

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

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**КАРИМОВ ДАВРОН РАХМАТОВИЧ**

**КЕЧИКИШЛИ ТЕХНОЛОГИК ОБЪЕКТЛАРНИНГ**  
**АДАПТИВ БОШҚАРИШ СИСТЕМАЛАРИНИ**  
**СИНТЕЗЛАШ АЛГОРИТМЛАРИ**

**05.01.08 - Технологик жараёнлар ва ишлаб чиқаришларни автоматлаштириш**  
**ва бошқариш (техника фанлари)**

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

**Тошкент– 2020**

**Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)**

**Content of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)**

**Каримов Даврон Рахматович**

Кечикишли технологик объектларнинг адаптив бошқариш системаларини синтезлаш алгоритмлари.....3

**Каримов Даврон Рахматович**

Алгоритмы синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами с запаздыванием .....21

**Karimov Davron Rakhmatovich**

Algorithms for synthesis of the adaptive controlling the lagged (delayed) technological objects.....39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works .....42

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

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**КАРИМОВ ДАВРОН РАХМАТОВИЧ**

**КЕЧИКИШЛИ ТЕХНОЛОГИК ОБЪЕКТЛАРНИНГ  
АДАПТИВ БОШҚАРИШ СИСТЕМАЛАРИНИ  
СИНТЕЗЛАШ АЛГОРИТМЛАРИ**

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

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

**Тошкент– 2020**

**Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида №В2017.3.PhD/Т311 рақам билан рўйхатга олинган.**

Докторлик диссертацияси Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

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

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

**Расмий оппонентлар:** **Гулямов Шухрат Манапович**  
техника фанлари доктори, профессор

**Холматов Давронбек Абдалимович**  
техника фанлари номзоди, доцент

**Етакчи ташкилот:** **Навоний давлат кончилиқ институти**

Диссертация ҳимояси Тошкент давлат техника университети ҳузуридаги DSc.03/30.12.2019.Т.03.02 рақамли Илмий кенгашнинг 2020 йил «14» 10 соат 12<sup>оғ</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@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz)).

Диссертация билан Тошкент давлат техника университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (163 рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100095, Тошкент шаҳри, Университет кўчаси, 2. Тел.: (99871) 246-03-41.

Диссертация автореферати 2020 йил «8» 10 кун тарқатилди.  
(2020 йил «19» 09 даги 22 рақамли реестр баённомаси).



**Н.Р.Юсупбеков**  
Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш раиси,  
техника фанлари доктори, профессор, академик

**У.Ф.Мамиров**  
Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш илмий котиби,  
техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)

**Ж.У.Севинов**  
Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш қошидаги Илмий семинар раиси ўринбосари,  
техника фанлари доктори, доцент

## КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Жаҳонда сўнги йилларда мавжуд технологияларни такомиллаштиришга, ишлаб чиқариш ва технологик агрегатлар қувватини оширишга, ишлаб чиқариш мажмуалари бошқаруви тараққиётига ҳамда оптимал ва адаптив бошқаришга қаратилган замонавий технологияларини яратишга алоҳида эътибор берилмоқда. Кейинги пайтда, тезкорлик билан ривожланаётган турли тармоқларда реал технологик объектларни бошқариш жараёни, юқори даражада сифатли бўлган маҳсулотларни кам энерго ва ресурс харажатларда амалга оширишни таъминлашнинг жиддий ашёвий воситалари сифатида ахборот технологияларини қўллаш жуда долзарб масалалардан бири эканлиги эътироф қилинмоқда. Бу соҳада тадқиқотлар ҳамда ишлаб чиқаришлар самарадорлиги ва маҳсулотлар рақобатдошлигини таъминловчи технологик объектларни бошқариш тизимларини такомиллаштиришга жиддий эътибор берилмоқда.

Жаҳонда турли автоматлаштириш ва бошқарув тизимларини ишлаб чиқиш муҳим масалалар сифатида қайд этилади, шу билан бирга технологик объектлар, замонавий математик усуллар ва ахборот технологиялари учун адаптив бошқарув тизимларини яратиш, уларни такомиллаштиришга, инновацион гоялар ва бошқарув технологияларини жорий этишга катта эътибор қаратилмоқда. Шу билан бир вақтда модел ва алгоритм усулларни ишлаб чиқиш, интеллектуал таҳлил усуллари интеграциялашуви асосида мураккаб объектларни бошқариш моделларини яратиш, алгоритмларни синтезлаш усуллари, алгоритмларини ишлаб чиқиш, бошқариш, ахборотни қайта ишлаш ва бошқарув қарорларини қабул қилиш муҳимдир. Бунга боғлиқ ҳолда кечикишли технологик объектларни адаптив бошқариш тизимларини синтезлаш алгоритмларини такомиллаштириш ва модификациялаш муҳим вазифа ҳисобланади.

Республикамизда бугунги кунда автоматлаштириш ва бошқариш йўналишига, жумладан турли технологик жараёнлар ва ишлаб чиқаришларни автоматлаштириш ва бошқаришда энергия ва ресурс тежамкорликни таъминловчи такомиллаштирилган бошқариш системаларини яратишга алоҳида эътибор қаратилмоқда. 2017–2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан, «... иқтисодиётнинг энергия ва ресурс сарфини қисқартириш, ишлаб чиқаришга энергия тежамкор технологияларни жорий этиш, иқтисодиёт тармоқларидаги меҳнат унумдорлигини ошириш»<sup>1</sup> вазифалари белгилаб берилган. Мазкур вазифаларни амалга ошириш, жумладан, бошқариш жараёнларининг сифат кўрсаткичлари ва аниқлигини оширишга имкон берувчи кечикишли технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини ишлаб чиқиш 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 Фармони ҳамда 2012 йил 21 мартдаги ПҚ–1730-сон «Замонавий ахборот-коммуникация технологияларини янада жорий этиш ва ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги ва 2018 йил 27 апрелдаги ПҚ–3682-сон «Инновацион гоялар, технологиялар ва лойиҳаларни амалиётга жорий қилиш тизимини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

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

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Кечикишли технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлаш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқишга оид илмий-техник адабиётларни таҳлил қилишдан маълум бўлишича, бу соҳада етарлича назарий ва амалий натижаларга эришилган.

Бу соҳанинг ривожланишига кўплаб хорижлик олимлар, жумладан De R. Keyser, Th. Nanayakkara, K. Y. Rama, J. Saridis, P.V. Shankar, J.Y. Dieulot, A.A. Бобцов, Е.Л. Еремин, А.М. Цыкунов, А.А. Пыркин, Н.И. Смирнов, А.И. Репин, А.В. Имангазиева, А.П. Захаров, Л.М. Яковис, В.И. Гостев, Р.Д. Ахметсафин, Р.З. Ахметсафина, А.И. Рубан, О.О. Мухина, А.З. Асанов, В.Н. Фомин, А.Л. Фрадков, И.Б. Фуртат, Я.З. Цыпкин, Ш.Е. Штейнберг ва бошқалар ҳамда мамлакатимиз олимлари, жумладан Б.М. Азимов, Т.Ф. Бекмуратов, Ш.М. Гулямов, И.И. Жуманов, О.О. Зарипов, Х.З. Игамбердиев, М.А. Исмаилов, А.А. Кадыров, Н.З. Камалов, М.М. Камилов, А.Р. Марахимов, И.Х. Сиддиқов, Н.Р. Юсупбеков ва бошқалар ўзларининг улкан ҳиссаларини қўшишган.

Шу билан бирга, илмий тадқиқотлар доирасининг доимий равишда мураккаблашиши ва кенгайиши сабабли кечикишли технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини янги самарали усуллари ва алгоритмларни ишлаб чиқиш талаб этилади. Бундан ташқари, объектларни идентификациялаш ва адаптив бошқариш бўйича тургун алгоритмларни ишлаб чиқиш мақсадга мувофиқ, бу эса кечикишли динамик объектлар учун адаптив бошқариш тизимларини қуриш спектори ва уни амалга ошириш алгоритмик процедураларини кенгайтиради ва уларнинг ишлаш самарадорлигини оширади. Юқоридагилар билан боғлиқ ҳолда кечикишли технологик объектларни адаптив бошқариш тизимини яратиш учун келгусида қатъий суратда самарали алгоритмларни яратиш ва уларни модификациялаш зарур бўлади.

**Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.**

Диссертация тадқиқоти Тошкент давлат техника университети илмий-тадқиқот ишлари режаларининг А-5-42 – «Априор ноаниқлик шароитида технологик объектларни автоматлаштирилган мониторинги ва бошқаришни интеллектуаллаштиришнинг дастурий инструментал воситаси» (2015-2017), ОТ-Ф4-78 – «Идентификацион ёндашув асосида динамик объектларни адаптив бошқариш системалари синтезининг назарий асослари ва мунтазам усуллари ишлаб чиқиш» (2017-2020) мавзуларидаги лойиҳалари доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** кечикишли технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлашнинг тургун алгоритмлари, ҳисоблаш схемаларини ишлаб чиқиш ҳисобланади.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

кечкишли технологик объектларнинг адаптив бошқариш системаларини синтезлаш усул ва алгоритмлари ривожини тизимли таҳлил қилиш;

бошқариш объектларида доимий кечикиш қийматини тургун баҳоловчи алгоритмларни ишлаб чиқиш;

кириш ва чиқиш сигналларини амалга ошириш асосида кечикишли бошқариш объектларини идентификациялаш алгоритмларини ишлаб чиқиш;

кечкишли бошқариш объектларини идентификациялашнинг тургун алгоритмларини ишлаб чиқиш;

кечкишли бошқариш системасини синтезлаш алгоритмларни ишлаб чиқиш;

эталон моделдан фойдаланиб адаптив бошқариш алгоритмларини ишлаб чиқиш;

бошқариш таъсиридаги кечикишли объектлар учун адаптив бошқариш алгоритмларини ишлаб чиқиш;

бошқариш системасини куриш масаласини ечишда ишлаб чиқилган алгоритмлар ва ҳисоблаш схемаларини аниқ технологик объектларда амалий синовдан ўтказиш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида кечикишли технологик объектларни адаптив бошқариш системалари олинган.

**Тадқиқотнинг предмети** кечикишли технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини тургун синтезлаш усуллари ва алгоритмларидан иборат.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Тадқиқот жараёнида тизимли таҳлил, идентификациялаш, баҳолаш, адаптив бошқариш ва нокоррект қўйилган масалаларни ечиш усулларида фойдаланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

алгоритмни хотира кенглигини турли қийматлари учун кириш ва чиқиш сигналларини амалга ошириш асосида кечикишли бошқариш объектларини идентификациялашнинг тургун алгоритмлари ишлаб чиқилган;

мунтазамлашган энг кичик квадратлар усули асосида кечикишли бошқариш объектларини идентификацияловчи тургун, рекуррент, корреляцияли алгоритмлар ишлаб чиқилган;

матрицаларни тургун псевдоўзгартиришнинг Эрмит усулига ва бузилмаган матрицаларга икки томонлама кўпайтиришдан фойдаланиш асосида эталон модели адаптив бошқаришни тургун алгоритмлари ишлаб чиқилган;

минимал псевдотескари матрица ва сингуляр ёйиш усули асосида бошқаришда кечикиш мавжуд бўлган объектларни адаптив бошқаришни тургун алгоритмлари ишлаб чиқилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

кечкишли технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини тургун синтезлаш масалаларини ечишни алгоритм ва дастурлар билан қувватлашга мўлжалланган дастурий модуллар ишлаб чиқилган;

нормал ишлаш шароитида саноат тажрибаси натижалари асосида аммиак селитраси эритмасини буглатиш жараёнларининг математик модели ишлаб чиқилган;

аммиакли селитра эритмасини буглатиш технологик жараёнини автоматлаштириш ва адаптив бошқаришнинг структуравий ва функционал схемалари ишлаб чиқилган;

жараёнларнинг технологик режимларини барқарорлаштириш ва уларнинг самарадорлигини ошириш имконини берадиган аммиакли селитра эритмасини буглатиш технологик жараёнини тегишли техник таъминотли бошқариш тизими таклиф этилган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончилиги.** Тадқиқот натижаларининг ишончилиги услубий жиҳатдан асосланган назарий ҳисоб-китобларни амалга оширилиши; динамик объектларни адаптив бошқаришнинг назарий асосланган мезонларини қўлланилиши; замонавий автоматик бошқариш назариясининг синовдан ўтган усуллари ва алгоритмларини ишлатилиши; адаптив бошқаришнинг таклиф этилган усуллари ва алгоритмларини талаб даражадаги яқинлиги; назарий ва амалий тадқиқот натижалари ва уларнинг ўзаро мувофиқлиги билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти кечикишли технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини тургун синтезловчи конструктив алгоритмларни ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти кечикишли объектларни адаптив бошқариш системаларини тургун синтезлаш масалаларини математик ва алгоритмик таъминотини ишлаб чиқишдан иборат. Ишлаб чиқилган алгоритмлар узлуксиз ишлаб чиқаришли технологик жараёнларни адаптив бошқариш системаларининг функционал структурасини қуришда ва лойиҳалашни автоматлаштириш кенг қўлланилиши билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Кечикишли технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлаш алгоритмлари бўйича олинган илмий натижалар асосида:

матрицаларни тургун псевдоўзгартиришнинг Эрмит усулидан ва бузилмаган матрицаларга икки томонлама кўпайтиришдан фойдаланиш орқали ишлаб чиқилган эталон модели адаптив бошқаришни тургун



алгоритмлари “Навоийазот” АЖДа жорий қилинган (“ЎЗКИМЁСАНОАТ” АЖнинг 2020 йил 30 июндаги 14-2929-сон маълумотномаси). Натижада, ҳолат вектори вақтга боғлиқ ҳолда керакли қонуният билан ўзгариб туради ва системадаги ўзгаришлар эталон ҳаракатларга яқин келишини таъминлашга имкон берган;

минимал псевдотескари матрица ва сингуляр ёйиш усули асосида бошқаришда кечикиш мавжуд бўлган объектларни адаптив бошқаришни тургун алгоритмлари “Навоийазот” АЖДа жорий қилинган (“ЎЗКИМЁСАНОАТ” АЖнинг 2020 йил 30 июндаги 14-2929-сон маълумотномаси). Натижада, аммиак селитра эритмасини буглатиш жараёнларининг технологик режимларини ўтишини барқарорлаштиришга имкон берган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Тадқиқотнинг назарий ва амалий натижалари 5 та халқаро ва 5 та республика илмий-амалий анжуманларида маълумот қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси бўйича жами 17 та илмий иш, шулардан – Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссияси тавсия этган илмий нашрларда 6 та мақола, жумладан, 2 та хорижий ва 4 та республика журналларида нашр этилган. Шунингдек, ЭХМ учун дастурий маҳсулотга рўйхатдан ўтган 1 та гувоҳнома олинган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, диссертация ҳажми 111 бетни ташкил этади, жумладан фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат.

## **ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ**

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

**«Кечикишли технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлаш масалалари ва алгоритмлари»** номли биринчи бобда кечикишли объектлар параметрлари, уларнинг хусусиятлари келтирилган, адаптив бошқариш системаларини синтезлаш усуллари ва алгоритмлари тадқиқот мақсади ва вазифаларининг қўйилиши келтирилган.

Ақсар технологик жараёнлар кечикишлар ва ностационарлик хусусияти билан тавсифланади. Бундай жараёнларни бошқариш системаларини куриш мураккаб. Юзага келадиган қийинчиликларни бартараф этишнинг энг яхши йўли адаптив ёндашишдан фойдаланишдир.

Шундан келиб чиққан ҳолда, кечикишли технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлаш масаласини системали градиациялаш методологияси бу ўринда мувафақиятли бўлади. Бу

методология мунтазам усуллар ва бошқариш объектлар динамикасига оид тескари масалалар концепциясини қўллашга асосланади. Шунинг учун кечикишли динамик системаларнинг ҳолатини мунтазамлаш усуллари билан аниқ ҳисоблашга қаратилган ҳамма имкониятларни кўриб чиқиш ва ноаниқ қўйилган масалаларни ечиш усуллари ва алгоритмларини топиш мақсадга мувофиқ. Юқорида келтирилган фикрларга асосланиб, мазкур диссертация ишининг мақсади кечикишли технологик объектларни адаптив бошқариш системаларини мунтазам синтезлаш алгоритмларини тадқиқ этиш ва ишлаб чиқишни ёритиш ҳамда уларни амалиётда қўллаш деб таърифлаш мумкин.

Диссертациянинг «**Кечикишли динамик объектларни бошқаришда мунтазам идентификациялаш алгоритмларини ишлаб чиқиш**» номли иккинчи бобида динамик системаларда доимий кечикишни баҳолашнинг тургун алгоритмлари, кечикишли бошқариш объектларини кириш ва чиқиш сигналлари асосида идентификацияловчи, кечикишли динамик бошқарув объектларни идентификациялаш, кечикишли чизикли дискрет системаларни кечикишсиз, ҳолат векторлари кенгайтирилган система кўринишида тасвирлаш келтирилган.

Бошқариш масалаларида жуда кўп ҳолларда системанинг кириш ва чиқишларини ўлчаб, объект ва ўлчов параметрлари робастли аниқланадиган масала амалиёт учун муҳимдир. Кечикишли системаларни параметрик идентификациялаш алгоритми келтирилган, бунда кириш ва чиқиш сигналларининг вақтга боғлиқ муносабатлари, динамиканинг тескари масалалар концепциясидан фойдаланиб кўриб чиқамиз.

Қуйидаги чизикли тенгламалар ифодаланган бошқариш объектини кўриб чиқамиз:

$$x(t+1) = a_0 + \sum_{i=1}^{n_1} a_i x(t+1-i) + \sum_{i=n_1+1}^n a_i x(t+1-\tau_1-i) + \sum_{j=1}^m a_{n+j} u(t+1-\tau-j) + \xi(t), \quad t \geq 0 \quad (1)$$

Координаталар- $x$  ва бошқарувлар  $u$  маълум. Бу ерда  $\tau_1, \tau$ - дискрет соф кечикишлар, бошқарувчи таъсир амплитуда бўйича оддий чекловга эга  $u_1 \leq u(t) \leq u_2$ , халақит ҳам чекланган:  $|\xi(t)| \leq \xi_1, a_i (i=0, \dots, n+m)$  – объектнинг номаълум, доимий параметрлари.

Қуйидаги (1) ифодага асосланиб қуйидаги нисбатларни матрица кўринишида ёзамиз ва улардан кечикишли объектни идентификациялашда фойдаланамиз

$$Y(t) = Z(t-1)a(t), \quad (2)$$

бу ерда  $Y(t) = (y^T(t) \dots y^T(t-p+1))^T, Z(t-1) = (z^T(t-1) \dots z^T(t-p))^T,$   
 $z(k) = (1, x(k), \dots, x(k+1-n_1), x(k-\tau_1-n_1), \dots, x(k+1-\tau_1-n), u(k-\tau), \dots, u(k+1-\tau-m)),$   
 $u(k-\tau), \dots, u(k+1-\tau-m)), a^T(t) = (a_0, a_1, \dots, a_{n+m}),$

$p \geq 1$  – идентификациялаш алгоритмида хотира чуқурлиги.

Параметрларнинг орттирмалари вектори  $\Delta a(t) = a(t) - a(t-1)$  ни  $\|e_0(t) - Z(t-1)\Delta a(t)\|^2 = \min, \|\Delta a(t)\|^2 = \min$  меъзон орқали топилади: бу ерда  $e_0(t) = x(t) - Z(t-1)a(t-1), x(t) = (x^T(t) \dots x^T(t-p+1))^T,$  яъни  $\Delta a(t) = Z^+(t-1)(x(t) - Z(t-1)a(t-1)).$

Хотира чуқурлиги  $p$  нинг қийматига боғлиқ  $Z(t-1)$  матрица ортиқча аниқланган, етарлича аниқланмаган ва квадратли бўлиши мумкин. Айтилган ҳолатлар учун (2) тенглама ечимларини қуйидагича аниқлаш мумкин:

$$\Delta a(t) = (Z^T(t-1)Z(t-1))^{\dagger} \cdot Z^T(t-1)(x(t) - Z(t-1)a(t-1)), \quad (3)$$

$$\Delta a(t) = Z^T(t-1)(Z(t-1)Z^T(t-1))^{\dagger} (x(t) - Z(t-1)a(t-1)),$$

$$\Delta a(t) = Z^+(t-1)(x(t) - Z(t-1)a(t-1)). \quad (4)$$

Ифода (4)ни қуйидагича мунтазамлаш мақсадга мувофиқ:

$$\Delta a(t) = (Z^T(t-1)Z(t-1) + aI)^{-1} \cdot Z^T(t-1)(x(t) - Z(t-1)a(t-1)),$$

$$\Delta a(t) = Z^T(t-1)(Z(t-1)Z^T(t-1) + aI)^{-1} (x(t) - Z(t-1)a(t-1)),$$

$$\Delta a(t) = (Z(t-1) + aI)^{-1} (x(t) - Z(t-1)a(t-1)).$$

Мунтазамлаш параметри  $a > 0$  ни квазиоптималлаш ёки квазиуносабатлар орқали аниқлаш мақсадга мувофиқ.

Келтирилган алгоритмлар кечикили бошқариш объектларини кириш ва чиқиш сигналлари орқали тургун идентификациялаш имконини беради.

Фараз қилайлик дискрет, динамик, сигналлари кечикадиган номаълум бошқарув объекти қуйидаги тенглама билан ифодаланади:

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

бу ерда  $A(z^{-1}) = 1 - a_1z^{-1} - \dots - a_naz^{-na}$ ,  $B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_nbz^{-nb}$ , ва  $z^{-1}$  - ортга суриш оператори.

Шунда  $\{u(k), y(k), k=1, \dots, N\}$  ўлчами  $N > \max\{na + nb + 1, d + nb + 1\}$  бўлган дискрет маълумотлар кетма-кетлиги бўлсин. Қуйидаги ифодаларни киритамиз

$$\theta^T = [a^T; b^T] = [a_1, \dots, a_{na}; b_0, b_1, \dots, b_{nb}], \quad \varphi_{k,d}^T = [y_k^T; u_{k,d}^T] = [y(k-1), \dots, y(k-na), \\ u(k-d), u(k-d-1), \dots, u(k-d-nb)].$$

Модель (5) ни қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:  $y(k) = \varphi_{k,d}^T \theta + v(k)$ .

Шунда  $\hat{d}$  параметр  $d$  нинг баҳоси бўлсин. Қуйидаги энг кичик квадратлар меъзонидан фойдаланамиз  $J(\hat{d}) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - \varphi_{k,\hat{d}}^T \theta]^2$ . Меъзонни  $\theta$  бўйича минимизациялаштириб система параметрларини баҳолаш учун қуйидаги ифодани келтириб чиқариш мумкин:

$$A\hat{\theta}_{LS}(\hat{d}) = c, \quad (6)$$

бу ерда  $A = \left[ \sum_{k=1}^N \varphi_{k,\hat{d}} \varphi_{k,\hat{d}}^T \right]$ ,  $c = \left[ \sum_{k=1}^N \varphi_{k,\hat{d}} y(k) \right]$ .

Тенграмалар системаси (6) ёмон шартланган бўлиши мумкин. Бу ҳолат (6) тенграмани ечишда мунтазамлаш усулларида фойдаланишни тақозо этади.

Аппроксимация шартининг  $\|c - \bar{c}\| \leq \delta$ ,  $\|A - \bar{A}\| \leq h$ ,  $\gamma \equiv (\delta, h)$  кўринишни қўллаемиз. Нормал ечимига  $\hat{\theta}_{LS}^0(\hat{d})$  жоиз яқинлашув бўлганда, тенграманинг нормал ечимига  $\hat{\theta}_{LS}^0(\hat{d})$  кўйиш мумкин:  $Q_\gamma$  синфидаги векторлар  $\hat{\theta}_{LS}(\hat{d})$  векторни топиш  $\hat{\theta}_{LS}^\gamma(\hat{d})$ , минималлаштириш функционали  $\Omega[\hat{\theta}_{LS}(\hat{d})] = \|\hat{\theta}_{LS}(\hat{d})\|^2$ , шундай экан

бундай  $\inf_{\hat{\theta}_{LS}(\hat{d}) \in Q_\gamma} \|\hat{\theta}_{LS}(\hat{d})\|^2 = \|\hat{\theta}'_{LS}(\hat{d})\|^2$  векторни топиш  
 $\hat{\theta}'_{LS}(\hat{d}) \in Q_\gamma \equiv \{\hat{\theta}_{LS}(\hat{d}); \|A\hat{\theta}_{LS}(\hat{d}) - c\| \leq 2(h\|\hat{\theta}_{LS}(\hat{d})\| + \delta) + \mu\}$ .

Фараз киламиз,  $d$  соф кечикиш  $0 \leq T_1 \leq d \leq T_2$  ораликда ётади, бунда  $T_1$  ва  $T_2$  маълум. Ўзаро корреляцияли функция  $r_{yu}(\cdot)$  нинг қийматлари дискрет ахборот бўйича ҳисоблаб топилади

$$\hat{r}_{yu}(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y(k)u(k-t), \quad t = T_1 - p, \quad T_1 - p + 1, \dots, T_2 - p. \quad (7)$$

$\hat{d}$  қиймат қуйидаги шартлар асосида топилади:

$$|\hat{r}_{yu}(t)| < \varepsilon, \quad t < \hat{d} - p, \quad |\hat{r}_{yu}(\hat{d} - p)| \gg \max\{|\hat{r}_{yu}(t)|, t = T_1 - p, \dots, \hat{d} - p - 1\}$$

бу ерда  $\varepsilon$  - кичик мусбат сон, тегишли тарзда танланади.

Зарур маълумотлар ҳамиша танлаш учун қуйидаги эмперик қоидадан фойдаланилади  $\Delta T \cdot N > 10T_m$ , бу ерда  $\Delta T$  дискрет оралиги ва  $T_m$  идентификацияланаётган система учун вақтнинг асосий доимийси. Ўз-ўзидан аёнки, идентификациялаш амалидан талаб этилган натижани таъминлаш учун дискрет маълумотлар ҳажми, сигнал-шовқин нисбати ортишига мос ҳолда ортиши керак. Шунда кечикишни баҳолайдиган ва система параметрларини идентификациялаш алгоритмини ишлатиш мумкин. Қуйида (7) формула орқали корреляцияли функцияларни ҳисоблаш учун рекуррентли формулаларни аниқлаш мумкин

$$\hat{r}_{yu}(t, k+1), \quad t = T_1 - p, \quad T_1 - p + 1, \dots, T_2 - p. \quad (8)$$

Қуйидаги шартлардан фойдаланиб  $\hat{d}_{k+1}$  баҳо аниқланади

$$|\hat{r}_{yu}(t, k+1)| < \varepsilon_{k+1}, \quad t < \hat{d}_{k+1} - p, \quad (9)$$

$$|\hat{r}_{yu}(\hat{d}_{k+1} - p, k+1)| \gg \max\{|\hat{r}_{yu}(t, k+1)|, t = T_1 - p, \dots, \hat{d}_{k+1} - p - 1\}, \quad (10)$$

бу ерда  $\{\varepsilon_k\}$  – мусбат доимий кетма-кетлик нолгача монотон камайиб боради.

Кейин қайд этилган  $\hat{d} = \hat{d}_{k+1}$  учун  $\hat{\theta}_{k+1}(\hat{d}_{k+1})$  ҳисобланади, бунда оддий энг кичик квадратлар усулидан фойдаланилади

$$\hat{\theta}_{k+1}(\hat{d}_{k+1}) = \hat{\theta}_k(\hat{d}_k) + P_{k+1} \varphi_{k+1, \hat{d}_{k+1}} [y(k+1) - \varphi_{k+1, \hat{d}_{k+1}}^T \hat{\theta}_k(\hat{d}_k)], \quad (11)$$

$$P_{k+1} = P_k - [1 + \varphi_{k+1, \hat{d}_{k+1}}^T P_k \varphi_{k+1, \hat{d}_{k+1}}]^{-1} P_k \varphi_{k+1, \hat{d}_{k+1}} \varphi_{k+1, \hat{d}_{k+1}}^T P_k. \quad (12)$$

Қадамлар (8)-(12) ҳисоб тугагини аниқлаш учун меъзон бажарилмагунча такрорланаверади.

Келтирилган турғун рекуррент алгоритмлар тасодифий жараёнлар ва ҳалақитлар таъсирида бўлган кечикишли динамик бошқарув объектларини идентификациялаш жараёнининг аниқлигини ошириш имконини беради.

Шунингдек динамик системалардаги доимий кечикиш қийматини турғун баҳолаш ва кечикишли чизикли дискрет системаларни кечикишсиз вектор ҳолатлари кенгайтирилган система кўринишида ифодалайдиган алгоритмлар келтирилган. Келтирилган итерацияли алгоритмлар объектнинг динамикаси тенгламасидаги кечикишлар қийматини ҳисоблаш аниқлигини ва бошқариш жараёнининг сифат кўрсаткичларини ошириш имконини беради.

Диссертациянинг «Кечикишли технологик объектларда адптив бошқариш алгоритмларини ишлаб чиқиш» номли учинчи боби кечикишли объектларни чизикли бошқариш системасини адптив синтезлаш

алгоритмлари, блок импульсли функциядан фойдаланиб кечикишли системаларни оптимал бошқариш, адаптив бошқариш объектларининг эталон модели тургун алгоритмлари, кечикишли объектларни адаптив бошқаришни тургун алгоритмларини ишлаб чиқишга багишланган.

Шундай имкониятлардан бири ноаниқ эталон модели бошқариш системасидан фойдаланиш бўлиб, бошқаришнинг асосий контурига ва ўлчанадиган параметрларига талабларни камайтириш имконини беради. Бундай системаларни лойихалаш анча осон, объектнинг ҳолат векторини тўлиқ ўлчаш шарт эмас. Бундан ташқари, бошқарувчи қурилманинг параметрлари созлангандан кейин ўткинчи жараёнларининг сифати ноаниқ эталон модел ёрдамида аниқланадиган қандайдир эталон ўткинчи жараёнига яқин бўлади.

Бошқариш бўйича кечикишли динамик объектни кўриб чиқамиз, қуйидаги тенгламалар билан ифодаланади:

$$x_{k+1} = A_k \cdot x_k + B_k \cdot u_{k-\tau} + \sigma; \quad u_s = \psi_s, \quad s \in [-\tau, 0]; \quad y_k = C \cdot x_k, \quad (13)$$

бу ерда  $\sigma = a(x_k, \xi_k) \cdot x_k + b(x_k, \xi_k) \cdot u_{k-\tau} + f_k$  – объектнинг эгри чизикли кесими, галаёнлар вектори билан бирга.

Объектни бошқариш қонуни (13) ни қуйидаги кўринишда берамиз:

$$u_k = g_k - D \cdot \tilde{x}_k + B_0^+ \cdot \mu_k - B_0^+ \cdot K_a \cdot \tilde{x}_k - B_0^+ \cdot K_b \cdot u_k, \quad (14)$$

бу ерда  $g_k$  – берилувчи таъсирлар вектори;  $D$  – чизикли, модал тесқари алоқаларнинг ўзгармас (доимий) матрицаси;  $B_0^+ = (B_0^T B_0)^{-1} B_0^T$  – матрица,  $B_0$  га псевдотесқари чап  $l \times n$ ,  $\mu_k$  – объектни адаптациялаш сигналларининг  $n$  ўлчамли вектори.  $\tau \cdot \mu_{k+1} + \mu_k = z$ , бу ерда  $\tau = \text{diag}(\tau_1, \dots, \tau_r)$ .

Кечикишни ҳисобга олмаган ҳолда объектнинг чизикли стационар яқинлашувини маълум ва  $x_{k+1} = A_0 \cdot x_k + B_0 \cdot u_k$ , дея фараз қилсак унда кузатувчанлик ва бошқарувчанлик шартлари бажарилади, формула (13) ни қуйидагича ёзамиз:

$$x_{k+1} = (A_0 + K_a) \cdot x_k + (B_0 + K_b) \cdot u_k + \sigma(x_k, k), \quad (15)$$

бу ерда  $\sigma(x_k, k) = \sigma$  – объектнинг ночизиклилигини ва ташқи халақит таъсирларни ҳисобга олувчи қолдик вектор.

Шундай экан (15) системанинг дастурий ҳаракати  $x_k^M$  система (15) берилган ноаниқ эталон модел формуласини қаноатлантиради:

$$x_{k+1}^M = A^M \cdot x_k^M + B^M \cdot g_k, \quad x_{k_0}^M = x_0^M, \quad (16)$$

бу ерда  $g_k$  – берилувчи таъсирнинг  $m$  ўлчовли вектори;  $A^M = A_0 - B_0 \cdot D$ ;  $B^M = B_0$ .

Шундай бошқариш қонуни  $u_k$  ни синтезлаш керакки, (15) система ҳаракати  $x_k$  нинг эталон ҳаракат  $x_k^M$  нинг  $\delta_0$  – яқин атрофига яқинлашувини таъминласин. Бунинг учун қуйидаги тенгсизлик бажарилишини таъминлаш керак:  $\|x_k - x_k^M\| = \|\tilde{e}_k\| \leq \delta_0 \quad \forall t \geq t_a$ , бу ерда  $\tilde{e}_k$  – бошқариш хатолигининг  $n$  ўлчамли вектори;  $t_a$  – адаптация давомийлиги.

Бошлангич объект (15) нинг ҳолат тенгламасини бошқариш алгоритми (14) ни ҳисобга олган ҳолда қуйидагича ёзиш мумкин:

$$x_{k+1} = A_0 \cdot x_k + K_a \cdot x_k + (B_0 + K_b) [g_k - D \cdot \tilde{x}_k + B_0^+ \cdot \mu_k - B_0^+ \cdot K_a \cdot \tilde{x}_k + B_0^+ \cdot K_b \cdot u_k] + \sigma. \quad (17)$$

Қуйидаги (17) га асосланиб ва (16) ни ҳисобга олиб бошқариш хатолиги тенгламасини қуйдагича кўчириб ёзамиз:

$$\begin{aligned} \tilde{e}_{k+1} = & A_0 \cdot x_k + K_a \cdot x_k + B_0 \cdot g_k - B_0 \cdot D \cdot \tilde{x}_k - B_0 \cdot B_0^+ \cdot K_a \cdot \tilde{x}_k - \\ & - A^M \cdot x_k^M - B^M \cdot g_k^M + \sigma + B_0 \cdot B_0^+ \cdot \mu_k - B_0 \cdot B_0^+ \cdot K_b \cdot u_k + K_b \cdot u_k. \end{aligned} \quad (18)$$

Тенгламадаги (18) ни белгилаб  $e_k = x_k - \tilde{x}_k$  - кечикиши йўқ объектнинг ҳолат ўзгарувчиларини баҳолаш хатолигини иккинчи соزلанувчи модел сифатида ажратиб оламиз:

$$\tilde{x}_{k+1} = A_k \cdot \tilde{x}_k + G \cdot C \cdot e_k - B_k \cdot u_k + \sigma.$$

Идентификациянинг  $\|e_k\| \leq \varepsilon_0, \forall t \geq t_M$  мақсадини бажаришда  $\lim_{k \rightarrow k_M} \|e_k\| = \lim_{k \rightarrow k_M} \|x_k - \tilde{x}_k\| \leq \varepsilon_0, \forall k \geq k_M$ , мақсади ҳам бажарилади, бу ерда  $k_M \rightarrow k_y, k_y$  - объектни бошқариш вақти (давомийлиги).

Бу ҳолда (18) ни қуйидаги кўринишда кўчириб ёзиш мумкин:

$$\begin{aligned} \tilde{e}_{k+1} = & (A_0 - B_0 \cdot D) \cdot x_k + B_0 \cdot g_k + B_0 \cdot D \cdot e_k - A^M \cdot x_k^M - B^M \cdot g_k^M + \sigma + B_0 \cdot B_0^+ \cdot \mu_k + \\ & + B_0 \cdot B_0^+ \cdot K_a \cdot e_k + (I - B_0 \cdot B_0^+) \cdot K_a \cdot x_k + (I - B_0 \cdot B_0^+) \cdot K_b \cdot u_k. \end{aligned} \quad (19)$$

Агар бошқариш бўйича мослашувчанлик шартлари  $(I - B_0 \cdot B_0^+) \cdot (A^M - A_0) = 0$  ва  $(I - B_0 \cdot B_0^+) \cdot B^M = 0$ , бажарилса, қуйидаги нисбатни ҳосил қиламиз:

$$A_0 - B_0 \cdot D = A^M \text{ и } B_0 = B^M. \quad (20)$$

Тенглама (20) ни ҳисобга олиб, (19) тенгламани қуйидагича кўчириб ёзамиз:

$$\tilde{e}_{k+1} = A^M \cdot \tilde{e}_k + B_0 \cdot D \cdot e_k + \sigma + B_0 \cdot B_0^+ \cdot \mu_k + B_0 \cdot B_0^+ \cdot K_a \cdot e_k,$$

бунда  $D$  матрицанинг элементлари тенглама (20) дан топилади.

$\tilde{\xi}_k = B_0 \cdot D \cdot e_k + \sigma + B_0 \cdot B_0^+ \cdot \mu_k + B_0 \cdot B_0^+ \cdot K_a \cdot e_k$  ифодани киритиб, бошқариш хатолиги учун узил-кесил тенгламани топамиз:  $\tilde{e}_{k+1} = A^M \cdot \tilde{e}_k + \tilde{\xi}_k$ . Юқорида айтилган шартлар бўйича идентификациялаш бўйича мосланганлик  $(I - L \cdot L^+) \cdot \sigma = 0$  бажарилади, яъни  $t_k \rightarrow \infty$  да баҳолаш жараёнининг асимптотик тургунлиги  $e_k \rightarrow 0$  ўринли бўлади; бу ерда  $L = P^{-1} C^T$ ,  $P$  - симметрик мусбат матрица. Бунинг устига адаптация бўйича мосланганлик шarti қаноатлантирилади:  $(I - B_0 \cdot B_0^+) \cdot \sigma = 0$ . Бу ҳолда система асимптотик тургун ва бошқариш мақсади  $\lim_{\tau \rightarrow 0} \|\tilde{e}_k\| = 0$  бажарилади.

Кўрилатган ҳолатда Эрмит усулидан фойдаланиш мақсадга мувофиқ, унга кўра псевдотескари матрица қуйидаги формула асосида аниқланади  $B_0^+ = B_0^T M^- B_0$ , бу ерда  $M = (B_0 B_0^T)^2$ , бунда  $M^- = F^T R E$  - матрица  $M$  учун рефлексив  $g$ -тескари (умумлашган тескари) матрица, бу ҳолат учун  $M$  ва  $R$  матрицалар Эрмит ҳолати,  $R$  - диагональ “бир”лар сони  $r$ , қолганлари “ноль” асосий диагоналда.

Келтирилган кечикишли объектларни адаптив бошқариш системаларини синтезлашнинг тургун алгоритмлари ҳолат векторининг вақт бўйича исталган қонун бўйича ўзгаришини дастур бўйича амалга ошириш имконини беради ва системанинг ҳаракатларини эталон ҳаракатга яқинлаштиради.

Кечикишлар фақат бошқаришда бўладиган объектлар учун адаптацияловчи алгоритмларни синтезлаш масаласини кўриб чиқамиз. Бундай объектларнинг ўзига хос хусусияти шундаки, уларни чуқур манфий боғланиш билан қамраб олиб бўлмайди, чунки бунда система тургун

бўлмайди. Бундай объектларни бошқариш айниқса, ноаниқлик шароитларида қийин, чунки объект, бошқарувчи таъсирларнинг “ноль” ҳолатида тургун бўлади.

Фараз қиламиз, бошқариш объекти қуйидаги тенгламалар билан ифодаланади (13). Чикиш параметрларнинг вектори, бир мунча вақт ўтгандан кейин берилаётган таъсирлар  $-g_0$  нинг  $s$ -ўлчамли векторига яқин бўлиши талаб этилади. Шунини ҳисобга олиб, мақсад шартларини қуйидаги тенгсизлик кўринишида берамиз:

$$\eta_q = (y_k - g_0)^T K (y_k - g_0) \leq \varepsilon, \quad (21)$$

бу ерда  $K = K^T > 0$ ,  $\varepsilon$  - бериладиган таъсирлар талаб этиладиган даражада аниқ ишлашини белгилайдиган мусбат сон. Бошқарувчи қурилма структурасини ҳосил қилиш учун қуйидаги ифодадан фойдаланамиз

$$y_{k+1} = \sum_{i=0}^{n-1} A_i^* y_{k-i} + \sum_{i=0}^z B_i^* u_{k-i-1} + \sum_{i=0}^p D_i w_{k-i}. \quad (22)$$

Мақсад шартлари (21) ни  $k+l$  вақт моменти учун ёзамиз:

$$(y_{k+l} - g_0)^T K (y_{k+l} - g_0) \leq \varepsilon \quad (25)$$

ва  $C_0$  матрица билан  $v_k$  векторни киритамиз:  $C_0 = [A_0 \dots A_{n-1} \dots B_{l+z} \dots -1]$ ,  $v_k = \text{col}[y_k, \dots, y_{k-n+1}, \dots, u_{k-1}, \dots, u_{k-z-i} g_0]$ , шунда мақсад шартлари (25) қуйидаги кўринишни олади:

$$[B_0 u_k + C_0 v_k + v_k]^T K [B_0 u_k + C_0 v_k + v_k] \leq \varepsilon, \quad (26)$$

ва  $v_k \equiv 0$  бўлганда (26) нинг бажарилишини таъминлайдиган бошқариш қонуни қуйидаги кўринишни олади:

$$B_0 u_k = f_k, \quad (27)$$

ёки  $u_k = B_0^+ f_k = C_0 v_k$ , бу ерда  $B_0^+$  – псевдотескари матрица,  $f_k = -C_0 v_k$ .

Қуйидаги (27) система умумий ҳолда мос келмайдиган бўлиши мумкин.  $u_k$  – чизикли алгебраик тенгламанинг  $f_k = \tilde{f}_k \in R^m$  учун нормал псевдоечим бўлсин, яъни  $Z_0 = \{u_k \in R^n : \|\tilde{B}_0 u_k - \tilde{f}_k\| = \inf\}$ , кўпликдан шундай элемент-ки, унинг учун  $\|\bar{u}_k\| = \inf\{\|u_k\| : u_k \in Z_0\}$  бўлади.

Аппроксимация шартлари учун қуйидаги кўринишни қўллаймиз:  $B_{0,h} \in \mathcal{U}$ ,  $\|B_{0,h} - \tilde{B}_0\| \leq h$ ,  $f_{k,\delta} \in R^m$ ,  $\|f_{k,\delta} - \tilde{f}_k\| \leq \delta$ , бу ерда  $h$  ва  $\delta$  – тахминий маълумотларнинг берилган қийматлари шартларни қаноатлантиради, деб ҳисобласак, унда  $u_{k,h\delta} \equiv B_{0,h}^+ f_{k,\delta}$  элемент, умуман олганда  $h, \delta \rightarrow 0$  да  $\bar{u}_k$  га яқинлашмайди.

Қуйидаги (27) тенгламани ечиш учун минимал псевдотескари матрица усулидан фойдаланамиз, у экстримал масалани ечишдан иборат: шундай матрица  $\tilde{B}_{0,h} \in \mathcal{U}$  ни топиш керак-ки,  $\|\tilde{B}_{0,h}^+\|_* = \inf\{\|B_0^+\|_* : B_0 \in \mathcal{U}, \|B_0 - B_{0,h}\| \leq h\}$ , бўлсин ва кейин  $u_{k,\eta} \equiv \tilde{B}_{0,h}^+ f_{k,\delta}$  элементни қуришда бу элемент  $\bar{u}_k$  га яқинлашди деб қабул қилинади. Бу ерда  $\|\cdot\|_*$  – ўлчами  $n \times m$  бўлган матрицалар  $-\mathcal{U}^*$  фазосида евклид меъёри. Қуйидаги таъкидланишича, сингуляр ёйилмаси  $B_0 = URV^T \in \mathcal{U}$ ,  $R = \text{diag}(\rho_1, \dots, \rho_M)$  бўлган ҳар қандай матрица  $B_0$  учун қуйидагилар ўринли:

$$\sum_{k=1}^M (\rho_k - \bar{\rho}_k)^2 \leq \|B_0 - \tilde{B}_0\|^2, \quad \|B_0^+\|_*^2 = \sum_{k=1}^M \Theta(\rho_k^2) = \sum_{k=1}^{r(B_0)} \rho_k^{-2}; \quad r(B_0) \equiv \text{rang} B_0.$$

бу ерда  $\Theta(\rho) \equiv \{\rho^{-1}$  дан  $\rho \neq 0$ ;  $0$  дан  $\rho = 0\}$ , шундай сонлар  $\hat{\rho}_1, \dots, \hat{\rho}_M \geq 0$  ни топиш керак-ки,

$$\sum_{k=1}^M \Theta(\hat{\rho}_k^2) = \inf \left\{ \sum_{k=1}^M \Theta(\rho_k^2) : \sum_{k=1}^M (\rho_k - \tilde{\rho}_k)^2 \leq h^2; \rho_1, \dots, \rho_M \geq 0 \right\} \quad (28)$$

Масалани (28) ечиб,  $u_{k,\eta}$  нинг  $\bar{u}_k$  га яқин қийматини топиш мумкин  $\bar{u}_k : u_{k,\eta} = V_h \hat{R}_h^+ U_h^T f_{k,\delta}$ ,  $\hat{R}_h^+ = \text{diag}[\Theta(\hat{\rho}_1), \dots, \Theta(\hat{\rho}_M)] \in \mathbf{U}^*$ .

Фараз қиламиз, шундай бошқарув  $u_*$  мавжуд-ки,  $u_k = u_*$  бўлганда  $\|y_{k+1}\| \leq d^*$ ,  $d > 0$ , шарт бажарилади, яъни қандайдир авариявий бошқарув  $u_*$ , мавжуд-ки, агар назорат остидаги параметрлар белгиланган чегарадан ташқарига чиқса, ундан фойдаланилади. Қуйидаги  $C_*$  матрица номаълумлигини ҳисобга олиб, бошқарувчи қурилманинг структурасини қуйидаги формула ёрдамида аниқлаймиз: агар  $\|y_k\| > \delta_1$  бўлса  $u_k = u_*$ ; агар  $\|y_k\| \leq \delta_1$  бўлса  $u_k = C_k v_k$ , бу ерда  $C_k$  – созланадиган параметрлар матрицаси. Бу ҳолатда бошқарувчи қурилма структураси қуйидаги кўринишда танлаб олинади: агар  $\|y_k\| \leq \delta_1$  бўлса  $u_k = \tilde{C}_k \tilde{v}_k$ , агар  $\|y_k\| > \delta_1$  бўлса,  $u_k = u_*$ , бу ерда  $\tilde{C}_k$  – созланадиган параметрлар матрицаси.

Адаптация алгоритмларини тузиш учун қуйидаги методикадан фойдаланамиз. Биринчидан, кучайтирилган мақсад шартлари  $C_k = C_*$  бўлганда,  $\eta_{k+i} \leq \rho^2 \varepsilon$ ,  $0 < \rho < 1$  бажарилишини текшираемиз. Қуйидаги  $K$  матрицани кўпайтувчиларга ажратамиз:  $K = (B_0^+)^T H B_0^+$ , бу ерда  $H = H^T > 0$ , шунда  $v_k \equiv 0$ , учун ҳосил қиламиз:

$$(-B_0^+ A_0 v_k - f_k)^T (B_0^+)^T H B_0^+ (B_0^+ v_k - f_k) = B_0^+ f_k - B_0^+ f_k)^T H (B_0^+ v_k - B_0^+ f_k) \leq \rho^2 \varepsilon.$$

Шунда рекуррент мақсад тенгсизликларидан фойдаланиб  $C_k$  матрицани созлаш амалини тузиш мумкин:  $C_{k+l} = C_{k+l-1}$ , агар  $\eta_{k+l} \leq \varepsilon$ ,  $\|C_{k+l-1} v_{k+l}\| \leq \varphi$ ;  $C_{k+l} = q C_{k+l-1} / \|v_{k+l}\| \|C_{k+l-1}\|$ , агар  $\eta_{k+l} \leq \varepsilon$ ,  $\|C_{k+l-1} v_{k+l}\| > \varphi$ .

Келтирилган алгоритмлар ноаниқлик шароитида кечикишли кўпбоғламли технологик жараёнларни бошқариш масаласини ечишда анча самарали, натижада ўткинчи жараённинг самарадорлигининг ошишига олиб келади.

Кечикишли объектларни чизиқли бошқариш системасини адаптив синтезлаш алгоритмлари ва блоклар билан импульсланадиган функциядан фойдаланилган кечикишли системаларнинг оптимал бошқариш алгоритмлари масалалари кўрилган. Уларни амалда қўллаш самарали, ҳисоблаш схемалари функциялари минималлаштирилишига олиб келади.

**Диссертациянинг «Технологик объектларнинг адаптив бошқариш системаларини синтезлаш алгоритмларини кечикишли аммиакли селитра эритмасини буглатиш жараёнида қўллаш» номли тўртинчи бобида кечикишли адаптив бошқариш системалари синтезлашнинг ишлаб чиқилган алгоритмларини аниқ технологик жараёнга қўллаш натижалари келтирилган.**

Аммиак селитраси суюқлигини буглатиш жараёнини тавсифловчи асосий кўрсаткичлар сифатида қуйидагилар кўриб чиқилди: бошқарувчи параметрлар  $u = (u_1, u_2, u_3, u_4)$ , бунда  $u_1$  – иссиқлик сарфи;  $u_2$  – буглатиладиган аммиак селитра суюқлиги сарфи;  $u_3$  – бугланган суюқлик сарфи;  $u_4$  – эриткич



бугларнинг сарфи; чиқиш параметрлари  $y = (y_1, y_2, y_3, y_4)$ , бунда  $y_1$  – бугланган суюқлик концентрацияси;  $y_2$  – ҳарорат депрессияси (қайнатилган суюқлик ва аралашма орасидаги ҳарорат фарқи);  $y_3$  – аппаратнинг буглатувчиси ичидаги босим;  $y_4$  – буглатиш аппарати ичидаги суюқлик сатҳи; назорат қилинмайдиган галаён таъсирлар  $w = (w_1, w_2)$ , бунда  $w_1$  – аппаратга киришда аммиак селитра суюқлигининг концентрацияси;  $w_2$  – иссиқлик ташувчи сарфининг ўзгариши.

Жараёни формаллаштириш натижасида математик модел структурасини қуйидагича танлаб олиш мумкин:

$$x_{k+1} = Ax_k + Dx_{k-\tau} + Bu_k + w_k, \quad (29)$$

$$y_k = Lx_k + v_k, \quad (30)$$

бу ерда  $x_k \in R^3$ ;  $u_k \in R^4$ ;  $y_k \in R^4$ .  $A, D, B, L$  матрицалар ва  $w_k, v_k$  векторлар номаълум параметрлар  $\tilde{\xi}_k \in \Xi$  векторига боғлиқ деб қабул қиламиз.

Математик моделни ҳосил қилиш учун “Навоийазот” АЖда аммиак селитрасини буглатиш технологик жараёни нормал ишлаб турган шароитда саноат тажриба синови ўтказилган. Кузатилаётган тасоддий жараёнларнинг қайд этиш вақти ва амалга оширилишини дискретлашда зарур қийматлар қуйидагича бўлади:  $T = 45$  дақиқа,  $\Delta t = 0,5$  дақиқа. Қўрилаётган жараённинг турли режимлари учун синовлар серияси бажарилди.

Объектнинг параметрларини идентификациялашда (5), (6) типдаги алгоритмлардан фойдаланилди. Объект параметрлари қуйидагича:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -4.5 & -6.7 & -2.6 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.5 & 0.1 & 0.5 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.9 & 0 & 1.2 \\ 0 & 0 & 2.7 & 0 \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1.3 \\ 1.5 & 2 & 1.2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (31)$$

Моделнинг адекватлигини ўрнатишда вақт қолдигини қўллашга асосланган мезонлардан фойдаланилди.

Шундай қилиб, аммиак селитраси суюқлигини буглатиш жараёни учун ишлаб чиқилган математик модели асосий кириш ва чиқиш ўзгарувчилари орасидаги миқдорий нисбатни аниқлаш, мавжуд ёки танланмайдиган бошқариш усулларида жараён ҳолатини прогнозлаш ва бошқаришнинг оптимал адаптив қонунларини синтезлаш имконини беради.

Аммиак селитрасини буглашнинг жараёнини кечикишли чизиқли фарқланувчи тенгламалар системаси билан (29) ва (30) кўринишида ифодалаш мумкин. Регулятор структурасини ўзимиз берамиз, бунда системага қандайдир  $r \in R^g$  вектор таъсир ўтказди деб фарз қиламиз

$$\dot{u} = C_1^T r + C_2^T x + C_3^T x(t - \tau), \quad (32)$$

бунда  $C_1, C_2, C_3$  - ростлагичнинг созланадиган параметрларига оид матрицалар, ўлчамлари тегишлича  $(g \times w)$ ,  $(n \times w)$ ,  $(n \times w)$ .

$C_1, C_2, C_3$  матрицаларни созлайдиган шундай дискрет алгоритмларни синтезлаш керак-ки, (29) ва (32) системаларда кечадиган жараёнлар созлаш охирида эталон моделдаги жараёнларга яқин бўлсин  $\dot{x}_M = A_M x_M + D_M x_M(t - \tau) + B_M r$ , бунда  $x_M \in R^n$ ;  $r \in R^g$ .  $A, D, B$  матрицаларни қуйидагича ифодалаш мумкин:  $A = A_M - B v_{20}^T$ ,  $D = D_M - B v_{30}^T$ ,  $B_M = B v_{10}^T$ , бунда  $v_{10}, v_{20}, v_{30}$  – қандайдир номаълум матрицалар.

Системанинг ишлаш сифатидан келиб чикиб, адаптация жараёни тугагандан кейин эталон модел параметрларининг қуйидаги қийматлари берилди:

$$A_M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -6 & -11 & -6 \end{bmatrix}, \quad D_M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.5 & -0.5 & -0.5 \end{bmatrix}, \quad B_M = \begin{bmatrix} 0.55 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1.3 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (33)$$

Стабиллаш масаласини ечишда дискрет-узлуксиз адаптив автоматик бошқариш системасидаги ростлагич коэффициентлари адаптациянинг дискрет алгоритмларига мувофиқ созланди:

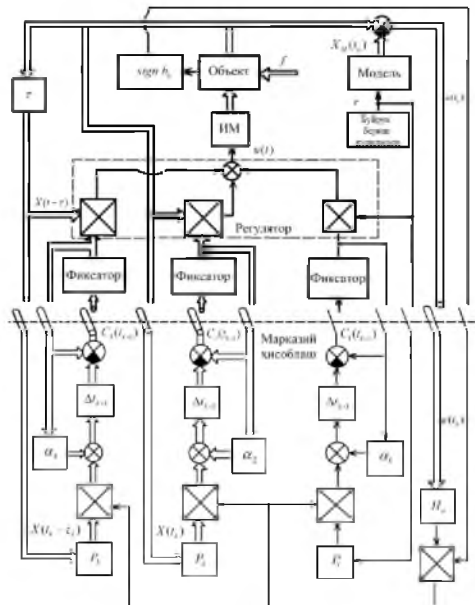
$$\begin{aligned} C_{1i}(t_{k+1}) &= C_{1i}(t_k) - \Delta t_{k+1} \left[ \tilde{g}_i^T(x(t_k) - x_M(t_k)) P_1 r + \alpha_1 C_{1i}(t_k) \right] \\ C_{2i}(t_{k+1}) &= C_{2i}(t_k) - \Delta t_{k+1} \left[ \tilde{g}_i^T(x(t_k) - x_M(t_k)) P_2 x(t_k) + \alpha_2 C_{2i}(t_k) \right] \\ C_{3i}(t_{k+1}) &= C_{3i}(t_k) - \Delta t_{k+1} \left[ \tilde{g}_i^T(x(t_k) - x_M(t_k)) P_3 x(t_k - \tau_k) + \alpha C_{3i}(t_k) \right] \end{aligned}$$

бу уларнинг параметрлари қиймати

$$G = P_1 = P_2 = P_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 1 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}; \quad \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0.1; \quad \Delta t_{k+1} \equiv \Delta t = 1c; \quad (34)$$

$$C_1(0) = C_2(0) = C_3(0) = 0.$$

Келтирилган алгоритм асосида адаптив автоматик бошқариш системасининг қуйидаги блок-схемасини тузиш мумкин (1-расм).



1-расм. Аммиак селитрасини ҳолат бўйича кечикиб буглатиш жараёнлари учун аниқ эталон модели дискрет-узлуксиз адаптив автоматик бошқариш системасининг блок-схемаси

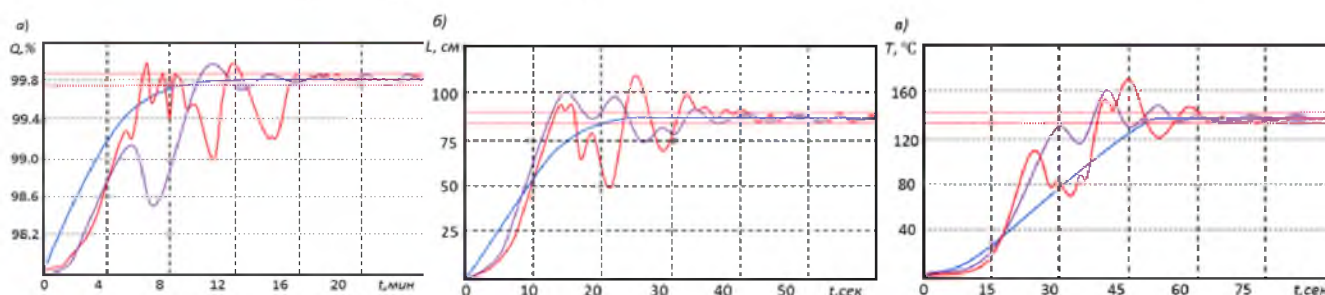
Блок-схемадан кўринишича, марказий ҳисоблаш комплексига адаптациялаш алгоритмини ҳисоблаб чиқиш вазифаси юклатилган, яъни дискрет вақт онлари  $t_{k+1}$  да ростлагич параметрларига тузатишлар киритади. Ҳисоблар тугагач, ростлагич параметрларининг янги қийматлари фиксаторларда кейинги вақт моментигача эслаб қолинади. Кейинги вақтда марказий ҳисоблаш комплексига янги ўлчанган қийматлар киритилади ва ростлагич коэффициентларига янги тузатишлар киритилади.

Фиксаторларнинг чиқишидаги сигналлар (ростлагичнинг созланадиган параметрларини қийматлари) вақтнинг узлуксиз-парча функциялари бўлиб ўзлуксиз погоналар кўринишига эга бўлади.

2-расмда синтезланган дискрет-узлуксиз, дискрет адаптив бошқариш системаси ва уларнинг эталон моделдаги ўтиш жараёнлари графиклари тасвирланган. Улар қуйидаги ҳолатлар учун тегишли, объектнинг параметрлари (31) ва (33) қийматларга эга, шартлар эса

$$\tau_1 = 15c; \quad \varphi(s) = 0; \quad s \in [-\tau, 0]; \quad r^T = (1; 0; 0). \quad (35)$$

Объектга  $\Pi$  ( $f_0^T = (0.1; -0.1; 0.1)$ ) турдаги ҳалақит таъсир қилган. Графиклардан кўриниб турибдики (2-расм (а, б, в)), синтезланган дискрет-узлуксиз адаптив автоматик бошқариш системаси адаптациянинг берилган классида Д адаптивдир. Системадаги ўтиш жараёнлари-тебранма, ростлаш вақти  $t_{\text{ростл.1}} = 15,2\text{мин}$ ,  $t_{\text{ростл.2}} = 42c$ ,  $t_{\text{ростл.3}} = 60c$ .



2-расм (а, б, в). Дискрет-узлуксиз, дискрет адаптив бошқариш системаси ва уларнинг эталон моделдаги ўтиш жараёнлари графиклари:

(а) аммиакли селитра суюқлиги концентрацияси, сатҳ (б) ва бўғлатиш аппарати ичидаги ҳарорат (в).

моделлаштирилаётган дискрет адаптив бошқариш системасидаги ўтиш жараёнларининг графиги тасвирланган. Бошқариш объектнинг параметрларини қийматлари (31), (33) ва (35)да келтирилган, объектга эса  $I$  ( $\tilde{f} = 0.1$ ) туридаги ҳалақитлар таъсир қилган. Адаптациянинг дискрет алгоритмларини параметрлари (34) даги қийматларга эга бўлади, бунда дискретлаш қадами  $\Delta t = 0,1c$ . Ўтиш жараёнларининг графикларидан кўриниб турибдики (2-расм (а, б, в)), синтезланган дискрет адаптив автоматик бошқариш системаси адаптациялашнинг берилган классида Д адаптивдир. Системадаги ўтиш жараёнлари тебранма, ростлаш вақти  $t_{\text{ростл.1}} = 13,2\text{мин}$ ,  $t_{\text{ростл.2}} = 35c$ ,  $t_{\text{ростл.3}} = 52,8c$ .

Шундай қилиб, ишлаб чиқилган аммиак селитраси суюқлигини бўғлатиш жараёнларини адаптив бошқариш системаси юқори ростлаш сифатини таъминлайди ва кўриб чиқилаётган жараён учун етарли аниқликка эга.

## ХУЛОСА

Диссертацияда, тизимли таҳлил концепцияси, адаптив бошқариш системалари назарияси ноаниқ қўйилган масалаларни идентификациялаш ва ечим усуллари асосида кечикишли технологик объектларни бошқариш системаларини адаптив синтезлаш конструктив алгоритмлари ишлаб чиқилди.

Тадқиқот ниҳоясида қуйидаги илмий натижалар олинган:

1. Динамик бошқариш системаларида кечикишнинг қийматларини турғун баҳолайдиган алгоритмлар таклиф этилди. Келтирилган итерацияли алгоритмлар объектнинг динамикаси тенгламасидаги кечикишлар қийматини ҳисоблаш аниқлигини ва бошқариш жараёнининг сифат кўрсаткичларини ошириш имконини беради.
2. Хотира чуқурлиги турлича ҳолатлар учун кириш ва чиқиш сигналлари асосида кечикишли бошқариш объектларини идентификациялашни турғун алгоритмлари ишлаб чиқилди. Бу алгоритмлар псевдоўзгартириш концепциясидан фойдаланиб бошқариш объектларини турғун идентификациялаш имконини беради.
3. Кечикишли динамик бошқариш алгоритмларини идентификациялашнинг турғун, рекуррент корреляцияловчи алгоритмлар энг кичик квадратларнинг мунтазамлашган усули асосида ишлаб чиқилди. Бу алгоритмлар тасодифий жараёнлар ва ҳалақитлар таъсири остидаги кечикишли бошқариш объектларини идентификациялаш жараёнининг аниқлигини оширади.
4. Кечикишли чизикли объектларни кечикишсиз вектор ҳолатлари кенгайтирилган система кўринишида ифодалайдиган алгоритмлар келтирилди. Бу алгоритмлар кечикишли бошқариш объектларини идентификациялаш масалаларини ечадиган турли алгоритмларни шакллантириш имконини беради.
5. Бошқариш бўйича кечикишли чизикли система учун адаптив системани синтезлаш алгоритмлари таклиф этилган. Бу алгоритмлар қўшимча контур киритиш асосида бошқариш жараёнининг сифат кўрсаткичларини кўтариш имконини беради.
6. Кечикишли системаларни оптимал бошқариш алгоритмлари импульсли блоklar функцияларидан фойдаланиб ишлаб чиқилди. Ҳолат вектори ва унинг ҳосиласи учун импульс блокли аппроксимациялашдан фойдаланиб, бошқариш системасининг тезлигини ошириш имкони туғилди.
7. Эталон модел ёрдамида адаптив бошқаришнинг турғун алгоритмлари Эрмит усули (матрицаларни бузилмаган матрицаларга икки томонлама кўпайтириб, турғун псевдоўзгартириш) асосида ишлаб чиқилди. Бу алгоритмлар ҳолат вектори биз истаган қонуният билан ўзгаришини ва системанинг характерлари эталон ҳаракатга яқин бўлишини таъминлайди.
8. Бошқаришда кечикишли объектларни адаптив бошқариш турғун алгоритмлари минимал пседотескари матрица ва сингуляр ёйиш усули асосида ишлаб чиқилди. Бу алгоритмлар кечикишли кўпбоғламли технологик объектларни бошқариш масаласини ечишда катта самара беради ва ўткинчи жараённинг сифатини оширади.
9. Ишлаб чиқилган алгоритмлар асосида аммиакли селитра эритмасини буглатиш жараёни учун ҳолат бўйича кечикишли адаптив бошқариш тизими таклиф этилди ва аниқ эталон моделига эга бўлган дискрет-узлуксиз адаптив автоматик бошқариш тизимининг блок-схемаси таклиф этилди.

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

---

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**КАРИМОВ ДАВРОН РАХМАТОВИЧ**

**АЛГОРИТМЫ СИНТЕЗА СИСТЕМ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ**

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

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

**Ташкент – 2020**

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за №В2017.3.PhD/Т311.

Диссертация выполнена в 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.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

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

**Официальные оппоненты:** Гулямов Шухрат Маналович  
доктор технических наук, профессор  
Холматов Давронбек Абдалимович  
кандидат технических наук, доцент

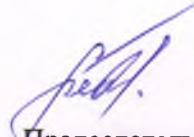
**Ведущая организация:** Навоийский государственный горный институт

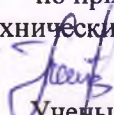
Защита диссертации состоится «14» 10 2020 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.T.03.02 при Ташкентском государственном техническом университете (Адрес: 100095, г.Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz)).


С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (зарегистрировано №163. Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: 246-03-41.

Автореферат диссертации разослан «8» 10 2020 года.  
(реестр протокола рассылки №22 от «19» 09 2020 года)



  
**Н.Р.Юсупбеков**  
Председатель Научного совета  
по присуждению учёных степеней,  
доктор технических наук, профессор, академик

  
**У.Ф.Мамиров**  
Ученый секретарь Научного совета  
по присуждению учёных степеней,  
доктор философии по техническим наукам (PhD)

  
**Ж.У.Севинов**  
Заместитель председателя Научного семинара  
при научном совете по присуждению учёных степеней,  
доктор технических наук, доцент

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире в последнее время особое внимание уделяется совершенствованию существующих технологий, повышению эффективности производства и мощности технологических агрегатов, развитию процессов управления производственными комплексами, а также разработке технологий оптимального и адаптивного управления. В последнее время, одной из наиболее актуальных задач в стремительно развивающихся отраслях является применение информационных технологий при автоматизации и управления технологическими объектами, позволяющих улучшить качество и увеличить выпуск продукции с наименьшими энерго-ресурсными затратами. В этой области проводятся исследования по совершенствованию систем управления технологическими объектами различного функционального назначения, обеспечению конкурентоспособности продукции и эффективности производства.

В мире в качестве важных вопросов отмечаются разработки различных систем автоматизации и управления, при этом большое внимание уделяется созданию и совершенствованию адаптивных систем управления технологическими объектами, современных математических методов и информационных технологий, направленных в первую очередь на внедрение инновационных идей и технологий управления. В тоже время важно развивать методы и алгоритмы построения моделей, синтеза алгоритмов управления сложными объектами на основе интеграции интеллектуальных методов анализа, управления, обработки информации и принятия управленческих решений. В связи с этим важной задачей является усовершенствование и модификация алгоритмов синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами с запаздыванием.

В настоящее время в Республике уделяется большое внимание направлениям автоматизации и управления, в том числе созданию систем усовершенствованного управления, обеспечивающих энерго- и ресурсосбережение при автоматизации и управлении различными технологическими процессами и производствами с запаздыванием. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 гг. отмечены задачи, в том числе, по «... сокращению энергоёмкости 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>. В этом аспекте создание адаптивных систем управления технологическими объектами с запаздыванием, способствующих повышению точности и качественных показателей процессов управления, является весьма актуальной.

Данное диссертационное исследование в определённой степени служит выполнению задач, предусмотренных Указом Президента Республики

---

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

Узбекистан № УП–4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» и Постановлениями № ПП-1730 от 21 марта 2012 года «О мерах по дальнейшему внедрению и развитию современных информационно-коммуникационных технологий» и № ПП-3682 от 27 апреля 2018 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов», а также другими нормативно-правовыми документами, принятыми в данной сфере.

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

**Степень изученности проблемы.** Анализ научно-технической литературы последних лет, касающихся исследований по разработке методов и алгоритмов синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами с запаздыванием, свидетельствует о достижении значительных теоретических и практических результатов в этой области. Значительный вклад в развитие адаптивного управления технологическими объектами с запаздыванием внесли многие зарубежные ученые, такие как De R. Keyser, Th. Nanayakkara, K. Y. Rama, J. Saridis, P.B. Shankar, J.Y. Dieulot, A.A. Бобцов, Е.Л. Еремин, А.М. Цыкунов, А.А. Пыркин, Н.И. Смирнов, А.И. Репин, А.В. Имангазиева, А.П. Захаров, Л.М. Яковис, В.И. Гостев, Р.Д. Ахметсафин, Р.З. Ахметсафина, А.И. Рубан, О.О. Мухина, А.З. Асанов, В.Н. Фомин, А.Л. Фрадков, И.Б. Фуртат, Я.З. Цыпкин, Ш.Е. Штейнберг, а также отечественные ученые, в том числе Б.М. Азимов, Т.Ф. Бекмуратов, Ш.М. Гулямов, И.И. Жуманов, О.О. Зарипов, Х.З. Игамбердиев, М.А. Исмаилов, А.А. Кадыров, Н.З. Камалов, М.М. Камилов, А.Р. Марахимов, И.Х. Сиддиков, Н.Р. Юсупбеков и др. Вместе с тем, постоянное усложнение и расширение круга научных исследований требует разработки новых эффективных методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления технологическими объектами с запаздыванием. Кроме того, оказывается целесообразным осуществлять разработку устойчивых алгоритмов идентификации и адаптивного управления объектами, что позволит расширить спектр алгоритмических процедур построения и реализации адаптивных систем управления динамическими объектами с запаздыванием и повысить эффективность их функционирования. В связи с вышеотмеченным возникает настоятельная необходимость дальнейшей модификации и создания эффективных алгоритмов построения систем адаптивного управления технологическими объектами с запаздыванием.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационное исследование выполнено в рамках научно-исследовательских проектов Ташкентского государственного технического университета: №А-5-42 - «Программно-инструментальные средства интеллектуализации автоматизированного мониторинга и управления технологическими объектами в условиях априорной



неопределенности» (2015-2017); №ОТ-Ф4-78: «Разработка теоретических основ и регулярных методов синтеза адаптивных систем управления динамическими объектами на основе идентификационного подхода» (2017-2020).

**Целью исследования** является разработка алгоритмов устойчивого синтеза систем адаптивного управления объектами с последействием и вычислительных схем их практической реализации.

**Задачи исследования:**

системный анализ развития методов и алгоритмов синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами с последействием;

разработка алгоритмов устойчивого оценивания значения постоянного запаздывания в объектах управления;

разработка алгоритмов идентификации управляемых объектов с последействием на основе реализаций входных и выходных сигналов;

разработка устойчивых алгоритмов идентификации управляемых объектов с запаздыванием;

разработка алгоритмов синтеза систем управления с последействием;

разработка алгоритмов адаптивного управления с использованием эталонной модели;

разработка алгоритмов адаптивного управления объектами с запаздыванием в управляющем воздействии;

практическая апробация разработанных алгоритмов и вычислительных схем при решении задачи построения системы управления конкретным технологическим объектом.

**Объектом исследования** являются системы адаптивного управления объектами с последействием.

**Предметом исследования** являются методы и алгоритмы устойчивого синтеза систем адаптивного управления объектами с последействием.

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

**Научная новизна** исследования заключается в следующем:

разработаны устойчивые алгоритмы идентификации управляемых объектов с запаздыванием на основе реализаций входных и выходных сигналов для различных значений глубины памяти алгоритма;

разработаны устойчивые рекуррентные корреляционные алгоритмы идентификации управляемых объектов с запаздыванием на основе регуляризованного метода наименьших квадратов;

разработаны устойчивые алгоритмы адаптивного управления с эталонной моделью на основе устойчивого псевдообращения матриц методом Эрмита с использованием двухстороннего умножения на невырожденные матрицы;

разработаны устойчивые алгоритмы адаптивного управления объектами с запаздыванием в управлении на основе метода минимальной псевдообратной матрицы и сингулярного разложения.

**Практические результаты** исследования заключаются в следующем:

разработаны программные модули, предназначенные для программно-алгоритмической поддержки решения задач устойчивого синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами с запаздыванием;

на основе результатов промышленного эксперимента в условиях нормального функционирования разработаны математические модели процесса выпаривания раствора аммиачной селитры;

разработаны структурные и функциональные схемы автоматизации и адаптивного управления технологическим процессом выпаривания раствора аммиачной селитры;

предложена система управления технологическим процессом выпаривания раствора аммиачной селитры с соответствующим техническим обеспечением, позволяющая стабилизировать технологические режимы протекания процессов и повысить эффективность его.

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

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследования состоит в разработке конструктивных алгоритмов устойчивого синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами с запаздыванием.

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

**Внедрение результатов исследования.** Разработанные алгоритмы синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами с запаздыванием внедрены на АО «Навои-Азот» в следующих формах:

разработанные устойчивые алгоритмы адаптивного управления с эталонной моделью на основе устойчивого псевдообращения матриц методом Эрмита с использованием двухстороннего умножения на невырожденные матрицы (Справка АО «УЗКИМЕСАНОАТ» № 14-2929 от 30 июня 2020 года). В результате осуществляется программное движение по желаемому закону изменения во времени вектора состояния и обеспечиваются сходимость движения системы в некоторую окрестность относительно эталонного движения;

разработанные устойчивые алгоритмы адаптивного управления объектами с запаздыванием в управлении на основе метода минимальной

псевдообратной матрицы и сингулярного разложения (Справка АО «УЗКИМЁСАНОАТ» № 14-2929 от 30 июня 2020 года). Алгоритмы позволяют стабилизировать технологические режимы протекания процесса выпаривания раствора аммиачной селитры.

**Апробация результатов исследования.** Результаты данного исследования были обсуждены на 5 международных и 5 республиканских научно-практических конференциях.

**Публикация результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, из них 6 в журнальных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан, в том числе 2 в иностранных и 4 в республиканских журналах. Также получено 1 свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, объем диссертации составляет 111 страниц, а также списка использованной литературы и приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В первой главе **«Задачи и алгоритмы синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами с запаздыванием»** приводятся объекты с запаздыванием и их особенности, методы и алгоритмы синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами с запаздыванием, постановка цели и задачи исследования.

Многие технологические процессы характеризуются запаздыванием и нестационарностью. Построение систем управления такими объектами вызывают значительные трудности. Наиболее перспективным путем преодоления возникающих трудностей является использование адаптивного подхода.

В этой связи при решении задач синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами с запаздыванием весьма плодотворным оказывается подход, основанный на методологии системной градации, в частности, на привлечении концепций обратных задач динамики управляемых объектов и регулярных методов. Поэтому целесообразно рассмотреть различные возможные подходы к решению задач повышения точности вычисления состояния динамических систем с запаздыванием методами регуляризации и выявить наиболее перспективные для практического использования методы и алгоритмы решения некорректно

поставленных задач. Вышеизложенные выводы обусловили постановку цели настоящей диссертационной работы, посвященной разработке и исследованию алгоритмов регулярного синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами с запаздыванием и их практическому применению при решении задач автоматизации и управления конкретными технологическими процессами производства.

Вторая глава диссертации «**Разработка устойчивых алгоритмов идентификации динамических объектов управления с запаздыванием**» посвящена разработке алгоритмов устойчивого оценивания значения постоянного запаздывания в динамических системах, алгоритмов идентификации объектов управления с запаздыванием на основе реализаций входных и выходных сигналов, идентификации динамических объектов управления с запаздыванием, представления линейных дискретных систем с запаздыванием в виде систем без запаздывания с расширенными векторами состояний.

Весьма часто в задачах управления возникает задача робастного определения параметров объекта и запаздывания по измерениям входных и выходных переменных системы. Приведем алгоритм параметрической идентификации систем с запаздыванием, основанный на рассмотрении временных зависимостей входных и выходных сигналов с использованием концепций обратных задач динамики.

Рассмотрим объект управления, описываемый линейным разностным уравнением:

$$x(t+1) = a_0 + \sum_{i=1}^{n_1} a_i x(t+1-i) + \sum_{i=n_1+1}^n a_i x(t+1-\tau_1-i) + \sum_{j=1}^m a_{n+j} u(t+1-\tau-j) + \xi(t), \quad t \geq 0 \quad (1)$$

с известными начальными значениями координаты  $x$  и управления  $u$ . Здесь  $\tau_1, \tau$  - дискретные чистые запаздывания, управляющее воздействие имеет простейшее ограничение по амплитуде  $u_1 \leq u(t) \leq u_2$ , помеха ограничена:  $|\xi(t)| \leq \xi_1$ ,  $a_i (i = 0, \dots, n+m)$  - постоянные неизвестные параметры объекта.

На основании (1) запишем следующие соотношения в матричной форме, которые будем использовать для идентификации объекта с запаздыванием:

$$Y(t) = Z(t-1)a(t), \quad (2)$$

где  $Y(t) = (y^T(t) \dots y^T(t-p+1))^T$ ,  $Z(t-1) = (z^T(t-1) \dots z^T(t-p))^T$ ,  
 $z(k) = (1, x(k), \dots, x(k+1-n_1), x(k-\tau_1-n_1), \dots, x(k+1-\tau_1-n), u(k-\tau), \dots, u(k+1-\tau-m)),$   
 $u(k-\tau), \dots, u(k+1-\tau-m)), \quad a^T(t) = (a_0, a_1, \dots, a_{n+m}),$

параметр  $p \geq 1$  - глубина памяти в алгоритме идентификации.

Вектор приращений параметров  $\Delta a(t) = a(t) - a(t-1)$  будем находить из критерия:  $\|e_0(t) - Z(t-1)\Delta a(t)\|^2 = \min$ ,  $\|\Delta a(t)\|^2 = \min$ , где  $e_0(t) = x(t) - Z(t-1)a(t-1)$ ,  $x(t) = (x^T(t) \dots x^T(t-p+1))^T$ , т.е.  $\Delta a(t) = Z^+(t-1)(x(t) - Z(t-1)a(t-1))$ .

В зависимости от глубины памяти  $p$  матрица  $Z(t-1)$  может быть переопределенной, недоопределенной и квадратной. Для упомянутых случаев решения уравнения (2) могут быть определены следующим образом:

$$\Delta a(t) = (Z^T(t-1)Z(t-1))^{\dagger} \cdot Z^T(t-1)(x(t) - Z(t-1)a(t-1)), \quad (3)$$

$$\Delta a(t) = Z^T(t-1)(Z(t-1)Z^T(t-1))^{\dagger} (x(t) - Z(t-1)a(t-1)), \quad (4)$$

$$\Delta a(t) = Z^+(t-1)(x(t) - Z(t-1)a(t-1)).$$

В выражения (4) целесообразно ввести регуляризацию:

$$\begin{aligned}\Delta a(t) &= (Z^T(t-1)Z(t-1) + aI)^{-1} \cdot Z^T(t-1)(x(t) - Z(t-1)a(t-1)), \\ \Delta a(t) &= Z^T(t-1)(Z(t-1)Z^T(t-1) + aI)^{-1}(x(t) - Z(t-1)a(t-1)), \\ \Delta a(t) &= (Z(t-1) + aI)^{-1}(x(t) - Z(t-1)a(t-1)).\end{aligned}$$

Параметр регуляризации  $a > 0$  здесь целесообразно определять на основе способов квазиоптимальности или отношений.

Приведенные алгоритмы позволяют осуществлять устойчивую идентификацию объектов управления с запаздыванием на основе реализаций входных и выходных сигналов.

Предположим, что дискретный динамический объект управления с неизвестным запаздыванием описывается уравнением вида:

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

где  $A(z^{-1}) = 1 - a_1z^{-1} - \dots - a_naz^{-na}$ ,  $B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_nbz^{-nb}$  и  $z^{-1}$  - оператор обратного сдвига.

Пусть  $\{u(k), y(k), k=1, \dots, N\}$  представляет собой последовательность дискретных данных размера  $N > \max\{na + nb + 1, d + nb + 1\}$ . Введем обозначения:

$$\begin{aligned}\theta^T = [a^T; b^T] &= [a_1, \dots, a_{na}; b_0, b_1, \dots, b_{nb}], \quad \varphi_{k,d}^T = [y_k^T; u_{k,d}^T] = [y(k-1), \dots, y(k-na), \\ &u(k-d), u(k-d-1), \dots, u(k-d-nb)].\end{aligned}$$

Модель (5) может быть представлена в виде:  $y(k) = \varphi_{k,d}^T \theta + v(k)$ .

Пусть  $\hat{d}$  будет оценкой  $d$ . Будем использовать следующий критерий наименьших квадратов  $J(\hat{d}) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - \varphi_{k,\hat{d}}^T \theta]^2$ . Минимизируя его по  $\theta$ , можно получить следующее выражение для оценки параметров системы:

$$A\hat{\theta}_{LS}(\hat{d}) = c, \quad (6)$$

$$\text{где } A = \left[ \sum_{k=1}^N \varphi_{k,\hat{d}} \varphi_{k,\hat{d}}^T \right], \quad c = \left[ \sum_{k=1}^N \varphi_{k,\hat{d}} y(k) \right].$$

Система уравнений (6) как правило является плохо обусловленной. По этой причине при решении уравнения (6) необходимо использовать методы регуляризации.

Условия аппроксимации примем в виде:  $\|c - \bar{c}\| \leq \delta$ ,  $\|A - \bar{A}\| \leq h$ ,  $\gamma \equiv (\delta, h)$ . Поскольку нормальное решение  $\hat{\theta}_{LS}^0(\hat{d})$  обладает свойством минимальности нормы, то естественно задачу нахождения приближений к нормальному решению  $\hat{\theta}_{LS}^0(\hat{d})$  поставить так: в классе  $Q_\gamma$  векторов  $\hat{\theta}_{LS}(\hat{d})$  найти вектор  $\hat{\theta}_{LS}^\gamma(\hat{d})$ , минимизирующий функционал  $\Omega[\hat{\theta}_{LS}(\hat{d})] = \|\hat{\theta}_{LS}(\hat{d})\|^2$ , т.е. найти такой вектор  $\hat{\theta}_{LS}^\gamma(\hat{d}) \in Q_\gamma \equiv \{\hat{\theta}_{LS}(\hat{d}); \|A\hat{\theta}_{LS}(\hat{d}) - c\| \leq 2(h\|\hat{\theta}_{LS}(\hat{d})\| + \delta) + \mu\}$ , что  $\inf_{\hat{\theta}_{LS}(\hat{d}) \in Q_\gamma} \|\hat{\theta}_{LS}(\hat{d})\|^2 = \|\hat{\theta}_{LS}^\gamma(\hat{d})\|^2$ .

Предположим, что чистое запаздывание  $d$  лежит в диапазоне  $0 \leq T_1 \leq d \leq T_2$ , где  $T_1$  и  $T_2$  известны. Вычисляют оценки для взаимокорреляционной функции  $r_{yu}(\cdot)$  по дискретной информации

$$\hat{r}_{yu}(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y(k)u(k-t), \quad t = T_1 - p, \quad T_1 - p + 1, \dots, T_2 - p. \quad (7)$$

Определяют оценку  $\hat{d}$  в соответствии с условием:

$$|\hat{r}_{yu}(t)| < \varepsilon, \quad t < \hat{d} - p, \quad |\hat{r}_{yu}(\hat{d} - p)| \gg \max\{|\hat{r}_{yu}(t)|, t = T_1 - p, \dots, \hat{d} - p - 1\}$$

где  $\varepsilon$  - соответствующим образом выбранное малое положительное число.

Для выбора объема необходимых данных может быть реализовано следующее эмпирическое правило  $\Delta T \cdot N > 10T_m$ , где  $\Delta T$  соответствует интервалу дискретности и  $T_m$  определяет главную постоянную времени для идентифицируемой системы. Очевидно, что для того, чтобы обеспечить требуемый результат процедуры идентификации, объем дискретных данных должен возрастать соответственно при увеличении отношения сигнал-шум.

Тогда можно реализовать следующий алгоритм оценки запаздывания и идентификации параметров системы. Из (7) могут быть определены рекуррентные формулы для вычисления корреляционных функций

$$\hat{r}_{yu}(t, k+1), \quad t = T_1 - p, \quad T_1 - p + 1, \dots, T_2 - p. \quad (8)$$

Определяется оценка  $\hat{d}_{k+1}$  с использованием условий

$$|\hat{r}_{yu}(t, k+1)| < \varepsilon_{k+1}, \quad t < \hat{d}_{k+1} - p, \quad (9)$$

$$|\hat{r}_{yu}(\hat{d}_{k+1} - p, k+1)| \gg \max\{|\hat{r}_{yu}(t, k+1)|, t = T_1 - p, \dots, \hat{d}_{k+1} - p - 1\}, \quad (10)$$

где  $\{\varepsilon_k\}$  – неотрицательная постоянная последовательность, которая монотонно убывает до нуля.

Затем вычисляется  $\hat{\theta}_{k+1}(\hat{d}_{k+1})$  для фиксированной  $\hat{d} = \hat{d}_{k+1}$ , используя обычный метод наименьших квадратов

$$\hat{\theta}_{k+1}(\hat{d}_{k+1}) = \hat{\theta}_k(\hat{d}_k) + P_{k+1} \varphi_{k+1, \hat{d}_{k+1}} [y(k+1) - \varphi_{k+1, \hat{d}_{k+1}}^T \hat{\theta}_k(\hat{d}_k)], \quad (11)$$

$$P_{k+1} = P_k - [1 + \varphi_{k+1, \hat{d}_{k+1}}^T P_k \varphi_{k+1, \hat{d}_{k+1}}]^{-1} P_k \varphi_{k+1, \hat{d}_{k+1}} \varphi_{k+1, \hat{d}_{k+1}}^T P_k. \quad (12)$$

Упомянутые шаги (8)-(12) повторяются до тех пор, пока не будет выполнен один из критериев останова решения.

Приведенные устойчивые рекуррентные алгоритмы позволяют повысить точность процедуры идентификации динамических объектов управления с запаздыванием, находящихся под воздействием случайных процессов и помех.

Здесь также рассмотрены вопросы устойчивого оценивания значения постоянного запаздывания в динамических системах и представления линейных дискретных систем с запаздыванием в виде систем без запаздывания с расширенными векторами состояний. Приведенные итерационные алгоритмы позволяют повысить точность вычисления величин запаздываний в уравнении динамики объекта и качественные показатели процессов управления.

Третья глава диссертации **«Разработка алгоритмов адаптивного управления технологическими объектами с запаздыванием»** посвящена разработке алгоритмов синтеза адаптивной системы для линейного объекта с запаздыванием по управлению, оптимального управления системами с запаздыванием с использованием блочно импульсных функций, устойчивых алгоритмов адаптивного управления с эталонной моделью, адаптивного управления объектами с запаздыванием в управлении.

Одним из возможных способов построения адаптивных систем является использование систем управления с неявной эталонной моделью, позволяющих снизить требования к основному контуру управления и к

информации об измеряемых параметрах, а именно в такой системе гораздо проще спроектировать систему управления с не полностью измеряемым вектором состояния объекта. Кроме того, после настройки параметров управляющего устройства качество переходных процессов близко к некоторому эталонному переходному процессу, определяемому неявной эталонной моделью.

Будем рассматривать динамический объект с запаздыванием по управлению, описываемый следующими уравнениями:

$$x_{k+1} = A_k \cdot x_k + B_k \cdot u_{k-\tau} + \sigma; \quad u_s = \psi_s, \quad s \in [-\tau, 0]; \quad y_k = C \cdot x_k, \quad (13)$$

где  $\sigma = a(x_k, \xi_k) \cdot x_k + b(x_k, \xi_k) \cdot u_{k-\tau} + f_k$  – нелинейная часть объекта в совокупности с вектором возмущений.

Закон управления объектом (13) зададим в виде:

$$u_k = g_k - D \cdot \tilde{x}_k + B_0^+ \cdot \mu_k - B_0^+ \cdot K_a \cdot \tilde{x}_k - B_0^+ \cdot K_b \cdot u_k, \quad (14)$$

где  $g_k$  – вектор задающих воздействий;  $D$  – постоянная матрица линейных модальных обратных связей;  $B_0^+ = (B_0^T B_0)^{-1} B_0^T$  – левая псевдообратная к  $B_0$  матрица размером  $l \times n$ ;  $\mu_k$  –  $n$ -мерный вектор сигналов адаптации объекта:  $\tau \cdot \mu_{k+1} + \mu_k = z$ , где  $\tau = \text{diag}(\tau_1, \dots, \tau_r)$ .

Полагая известным линейное стационарное приближение объекта без учета запаздывания, имеющее вид  $x_{k+1} = A_0 \cdot x_k + B_0 \cdot u_k$ , для которых выполняются условия управляемости и наблюдаемости, перепишем уравнение (13) в виде:

$$x_{k+1} = (A_0 + K_a) \cdot x_k + (B_0 + K_b) \cdot u_k + \sigma(x_k, k), \quad (15)$$

где  $\sigma(x_k, k) = \sigma$  – остаточный вектор, учитывающий нелинейность объекта и влияние внешних возмущений.

Пусть программное движение  $x_k^M$  системы (15) удовлетворяет уравнению неявно заданной эталонной модели:

$$x_{k+1}^M = A^M \cdot x_k^M + B^M \cdot g_k, \quad x_{k_0}^M = x_0^M, \quad (16)$$

где  $g_k$  –  $m$ -мерный вектор задающих воздействий;  $A^M = A_0 - B_0 \cdot D$ ;  $B^M = B_0$ .

Требуется синтезировать такой закон управления  $u_k$ , который обеспечил бы сходимость движения  $x_k$  системы (15) в некоторую  $\delta_0$  – окрестность относительно эталонного движения  $x_k^M$ . Для этого требуется обеспечить выполнение неравенства:  $\|x_k - x_k^M\| = \|\tilde{e}_k\| \leq \delta_0 \quad \forall t \geq t_a$ , где  $\tilde{e}_k$  –  $n$ -мерный вектор ошибки управления;  $t_a$  – время адаптации.

Уравнение состояния исходного объекта (15) с учетом алгоритма управления (14) запишется в виде:

$$x_{k+1} = A_0 \cdot x_k + K_a \cdot x_k + (B_0 + K_b) [g_k - D \cdot \tilde{x}_k + B_0^+ \cdot \mu_k - B_0^+ \cdot K_a \cdot \tilde{x}_k + B_0^+ \cdot K_b \cdot u_k] + \sigma. \quad (17)$$

На основании (17) с учетом (16) уравнение ошибки управления перепишем в виде:

$$\begin{aligned} \tilde{e}_{k+1} = & A_0 \cdot x_k + K_a \cdot x_k + B_0 \cdot g_k - B_0 \cdot D \cdot \tilde{x}_k - B_0 \cdot B_0^+ \cdot K_a \cdot \tilde{x}_k - \\ & - A^M \cdot x_k^M - B^M \cdot g_k^M + \sigma + B_0 \cdot B_0^+ \cdot \mu_k - B_0 \cdot B_0^+ \cdot K_b \cdot u_k + K_b \cdot u_k. \end{aligned} \quad (18)$$

Выделим в выражении (18)  $e_k = x_k - \tilde{x}_k$  – ошибку оценивания переменных состояния объекта без запаздывания второй настраиваемой моделью:

$$\tilde{x}_{k+1} = A_k \cdot \tilde{x}_k + G \cdot C \cdot e_k - B_k \cdot u_k + \sigma.$$

При выполнении цели идентификации  $\|e_k\| \leq \varepsilon_0, \forall t \geq t_M$  будет выполняться и цель идентификации  $\lim_{k \rightarrow k_M} \|e_k\| = \lim_{k \rightarrow k_M} \|x_k - \tilde{x}_k\| \leq \varepsilon_0, \forall k \geq k_M$ , где  $k_M \rightarrow k_y, k_y$  – время управления объектом.

В этом случае выражение (18) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned} \tilde{e}_{k+1} = & (A_0 - B_0 \cdot D) \cdot x_k + B_0 \cdot g_k + B_0 \cdot D \cdot e_k - A^M \cdot x_k^M - B^M \cdot g_k^M + \sigma + B_0 \cdot B_0^+ \cdot \mu_k + \\ & + B_0 \cdot B_0^+ \cdot K_a \cdot e_k + (I - B_0 \cdot B_0^+) \cdot K_a \cdot x_k + (I - B_0 \cdot B_0^+) \cdot K_b \cdot u_k. \end{aligned} \quad (19)$$

Если выполняются условия согласованности по управлению  $(I - B_0 \cdot B_0^+) \cdot (A^M - A_0) = 0$  и  $(I - B_0 \cdot B_0^+) \cdot B^M = 0$ , то получаем соотношения:

$$A_0 - B_0 \cdot D = A^M \text{ и } B_0 = B^M. \quad (20)$$

С учетом соотношений (20) выражение (19) перепишем в виде:

$$\tilde{e}_{k+1} = A^M \cdot \tilde{e}_k + B_0 \cdot D \cdot e_k + \sigma + B_0 \cdot B_0^+ \cdot \mu_k + B_0 \cdot B_0^+ \cdot K_a \cdot e_k,$$

причем элементы матрицы  $D$  рассчитываются из соотношений (20).

Вводя обозначение  $\zeta_k = B_0 \cdot D \cdot e_k + \sigma + B_0 \cdot B_0^+ \cdot \mu_k + B_0 \cdot B_0^+ \cdot K_a \cdot e_k$ , окончательно получим уравнение для ошибки управления:  $\tilde{e}_{k+1} = A^M \cdot \tilde{e}_k + \zeta_k$ . В этих условиях согласованность по идентификации  $(I - L \cdot L^+) \cdot \sigma = 0$  выполняется, т.е. имеет место асимптотическая устойчивость процесса оценивания  $e_k \rightarrow 0$  при  $t_k \rightarrow \infty$ , где  $L = P^{-1} C^T$ ,  $P$  – симметричная положительно определенная матрица. Пусть к тому же выполнено условие согласованности по адаптации вида:  $(I - B_0 \cdot B_0^+) \cdot \sigma = 0$ . В этом случае система асимптотически устойчива и достигается цель управления вида  $\lim_{k \rightarrow \infty} \|\tilde{e}_k\| = 0$ .

В рассматриваемом случае целесообразно использовать метод Эрмита, в котором псевдообратная матрица определяется на основе выражения  $B_0^+ = B_0^T M_R^- B_0^T$ , где  $M = (B_0 B_0^T)^2$ , а  $M_R^- = F^T R E$  – рефлексивная  $g$ -обратная (обобщенная обратная) для матрицы  $M$ , матрицы  $M$  и  $R$  в данном случае эрмитовы, причем  $R$  – диагональная матрица с  $r$  единицами и прочими – нулями на главной диагонали.

Приведенные устойчивые алгоритмы синтеза системы адаптивного управления объектами с запаздыванием позволяют осуществлять программное движение по желаемому закону изменения во времени вектора состояния и обеспечивают сходимость движения системы в некоторую окрестность относительно эталонного движения.

Рассмотрим также задачу синтеза алгоритмов адаптации для объектов, имеющих запаздывание только в управлении. Объекты данного класса имеют свои особенности, заключающиеся в том, что их нельзя охватывать глубокой отрицательной связью, так как система становится неустойчивой. Особенно трудно управлять такими объектами в условиях неопределенности, когда объект неустойчив при нулевом управляющем воздействии.

Предположим, что объект управления описывается уравнением (13). Требуется, чтобы вектор выходных параметров по истечении некоторого времени был близок к некоторому  $s$ -мерному вектору задающих воздействий  $g_0$ . Учитывая это, целевые условия зададим в виде следующего неравенства:

$$\eta_q = (y_k - g_0)^T K (y_k - g_0) \leq \varepsilon, \quad (21)$$



где  $K = K^T > 0$ ,  $\varepsilon$  – положительное число, определяющее требуемую точность обработки задающего воздействия. Для получения структуры управляющего устройства будем использовать выражение:

$$y_{k+1} = \sum_{i=0}^{n-1} A_i^* y_{k-i} + \sum_{i=0}^z B_i^* u_{k-i-1} + \sum_{i=0}^p D_i w_{k-i}. \quad (22)$$

Запишем целевые условия (21) для момента времени  $k+1$ :

$$(y_{k+1} - g_0)^T K (y_{k+1} - g_0) \leq \varepsilon \quad (25)$$

и введем матрицу  $C_0$  и вектор  $v_k$ :  $C_0 = [A_0 \cdots A_{n-1} \cdots B_{l+z} \cdots -1]$ ,  $v_k = \text{col}[y_k, \dots, y_{k-n+1}, \dots, u_{k-1}, \dots, u_{k-z-i} g_0]$ , тогда целевые условия (25) примут вид:

$$[B_0 u_k + C_0 v_k + v_k]^T K [B_0 u_k + C_0 v_k + v_k] \leq \varepsilon, \quad (26)$$

и закон управления, обеспечивающий выполнение (26) при  $v_k \equiv 0$ , будет иметь вид:

$$B_0 u_k = f_k, \quad (27)$$

или  $u_k = B_0^+ f_k = C_* v_k$ , где  $B_0^+$  – псевдообратная матрица,  $f_k = -C_0 v_k$ .

Система (27) в общем случае может быть несовместной. Пусть  $u_k$  – нормальное псевдорешение этой с.л.а.у. для  $f_k = \bar{f}_k \in R^m$ , т. е. такой элемент из множества  $Z_0 \equiv \{u_k \in R^n : \|\bar{B}_0 u_k - \bar{f}_k\| = \inf\}$ , для которого  $\|\bar{u}_k\| = \inf\{\|u_k\| : u_k \in Z_0\}$ .

Условия аппроксимации примем в виде:  $B_{0,h} \in \mathcal{U}$ ,  $\|B_{0,h} - \bar{B}_0\| \leq h$ ,  $f_{k,\delta} \in R^m$ ,  $\|f_{k,\delta} - \bar{f}_k\| \leq \delta$ , где  $h$  и  $\delta$  – заданные точности приближенных данных; в этих условиях элемент  $u_{k,h\delta} \equiv B_{0,h}^+ f_{k,\delta}$ , вообще говоря, не будет сходиться к  $\bar{u}_k$  при  $h, \delta \rightarrow 0$ .

Для решения уравнения (27) будем использовать метод минимальной псевдообратной матрицы, который заключается в решении экстремальной задачи: найти матрицу  $\tilde{B}_{0,h} \in \mathcal{U}$  такую, что  $\|\tilde{B}_{0,h}^+\|_* = \inf\{\|B_0^+\|_* : B_0 \in \mathcal{U}, \|B_0 - B_{0,h}\| \leq h\}$ , и в построении затем элемента  $u_{k,\eta} \equiv \tilde{B}_{0,h}^+ f_{k,\delta}$ , принимаемого в качестве приближения к  $\bar{u}_k$ . Здесь  $\|\cdot\|_*$  – евклидова норма в пространстве матриц  $\mathcal{U}^*$  размерности  $n \times m$ . Для любой матрицы  $B_0$ , имеющей сингулярное разложение  $B_0 = URV^T \in \mathcal{U}$ ,  $R = \text{diag}(\rho_1, \dots, \rho_M)$ , справедливы соотношения:

$$\sum_{k=1}^M (\rho_k - \bar{\rho}_k)^2 \leq \|B_0 - \bar{B}_0\|^2, \quad \|B_0^+\|_*^2 = \sum_{k=1}^M \Theta(\rho_k^2) = \sum_{k=1}^{r(B_0)} \rho_k^{-2}; \quad r(B_0) \equiv \text{rang} B_0.$$

где  $\Theta(\rho) \equiv \{\rho^{-1} \text{ при } \rho \neq 0; 0 \text{ при } \rho = 0\}$ , найти такие  $\hat{\rho}_1, \dots, \hat{\rho}_M \geq 0$ , что

$$\sum_{k=1}^M \Theta(\hat{\rho}_k^2) = \inf\left\{\sum_{k=1}^M \Theta(\rho_k^2) : \sum_{k=1}^M (\rho_k - \tilde{\rho}_k)^2 \leq h^2; \rho_1, \dots, \rho_M \geq 0\right\}. \quad (28)$$

На основе решения задачи (28) может быть получено приближение  $u_{k,\eta}$  к  $\bar{u}_k$ :  $u_{k,\eta} = V_h \hat{R}_h^+ U_h^T f_{k,\delta}$ ,  $\hat{R}_h^+ = \text{diag}[\Theta(\hat{\rho}_1), \dots, \Theta(\hat{\rho}_M)] \in \mathcal{U}^*$ .

Будем считать, что существует некоторое управление  $u_*$  такое, что при  $u_k = u_*$  всегда выполнено условие  $\|y_{k+1}\| \leq d_*$ ,  $d_* > 0$ , т.е. существует некоторое аварийное управление  $u_*$ , которым пользуются, если контролируемые параметры выходят за допустимые пределы. Учитывая тот факт, что матрица  $C_*$  неизвестна, определим структуру управляющего устройства следующей формулой:  $u_k = u_*$ , если  $\|y_k\| > \delta_1$ ;  $u_k = C_k v_k$ , если  $\|y_k\| \leq \delta_1$ , где  $C_k$  – матрица настраиваемых параметров. Структуру управляющего устройства в этом

случае выберем в виде:  $u_k = \tilde{C}_k \tilde{v}_k$ , если  $\|y_k\| \leq \delta_1$ ,  $u_k = u_*$ , если  $\|y_k\| > \delta_1$ , где  $\tilde{C}_k$  – матрица настраиваемых параметров.

Для построения алгоритма адаптации будем пользоваться следующей методикой. Во-первых, проверим выполнение усиленных целевых условий  $\eta_{k+i} \leq \rho^2 \varepsilon$ ,  $0 < \rho < 1$  при  $C_k = C_*$ . Разложим матрицу  $K$  на сомножители:  $K = (B_0^+)^T H B_0^+$ , где  $H = H^T > 0$ , тогда при  $v_k \equiv 0$ , получим:

$$(-B_0 B_0^+ A_0 v_k - f_k)^T (B_0^+)^T H B_0^+ (B_0 B_0^+ f_k - f_k) = B_0^+ f_k - B_0^+ f_k)^T H (B_0^+ f_k - B_0^+ f_k) \leq \rho^2 \varepsilon.$$

Тогда, пользуясь методом рекуррентных целевых неравенств, можно построить следующую процедуру настройки матрицы  $C_k$ :  $C_{k+l} = C_{k+l-1}$ , если  $\eta_{k+l} \leq \varepsilon$ ,  $\|C_{k+l-1} v_{k+l}\| \leq \varphi$ ;  $C_{k+l} = q_* C_{k+l-1} / \|v_{k+l}\| \|C_{k+l-1}\|$ , если  $\eta_{k+l} \leq \varepsilon$ ,  $\|C_{k+l-1} v_{k+l}\| > q$ .

Приведенные алгоритмы оказываются весьма эффективными при решении задач управления многосвязными технологическими процессами с запаздыванием в условиях неопределенности и позволяют повысить качество переходных процессов.

Здесь также рассмотрены вопросы синтеза алгоритмов адаптивной системы для линейного объекта с запаздыванием по управлению и оптимального управления системами с запаздыванием с использованием блочно импульсных функций. При их практической реализации эффективными оказываются вычислительные схемы минимизации функционалов.

В четвертой главе диссертации **«Применение разработанных алгоритмов синтеза систем адаптивного управления к процессу выпаривания раствора аммиачной селитры с запаздыванием»** приводятся результаты применения разработанных алгоритмов синтеза адаптивных систем управления с запаздыванием при автоматизации и управлении конкретным технологическим процессом.

В качестве основных показателей, характеризующих процесс выпарки раствора аммиачной селитры, рассматривались следующие переменные: управляющие параметры  $u = (u_1, u_2, u_3, u_4)$ , где  $u_1$  – расход теплоносителя;  $u_2$  – расход раствора аммиачной селитры на упарку;  $u_3$  – расход упаренного раствора;  $u_4$  – расход пара растворителя; выходные параметры  $y = (y_1, y_2, y_3, y_4)$ , где  $y_1$  – концентрация упаренного раствора;  $y_2$  – температурная депрессия (разности между температурами кипения раствора и растворителя);  $y_3$  – давление в выпарном аппарате;  $y_4$  – уровень раствора внутри выпарного аппарата; неконтролируемые возмущающие воздействия  $w = (w_1, w_2)$ , где  $w_1$  – концентрация раствора аммиачной селитры на входе в аппарат;  $w_2$  – изменения расхода теплоносителя.

Произведенная формализация процесса позволяет выбрать структуру математической модели в следующем виде:

$$x_{k+1} = Ax_k + Dx_{k-\tau} + Bu_k + w_k, \quad (29)$$

$$y_k = Lx_k + v_k, \quad (30)$$

где  $x_k \in R^3$ ;  $u_k \in R^4$ ;  $y_k \in R^4$ . Будем считать, что матрицы  $A, D, B, L$  и векторы  $w_k, v_k$  зависят от вектора неизвестных параметров  $\tilde{\xi}_k \in \Xi$ .

Для получения математической модели проведен промышленный эксперимент в условиях нормального функционирования технологического процесса выпаривания аммиачной селитры на АО «Навоизот».

Необходимые значения времени регистрации и дискретизации реализаций наблюдаемых случайных процессов, оказались соответственно равными:  $T = 45$  минут,  $\Delta t = 0,5$  мин. Были проведены разные серии опытов для наиболее характерных режимов функционирования рассматриваемого процесса, обусловленные изменениями значений концентрации раствора аммиачной селитры на входе в аппарат.

Для идентификации параметров объекта был использован алгоритм типа (5), (6). Параметры объекта оказались следующими:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -4.5 & -6.7 & -2.6 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.5 & 0.1 & 0.5 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.9 & 0 & 1.2 \\ 0 & 0 & 2.7 & 0 \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1.3 \\ 1.5 & 2 & 1.2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (31)$$

Установление адекватности полученных моделей произведено на основе критерия, основанного на использовании зависимости остатков от времени.

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

Рассматриваемый процесс, как было отмечено выше, описывается системой линейных разностных уравнений вида (29), (30). Зададимся структурой регулятора с учетом того, что на систему действует некоторый вектор задающих воздействий  $r \in R^g$ :

$$\dot{x} = C_1^T r + C_2^T x + C_3^T x(t - \tau), \quad (32)$$

где  $C_1, C_2, C_3$  - матрицы настраиваемых параметров регулятора, имеющие размерности  $(g \times w), (n \times w), (n \times w)$ , соответственно.

Необходимо синтезировать такие дискретные алгоритмы настройки матриц  $C_1, C_2, C_3$ , чтобы процессы, протекающие в системе (29), (32) после окончания настройки были близки к процессам в эталонной модели  $\dot{x}_M = A_M x_M + D_M x_M(t - \tau) + B_M r$ , где  $x_M \in R^n; r \in R^g$ . Матрицы  $A, D, B$  можно представить в виде:  $A = A_M - B v_{20}^T, D = D_M - B v_{30}^T, B_M = B v_{10}^T$ , где  $v_{10}, v_{20}, v_{30}$  - некоторые неизвестные матрицы.

Исходя из качества функционирования системы после окончания процесса адаптации, задавались следующие значения параметров эталонной модели:

$$A_M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -6 & -11 & -6 \end{bmatrix}, D_M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.5 & -0.5 & -0.5 \end{bmatrix}, B_M = \begin{bmatrix} 0.55 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1.3 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (33)$$

При решении задачи стабилизации коэффициенты регулятора в дискретно-непрерывной адаптивной системе управления (ДНАДСУ) настраивались в соответствии с дискретными алгоритмами адаптации:

$$\begin{aligned} C_{1i}(t_{k+1}) &= C_{1i}(t_k) - \Delta t_{k+1} \left[ \tilde{g}_i^T (x(t_k) - x_M(t_k)) P_1 r + \alpha_1 C_{1i}(t_k) \right] \\ C_{2i}(t_{k+1}) &= C_{2i}(t_k) - \Delta t_{k+1} \left[ \tilde{g}_i^T (x(t_k) - x_M(t_k)) P_2 x(t_k) + \alpha_2 C_{2i}(t_k) \right] \\ C_{3i}(t_{k+1}) &= C_{3i}(t_k) - \Delta t_{k+1} \left[ \tilde{g}_i^T (x(t_k) - x_M(t_k)) P_3 x(t_k - \tau_k) + \alpha_3 C_{3i}(t_k) \right] \end{aligned}$$

параметры которых имели следующие значения:

$$G = P_1 = P_2 = P_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 1 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}; \quad \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0.1; \quad \Delta t_{k+1} \equiv \Delta t = 1c; \quad (34)$$

$$C_1(0) = C_2(0) = C_3(0) = 0.$$

На основе приведенного алгоритмического обеспечения можно предложить следующую блок-схему (рис.1).

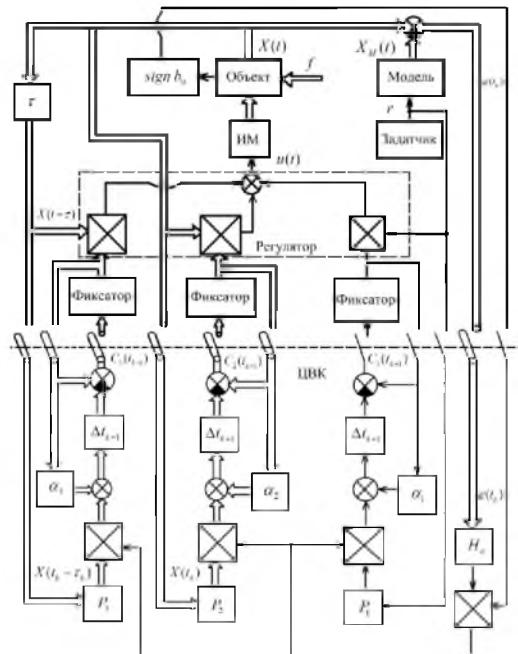


Рис. 1. Блок-схема дискретно-непрерывной адаптивной системы автоматического управления с явной эталонной моделью для процесса выпаривания аммиачной селитры с запаздыванием по состоянию.

Как видно из блок-схемы системы на цифровой вычислительный комплекс (ЦВК) возложена функция просчета алгоритмов адаптации, т.е. корректировка параметров регулятора, которая осуществляется в дискретные моменты времени  $t_{k+1}$ . После расчета в ЦВК новые значения параметров регулятора запоминаются в фиксаторах до следующего момента времени, в который снова будет осуществляться ввод измерений в ЦВК и проводиться новая корректировка значений коэффициентов регулятора, которые затем подаются в регулятор. Сигналы с выходов фиксаторов, несущие информацию о значении настраиваемых параметров регулятора, являются кусочно-непрерывными функциями времени и имеют ступенчато-непрерывный вид.

На рис. 2 представлены графики переходных процессов в синтезированных ДНАдСУ и ДАдСУ для случая, когда параметры объекта имели значения (31), (33) и

$$\tau_1 = 15c; \quad \varphi(s) = 0; \quad s \in [-\tau, 0]; \quad r^T = (1; 0; 0). \quad (35)$$

На объект действовала помеха типа П ( $f_0^T = (0.1; -0.1; 0.1)$ ). Как видно из графиков переходных процессов (рис 2 (а, б, в)), синтезированная ДНАдСУ является Д адаптивной в заданном классе адаптации. Переходные процессы в системе являются колебательными, время регулирования равно  $t_{рег.1} = 15.2 мин$ ,  $t_{рег.2} = 42c$ ,  $t_{рег.3} = 60c$ .

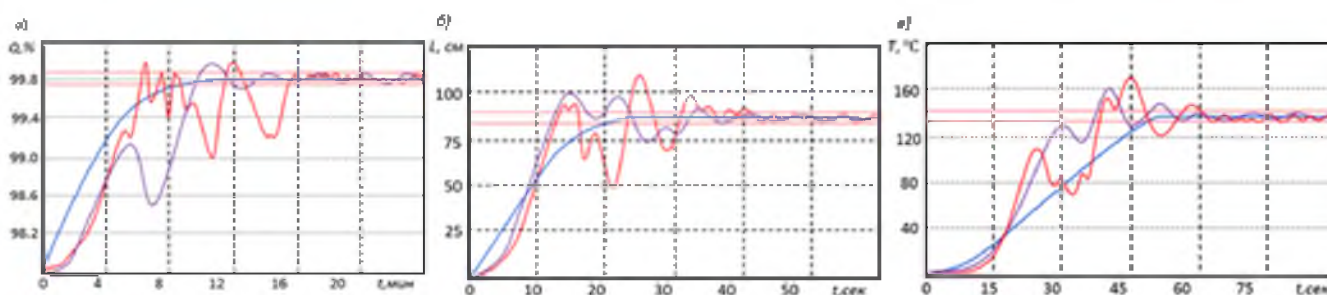


Рис 2. Графики переходных процессов в ДНАдСУ, ДАдСУ и эталонной модели: концентрация упаренного раствора (а), уровень (б) и температура раствора (в) внутри выпарного аппарата.

На рис. 2 (а, б, в) также приведены графики переходных процессов в моделируемой ДАдСУ, когда регулятор также является дискретным. Параметры объекта управления имели значения (31), (33) и (35), а на объект действовала помеха типа I ( $\tilde{f}=0.1$ ). Параметры дискретных алгоритмов адаптации имели значения (34), где шаг дискретизации был равен  $\Delta t = 0,1c$ . Как видно из графиков переходных процессов синтезированная ДАдСУ является Д адаптивной в заданном классе адаптации. Переходные процессы в системе являются колебательными, время регулирования равно  $t_{рег.1} = 13,2мин$ ,  $t_{рег.2} = 35c$ ,  $t_{рег.3} = 52,8c$ .

Таким образом, разработанная адаптивная система управления процессом выпаривания раствора аммиачной селитры обеспечивает лучшее качество регулирования и обладает достаточной для рассматриваемого процесса точностью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основе концепций системного анализа, теории адаптивных систем управления, динамической фильтрации и методов решения некорректных задач разработаны конструктивные алгоритмы адаптивного синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами с запаздыванием.

В итоге получены следующие научные результаты:

1. Предложены алгоритмы устойчивого оценивания значения запаздывания в динамических системах управления. Приведенные итерационные алгоритмы позволяют повысить точность вычисления величин запаздываний в уравнении динамики объекта и качественные показатели процессов управления.
2. Разработаны устойчивые алгоритмы идентификации объектов управления с запаздыванием на основе реализаций входных и выходных сигналов для различных значений глубины памяти алгоритма. Приведенные алгоритмы позволяют осуществлять устойчивую идентификацию объектов управления с запаздыванием с использованием концепций псевдообращения.
3. Разработаны устойчивые рекуррентные корреляционные алгоритмы идентификации управляемых объектов с запаздыванием на основе регуляризованного метода наименьших квадратов. Приведенные

устойчивые рекуррентные алгоритмы позволяют повысить точность процедуры идентификации динамических объектов управления с запаздыванием, находящихся под воздействием случайных процессов и помех.

4. Приведены алгоритмы преобразования линейных объектов с запаздыванием к виду объектов без запаздывания с расширенными векторами состояний. Приведенные алгоритмы позволяют формировать разнообразные алгоритмы решения задач идентификации управляемых объектов с запаздыванием.
5. Предложены алгоритмы синтеза адаптивной системы для линейного объекта с запаздыванием по управлению. Полученные алгоритмы позволяют повысить качественные показатели процессов управления на основе ведения дополнительного контура.
6. Разработаны алгоритмы оптимального управления системами с запаздыванием с использованием блочно-импульсных функций. Приведенные алгоритмы позволяют повысить быстродействие системы управления используя блочно-импульсные аппроксимации для вектора состояния и ее производной.
7. Разработаны устойчивые алгоритмы адаптивного управления с эталонной моделью на основе устойчивого псевдообращения матриц методом Эрмита с использованием двухстороннего умножения на невырожденные матрицы. Приведенные устойчивые алгоритмы синтеза системы адаптивного управления объектами с запаздыванием позволяют осуществлять программное движение по желаемому закону изменения во времени вектора состояния и обеспечивают сходимость движения системы в некоторую окрестность относительно эталонного движения.
8. Разработаны устойчивые алгоритмы адаптивного управления объектами с запаздыванием в управлении на основе метода минимальной псевдообратной матрицы и сингулярного разложения. Приведенные алгоритмы оказываются весьма эффективными при решении задач управления многосвязными технологическими объектами с запаздыванием и позволяют повысить качество переходных процессов.
9. На основе разработанных алгоритмов предложена адаптивная система управления процессом выпаривания раствора аммиачной селитры с запаздыванием по состоянию и предложена блок-схема дискретно-непрерывной адаптивной системы автоматического управления с явной эталонной моделью.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/30.12.2020.T.03.02  
ON THE ADMISSION OF SCIENTIFIC DEGREES AT  
THE TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

---

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

**KARIMOV DAVRON RAKHMATOVICH**

**ALGORITHMS FOR SYNTHESIS OF THE ADAPTIVE CONTROLLING  
DELAYED TECHNOLOGICAL OBJECTS**

**05.01.08 - Automation and control of technological processes and manufactures  
(technical science)**

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

**Tashkent – 2020**

The theme of doctor of philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number №B2017.3.PhD/T311.

The dissertation has been prepared at Tashkent State Technical University.

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

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

**Official opponents:** **Gulyamov Shukhrat Manapovich**  
Doctor of Technical Sciences, Professor

**Kholmatov Davronbek Abdalimovich**  
Candidate of technical Sciences, associate Professor


**Leading organization:** **Navoi state mining institute**

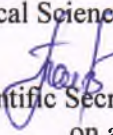
Defense of dissertation will take place in «14» 10 2020 at 12<sup>00</sup> o'clock at a meeting of the scientific council DSc.03/30.12.2020.T.03.02 at the Tashkent state technical university (Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: (99871) 246-46-00; fax: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu\_info@tdtu.uz).

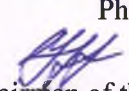
The doctoral dissertation could be reviewed at the Information-resource center of Tashkent state technical university (registration number 163). Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: (99871) 246-03-41.

Abstract of dissertation sent out on «8» 10 2020 year.  
(mailing report №22, on «19» 09 2020 year).



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

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

  
**J.U. Sevinov**  
Vise-Chairman of the Academic Seminar  
under the Scientific Council on awarding scientific degrees,  
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor



## INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

**The aim of the research work** is to develop algorithms for the stable synthesis of adaptive object management systems with delay and computational schemes for their practical implementation.

**The object of the research** is adaptive control systems of objects with a delay.

**Scientific novelty of the research work is as follows:**

stable algorithms for identifying managed objects with a delay are developed based on implementations of input and output signals for different values of the algorithm's memory depth;

stable recurrent correlation algorithms for identification of controlled objects with a delay based on the regularized least squares method are developed;

stable adaptive control algorithms with a reference model based on stable pseudo-rotation of matrices by the Hermite method using two-way multiplication by non-degenerate matrices are developed;

stable algorithms for adaptive control of objects with a delay in control are developed based on the method of minimal pseudo-inverse matrix and singular value decomposition.

**Implementation of the research results.** The developed algorithms for the synthesis of adaptive control systems for technological objects with a delay are implemented at “Navoi-Azot” JSC in the following forms:

developed stable adaptive control algorithms with a reference model based on stable pseudo-circulation of matrices by Hermite method using two-way multiplication by non-degenerate matrices (reference of JSC “O‘zkiyosanoat” № 14-2929 dated June 30, 2020). As a result, the program motion is carried out according to the desired law of change in time of the state vector and the convergence of the system motion to a certain neighborhood relative to the reference motion is ensured;

developed stable algorithms for adaptive control of objects with a delay in control based on the method of minimal pseudo-return matrix and singular expansion (reference of JSC “O‘zkiyosanoat” № 14-2929 dated June 30, 2020). Algorithms allow you to stabilize the technological modes of the process of evaporation of ammonium nitrate solution.

**The structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, list of references and appendices. The dissertation volume is 111 pages.

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

**I бўлим (Часть I; Part I)**

1. Каримов Д.Р. Алгоритмы идентификации динамических объектов управления с запаздыванием // Научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». Ташкент, ТашГТУ. №1(43), 2012. - С.86-89. (05.00.00; №12)
2. Каримов Д.Р. Алгоритмы синтеза системы управления динамическими объектами с запаздыванием // Научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». Ташкент, ТашГТУ. №4(46), 2012. - С.89-91. (05.00.00; №12)
3. Каримов Д.Р. Устойчивые алгоритмы идентификации объектов управления с запаздыванием на основе реализаций входных и выходных сигналов // Научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». Ташкент, ТашГТУ. №4(92), 2016. -С.92-96. (05.00.00; №12)
4. Igamberdiev H.Z., Karimov D.R. Sustainable Evaluation of the Value of Permanent Delay in Dynamic Systems // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology (website:www.ijarset.com, ISSN: 2350-0328, India), Vol. 5, Issue 11, November 2018. –PP. 7336-7339. (05.00.00; №8)
5. Игамбердиев Х.З., Каримов Д.Р. Устойчивые алгоритмы адаптивного управления объектами с запаздыванием в управлении // Научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». Ташкент, ТашГТУ. №1, 2019. -С.58-62. (05.00.00; №12)
6. Igamberdiev H.Z., Kamalov N.Z., Karimov D.R. Sustainable Algorithms of Adaptive Management of Lagged Objects // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology (website:www.ijarset.com, ISSN: 2350-0328, India), Vol. 6, Issue 1, January 2019. –PP. 7901-7904. (05.00.00; №8).

**II бўлим (Часть II; Part II)**

7. Каримов Д.Р. Алгоритмы синтеза системы управления объектами с запаздыванием // Материалы Республиканской научно-технической конференции «Современные технологии и инновации горно-металлургической отрасли». - Навои 14-15 июня 2012 г., с. 279.
8. Sevinov J.U., Holkhodjaev B.A., Karimov D.R. Antijamming algorithm of adaptive authentication of management objects // Seventh World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation “WCIS- 2012”. Tashkent, Volume I, 2012. -pp. 325-328.
9. Севинов Ж.У., Каримов Д.Р. Алгоритмы синтеза системы управления объектами с запаздыванием // Материалы Республиканской научно-

- технической конференции «Современные техника и технологии горно-металлургической отрасли и пути их развития». - Навои 14-16 мая 2013 г., с. 492.
10. Игамбердиев Х.З., Каримов Д.Р. Регулярный алгоритм параметрической идентификации объекта с запаздыванием // Материалы Республиканской научно-технической конференции «Горно-металлургический комплекс: достижения, проблемы и перспективы инновационного развития». - Навои 15-16 ноября 2016 г., с. 352.
  11. Каримов Д.Р. Устойчивые алгоритмы идентификации величины постоянного запаздывания в динамических объектах управления // “Динамик системаларнинг долзарб муаммолари ва уларнинг тадбиқлари” Республика илмий конференцияси (Хорижий олимлар иштирокида) Тошкент шаҳридаги Турин политехника Университети. 2017 йил 1-3 май, 309 бет.
  12. Игамбердиев Х.З., Каримов Д.Р. Регулярные алгоритмы идентификации величины запаздывания в управляемых объектах // Материалы IX-Международной научно-технической конференции горно-металлургический комплекс: «Достижения, проблемы и современные тенденции развития горно-металлургического комплекса». Навои. 12-14 июня, 2017. –С. 471.
  13. Karimov D.R. Iterative algorithms for estimating the value of the constant lag in dynamic systems // Tenth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation “WCIS- 2018” 25-26 October, Tashkent, Uzbekistan, - PP.441-444.
  14. Каримов Д.Р. Алгоритмы оценивания величины постоянного запаздывания в системах управления // Международная научно-техническая конференция: «Проблемы повышения эффективности работы современного производства и энерго-ресурсосбережения». – Андижан, 3-4 октября, 2018. Том 1. –С. 1091-1092.
  15. Igamberdiev H. Z., Yusupbekov A. N., D. R. Karimov, Shukurova O.P. Stable Algorithms for Adaptation of Objects with Control Delay. ICSCCW 2019: 10th International Conference on Theory and Application of Soft Computing, Computing with Words and Perceptions - ICSCCW-2019. 735-740 с. DOI [https://doi.org/10.1007/978-3-030-35249-3\\_95](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35249-3_95)
  16. Каримов Д.Р. Устойчивые алгоритмы синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами с запаздыванием // Сборник докладов Республиканской научно-технической конференции «Инновационные идеи в разработке информационно-коммуникационных технологий и программных обеспечений». – Самарканд, 15-16 мая 2020. – С. 74-76.
  17. Игамбердиев Х.З., Каримов Д.Р, Мамиров Ў.Ф. Кечикишли технологик объектларни бошқаришда кириш ва чиқиш сигналларини реализация қилиш асосида адаптив идентификациялаш масаласи учун дастурий таъминот // ЭҲМ учун яратилган дастурнинг расмий рўйхатдан ўтказилганлиги тўғрисидаги гувоҳнома. №DGU 08909, 29.08.2020 й.

Автореферат "Техника фанлари ва инновация" илмий журнали тахририятида тахрирдан 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 табоги: 3. Адади 100. Буюртма № 5.

«Тошкент кимё-технология институти» босмаҳонасида чоп этилди.  
100170, Тошкент, Навоий кўчаси, 32-уй.