

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

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**МАМИРОВ УКТАМ ФАРХОДОВИЧ**

**НОАНИҚ ДИНАМИК ОБЪЕКТЛАРНИ АДАПТИВ БОШҚАРИШ  
ТИЗИМЛАРИНИ МУНТАЗАМ СИНТЕЗЛАШ УСУЛЛАРИ ВА  
АЛГОРИТМЛАРИ**

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

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

**Тошкент – 2021**

**Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации**

**Contents of the Doctoral (DSc) Dissertation Abstract**

**Мамиров Уктам Фарходович**

Ноаниқ динамик объектларни адаптив бошқариш тизимларини  
мунтазам синтезлаш усуллари ва алгоритмлари ..... 3

**Мамиров Уктам Фарходович**

Методы и алгоритмы регулярного синтеза систем адаптивного  
управления неопределенными динамическими объектами ..... 29

**Mamirov Uktam Farkhodovich**

Methods and algorithms for regular synthesis of adaptive control systems  
for uncertain dynamic objects ..... 55

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ  
List of published works .....59

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

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**МАМИРОВ УКТАМ ФАРХОДОВИЧ**

**НОАНИҚ ДИНАМИК ОБЪЕКТЛАРНИ АДАПТИВ БОШҚАРИШ  
ТИЗИМЛАРИНИ МУНТАЗАМ СИНТЕЗЛАШ УСУЛЛАРИ ВА  
АЛГОРИТМЛАРИ**

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

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

**Тошкент – 2021**

Докторлик (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2021.2.DSc/T440 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.ziyounet.uz](http://www.ziyounet.uz)) joyлаштирилган.

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

**Расмий оппонентлар:** **Марахимов Аважон Рахимович**  
техника фанлари доктори, профессор

**Назаров Улугбек Султанович**  
техника фанлари доктори, профессор

**Файзиматов Шухрат Нуманович**  
техника фанлари доктори, профессор

**Етакчи ташкилот:** «Химвавтоматика» МЧЖ ҚҚ

Диссертация змояси Тошкент давлат техника университети ҳузуридаги DSc.03/30.12.2019.T.03.02 рақамли Илмий кенгашнинг 2021 йил «24» 11 соат 10<sup>23</sup> даги мажлисида бўлиб ўтди. (Манзил: 100095, Тошкент шаҳри, Университет кўчаси, 2. Тел.: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: [tstu\\_info@edu.uz](mailto:tstu_info@edu.uz)).

Диссертация билан Тошкент давлат техника университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (226 рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100095, Тошкент шаҳри, Университет кўчаси, 2. Тел.: (99871) 207-14-70).

Диссертация автореферати 2021 йил «12» 11 кuni тарқатилди.  
(2021 йил «03» 11 даги 16 рақамли реестр баённомаси).



*[Signature]* **Н.Р.Юсупбеков**  
Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш раиси,  
т.ф.д., профессор, академик

*[Signature]* **У.Т.Муҳамедханов**  
Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш илмий котиби,  
техника фанлари доктори, профессор

*[Signature]* **Ж.У.Севинов**  
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш  
кошидаги Илмий семинар раис ўринбосари,  
т.ф.д., доцент

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

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Жаҳонда ҳозирги вақтда автоматлаштириш масалаларини ҳал қилишда тезкор бошқариш, бошқариш контурларидаги кўплаб ўзаро таъсирли ва ўзаро боғлиқли ўрнатилган параметрларни назорат қилиш ва ушлаб туришни талаб қилувчи технологик жараёнларни такомиллашган бошқариш тизимларини яратишга катта эътибор қаратилмоқда. Бу йўналишда дунёнинг етакчи мамлакатларида маълум ютуқларга эришилган бўлиб, уларда ишлаб чиқарилаётган маҳсулот сифатини янада ошириш учун бошқариш усуллари ва воситалари ишлаб чиқилмоқда ва такомиллаштирилмоқда. Бироқ, реал автоматлаштириш объектларида бошқариш жараёнларининг сифатини сезиларли даражада пасайтирадиган, ҳисобга олинмайдиган параметрик, структуравий, функционал ва бошқа турдаги ноаниқликлар мавжуд. Бу борада, ноаниқликлар шароитида технологик жараёнларнинг сифат кўрсаткичларини ошириш имконини берадиган адаптив бошқариш тизимларини такомиллаштириш муҳим аҳамият касб этмоқда.

Жаҳонда ноаниқликлар шароитида бошқариш объектларининг юқори аниқликга эга бўлган адаптив бошқариш тизимларини ишлаб чиқиш, уларнинг параметрларини узлуксиз идентификациялаш ва ҳолатини баҳолашга йўналтирилган тадқиқотлар олиб борилмоқда. Бу борада, технологик жараён моделининг тасодифий омилларини ўзгариши ва тасодифий ғалаёнларнинг таъсир кўрсатиши шароитларида ишлайдиган бошқариш тизими учун оптимал структурани танлаш ва ишлаб чиқиш масаласини ҳал қилиш долзарб ҳисобланмоқда. Шу жиҳатдан, ҳозирги вақтда ноаниқ динамик объектларни бошқариш тизимларини такомиллаштириш, адаптив бошқариш жараёнларини оптималлаштириш, объектларни идентификациялаш ва баҳолаш осттизимларини синтезлаш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш ҳамда иқтисодиётнинг турли тармоқларига уларни жорий қилиш бўйича тадқиқотларга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Мамлакатимизда технологик жараёнлар ва ишлаб чиқаришни юқори самарали бошқариш тизимларини яратиш бўйича ишларни самарали ташкил этиш бўйича кенг кўламли чора-тадбирлар олиб борилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан «... миллий иқтисодиётнинг самарадорлигини ошириш, ... иқтисодиётнинг энергия ва ресурс сарфини қисқартириш, ишлаб чиқаришга энергия тежамкор технологияларни жорий этиш, иқтисодиёт тармоқларидаги меҳнат унумдорлигини ошириш, ... иқтисодиёт, ижтимоий соҳа, бошқарув тизимига ахборот-коммуникация технологияларини жорий этиш»<sup>1</sup> вазифалари белгилаб берилган. Мазкур вазифаларни амалга ошириш, жумладан нотўғри қўйилган масалаларни ечишдан фойдаланиб, ноаниқ динамик объектларни адаптив бошқариш тизимларини мунтазам синтезлаш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш муҳим вазифа ҳисобланади.

<sup>1</sup> Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини 2017-2021 йилларда янада ривожлантириш Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги ва 2018 йил 19 феврал ПФ-5349-сон «Ахборот технологиялари ва коммуникациялари соҳасини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари» Фармонлари, 2018 йил 25 октябрдаги ПҚ-3983-сон «Ўзбекистон Республикасида кимё саноатини жадал ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги ва 2019 йил 3 апрелдаги ПҚ-4265-сон «Кимё саноатини янада ислоҳ қилиш ва унинг инвестициявий жозибадорлигини ошириш 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 технологиялар ривожланишининг IV. «Ахборотлаштириш ва ахборот-коммуникация технологияларини ривожлантириш» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

**Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи<sup>2</sup>.** Технологик объектларни адаптив бошқариш тизимларини синтезлашнинг усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқишга йўналтирилган кенг қамровли илмий-тадқиқотлар жаҳоннинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасаларида, жумладан «Honeywell», «Siemens», Massachusetts Institute of Technology, University of California (АҚШ), Kungliga Tekniska högskolan (Швеция), Imperial College London, The University of Edinburgh (Буюк Британия), Technical University Munich, Technical University Darmstadt (Германия), Tokyo Institute of Technology (Япония), Korea Advanced Institute of Science and Technology (Жанубий Корея), «Alstom» (Франция), «Simatek-Energo» (Беларусия), University of Science and Technology of China (Хитой), Н.Э. Бауман номидаги Москва давлат техника университети, РФА Бошқариш муаммолари институти, Санкт-Петербург информатика ва автоматлаштириш институтларида (Россия Федерацияси) олиб борилмоқда.

Ноаниқ динамик объектларни адаптив бошқариш тизимларини синтез қилиш усуллари ва алгоритмларини яратиш ҳамда бошқариш тизимларини такомиллаштиришга оид жаҳонда олиб борилган тадқиқотлар натижасида қатор, жумладан ноаниқлик шароитида бошқариладиган объектларни адаптив параметрик идентификациялаш ва баҳолаш усуллари ва алгоритмлари яратилган (Massachusetts Institute of Technology, University of California (АҚШ); Kungliga Tekniska högskolan (Швеция), РФА Бошқариш муаммолари

---

<sup>2</sup>Диссертация мавзуси бўйича илмий тадқиқотлар шарҳи <https://www.honeywell.com/us/en>, <https://www.siemens.com/global/en.html>, <https://web.mit.edu/>, <https://www.universityofcalifornia.edu/>, <http://www.cdio.org/>, <https://www.imperial.ac.uk/>, <https://www.ed.ac.uk/>, <https://www.tum.de/en/>, <https://www.tu-darmstadt.de/index.en.jsp>, <https://www.titech.ac.jp/english>, <https://en.snu.ac.kr/>, <https://www.kaist.ac.kr/kr/>, <https://www.alstom.com/>, <http://www.simatek.by/ru/index.html>, <https://en.ustc.edu.cn/>, <http://www.cedar.buffalo.edu/~srihari/CSE555/>, <https://bmstu.ru/>, <http://www.spiiras.nw.ru/>, <http://www.mipt.ru/>, <https://elibrary.ru/item.asp?id=21681096>, <https://studfiles.net/1376730/>, <https://cyberleninka.ru/.../obzor-metodov-raspoznavaniya-simvolov>, <http://ieeexplore.ieee.org/document/824819/>, <http://intellect-tver.ru/?p=165>, <http://www.nickart.spb.ru/analysis/market.php>, <https://www.ipu.ru/> ва бошқа манбалар асосида ишлаб чиқилган.

институты (РФ)); чизикли ноаниқ тизимларни робастли бошқариш усуллари ва алгоритмлари ишлаб чиқилган (The University of Edinburgh (Буюк Британия); Tokyo Institute of Technology (Япония); University of Science and Technology of China (Хитой); Н.Э. Бауман номидаги Москва давлат техника университети (РФ)); динамик объектларни адаптив бошқариш ва мослашиш алгоритмлари ишлаб чиқилган (Technical University Darmstadt (Германия); Санкт-Петербург информатика ва автоматлаштириш институты, (РФ)); параметрик ва структуралы ноаниқликлар шароитларида бошқариш объектини идентификациялашнинг адаптив алгоритмлари ишлаб чиқилган (Korea Advanced Institute of Science and Technology (Жанубий Корея); Technical University Munich (Германия), Н.Э. Бауман номидаги Москва давлат техника университети (РФ)); норавшан ростлагичлар ва нейротармоқ технологиялари базасида адаптив бошқариш тизимларини синтезлаш усуллари ва алгоритмлари ишлаб чиқилган (University of California, (АҚШ); Linköping University, (Швеция); РФА Бошқариш муаммолари институты, РФ)).

Замонавий ахборот технологиялари ютуқларини жалб қилган ҳолда, ноаниқ динамик объектларни адаптив бошқариш тизимларини яратиш воситаларини ишлаб чиқиш бўйича жаҳонда бир қатор устувор йўналишларда илмий-тадқиқотлар олиб борилмоқда, жумладан, ноаниқ параметрли бошқариш объектларини математик моделларини шакллантириш, параметрик ва структуралы ноаниқлик шароитларида бошқариш объектларини идентификациялашнинг адаптив алгоритмларини ишлаб чиқиш, зарурий аниқлик ва ростлаш сифатини таъминлайдиган, интеллектуал технологиялар базасида нозикли ноаниқ объектларни адаптив бошқариш тизимларини синтезлаш.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Динамик объектларни бошқариш жараёнларини мослаштириш ва турли хил мураккабликлар ва ноаниқликларни ҳисобга олган ҳолда юқори самарали бошқариш тизимларни яратиш, параметрик, структуралы ва модели ноаниқликлар шароитида технологик объектлар ва жараёнларни адаптив бошқариш тизимларини ишлаб чиқишнинг назарий ва амалий масалаларини тадқиқ қилиш саволлари бўйича қатор хорижлик олимлар, жумладан G.A.Apostolakis<sup>3</sup>, J.Dewooght<sup>4</sup>, J.K.Hedrick<sup>5</sup>, M.Hinrichsen<sup>6</sup>, D.Thunnissen<sup>7</sup>, H.K.Lee<sup>8</sup>, P.V.Shankar<sup>8</sup>, B.Song<sup>5</sup>, В.Н.Афанасьев<sup>9</sup>, Б.Р.Андреевский<sup>10</sup>, А.А.Бобцов<sup>11</sup>, С.В.Емельянов<sup>12</sup>,

<sup>3</sup> Apostolakis G.A. A Commentary on Model Uncertainty. Presented at Proc. Workshop I Adv. Topics Risk Reliab. Anal. – Model Uncertainty: Its Character Quantification, Annapolis, MD. 1994. P. 973–980.

<sup>4</sup> Dewooght J. Model uncertainty and model inaccuracy, Reliability Engineering and System Safety. 1998. Vol. 59. P. 171-185.

<sup>5</sup> Song, B., Hedrick, J.K. Dynamic Surface Control of Uncertain Nonlinear Systems. An LMI approach. – Springer Science & Business Media, 2011.

<sup>6</sup> Hinrichsen, M. Control of Uncertain Systems. USA. Springer Science & Business Media, 2011.

<sup>7</sup> Thunnissen D. Uncertainty classification for the design and development of complex systems, Proceedings of the 3rd Annual Predictive Methods Conference, Veros Software, Santa Ana, CA, June, 2003. P. 1-16.

<sup>8</sup> Shankar P. Bhattacharyya, Lee H Keel. Control of Uncertain Dynamic Systems. CRC Press. 1991. -544 p.

<sup>9</sup> Афанасьев В.Н. Управление неопределенными динамическими объектами. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 208 с.

<sup>10</sup> Андреевский Б.Р. Методы управления в условиях неопределенности. - Л.: ЛМИ, 1989. - 88с.

<sup>11</sup> Мирошник И.В., Никифоров В.О., Бобцов А.А. Адаптация пространственного движения нелинейных динамических систем // 6-й Санкт-Петербургский симпозиум по теории адаптивных систем (SPAS'99). 1999. С.115-119.

<sup>12</sup> Емельянов С.В., Коровин С.К. Стабилизация неопределенных динамических объектов с непрерывным временем. В сб. «Новые методы управления сложными системами», – М.: Наука, 2004.

С.К.Коровин<sup>12</sup>, Н.Н.Карабутов<sup>13</sup>, И.В.Мирошник<sup>11</sup>, В.О.Никифоров<sup>11</sup>, И.Б.Фуртат<sup>14</sup>, С.Б.Пельцвергер<sup>15</sup>, М.Ю.Сергин<sup>16</sup>, А.М.Цыкунов<sup>14</sup> ва бошқалар ҳамда мамлакатимиз олимлари, жумладан Б.М.Азимов, Т.Ф.Бекмуратов, Ш.М.Гулямов, О.О.Зарипов<sup>17</sup>, Х.З.Игамбердиев<sup>17,18</sup>, М.А.Исмаилов, М.М.Камилов, А.Р.Марахимов<sup>19</sup>, Ж.У.Севинов<sup>18</sup>, И.Х.Сидиков<sup>19</sup>, Ш.Х.Фазилов, Н.Р.Юсупбеков<sup>20</sup> ва бошқалар ўзларининг улкан хиссаларини қўшишган.

Юқорида айтиб ўтилган олимлар томонидан параметрлари ноаниқ бўлган бошқариш объектларининг математик моделларини шакллантириш, зарурий аниқлик ва ростлаш сифатини таъминлайдиган мураккаб динамик тизимларни идентификациялаш, баҳолаш ва бошқаришнинг адаптив алгоритмлари, чизиқли ноаниқ тизимларни робастли бошқариш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш муаммолари бўйича тадқиқотлар ўтказилган.

Шу билан бирга, кўриб чиқилаётган масалалар бўйича тадқиқотлар соҳасида эришилган ютуқларга ва ноаниқ объектларни адаптив бошқариш тизимларини синтезлаш усуллари соҳасида эришилган муҳим натижаларга қарамай, ҳозирги вақтда ноаниқ динамик объектларни адаптив бошқариш тизимларини синтезлашнинг мунтазамлашган алгоритмлари етарли даражада ишлаб чиқилмаган.

**Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти Тошкент давлат техника университети илмий-тадқиқот ишлари режаларининг №ЁФ-4-06 – «Созланувчи модели адаптив бошқариш системаларини синтезлашнинг мунтазам усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш» (2012-2013), №А-5-42 – «Априор ноаниқлик 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** ноаниқ динамик объектларни адаптив бошқариш тизимларини мунтазам синтезлаш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш ҳамда уларни муайян ишлаб чиқариш жараёнларини

---

<sup>13</sup> Карабутов Н.Н. Адаптивная идентификация систем: информационный синтез. 2006. - 384 с.

<sup>14</sup> Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Робастное управление нестационарными объектами с неизвестной переменной относительной степенью // Управление большими системами, 2011, Выпуск 33, –С. 91-112.

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

<sup>16</sup> Сергин Михаил Юрьевич. Принципы, методы и алгоритмы построения систем управления технологическими процессами со структурной неопределенностью: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06: Тамбов, 2004. -305 с.

<sup>17</sup> Игамбердиев Х.З., Юсупбеков А.Н., Зарипов О.О. Регулярные методы оценивания и управления динамическими объектами в условиях неопределенности. – Т.: ТашГТУ, 2012. –320 с.

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

<sup>19</sup> Марахимов А.Р., Игамбердиев Х.З., Юсупбеков А.Н., Сидиков И.Х. Нечетко множественные модели и интеллектуальное управление технологическими процессами. –Т.: ТашГТУ, 2014. –240 с.

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



автоматлаштириш ва бошқариш масалаларини ечишда амалий қўллашдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

ноаниқ динамик объектларни бошқариш муаммолари ва усулларини тизимли таҳлил қилиш;

ноаниқ бошқариш объектларини параметрик ва координатали баҳолашнинг мунтазам алгоритмларини ишлаб чиқиш;

ноаниқ динамик объектларни барқарорлаштиришнинг мунтазам алгоритмларини ишлаб чиқиш;

параметрик ноаниқ объектларни адаптив бошқариш тизимларида ростлагичларни синтезлашнинг мунтазам алгоритмларини ишлаб чиқиш;

эталон моделлар асосида ноаниқ динамик объектларни адаптив бошқариш ва мослаштиришнинг мунтазам алгоритмларини ишлаб чиқиш;

ноаниқ динамик объектларнинг бошқариш тизимларини синтезлашнинг мунтазам алгоритмларини ишлаб чиқиш;

муайян технологик объектнинг адаптив бошқариш тизимини синтезлаш масаласини ечишда ноаниқ динамик объектларни адаптив бошқариш тизимларини мунтазам синтезлашнинг ишлаб чиқилган алгоритмлари ва ҳисоблаш схемаларини амалиётда қўллаш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида ноаниқ динамик объектларни адаптив бошқариш тизимлари олинган.

**Тадқиқотнинг предмети** ноаниқ динамик объектларни адаптив бошқариш тизимларини мунтазам синтезлаш усуллари ва алгоритмларидан иборат.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Тадқиқот жараёнида тизимли таҳлилнинг умумий услибиёти, идентификациялаш, динамик баҳолаш, адаптив бошқариш, матрицани псевдоағдариш концепцияси ва нокоррект қўйилган масалаларни ечиш усулларидан фойдаланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

бошқариладиган тизимлар динамикасининг тескари масалалари концепциялари ва нокоррект масалаларни мунтазамлаштириш принципи асосида ноаниқ динамик объектларни адаптив бошқариш тизимларини синтез қилиш усуллари ва алгоритмлари ишлаб чиқилган;

максимал рангли чап ва ўнг нол бўлувчилар билан ажратилган бузилмаган блокли матрицани тескарилашнинг мунтазам алгоритмлари асосида бошқариш объектларининг ҳолат векторини баҳолаш процедурасини ноаниқлик омилларининг таъсирига сезгирмаслигини ошириш алгоритмлари ишлаб чиқилган;

тахминий математик моделлар мавжудлигида локал оптималлаштириш усули асосида ноаниқ динамик объектларни барқарорлаштириш тизимини синтез қилишнинг мунтазам алгоритмлари ишлаб чиқилган;

оралиқ ҳисоблашларнинг тўғрилигини назорат қилишни осонлаштиришга имкон берувчи мунтазам итерацион алгоритмлар асосида ташқи ғалаёнлар ва сигналли ноаниқлик мавжудлигида чизиқли динамик объектларни барқарорлаштириш алгоритмлари ишлаб чиқилган;

айлантириш ёки қайтариш матрицалари ёрдамида ростлагич коэффициентлари учун тенгламалар тизимидаги матрицани ёйиш асосида ноаниқ бошқариш объектларининг бошқариш бўйича турғунлик хусусиятини эътиборга олган ҳолда диссипативлик тўғрисидаги масалада адаптив ростлагични синтез қилишнинг мунтазам алгоритмлари ишлаб чиқилган;

координатали ва параметрик ғалаёнлар етарлича кенг диапазонда ўзгарганда тизимнинг ишлаш қобилятини таъминловчи тезлик градиенти, параметрли ва сигналли мослаштириш усуллари асосида ноаниқ динамик объектларни адаптив бошқаришнинг мунтазам алгоритмлари ишлаб чиқилган;

матрицани ёйишнинг турли ҳисоблаш схемалари асосида объект ҳолати тўғрисидаги маълумотлари нотўлиқ бўлган динамик объектларни бошқариш тизимларини синтез қилишнинг мунтазам соддалаштирилган ҳисоблаш процедуралари ишлаб чиқилган;

минимал итерация ва матрицаларни блоklarга бўлиш усулларидан фойдаланиб умумлаштирилган соzланувчи объектнинг базавий структураси учун кенгайтирилган тенгламалар тизими асосида параметрик ноаниқлик шароитида кўп қатламли нейрон тармоқли адаптив бошқариш тизимларини синтез қилишнинг мунтазам алгоритмлари ишлаб чиқилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

параметрик ноаниқлик шароитида бошқариладиган объектларнинг ўтиш матрицасини идентификациялаш, динамик объектларни бошқариш тизимларини синтезлаш масалаларини ечиш учун мўлжалланган дастурий таъминот ишлаб чиқилган;

одатий ишлаш шароитида ўтказилган саноат тажрибаси натижалари асосида аммиакли селитра ишлаб чиқаришнинг асосий осттизимлари учун математик моделлар ишлаб чиқилган;

аммиакли селитра ишлаб чиқаришни автоматик бошқариш тизимининг иерархик кўринишлари ишлаб чиқилган;

жараёнлар кечишининг технологик режимларини барқарорлаштириш ва уларнинг ишлаш самарадорлигини оширишга имкон берувчи мос техник таъминотли аммиакли селитра ишлаб чиқариш технологик жараёнларини адаптив бошқариш тизимининг функционал-структуравий схемаси ишлаб чиқилган.

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

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти бошқариш жараёнларининг сифати ва оперативлигини оширишга имкон берадиган, ноаниқ динамик объектларни

адаптив бошқариш тизимларини мунтазам синтезлашнинг конструктив усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти** технологик объектларнинг кенг тоифасида ноаниқ динамик объектларни адаптив бошқариш масалаларининг математик ва алгоритмик таъминотини ишлаб чиқилиши ва ишлаб чиқаришнинг узлуксиз характерли технологик жараёнларини адаптив бошқариш тизимларининг функционал структураларини куриш ва лойиҳалашни автоматлаштиришда кенг қўлланилиши билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Ноаниқ динамик объектларни адаптив бошқариш тизимларини мунтазам синтезлаш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

бошқариш объектларининг ҳолат векторини баҳолаш процедурасини ноаниқлик омилларининг таъсирига сезгирмаслигини ошириш алгоритмлари «Навоийазот» АЖ да жорий қилинган («Ўзкимёсаноат» АЖнинг 2021 йил 22 сентябрдаги 04-3420-сон маълумотномаси). Натижада, алгоритмлар созланувчи модели адаптив бошқариш тизимларида ростлагич параметрларини баҳолаш алгоритмларини синтезлаш масалаларини мунтазамлаш ва априори номаълум ташқи ғалаёнларга турғун бўлган қидирилаётган қийматлар баҳосини олиш имконини берган;

чизиқли ноаниқ динамик объектни барқарорлаштиришнинг мунтазам алгоритмлари «Навоийазот» АЖ да жорий қилинган («Ўзкимёсаноат» АЖнинг 2021 йил 22 сентябрдаги 04-3420-сон маълумотномаси). Натижада, алгоритмлар идеал ишлаш шартлари бузилганда адаптив тизимларни ишлаш қобилиятини таъминлаш имконини берган;

матрицани ёйишнинг турли ҳисоблаш схемалари асосида объект ҳолати тўғрисидаги маълумотлари нотўлиқ бўлган динамик объектларни бошқариш тизимларини синтез қилишнинг мунтазам соддалаштирилган ҳисоблаш процедуралари «Навоийазот» АЖ да жорий қилинган («Ўзкимёсаноат» АЖнинг 2021 йил 22 сентябрдаги 04-3420-сон маълумотномаси). Натижада, берилган спектрли тизимларни синтезлаш масаласини мунтазамлаштириш ва аммиакли селитра ишлаб чиқаришда жараёнларнинг технологик режимларини барқарорлаштириш имконини берган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Тадқиқотнинг назарий ва амалий натижалари 9 та халқаро ва 7 та республика илмий-амалий анжуманларида маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси бўйича жами 41 та илмий иш, шулардан – 1 та монография, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 19 та мақола, жумладан, 10 таси хорижий журналларда нашр этилиб, ЭҲМ лар учун дастурий маҳсулотларга Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигидан рўйхатдан ўтган 5 та гувоҳнома олинган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертация ҳажми 189 бетни ташкил этади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

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

Диссертациянинг **«Ноаниқ динамик объектларни бошқариш муаммолари ва усуллари»** деб номланган биринчи бобда динамик объектларни бошқариш масалаларида ноаниқликларнинг таснифи ва типлари ҳамда уларнинг ўзига хос хусусиятлари, ноаниқ параметрларга эга бўлган бошқариладиган объектларнинг математик моделини танлаш муаммоси, моделнинг ноаниқлиги шароитларида тизимларни бошқариш алгоритмларининг расмий тасвирланиши, ноаниқ динамик объектларни бошқариш тизимларини синтезлаш усуллари ва алгоритмларининг асосий турлари, тадқиқот мақсади ва вазифаларини қўйилиши келтирилган.

Турли саноат тармоқларида технологик жараёнларни автоматлаштириш юқори аниқликдаги самарали бошқариш тизимларини ишлаб чиқишни талаб қилади. Ўз навбатида, юқори сифатли бошқариш тизимини куриш учун объектнинг параметрлари ва ғалаён таъсирлар ҳақида априор маълумотларга эга бўлиш керак. Реал ҳолатларда бундай маълумотлар одатда мавжуд эмас. Бундай ҳолларда объектни бошқариш жараёнида етишмаётган априор маълумотларни тўлдириш керак. Ушбу процедура бошқариш қурилмасини бошқариладиган объектнинг номаълум иш шароитларига мослаштириш билан боғлиқ.

Ноаниқ объектларни адаптив бошқариш тизимларини синтезлаш масалаларини ечишда, кўпинча, новариацион усуллар ғоясидан фойдаланилади. Шу сабабли, параметрик ноаниқ объектларни адаптив бошқариш тизимларини синтезлаш масалаларининг хусусиятларини нокоррект қўйилган масалалар назарияси усуллари ва энг самарали бўлганларини аниқлаш нуқтаи-назаридан таҳлил қилишга интилиш табиий равишда юзага келади. Ноаниқ динамик объектларни адаптив бошқариш тизимларини куриш назарияси ва ҳолатини қисқача таҳлил қилишдан хулоса чиқариш мумкин-ки, ушбу соҳада қидириладиган ечим ҳақидаги априор ахборот чекланган шароитларда мунтазам параметрик идентификациялаш ва ростлагични синтезлаш саволлари кам ўрганилган. Юқорида келтирилган фикрларга асосланиб, мазкур диссертация ишининг мақсадини параметрик ноаниқ динамик объектларни адаптив бошқариш системаларини мунтазам синтезлаш алгоритмларини тадқиқ этиш ва ишлаб чиқишни ёритиш ҳамда уларни амалиётда қўллаш деб таърифлаш мумкин.

Диссертациянинг “Ноаниқ бошқариш объектларини параметрик ва координатали баҳолашнинг мунтазам алгоритмларини ишлаб чиқиш” деб номланган иккинчи боби бошқариладиган ноаниқ объектларни параметрик баҳолашнинг мунтазам алгоритмларини ишлаб чиқишга бағишланган.

$$x_{k+1} = \tilde{A}x_k + \tilde{B}u_k + w_k, \quad x_{0|0} = x_0^0, \quad y_k = Hx_k + v_k,$$

кўринишдаги параметрик ноаниқликка эга бўлган объектнинг чизиқли моделини кўриб чиқамиз, бу ерда  $x \in R^n$ ,  $y \in R^l$ ,  $u \in R^m$  – объектнинг ҳолат вектори, объектнинг чиқиш вектори ва бошқариш вектори;  $w_k \in R^n$ ,  $v_k \in R^l$  – объектнинг тенгламаси ва кузатиш тенгламасидаги ўзаро мустақил оқ шовқинли Гаусс кетма-кетликлари,  $\tilde{A} = A_0 + \Delta A$ ,  $\tilde{B} = B_0 + \Delta B$ , бу ерда  $A_0, B_0$  – объект параметрларининг номинал қийматлари;  $\Delta A, \Delta B$  – объектнинг галаёнланли параметрларини квазистационар номаълум матрицалари.

Ҳолат бўйича чизиқли тескари боғланиш ёрдамида ички бошқариш контурини  $u_k = u_{1,k} - k_k^T x$  ҳосил қиламиз, унинг тенгламалари қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$x'_{k+1} = [A_0 - B_0 k_k^T] x'_k + B_0 u_{1,k} + w'_k; \quad x_{0|0} = x_0^0; \quad y'_k = Hx'_k + v'_k.$$

Ички контур ҳолатини баҳолаш қурилмаси ўзида ички контурнинг эталон модели учун қурилган Калман филтритини тақдим қилади

$$\hat{x}'_{k+1} = [A^M - \tilde{k}_k H] \hat{x}'_k + \tilde{k}_k y_k + B^M u_{1,k}, \quad \hat{y}'_k = H \hat{x}'_k, \quad \tilde{k}_k = P_k H^T R_k^{-1},$$

$$P_{k+1} = A^M P_k + P_k (A^M)^T - P_k H^T R_k^{-1} H P_k + Q_k.$$

Ҳолат ва кузатишларнинг кенгайтирилган  $x_{p,k} = (x_k, x'_k)$ ,  $y_{p,k} = (y_k, y'_k)$  векторларини киритамиз. У ҳолда кенгайтирилган ҳолат векторининг  $\hat{x}_{p,k} = \hat{x}_k + \hat{x}'_k$  баҳоси  $\tilde{x}_{p,k} = D \hat{x}_{p,k} = [D_1 \quad D_2] \cdot \begin{bmatrix} \hat{x}_k \\ \hat{x}'_k \end{bmatrix}$  га эга бўламиз.  $D = [D_1 \quad D_2]$  ни оптимал созлаш учун  $J = tr \{ M[y_k y_k^T] - 2HDx_{p,k} M[y_k^T] + HDx_{p,k} x_{p,k}^T D^T H^T \}$  квадратик функционални  $D$  бўйича минималлаштириш масаласини кўриб чиқамиз. Бундан, матрицани псевдоағдариш операциясидан фойдаланиш билан қуйидагига эга бўламиз:

$$D = (H^T H)^+ H^T M[y_k] \hat{x}_{p,k}^T [\hat{x}_{p,k} \hat{x}_{p,k}^T]^+ \quad (1)$$

$F = (H^T H)$  матрица (1) ифодада кўпинча бузилган матрица бўлиб ҳисобланади, яъни

$$F \in R^{m \times n}, \quad \det F = 0, \quad \text{rank} F = m < n. \quad (2)$$

Блок матрицани  $\begin{bmatrix} F^T & F_R \\ F_L & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F & F_L^T \\ F_R^T & 0 \end{bmatrix} \in R^{(2n-m) \times (2n-m)}$  шакллантирамиз, бу

ерда  $F_L, F_R$  – максимал рангнинг нолини чап ва ўнг бўлувчилари, яъни

$$F_L F = 0, \quad \text{rank} F_L = n - m; \quad (3)$$

$$F F_R = 0, \quad \text{rank} F_R = n - m. \quad (4)$$

Сўнгра ҳар доим  $F_L$  ва  $F_R$  бўлувчилар (2)-(4) да максимал рангга эга деб тахмин қилинади. Бунда рангларнинг қуйидаги тенглиги бажарилади:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} F^T & F_R \\ F_L & 0 \end{bmatrix} = 2n - m.$$

Шунда  $F^+ \in R^{n \times n}$  псевдотескари матрица қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$F^+ = T F T, \quad (5)$$

бу ерда  $T = (F + F_L^T \varphi^T F_R^T)^{-1} = (F + (F_R \varphi F_L)^T)^{-1}$  – тескари биттаю-битта бўлмаган матрица;  $\varphi \in R^{(n-m) \times (n-m)}$  – ихтиёрий квадрат айлантириладиган матрица. Агар  $F_R^T F_R = F_L F_L^T = \varphi^T \varphi = I_{n-m}$  ярим ортогоналлик шартлари бажарилса, шунда (5) псевдотескари матрицани ҳисоблаш формуласи қуйидаги кўринишни олади:

$$F^+ = (F + (F_R \varphi F_L)^T)^{-1} - F_R \varphi^T F_L. \quad (6)$$

Осон бўлиши учун,  $\varphi$  матрицани ифодадан чиқариб ташлаш билан (6) нинг ўрнига  $F^+ = (F + (F_R F_L)^T)^{-1} - F_R F_L$ .

Бу ерда, шунингдек, бошқариладиган объектларнинг ҳолатини Калман типдаги кенгайтирилган кузатувчилар асосида робаст баҳолаш ва мунтазамлаш усуллари асосида параметрик ноаниқлик шароитларида бошқариладиган объектларнинг ўтиш матрицасини идентификациялаш алгоритмлари ҳам кўриб чиқилган.

Келтирилган мунтазам ҳисоблаш процедуралари созланадиган модели адаптив бошқариш тизимларида ростлагичнинг параметрларини баҳолаш алгоритмларини синтезлаш масаласини мунтазамлаштириш ва параметрик ноаниқлик шароитларида бошқариш жараёнларининг сифат кўрсаткичларини ошириш имконини беради.

Диссертацияни «**Ноаниқ динамик объектларни барқарорлаштиришнинг мунтазам алгоритмларини ишлаб чиқиш**» деб номланган учинчи бобида ноаниқ динамик объектларни барқарорлаштириш тизимларини синтезлашнинг мунтазам алгоритмларини ишлаб чиқиш натижалари келтирилган.

Маълумки, бошқариладиган объектнинг тасвирланиши аниқ маълум бўлмайди. Шу сабабли математик моделга таянадиган ҳар қандай бошқариш алгоритми ушбу моделнинг “билинар-билинемас ғимирлашларига” нисбатан маълум бир турғунликка эга бўлиши, яъни бу ғимирлашларга нисбатан қўпол бўлиши лозим. Қуйидаги тенглама билан тасвирланадиган бошқариладиган объектни кўриб чиқамиз:

$$x_{t+1} = A x_t + B u_t + \xi_t, \quad (7)$$

бунда унинг тахминий модели  $x_{t+1} = C x_t + D u_t + \xi_t$ , бу ерда  $x_t \in R^n$ ,  $u_t \in R^m$ ,  $\xi_t \in R^n$  – мос равишда ҳолат, бошқариш ва ўлчанмайдиган ғалаёнлар векторлари;  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  – тегишли ўлчамли матрицалари.

Локал оптималлаштиришнинг модификацияланган усулига мувофиқ  $t$  вақт momentiда барқарорлаштирадиган бошқариш қуйидаги масаланинг ечими сифатида қидирилади:

$$\|C x_t + D u_t + x_t - C x_{t-1} - D u_{t-1}\| \rightarrow \min, \quad u \in R^m. \quad (8)$$

Бошқаришни топишнинг мазкур процедураси бир кадамли оптималлаштириш ғоясига мос келади: ҳар бир  $t$  вақт моментида  $x_{t+1}$  вектор ва ўлчанмайдиган ғалаённи қандайдир бир баҳосининг йиғиндиси минималлаштирилади.

$\text{Ker}D = \{0\}$  бўлганлиги ва  $D^T D$  – тескари матрица мавжуд бўлганлиги сабабли,  $L = (D^T D)^{-1} D^T$  деб белгилаш билан (8) дан

$$u_t = -L((C + I)x_t - Cx_{t-1} - Du_{t-1}),$$

ни ёки (7) ни ҳисобга олиш билан қуйидагини топамиз

$$u_t = -L(Cx_t + (A - C)x_{t-1} + (B - D)u_{t-1} + \xi_{t-1}). \quad (9)$$

$v_t = u_t - \hat{u}$  деб белгилаймиз, (7) ва (9) ифодаларга кўра қуйидагини оламиз:

$$x_{t+1} = (A - BLC)x_t - BL(A - C)x_{t-1} - BL(B - D)v_{t-1} + BL(\xi - \xi_{t-1}) - (\xi - \xi_t). \quad (10)$$

(10) ифодани вектор-матрица шаклида ёзамиз ва  $z_t = (x_t, x_{t-1}, v_{t-1})^T$ ,  $\zeta_t = (\xi - \xi_t, \xi - \xi_{t-1}, 0)^T$  га асосан  $\det(\Lambda_0 - \lambda I) = \lambda^{n+m} \det(C - DLC - \lambda I)$  бўлишини кўрсатиш мумкин, яъни  $\Lambda_0$  матрицанинг хусусий қийматлари модул бўйича бирдан кичик бўлиши келиб чиқади. Бу локал оптимал барқарорлаштиришнинг кўполлигини кўрсатади. Агар  $D$  матрица тўлиқ рангга эга бўлмаса у ҳолда кўриб чиқиладиган масала нотўғри қўйилган масала бўлади ва бунда мунтазам усуллардан фойдаланиш мақсадга мувофиқ бўлади.

$n \times m$  ўлчамли  $D_m = (d_1, d_2, \dots, d_m)$  матрицани кўриб чиқамиз. Бунда устунлари бўлган  $d_j$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ . векторлари хизмат қилади.  $D_{m-1}$  яққол белгилашдан фойдаланиш билан бу матрицани  $D_m = (D_{m-1} \mid d_m)$ ,  $m = 2, 3, \dots$  кўринишда тақдим қилиш мумкин.  $D_1$  матрицани псевдоағдариш  $D_1^+ = d_1^T / d_1^T d_1$  формула бўйича амалга оширилади.

$D_{m+1}^+$  псевдотескари матрицани кетма-кет топиш учун Гревилль усулидан фойдаланамиз. Бундан қуйидагини оламиз  $D_{m+1}^+ = (D_m^+ [I - d_{m+1} k_{m+1}^T] / k_{m+1}^T)$ ,  $k_{m+1}^T$  параметр  $D_m$  матрица ва  $d_{m+1}$  векторнинг қийматлари билан белгиланади.

Келтирилган ҳисоблаш усуллари ноаниқ динамик объектларни барқарорлаштириш тизимларини синтезлаш масаласини мунтазамлаштириш ва яқинлаштирилган математик моделлар бор бўлганда бошқариш жараёнларининг сифат кўрсаткичларини ошириш имконини беради.

Ташқи ғалаёнлар ва сигналли ноаниқлик мавжуд бўлганда барқарорлаштириш масаласини кўриб чиқамиз. Бошқариш объектининг тенгламаси

$$x_{k+1} = [A + \eta_k] x_k + B u_k, \quad x_k(0) = x_0$$

бўлсин, бу ерда  $A$  – тизимда қабул қилса бўладиган ўтиш жараёнларини таъминлайдиган маълум матрица,  $\eta_k$  – параметрик ғалаёнлар матрицаси.

$\eta_k$  параметрик ғалаёнларни компенсациялаш учун бошқариш қуйидагича танланиши мумкин:

$$u_k = -R^{-1} B^T [S_k^* + s_k] x_k,$$

бу ерда  $s_k$  – созланадиган параметрлар матрицаси.  $\eta_k$  параметрик

ғалаёнларни тўлиқ компенсациялаш учун

$$BR_k^{-1}B^T s_k = \eta_k. \quad (11)$$

муносабатдан фойдаланилади.

Қуйида (11) кўринишидаги тенгламалар тизимини Качмаж проекцион алгоритмидан фойдаланиш асосида ечиш алгоритминини келтирамыз. Ечимни мунтазамлаштириш учун (11) тенгламани

$$G_k s_k = \eta_k, \quad (12)$$

кўринишда тақдим қиламыз, бу ерда  $G_k = BR_k^{-1}B^T$ .

$$s_k^i = s_k^{i-1} + G_{k,l}^+(\eta_l - G_l s_k^{i-1}), \quad l = \text{mod}_p(i), \quad (13)$$

формула бўйича ҳисобланадиган  $s_k^i$  кетма-кетлик (12) тизимнинг  $s_k^*$  ечимига яқинлашади, бу ерда  $G = [G_1^T \dots G_p^T]^T$ ,  $\eta = [\eta_1^T \dots \eta_p^T]^T$ . Алгоритмни яқинлашувчанлик тезлигини чизиқли хилма-хилликларнинг оғишига боғлиқлиги тўғрисидаги масалани кўриб чиқамиз.  $r_k^{i,i-1} = s_k^{i-1} - s_k^i$ ,  $r_k^i = s_k^i - s_k^*$  белгилашларни киритамиз. (13) дан қуйидаги келиб чиқади:

$$r_k^{i,i-1} = -G_{k,l}^+(\eta_{k,l} - G_{k,l} s_k^{i-1}) = G_{k,l}^+ G_{k,l} s_k^{i-1} - G_{k,l}^+ \eta_{k,l}. \quad (14)$$

$G_{k,l}^+ \eta_{k,l} \in R_l$ ,  $G_{k,l}^+ G_{k,l} s_k^{i-1} \in R_l$  эканлиги маълум, шундан келиб чиққан ҳолда  $r_k^{i,i-1} \in R_l$ . (13) нинг ҳар иккала қисмидан  $s_k^*$  ни айириб ташлаш ва (3.20) ни ҳисобга олиш билан қуйидагини оламиз:

$$r_k^i = r_k^{i-1} - r_k^{i,i-1}, \quad r_k^{i,i-1} = G_{k,l}^+ G_{k,l} r_k^{i-1}. \quad (15)$$

Итерацион жараённинг (15) тўхтатиш мезони қуйидаги кўринишда танланади:

$$\|r_k^{i,i-1}\| = \|z_k^{i-1} - z_k^i\| \leq \varepsilon. \quad (16)$$

Келтирилган ҳисоблаш процедуралари итерацион алгоритм асосида чизиқли ноаниқ динамик объектларни барқарорлаштириш масаласини мунтазамлаштириш ва бошқариш жараёнларининг сифат кўрсаткичларини ошириш имконини беради.

Адаптив тизимларни синтезлашда кўрилаётган тизимларнинг диссипативлик хусусиятини таҳлил қилиш муҳим масала ҳисобланади. Стохастик объектларни адаптив бошқариш тизимларининг диссипативлиги тўғрисидаги масалада барқарорлаштирувчи ростлагичнинг параметрларини турғун баҳолашнинг мунтазам алгоритмларини кўриб чиқамиз. Қуйидаги кўринишдаги

$$a(\nabla; \xi) y_i = b(\nabla; \xi) u_i + v_i(\xi), \quad (17)$$

тенглама билан тасвирланадиган бошқариладиган объектни кўриб чиқамиз, бу ерда  $u_i$  ва  $y_i$  – объектнинг скаляр кирувчи ва чиқувчи сигналлари,  $a(\nabla; \xi)$  ва  $b(\nabla; \xi)$  полиномлар қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$\begin{aligned} a(\lambda, \xi) &= 1 + \lambda_1 a_1(\xi) + \dots + \lambda^r a_r(\xi), \\ b(\lambda, \xi) &= \lambda^k [b_k(\xi) + \dots + \lambda^{r-k} b_r(\xi)]. \end{aligned} \quad (18)$$



(18)даги полиномларнинг  $\xi$ ,  $k = k(\xi)$  га боғлиқ бўлган коэффициентлар тўпламини  $k$  орқали белгилаймиз  $k(\xi) = \text{col}(a_{i_1}(\xi), \dots, a_{i_l}(\xi), b_{j_1}(\xi), \dots, b_{j_m}(\xi))$ ,  $1 \leq i_l \leq r$ ,  $k \leq j_m \leq r$ .

Аҳамиятга молик параметрларнинг  $k(\xi)$  вектори маълум бўлганда ростлагичнинг коэффициентлари учун тенгламалар тизимини қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$Az = f, \quad A: Z \rightarrow F \quad (19)$$

бу ерда  $A = A(k)$  ва  $f = f(k)$  функциялар  $g(\lambda) = a(\lambda)\alpha(\lambda) - b(\lambda)\beta(\lambda)$  оптимал тизимнинг тавсифий полиномлари ва  $\alpha(\nabla, k)u_t = \beta(\nabla, k)y_t$ ,  $z = \text{col}(\alpha_1, \dots, \alpha_p, \beta_1, \dots, \beta_p)$  ростлагичнинг  $\alpha(\lambda, k)$ ,  $\beta(\lambda, k)$  полиномлари асосида аниқланади,  $p$  – ростлагичнинг фарқ тартиби.

Агар  $\alpha(\lambda, k)$ ,  $\beta(\lambda, k)$  полиномлар умумий илдизларга эга бўлмаса, яъни (17) бошқариладиган объект – бошқарилувчан бўлса, у ҳолда (19) тизим қандайдир бир  $p \leq r$  да  $z$  га нисбатан бир қийматли тарзда ечилувчан бўлади. Бироқ бошқариладиган объект ҳамма  $k$  ларда ҳам бошқарилувчан бўлмаса, у ҳолда (19) тизим ечилмайдиган бўлиб қолиши мумкин. Бундай ҳолларда мунтазам усуллардан фойдаланиш мақсадга мувофиқ бўлади.

(19) масалани аппроксимациялаш шартларини  $\|A - \bar{A}\| \leq h$ ,  $\|f - \bar{f}\| \leq \delta$  кўринишда қабул қиламиз, бу ерда  $\bar{A}$  ва  $\bar{f}$  – мос равишда матрица оператори ва (19) тенгламанинг ўнг қисмини аниқ қийматлари. Мунтазамлаштириш усулини қўллаш

$$(A^T A z + \alpha C) z_\alpha = A^T f \quad (20)$$

тизимни  $\alpha$  параметрнинг турли қийматларида кўп маротаба ечишга келтирилади. Бу ерда  $C$  - симметрик, мусбат аниқланган матрица.

$A^T A + \alpha C$  матрицани тўғридан-тўғри ҳисоблаш ва (20) тизимни шу матрица билан ечиш ҳисоблашда қийинчиликлар туғилишига олиб келади. Кичик  $\alpha$  ларда (19) га қараганда анчагина ёмон шартланган  $A^T A z = A^T f$  тизимни ечишга тўғри келади.  $C$  матрицани кўпайтмага ёямиз  $C = B^T B$ , бу ерда  $B$  – ўнг учбурчак матрица. Шунда (3.30) тизим  $(P^T P + \alpha I) y_\alpha = P^T f$ , бу ерда  $P = AB^{-1}$ ,  $y_\alpha = B z_\alpha$ . Сўнгра  $P$  матрицани қуйидаги кўпайтма кўринишида тақдим қиламиз

$$P = QDR, \quad (21)$$

бу ерда  $Q$  ва  $R$  – унитар матрицалар,  $D$  – икки диагоналли ўнг матрица. (21) нинг ёйилмасини айлантириш ёки қайтариш матрицалари ёрдамида олиш мумкин.

Кўрилаётган ёндашувдан технологик объектларни адаптив бошқариш тизимларини синтезлашнинг амалий масалаларини ечишда фойдаланиш мумкин.

Адаптив тизимларни синтезлашда эталон моделлар тушунчаси жуда самарали ҳисобланади. Эталон моделлар асосида ноаниқ динамик объектларни адаптив бошқариш ва мослаштиришнинг мунтазам

алгоритмларини синтезлаш саволларини кўриб чиқамиз. Мослашувчан ёндашувда объектнинг

$$\dot{x}(t) = \varphi(x, u, \chi, f), \quad x(t_0) = x^{(0)}, \quad (22)$$

$$y = w(x, u, \chi, v). \quad (23)$$

кўринишдаги нозикли тенгламалари кўриб чиқилади.

Кўпинча (3.53), (3.54) тенгламаларни ўрнига

$$\dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + (B + \Delta B)r(t), \quad (24)$$

кўринишдаги чизиклантирилган тенгламалардан фойдаланилади.

Мослаштиришнинг мақсади –  $x(t)$  векторни

$$\dot{x}_M(t) = A_M x_M(t) + B_M r(t),$$

тенгламанинг ечими бўлиб ҳисобланадиган  $x_M(t) \in R^n$  эталон моделнинг ҳолат векторига интилишини таъминлаш бўлиб ҳисобланади, бу ерда  $n \times n$  -  $A_M$  матрица ва  $n \times m$  -  $B_M$  матрица (Гурвицев  $A_M$  матрицаси) ҳаракатнинг зарурий динамикасини беради. Мослаштириш алгоритмини олиш учун

$$Q(x) = \frac{1}{2} e^T P e, \quad (25)$$

мақсад функционалини танлаймиз, бу ерда  $e = e(t) = x(t) - x_M(t)$  – хато вектори,  $P = P^T > 0$  – мусбат аниқланган  $n \times n$ -матрица.

Бошланғич шартларнинг берилган кўплиги учун  $\Omega \subset R^n$  ни таъминлайдиган  $\lim_{t \rightarrow \infty} Q(x(t, x_0)) = 0$  бошқаришнинг мақсадини таъминлайдиган  $u = U(x)$  тесқари боғланиш қонунини куриш талаб қилинади, бу ерда  $x(t, x_0) - x_0 \in \Omega$  бошланғич шартга эга бўлган (24), (25) тизимнинг ечими. Айтайлик, ҳар қандай  $x, x_M \in R^n, r \in R^m$  учун

$$Ax + Bu_* - A_M x_M - B_M r(t) = A_M e \quad (26)$$

тенглама  $u_* \in R^m$  га нисбатан ечилувчан бўлсин. Шунда  $u_*$

$$u_* = K_r^* r(t) + K_x^* x, \quad (27)$$

муносабатни қаноатлантиради, бу ерда  $K_r^* = B^+ B_M, K_x^* = B^+ (A_M - A)$ .

Бошқача қилиб айтганда  $A_M - A \in L(B), B_M - B \in L(B)$ , бу ерда  $L(B)$  –  $B$  матрицанинг устунлари билан бузилган чизикли осткенглик. Кейинги шартлар, ўз навбатида қуйидаги муносабатларга эквивалентдир.

$$\text{rank} B = \text{rank}\{B, B_M\} = \text{rank}\{B, A_M - A\}. \quad (28)$$

Бу ҳолатда тезлик градиенти қуйидаги кўринишга эга бўлади

$$u = K_r r(t) + K_x x, \quad (29)$$

$$dK_r / dt = -\gamma B^T P e r(t), \quad dK_x / dt = -\gamma B^T P e x^T.$$

(29) алгоритм координатли ва параметрик ғалаёнлар етарлича кенг ораликларда ўзгарганда ҳам ишга қобилиятли бўлади. Агар параметрик ғалаён катта тезлик билан ўзгарса, у ҳолда мослаштириш жараёни ёмонлашади. Бу ҳолда сигналли мослаштириш алгоритмини қўллаш мақсадга мувофиқ бўлади. (26) тенглама (28) шартлар бажарилганда ҳар қандай  $x, x_M \in R^n, r \in R^m$  ларда  $u_* \in R^m$  га нисбатан бир қийматли тарзда ечилувчан эканлигини кўрсатиш мумкин.  $u_*$  ни топиш учун

$$u_* = K_{xM}^* x_M + K_r^* r + u_s^*, \quad (30)$$

муносабатдан фойдаланамиз, бу ерда  $K_{xM}^* = B^+(A_M - A)$ ,  $K_r^* = B^+ B_M$ ,  $u_s^* = B^+(A_M - A)$ .

Асосий контурда худди (29) га ўхшаш  $u = K_{xM} x + K_r r + u_s$  кўринишдаги ростлагични оламиз, бу ерда  $K_{xM}$ ,  $K_r$  ва  $u_s - \theta = \text{col}(K_{xM}, K_r, u_s)$  векторни ҳосил қилувчи соналандиган параметрлар. (27) ва (30) тенгламаларга мувофиқ ҳисоблашда псевдотескари матрицани қуйидагича тақдим қиламиз:  $B^+ = (B^T B)^{-1} B^T$ .  $B^T B = T U T^T$  диагональ кўринишдаги симметрик матрицани тақдим қиламиз, бу ерда  $T = (t_1 \mid t_2 \mid \dots \mid t_{m+n})$  – блок ортогональ матрица,  $U$  – диагональ матрица. Шунда  $(B^T B)^+ = \sum_{i=1}^{m+n} \lambda_i^{-1} t_i t_i^T$  деб ёзиш мумкин, бу ерда  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{m+n} > 0$  –  $B^T B$  матрицанинг хусусий сонлари. Ушбу алмаштириш  $B^T B$  матрицани шартларини яхшилаш ва қидирилаётган ечимнинг аниқлигини ошириш имконини беради.

Самарали псевдотескарилаш алгоритмларидан фойдаланиш асосида ноаниқ динамик объектларни адаптив бошқаришнинг келтирилган мунтазам алгоритмлари бошқариш қонунининг параметрларини ҳисоблашнинг аниқлигини ошириш имконини беради.

**Диссертацияни «Ноаниқ динамик объектларнинг бошқариш тизимларини синтезлашнинг мунтазам алгоритмларини ишлаб чиқиш»** деб номланган тўртинчи боби объект ҳолати тўғрисидаги маълумотлар нотўлиқ бўлган бошқариш тизимларини синтезлашнинг мунтазам алгоритмларини ишлаб чиқишга бағишланган.

Қуйида матрицали айирмалы тенглама билан тасвирланадиган чизикли стационар тизимни кўриб чиқамиз:

$$x_{k+1} = Ax + Bu, \quad y = Hx. \quad (31)$$

(31) тизимга чиқиш бўйича

$$u = Ky = KHx \quad (32)$$

чизикли стационар тескари боғланишни шундай киритиш зарурки, бунда ёпиқ тизим  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  олдиндан берилган спектрга эга бўлсин ( $\lambda_i$  –  $A + BKA$  матрицанинг хусусий сонлари,  $K - r \times l$  ўлчамга эга бўлган тескари боғланиш матрицаси).

(31) тизимнинг бошқарилувчанлигидан шундай  $n \times n$  ўлчамга эга бўлган  $N$  бузилмаган матрица ва  $r \times r$  ўлчамга эга бўлган  $M$  алмаштириб қўйишлар матрицаси мавжудлиги келиб чиқадикки, бунда  $\hat{x} = Nx$ ,  $\hat{u} = M^{-1}u$ ,  $\hat{y} = y$  қайта шакллантиришлар (31) тизимни қуйидаги кўринишга олиб келади:

$$\hat{x}_{k+1} = A\hat{x} + B\hat{u}, \quad \hat{y} = H\hat{x}. \quad (33)$$

Агар (31) тизим бошқарилувчан бўлса ва (33) каноник тақдим қилиниши учун

$$[Z - A_2]S^T = 0 \quad (34)$$

шарт бажарилса, у ҳолда (31) тизимнинг спектрини (32) кўринишдаги тескари боғланиш ёрдамида ихтиёрий тарзда бериш мумкинлигини кўрсатиш мумкин,

бунда  $K = MB_v^{-1}[Z - A_2]\hat{H}^+$ , бу ерда  $\hat{H}^+ = \hat{H}^T(\hat{H}\hat{H}^T)^{-1}$ .

(31) тизимнинг бошқарилувчанлигидан (33) каноник тақдим қилишнинг мавжудлиги келиб чиқади. У ҳолда

$$\hat{K}\hat{H} = B_v^{-1}[Z - A_2]. \quad (35)$$

(35) ифодани куйидаги кўринишда қайта ёзамиз:

$$\hat{K}\hat{H} = \begin{bmatrix} \hat{K} & \vdots & 0 \\ \hat{H}^T & \vdots & S^T \end{bmatrix}^T = B_v^{-1}[Z - A_2], \quad (36)$$

бу ерда  $0^T - ((n-l) \times r)$  - ноллик остматрица.  $\begin{bmatrix} \hat{H}^T & \vdots & S^T \end{bmatrix}^T$  матрицанинг бузилмаганлиги ва  $\begin{bmatrix} \hat{H}^T & \vdots & S^T \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \hat{H}^+ & \vdots & S^+ \end{bmatrix}$  муносабатни ҳисобга олиш билан (36) дан

$$\begin{bmatrix} \hat{K} & \vdots & 0 \end{bmatrix} = B_v^{-1}[Z - A_2] \begin{bmatrix} \hat{H}^T & \vdots & S^T \end{bmatrix}^T = B_v^{-1}[Z - A_2] \begin{bmatrix} \hat{H}^+ & \vdots & S^+ \end{bmatrix}. \quad (37)$$

ни оламиз.

Агар (37) тенгламанинг шарти бажарилса, у ҳолда  $B_v^{-1}[Z - A_2]S^+ = 0$  муносабат ҳам бажарилади. Шунда тескари боғланишлар матрицаси (37) дан аниқланади  $\hat{K} = B_v^{-1}[Z - A_2]\hat{H}^+$ . Бошланғич базисда  $K$  матрица узил-кесил куйидаги кўринишга эга бўлади:

$$K = \hat{M}B_v^{-1}[Z - A_2]\hat{H}^+. \quad (38)$$

Бу шу билан шартланадики, аксарият ҳолларда (38) тенгламалар тизими, қоидага кўра, тўлиқ аниқланмаган бўлиб ҳисобланади. Қидирилаётган ечимни турғунлаштириш ва (37), (38) даги псевдотескарилаш процедурасига кўпроқ сонли барқарорликни бериш учун мунтазам усуллардан фойдаланиш зарур бўлади.

$\hat{H}^+ = \hat{H}^T(\hat{H}\hat{H}^T)^{-1}$  ифоданинг ўринлилиги шу билан шартланадики, ҳар қандай  $\hat{H} \in R^{p \times n}$  матрицани  $U \in R^{p \times r}$  ва  $V \in R^{r \times p}$  матрицаларга эга бўлган “скелет” ёйилма кўринишида тақдим қилиш мумкин  $H = UV$ , бу ерда  $r = \text{rank} C \leq \min(p, n)$ . Энди  $\hat{H}^+ = V^+ \cdot U^+$ , ни кўямиз, бу ерда  $V^+ = V^T(VV^T)^{-1}$ ,  $U^+ = (U^T U)^{-1}U^T$ .  $\hat{H}$  матрицани тескарилашда  $Q = \hat{H}\hat{H}^T$  ни ҳисоблашга асосланган усулни ҳам қўллаш мумкин.  $Q$  матрица  $-p \times p$  тартибли  $r < p$ , рангли мусбат аниқланган симметрик матрица эканлигини ҳисобга оладиган бўлсак, у ҳолда

$$Q^+ = T^T(TT^T)^{-2}T, \quad (39)$$

бу ерда  $r$  рангли  $T_{(p \times r)}$  матрица  $Q = T^T T$ . ёйилмадан аниқланади..

Шундай қилиб, (39) ни ҳисобга олиш билан  $\hat{H}^+ = \hat{H}^T(\hat{H}\hat{H}^T)^{-1}$  ифодани

$$\hat{H}^+ = \hat{H}^T Q^+ = \hat{H}^T T^T (TT^T)^{-2} T. \quad (40)$$

кўринишда ёзиш мумкин.

$Q$  матрица ёмон шартланган бўлган ҳолда псевдоағдариш процедурасининг барқарорлигини ошириш учун (40) ифодада  $\hat{H}^+ = \hat{H}^T T^T (TT^T + \alpha I)^{-2} T$ , кўринишидаги мунтазам процедуралардан фойдаланиш мақсадга мувофиқ бўлади, бу ерда  $\alpha > 0$  – мунтазамлаштириш

параметри,  $I$  – бирлик матрица. Бу ерда мунтазамлаштириш параметри  $\alpha$  ни модели мисоллар асосида аниқлаш мақсадга мувофиқ.

Мураккаб динамик объектларни автоматик бошқариш тизимларини яратишда нейротармоқли тизимлар (НТ) катта роль ўйнайди. Бошқариш тизимларида НТ ларни қўллашнинг турли-туман усуллари мавжуд. Параметрик ноаниқлик шароитларида кўп қатламли нейрон тармоқли адаптив бошқариш тизимини синтезлаш масаласини кўриб чиқамиз. Ташқи мухитнинг  $v$  ғалаёнларини ҳисобга олмасдан объектнинг бошланғич айирмали тенгламалар тизимини ёзамиз:

$$x_{k+1} = f(x_k, \theta_k) + g(x_k)u_k, \quad (41)$$

бу ерда  $f(\cdot)$ ,  $g(\cdot)$ ,  $h(\cdot)$  – силлиқ вектор функциялар параметрлар кўплигигача бўлган аниқлик билан аниқланган,  $\theta$  – номаълум параметрларнинг вектори.

Сўнгра ўлчаш ва кузатиш, ғалаёнларни бостириш тизимининг динамикасини, ғалаёнлантирувчи таъсирлар моделининг ўзини айирмали тенгламалар тизимини тузамиз:

$$\omega_{k+1} = p(\omega_k), \quad (42)$$

бу ерда  $\omega \in R^u$  – объектга нисбатан ташқи бўлган, ғалаёнларни дунёга келтирадиган динамик тизимларнинг ҳолат вектори.

(41) ва (42) тенгламалар тизимларининг боғланиш тенгламаларини қуйидаги кўринишда ёзамиз:

$$h(x, u, \omega) = 0. \quad (43)$$

(41)-(43) тенгламалар базасида кенгайтирилган дифференциал тенгламалар тизимини ёзамиз:

$$\tilde{x}_{k+1} = \tilde{f}(\tilde{x}_k, \theta_k) + \tilde{g}(\tilde{x}_k)\tilde{u}_k, \quad (44)$$

бу ерда  $\tilde{x}_{k+1} \in R^q$  ( $q = n + \mu$ ) – кенгайтирилган тизимнинг ҳолат вектори;  $\tilde{u} \in R^p$  – кенгайтирилган тизимни янги бошқариш вектори.

Адаптив ростлагич сифатида кўп қатламли нейротармоқдан фойдаланувчи (44) синтезлаш масаласини кўриб чиқамиз. (4.48) бошқариладиган объектнинг ўзини қандай тутиши  $\theta$  параметрларга боғлиқ бўлади. Бошқаришнинг мақсадига хатонинг тескари тарқалишидан фойдаланувчи  $J = 0,5\sigma^T\sigma$  квадратик ўқитиш функционалини мослаштириш алгоритминини минималлаштириш йўли билан эришилади. Бунда  $u$  бошқарувчи таъсирни (41) объектнинг тенгламаларини ҳисобга олиш билан  $\sigma = 0$  шартдан олиш мумкин:

$$g(x)u = b, \quad (46)$$

бу ерда  $b = A^M x_k + B^M r_k - f(x)$ .

(46) тўлиқ аниқланган тизимни турғун ечиш учун  $(g^T(x)g(x))$ -минимал итерациялар усулини қўлаймиз. Ихтиёрий тарзда олинган қандайдир бир  $s \in C^m$  вектор учун  $q_1, q_2, \dots$  векторлар кетма-кетлиги қурилади, бу ерда  $q_i \in C^m$ , қуйидаги формулалар бўйича:  $q_1 = s$ ,  $v_1 = g(x)q_1$ ,  $q_2 = g(x)v_1 - \gamma_1 q_1$ , сўнгра

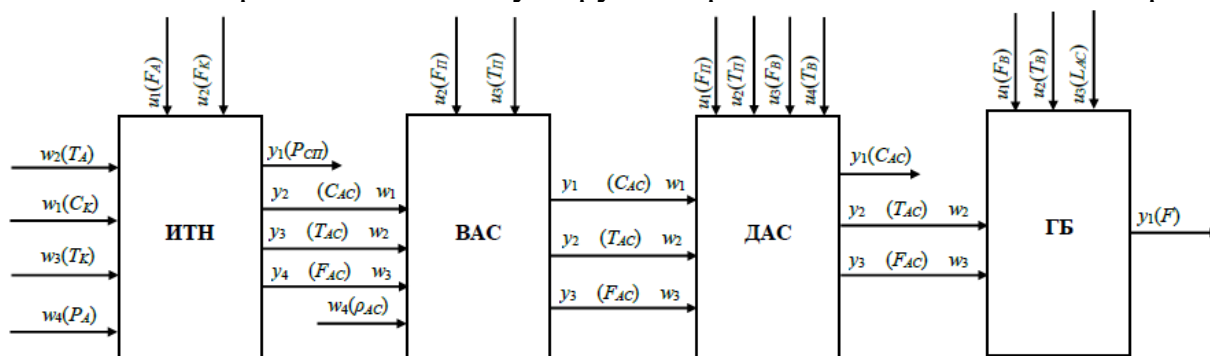
$i = 2, 3, \dots$  учун қуйидагини ҳисоблаймиз:  $q_{i+1} = g(x)v_i - \gamma_i q_i - \delta_i q_{i-1}$ , бу ерда  $\gamma_i = \frac{(g(x)v_i, g(x)v_i)}{(v_i, v_i)}$ ,  $\delta_i = \frac{(v_i, v_i)}{(v_{i-1}, v_{i-1})}$ ,  $v_i = g(x)q_i$ ,  $v_i \in C^n$ .

Бобда, шунингдек, динамик объектларни бошқариш учун нейротармоқли ростлагични синтезлаш алгоритмлари, экстремал усул асосида нейрон тармоғини ўқитишнинг мунтазам итерацион алгоритмлари кўриб чиқилган.

Келтирилган алгоритмлар матрицаларни турғун псевдоағдариш ва шу тариха параметрик ноаниқлик шароитларида кўп қатламли нейрон тармоқли адаптив бошқариш тизимларининг аниқлигини ошириш имконини беради.

Диссертацияни «**Аммиакли селитра ишлаб чиқариш технологик жараёнини автоматлаштириш ва бошқариш масалаларида ишлаб чиқилган синтезлаш алгоритмларини қўллаш**» деб номланган бешинчи бобида ишлаб чиқилган адаптив бошқариш тизимларини синтезлаш усуллари ва алгоритмларини аммиакли селитра ишлаб чиқаришнинг технологик жараёнларида қўлланиш натижалари келтирилган.

Бошқариш объекти сифатида аммиакли селитра ишлаб чиқаришни асосий тўртта босқичда ўрнатилган жараёнларини формаллаштириш кўриб чиқиладиган жараённинг асосий ўзгарувчиларини аниқлаш имконини берди.



1-расм. Аммиакли селитра ишлаб чиқариш жараёнлари структура схемаси ва улар орасидаги алоқа

Аммиакли селитра ишлаб чиқаришда бошқариш объекти сифатида нейтраллаш жараёнига таъсир кўрсатувчи асосий технологик параметрлар қуйидагилар ҳисобланади: Бошқарувчи таъсирлар:  $u_1(F_A)$  – газсимон аммиакнинг сарфи, м<sup>3</sup>/соат,  $u_2(F_K)$  – азот кислотасининг сарфи, м<sup>3</sup>/соат; Ғалаёнлантирувчи таъсирлар:  $w_1(C_K)$  – азот кислотасининг концентрацияси, %;  $w_2(T_A)$  – газсимон аммиакнинг ҳарорати, °С;  $w_3(T_K)$  – азот кислотасининг ҳарорати, °С;  $w_4(P_A)$  – газсимон аммиакнинг босими, кПа; Чиқувчи (бошқариладиган) ўзгарувчилар:  $y_1(P_{CN})$  – шарбат буғининг нейтраллаш иссиқлигидан фойдаланадиган аппарат (НИФА)дан чиқишдаги концентрацияси, кПа,  $y_2(C_{AC})$  – НИФА дан чиқишда эритмада аммиакли селитранинг концентрацияси, %,  $y_3(T_{AC})$  – НИФА дан чиқишда аммиакли селитра эритмасининг ҳарорати, °С,  $y_4(F_{AC})$  – аммиакли селитра эритмасининг сарфи, м<sup>3</sup>/соат.

Буғлатиш аппаратида аммиакли селитра эритмасини буғлатиш жараёнининг асосий технологик параметрлари: Бошқарувчи таъсирлар:  $u_1(F_{II})$  – иситувчи буғнинг сарфи, м<sup>3</sup>/соат,  $u_2(T_{II})$  – иситувчи буғнинг ҳарорати, °С;

Ғалаёнлантирувчи таъсирлар:  $w_1(C_{AC})$  – эритмада аммиакли селитранинг концентрацияси, %,  $w_2(T_p)$  – аммиакли селита эритмасининг ҳарорати, °С,  $w_3(F_{AC})$  – аммиакли селитра эритмасининг сарфи, м<sup>3</sup>/соат,  $w_4(\rho_{AC})$  – аммиакли селитра эритмасининг зичлиги, кг/м<sup>3</sup>; Чиқувчи (бошқариладиган) ўзгарувчилар:  $y_1(C_{AC})$  – буғлатувчи аппаратдан чиқишда эритмада аммиакли селитранинг концентрацияси, %,  $y_2(T_{AC})$  – буғлатувчи аппаратдан чиқишда аммиакли селитра эритмасининг ҳарорати, °С,  $y_3(F_{AC})$  – буғлатувчи аппаратдан чиқишда аммиакли селитра эритмасининг сарфи, м<sup>3</sup>/соат.

Аммиакли селитра эритмасини охиригача буғлатиш жараёнининг асосий технологик параметрлари: Бошқарувчи таъсирлар:  $u_1(F_{II})$  – иситувчи буғнинг сарфи, м<sup>3</sup>/соат,  $u_2(T_{II})$  – иситувчи буғнинг ҳарорати, °С,  $u_3(F_B)$  – ҳаво сарфи, м<sup>3</sup>/соат,  $u_4(T_B)$  – ҳавонинг ҳарорати, °С; Ғалаёнлантирувчи таъсирлар:  $w_1(C_{AC})$  – эритмада аммиакли селитранинг концентрацияси, %,  $w_2(T_p)$  – аммиакли селитра эритмасининг ҳарорати, °С,  $w_3(F_{AC})$  – аммиакли селитра эритмасининг сарфи, м<sup>3</sup>/соат; Чиқувчи (бошқариладиган) ўзгарувчилар:  $y_1(C_{AC})$  – охиригача буғлатиш аппаратида чиқишда эритмада аммиакли селитранинг концентрацияси, %,  $y_2(T_{AC})$  – охиригача буғлатиш аппаратида чиқишда аммиакли селитра эритмасининг ҳарорати, °С,  $y_3(F_{AC})$  – охиригача буғлатиш аппаратида чиқишда аммиакли селитра эритмасининг сарфи, м<sup>3</sup>/соат.

Аммиакли селитра эритмасини гранулалаш жараёнининг асосий технологик параметрлари: Бошқарувчи таъсирлар:  $u_1(F_{II})$  – ҳаво сарфи, м<sup>3</sup>/соат,  $u_2(T_{II})$  – ҳавонинг ҳарорати, °С,  $u_3(L_p)$  – виброакустик грануляторда эритманинг сатҳи; Ғалаёнлантирувчи таъсирлар:  $w_1(T_p)$  – аммиакли селитра эритмасининг ҳарорати, °С,  $w_2(F_{AC})$  – аммиакли селитра эритмасининг сарфи, м<sup>3</sup>/соат; Чиқувчи (бошқариладиган) ўзгарувчилар:  $y(F)$  – гранулаланган аммиакли селитранинг сарфи, т/соат.

Амалга оширилган формаллаштириш асосида, ҳар бири одатда қуйидаги тенглама билан тавсифланадиган ўзаро боғлиқ бўлган тўртта осттизимлардан иборат катта ўлчамли тизимлар динамикаси ва ўлчов тенгламаларини ёзамиз:

$$x_{i,k+1} = A_i x_{i,k} + B_i u_{i,k} + H_i w_{i,k}, \quad i = 1, 2, \dots, 4; \quad k = 0, 1, 2, \dots, (K - 1), \quad y_i = C x_i. \quad (47)$$

Математик моделни олиш ва ундан амалда фойдаланиш учун “Навоийазот” АЖ да аммиакли селитра ишлаб чиқариш технологик жараёнининг нормал фаолият кўрсатиши шароитларида саноат эксперименти ўтказилган. Аммиакли селитра ишлаб чиқариш жараёнининг динамик тавсифларини олдиндан таҳлил қилиш асосида кузатиладиган тасодифий жараёнларни  $T$  қайд қилиш вақти ва  $\Delta t$  амалга оширишларни дискретлаштириш вақти мос равишда  $T=6$  соат,  $\Delta t = 4$  мин қилиб танланган. Жами бўлиб 90 та ўлчашлар ўтказилган.

нейтраллаш жараёни учун:

$$A_I = [-0.0028, 0.6410, -0.3935, 0.9569; -0.9189, 0.0000, -0.3128, 0.5639; 0.0000, 0.3535, 0.0000, -0.1329; 0.5368, 0.9021, 0.6375, 0.5867];$$

$$B_I = [0.0000, -0.1736; 0.4100, 0.0000; -0.0016, -0.7014; 0.7487, 0.0000];$$

$$C_I = [0.3077, 0.2552, -0.8126, -0.7075; -0.1182, 0.0088, 0.0858, 0.6545; -0.2437, 0.0000, -0.3988, 0.6883; 0.1194, -0.1457, 0.0000, -0.9068];$$

буғлатиш жараёни учун:

$A_2 = [0.3334, -0.9216; -0.7689, -0.0023];$   
 $B_2 = [0.1681, 0.5578; 0.7448, -0.2209];$   
 $C_2 = [-0.3119, -0.1673; 0.2499, 0.0415; 0.3574, 0.4885];$   
 охиригача буғлатиш жараёни учун:  
 $A_3 = [0.3861, 0.9809; 0.9788, 0.8663];$   
 $B_3 = [0.2894, 0.4530, 0.0000, 0.0065; -0.5980, 0.4875, 0.1757, 0.2592];$   
 $C_3 = [-0.4971, 0.0121; -0.9353, -0.9099; -0.7053, -0.1085];$   
 гранулалаш жараёни учун:  
 $A_4 = [0.7536, -0.3606; -0.3858, 0.6139];$   
 $B_4 = [-0.5223, -0.6933; -0.2430, 0.1982; 0.4503, -0.8976];$   
 $C_4 = [0.1053, 0.8304].$

Ишлаб чиқилган моделнинг монандлиги қолдиқ хоссаларини таҳлилига асосланган мезон асосида ўрнатилган.

Ишлаб чиқаришни бошқаришнинг математик умумий масаласини қуйидаги

$$\min_{x,u,y \in S} \{F(x,u,y) = \sum_{i=1}^n f_i(x_i, u_i, y_i)\}$$

кўринишда шакллантириш мумкин, чекловларни ҳисобга олиб

$$y_i = g_i(x_i, u_i), \quad i = \overline{1,3}, \quad h_i(x_i, u_i, y_i) \geq 0, \quad x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}, \quad u_{i \min} \leq u_i \leq u_{i \max}, \quad y_{i \min} \leq y_i \leq y_{i \max},$$

бу ерда

$$\begin{aligned}
 f_1(x_1, u_1, y_1) &= (\lambda_1 G_1 + \lambda_2 G_2) / G_5, \quad f_2(x_2, u_2, y_2) = \lambda_3 G_n / G_{15}, \quad f_3(x_3, u_3, y_3) = \lambda G_6 / G, \\
 x_1 &= (T_A, T_K, C_K, P_A), \quad x_2 = (C_{AC}, T_{AC}, F_{AC}), \quad x_3 = (C_{AC}, T_{AC}, F_{AC}), \quad x_4 = (T_{AC}, F_{AC}), \\
 u_1 &= (F_A, F_K), \quad u_2 = (F_{II}, T_{II}), \quad u_3 = (F_{II}, T_{II}, F_B, T_B), \quad u_4 = (F_B, T_B, L_{AC}) \\
 y_1 &= (P_{CII}, C_{AC}, T_{AC}, F_{AC}), \quad y_2 = (C_{AC}, T_{AC}, F_{AC}), \quad y_3 = (C_{AC}, T_{AC}, F_{AC}), \quad y_4 = (F).
 \end{aligned}$$

Юқорида айтилганларни ҳисобга олиш билан оптимал бошқариш масаласини ўзаро боғланган динамик тизимларни оптималлаштириш ва бошқариш масаласи сифатида ифодалаймиз. Айтайлик осттизимларнинг ўзлари чизикли динамик тенгламалар билан тасвирлансин (47). Бунда бошланғич ҳолат маълум деб ҳисобланади, яъни

$$x_i(0) = x_{i,0}, \quad (48)$$

бу ерда  $z_i$  – бошқа осттизимларнинг чиқишлари билан ҳосил қилинган ўзаро

ҳаракатлар вектори, яъни  $z_{i,k} = \sum_{j=1}^N L_{ij} x_{j,k}$ . Бундай масалани ечиш учун (47) ва (48)

шартлар бажарилганда  $\lambda$  бўйича  $\Phi(\lambda)$  функцияни максималлаштириш зарур бўлади, бу ерда  $\Phi(\lambda) = \min_{x,u,z} L(x,u,z,\lambda)$ . Бунда

$$L(x,u,z,\lambda) = \sum_{i=1}^N L_i = \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{1}{2} \|x_{i,K}\|_{P_i}^2 + \sum_{k=0}^{K-1} \frac{1}{2} \left[ \|x_{i,k}\|_{Q_{i,k}}^2 + \|z_{i,k}\|_{S_{i,k}}^2 + \|u_{i,k}\|_{R_{i,k}}^2 + \lambda_{i,k}^T z_{i,k} - \sum_{j=1}^N \lambda_{i,k}^T L_{ji} x_{j,k} \right] \right\}. \quad (49)$$

(49) тенгламадаги иккиланган минималлаштириш масаласини (47) тенгламага мувофиқ  $M(p)$  функцияни  $p$  бўйича максималлаштириш масаласи сифатида аниқлаймиз, бу ерда (48) шарт бўжарилса



$$M(p) = \min_{x,u,z} \left\{ \frac{1}{2} \|x_{i,K}\|_{P_i}^2 + \sum_{k=0}^{K-1} \frac{1}{2} \left[ \|x_{i,k}\|_{Q_{i,k}}^2 + \|z_{i,k}\|_{S_{i,k}}^2 + \|u_{i,k}\|_{R_{i,k}}^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + p_{i,k}^T [A_i x_{i,k} + B_i u_{i,k} + C_i z_{i,k} - x_{i,k+1}] + \lambda_{i,k}^{*T} z_{i,k} - \sum_{j=1}^N \lambda_{j,k}^{*T} L_{ji} x_{i,k} \right] \right\} \quad (50)$$

$M(p)$  функциянинг градиенти қуйидаги ифода билан аниқланади.

$$\nabla M(p) \Big|_{p=p^*} = -x_{i,k+1}^* + A_i x_{i,k}^* + B_i u_{i,k}^* + C_i z_{i,k}^*, \quad (51)$$

Шунда (50) тенгламадан фойдаланиш билан

$$M(p) = \frac{1}{2} \|x_{i,K}\|_{P_{i,K}}^2 - p_{i,K-1}^{*T} x_{i,K} + \sum_{k=0}^{K-1} \{H_i(x_{i,k}, u_{i,k}, z_{i,k}, k) - p_{i,k-1}^{*T} x_{i,k}\},$$

деб ёзиш мумкин, бу ерда  $p(-1)$  нолга тенг деб тахмин қилинади. Натижада  $p = p^*$  белгиланган қийматлар учун қуйида келтирилган оптималлаштириш масаласи пайдо бўлади.

$k=0$  учун: (48) шартга мувофиқ  $H_i(x_{i,0}, u_{i,0}, z_{i,0})$  гамильтонианни минималлаштирадиган  $u_{i,0}$ ,  $z_{i,0}$  қийматларни топиш талаб қилинади. Бу масаланинг аниқ ечимини  $H_i$  нинг  $u_{i,0}$  ва  $z_{i,0}$  бўйича хусусий ҳосилаларини нолга тенглаштириш билан олиш мумкин, бу қуйидаги натижага олиб келади:

$$u_{i,0} = -R_i^{-1} B_i^T p_{i,0}^*, \quad z_{i,0} = -S_i^{-1} [C_i^T p_{i,0}^* + \lambda_{i,0}^*]. \quad (52)$$

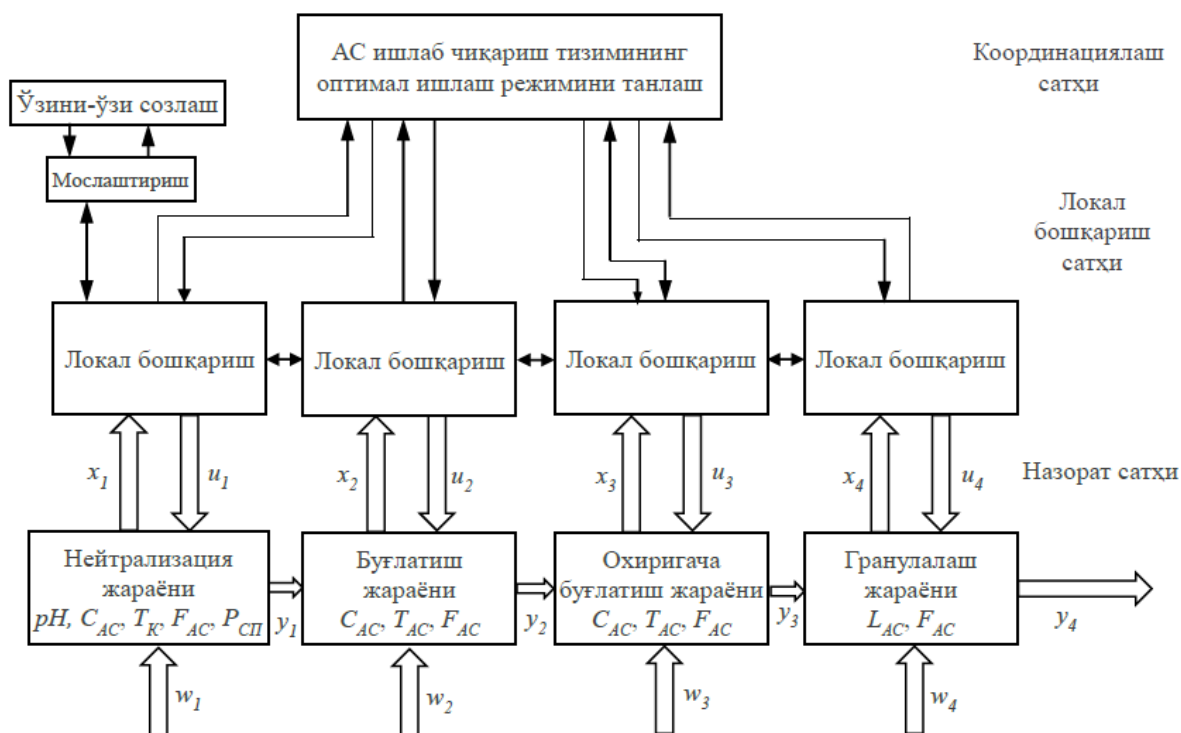
$k=1, 2, \dots, (K-1)$  учун:  $\{H_i(x_{i,k}, u_{i,k}, z_{i,k}, k) - p_{i,k-1}^{*T} x_{i,k}\}$  функционални минималлаштирадиган  $x_{i,k}$ ,  $u_{i,k}$ ,  $z_{i,k}$ , қийматларни топиш талаб қилинади. Бу масаланинг аниқ ечими қуйидаги ифодалардан аниқланади:

$$x_{i,k} = -Q_{i,k}^{-1} \left[ A_i^T p_{i,k}^* - p_{i,k-1}^* - \sum_{j=1}^N (\lambda_{j,k}^{*T} L_{ji})^T \right], \quad u_{i,k} = -R_i^{-1} B_i^T p_{i,k}^*, \quad z_{i,k} = -S_i^{-1} [C_i^T p_{i,k}^* + \lambda_{i,k}^*] \quad (53)$$

$k=K$  учун:  $\frac{1}{2} \|x_{i,K}\|_{P_{i,K}}^2 - p_{i,K-1}^{*T} x_{i,K}$ , ифодани минималлаштирадиган  $x_{i,K}$  ни топиш талаб қилинади. Бу қуйидаги натижани беради:

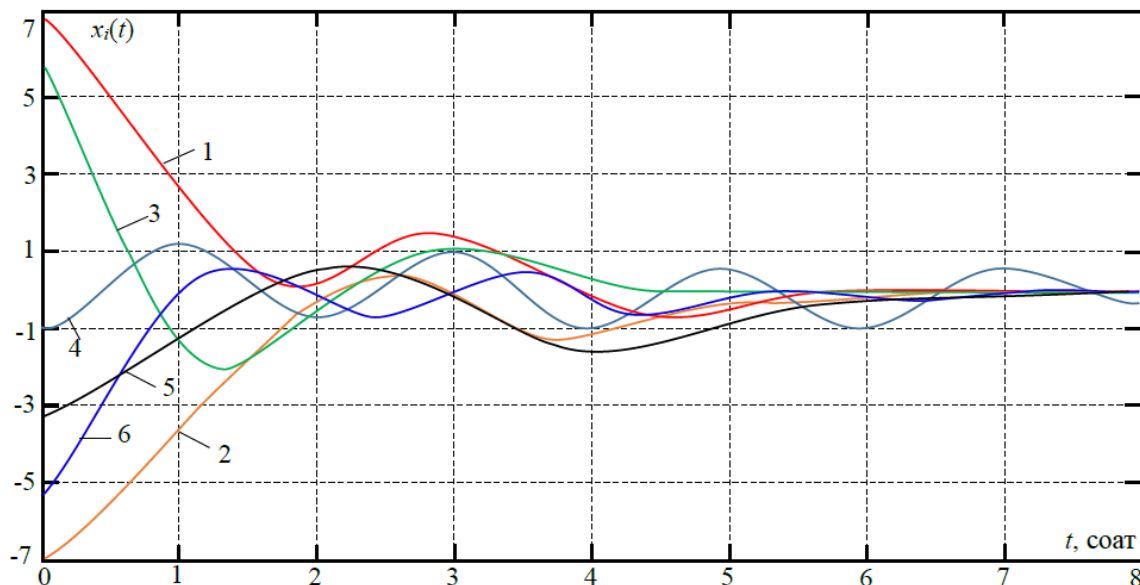
$$x_{i,K} = P_i^{-1} p_{i,K-1}^*. \quad (54)$$

Шундай қилиб, (47), (48) тенгламалар билан аниқланадиган динамикани ҳисобга олишда (50) даги  $J$  ни минималлаштириш мажмуавий масаласини уч даражали алгоритмдан фойдаланиш билан ечиш мумкин, бу ерда биринчи даражада берилган  $\lambda_k^*$  ва  $p_k^*$  кетма-кетликларни шунчаки оптимал тагмасалаларнинг аниқ ечимларини аниқлайдиган (52)-(54) ифодаларга ўрнига қўйиш зарур бўлади. Бу ечимлар асосида олинган  $x$ ,  $u$ ,  $z$  нинг оптимал қийматларидан иккинчи даражада (51) тенгламадан  $M(p)$  функциянинг градиентини ҳисоблаш учун фойдаланилади. Бу градиентдан, ўз навбатида,  $p$  нинг  $M(p)$  ни максималлаштирадиган қийматларини топиш учун фойдаланилади. Учинчи босқичда  $p$  нинг оптималлаштиришнинг иккинчи даражасида олинган оптимал қийматларидан  $\Phi(\lambda)$  ни итератив максималлаштириш учун фойдаланилади. Умумий максимумга  $\nabla \Phi(\lambda)$  ҳам,  $\nabla M(p)$  ҳам нолга яқинлашганда эришилади. 2-расмда оптималлаштириш масаласини ечишнинг уч даражали структураси келтирилган.

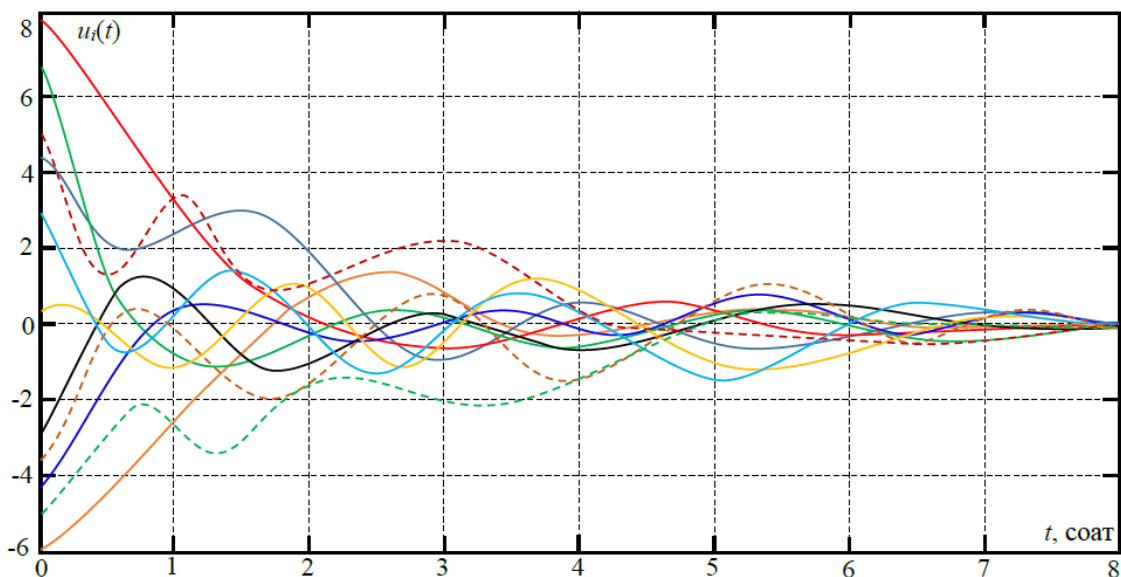


2-расм. Аммиакли селитра ишлаб чиқариш жараёнини автоматик бошқариш тизимининг шажаравий тақдим қилиниши

3- ва 4-расмларда маълум вақт давомида аммиакли селитра ишлаб чиқариш жараёнини мос равишда объект ҳолатининг параметрлари ва бошқариш таъсирларининг (52)-(54) ўзгариш графиклари келтирилган.



3-расм. Аммиакли селитра ишлаб чиқариш жараёнини мос равишда объект ҳолатларининг параметрлари ўзгариш графиклари: 1-газсимон аммиакнинг ҳарорати ( $T_A$ ); 2-азот кислотасининг ҳарорати ( $T_K$ ); 3- газсимон аммиакнинг босими ( $P_A$ ); 4-аммиакли селита эритмасининг ҳарорати ( $T_P$ ); 5-аммиакли селитра эритмасининг сарфи ( $F_{AC}$ ); 6- pH муҳитнинг қиймати



4-расм. Бошқариш таъсирларининг ўзгариш графикалари

Шундай қилиб, бошқариш тизимининг фаолият кўрсатишини имитациялашда олинган натижаларни таҳлил қилиш шуни кўрсатадики, турли ишлаб чиқариш вазиятларида вужудга келадиган ғалаёнларнинг таъсири широкларида аммиакли селитра ишлаб чиқаришнинг оптимал стратегиясини қўллаш квазистационарлик интервалларида фаолият кўрсатишнинг самардорлик критериясининг қийматини ошириш имконини беради. Ишлаб чиқаришнинг асосий технологик параметрларини таққослаш бошқариш тизимининг фаолият кўрсатиши натижасида азот кислотаси бўйича технометрик юкламадан ошиқча юкланиш коэффициентининг турғунлашишини ҳам кўрсатади, шу тариқа хомашёнинг нейтраллаш реакцияси натижасида ҳосил бўладиган шарбат буғининг йўқолишлари камаёди. НИФ аппарати юкласининг рационал тақсимланиши ҳисобига буғлатишга келиб тушадиган селитра эритмаларининг концентрацияси ортади ва бир тонна тайёр маҳсулотга кетадиган буғ сарфи камаёди.

## ХУЛОСА

Диссертацияда тизимли таҳлил, автоматик бошқариш тизимлар назарияси, динамик филтрлаш ва нокоррект масалаларни ечиш усуллари асосида адаптив бошқариш тизимини мунтазам синтезлашнинг конструктив услубиёти ишлаб чиқилган.

Натижада қуйидаги илмий натижалар олинган:

1. Качмаж алгоритмининг блокли варианты ва Гревил шаклидаги тўғри тўртбурчакли матрицани псевдоағдаридан фойдаланиб проекциялаш усуллари асосида кириш маълумотлари тахминий берилган шароитда ноаниқ динамик бошқариш объектларини идентификациялашнинг мунтазамлашган алгоритмлари ишлаб чиқилган. Натижада, кенгайтирилган тенгламалар тизимини соддалаштирилган мунтазамлаштириш усули энг яхши кўрсаткични таъминлаган.

2. Бошқариш объектларининг ҳолат векторини баҳолаш процедурасини ноаниқлик омиллариининг таъсирига сезгирмаслигини ошириш алгоритмлари

ишлаб чиқилган. Ушбу алгоритмлар созланувчи модели адаптив бошқариш тизимларида ростлагич параметрларини баҳолаш алгоритмларини синтезлаш масалаларини мунтазамлаш имконини беради.

3. Тахминий математик моделлар мавжуд бўлганда локал оптималлаштириш усули асосида ноаниқ динамик объектларни барқарорлаштириш тизимларини синтезлаш алгоритмлари ишлаб чиқилган.

4. Ташқи ғалаёнлар, сигналли ноаниқликлар ва ностационар номаълум параметрларнинг мавжудлигида чизикли динамик объектларни барқарорлаштириш алгоритмлари ишлаб чиқилган.

5. Айлантириш ёки қайтариш матрицалари ёрдамида ростлагич коэффициентлари учун тенгламалар тизимидаги матрицани ёйиш асосида ноаниқ бошқариш объектларининг бошқариш бўйича турғунлик хусусиятини эътиборга олган ҳолда диссипативлик тўғрисидаги масалада адаптив ростлагични синтезлашнинг мунтазам алгоритмлари ишлаб чиқилган.

6. Эквивалент кенгайтирилган кўшма тизимдан фойдаланиб матрицани псевдоағдариш концепцияси асосида параметрик ноаниқ объектларни билвосита адаптив бошқариш тизимларидаги ростлагичларни созлаш параметрлари учун мунтазамлашган итерацион баҳолаш ишлаб чиқилган.

7. Тезлик градиенти, параметрли ва сигналли мослаштириш усуллари асосида ноаниқ динамик объектларни адаптив бошқариш алгоритмлари ишлаб чиқилган. Ушбу алгоритмлар координатали ва параметрик ғалаёнларнинг етарлича кенг диапазонларида тизимнинг ишлаш қобилиятини таъминлайди.

8. Матрицани ёйишнинг турли ҳисоблаш схемалари асосида объект ҳолати тўғрисида тўлиқ маълумотга эга бўлмаган динамик объектларни бошқариш тизимларини синтез қилишнинг соддалаштирилган ҳисоблаш процедуралари ишлаб чиқилган.

9. Чизикли алгебраик тенгламалар тизимларининг псевдоағдаришларини аниқлашнинг рекуррент усулидан фойдаланиб, инвариантлик назарияси асосида динамик объектларни бошқариш тизимларини синтез қилиш алгоритмлари ишлаб чиқилган. Ишлаб чиқилган алгоритмлар параметрик ноаниқлик шароитида синтезлаш масалаларини мунтазамлаштириш ва бошқариш жараёнининг сифат кўрсаткичларини ошириш имконини беради.

10. Итерацияли мунтазамлаштириш тамойилидан фойдаланиб, вариацияли тенгсизликларни ечиш усуллари асосида кўп режимли нейрон тармоқли ростлагични синтез қилиш алгоритмлари ишлаб чиқилган. Натижада, алгоритмлар қидирилаётган баҳолашнинг изчиллигини ва интеллектуал бошқариш тизимининг юқори аниқлигини таъминлаш имконини беради.

11. Ишлаб чиқилган мунтазам синтезлаш алгоритмлари асосида аммиакли селитра ишлаб чиқариш жараёнларини адаптив бошқариш тизими таклиф қилинган. Олинган натижалар ва бошқариш тизимини моделлаштириш асосида ўткинчи жараёнларнинг таҳлили, объектни ишлаб чиқилган стратегияга мувофиқ бошқариш берилган сифатдаги маҳсулот ишлаб чиқаришни ўртача 2,4% га ошириш ва энергия сарфларини камайтириш ҳамда хомашё ва мақсадли маҳсулотнинг йўқолишларини камайтириш ҳисобига даромадларни ошириш имконини беради.

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

---

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**МАМИРОВ УКТАМ ФАРХОДОВИЧ**

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛЯРНОГО СИНТЕЗА СИСТЕМ  
АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННЫМИ  
ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ**

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

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

**Ташкент – 2021**

Тема докторской (DSc) диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за В2021.2.DSc/T440.

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.ziyounet.uz](http://www.ziyounet.uz))

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

**Официальные оппоненты:** Марахмиев Авазжон Рахимович  
доктор технических наук, профессор

Назаров Улугбек Султанович  
доктор технических наук, профессор

Файзиматов Шухранат Нуманович  
доктор технических наук, профессор


**Ведущая организация:** СП ООО «Химвавтоматика»

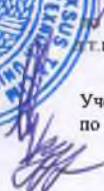
Защита диссертации состоится «24» 11 2021 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.T.03.02 при Ташкентском государственном техническом университете (Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz)).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (зарегистрировано №226) (Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: 207-14-70).

Автореферат диссертации разослан «18» 11 2021 года.  
(реестр протокола рассылки №16 от «03» 11 2021 года)



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

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

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

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

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире в настоящее время при решении задач автоматизации значительное место уделяется созданию совершенных систем управления технологическими процессами, требующими оперативного управления, контроля и поддержания заданных параметров по множеству взаимодействующих и взаимосвязанных контуров управления. В этом направлении определенные успехи достигнуты в ведущих странах мира, где разрабатываются и совершенствуются методы и средства управления для дальнейшего повышения качества производимой продукции. Однако в реальных объектах автоматизации имеют место параметрические, структурные, функциональные и другие типы неопределенностей, неучет которых в значительной степени снижают качество процессов управления. В связи с этим важно совершенствовать системы адаптивного управления, позволяющие повысить качество технологических процессов в условиях неопределенности.

В мире ведутся исследования по разработке систем адаптивного управления с высокой точностью управления объектами в условиях неопределенности, непрерывной идентификацией их параметров и оценкой их состояния. По этой причине актуальным является решение проблемы разработки и выбора оптимальной структуры системы управления, работающей в условиях изменения случайных факторов модели технологического процесса и воздействий случайных возмущений. В этой связи в настоящее время особое внимание уделяется исследованиям по совершенствованию систем управления неопределенными динамическими объектами, оптимизации процессов адаптивного управления, разработке методов и алгоритмов синтеза подсистем идентификации и оценки объектов и их реализации в различных секторах экономики.

В республике проводятся широкомасштабные мероприятия по эффективной организации мер по созданию высокоэффективных систем управления технологическими процессами и производствами. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 гг. отмечены задачи, в том числе, по «... повышению конкурентоспособности национальной экономики, ... сокращению энергоемкости и ресурсоемкости экономики, широкого внедрения в производство энергосберегающих технологий, повышению производительности труда в отраслях экономики, ... внедрению информационно-коммуникационных технологий в экономику, социальную сферу, системы управления»<sup>1</sup>. Для реализации подобных задач важным является разработка методов и алгоритмов регулярного синтеза систем адаптивного управления неопределенными динамическими объектами с использованием методов решения некорректно поставленных задач.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит для выполнения задач, предусмотренных указами Президента Республики

---

<sup>1</sup> Указ Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 г. №УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан».

Узбекистан №УП4947 от 7 февраля 2017 года “О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан”, от 19 февраля 2018 года №УП 5349 «О мерах по дальнейшему совершенствованию информационно-коммуникационных отраслей», постановлениями Президента №ПП-3983 от 25 октября 2018 года “О мерах по ускоренному развитию химической промышленности республики Узбекистан”, №ПП-4265 от 3 апреля 2019 года “О мерах по дальнейшему реформированию и повышению инвестиционной привлекательности химической промышленности”, 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».

**Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации<sup>2</sup>.** В ведущих научных центрах и высших образовательных учреждениях мира проводятся научные исследования, направленные на разработку методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления технологическими объектами, в том числе, в «Honeywell», «Siemens», Massachusetts Institute of Technology, University of California (США), Kungliga Tekniska högskolan (Швеция), Imperial College London, The University of Edinburgh (Великобритания), Technical University Munich, Technical University Darmstadt (Германия), Tokyo Institute of Technology (Япония), Korea Advanced Institute of Science and Technology (Южная Корея), «Alstom» (Франция), «Simatek-Energo» (Беларусь), University of Science and Technology of China (USTC) (Китай), Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана, Институте проблем управления РАН, Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации (Российская Федерация).

В результате исследований, проведенных в мире по созданию методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления неопределенными динамическими объектами, а также совершенствованию систем управления, получен ряд результатов, в том числе созданы методы и алгоритмы адаптивной параметрической идентификации и оценивания управляемых объектов в условиях неопределенности (Massachusetts Institute of Technology, University of California (США); Kungliga Tekniska högskolan (Швеция); Институте проблем управления РАН (РФ)); разработаны методы и алгоритмы робастного управления линейными неопределенными системами (The University of Edinburgh (Великобритания); Tokyo Institute of Technology (Япония); University of Science and Technology of China (Китай); Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (РФ));

---

<sup>2</sup> Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации составлен на основании <https://www.honeywell.com/us/en>, <https://www.siemens.com/global/en.html>, <https://web.mit.edu/>, <https://www.universityofcalifornia.edu/>, <http://www.cdio.org/>, <https://www.imperial.ac.uk/>, <https://www.ed.ac.uk/>, <https://www.tum.de/en/>, <https://www.tu-darmstadt.de/index.en.jsp>, <https://www.titech.ac.jp/english>, <https://en.snu.ac.kr/>, <https://www.kaist.ac.kr/kr/>, <https://www.alstom.com/>, <http://www.simatek.by/ru/index.html>, <https://en.ustc.edu.cn/>, <http://www.cedar.buffalo.edu/~srihari/CSE555/>, <https://bmstu.ru/>, <http://www.spiiras.nw.ru/>, <http://www.mipt.ru/>, <https://elibrary.ru/item.asp?id=21681096>, <https://studfiles.net/1376730/>, <https://cyberleninka.ru/.../obzor-metodov-raspoznavaniya-simvolov>, <http://ieeexplore.ieee.org/document/824819/>, <http://intellect-tver.ru/?p=165>, <http://www.nickart.spb.ru/analysis/market.php>, <https://www.ipu.ru/> и других источников.



разработаны алгоритмы адаптивного управления и адаптации динамическими объектами (Technical University Darmstadt (Германия); Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (РФ)); разработаны адаптивные алгоритмы идентификации объектов управления в условиях параметрической и структурной неопределенности (Korea Advanced Institute of Science and Technology (Южная Корея); Technical University Munich (Германия), Московский государственный технический университет им.Н.Э.Баумана (РФ)); разработаны методы и алгоритмы синтеза адаптивных систем управления на базе нечетких регуляторов и нейросетевой технологии (University of California (США); Linksping University (Швеция); Институт проблем управления РАН (РФ).

В мировых исследованиях по разработке инструментальных средств создания адаптивных систем управления неопределенными динамическими объектами с привлечением достижений современных информационных технологий по ряду приоритетных направлений проводятся научные исследования, в том числе, по формированию математических моделей объектов управления с неопределенными параметрами, разработке адаптивных алгоритмов идентификации объектов управления в условиях параметрической и структурной неопределенности, синтеза адаптивных систем управления нелинейными неопределенными объектами на базе интеллектуальных технологий, обеспечивающих требуемые точность и качество регулирования.

**Степень изученности проблемы.** Вопросам исследования теоретических и практических задач по адаптации процессов управления динамическими объектами и созданию высокоэффективных систем управления с учетом различных факторов сложности и неопределенности, разработке адаптивных систем управления технологическими объектами и процессами в условиях параметрической, структурной и модельной неопределенностей, посвящены работы ряда зарубежных учёных G.A.Apostolakis<sup>3</sup>, J.Dewooght<sup>4</sup>, J.K.Hedrick<sup>5</sup>, M.Hinrichsen<sup>6</sup>, D.Thunnissen<sup>7</sup>, H.K.Lee<sup>8</sup>, P.B.Shankar<sup>8</sup>, B.Song<sup>5</sup>, В.Н.Афанасьева<sup>9</sup>, Б.Р.Андриевсков<sup>10</sup>, А.А.Бобцова<sup>11</sup>, С.В.Емельянова<sup>12</sup>, С.К.Коровина<sup>12</sup>, Н.Н.Карабутова<sup>13</sup>, И.В.Ми-

---

<sup>3</sup> Apostolakis G.A. A Commentary on Model Uncertainty. Presented at Proc. Workshop I Adv. Topics Risk Reliab. Anal. – Model Uncertainty: Its Character Quantification, Annapolis, MD. 1994. P. 973–980.

<sup>4</sup> Dewooght J. Model uncertainty and model inaccuracy, Reliability Engineering and System Safety. 1998. Vol. 59. P. 171-185.

<sup>5</sup> Song, B., Hedrick, J.K. Dynamic Surface Control of Uncertain Nonlinear Systems. An LMI approach. – Springer Science & Busines Media, 2011.

<sup>6</sup> Hinrichsen, M. Control of Uncertain Systems. USA. Springer Science & Busines Media, 2011.

<sup>7</sup> Thunnissen D. Uncertainty classification for the design and development of complex systems, Proceedings of the 3rd Annual Predictive Methods Conference, Veros Software, Santa Ana, CA, June, 2003. P. 1-16.

<sup>8</sup> Shankar P. Bhattacharyya, Lee H Keel. Control of Uncertain Dynamic Systems. CRC Press. 1991. -544 p.

<sup>9</sup> Афанасьев В.Н. Управление неопределенными динамическими объектами. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 208 с.

<sup>10</sup> Андриевский Б.Р. Методы управления в условиях неопределенности. - Л.: ЛМИ, 1989. - 88с.

<sup>11</sup> Мирошник И.В., Никифоров В.О., Бобцов А.А. Адаптация пространственного движения нелинейных динамических систем // 6-й Санкт-Петербургский симпозиум по теории адаптивных систем (SPAS'99). 1999. С.115-119.

<sup>12</sup> Емельянов С.В., Коровин С.К. Стабилизация неопределенных динамических объектов с непрерывным временем. В сб. «Новые методы управления сложными системами», – М.: Наука, 2004.

<sup>13</sup> Карабутов Н.Н. Адаптивная идентификация систем: информационный синтез. 2006. - 384 с.

рошника<sup>11</sup>, В.О.Никифорова<sup>11</sup>, И.Б.Фуртата<sup>14</sup>, С.Б.Пельцвергера<sup>15</sup>, М.Ю.Сергина<sup>16</sup>, А.М.Цыкунова<sup>14</sup> и др., а также отечественных ученых Б.М.Азимова, Т.Ф.Бекмуратова, Ш.М.Гулямова, О.О.Зарипова<sup>17</sup>, Х.З.Игамбердиева<sup>17,18</sup>, М.А.Исмаилова, М.М.Камилова, А.Р.Марахимова<sup>19</sup>, Ж.У.Севинова<sup>18</sup>, И.Х.Сидикова<sup>19</sup>, Ш.Х.Фазилова, Н.Р.Юсупбекова<sup>20</sup> и др.

Со стороны вышеупомянутых учёных велись исследования, посвященные проблемам по формированию математических моделей объектов управления с неопределенными параметрами, разработке адаптивных алгоритмов идентификации, оценивания и управления сложными динамическими системами, обеспечивающих требуемые точность и качество регулирования, методов и алгоритмов робастного управления линейными неопределенными системами.

Наряду с этим, несмотря на имеющиеся достижения в области исследований по рассматриваемым вопросам и значительные результаты, достигнутые в области методов синтеза адаптивных систем управления неопределенными объектами, в настоящее время в недостаточной степени разработаны регуляризованные алгоритмы синтеза систем адаптивного управления неопределенными динамическими объектами.

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

**Цель исследования** состоит в разработке методов и алгоритмов регулярного синтеза систем адаптивного управления неопределенными динамическими объектами и их практическом применении при решении задач автоматизации и управления конкретными процессами производства.

---

<sup>14</sup> Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Робастное управление нестационарными объектами с неизвестной переменной относительной степенью // Управление большими системами, 2011, Выпуск 33, –С. 91-112.

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

<sup>16</sup> Сергин Михаил Юрьевич. Принципы, методы и алгоритмы построения систем управления технологическими процессами со структурной неопределенностью: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06: Тамбов, 2004. -305 с.

<sup>17</sup> Игамбердиев Х.З., Юсупбеков А.Н., Зарипов О.О. Регулярные методы оценивания и управления динамическими объектами в условиях неопределенности. – Т.: ТашГТУ, 2012. –320 с.

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

<sup>19</sup> Марахимов А.Р., Игамбердиев Х.З., Юсупбеков А.Н., Сидиков И.Х. Нечетко множественные модели и интеллектуальное управление технологическими процессами. –Т.: ТашГТУ, 2014. –240 с.

<sup>20</sup> Юсупбеков Н.Р., Нурмухамедов Х.С., Зокиров С.Г. Кимёвий технология асосий жараён ва курилмалари. –Т.: «Фан ва технология», 2015, 848 б.

### **Задачи исследования:**

системный анализ проблемы и методов управления неопределенными динамическими объектами;

разработка регулярных алгоритмов параметрического и координатного оценивания неопределенных объектов управления;

разработка регулярных алгоритмов стабилизации неопределенных динамических объектов;

разработка регулярных алгоритмов синтеза регуляторов в адаптивных системах управления параметрически неопределенными объектами;

разработка регулярных алгоритмов адаптивного управления и адаптации неопределенных динамических объектов на основе эталонных моделей;

разработка регулярных алгоритмов синтеза систем управления неопределенными динамическими объектами;

практическая апробация разработанных алгоритмов и вычислительных схем регулярного синтеза систем адаптивного управления неопределенными динамическими объектами при решении задачи синтеза адаптивной системы управления конкретным технологическим объектом.

**Объектом исследования** являются системы адаптивного управления неопределенными динамическими объектами.

**Предметом исследования** составляют методы и алгоритмы регулярного синтеза систем адаптивного управления неопределенными динамическими объектами.

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

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

разработаны методы и алгоритмы синтеза систем адаптивного управления неопределенными динамическими объектами на основе концепций обратных задач динамики управляемых систем и принципа регуляризации некорректных задач;

разработаны алгоритмы повышения грубости процедуры оценки вектора состояния объектов управления к влиянию факторов неопределенности на основе регулярных алгоритмов обращения невырожденной блочной матрицы с выделением ее левых и правых делителей нуля максимального ранга;

разработаны регулярные алгоритмы синтеза систем стабилизации неопределенных динамических объектов на основе метода локальной оптимизации при наличии приближенных математических моделей;

разработаны алгоритмы стабилизации линейного динамического объекта при наличии внешних возмущений и сигнальной неопределенности на основе регулярных итерационных алгоритмов, позволяющих облегчить контроль точности промежуточных вычислений;

разработаны регулярные алгоритмы синтеза адаптивного регулятора в задаче о диссипативности с учетом свойства устойчивости по управлению неопределенных объектов управления на основе разложения матрицы

системы уравнений для коэффициентов регулятора с помощью матриц вращения или отражения;

разработаны регулярные алгоритмы адаптивного управления неопределенными динамическими объектами на основе методов скоростного градиента, параметрической и сигнальной адаптации, обеспечивающие работоспособность системы при изменении координатных и параметрических возмущений в достаточно широких пределах;

разработаны регулярные упрощенные вычислительные процедуры синтеза систем управления динамическими объектами при неполной информации о состоянии объекта на основе различных вычислительных схем разложения матриц;

разработаны регулярные алгоритмы синтеза адаптивной системы управления с многослойной нейронной сетью в условиях параметрической неопределенности на основе расширенной системы уравнений для базовой структуры обобщенного настраиваемого объекта с использованием методов минимальных итераций и разбиения матриц на блоки.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

разработаны программные обеспечения, предназначенные для решения задачи идентификации переходной матрицы управляемых объектов, синтеза системы управления динамическими объектами в условиях параметрической неопределенности;

на основе результатов промышленного эксперимента в условиях нормального функционирования разработаны математические модели основных подсистем производства аммиачной селитры;

разработаны иерархические представления системы автоматического управления процессом производства аммиачной селитры;

разработана функционально-структурная схема системы адаптивного управления технологическими процессами производства аммиачной селитры с соответствующим техническим обеспечением, позволяющая стабилизировать технологические режимы протекания процессов и повысить эффективность их функционирования.

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

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследования состоит в разработке конструктивных методов и алгоритмов регулярного синтеза систем адаптивного управления неопределенными динамическими объектами, позволяющих повысить качество и оперативность процессов управления.

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке математического и алгоритмического обеспечения задач адаптивного управления неопределенными динамическими объектами широким классом технологических объектов и могут найти широкое применение при построении функциональной структуры и автоматизации проектирования адаптивных систем управления технологическими процессами с непрерывным характером производства.

**Внедрение результатов исследования.** Полученные научные результаты по регулярному синтезу систем адаптивного управления неопределенными динамическими объектами внедрены в следующих формах:

алгоритмы повышения грубости процедуры оценки вектора состояния объектов управления к влиянию факторов неопределенности внедрены на АО «Навоийазот» (Справка АО «Узкимёсаноат» №04-3420 от 22 сентября 2021 года). Алгоритмы позволяют регуляризовать задачу синтеза алгоритмов оценивания параметров регуляторов в адаптивных системах управления с настраиваемой моделью и получать устойчивые к априорно неизвестным внешним возмущениям оценки искомых величин;

регулярные алгоритмы стабилизации линейного неопределенного динамического объекта внедрены на АО «Навоийазот» (Справка АО «Узкимёсаноат» №04-3420 от 22 сентября 2021 года). Алгоритмы обеспечивают работоспособность адаптивных систем при нарушении идеальных условий функционирования;

регулярные упрощенные вычислительные процедуры синтеза систем управления динамическими объектами при неполной информации о состоянии объекта на основе различных вычислительных схем разложения матриц внедрены на АО «Навоийазот» (Справка АО «Узкимёсаноат» №04-3420 от 22 сентября 2021 года). Алгоритмы позволяют регуляризовать задачу синтеза систем с заданным спектром и стабилизировать технологические режимы протекания процессов в производстве аммиачной селитры.

**Апробация результатов исследования.** Результаты данного исследования были обсуждены на 9 международных и 7 республиканских научно-практических конференциях.

**Опубликованность результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 41 научные работы, в том числе 1 монография, 19 статей в журнальных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан к публикациям основных научных результатов докторских диссертаций (в 10 зарубежных и 9 республиканских журналах), также получено 5 свидетельств об официальной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 189 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В первой главе **«Проблемы и методы управления неопределенными динамическими объектами»** представлены результаты классификации и типы неопределенностей в задачах управления динамическими объектами и их особенности, процедуры выбора математической модели объектов управления с неопределенными параметрами, формального описания алгоритмов управления системами в условиях модельной неопределенности, а также основные разновидности методов и алгоритмов синтеза систем управления неопределенными динамическими объектами, цель и задачи исследования.

При автоматизации технологических процессов в различных отраслях промышленности требуется разработка высокоточных эффективных систем управления. В свою очередь для построения качественной системы управления необходимо наличие априорной информации о параметрах объекта и возмущающих воздействий. В реальных случаях такая информация обычно отсутствует. В таких случаях приходится восполнять недостающую априорную информацию в процессе управления объектом. Такая процедура связана с адаптацией управляющего устройства к неизвестным условиям функционирования управляемого объекта.

При решении задач синтеза систем адаптивного управления неопределенными объектами часто используются идеи невариационных методов. Поэтому естественным образом возникает стремление проанализировать особенности задач синтеза систем адаптивного управления неопределенными объектами с позиций методов теории некорректно поставленных задач и выявить наиболее эффективные из них. В недостаточной степени исследованы также вопросы регулярной параметрической идентификации и синтеза регулятора в условиях ограниченной априорной информации об искомом решении.

Вышеизложенные выводы обусловили постановку цели настоящей диссертационной работы, посвященной разработке и исследованию алгоритмов регулярного синтеза систем адаптивного управления неопределенными динамическими объектами и их практическому применению.

Вторая глава диссертации «Разработка регулярных алгоритмов параметрического и координатного оценивания неопределенных объектов управления» посвящена разработке регулярных алгоритмов параметрического оценивания неопределенных объектов управления. Рассмотрим линейную модель объекта с параметрической неопределенностью вида:

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= \tilde{A}x_k + \tilde{B}u_k + w_k, \quad x_{00} = x_0^0, \\y_k &= Hx_k + v_k,\end{aligned}$$

где  $x \in R^n$ ,  $y \in R^l$ ,  $u \in R^m$  – векторы состояния, выхода и управления объекта;  $w_k \in R^n$ ,  $v_k \in R^l$  – взаимно независимые беложумные гауссовские последовательности в уравнении объекта и в уравнении наблюдения;  $\tilde{A} = A_0 + \Delta A$ ,  $\tilde{B} = B_0 + \Delta B$ , где  $A_0, B_0$  – заданные номинальные значения параметров;  $\Delta A, \Delta B$  – квазистационарные неизвестные матрицы возмущенных параметров объекта.

Образуем с помощью линейной обратной связи по состоянию  $u_k = u_{1,k} - k_k^T x$  внутренний контур управления, уравнения которого имеют вид:

$$x'_{k+1} = [A_0 - B_0 k_k^T] x'_k + B_0 u_{1,k} + w'_k; \quad x_{00} = x_0^0; \quad y'_k = Hx'_k + v'_k.$$

Устройство оценивания состояний представляет собой фильтр Калмана, построенный для эталонной модели внутреннего контура:

$$\begin{aligned}\hat{x}'_{k+1} &= [A^M - \tilde{k}_k H] \hat{x}'_k + \tilde{k}_k y_k + B^M u_{1,k}, \quad \hat{y}'_k = H \hat{x}'_k, \quad \tilde{k}_k = P_k H^T R_k^{-1}, \\P_{k+1} &= A^M P_k + P_k (A^M)^T - P_k H^T R_k^{-1} H P_k + Q_k.\end{aligned}$$

Введем расширенные векторы состояния и наблюдений  $x_{p,k} = (x_k, x'_k)$ ,  $y_{p,k} = (y_k, y'_k)$ . Тогда оценку расширенного вектора состояния  $\hat{x}_{p,k} = \hat{x}_k + \hat{x}'_k$  можно записать в виде:

$$\tilde{x}_{p,k} = D \hat{x}_{p,k} = \begin{bmatrix} D_1 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_k \\ \hat{x}'_k \end{bmatrix}.$$

Для оптимальной настройки  $D = [D_1 \ D_2]$  рассмотрим задачу минимизации по  $D$  квадратичного функционала:

$$J = \text{tr} \left\{ M [y_k y_k^T] - 2 H D x_{p,k} M [y_k^T] + H D x_{p,k} x_{p,k}^T D^T H^T \right\}.$$

Отсюда, используя операцию псевдообращения матрицы, получим

$$D = (H^T H)^+ H^T M [y_k] \hat{x}_{p,k} [\hat{x}_{p,k} \hat{x}_{p,k}^T]^+. \quad (1)$$

Матрица  $F = (H^T H)$  в выражении (1) чаще всего является вырожденной квадратной матрицей, т.е.

$$F \in R^{n \times n}, \quad \det F = 0, \quad \text{rank} F = m < n. \quad (2)$$

Сформируем блочную матрицу:

$$\begin{bmatrix} F^T & F_R \\ F_L & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F & F_L^T \\ F_R^T & 0 \end{bmatrix} \in R^{(2n-m) \times (2n-m)},$$

где  $F_L, F_R$  – левый и правый делители нуля максимального ранга, т.е.

$$F_L F = 0, \quad \text{rank} F_L = n - m; \quad (3)$$

$$FF_R = 0, \text{rank}F_R = n - m. \quad (4)$$

Далее везде предполагается, что делители  $F_L$  и  $F_R$  имеют максимальные ранги в смысле (2)-(4). При этом выполняется следующее тождество рангов:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} F^T & F_R \\ F_L & 0 \end{bmatrix} = 2n - m.$$

Тогда псевдообратная матрица  $F^+ \in R^{n \times n}$  имеет вид:

$$F^+ = TFT, \quad (5)$$

где  $T = (F + F_L^T \varphi^T F_R^T)^{-1} = (F + (F_R \varphi F_L)^T)^{-1}$  – неединственная обратимая матрица;  $\varphi \in R^{(n-m) \times (n-m)}$  – произвольная квадратная обратимая матрица. Если выполняются условия полуортогональности  $F_R^T F_R = F_L F_L^T = \varphi^T \varphi = I_{n-m}$ , то формула вычисления псевдообратной матрицы (5) приобретает следующий вид:

$$F^+ = (F + (F_R \varphi F_L)^T)^{-1} - F_R \varphi^T F_L. \quad (6)$$

Для простоты, исключая из рассмотрения матрицу  $\varphi$ , вместо (6) можно записать уравнение  $F^+ = (F + (F_R F_L)^T)^{-1} - F_R F_L$ .

Здесь также рассмотрены вопросы построения робастных алгоритмов оценивания состояния объектов управления на основе расширенных наблюдателей калмановского типа и алгоритмов идентификация переходной матрицы управляемых объектов в условиях параметрической неопределенности на основе регулярных методов.

Приведенные регулярные вычислительные процедуры позволяют регуляризовать задачу синтеза алгоритмов оценивания параметров регуляторов в адаптивных системах управления с настраиваемой моделью и повысить качественные показатели процессов управления в условиях параметрической неопределенности.

В третьей главе диссертации «**Разработка регулярных алгоритмов стабилизации неопределенных динамических объектов**» приводятся результаты разработки регулярных алгоритмов синтеза систем стабилизации неопределенных динамических объектов.

Описание объекта управления, как правило, не бывает известно точно. По этой причине любой алгоритм управления, опирающийся на математическую модель, должен обладать определенной устойчивостью к «малым шевелениям» этой модели, или, как говорят, быть грубым. Рассмотрим объект управления, описываемый уравнением

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t + \xi_t, \quad (7)$$

при этом приближенная его модель имеет вид:  $x_{t+1} = Cx_t + Du_t + \xi_t$ , где  $x_t \in R^n$ ,  $u_t \in R^m$ ,  $\xi_t \in R^n$  – соответственно векторы состояния, управления и неизмеряемых возмущений;  $A, B, C, D$  – матрицы соответствующих размерностей.

В соответствии с модифицированным методом локальной оптимизации стабилизирующее управление в момент времени  $t$  ищется как решение следующей задачи:

$$\|Cx_t + Du_t + x_t - Cx_{t-1} - Du_{t-1}\| \rightarrow \min, \quad u \in R^m. \quad (8)$$



Данный способ нахождения управления соответствует идее одношаговой оптимизации: в каждый момент времени  $t$  минимизируется сумма вектора  $x_{t+1}$  и некоторой «оценки» неизмеряемого возмущения.

Так как условие  $\text{Ker}D = \{0\}$  равносильно тому, что  $D^T D$  – обратимая матрица, то, обозначая  $L = (D^T D)^{-1} D^T$  получаем из (8):

$$u_t = -L((C + I)x_t - Cx_{t-1} - Du_{t-1}),$$

или с учетом (7)

$$u_t = -L(Cx_t + (A - C)x_{t-1} + (B - D)u_{t-1} + \xi_{t-1}). \quad (9)$$

Обозначая  $v_t = u_t - \hat{u}_t$ , с учетом выражений (7) и (9) можно получить

$$x_{t+1} = (A - BLC)x_t - BL(A - C)x_{t-1} - BL(B - D)v_{t-1} + BL(\xi - \xi_{t-1}) - (\xi - \xi_t). \quad (10)$$

Записывая (10) в векторно-матричной форме и учитывая обозначения

$$z_t = (x_t, x_{t-1}, v_{t-1})^T, \quad \zeta_t = (\xi - \xi_t, \xi - \xi_{t-1}, 0)^T$$

можно показать, что  $\det(\Lambda_0 - \lambda I) = \lambda^{n+m} \det(C - DLC - \lambda I)$ , т.е. собственные числа матрицы  $\Lambda_0$  по модулю меньше единицы. Это указывает на грубость процедуры локально-оптимальной стабилизации. В случае, когда матрица  $D$  является матрицей неполного ранга, то рассматриваемая задача является некорректно поставленной и здесь необходимо использовать регулярные методы.

Зададим матрицу размера  $n \times m$ ,  $D_m = (d_1, d_2, \dots, d_m)$ , столбцами которой служат векторы  $d_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ . Используя очевидное обозначение  $D_{m-1}$ , эту матрицу можно представить в виде

$$D_m = (D_{m-1} \mid d_m), \quad m = 2, 3, \dots$$

Псевдообращения матрицы  $D_1$  осуществляются по формуле  $D_1^+ = d_1^T / d_1^T d_1$ .

Для последовательного нахождения псевдообратной матрицы  $D_{m+1}^+$  в работе использован метод Гревилля с псевдообратной матрицей

$$D_{m+1}^+ = \left( D_m^+ \left[ I - d_{m+1} k_{m+1}^T \right] / k_{m+1}^T \right),$$

где параметр  $k_{m+1}^T$  обуславливается значениями матрицы  $D_m$  и вектора  $d_{m+1}$ .

Приведенные вычислительные процедуры позволяют регуляризовать задачу синтеза систем стабилизации неопределенных динамических объектов и повысить качественные показатели процессов управления при наличии приближенных математических моделей.

Рассмотрим теперь задачу стабилизации при наличии внешних возмущений и сигнальной неопределенности. Пусть объект управления описывается уравнением

$$x_{k+1} = [A + \eta_k] x_k + B u_k, \quad x_k(0) = x_0,$$

где  $A$  – известная матрица, которая обеспечивает приемлемые переходные процессы в системе,  $\eta_k$  – матрица параметрических возмущений.

Для компенсации параметрических возмущений  $\eta_k$  управление может быть выбрано в виде:

$$u_k = -R^{-1} B^T \left[ S_k^* + s_k \right] x_k,$$

где  $s_k$  – матрица настраиваемых параметров. Для полной компенсации параметрических возмущений  $\eta_k$  используется выражение:

$$BR_k^{-1}B^T s_k = \eta_k. \quad (11)$$

Приведем алгоритм решения систем уравнений вида (11), основанный на использовании проекционного алгоритма Качмажа. Для регуляризации решения представим уравнение (11) в виде:

$$G_k s_k = \eta_k, \quad (12)$$

где  $G_k = BR_k^{-1}B^T$ .

Последовательность

$$s_k^i = s_k^{i-1} + G_{k,l}^+(\eta_l - G_l s_k^{i-1}), \quad l = \text{mod}_p(i), \quad (13)$$

сходится к решению  $s_k^*$  системы (12), где  $G = [G_1^T \dots G_p^T]^T$ ,  $\eta = [\eta_1^T \dots \eta_p^T]^T$ . Рассмотрим вопрос о зависимости скорости сходимости алгоритма от наклонов линейных многообразий. Введем обозначения  $r_k^{i,i-1} = s_k^{i-1} - s_k^i$ ,  $r_k^i = s_k^i - s_k^*$ . Из (13) следует

$$r_k^{i,i-1} = -G_{k,l}^+(\eta_{k,l} - G_{k,l} s_k^{i-1}) = G_{k,l}^+ G_{k,l} s_k^{i-1} - G_{k,l}^+ \eta_{k,l}. \quad (14)$$

Известно, что  $G_{k,l}^+ \eta_{k,l} \in R_l$ ,  $G_{k,l}^+ G_{k,l} s_k^{i-1} \in R_l$ , следовательно,  $r_k^{i,i-1} \in R_l$ . Вычитая из обеих частей (13) вектор  $s_k^*$  и учитывая (14), получаем

$$r_k^i = r_k^{i-1} - r_k^{i,i-1}, \quad r_k^{i,i-1} = G_{k,l}^+ G_{k,l} r_k^{i-1}. \quad (15)$$

Критерий останова итерационного процесса (15) целесообразно выбирать в виде:

$$\|r_k^{i,i-1}\| = \|z_k^{i-1} - z_k^i\| \leq \varepsilon. \quad (16)$$

Приведенные вычислительные процедуры позволяют регуляризовать задачу стабилизации линейного неопределенного динамического объекта на основе итерационного алгоритма и повысить качественные показатели процессов управления.

При синтезе адаптивных систем весьма важным вопросом является анализ свойства диссипативности рассматриваемой системы. Рассмотрим алгоритмы устойчивого оценивания параметров стабилизирующего регулятора в задаче о диссипативности адаптивной системы управления стохастическими объектами. Будем рассматривать объект управления, описываемый уравнением вида:

$$a(\nabla; \xi) y_t = b(\nabla; \xi) u_t + v_t(\xi), \quad (17)$$

где  $u_t$  и  $y_t$  – скалярные входной и выходной сигналы объекта, полиномы  $a(\nabla; \xi)$  и  $b(\nabla; \xi)$  имеют вид:

$$\begin{aligned} a(\lambda, \xi) &= 1 + \lambda_1 a_1(\xi) + \dots + \lambda^r a_r(\xi), \\ b(\lambda, \xi) &= \lambda^k [b_k(\xi) + \dots + \lambda^{r-k} b_r(\xi)]. \end{aligned} \quad (18)$$

Обозначим через  $k$  набор коэффициентов полиномов (18), зависящих от  $\xi$ ,  $k = k(\xi)$ ,  $k(\xi) = \text{col}(a_{i_1}(\xi), \dots, a_{i_l}(\xi), b_{j_1}(\xi), \dots, b_{j_m}(\xi))$ ,  $1 \leq i_l \leq r$ ,  $k \leq j_m \leq r$ .

При известном векторе существенных параметров  $k(\xi)$  систему уравнений для коэффициентов регулятора можно записать в виде

$$Az = f, \quad A: Z \rightarrow F, \quad (19)$$

где  $A = A(k)$  и  $f = f(k)$  определяются на основе характеристического полинома оптимальной системы  $g(\lambda) = a(\lambda)\alpha(\lambda) - b(\lambda)\beta(\lambda)$  и полиномов  $\alpha(\lambda, k)$ ,  $\beta(\lambda, k)$  регулятора  $\alpha(\nabla, \tau)u_i = \beta(\nabla, \tau)y_i$ ,  $z = \text{col}(\alpha_1, \dots, \alpha_p, \beta_1, \dots, \beta_p)$ ,  $p$  – разностный порядок регулятора.

Если полиномы  $\alpha(\lambda, k)$ ,  $\beta(\lambda, k)$  не имеют общих корней, т.е. объект управления (17) – управляемый, то система (19) однозначно разрешима относительно  $z$  при некотором  $p \leq r$ . Однако, если объект управления не при всех  $k$  является управляемым, то система (19) может оказаться неразрешимой. В таких случаях целесообразно использовать регулярные методы.

Условия аппроксимации задачи (19) примем в виде  $\|A - \bar{A}\| \leq h$ ,  $\|f - \bar{f}\| \leq \delta$ , где  $\bar{A}$  и  $\bar{f}$  – точные значения матричного оператора и правой части уравнения (19) соответственно. Применение метода регуляризации сводится к многократному решению системы

$$(A^T A z + \alpha C) z_\alpha = A^T f \quad (20)$$

при различных значениях параметра  $\alpha$ . Здесь  $C$  – симметричная, положительно определенная матрица.

Прямое вычисление матрицы  $A^T A + \alpha C$  и решение системы (20) с этой матрицей приводит к вычислительным трудностям. При малых  $\alpha$  приходится решать систему  $A^T A z = A^T f$ , которая обусловлена значительно хуже, чем (19).

Разложим матрицу  $C$  в произведение  $C = B^T B$ , где  $B$  – правая треугольная матрица. Тогда система (20) будет эквивалентна системе  $(P^T P + \alpha I) y_\alpha = P^T f$ , где  $P = AB^{-1}$ ,  $y_\alpha = B z_\alpha$ . Далее, представим матрицу  $P$  в виде произведения

$$P = QDR, \quad (21)$$

где  $Q$  и  $R$  – унитарные матрицы,  $D$  – правая двухдиагональная. Разложение (21) можно получить с помощью матриц вращения или отражения.

Рассматриваемый подход может быть использован при решении прикладных задач синтеза систем адаптивного управления технологическими объектами.

При синтезе адаптивных систем весьма эффективными представляются концепции эталонных моделей. Рассмотрим вопросы синтеза регулярных алгоритмов адаптивного управления и адаптации неопределенных динамических объектов на основе эталонных моделей. При адаптивном подходе часто рассматриваются нелинейные уравнения объекта вида:

$$\dot{x}(t) = \varphi(x, u, \chi, f), \quad x(t_0) = x^{(0)}, \quad (22)$$

$$y = w(x, u, \chi, v). \quad (23)$$

Вместо уравнений (22), (23) обычно используют линеаризованные уравнения:

$$\dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + (B + \Delta B)r(t), \quad (24)$$

Цель адаптации – обеспечить стремление вектора  $x(t)$  к вектору состояния эталонной модели  $x_M(t) \in R^n$ , являющемуся решением уравнения

$$\dot{x}_M(t) = A_M x_M(t) + B_M r(t),$$

где  $n \times n$  -матрица  $A_M$  и  $n \times m$  -матрица  $B_M$  (матрица  $A_M$  гурвицева) задают желаемую динамику движения.

Для получения алгоритма адаптации выберем целевой функционал

$$Q(x) = \frac{1}{2} e^T P e, \quad (25)$$

где  $e = e(t) = x(t) - x_M(t)$  – вектор ошибки,  $P = P^T > 0$  – положительно определенная  $n \times n$  -матрица.

Требуется построить закон обратной связи  $u = U(x)$ , обеспечивающий для заданного множества начальных условий  $\Omega \subset R^n$  достижение цели управления

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Q(x(t, x_0)) = 0,$$

где  $x(t, x_0)$  – решение системы (24), (25) с начальным условием  $x_0 \in \Omega$ . Пусть для любых  $x, x_M \in R^n, r \in R^m$  уравнение

$$Ax + Bu_* - A_M x_M - B_M r(t) = A_M e \quad (26)$$

разрешимо относительно  $u_* \in R^m$ . Тогда  $u_*$  удовлетворяет соотношению

$$u_* = K_r^* r(t) + K_x^* x, \quad (27)$$

где  $K_r^* = B^+ B_M, K_x^* = B^+ (A_M - A)$ .

Иначе говоря,  $A_M - A \in L(B), B_M - B \in L(B)$ , где  $L(B)$  – линейное подпространство, порожденное столбцами матрицы  $B$ . Последние условия, в свою очередь, эквивалентны соотношениям

$$\text{rank} B = \text{rank}\{B, B_M\} = \text{rank}\{B, A_M - A\}. \quad (28)$$

Выбирая алгоритм скоростного градиента, получим

$$u = K_r r(t) + K_x x, \quad (29)$$

$$dK_r/dt = -\gamma B^T P e r(t), \quad dK_x/dt = -\gamma B^T P e x^T.$$

Алгоритм (29) является работоспособным при изменении координатных и параметрических возмущений в достаточно широких пределах. Если параметрическое возмущение изменяется с высокой скоростью, то процесс адаптации ухудшается. В этом случае целесообразно применять алгоритмы сигнальной адаптации. Можно показать, что уравнение (26) при выполнении условий (28) однозначно разрешимо относительно  $u_* \in R^m$  для любых  $x, x_M \in R^n, r \in R^m$ . Для нахождения  $u_*$  используем соотношения

$$u_* = K_{xM}^* x_M + K_r^* r + u_s^*, \quad (30)$$

где  $K_{xM}^* = B^+ (A_M - A), K_r^* = B^+ B_M, u_s^* = B^+ (A_M - A)$ .

В основном контуре аналогично (29) возьмем регулятор вида

$$u = K_{xM} x + K_r r + u_s,$$

где  $K_{xM}, K_r$  и  $u_s$  – настраиваемые параметры, образующие вектор  $\theta = \text{col}(K_{xM}, K_r, u_s)$ . При вычислении согласно уравнений (27) и (30) псевдообратную матрицу представим следующим образом:  $B^+ = (B^T B)^{-1} B^T$ . Представим симметрическую матрицу в диагональном виде  $B^T B = T U T^T$ , где  $T = (t_1 \mid t_2 \mid \dots \mid t_{m+n})$  – блочная ортогональная, а  $U$  – диагональная матрица.

Тогда, можно записать  $(B^T B)^+ = \sum_{i=1}^{m+n} \lambda_i^{-1} t_i t_i^T$ , где  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{m+n} > 0$  – собственные числа матрицы  $B^T B$ . Такое преобразование позволяет улучшить обусловленность матрицы  $B^T B$  и тем самым повысить точность искомого решения.

Приведенные регулярные алгоритмы адаптивного управления и адаптации неопределенных динамических объектов на основе эталонных моделей с использованием алгоритмов псевдообращения способствуют повышению точности определения параметров закона управления.

Четвертая глава диссертации «**Разработка регулярных алгоритмов синтеза систем управления неопределенными динамическими объектами**» посвящена разработке регулярных алгоритмов синтеза систем управления при неполной информации о состоянии объекта.

Рассмотрим линейную стационарную систему, описываемую матричным разностным уравнением:

$$x_{k+1} = Ax + Bu, \quad y = Hx. \quad (31)$$

Необходимо ввести в систему (31) линейную стационарную обратную связь по выходу

$$u = Ky = KHx \quad (32)$$

так, чтобы замкнутая система имела наперед заданный спектр  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  ( $\lambda_i$  – собственное число матрицы  $A + BKA$ ,  $K$  – матрица обратной связи размерности  $r \times l$ ).

Из управляемости системы (31) следует существование невырожденной матрицы  $N$  размерности  $n \times n$  и матрицы перестановок  $M$  размерности  $r \times r$ , таких, что преобразование

$$\hat{x} = Nx, \quad \hat{u} = M^{-1}u, \quad \hat{y} = y$$

приводит систему (31) к виду:

$$\hat{x}_{k+1} = A\hat{x} + B\hat{u}, \quad \hat{y} = \hat{H}\hat{x}. \quad (33)$$

Можно показать, что если система (31) управляема и для ее канонического представления (33) выполняется условие

$$[Z - A_2]S^T = 0, \quad (34)$$

то спектр системы (31) может быть произвольно задан с помощью обратной связи вида (32), причем  $K = MB_v^{-1}[Z - A_2]\hat{H}^+$  (матрица  $\hat{H}^+ = \hat{H}^T(\hat{H}\hat{H}^T)^{-1}$ ).

Из управляемости системы (31) следует существование канонического представления (33). Тогда

$$\hat{K}\hat{H} = B_v^{-1}[Z - A_2]. \quad (35)$$

Выражение (35) перепишем следующим образом:

$$\hat{K}\hat{H} = \begin{bmatrix} \hat{K} & \vdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{H}^T & \vdots & S^T \end{bmatrix}^T = B_v^{-1}[Z - A_2], \quad (36)$$

где  $0^T - ((n-l) \times r)$  – нулевая подматрица. Учитывая невырожденность матрицы  $\begin{bmatrix} \hat{H}^T & \vdots & S^T \end{bmatrix}^T$  и соотношение  $\begin{bmatrix} \hat{H}^T & \vdots & S^T \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \hat{H}^+ & \vdots & S^+ \end{bmatrix}$ , из (36) получим

$$\begin{bmatrix} \hat{K} & \vdots & 0 \end{bmatrix} = B_v^{-1}[Z - A_2] \begin{bmatrix} \hat{H}^T & \vdots & S^T \end{bmatrix}^T = B_v^{-1}[Z - A_2] \begin{bmatrix} \hat{H}^+ & \vdots & S^+ \end{bmatrix}. \quad (37)$$

Если выполняется условие (34), то будет выполняться и соотношение

$$B_v^{-1}[Z - A_2]S^+ = 0.$$

Тогда матрица обратных связей определится из (37)

$$\hat{K} = B_v^{-1}[Z - A_2]\hat{H}^+.$$

Окончательно в исходном базисе матрица  $K$  имеет следующий вид:

$$K = \hat{M}B_v^{-1}[Z - A_2]\hat{H}^+. \quad (38)$$

Это обусловлено тем, что весьма часто система уравнений (38) является, как правило, недоопределенной. С целью стабилизации искомого решения и придания большей численной устойчивости процедуре псевдообращения в (37), (38), необходимо использовать регулярные методы. Справедливость выражения  $\hat{H}^+ = \hat{H}^T(\hat{H}\hat{H}^T)^{-1}$  обусловлена тем, что всякую матрицу  $\hat{H} \in R^{p \times n}$  можно представить в виде «скелетного» разложения  $H = UV$  с матрицами  $U \in R^{p \times r}$  и  $V \in R^{r \times p}$ , где  $r = \text{rank} C \leq \min(p, n)$ . Положим теперь  $\hat{H}^+ = V^+ \cdot U^+$ , где  $V^+ = V^T(VV^T)^{-1}$ ,  $U^+ = (U^T U)^{-1}U^T$ . При обращении матрицы  $\hat{H}$  также можно использовать прием, основанный на вычислении  $Q = \hat{H}\hat{H}^T$  в выражении (36). Принимая во внимание, что  $Q$  является симметричной неотрицательно определенной матрицей порядка  $p \times p$  ранга  $r < p$  то

$$Q^+ = T^T(TT^T)^{-2}T, \quad (39)$$

где матрица  $T_{(p \times r)}$  ранга  $r$  определяется из разложения  $Q = T^T T$ .

Таким образом, выражение  $\hat{H}^+ = \hat{H}^T(\hat{H}\hat{H}^T)^{-1}$  с учетом (39) может быть записано в виде:

$$\hat{H}^+ = \hat{H}^T Q^+ = \hat{H}^T T^T (TT^T)^{-2} T. \quad (40)$$

В случае, если матрица  $Q$  плохо обусловлена, то для повышения устойчивости процедуры псевдообращения в (40) целесообразно использовать регулярные процедуры вида  $\hat{H}^+ = \hat{H}^T T^T (TT^T + \alpha I)^{-2} T$ , где  $\alpha > 0$  – параметр регуляризации,  $I$  – единичная матрица. Параметр регуляризации  $\alpha$  здесь целесообразно определять на основе способа модельных примеров.

Значимую роль в процессе создания систем адаптивного управления неопределенными динамическими объектами играют нейросетевые системы (НС). Существуют различные способы применения НС в системах управления. Рассмотрим вопросы синтеза адаптивной системы управления с многослойной (МНС) в условиях параметрической неопределенности. Запишем исходную систему разностных уравнений объекта без учета возмущений  $v$  внешней среды:

$$x_{k+1} = f(x_k, \theta_k) + g(x_k)u_k, \quad (41)$$

где векторные гладкие функции  $f(\cdot)$ ,  $g(\cdot)$ ,  $h(\cdot)$  определены с точностью до множества параметров,  $\theta$  – вектор неизвестных параметров.

Затем составим систему разностных уравнений, определяющих динамику системы измерения и наблюдения, подавления возмущений и собственно модель возмущающих воздействий:

$$\omega_{k+1} = p(\omega_k), \quad (42)$$

где  $\omega \in R^\mu$  – вектор состояния внешних по отношению к объекту динамических систем, порождающих возмущения.

Запишем уравнения связи систем уравнений (41) и (42) в виде:

$$h(x, u, \omega) = 0. \quad (43)$$

На базе уравнений (41)-(43) запишем расширенную систему разностных уравнений:

$$\tilde{x}_{k+1} = \tilde{f}(\tilde{x}_k, \theta_k) + \tilde{g}(\tilde{x}_k) \tilde{u}_k, \quad (44)$$

где  $\tilde{x}_{k+1} \in R^q$  ( $q = n + \mu$ ) – вектор состояния расширенной системы;  $\tilde{u} \in R^p$  – новый вектор управления расширенной системы.

Рассмотрим задачу синтеза (44) с использованием МНС в качестве адаптивного регулятора. Поведение объекта управления (44) зависит от параметров  $\theta$ . Можно показать, что цель управления достигается путем минимизации алгоритмом адаптации квадратичного функционала обучения  $J = 0,5\sigma^T \sigma$  с использованием обратного распространения ошибки. При этом управление  $u$  можно вычислить из условия  $\sigma = 0$  на основе уравнений (41):

$$g(x)u = b, \quad (46)$$

где  $b = A^M x_k + B^M r_k - f(x)$ .

Для устойчивого решения переопределенной системы (46) будем применять метод  $(g^T(x)g(x))$ -минимальных итераций. Для некоторого произвольно взятого вектора  $s \in C^m$  строится последовательность векторов  $q_1, q_2, \dots$ , где  $q_i \in C^m$ , по следующим формулам:

$$q_1 = s, v_1 = g(x)q_1, q_2 = g(x)v_1 - \gamma_1 q_1,$$

далее для  $i = 2, 3, \dots$  вычисляются

$$q_{i+1} = g(x)v_i - \gamma_i q_i - \delta_i q_{i-1},$$

где

$$\gamma_i = \frac{(g(x)v_i, g(x)v_i)}{(v_i, v_i)}, \quad \delta_i = \frac{(v_i, v_i)}{(v_{i-1}, v_{i-1})}, \quad v_i = g(x)q_i, \quad v_i \in C^n.$$

В главе также рассмотрены задачи синтеза нейросетевого регулятора для управления динамическими объектами, регулярных итерационных алгоритмов обучения нейронной сети на основе экстремального метода.

Приведенные алгоритмы позволяют производить устойчивое псевдообращение матриц и тем самым повысить точность адаптивных систем управления с многослойной нейронной сетью в условиях параметрической неопределенности.

**В пятой главе «Применение разработанных алгоритмов синтеза в задачах автоматизации и управления технологическим процессом производства аммиачной селитры» приводятся результаты применения разработанных методов и алгоритмов синтеза адаптивных систем управления технологическими процессами производства аммиачной селитры.**

Произведенная формализация процесса производства аммиачной селитры как объекта управления, установленным на четырёх основных

стадиях, позволила выделить основные переменные, характеризующие рассматриваемый процесс.

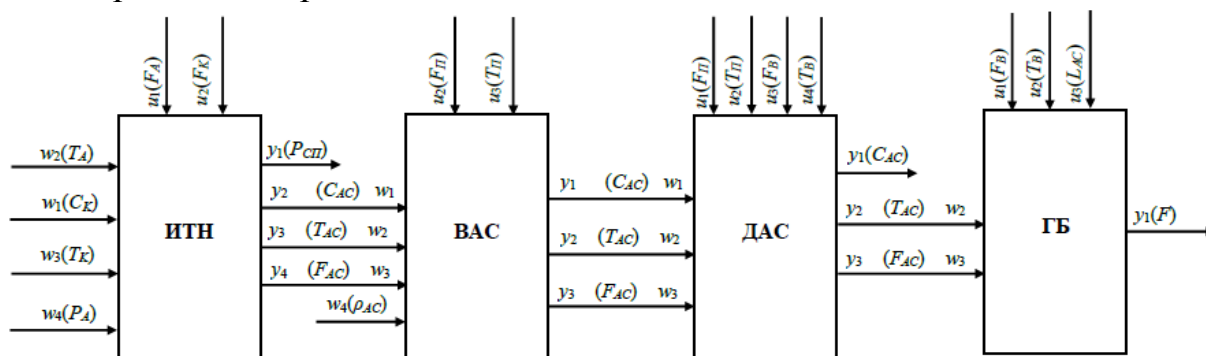


Рис 1. Структурная схема и связи между процессами производства аммиачной селитры

Основными технологическими параметрами, влияющими на процесс нейтрализации в производстве аммиачной селитры как объекта управления являются следующие: Управляющие воздействия:  $u_1(F_A)$  – расход газообразного аммиака,  $m^3/ч$ ,  $u_2(F_K)$  – расход азотной кислоты,  $m^3/ч$ ; Возмущающие воздействия:  $w_1(C_K)$  – концентрация азотной кислоты, %;  $w_2(T_A)$  – температура газообразного аммиака,  $^{\circ}C$ ;  $w_3(T_K)$  – температура азотной кислоты,  $^{\circ}C$ ;  $w_4(P_A)$  – давление газообразного аммиака, кПа; Выходные (управляемые) переменные:  $y_1(P_{СП})$  – давление сокового пара на выходе из ИТН, кПа,  $y_2(C_{AC})$  – концентрация аммиачной селитры в растворе на выходе из ИТН, %,  $y_3(T_{AC})$  – температура раствора аммиачной селитры из ИТН,  $^{\circ}C$ ,  $y_4(F_{AC})$  – расход раствора аммиачной селитры,  $m^3/ч$ .

Основные технологические параметры процесса выпаривания раствора аммиачной селитры в выпарной аппарат: Управляющие воздействия:  $u_1(F_{II})$  – расход греющего пара,  $m^3/ч$ ,  $u_2(T_{II})$  – температура греющего пара,  $^{\circ}C$ ; Возмущающие воздействия:  $w_1(C_{AC})$  – концентрация аммиачной селитры в растворе, %,  $w_2(T_p)$  – температура раствора аммиачной селитры,  $^{\circ}C$ ,  $w_3(F_{AC})$  – расход раствора аммиачной селитры,  $m^3/ч$ ,  $w_4(\rho_{AC})$  – плотность раствора аммиачной селитры,  $кг/м^3$ ; Выходные (управляемые) переменные:  $y_1(C_{AC})$  – концентрация аммиачной селитры в растворе на выходе из выпарной аппарат, %,  $y_2(T_{AC})$  – температура раствора аммиачной селитры из выпарной аппарат,  $^{\circ}C$ ,  $y_3(F_{AC})$  – расход раствора аммиачной селитры из выпарной аппарат,  $m^3/ч$ .

Основные технологические параметры процесса доупаривания раствора аммиачной селитры: Управляющие воздействия:  $u_1(F_{II})$  – расход греющего пара,  $m^3/ч$ ,  $u_2(T_{II})$  – температура греющего пара,  $^{\circ}C$ ,  $u_3(F_B)$  – расход воздуха,  $m^3/ч$ ,  $u_4(T_B)$  – температура воздуха,  $^{\circ}C$ ; Возмущающие воздействия:  $w_1(C_{AC})$  – концентрация аммиачной селитры в растворе, %,  $w_2(T_p)$  – температура раствора аммиачной селитры,  $^{\circ}C$ ,  $w_3(F_{AC})$  – расход раствора аммиачной селитры,  $m^3/ч$ ; Выходные (управляемые) переменные:  $y_1(C_{AC})$  – концентрация аммиачной селитры в растворе на выходе из доупарочной аппарат, %,  $y_2(T_{AC})$  – температура раствора аммиачной селитры из доупарочной аппарат,  $^{\circ}C$ ,  $y_3(F_{AC})$  – расход раствора аммиачной селитры из доупарочной аппарат,  $m^3/ч$ .



Основные технологические параметры процесса гранулирования раствора аммиачной селитры: Управляющие воздействия:  $u_1(F_{II})$  – расход воздуха, м<sup>3</sup>/ч,  $u_2(T_{II})$  – температура воздуха, °С,  $u_3(L_p)$  – уровень раствора в виброакустический гранулятор; Возмущающие воздействия:  $w_1(T_p)$  – температура раствора аммиачной селитры, °С,  $w_2(F_{AC})$  – расход раствора аммиачной селитры, м<sup>3</sup>/ч; Выходные (управляемые) переменные:  $y(F)$  – расход гранулированные аммиачной селитры, т/ч.

На основе проведенной формализации запишем уравнения динамики и измерения для взаимосвязанных систем большой размерности, состоящих из совокупности четырех подсистем, каждая из которых в общем случае описывается следующим уравнением

$$x_{i,k+1} = A_i x_{i,k} + B_i u_{i,k} + H_i w_{i,k}, \quad i = 1, 2, \dots, 4; \quad k = 0, 1, 2, \dots, (K-1), \quad y_i = C x_i. \quad (47)$$

Для получения и практического использования математической модели был проведен промышленный эксперимент в условиях нормального функционирования технологического процесса производства аммиачной селитры на АО «Навоийазот». На основе предварительного анализа динамических характеристик процесса производства аммиачной селитры время регистрации  $T$  и дискретизации реализаций  $\Delta t$  наблюдаемых случайных процессов было выбрано соответственно:  $T=6$  час,  $\Delta t=4$  мин. Всего было произведено 90 измерений.

для процесса нейтрализации:

$$A_1 = [-0.0028, 0.6410, -0.3935, 0.9569; -0.9189, 0.0000, -0.3128, 0.5639; 0.0000, 0.3535, 0.0000, -0.1329; 0.5368, 0.9021, 0.6375, 0.5867];$$

$$B_1 = [0.0000, -0.1736; 0.4100, 0.0000; -0.0016, -0.7014; 0.7487, 0.0000];$$

$$C_1 = [0.3077, 0.2552, -0.8126, -0.7075; -0.1182, 0.0088, 0.0858, 0.6545; -0.2437, 0.0000, -0.3988, 0.6883; 0.1194, -0.1457, 0.0000, -0.9068];$$

для процесса выпаривания:

$$A_2 = [0.3334, -0.9216; -0.7689, -0.0023];$$

$$B_2 = [0.1681, 0.5578; 0.7448, -0.2209];$$

$$C_2 = [-0.3119, -0.1673; 0.2499, 0.0415; 0.3574, 0.4885];$$

для процесса доупаривания:

$$A_3 = [0.3861, 0.9809; 0.9788, 0.8663];$$

$$B_3 = [0.2894, 0.4530, 0.0000, 0.0065; -0.5980, 0.4875, 0.1757, 0.2592];$$

$$C_3 = [-0.4971, 0.0121; -0.9353, -0.9099; -0.7053, -0.1085];$$

для процесса гранулирования:

$$A_4 = [0.7536, -0.3606; -0.3858, 0.6139];$$

$$B_4 = [-0.5223, -0.6933; -0.2430, 0.1982; 0.4503, -0.8976];$$

$$C_4 = [0.1053, 0.8304].$$

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

Математически общую задачу управления производством можно сформулировать следующим образом:

$$\min_{x,u,y \in S} \{F(x,u,y) = \sum_{i=1}^n f_i(x_i, u_i, y_i)\}$$

с учетом ограничений

$$y_i = g_i(x_i, u_i), \quad i = \overline{1, 3}, \quad h_i(x_i, u_i, y_i) \geq 0, \quad x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}, \quad u_{i \min} \leq u_i \leq u_{i \max}, \quad y_{i \min} \leq y_i \leq y_{i \max},$$

где

$$\begin{aligned} f_1(x_1, u_1, y_1) &= (\lambda_1 G_1 + \lambda_2 G_2) / G_5, \quad f_2(x_2, u_2, y_2) = \lambda_3 G_n / G_{15}, \quad f_3(x_3, u_3, y_3) = \lambda G_6 / G, \\ x_1 &= (T_A, T_K, C_K, P_A), \quad x_2 = (C_{AC}, T_{AC}, F_{AC}), \quad x_3 = (C_{AC}, T_{AC}, F_{AC}), \quad x_4 = (T_{AC}, F_{AC}), \\ u_1 &= (F_A, F_K), \quad u_2 = (F_{II}, T_{II}), \quad u_3 = (F_{II}, T_{II}, F_B, T_B), \quad u_4 = (F_B, T_B, L_{AC}) \\ y_1 &= (P_{CP}, C_{AC}, T_{AC}, F_{AC}), \quad y_2 = (C_{AC}, T_{AC}, F_{AC}), \quad y_3 = (C_{AC}, T_{AC}, F_{AC}), \quad y_4 = (F). \end{aligned}$$

С учетом вышесказанного, задачу оптимального управления сформулируем как задачу оптимизации и управления взаимосвязанными динамическими системами. Допустим, что сами подсистемы описываются линейными динамическими уравнениями (47). При этом допускается, что начальное состояние известно, т.е.

$$x_i(0) = x_{i,0}. \quad (48)$$

Здесь  $z_i$  – это вектор взаимодействия, образованный выходами других подсистем, т.е.  $z_{i,k} = \sum_{j=1}^N L_{ij} x_{j,k}$ . Для решения такой задачи необходимо максимизировать по  $\lambda$  функцию  $\Phi(\lambda)$ , где  $\Phi(\lambda) = \min_{x,u,z} L(x,u,z,\lambda)$  при выполнении условий (47) и (48). При этом

$$L(x,u,z,\lambda) = \sum_{i=1}^N L_i = \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{1}{2} \|x_{i,K}\|_{P_i}^2 + \sum_{k=0}^{K-1} \frac{1}{2} \left[ \|x_{i,k}\|_{Q_{i,k}}^2 + \|z_{i,k}\|_{S_{i,k}}^2 + \|u_{i,k}\|_{R_{i,k}}^2 + \lambda_{i,k}^T z_{i,k} - \sum_{j=1}^N \lambda_{j,k}^T L_{ji} x_{i,k} \right] \right\}. \quad (49)$$

Определим двойственную задачу минимизации в уравнении (49) в соответствии с уравнением (47) как задачу максимизации по  $p$  функции  $M(p)$ , где

$$\begin{aligned} M(p) &= \min_{x,u,z} \left\{ \frac{1}{2} \|x_{i,K}\|_{P_i}^2 + \sum_{k=0}^{K-1} \frac{1}{2} \left[ \|x_{i,k}\|_{Q_{i,k}}^2 + \|z_{i,k}\|_{S_{i,k}}^2 + \|u_{i,k}\|_{R_{i,k}}^2 + \right. \right. \\ &\left. \left. + p_{i,k}^T [A_i x_{i,k} + B_i u_{i,k} + C_i z_{i,k} - x_{i,k+1}] + \lambda_{i,k}^{*T} z_{i,k} - \sum_{j=1}^N \lambda_{j,k}^{*T} L_{ji} x_{i,k} \right] \right\} \end{aligned} \quad (50)$$

при известном начальном состоянии  $x_i(0) = x_{i,0}$ .

Градиент функции  $M(p)$  определяется выражением:

$$\nabla M(p) \Big|_{p=p^*} = -x_{i,K+1}^* + A_i x_{i,K}^* + B_i u_{i,K}^* + C_i z_{i,K}^*, \quad (51)$$

Тогда, используя уравнение (50), можно записать

$$M(p) = \frac{1}{2} \|x_{i,K}\|_{P_{i,K}}^2 - p_{i,K-1}^{*T} x_{i,K} + \sum_{k=0}^{K-1} \{H_i(x_{i,k}, u_{i,k}, z_{i,k}, k) - p_{i,k-1}^{*T} x_{i,k}\},$$

где  $p(-1)$  полагается равным нулю. В результате появляется приведенная ниже задача оптимизации для фиксированных значений  $p = p^*$ .

Для  $k=0$ : Требуется найти значения  $u_{i,0}$ ,  $z_{i,0}$ , минимизирующие гамильтониан  $H_i(x_{i,0}, u_{i,0}, z_{i,0})$  в соответствии с условием  $x_i(0) = x_{i,0}$ . Точное решение этой задачи можно получить, приравнявая нулю частные производные  $H_i$  по  $u_{i,0}$  и  $z_{i,0}$ , что ведет к следующему результату:

$$u_{i,0} = -R_i^{-1} B_i^T p_{i,0}^*, \quad z_{i,0} = -S_i^{-1} [C_i^T p_{i,0}^* + \lambda_{i,0}^*]. \quad (52)$$

Для  $k=1,2,\dots,(K-1)$ : Требуется найти значения  $x_{i,k}$ ,  $u_{i,k}$ ,  $z_{i,k}$ , минимизирующие функционал  $\{H_i(x_{i,k}, u_{i,k}, z_{i,k}, k) - p_{i,k-1}^{*T} x_{i,k}\}$ . Точное решение этой задачи определяются соотношениями

$$x_{i,k} = -Q_{i,k}^{-1} \left[ A_i^T p_{i,k}^* - p_{i,k-1}^* - \sum_{j=1}^N (\lambda_j^{*T} L_{ji})^T \right], u_{i,k} = -R_i^{-1} B_i^T p_{i,k}^*, z_{i,k} = -S_i^{-1} [C_i^T p_{i,k}^* + \lambda_{i,k}^*] \quad (53)$$

Для  $k=K$ : Требуется найти  $x_{i,K}$ , минимизирующие выражение:

$$\frac{1}{2} \|x_{i,K}\|_{P_{i,K}}^2 - p_{i,K-1}^{*T} x_{i,K},$$

что дает

$$x_i(K) = P_i^{-1} p_{i,K-1}^* \quad (54)$$

Таким образом, комплексная задача минимизации  $J$  в уравнении (50) при учете динамики, определяемой уравнениями (47), (48), может быть решена при использовании трехуровневого алгоритма, где на первом уровне заданные последовательности  $\lambda_k^*$  и  $p_k^*$  необходимо просто подставить в соотношения (52)-(54), определяющие точные решения оптимальных подзадач. Полученные на основе этих решений оптимальные значения  $x$ ,  $u$ ,  $z$  используются на втором уровне для вычисления градиента функции  $M(p)$  из уравнения (51). Этот градиент, в свою очередь, используется для нахождения значений  $p$ , максимизирующих  $M(p)$ . На третьем уровне оптимальные значения  $p$ , полученные на втором уровне оптимизации, используются для итеративной максимизации  $\Phi(\lambda)$ . Общий оптимум достигается, когда  $\nabla\Phi(\lambda)$  и  $\nabla M(p)$  приближаются к нулю. На рис. 2 представлена трехуровневая структура решения задачи оптимизации.



Рис. 2. Иерархическое представление системы автоматического управления процессом производства аммиачной селитры

На рисунках 3, 4 приведены соответственно графики изменения параметров состояния объекта и управляющих воздействий (52)-(54) процессов производства аммиачной селитры при определенной длительности времени.

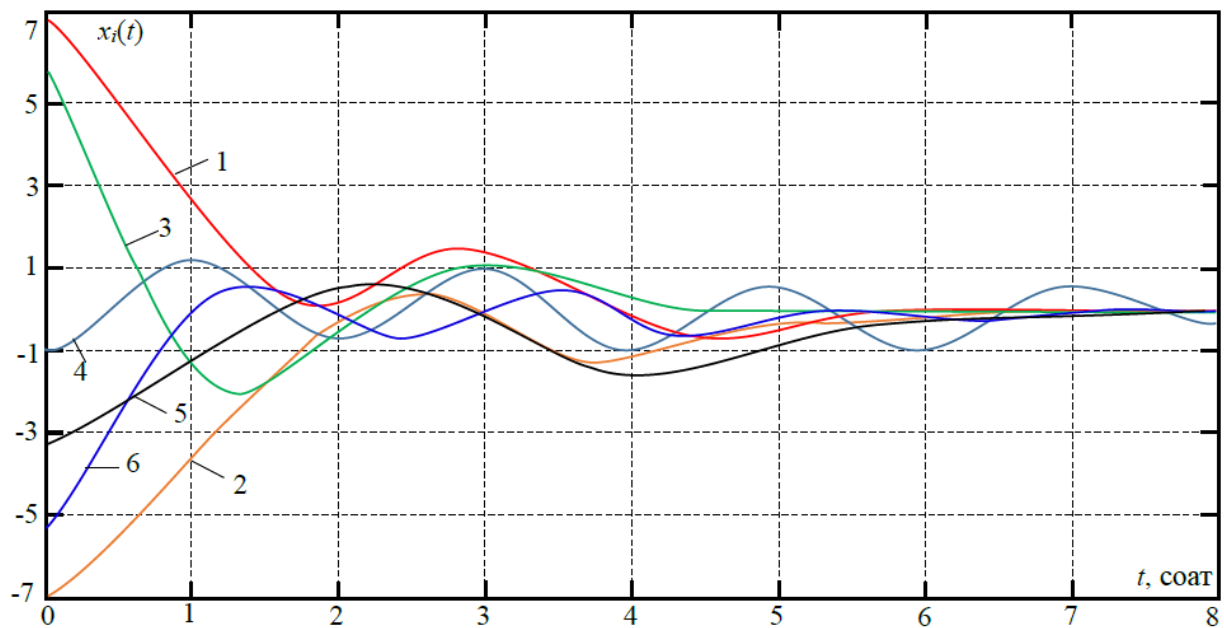


Рис. 3. Графики изменения параметров состояния процесса производства аммиачной селитры: 1- температура газообразного аммиака ( $T_A$ ); 2- температура азотной кислоты ( $T_K$ ); 3- давление газообразного аммиака ( $P_A$ ); 4- температура раствора аммиачной селитры ( $T_P$ ); 5- расход раствора аммиачной селитры ( $F_{AC}$ ); 6- значение рН щелоков

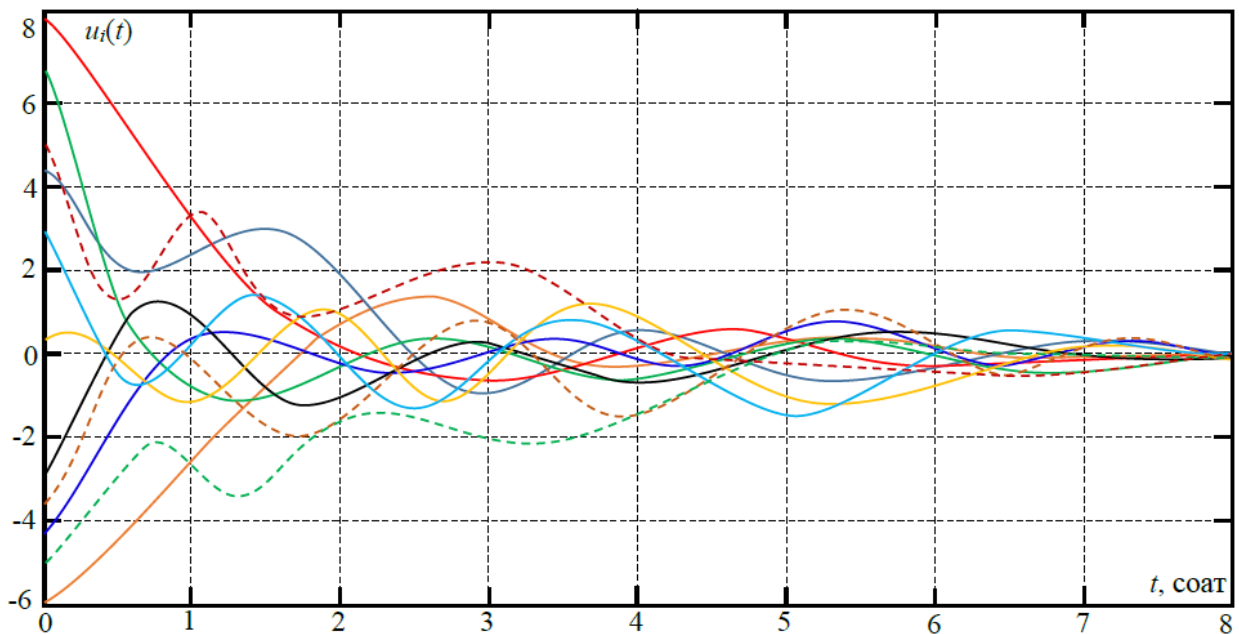


Рис. 4. График изменения управляющих воздействий

Таким образом, анализ результатов, полученных при имитации функционирования системы управления, показал, что в случае применения адаптивной системы управления производством аммиачной селитры в условиях действия возмущений, возникающих при различных производственных ситуациях, позволяет повысить значение критерия эффективности функционирования производства на интервалах квазистационарности.

Сравнение основных технологических параметров производства показывает также, что в результате функционирования системы управления стабилизируется коэффициент сверхстехиометрической нагрузки по азотной кислоте, тем самым уменьшаются потери сырья с соковым паром аммиачной селитры, образуемых в результате реакции нейтрализации. За счет рационального распределения расхода и нагрузки аппарата ИТН повышается концентрация растворов селитры, поступающих на выпарку и снижаются затраты по пару на тонну готового продукта.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

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

В итоге получены следующие научные результаты:

1. Разработаны регуляризованные алгоритмы идентификации неопределенных динамических объектов управления в условиях приближенного задания исходных данных на основе проекционных методов с использованием блочного варианта алгоритма Качмажа и псевдообращения прямоугольных матриц в форме Гревия. Показано, что наилучшие показатели обеспечивает метод упрощенной регуляризации для расширенной системы уравнений.

2. Разработаны алгоритмы повышения грубости процедуры оценки вектора состояния объектов управления к влиянию факторов неопределенности, отличающихся от известных тем, что они позволяют регуляризовать задачу синтеза алгоритмов оценивания параметров регуляторов в адаптивных системах управления с настраиваемой моделью.

3. Разработаны алгоритмы синтеза систем стабилизации неопределенных динамических объектов на основе метода локальной оптимизации при наличии приближенных математических моделей.

4. Разработаны алгоритмы стабилизации линейного динамического объекта при наличии внешних возмущений и сигнальной неопределенности и нестационарности неизвестных параметров.

5. Разработаны регулярные алгоритмы синтеза адаптивного регулятора в задаче о диссипативности с учетом свойства устойчивости по управлению неопределенных объектов управления на основе разложения матрицы

системы уравнений для коэффициентов регулятора с помощью матриц вращения или отражения.

6. Разработаны регуляризованные итерационные оценки для параметров настроек регуляторов в системах непрямого адаптивного управления параметрически неопределенными объектами на основе концепций псевдообращения матриц с использованием эквивалентной расширенной совместной системы.

7. Разработаны алгоритмы адаптивного управления неопределенными динамическими объектами на основе методов скоростного градиента, параметрической и сигнальной адаптации, обеспечивающие работоспособность системы при изменении координатных и параметрических возмущений в достаточно широких пределах.

8. Разработаны упрощенные вычислительные процедуры синтеза систем управления динамическими объектами при неполной информации о состоянии объекта на основе различных вычислительных схем разложения матриц.

9. Разработаны алгоритмы синтеза систем управления динамическими объектами на основе теории инвариантности с использованием рекуррентного метода определения псевдорешений линейных алгебраических систем уравнений, позволяющие регуляризовать задачу синтеза рассматриваемых алгоритмов в условиях параметрической неопределенности и повысить качественные показатели процессов управления.

10. Разработаны алгоритмы синтеза многорежимного нейросетевого регулятора на основе методов решения вариационных неравенств с использованием принципа итеративной регуляризации, обеспечивающие состоятельность искомых оценок и высокую точность интеллектуализированной системы управления.

11. На основе разработанных алгоритмов регулярного синтеза предложена адаптивная система управления процессом производства аммиачной селитры. Полученные результаты и анализ переходных процессов на основе моделирования системы управления показали, что управление объектом в соответствии с разработанной стратегией позволяет увеличить выпуск продукции заданного качества в среднем на 2,4 % и повысить приведенный доход производства за счет снижения энергозатрат, потерь сырья и целевого продукта.

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

---

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

**MAMIROV UKTAM FARKHODOVICH**

**METHODS AND ALGORITHMS FOR REGULAR SYNTHESIS OF  
ADAPTIVE CONTROL SYSTEMS FOR UNCERTAIN DYNAMIC  
OBJECTS**

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

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

**Tashkent – 2021**

**The theme of doctoral (DSc) dissertation is registered at the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2021.2.DSc/T440.**

The dissertation was completed at the Tashkent State Technical University.

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

**Scientific consultant:** **Igamberdiyev Khusan Zakirovich**  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician

**Official opponents:** **Marakhimov Avazjon Rakhimovich**  
Doctor of Technical Sciences, Professor

**Nazarov Ulugbek Sultanovich**  
Doctor of Technical Sciences, Professor

**Fayzimatov Shukhrat Numanovich**  
Doctor of Technical Sciences, Professor

**Leading organization:** **JV LLC "Khimavtomatika"**

Defense of dissertation will take place in «24» 11 2021 at 10<sup>00</sup> o'clock at a meeting of the scientific council DSc 03/30.12.2019.T.03.02 at the Tashkent state technical university (Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: (99871) 246-46-00; fax: (99871) 227-10-32; e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz)).

The doctoral dissertation could be reviewed at the Information-resource center of Tashkent state technical university (registration number 226). (Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel. : (99871) 207-14-70).

Abstract of the dissertation distributed «12» 11 2021 year.  
(mailing report № 16, on «03» 11 2021 year)



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

**U.T.Mukhamedkhanov**  
Scientific Secretary of Scientific Council,  
on awarding scientific degrees,  
Doctor of technical sciences, Professor

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



## INTRODUCTION (abstract of DSc thesis)

**The aim of the research** is to develop methods and algorithms for the regular synthesis of adaptive control systems for undefined dynamic objects and their practical application in solving problems of automation and control of specific production processes.

**The object of the research** is the systems of adaptive control of undefined dynamic objects.

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

methods and algorithms for the synthesis of systems for adaptive control of uncertain dynamic objects based on the concepts of inverse problems of dynamics of controlled systems and the principle of regularization of ill-posed problems have been developed;

algorithms for increasing the roughness of the procedure for assessing the state vector of control objects to the influence of uncertainty factors have been developed on the basis of regular algorithms for inverting a non-degenerate block matrix with the allocation of its left and right divisors of zero of the maximum rank;

regular algorithms for the synthesis of stabilization systems for undefined dynamic objects have been developed on the basis of the local optimization method in the presence of approximate mathematical models;

algorithms for stabilization of a linear dynamic plant in the presence of external disturbances and signal uncertainty have been developed on the basis of regular iterative algorithms, which make it easier to control the accuracy of intermediate calculations;

regular algorithms for the synthesis of an adaptive controller in the problem of dissipativity, taking into account the stability property for the control of indefinite control objects, based on the decomposition of the matrix of the system of equations for the controller coefficients using rotation or reflection matrices have been developed;

regular algorithms for adaptive control of undefined dynamic objects have been developed based on the methods of velocity gradient, parametric and signal adaptation, which ensure the operability of the system when changing coordinate and parametric disturbances within a fairly wide range;

regular simplified computational procedures for the synthesis of control systems for dynamic objects with incomplete information about the state of the object on the basis of various computational schemes of matrix decomposition have been developed;

regular algorithms for the synthesis of an adaptive control system with a multilayer neural network in conditions of parametric uncertainty have been developed on the basis of an extended system of equations for the basic structure of a generalized tunable object using the methods of minimal iterations and partitioning of matrices into blocks.

**Implementation of the research results.** The obtained scientific results on the regular synthesis of adaptive control systems for indefinite dynamic objects are implemented in the following forms:

algorithms for increasing the roughness of the procedure for assessing the state vector of control objects to the influence of uncertainty factors have been introduced at “Navoiyazot” JSC (Reference of “Uzkimyosanoat” JSC No. 04-3420 dated September 22, 2021). The algorithms allow to regularize the problem of synthesizing algorithms for estimating the parameters of regulators in adaptive control systems with a tunable model and to obtain estimates of the required quantities that are stable against a priori unknown external disturbances;

regular algorithms for stabilization of a linear indefinite dynamic object have been introduced at “Navoiyazot” JSC (Reference of “Uzkimyosanoat” JSC No. 04-3420 dated September 22, 2021). Algorithms ensure the operability of adaptive systems in case of violation of the ideal operating conditions;

regular simplified computational procedures for the synthesis of control systems for dynamic objects with incomplete information about the state of the object based on various computational schemes of matrix decomposition have been introduced at “Navoiyazot” JSC (Reference of “Uzkimyosanoat” JSC No. 04-3420 dated September 22, 2021). The algorithms make it possible to regularize the problem of synthesizing systems with a given spectrum and to stabilize the technological modes of the processes in the production of ammonium nitrate.

**The structure and scope of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, five chapters, conclusion, references and appendices. The volume of the dissertation is 189 pages.

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

**I бўлим (Часть I; Part I)**

1. Мамиров У.Ф. Регулярный синтез систем адаптивного управления неопределенными динамическими объектами. –Ташкент: Изд. «Знания и интеллектуальный потенциал», 2021. –215 с.

2. Yusupbekov N.R., Igamberdiev H.Z., Mamirov U.F. Algorithms of Sustainable Estimation of Unknown Input Signals in Control Systems // Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems, vol. 12(4), -PP. 83-86, Poland, 2018. DOI: 10.14313/JAMRIS\_4-2018/29 (3, Scopus, IF 0.9)

3. Sevinov J.U., Mamirov U.F., Yusupov Yo.A. Robust Algorithms for Estimating the State of Control Objects Based on Advanced Observers of the Kalman Type // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 6, Issue 11, November 2019, -PP. 11751-11755. (05.00.00, №8)

4. Mamirov U.F. Sustainable Algorithms For Synthesis Of Regulators In Adaptive Control Systems Of Parametrically Uncertain Objects // Chemical Technology, Control and Management: Vol. 2019: Iss. 4, Article 8. –PP. 126-132 DOI: <https://doi.org/10.34920/2019.3.126-132> (05.00.00, №12)

5. Yusupbekov N.R., Igamberdiev H.Z., Mamirov U.F. Algorithms of sustainable estimation of unknown input signals in control systems // Journal of Multiple-Valued Logic and Soft Computing, Volume 33, Issue 1-2, 2019, -PP 1-10. (3, Scopus, IF 1.6)

6. Mamirov U.F. Steady Algorithms for Synthesis of Multidimensional Controlling Systems with Incomplete Information on the Object Status // Chemical Technology, Control and Management: Vol. 2020: Iss. 1, Article 5., -PP. 51-56. DOI: <https://doi.org/10.34920/2020.1.51-56> (05.00.00, №12)

7. Зарипов О.О., Мамиров У.Ф., Шукурова О.П. Итерационные алгоритмы регулярной идентификации объектов управления большой размерности // Научно-практический и информационно-аналитический журнал «Потомки Мухаммада ал-Хоразмий», №2(12), 2020. –С. 136-138. (05.00.00, №10)

8. Mamirov U.F. Identification of the transition matrix of controlled objects under the conditions of parametric uncertainty // Chemical Technology, Control and Management: Vol. 2020: Iss. 4. –PP. 46-51. DOI: <https://doi.org/10.34920/2020.4.46-51>. (05.00.00, №12)

9. Mamirov U.F. Increasing the Roughness of the Procedure for Evaluating a Vector of the Condition of Objects to the Influence of Uncertainty Factors // Technical science and innovation: Vol. 2020: Iss. 3, Article 8, Tashkent. 2020. – PP.130-134. DOI: <https://doi.org/10.51346/tstu-01.20.3-77-0072>. (05.00.00, №16)

10. Yusupbekov N.R., Igamberdiev H.Z., Zaripov O.O., Mamirov U.F. Stable Iterative Neural Network Training Algorithms Based on the Extreme Method //

Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020, Izmir, vol 1306. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-64058-3\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-030-64058-3_30) (11, Springer, IF 0.63)

11. Yusupbekov A.N., Sevinov J.U., Mamirov U.F., Botirov T.V. Algorithms for the Synthesis of a Neural Network Regulator for Control of Dynamic Objects // Advances in Intelligent Systems and Computing, Izmir, 2020, vol 1306. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-64058-3\\_90](https://doi.org/10.1007/978-3-030-64058-3_90) (11, Springer, IF 0.63)

12. Yusupbekov N.R., Igamberdiev H.Z., Mamirov U.F. Adaptive Control System with a Multilayer Neural Network under Parametric Uncertainty Condition // CEUR Workshop Proceedings, 2020, Vol. 2782, Smolensk, Russia, –PP. 228-234. (3, Scopus, IF 0.8)

13. Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У., Мамиров У.Ф. Регулярные алгоритмы синтеза адаптивного регулятора в задаче о диссипативности // Международный научно-технический журнал «Инновации в технике и технологиях», Vol.1, №.3. 2020. –PP. 24-28. (35, Crossref, IF 0.7)

14. Igamberdiev H.Z., Mamirov U.F. Regular Algorithms for the Parametric Estimation of the Uncertain Object Control // Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020, Tashkent, vol 1323. –PP. 322-328. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-68004-6\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68004-6_42) (3, Scopus, IF 0.9)

15. Mamirov U.F. Synthesis of control systems for multidimensional dynamic objects under parametric uncertainty based on the invariance theory // Chemical Technology, Control and Management: Vol. 2021: Iss. 1. –PP.67-72. DOI: <https://doi.org/10.34920/2021.1.67-72> (05.00.00, №12)

16. Yusupbekov N.R., Igamberdiev H.Z., Mamirov U.F. Algorithms for robust stabilization of a linear uncertain dynamic object based on an iterative algorithm // In: Kahraman C., Cebi S., Cevik Onar S., Oztaysi B., Tolga A.C., Sari I.U. (eds) Intelligent and Fuzzy Techniques for Emerging Conditions and Digital Transformation. INFUS 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 307. Springer, Cham. –PP. 225-232. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85626-7\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85626-7_28). (3, Scopus, IF 0.6)

17. Mamirov U.F. Algorithms for synthesis of stabilization systems of uncertain dynamic objects // Chemical Technology, Control and Management: Vol. 2021: Iss. 2. –PP.75-80. DOI: <https://doi.org/10.51346/tstu-02.21.1-77-0011> (05.00.00, №12)

18. Yusupbekov N.R., Igamberdiev H.Z., Mamirov U.F. Stable Algorithms for Adaptive Control and Adaptation of Uncertain Dynamic Objects Based on Reference Models // CEUR Workshop Proceedings, 2021, Vol. 2965, Kolomna, Russia, –PP. 296-302. (3, Scopus, IF 0.8)

19. Igamberdiev Husan, Yusupbekov Azizbek, Mamirov Uktam, Abdukaxxarov Inomjon Stable Algorithms for Solving the Problem of Determining the Weighting Coefficients of Neural Networks with Radial-Basis Activation Functions // 11th International Conference on Theory and Application of Soft Computing, Computing with Words, Perception and Artificial Intelligence, ICSCCW 2021, Antalya, Turkey, 2021 (3, Scopus, IF 0.9)

20. Igamberdiev H.Z., Mamirov U.F. Formalization of the procedure for choosing the optimality criterion and setting the problem of ammonium nitrate

## II бўлим (Часть II; Part II)

21. Игамбердиев Х.З., Мамиров У.Ф. Алгоритмы устойчивого оценивания параметров многомерной модели и синтеза системы адаптивной стабилизации неопределенных объектов / Международная научно-практическая конференция «Инновационные решения инженерно-технологических проблем современного производства» 14-16 ноября 2019 года, Бухара, –С. 197-199.

22. Мамиров У.Ф., Ханкельдиева З.Х. Формирование алгоритмов управления матричным объектом в условиях параметрической неопределенности / Международная научно-практическая конференция «Инновационные решения инженерно-технологических проблем современного производства» 14-16 ноября 2019 года, Бухара, –С. 235-237.

23. Mamirov U.F., Botirov T.V., Boeva O.Kh., Buronov B.M. Estimation algorithm performance of the stochastic systems and selection control action / International conference on Integrated innovative development of Zarafshan region: achievements, challenges and prospects, 27-28 November 2019, Navoi, Uzbekistan, –PP. 468-472.

24. Mamirov U.F. Регулярные алгоритмы параметрического синтеза систем адаптивного управления неопределенными объектами / Prospects of Development of Science and Education Proceedings of 9th Conference, Tashkent, 25 December 2020, –PP. 44-46.

25. Mamirov U.F. Алгоритмы оценки качества функционирования стохастических систем и выбора управляющего воздействия / Prospects of Development of Science and Education Proceedings of 9th Conference, Tashkent, 25 December 2020, –PP. 40-43.

26. Мамиров У.Ф. Устойчивых алгоритмов синтеза адаптивных систем управления неопределенными объектами / Республиканской научно-практической конференции «Компетентный подход к образованию: проблемы и решения», Андижан, 2020. –С. 132-134.

27. Mamirov U.F. Formal description of algorithms for controlling systems under conditions of model uncertainty / The Proceedings of the 3th International Scientific and Practical Conference «Scientific Community: Interdisciplinary Research» (March 16-18, 2021). Hamburg, Germany: Busse Verlag GmbH, 2021. – pp. 504-507.

28. Мамиров У.Ф., Абдукаххаров И.И. Формальное описание алгоритмов управления системами в условиях модельной неопределенности / Республиканской научно-технической конференции «Актуальные вопросы и тенденции развития современных исследований, инноваций, техники и технологий». – Жиззах: ЖизПИ, 9-10 апрель 2021 г., том 1. –С. 408-410.

29. Мамиров У.Ф. Проблема выбора математической модели объектов управления с неопределенными параметрами / Республиканской научно-

технической конференции «Актуальные вопросы и тенденции развития современных исследований, инноваций, техники и технологий». – Жиззах: ЖизПИ, 9-10 апрель 2021 г., том 1. –С. 405-408.

30. Игамбердиев Х.З., Мамиров У.Ф. Устойчивые упрощенные вычислительные процедуры синтеза многомерных систем управления при неполной информации / Республиканской научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы применения цифровых технологий и искусственного интеллекта в управлении», Ташкент, 6-7 сентября 2021 г. –С. 7-12.

31. Игамбердиев Х.З., Мамиров У.Ф. Регулярные алгоритмы идентификации переходной матрицы объектов управления в условиях параметрической неопределенности / Республиканской научной конференции «Актуальные вопросы математики и прикладной математики в эпоху глобализации». -Ташкент. ТГТУ, 2021. Том 2. –С. 63-67.

32. Мамиров У.Ф. Устойчивые алгоритмы локально-оптимальной стабилизации неопределенных объектов управления / Республиканской научной конференции «Актуальные вопросы математики и прикладной математики в эпоху глобализации». -Ташкент. ТГТУ, 2021. Том 2. –С. 91-94.

33. Мамиров У.Ф. Устойчивые алгоритмы синтеза систем автоматической стабилизации неопределенных динамических объектов / Международной научно-практической конференции «Роль передовых инновационных технологий и образования в решении задач автоматизации и энергетики, направленная на повышение энергоэффективности производств и социальной сферы», Наманган 2021. –С. 534-536.

34. Мамиров У.Ф. Адаптивная система управления с многослойной нейронной сетью в условиях неопределенности / Международной научно-практической конференции «Современные проблемы прикладной математики и информационных технологий», Бухара, 2021. –С. 344-346.

35. Мамиров У.Ф. Алгоритмы синтеза параметрически инвариантных систем управления в условиях вариации матрицы состояния объекта / Международной научно-практической конференции «Современные проблемы прикладной математики и информационных технологий», Бухара, 2021. –С. 346-348.

36. Игамбердиев Х.З., Мамиров У.Ф. Устойчивые алгоритмы идентификации управляемых объектов в условиях неопределенности / 25-ая Международная научно-практическая конференция «Инновация-2021», Ташкент, 2021. –С. 276-278.

37. Мамиров У.Ф. Программное обеспечение задач идентификации переходной матрицы управляемых объектов в условиях параметрической неопределенности / Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, № DGU 08968 от 10.09.2020 г.

38. Севинов Ж.У., Мамиров У.Ф., Зарипова Ш.О. Программное обеспечение задач адаптивного оценивания состояния динамических систем / Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, № DGU 08544 от 14.07.2020 г.

39. Игамбердиев Х.З., Каримов Д.Р., Мамиров У.Ф. Программное обеспечение для задачи адаптивной идентификации объектов управления с запаздыванием на основе реализаций входных и выходных сигналов / Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, № DGU 08909 от 29.08.2020 г.

40. Мамиров У.Ф., Абдукаххаров И.И. Программное обеспечение задачи синтеза адаптивной системы управления с многослойной нейронной сетью в условиях параметрической неопределенности / Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, № DGU 10909 от 22.04.2021 г.

41. Мамиров У.Ф. Программное обеспечение задач синтеза системы управления многомерными динамическими объектами в условиях параметрической неопределенности / Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, № DGU 10910 от 22.04.2021 г.

Автореферат “Technical science and innovation” 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» гарнитураси.  
Рақамли босма усулда босилди.  
Шартли босма табағи: 4. Адади 100. Буюртма № 63/21.

Гувоҳнома № 851684.  
«Тирограф» МЧЖ босмаҳонасида чоп этилган.  
Босмаҳона манзили: 100011, Тошкент ш., Беруний кўчаси, 83-уй.