed;

an adaptive system with reference models for objects with state and control delay has been synthesized.

**Implementation of research results.** Based on the obtained scientific results of the synthesis of adaptive control systems for dynamic objects based on the concepts of the direct approach:

the developed algorithms for stable parametric synthesis of control devices in adaptive control systems with reference models were introduced at JSC Navoiyazot (Reference of JSC “O‘zkimyosanoat” No. 24-3246 dated August 11, 2020). Algorithms make it possible to implement the estimation problem in the case of inadequacy in a certain sense between the real system and its mathematical description.

the developed algorithms for stable adaptive control with a reference model under external disturbances were introduced at JSC Navoiyazot (Reference of JSC “O‘zkimyosanoat” No. 24-3246 dated August 11, 2020). The algorithms presented make it possible to regularize the considered problem of estimating the parameters of the controller and to obtain estimates of the required quantities that are stable against a priori unknown external disturbances.

the developed control algorithms for the process of adjusting the parameters in the system with a simplified reference model have been implemented at JSC Navoiyazot (Reference of JSC “O‘zkimyosanoat” No. 24-3246 dated August 11, 2020). The proposed scheme allows one to reduce the number of tunable parameters in the adaptive controller to the number of unknown coefficients in the system and contains only blocks with lumped delay, which simplifies the practical implementation of such systems;

the developed algorithms for the synthesis of controller parameters based on the estimation of the state vector in adaptive control systems with reference models

were introduced at JSC Navoiyazot (Reference of JSC “O‘zkimyosanoat” No. 24-3246 dated August 11, 2020). The results obtained make it possible to stabilize the technological modes of the process and increase the efficiency of its functioning.

**The structure and scope of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, five chapters, conclusion, references and appendices. The volume of the dissertation is 184 pages.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим (Часть I; Part I)**

1. Ботиров Т.В. Адаптивные системы управления и их применение // Монография, – Т.: Иктисодиёт дунёси, 2020. – 149 с. ISBN 978-9943-6263-9-3
2. Зарипов О.О., Ботиров Т.В. Регулярные алгоритмы оценивания параметров регуляторов в адаптивных системах управления с эталонными моделями // Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2013, – №4. -С. 75-78. (05.00.00; №12)
3. Зарипов О.О., Ботиров Т.В. Алгоритмы устойчивого оценивания состояния и параметров технологических объектов управления // Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2015, – №5. -С. 93-96. (05.00.00; №12)
4. Севинов Ж.У., Ботиров Т.В. Устойчивое оценивание параметров регулятора в системах адаптивного управления технологическими объектами // Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2016, – №4. -С. 75-78. (05.00.00; №12)
5. Botirov T.V. Recurrent Algorithms for Estimating the Parameters of Regulators under Uncertain Input Perturbations in Adaptive Control // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology (website: www.ijarset.com, ISSN: 2350-0328, India), Vol. 6, Issue 5, May 2019. – pp9047-9052. (05.00.00; №8)
6. Игамбердиев Х.З., Ботиров Т.В. Латипов Ш.Б., Бобоев А.А. Алгоритмы синтеза параметров регуляторов на основе оценивания вектора состояния в адаптивных системах управления с эталонными моделями // «Развитие науки и технологии» научно – технический журнал. Бухара, 2019, №5. – С.227-232. (05.00.00; №24)
7. Botirov T.V. Algorithms for regular parametric synthesis of control devices in adaptive control systems // International scientific and technical journal «Chemical Technology. Control and Management». №6(90), 2019 pp. 50-56. (05.00.00; №12)
8. Botirov T.V., Buranov B.M, Latipov Sh.B., Arziyev E, Shermurodova M. Analysis of the Stability of Control Systems of Technological Objects Based on the Concepts of the Interval Representation of Basic Data // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology (website: www.ijarset.com, ISSN: 2350-0328, India), Vol. 6, Issue 12, Dec 2019. – pp 12139-12145. (05.00.00; №8)
9. Botirov T.V., Buranov B.M, Latipov Sh.B. About one synthesis method for adaptive control systems with reference models // Journal of Physics: Conference Series. 1515(2), 2020, doi:10.1088/1742-6596/1515/2/022078 (3, Scopus)
10. Юсупбеков Н.Р., Ботиров Т.В., Латипов Ш.Б. Вазн функцияларидан фойдаланиш асосидаги эталон модели адаптив бошқариш алгоритмлари //

“Фан ва технологиялар тараққиёти” илмий-техникавий журнал. Бухоро, 2020, №2. – Б.120-124. (05.00.00; №24)

11. Igamberdiyev H.Z., Botirov T.V. Algorithms for the synthesis of adaptive control systems with a reference model for objects with an input delay based on a simple filter // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology (website: www.ijarset.com, ISSN: 2350-0328, India), Vol. 7, Issue 6, June 2020. – pp 14225-14230. (05.00.00; №8)

12. Botirov T.V., Buranov B.M, Latipov Sh.B. Barakayev Methods for synthesizing adaptive control with reference models using adaptive observers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 862(5), 2020, doi:10.1088/1757-899X/862/5/052012, (3, Scopus)

13. Botirov T.V. Procedure formalization for constructing an adaptive control system with a reference model based on the Lyapunov function // International scientific and technical journal «Chemical Technology. Control and Management». (ISSN 1815-4840) №3(93), 2020 pp. 45-48. (05.00.00; №12)

14. Igamberdiyev H.Z., Botirov T.V., Mamirov U.F. Synthesis of Adaptive Matrix Regulators with an Implicit Reference Model Based on the Polynomial Approach // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology (website: www.ijarset.com, ISSN: 2350-0328, India), Vol. 7, Issue 10, Oct. 2020. – pp 15249-15255. (05.00.00; №8)

## II бўлим (Часть II; Part II)

15. Ботиров Т.В. Алгоритмы регулярного параметрического синтеза управляющих устройств в адаптивных системах управления // Республиканская научно-техническая конференция «Перспективы развития техники и технологии и достижения горно-металлургической отрасли за годы независимости Республики Узбекистан», Навои, 12-14 мая 2011г. – с. 322-323.

16. Ботиров Т.В. Сатторов О.У., Атауллаев А.О. Рандомизированные алгоритмы синтеза управляющих устройств на основе линейного предсказывающего фильтра // Республиканская научно-техническая конференция «Перспективы развития техники и технологии и достижения горно-металлургической отрасли за годы независимости Республики Узбекистан», Навои, 12-14 мая 2011г. – с. 297-298.

17. Botirov T.V., Gulmatov Z.M. Synthesis algorithms of governor in systems of the direct adaptive control on the basis of the regularization method // Seventh World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation “WCIS- 2012”. Tashkent, Volume II, 2012. -pp.184-187.

18. Ботиров Т.В. Сатторов О.У., Саломова С.И. Задачи и алгоритмы синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами // Республиканская научно-техническая конференция «ISTIQLOL» «Современные технологии и инновации горно-металлургической отрасли» Навои, 14-15 мая 2012г.-с.229-230.

19. Ботиров Т.В. Гулматов З. Алгоритмы регулярного параметрического синтеза регуляторов в адаптивных системах управления// Республиканская научно-техническая конференция «ISTIQLOL» «Современные технологии и

инновации горно-металлургической отрасли» Навои, 14-15 мая 2012г.-с.237-238.

20. Игамбердиев Х.З., Ботиров Т.В., Ханкельдиева З.Х. Алгоритмы регулярного параметрического синтеза управляющих устройств в адаптивных системах управления с эталонными моделями // Международная научно-техническая конференция «Современные техника и технологии горно-металлургической отрасли и пути их развития», Навои, Узбекистан 14-16 мая 2013г. – с.469.

21. Botirov T.V., Khankeldieva Z.H., Mamirov U.F. Disturbing influences and interference // Eighth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation “WCIS- 2014”. Tashkent, 2014, November, 28-29.

22. Ботиров Т.В., Ханкельдиева З.Х. Алгоритмы устойчивого оценивания параметров регуляторов в адаптивных системах управления с эталонными моделями // Республиканская научно-техническая конференция «Перспективы науки и производства химической технологии в Узбекистане», Навои, Узбекистан 23-24 мая 2014г. – с.218-219.

23. Ботиров Т.В. Разработка структурной схемы адаптивной системы управления технологическим процессом получения формалина // «Фан, таълим ва ишлаб чиқариш интеграциясида ахборот-коммуникация технологияларини қўллашнинг ҳозирги замон масалалари» Республика илмий-техник анжуманининг маърузалар тўплами., 15 апрель, Нукус-2015. с.233-237.

24. Zaripov O.O., Botirov T.V. Steady state estimation algorithms and parameters of technological facilities management // Ninth World Conference «Intelligent Systems for Industrial Automation» WCIS – 2016. October 25-27, 2016. Tashkent, Uzbekistan.

25. Ботиров Т.В., Зарипов О.О. Системы адаптивного управления основными процессами обогащения угля // IX Республиканская научно-техническая конференция «Горно-металлургический комплекс: достижения, проблемы и перспективы инновационного развития». НавГГИ, Узбекистан. 15-16 ноября 2016 г. – С.449-450.

26. Игамбердиев Х.З., Ботиров Т.В., Ханкельдиева З.Х. Регулярные алгоритмы синтеза управляющих устройств в системах прямого адаптивного управления // Материалы IX Международной научно-технической конференции: «Достижения, проблемы и современные тенденции развития горно-металлургического комплекса». Навоий. 12-14 июня, 2017. –С.476.

27. Ботиров Т.В., Исмоилов Э.У., Рахмонова Х.З. Формализация задач синтеза систем управления технологическими процессами в условиях интервально-параметрической неопределенности // V Международной научно-практической Конференции «Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации», Россия, г Пенза. 20 февраля 2019 г., с.38-41.

28. Ботиров Т.В., Латипов Ш.Б, Баракаев А.М., Намозов Н. Синтез интервальных управляющих устройств в адаптивных системах управления с эталонной моделью // IX Международная научно-техническая конференция

«Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений», Россия, г. Екатеринбург., 6-7 апреля 2020 г., с.231-234

29. Эшмуродов З.О., Ботиров Т.В., Омонов Р. Программа для автоматического контроля температурных параметров установок энергоблоков ТЭС. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. DGU 03594, 15.03.2016.

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

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

32. Ботиров Т.В., Бобоев А.А., Махмудов Г.Б., Назарова Ф.С., Равшанова М.О. Программное обеспечение для оценки эффективности синтеза интервального регулятора для управления технологическими процессами в адаптивных системах управления. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. DGU 07065, 14.06.2019.

33. Ботиров Т.В., Базорова С.Дж., Самадов А., Арзиев Э, Латипов Ш.Б., Рахмонова Х.З. Программное обеспечение для управления технологическими процессами синтеза формальдегида в адаптивных системах управления. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. DGU 07344, 07.11.2019.

34. Игамбердиев Х.З., Ботиров Т.В. Программа для устойчивого синтеза регуляторов в адаптивных системах управления с эталонной моделью при внешних возмущениях. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. DGU 08705, 16.06.2020.

Автореферат “Техника фанлари ва инноциялар” илмий журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди ҳамда ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларини мослиги текширилди.

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

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