

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ ВА
ЭНЕРГЕТИКА ВА АВТОМАТИКА ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ
ФАН ДОКТОРИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ 16.07.2013.Т.02.01
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

ЗАРИПОВ ОРИПЖОН ОЛИМОВИЧ

**СТОХАСТИК БОШҚАРУВ ОБЪЕКТЛАРИ ҲОЛАТИНИ МУНТАЗАМ
АДАПТИВ БАҲОЛАШ УСУЛЛАРИ ВА АЛГОРИТМЛАРИ**

**05.13.07 – Технологик жараёнлар ва ишлаб чиқаришларни
автоматлаштириш ва бошқариш
(техника фанлари)**

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2014

Докторлик диссертацияси автореферати мундарижаси
Оглавление автореферата докторской диссертации
Content of the abstract of doctoral dissertation

Зарипов Орипжон Олимович Стохастик бошқарув объектлари ҳолатини мунтазам адаптив баҳолаш усуллари ва алгоритмлари	3
Зарипов Орипжон Олимович Методы и алгоритмы регулярного адаптивного оценивания состояния стохастических объектов управления	29
Zaripov Oripjon Methods and algorithms of regular adaptive state estimation of stochastic object control.....	55
Эълон қилинган ишлар рўйхати Список опубликованных работ List of published works	80

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ ВА
ЭНЕРГЕТИКА ВА АВТОМАТИКА ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ
ФАН ДОКТОРИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ 16.07.2013.Т.02.01
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

ЗАРИПОВ ОРИПЖОН ОЛИМОВИЧ

**СТОХАСТИК БОШҚАРУВ ОБЪЕКТЛАРИ ҲОЛАТИНИ МУНТАЗАМ
АДАПТИВ БАҲОЛАШ УСУЛЛАРИ ВА АЛГОРИТМЛАРИ**

**05.13.07 – Технологик жараёнлар ва ишлаб чиқаришларни
автоматлаштириш ва бошқариш
(техника фанлари)**

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2014

Докторлик диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида 30.09.2014/В2014.5.Т308 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

Докторлик диссертациясининг тўла матни Тошкент давлат техника университети ва Энергетика ва автоматика институти ҳузуридаги Фан доктори илмий даражасини берувчи 16.07.2013.Т.02.01 рақамли илмий кенгаш веб-саҳифасида www.tdtu.uz манзилига жойлаштирилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз) веб-саҳифада www.tdtu.uz манзилига ва «ZIYONET» Ахборот-таълим порталида www.ziyonet.uz манзилига жойлаштирилган.

**Илмий
маслаҳатчи:**

Игамбердиев Хусан Закирович
техника фанлари доктори, профессор

**Расмий
оппонентлар:**

Бекмуратов Тулкин Файзиевич
ЎЗР ФА академиги,
техника фанлари доктори, профессор

Адилов Фарух Тулкунович
техника фанлари доктори

Каипбергенов Батирбек Тулепбергенович
техника фанлари доктори

**Етакчи
ташқилот:**

«ЎЗКИМЁСАНОАТ» ДАК

Диссертация ҳимояси Тошкент давлат техника университети ва Энергетика ва автоматика институти ҳузуридаги 16.07.2013.Т.02.01 рақамли Илмий кенгашнинг «___» _____ 2014 йил соат 10⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100095, Тошкент, Университет кўч., 2. Тел.: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz).

Докторлик диссертацияси билан Тошкент давлат техника университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (___ рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 100095, Тошкент, Университет кўч., 2. Тел.: (99871) 246-03-41.

Диссертация автореферати 2014 йил «___» _____ да тарқатилди.
(2014 йил «___» _____ даги №__ рақамли реестр баённомаси).

Н.Р.Юсуббеков
Фан доктори илмий даражасини берувчи
илмий кенгаш раиси
ЎЗР ФА академиги, т.ф.д., профессор

А.Р.Марахимов
Фан доктори илмий даражасини берувчи
илмий кенгаш илмий котиби т.ф.д., профессор

Ш.М.Гулямов
Фан доктори илмий даражасини берувчи
илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси
т.ф.д., профессор

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АННОТАЦИЯСИ

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти. Ўзбекистон Республикаси ҳукумати томонидан регионал-ҳудудий автоматлаштирилган бошқариш тизимларини ривожлантириш ва ягона ахборот майдонини яратиш бўйича қабул қилинган комплекс чора-тадбирлар замонавий ахборот-коммуникация технологиялари асосида ахборот-бошқарув тизимларини кенг жорий этишга йўналтирилган. Шундан келиб чиққан ҳолда, турли функционал вазифали объектларни бошқариш ва уларнинг ҳолатини баҳолашнинг самарали усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш ўзининг долзарблиги билан ажралиб туради ва шу билан биргаликда, катта халқ хўжалиги аҳамиятига эга бўлган назарий ва амалий муаммо сифатида тўлалигича ечилмай қолмоқда. Ахборотларга ишлов бериш ва бошқаришнинг мураккаб тизимлари, хусусан, технологик объектларни бошқариш тизимларининг тараққиёти аниқлик тавсифларига бўлган талабларнинг доимий равишда ошиб бориши билан қизиқиш уйғотади. Бу масала айниқса, ташқи муҳит ва моделлар тавсифларининг априор ноаниқлиги ва кутилмаган ўзгарувчанлиги каби реал шароитларда мураккабдир. Бундай шароитларда ҳалақит берувчи содда омиллар сифатида қаралмайдиган модели бузилишларга нисбатан тизимнинг фаолият кўрсатиши мослашувчанлиги ва назоратига ўтиш мақсадга мувофиқ ва ҳалақит берувчи омилларни баҳолаш умуман тизимнинг фаолият кўрсатиш сифатини аҳамиятли даражада ошириш имконини беради. Шундай қилиб, априор ноаниқликнинг юқори бўлган шароитларида бошқариш тизимларни мослаштиришнинг самарали усуллари ва воситаларини ривожлантириш ва ишлаб чиқиш реал вақт жадаллигидаги кузатишлар маълумотларига самарали ишлов бериш имконини беради ва ахборотларга ишлов бериш ҳамда бошқариш тизимларининг аниқлиги ва ишончлилигини оширади.

Диссертация ишига бўлган зарурият, саноатнинг турли тармоқларидаги, хусусан, кимёвий саноатдаги мураккаб технологик объектларни назорат қилиш ва автоматлаштиришнинг замонавий концепцияларини кенг жорий этиш, ноаниқлик шароитларида объектларни баҳолаш, идентификациялаш ва бошқариш масалаларига диққат билан аҳамият беришни талаб этиши билан боғлиқлиги орқали ифодаланади.

Мазкур тадқиқот Ўзбекистон Республикаси Президентининг «Кимёвий саноатдаги корхоналарни модернизациялаш, техник ва технологик таъминлаш дастури тўғрисида»ги 2007 йил 7 июлдаги ПФ-677-сонли фармонининг амалга оширилишини таъминлашга қаратилган бўлиб, дастурдаги энг асосий масалалардан бири ишлаб чиқаришнинг техник даражаси ва самарадорлигини ошириш, замонавий юқори самарали технологиялар, қурилмалар ва технологик жараёнларни энг янги бошқариш тизимларини жорий этиш йўли орқали кимёвий ишлаб чиқаришдаги экологик хавфсизлик ва эксплуатацион ишончликни таъминлаш ҳисобланади.

Шу жиҳатдан юқорида кўрсатиб ўтилган масалаларни ечиш замонавий ахборот технологиялари асосида технологик жараёнларни бошқариш тизимининг самарадорлигини келажакда оширишга қаратилган махсус тадқиқотлар ва ишланмаларни амалга оширишни талаб қилиши келиб чиқади.

Бунда мослашиш ва назорат қилишнинг кўрсатиб ўтилган усулларини амалга ошириш бошқарилувчи объектлар динамикасининг турли хил тесқари масалаларини ечиш зарурияти билан тўқнаш келади. Бундай турдаги масалалар ёмон шартланган масалалар ҳисобланади. Улар ноқоррект қўйилган масалалар синфига тегишли бўлади. Бундай вазиятларда ноаниқлик шароитидаги бошқариш объекти ҳолатларини адаптив баҳолаш усуллари ва алгоритмларини синтезлаш масаласини жорий ахборотларга ишлов беришнинг турғун алгоритмларини қуриш услубиятини белгилаб берувчи мунтазам баҳолаш назарияси нуқтаи назаридан кўриб чиқиш мақсадга мувофиқдир. Шунга кўра модели ноаниқлик шароитларида технологик бошқариш объекти ҳолатини мунтазам адаптив баҳолашнинг самарали усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш ва уларни амалий жиҳатдан амалга оширишнинг ҳисоблаш схемаларини синтезлаш ниҳоятда муҳим аҳамият касб этади.

Тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялар тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги. Диссертация Ўзбекистон Республикаси фан ва технологияларни ривожлантиришнинг муҳим йўналишларига: ИТД-17 – «Ахборот ва телекоммуникация технологияларини кенг ривожлантириш ва жорий этишни таъминлайдиган замонавий ахборот тизимлари, бошқариш ва ўқитишнинг интеллектуал воситалари, илмий-техникавий маълумотлар базаси ва дастурий маҳсулотларини ишлаб чиқиш» ва ИТД-5 – «Жамиятни ахборотлаштириш даражасини оширишга йўналтирилган илмий ҳажмдор ахборот технологияларни, телекоммуникацион тармоқларни, аппарат-дастурий воситаларни интеллектуал бошқариш, ўқитиш усулларини ва тизимларини ишлаб чиқиш» мос ҳолда бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича халқаро илмий тадқиқотлар шарҳи. Стохастик бошқариш назариясида турли хил масалаларнинг сонли ечимларини олишга бўлган турлича ёндашувларни тавсифловчи кўплаб усуллар ва алгоритмлар ишлаб чиқилган. Бошқаришнинг турли хил оптимал ва субоптимал стратегиялари таклиф қилинган. Стохастик бошқаришнинг баъзи бир тавсифлари ва стратегияларининг синфлари аниқланган. Адаптив бошқариш тизимлари синфида турли даражадаги априор ноаниқлик шароитида баҳолаш, идентификациялаш ва қарор қабул қилишнинг самарали усуллари ва алгоритмлари ишлаб чиқилган. Бу соҳада АҚШ, Буюк Британия, Россия, Япония, Хитой, Жанубий Корея, Германия, Голландия, Франция, Италия, Австралия ва бошқа давлатларнинг олимлари томонидан маълум даражадаги муваффақиятларга эришилган.

Honeywell, Siemens, Mitsubishi, ABB, Invensys, Festo, GE Fanuc, Rockwell, Advantech, Evoc, Kontron, Eurotech, Intel, SeaTech, MOX, Wonderware, Rockwell Automation, Iconics, Trace-Mode ва бошқа халқаро

компаниялар ва илмий марказларнинг нашрларида қайд қилинишича, бошқаришнинг замонавий технологияларини ривожланиши оптимал ва адаптив бошқариш тизимларини модификациялаш ва такомиллаштириш йўналишларида амалга ошади.

Шу билан бирга, бошқариш объектлари тавсифининг ноаниқлиги билан боғлиқ бўлган ва уларнинг фаолият кўрсатиш шартларининг мураккаблашуви даражасида мавжуд модели бузилишларга нисбатан тизимларнинг фаолият кўрсатишини назорат қилиш ва мослаштириш тамойилларини киритишга асосланган янги йўналиш ва иловаларни ишлаб чиқишга йўналтирилган тадқиқотлар фаол олиб борилмоқда. Бу соҳадаги илмий-техник адабиётларни аналитик ўрганиш шуни кўрсатадики, динамик объектларни бошқариш тизимларининг келгусидаги такомиллашуви модели ва сигналли ноаниқлик шароитларида ишлайдиган турли хил функционал вазифали бошқариш тизимларини адаптив филтрлаш концепцияси асосида синтезлашнинг маълум усулларини такомиллаштириш ва янгиларини ишлаб чиқиш билан чамбарчас боғлиқдир.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Модели ноаниқлик шароитида бошқаришнинг технологик объектлари ҳолатини адаптив баҳолаш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш бўйича тадқиқотларга тегишли бўлган сўнгги йиллардаги илмий-техник адабиётлар таҳлили ушбу соҳада аҳамиятли даражадаги назарий ва амалий натижаларга эришилганлигидан далолат беради. Бошқариш тизимлари фаолиятини назорат қилиш ва мослаштиришга бағишланган кўп сонли ишлар эълон қилинган, умумназарий концепциялар ишлаб чиқилган ва ечилган амалий масалалар сони ортиб бормоқда. Сигналлар ва ҳалақитлар статистик тавсифларининг турли даражадаги априор ноаниқлиги шароитида ишлайдиган юқори аниқликдаги филтрларни қуришнинг турли йўллари мавжуд ва ишлаб чиқилмоқда. Бу соҳадаги турли назарий ва амалий масалаларга кўп сонли монографиялар, тўпламлар ва мақолалар бағишланган. Бу соҳада Aliev R., Andrews A.P., Brayson A., Bucy R., Izerman R., Jaegeol Yim, Jaehun Joo, Kalman R., Lainiotis D., Landau I.D., Leondes C., Ljung L., Simon D., Tao G., Wiener N., Zhou J., Абдуллаев Ж.А., Андриевский Б.Р., Бекмуратов Т.Ф., Буков В.Н., Булычев Ю.Г., Верлань А.Ф., Игамбердиев Х.З., Кадиров А.А., Камилов М.М., Красовский А.А., Никифоров В.О., Огарков М.А., Поляк Б.Т., Пупков К.А., Семушин И.В., Сеницын И.Н., Фрадков А.Л., Цыпкин Я.З., Юсупбеков Н.Р., Ядыкин И.Б., Яковлев В.Б. ва бошқа шу каби олимларнинг ишларини кўрсатиб ўтиш мумкин. Бироқ илмий-тадқиқот объектлари доирасининг кенгайиши ва доимий мураккаблашуви бузилишларни аниқлаш ва ташхислаш, ноаниқлик шароитида стохастик бошқариш объектлари ҳолатларини идентификациялаш ва адаптив баҳолашнинг янги самарали усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқишни талаб этади. Шу билан биргаликда, адабиётларда ноаниқлик шароитида стохастик бошқариш объектлари ҳолатларини адаптив баҳолашнинг осттизимларини синтезлаш масалаларидаги мунтазам алгоритмларнинг имкониятлари етарлича баҳоланмаган. Модели ноаниқлик

шароитларида бошқаришнинг стохастик тизимлари синфидаги аниқлаш ва мослаштиришнинг мунтазам усуллари ва алгоритмлари тўлалигича ишлаб чиқилмаган. Шунингдек, стохастик бошқариш объектлари ҳолатларини идентификациялаш ва бевосита ёндашув асосида адаптив баҳолашнинг мунтазам усуллари ҳамда объект динамикаси моделларида ноаниқлик бўлганда адаптив баҳолаш алгоритмлари ўз ривожини талаб этмоқда. Бундан ташқари бузилишларни биргаликда аниқлаш, идентификациялаш ва баргараф этишнинг мунтазам усуллари ва алгоритмларини мунтазам усулларнинг замонавий концепциялари асосида ишлаб чиқиш ҳам мақсадга мувофиқ бўлиб, ноаниқлик шароитидаги стохастик объектларни бошқаришнинг адаптив тизимларини қуриш ва амалга оширишнинг алгоритмик амаллари спектрини кенгайтиради ва тизимларнинг фаолият кўрсатиш самарадорлигини ошириш имконини беради. Юқорида келтириб ўтилганлардан модели ноаниқлик шароитида стохастик бошқариш объектлари ҳолатларини мунтазам адаптив баҳолашнинг самарали усуллари ва алгоритмларини яратиш ва келгусида такомиллаштиришнинг жуда зарурлиги келиб чиқади.

Диссертация тадқиқотининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги қуйидаги лойиҳаларда ўз аксини топган: давлат илмий-техника дастури А-14-045 – «Узлуксиз характерли технологик жараёнларга эга саноат ишлаб чиқариши учун интеллектуаллаштирилган ахборот-бошқарув тизимларини ишлаб чиқиш ва қўллаш» (2006-2008 йй.); ЁА-17-05 – «Узлуксиз технологик объектларнинг адаптив стохастик бошқариш тизими синтезининг мунтазам алгоритмларини ва дастурий воситаларини ишлаб чиқиш» (2010-2011 йй.); ОТ-Ф1-080 – «Мураккаб технологик жараёнлар ва ишлаб чиқаришларни бошқаришнинг интеллектуал тизимларини қуришнинг концепциялари ва принципларини ишлаб чиқиш» (2007-2011 йй.); Ф-4-56 – «Мураккаб технологик объектларнинг интеллектуал бошқариш тизимларини қатъиймас тўпламларни тасвирлаш асосида структурали параметрик синтезлашнинг назарий асосларини ва усулларини ишлаб чиқиш» (2012-2016 йй.).

Тадқиқотнинг мақсади технологик бошқарув объектлари ҳолатини модели ноаниқлик шароитида мунтазам адаптив баҳолаш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш ва уларни муайян ишлаб чиқариш жараёнларини автоматлаштириш ва бошқариш масалаларини ечишда амалий қўллашдан иборат.

Мақсадга эришиш учун қуйидаги **тадқиқот вазифалари** қўйилган:

динамик тизимларни бошқариш тизимларини синтезлаш масалаларидаги адаптив филтрлаш назарияси ва усуллари ривожини тизимли таҳлил қилиш;

адаптив баҳолашнинг мунтазам алгоритмларини идентификацион ёндашув асосида ишлаб чиқиш;

Калман филтрининг матрицали кучайтириш коэффициентини адаптив баҳолашнинг мунтазам алгоритмларини ишлаб чиқиш;

объект динамикаси моделларида ноаниқлик бўлганда адаптив баҳолашнинг мунтазам алгоритмларини ишлаб чиқиш;

мунтазам адаптив баҳолашнинг ишлаб чиқилган усул ва алгоритмларини технологик объектларни бошқариш масалаларига қўллаш.

Тадқиқот объекти сифатида стохастик бошқариш объектлари ҳолатларини баҳолаш ва динамик филтрлаш усуллари ва алгоритмлари қаралган.

Тадқиқот предмети – стохастик бошқариш объектлари ҳолатларини мунтазам адаптив баҳолаш усуллари ва алгоритмлари.

Тадқиқот усуллари. Тадқиқот жараёнида тизимли таҳлил, идентификациялаш, динамик филтрлаш, адаптив бошқариш ва нокоррект қўйилган масалаларни ечишнинг умумий услубияти қўлланилган.

Диссертация тадқиқотининг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

қидирилаётган ечим мувофиқлигини таъминлаш ва шу билан биргаликда адаптив баҳолаш амаллари аниқлигини ошириш имконини берадиган ёмон шартланган матрицали чизиқлантирилган тизимларнинг мумкин бўлган қийинчиликларини эътиборга олган ҳолда ночизиқли функционал тенгламаларни ечиш усуллари асосида объект шовқинининг ковариацион матрицасини мунтазам баҳолаш алгоритмлари ишлаб чиқилган;

баҳолаш хатоликлари назарий ковариацион матрицаларини реал қийматларга боғланишини таъминлаш ва шу билан биргаликда Калман филтри кучайтириш матрицаларини ҳисоблашни реал ўлчашлардаги узилиб қолишини бартараф этиш имконини берадиган матрицаларнинг сингуляр ажратиш асосида ўлчашларда кетма-кет корреляцияланган халақитлар бўлган шароитларда бошқариш объекти ҳолатини адаптив мунтазам баҳолаш алгоритмлари таклиф этилган;

филтрни ғалаён таъсирларининг ковариацион матрицаларини ўзгарувчан қийматларига мослаштириш имконини берадиган, хусусий ҳосилаларни ҳисоблаш ва силлиқлантиришни талаб этмайдиган кесишувчилар усули ва янгиловчи жараён асосида ўлчаш халақитлари ва объект шовқинининг ковариацион матрицаларини адаптив мунтазам итерацион баҳолаш алгоритмлари таклиф этилган;

градиентни проекциялаш усули асосида Калман филтрининг матрицали кучайтириш коэффицентини адаптив баҳолашнинг мунтазам алгоритми ишлаб чиқилган ва матрицали тенгламани ечмасдан туриб, ечимнинг хатолигини баҳолаш имконини берадиган кучайтириш коэффицентини ҳисоблашнинг матрицали тенгламаси ўнг қисми хатоликларини баҳолаш ифодалари олинган;

чизиқли алгебраик тенгламаларнинг тақрибий ҳосил қилинган ёки ёмон шартланган стохастик тизимларини ечиш усуллари асосида ўлчаш халақитлари ва объект шовқинини авто- ва ўзаро коррелирланганлиги шароитида адаптив баҳолашнинг динамик филтр кучайтириш коэффицентини ҳисоблаш аниқлигини ошириш имконини берадиган мунтазам алгоритмлари таклиф этилган;

итератив мунтазамлаштириш тамойили доирасида вариацион тенгсизликларни ечиш усуллари асосида бошқариш объектларининг ўтиш

матрицаларини адаптив баҳолашнинг қидирилаётган баҳолар мустақиллиги ва мувофиқлигини таъминловчи мунтазам алгоритмлари ишлаб чиқилган;

функционалларни минимумлаштиришнинг мунтазам усуллари асосида кўриб чиқилаётган баҳолаш масаласини мунтазамлаштириш имконини берадиган тўла априор модели ноаниқлик шароитларида Калман туридаги динамик филтёрнинг кучайтириш коэффициентини ва бошқарилувчи объект ўтиш матрицалари параметрларини баҳолашнинг мунтазам алгоритмлари таклиф этилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

динамик тизимлар ҳолатини адаптив баҳолаш масалаларини ечишни дастурий-алгоритмик қўллаб-қувватлашга мўлжалланган дастурий модуллардан тузилган ARES (adaptation, regularization, estimation, system) дастурий мажмуаси ишлаб чиқилган;

меъёрий фаолият кўрсатиш шароитларидаги саноат тажрибаси натижалари асосида PS-Агро ишлаб чиқаришдаги пульпани гранулали қуритиш ва аммиакли селитрани буғлатиш жараёнларининг математик моделлари ишлаб чиқилган;

модели ноаниқликнинг турли даражаларини эътиборга олган ҳолда параметрик ва сигналли мослашиш контурларидан фойдаланиб, бошқарилувчи объектлар ҳолатларини адаптив баҳолашнинг осттизими ишлаб чиқилган;

кальций-сульфат-фосфатли пульпани гранулали қуритиш агрегатининг ишлаб чиқарувчанлигини 2,25% га ошириш ва аммиакли селитрани буғлатишдаги буғнинг сарфини бир йилда 1223,2 Гкалорияга камайтиришни таъминлайдиган мос технологик жараёнларнинг автоматлаштириш ва бошқаришнинг муносиб техник таъминотли тизимлари таклиф этилган.

Олинган натижаларнинг ишончлилиги услубий асосланган назарий асосларнинг бажарилиши, ноқоррект қўйилган масалаларни ечиш усуллари асосида динамик объектларни адаптив баҳолаш ва бошқаришнинг назарий асосланган концепцияларининг қўлланилиши, замонавий автоматик бошқаришнинг апробация қилинган усуллари ва алгоритмларининг ишлатилиши, адаптив баҳолашнинг таклиф этилган усуллари ва алгоритмларининг талаб қилинган яқинлашиш даражаси, назарий ва амалий тадқиқотларнинг олинган натижалари ва уларнинг ўзаро мослиги билан таъминланган.

Тадқиқот натижаларининг назарий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг назарий аҳамияти модели ноаниқлик шароитларида технологик бошқариш объектлари ҳолатларини мунтазам адаптив баҳолашнинг конструктив усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотларнинг амалий аҳамияти кенг синфдаги технологик объектларнинг бошқариш тизимларини адаптив баҳолаш ва синтезлаш масалаларининг математик ва алгоритмик таъминотини ишлаб чиқишдан иборат. Априор ноаниқлик шароитида стохастик бошқариш объектлари ҳолатларини адаптив баҳолашнинг ишлаб чиқилган усул ва алгоритмлари

узлуксиз характерли ишлаб чиқаришнинг технологик жараёнларини бошқаришнинг адаптив тизимлари функционал структураларини куриш ва лойиҳалашни автоматлаштиришда кенг қўлланилиши мумкин.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Адаптив баҳолаш алгоритмлари ва бошқаришни автоматлаштиришнинг функционал схемалари «ЎЗКИМЁСАНОАТ» Давлат акционерлик компанияси корхоналарида, жумладан, Олмалик «АММОФОС-МАКСАМ» акционерлик жамиятида кальций-сульфат-фосфатли пульпани гранулалари куриштириш (03.10.2014 йилдаги далолатнома) ва «FARG‘ONAAZOT» акционерлик жамиятида аммиакли селитрани буғлатиш (21.05.2014 йилдаги далолатнома) технологик жараёнларини бошқаришни автоматлаштириш тизимларида жорий этилган бўлиб, жамланган йиллик иқтисодий самара 83 млн. 76 минг сўмни ташкил этган («ЎЗКИМЁСАНОАТ» ДАК нинг 17.11.2014 йилдаги жорий қилинганлик тўғрисидаги №01-2304/И-сонли маълумотномаси).

Ишнинг апробацияси. Тадқиқот натижалари 32 та илмий-амалий анжуман, конгресс ва семинарларда, жумладан 25 та халқаро: «Энергетика тараққиётининг замонавий ҳолати ва истиқболлари» (Тошкент, 2006); «Алоқа техникаси и технологияси» (Тошкент, 2008); «Тоғ-металлургия соҳасининг замонавий техника ва технологияси ҳамда уни ривожлантириш йўллари» (Навоий, 2008, 2013); «World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation – WCIS-2008-2012» (Тошкент, 2008, 2010, 2012); «Congress of the World Mathematical Society of Turkic Countries» (Almaty, 2009); «Интеграл тенгламалар-2009» (Киев, 2009); «Динамик тизимларни бошқариш ва оптималлаштириш – CODS-2009» (Тошкент, 2009); «Математик усуллар техника ва технологияларда – ММТТ-23» (Саратов, 2010); «International Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing – ICAFS-2010-2014» (Prague, 2010; Lisbon, 2012; Paris, 2014); «International School and Conference on Foliations, Dynamical Systems, Singularity Theory and Perverse Sheaves» (Samarkand, 2009); «International training-seminars on mathematics in conjunction with the joint mathematics meeting» (Samarkand, 2011); «Инновация» (Тошкент, 2010-2013); «Амалий математика ва ахборот технологияларининг долзарб муаммолари - Ал-Хоразмий – 2012 - 2014» (Тошкент, 2012; Самарқанд, 2014); «Сунъий интеллектда интеграллашган моделлар ва юмшоқ ҳисоблашлар» (Коломна, 2013); «International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control – «ICSCCW-2013» (Izmir, 2013); «Машинасозликда замонавий материаллар, техника ва технологиялар» (Андижон, 2014) ва 7 та республика конференцияларида апробациядан ўтказилган.

Натижаларнинг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича 60 та илмий иш, жумладан, 2 та монография, 20 та илмий мақолалар, улардан 6 таси хорижий журналларда чоп этилган ҳамда 10 та ЭҲМ учун яратилган дастурий воситаларни қайд қилиш гувоҳномалари олинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати, 4 та илова, 198 саҳифа матн, 12 та расм ва 5 та жадвалдан иборат.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти асосланган, тадқиқот мақсади ва вазифалари, объекти ва предметлари аниқланган, тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялар тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён этилган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланган, уларнинг назарий ва амалий аҳамиятлари очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш рўйхати, ишнинг апробацияси натижалари, эълон қилинган ишлар ва диссертациянинг тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертация ишининг **биринчи бобида** динамик тизимларнинг бошқариш тизимларини синтезлаш масалаларидаги адаптив филтрлаш назарияси ва усуллари ривожининг тизимли таҳлили масалалари кўриб чиқилган. Автоматик бошқаришнинг замонавий назарияси ва амалиётида мослашиш муаммосига катта эътибор қаратилган. Бу муаммоларнинг ечими объект тавсифлари ва ташқи муҳит таъсирларига нисбатан априор ва жорий ахборотнинг тўлиқ бўлмаган шароитларида ўта хилма-хил технологик жараёнларни бошқаришни амалга ошириш имконини беради. Шунинг таъкидлаб ўтиш лозимки, априор ноаниқликнинг пайдо бўлиши автоматлаштирилаётган объект ва жараёнларнинг физикавий, кимёвий ёки технологик моделларини шакллантириш босқичидаёқ юз беради. Жорий ноаниқлик назорат қилинмайдиган тасодифий характерда бўлиб, бу меъёрий фойдаланиш режимида объектга ташқи муҳитнинг таъсири ва бошқариш объектининг статик ва динамик хоссалари ўзгариши билан белгиланади. Адаптив тизимлар бошқариш тизимлари иерархиясида мураккаб тизимлар қаторига киради. Уларнинг мураккаблиги нафақат хусусий топологик хусусиятлар билан, балки алоқа операторларининг структураси, фойдаланиладиган математик аппаратнинг хилма-хиллиги ва техник амалга оширишнинг хусусиятлари билан ҳам аниқланади. Бошқариш тизимларидаги мослашиш муаммосининг мураккаблиги техник, биологик ёки бошқа тизим бўладими, ундаги кўп муқобиллик, бошқарилувчи жараён ва ташқи муҳит ҳақидаги ахборотнинг ноаниқлиги характерининг хилма-хиллиги каби адаптив хулқ концепциясининг ўзида таркиб топади. Бу аввало, мураккаб технологик жараёнларни бошқариш тизимларини яратишда одатда объектнинг ишончли моделларини назарда тутмаслик билан тушунтирилади. Мавжуд назариялардан ҳеч бири фақатгина у тизим ишини тўғри тавсифлай олишига даъвогарлик қила олмайди. Бу муаммоларни талқин қилувчи назарияларнинг бутун бир спектрига эгамиз. Бугунги кунда алоҳида жараёнларни тор доирада кўриб чиқиш ва фақатгина маълум даражада тавсифлаш орқали тизим ҳақида бир томонлама тасаввур ҳосил қилинмоқда ва бу барча жараёнларнинг ишончли баҳоларига эга бўлиш имконини бермайди. Шундай қилиб, халақит берувчи содда омиллар сифатида қараб

бўлмайдиган модели бузилишларга нисбатан тизим фаолиятини назорат қилиш ва мослаштиришни қўллаш мақсадга мувофиқ бўлиб, уларни баҳолаш тизим сифатини умумий ҳолда анча яхшилаш имконини беради. Бунда бошқариш объектлари ҳолатини баҳолаш масалаларини тўғри қўйиш ва уни сифатли ечиш ҳамда бузилишларни аниқлаш ва баҳолаш учун қатор моментларни эътиборга олиш лозим бўлиб, улардан энг муҳимлари қуйидагилар ҳисобланади: ноаниқликнинг кўринишлари (модели ёки параметрик), ноаниқликнинг тури (фақат биринчи босқичдаги, лойиҳалаш босқичдаги ёки иккала (жорий жараёни лойиҳалаш ва бошқариш) босқичдаги ноаниқлик). Модели ноаниқлик баъзи технологик жараёнлар учун қайси математик моделдан фойдаланиш кераклиги ҳақида тўла ишонч йўқлигини, параметрик ноаниқлик эса ҳар бир технологик жараён учун тенгламаларнинг умумий структураси маълум, лекин модель параметрларида ноаниқлик мавжудлигини билдиради.

Юқорида келтирилганларга кўра модели ноаниқлик, реалликни акс эттириш жараёни соддалашган моделлар ёрдамида амалга оширилиш ҳолатидан келиб чиқиб, физик жараённинг концептуал моделини акс эттиради деган хулоса чиқариш мумкин. Бунда модели ноаниқлик ўз навбатида математик ноаниқликни акс эттиради. Бу ушбу ҳолдаги концептуал модель тақрибий усуллар билан ечиладиган тенгламалар тизими кўринишида амалга оширилиши билан кўрсатилади. Бунда натижалар ноаниқлигининг миқдорий баҳоланиши мумкин бўлган кўриниши юзага келади.

Юзага келган ҳолат кузатишлар билан бошқариладиган тизимларнинг моделлари аниқлиги бўйича солиштирилишни таъминлаш усуллари асосида бошланғич маълумотларни топшириғи тақрибий бўлган шароитларда бошқариладиган объектлар ва тизимлар ҳолатларини адаптив баҳолаш муаммоларига янги ёндашувларни ривожлантиришни талаб этади. Бунда юқорида кўрсатилган фикрга биноан ҳолатни баҳолашнинг кўп қиррали муаммоларини ечишнинг асосига динамик баҳолашнинг умумий назарияси ва нокоррект тескари масалаларни ечиш усуллари биргаликда қўллаш концепциясини қўйиш мақсадга мувофиқдир. Шундан келиб чиққан ҳолда, адаптив схемаларни синтезлаш масалаларини тизимли градациялашнинг, хусусан, бошқариш объектлари динамикасининг тескари масалалари концепцияси ва мунтазам усулларни жалб этишга асосланган услубияти муваффақиятли киритилмоқда. Кўриб ўтилган ҳолатлар модели ноаниқлик шароитларида бошқаришнинг технологик объектлари ҳолатини мунтазам адаптив баҳолашнинг усуллари ва алгоритмларини яратиш, уларни саноат ишлаб чиқаришининг муайян технологик жараёнларини автоматлаштириш ва бошқариш масалаларини ечишда амалга оширувчи ҳисоблаш схемаларини синтезлашнинг зарурийлигини кўрсатади.

Иккинчи боб бошқариш объектларининг ҳолатини адаптив баҳолашнинг мунтазам алгоритмларини идентификацион ёндашув асосида ишлаб чиқишга бағишланган. Қуйидаги дискрет вақтдаги тенглама билан тавсифланадиган чизиқли ёки чизиқлантирилган узлуксиз динамик тизимни кўриб чиқамиз:

$$x_{i+1} = A_i x_i + B_i u_i + \Gamma_i w_i, \quad (1)$$

$$z_i = H_i x_i + v_i, \quad (2)$$

бу ерда x_i – тизимнинг n ўлчамли ҳолат вектори, u_i – l ўлчамли бошқариш вектори, z_i – m ўлчамли кузатиш вектори, w_i ва v_i – мос равишда объект шовқини ва кузатиш халқитларининг q ва p ўлчамли векторлари бўлиб, $E[w_i] = 0$, $E[w_i w_k^T] = Q_i \delta_{ik}$, $E[v_i] = 0$, $E[v_i v_k^T] = R_i \delta_{ik}$, $E[w_i v_k^T] = 0$ тавсифли Гаусс оқ шовқинининг кетма-кет кўриниши ҳисобланади; A , B , Γ ва H – мос ўлчамдаги матрицалар. Бу кетма-кетликлар \bar{x}_0 математик кутилма ва P_0 ковариацияли тизимнинг тасодифий бошланғич ҳолати x_0 га боғлиқ эмас.

(1), (2) динамик тизимларнинг ҳолат вектори x_i ни баҳолаш учун одатда қуйидаги кўринишга эга бўлган Калман филътрининг анъанавий тенгламалари ишлатилади:

$$\hat{x}_{i|i} = A_{i,i-1} \hat{x}_{i-1|i-1} + B_{i,i-1} u_{i-1} + K_i [z_i - B_{i,i-1} u_{i-1} - H_i \hat{x}_{i-1|i-1}], \quad (3)$$

$$K_i = P_{i|i-1} H_i^T [H_i P_{i|i-1} H_i^T + R_i]^{-1}, \quad (4)$$

$$P_{i|i-1} = A_{i,i-1} P_{i-1|i-1} A_{i,i-1}^T + Q_i, \quad P_{i|i} = P_{i|i-1} - K_i H_i P_{i|i-1}, \quad \hat{x}_{0|-1} = \mu_0, \quad P_{0|-1} = M_0. \quad (5)$$

Бирок Калман филътри (3) – (5) амалларини қўлланилиш сфераси, бу алгоритм тизим параметрларини аниқ билишга асосланганлиги сабабли чегараланган. A , B , Γ ва H матрицалар ўзининг номинал қийматларига мос келади, лекин ковариация матрицалари Q ва R номаълум деб фараз қиламиз. Унда динамик филътрлаш (3)-(5) ни амалга оширишда ковариация матрицалари Q ва R ни аниқлашни (4), (5) ифодаларга мувофиқ кучайтириш коэффициентини K ни кетма-кет ҳисоблаб амалга оширишдан иборат бўлган идентификацион ёндашувдан фойдаланиш мақсадга мувофиқ.

Адаптив баҳолаш алгоритмларини синтезлашнинг охириги тенгламаларида бошқариш u_i назарда тутилмаганлиги яққол кўриниб турибди. Бирок бошқариш ҳар доим вақт бўйича маълум функция ҳисобланади. Шунинг учун у дискрет вақт i га бўлган боғлиқлик орқали эътиборга олинган бўлиши мумкин. Q_i ва R_i шовқин ковариациялари матрицаларини идентификациялаш ёки баҳолаш алгоритмларининг катта қисми Калман филътридаги $v_i = z_i - H_i \hat{x}_{i|i-1}$ ўлчашларнинг янгиланувчи кетма-кетликлари ёки боғланмаганликларини тахлил қилиш усулларига асосланган бўлиши мумкин. Ковариация матрицаси Q ни аниқлаш учун қуйидаги тенгламадан фойдаланамиз:

$$\sum_{j=0}^{k-1} HA^j \tilde{A} Q \tilde{A}^T (A^{j-k})^T H^T = (P^* H^T)^T (A^{-k})^T H^T -$$

$$- HA^k (P^* H^T)^T - \sum_{j=0}^{k-1} HA^j \hat{V} (A^{j-k})^T H^T, \quad k=1,2,\dots,n, \quad (6)$$

$$\hat{V} = A \left[-K (P^* H^T)^T - (P^* H^T) K^T + K \hat{C}_0 K^T \right] A^T.$$

Ўлчаш шовқини матрицаларининг баҳолари $C_0 = E(v_i v_i^T) = HP^* H^T + R$,
яъни $\hat{R} = \hat{C}_0 - H(P^* H^T)$ тенгламадан фойдаланиш асосида тузилади.

(6) тенгламалар тизимини қуйидаги кўринишда қайтадан ёзамиз:

$$f(q) = 0,$$

бу ерда $q = \{q_1, q_2, \dots, q_q\}$ – ковариация матрицаси Q нинг элементларидан тузилган вектор.

Вектор q ни ҳисоблаш учун Ньютон усулидан фойдаланамиз:

$$q_{r+1} = q_r - [F(q_r)]^{-1} f(q_r), \quad r = 0, 1, \dots,$$

бу ерда $F(q_r) = q = q_r$ бўлганда олинган Якоби матрицаси.

q векторни ҳисоблаш жараёнида $F(q_r)$ матрица нафақат ёмон шартланган, балки q^* нукта атрофида бузилган ҳолатлар ҳам бўлиши мумкин. $F(q_r) \xi_r = -f_r$, $q_{r+1} = q_r + \xi_r$ тизимни ечиш учун М.М.Лаврентьевнинг қуйидаги ҳисоблаш схемасидан фойдаланиш мақсадга мувофиқ:

$$\alpha \xi_{r,n} + F(q_r) \xi_{r,n} = \alpha \xi_{r,n-1} - f_r, \quad n = 1, 2, \dots \quad (7)$$

(7) даги мунтазамлаштириш мунтазамлаштириш параметри α нинг қайд этилган қийматларида кўп сонли итерациялар ҳисобига амалга оширилади. Параметрлар вектори q_r ни қидиришни қуйидаги тенглама асосида ҳам амалга ошириш мумкин:

$$\Gamma(h_r, q_r) \xi_r = f(q_r), \quad q_{r+1} = q_r - \xi_r, \quad r = 0, 1, 2, \dots,$$

бу ерда $\Gamma(h_r, q_r)$ – айирма матрицаси, h_r – баъзи берилган мувофиқ кетма-кетликлардаги ҳақиқий сон.

Ўлчашлардаги модель ноаниқлиги аддитив Марков кетма-кетлиги ҳисобланган ҳолларда адаптив филтрни синтезлаш учун ўлчашларнинг янги вектори $\mu_i = z_{i+1} - \Psi_i z_i$ ни аниқлаш мақсадга мувофиқ бўлиб, натижада тизимнинг қуйидаги моделини ҳосил қиламиз:

$$x_{i+1} = A_i x_i + w_i, \quad \mu_i = H_i^* x_i + \varepsilon_i,$$

бу ерда $H_i^* = H_i A_i - \Psi_i H_i$, $\{\varepsilon_i\}$ – нолли ўртача оқ кетма-кетлик бўлиб, қуйидаги нисбат билан қаноатлантирилади:

$$E \left\{ \begin{bmatrix} w_i \\ \varepsilon_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_\tau^T \\ \varepsilon_\tau^T \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} Q_i & \hat{S}_i \\ \hat{S}_i^T & \hat{R}_i \end{bmatrix} \delta_{i-\tau}, \quad \hat{S}_i = Q_i H_i^T, \quad \hat{R}_i = H_i Q_i H_i^T + R_i,$$

$\Psi_i - v_{i+1} = \Psi_i v_i + \zeta_i$ ифода билан аниқланадиган ўтиш матрицаси.

Унда ўзгарувчан ҳолат векторининг баҳоси қуйидаги ифода асосида аниқланиши мумкин:

$$\tilde{x}_{i+1} = T_{i+1}^{(1)} \hat{x}_i + T_{i+1}^{(2)} \mu_{i+1},$$

бу ерда матрицалар $T_{i+1}^{(1)}$ ва $T_{i+1}^{(2)}$ Калман филтрининг ҳисоблаш амалларидан фойдаланиб, матрицалар сингуляр ажратиш асосида аниқланади.

Объект шовқинининг ковариацион матрицаси ва ўлчашларнинг халақитларини биргаликда баҳолаш учун қуйидаги тенгламалар тизимидан фойдаланамиз:

$$E(v_i v_i^T) - H P_{i|i-1} H^T - R = 0,$$

$$E(v_i v_{i-1}^T) = H A (I - K_{i-1} H) [P_{i-1|i-2} H^T - K_{i-1} R] = 0,$$

$$\dots\dots$$

$$E(v_i v_{i-m}^T) = H A (I - K_{i-1} H) A \dots A (I - K_{i-m} H) [P_{i-m|i-m-1} H^T - K_{i-m} R] = 0. \quad (8)$$

(8) тенгламалар тизимини қуйидаги кўринишда ёзамиз:

$$S(c) = 0, \quad (9)$$

бу ерда $S(c) - E^\beta$ да E^β га бўлган ночизикли оператор, $\beta = q + p$, $c = \{c_1, c_2, \dots, c_q; c_{q+1}, c_{q+2}, \dots, c_p\} - Q$ ва R ковариацион матрицаларнинг диагонал элементларидан тузилган вектор, яъни

$$c_1 = q_{11}, c_2 = q_{22}, \dots, c_q = q_{qq}; c_{q+1} = r_{11}, c_{q+2} = r_{22}, \dots, c_p = r_{pp}.$$

Юқорида келтирилган шартларда қуйидаги кўринишли ночизикли тенгламалар тизимини ечиш талаб этилади:

$$S_i(c_1, c_2, \dots, c_p) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, p. \quad (10)$$

(10) тенгламани ечиш учун β -ўлчамли фазодаги кесишувчилар усулидан фойдаланамиз. Кесишувчи тенгламалар усулига мувофиқ β -ўлчамли фазода $\beta+1$ нуқталарни ва β гиперюзани қуйидагича ёзиш мумкин:

$$c^{i\gamma} = (c_1^{i\gamma}, c_2^{i\gamma}, \dots, c_\beta^{i\gamma})^T, \quad \gamma = 1, 2, \dots, \beta, \quad L^k(c) = \sum_{j=1}^{\beta} a_j^k c_j + a_{\beta+1}^k = 0, \quad k = 1, 2, \dots, \beta.$$

Бунда гиперюза қуйидаги шартни қаноатлантириши керак:

$$L^k(c^{i\gamma}) = S_k(c^\gamma), \quad \gamma = 0, 1, 2, \dots, \beta, \quad k = 1, 2, \dots, \beta,$$

$$\text{ёки } L^k(c^{i\gamma}) - L^k(c^{i0}) = \sum_{j=1}^{\beta} a_j^k (c_j^{i\gamma} - c_j^{i0}) = S_k(c^{i\gamma}) - S_k(c^{i0}), \quad \gamma = 1, 2, \dots, \beta, \quad k = 1, 2, \dots, \beta.$$

Унда ҳисоблаш вектори c нинг итерацион алгоритми мунтазамлаштирилган вариантыни (9) асосида қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$c^{i+1} = c^i - (S(c^i, \varphi(c^i)) + \alpha_i B_i)^{-1} S(c^i), \quad (11)$$

бу ерда $\varphi_\gamma(c^i) = c_\gamma^i - S_\gamma(c^i)$, $\alpha_i = \mathcal{B}(i+1)^{-1}$, $\mathcal{B} \gg 0$.

Шуни айтиш мумкинки, итерацион жараён (11) ихтиёрий бошланғич яқинлашув $c^0 \in N_c$, яъни $\lim_{i \rightarrow \infty} \|c^i - c^*\| = 0$ дан келиб чиқади, бу ерда $N_c = \{\|c - c^*\| \leq \rho\}$, $\rho > 0$ – етарли даражада кичик сон; $c^* = (c_1^*, c_2^*, \dots, c_\beta^*) - S(c) = 0$, $c = (c_1, c_2, \dots, c_\beta)$, $S = (S_1, S_2, \dots, S_\beta)$ тизимнинг ягона ечими.

Итерацион алгоритм (11) хусусий ҳосилаларни ҳисоблаш ёки силликлантиришни талаб этмайди ва у биринчи ва иккинчи тартибли итерацион алгоритмлардан фарқланиб туради.

Шундай қилиб, келтирилган мунтазам алгоритмлар Калман фильтри кучайтириш коэффициентини ҳисоблаш учун ўлчашлар халақитлари ва объект шовқини ковариацион матрицалари элементларининг баҳоларини олиш ва шу билан биргаликда фильтрни ўзгарувчан ташқи халақит-сигналли шароитга нибатан мослаштириш имконини беради.

Диссертациянинг **учинчи бобда** динамик филтърнинг матрицали кучайтириш коэффициентини адаптив баҳолаш алгоритмларини ишлаб чиқиш натижалари келтирилган. Қуйидаги тенглама билан ифодаланадиган чизиқли динамик тизимни кўриб чиқамиз:

$$x_{i+1} = Ax_i + \Gamma w_i, \quad z_i = Hx_i + v_i. \quad (12)$$

Фараз қиламиз, шовқиннинг Q_i ва R_i ковариациялари номаълум. Филтърни мослаштиришда оптимал филтър учун ўринли бўлган $S = PH^T - KR_0$ муносабатни ишлатамиз. Қуйидаги кўринишда аниқланадиган, функционални минималлаштириш масаласини кўриб чиқамиз:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m s_{ij}^2, \quad (13)$$

бу ерда s_{ij} – S матрицанинг (i,j) -элементи.

S матрицани нолга олиб келувчи кучайтириш коэффициенти K ни аниқлаш учун градиентни проекциялаш усулидан фойдаланамиз:

$$k_{i+1}^r = P_{\mathcal{K}}(k_i^r - \beta_i J'(k_i^r)), \quad i = 0, 1, \dots, \quad r = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (14)$$

бу ерда $P_{\mathcal{K}}(k)$ – \mathcal{K} тўпламдаги k нуқтанинг проекцияси, $\beta_i > 0$; \mathcal{K} – каварик берк тўплам.

Кўриб чиқиладиган минималлаштириш масаласини ечиш учун А.Н.Тихоновнинг мунтазамлаштириш усулидан фойдаланамиз.

Унда $v_{i+1} = P_{\mathcal{K}_0}(v_i - \beta_i(J'_i(v_i) + \alpha_i v_i))$, $i = 1, 2, \dots$; $v_1 \in \mathcal{K}$ шарт билан аниқланадиган $\{v_i\}$ кетма-кетлик минимал меъёр билан $k_* \in \mathcal{K}_*$ нуқтага эришади, яъни $\lim_{i \rightarrow \infty} \|k_i - k_*\| = 0$, бунда $\lim_{i \rightarrow \infty} \|v_i - k_i\| = 0$, $\beta_i > 0$, $\lim_{i \rightarrow \infty} \beta_i = 0$, $\alpha_i = i^{-1/3}$, $\beta_i = i^{-1/2}$, $i = 1, 2, \dots$, $\mathcal{K} \neq \emptyset$, $J_* = \inf_{k \in \mathcal{K}} J(k) > -\infty$, $\mathcal{K}_* = \{k : k \in \mathcal{K}, J(k) = J_*\} \neq \emptyset$, $\mathcal{K} = \{k : k \in \mathcal{K}_0\}$.

(13) функционални (14) га мос равишда минималлаштириш учун S матрица яққол намоён бўладиган хусусий ҳосилалардаги тенгламаларни ҳисоблаш зарур. S ни аниқлаш учун қуйидаги ифодани ишлатамиз:

$$D \cdot \hat{S} = \hat{R}, \quad (15)$$

бу ерда $D = \left[[HA]^T \mid [H[A(I - KH)]A]^T \mid \dots \mid [H[A(I - KH)]^{j_{\max} - 1} A]^T \right]^T$,

$$\hat{R} = \left[[\hat{R}_1]^T \mid [\hat{R}_2]^T \mid \dots \mid [\hat{R}_{j_{\max}}]^T \right]^T,$$

$$\hat{R}_0 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N y_i y_i^T, \quad \hat{R}_j = \frac{1}{N-j} \sum_{i=1}^{N-j} y_{i+j} y_i^T, \quad j = 1, 2, \dots, j_{\max}, \quad j_{\max} = \eta.$$

(15) тенглама ечимини мунтазамлаштириш учун ўнг томон топшириғининг хатолигини баҳолаймиз. Корреляция коэффициентларининг хатолиги меъерий тақсимланиш қонунига бўйсунди деб фараз қиламиз. Унда ишончли эҳтимоллик $p = 0.95$ учун (15) тенгламанинг ўнг қисми хатолигига қуйидаги ифодани ёзиш мумкин:

$$\Delta \hat{R} = \hat{R} - \hat{R} = \left[[\Delta \hat{R}_{1(i)}]^T \mid [\Delta \hat{R}_{2(i)}]^T \mid \dots \mid [\Delta \hat{R}_{\eta(i)}]^T \right]_{\eta \times 1}^T,$$

$$\Delta \hat{R}_{\eta(i)} = \left[\left[\pm \frac{2[1 - r_{\eta(1i)}^2]}{\sqrt{N - \eta - 1}} \right] \mid \left[\pm \frac{2[1 - r_{\eta(2i)}^2]}{\sqrt{N - \eta - 1}} \right] \mid \dots \mid \left[\pm \frac{2[1 - r_{\eta(mi)}^2]}{\sqrt{N - \eta - 1}} \right] \right]_{m \times 1}^T.$$

Унда (15) тенглама ўнг қисмининг мутлақ ва нисбий ғалаёнлари меъёрларини қуйидаги ифодалар асосида баҳолаш мумкин:

$$\delta = \|\Delta\hat{R}\| = \|\tilde{R} - \hat{R}\| = 2 \left[\sum_{j=1}^{\eta} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \frac{|1 - r_{j(ki)}^2|^2}{N - j - 1} \right]^{1/2},$$

$$\delta_{\text{нис}} = \frac{\|\Delta\hat{R}\|}{\|\hat{R}\|} = 2 \left[\sum_{j=1}^{\eta} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \frac{|1 - r_{j(ki)}^2|^2}{N - j - 1} \right]^{1/2} / \left[\sum_{j=1}^{\eta} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m |r_{j(ki)}^2|^2 \right]^{1/2}.$$

Олинган ифодалар бевосита ечимни топмасдан туриб, (15) тенглама ечимлари хатоликларини баҳолаш имконини беради.

Баҳолаш ва филтрлашнинг турли масалаларини ечишда объект шовқини ва ўлчашларнинг халақитлари вақт бўйича авто- ва ўзаро коррелирланган вазиятлар бўлиши мумкин. Объект шовқини ва ўлчашларнинг халақитлари автокоррелирланган бўлган ҳолларда тизимнинг моделини қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$x_{i+1} = A_{i+1|i} x_i + \Gamma_{i+1|i} \eta_i, \quad \eta_{i+1} = \tilde{A}_{i+1|i} \eta_i + \tilde{\mu}_i w_{i+1},$$

$$z_{i+1} = H_{i+1} x_{i+1} + \xi_{i+1}, \quad \xi_{i+1} = \tilde{H}_{i+1} \xi_i + \tilde{v}_i v_{i+1},$$

априор маълумотлар билан $w_i \sim N(0, Q_i)$, $v_i \sim N(0, R_i)$, $x_0 \sim N(\bar{x}_0, P_0)$, $\eta_0 \sim N(\bar{\eta}_0, P_0^{(\eta\eta)})$, $\text{cov}(x_0, \eta_0) = \text{cov}(x_0, w_i) = \text{cov}(\eta_0, w_i) = \text{cov}(\eta_0, v_i) = \text{cov}(v_i, w_i) = 0$.

Кўриб чиқиладиган ҳолатда баҳолаш масалаларини ечишдаги кучайтириш коэффициентлари K_{i+1} ва $K_{i+1}^{(\eta)}$ қуйидаги ифодалар асосида аниқланади:

$$K_{i+1} P_{i+1|i}^{(22)*} = P_{i+1}^{(1)}, \quad (16)$$

$$K_{i+1}^{(\eta)} P_{i+1|i}^{(22)*} = P_{i+1}^{(2)}, \quad (17)$$

бу ерда $P_{i+1|i}^{(22)*}$, $P_{i+1}^{(1)}$ ва $P_{i+1}^{(2)}$ ўзида баҳолаш хатолигининг ковариацион матрицаларини намоён этади.

K_{i+1} ва $K_{i+1}^{(\eta)}$ ни ҳисоблаш учун мунтазам амаллардан фойдаланиш мақсадга мувофиқ. Ечимнинг мунтазам алгоритмини (16) тенгламага нисбатан қўллаймиз. Олинган алгоритм (17) тенгламани ечишда ҳам қўлланилиши мумкин. (16) тенгламани қуйидаги кўринишда ёзамиз:

$$P_{i+1|i}^{(22)*T} k_{i+1,j} = p_{i+1,j}^{(1)},$$

бу ерда $k_{i+1,j} = K_{i+1}^T$ матрицанинг j -устуни, $j=1,2,\dots,n$; $d_{i,j}^{\delta} = P_{i+1}^{(1)T}$ матрицанинг j -қатори, $j=1,2,\dots,n$.

Бу ерда ечимнинг мунтазамлаштирилган баҳоси $k_{i+1,j}$ ни тенгламаларни биргаликда ечиш асосида аниқлаш мақсадга мувофиқ:

$$P_{i+1|i}^{(22)*T} k_{i+1,j}^{(\alpha)} + \alpha k_{i+1,j}^{(\alpha)} = P_{i+1|i}^{(22)*} \tilde{p}_{i+1,j}^{(1)}, \quad \left\| P_{i+1|i}^{(22)*T} k_{i+1,j}^{(\alpha)} - \tilde{p}_{i+1,j}^{(1)} \right\|^2 = Q_{\min} + \delta,$$

бунда $Q_{\min} = \inf_{k_{i+1,j} \in R^m} Q(k_{i+1,j})$, $Q(k_{i+1,j}) = \left\| P_{i+1|i}^{(22)*T} k_{i+1,j} - p_{i+1,j}^{(1)\delta} \right\|^2$, $\delta > 0$; мунтазамлаштириш параметри α боғланмаганлик шартидан аниқланади.

Объект шовқини ва ўлчаш халақитларининг ўзаро коррелирланган ҳолатини кўриб чиқишда тизимнинг моделини қуйидаги кўринишда ёзамиз:

$$x_{i+1} = A_{i+1|i} x_i + \Gamma_i w_{i+1},$$

$$z_{i+1} = H_{i+1}x_{i+1} + G_iv_{i+1},$$

априор маълумотлар билан $w_{i+1} \sim N(0, Q_{i+1})$, $v_{i+1} \sim N(0, R_{i+1})$, $x_0 \sim N(\bar{x}_0, P_0)$,
 $\text{cov}\left(\begin{bmatrix} w_i \\ v_i \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} w_j \\ v_j \end{bmatrix}\right) = \begin{bmatrix} Q_i & C_i \\ C_i^T & R_i \end{bmatrix} \delta_{ij}$, $Q_i \geq 0$, $C_i \geq 0$, $R_i > 0$, $\text{cov}(x_0, w_i) = 0$; $\text{cov}(x_0, v_i) = 0$.

Кучайтиришнинг қидирилаётган матрицаси K_i^p ни аниқлаш учун қуйидаги кўринишли тенгламани ёзамиз:

$$L_i k_{i,j} = d_{i,j}^\delta = d_{i,j} + \delta d_{i,j}, \quad (18)$$

бу ерда $L_i = (R_i^T G_i^T) - H$ га H Гильберт фазосидан келиб чиқувчи чизикли оператор; $k_{i,j} - K_i^{pT}$ матрицанинг i -қатори, $j = 1, 2, \dots, n$; $d_{i,j}^\delta - \delta^2 = \|\delta d_{i,j}\|_E^2$, $\delta_{\min}^2 < \|\delta d_{i,j}\|_E^2 < \delta_{\max}^2$ кўринишдаги силликлантиришли $D_i = C_i^T \Gamma_i^T$ матрицанинг i -устуни, $j = 1, 2, \dots, n$; $d_{i,j}$ - (18) тенглама ўнг қисмининг аниқ қиймати.

(18) тенглама ечимини мунтазамлаштириш учун қуйидаги мунтазам амаллар самарали эканлиги кўрсатиб ўтилган:

$$\begin{aligned} k_{i,j,\alpha} &= (L_i + \alpha I)^{-1} d_{i,j}^\delta, \\ \bar{k}_{i,j,\alpha} &= (L_i + \alpha I)^{-1} L_i k_{i,j,\alpha}, \\ \alpha^2 k_{i,j,\alpha} + L_i^2 k_{i,j,\alpha} &= L_i d_{i,j}^\delta. \end{aligned}$$

Юқорида келтирилган алгоритмларни амалга оширишда мунтазамлаштириш параметри α ни боғланмаганлик усули асосида аниқлаш мақсадга мувофиқ.

Нокоррект қўйилган масалаларни ечиш усуллари асосида (18) тизимнинг энг яхши шартланганлигини таъминлаш учун тизимни қуйидаги кўринишда кўриб чиқиш мақсадга мувофиқлигини кўрсатиб ўтиш мумкин:

$$L_{i,\alpha} k_{i,j,\alpha} = \lambda d_{i,j}^\delta,$$

бу ерда $L_{i,\alpha} = [(\mathcal{D}_L + \alpha \mathcal{D}_L^{-1}) + (1 - \beta)(L_i - \mathcal{D}_L)]$, $\mathcal{D}_L - L_i$ нинг диагонал матрицалари,
 $\lambda = \lambda_\alpha = (d_{i,j}^\delta, L_i \tilde{k}_{i,j,\alpha}) \left(\|L_i \tilde{k}_{i,j,\alpha}\|_E^{-2} \right)$, $\beta = 1 - \left[\left(\|\mathcal{D}_L + \alpha \mathcal{D}_L^{-1}\|_E^2 - \|\mathcal{D}_L\|_E^2 \right) \left(\|L_i - \mathcal{D}_L\|_E^{-2} \right) \right]^{1/2}$, $\tilde{k}_{i,j,\alpha} - L_{i,\alpha} \tilde{k}_{i,j,\alpha} = d_{i,j}^\delta$ тизимнинг ечими.

Бу ерда λ ва β катталиклар α параметрнинг танланган қиймати асосида топилади.

Бобда шунингдек, объект шовқинининг корреляцияланганлиги шароитида адаптив баҳолашнинг мунтазамлаштирилган алгоритмларини қуриш ҳамда даражаси пасайтирилган субоптималь филтър асосида адаптив баҳолаш масалалари кўриб чиқилган. Уларни амалга оширишда содалаштирилган мунтазамлаштириш ва мунтазамлаштириш усулини ҳисоблаш схемалари самарали эканлиги кўрсатилган.

Келтирилган алгоритмлар Калман туридаги динамик филтърнинг матрицаси кучайтириш коэффициентини адаптив баҳолаш масаласини мунтазамлаштириш имконини беради.

Тўртинчи боб объект тавсифида ноаниклик бўлганда адаптив баҳоланишнинг мунтазам алгоритмларини ишлаб чиқишга бағишланган. Фараз қиламиз, динамик тизимнинг модели тенглама (12) кўринишида тавсифланади. Кўриб чиқиладиган тизим турғун, бузилмаган ва тўла кузатилувчан бўлсин: $\text{rank}[H^T \mid (HA)^T \mid \dots \mid (HA^{n-1})^T]^T = n$. A , Γ матрицалар ва шовқиннинг Q ва R ковариация матрицаларини доимий ва номаълум деб тахмин қиламиз. Матрица H маълум ҳисобланади. Матрица A ни баҳоланиш учун қуйидаги кўринишли муносабатдан фойдаланиш мақсадга мувофиқ:

$$\hat{Z}_{i+n,n} = \left[[\hat{Z}_{i+n,n}^1]^T \mid [\hat{Z}_{i+n,n}^2]^T \mid \dots \mid [\hat{Z}_{i+n,n}^n]^T \right]^T = \left[[H\hat{A}]^T \mid [H\hat{A}^2]^T \mid \dots \mid [H\hat{A}^n]^T \right]^T,$$

бу ерда

$$\hat{Z}_{i+n,n} = E[Z_{i,n} \hat{x}_{i-n}^T] \cdot \Xi_{i-n}^{-1}, \quad Z_{i,n} = [z_{i-n+1}^T \mid z_{i-n+2}^T \mid \dots \mid z_i^T]^T, \quad \Xi_{i-n} = E[\hat{x}_i \hat{x}_i^T]. \quad (19)$$

Матрицалар кетма-кетлиги $\{\hat{A}\}_{i=1}^n \rightarrow A$ деб фараз қилиб, $[H]^T \mid [H\hat{A}]^T \mid \dots \mid [H\hat{A}^{n-1}]^T]^T \cdot \hat{A} = [C_1]^T \mid [C_2]^T \mid \dots \mid [C_n]^T]^T = C$ кўринишли масалани кўриб чиқамиз, бу ерда блокли матрица C ифода (19) асосида маълумотларга ишлов бериш натижалари ҳисобланади. Унда алгоритм \hat{A}_n баҳони берувчи қуйидаги тенгламани кетма-кет ечишдан ташкил топади:

$$L_{i,n}(A_i) \cdot A_{i+1} = C, \quad i = 0, \dots, n-1, \quad (20)$$

бу ерда $L_{i,n}(A_i) = [H]^T \mid [HA_i]^T \mid \dots \mid [HA_i^{n-1}]^T]^T$. (20) тенгламани маълум оператор $\mathcal{L}: D(\mathcal{L}) \rightarrow G$, $D(\mathcal{L}) \subset G$ билан ёйилган шаклда ёзамиз:

$$\mathcal{L}(a_j) = c_j, \quad a_j \in D(\mathcal{L}), \quad (21)$$

бу ерда G – ҳақиқий Гильберт фазоси. (21) ифодада $\mathcal{L}(a_j) = L_{i,n}(\hat{A}) \cdot \hat{a}_j$, $j = 1, \dots, n$, \hat{a}_j ва c_j – мос равишда матрица A ва блокли матрица C нинг j -устунлари. Вектор \hat{a}_j ни аниқлашни қуйидаги кўринишли функционални минималлаштириш асосида амалга оширамиз:

$$J(a_j) = \sum_{j=1}^n (\mathcal{L}(a_j) - c_j)^2, \quad \eta = m \cdot n \quad (22)$$

яъни вектор \hat{a}_j нинг қидириладиган баҳоси $\hat{a}_j = \arg \inf_{a \in R^n} J(a_j)$. (22) ифодадаги функционал $J(a_j)$ Гильберт фазоси G даги берк қавариқ тўплам $Q \subset G$ да аниқланган, қавариқ дифференциалланувчи функционал ҳисобланади. Шундай қилиб, шундай a_j ларни аниқлаш зарурки, улар учун $(F(a_j), a_j - d_j) \leq 0$, $\forall d_j \in Q$ ўринли бўлсин, бу ерда $F(a_j) = J'(a_j)$ – монотон оператор. Унда мунтазамлаштирилган итератив кетма-кетлик $\hat{a}_{r,j}$ ни қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$\hat{a}_{r+1,j} = P_Q(\hat{a}_{r,j} - \alpha_{r,j}(F_\delta(\hat{a}_{r,j}) + \varepsilon_{r,j} M(\hat{a}_{r,j}))), \quad r = 0, 1, \dots,$$

бу ерда P_Q – метрик проектор; $M(\hat{a}_{r,j}) - Q \subset G$ да кучли монотонлик хусусиятига эга бўлган оператор; $\alpha_{r,j} > 0$, $\varepsilon_{r,j} > 0$ – мунтазамлаштириш параметрлари.

Кўриб чиқиладиган ҳолда $M(a_{r,j}) = a_{r,j}$, $\alpha_{r,j} = (1+r)^{-1/2}$, $\varepsilon_{r,j} = (1+r)^{-p}$, $0 < p < 1/2$ деб қабул қилиш мумкин. Кўриб чиқиладиган итерацион жараёни тўхтатишни $\lim_{\delta \rightarrow 0} \delta / \varepsilon_{r,j(\delta)} = 0$, $\lim_{\delta \rightarrow 0} \delta^{1/2} / \varepsilon_{r,j(\delta)}^2 = 0$ кўринишдаги ифодалар асосида амалга ошириш мумкин. Шундай қилиб, параметр i га I дан n гача қиймат бериб, юқорида келтирилган ифодаларга асосан A_1, A_2, \dots, A_n матрицаларни кетма-кет баҳолаш мумкин. Бошқариш объектларининг реал шароитларда ишлашида турли сабабларга кўра (12) моделларнинг A, G, Q, R параметрлари аниқ номаълум бўлиши мумкин бўлиб, уларни z_i ўлчаш маълумотлари бўйича аниқлаш зарур бўлади. Бу масалани ечиш учун одатда Калман фильтри тенгламалари турига кўра тизим (12) да бажариладиган улардаги бузилмаганлик, турғунлик ва тўлиқ кузатилувчанликни сақлаган ҳолда қуйидаги созулган модель ишлатилади:

$$\hat{g}_{i+1|i} = \Phi \hat{g}_{i|i-1} + L(z_i - C \hat{g}_{i|i-1}), \quad i \geq 1, \quad L = \Phi D.$$

Боғланмаганлик катталиги учун қуйидаги ифодани ёзиш мумкин:

$$\varepsilon_{j+1|j} = \Delta^+ (Z_{j+1} - \hat{U} \hat{g}_{j+1|j}), \quad j \geq 0,$$

бу ерда $\Delta = [\Theta^T \mid (\Theta\Psi)^T \mid \dots \mid (\Theta\Psi^{n-1})^T]^T$, $\text{rank } \Delta = n$, $Z_{j+1} = [z_{j+1}^T \mid z_{j+2}^T \mid \dots \mid z_{j+n}^T]^T$.

Идентификациялаш сифатининг мезони учун $J = J(\Phi, L, C) = \|\varepsilon_{j+1|j}\|^2$ кўринишли функционални қабул қиламиз. $(A_1, G_1, H_1) = \arg \min_{\Phi, L, C} J(\Phi, L, C)$

белгилашни киритамиз, бу ерда $A_1 = SAS^{-1}$, $G_1 = SG$, $H_1 = HS^{-1}$. Унда маълум H ва номаълум A, G, Q, R лар учун қуйидаги ифодани ёзамиз:

$$(A_1, G_1) = \arg \min_{\Phi, L} J(\Phi, L, H), \quad \hat{g}_{i+1|i}(A_1, G_1, H) = g_{i+1|i} = Sx_{i+1|i}, \quad H = HS.$$

Шундай қилиб, $(A_1, G_1) = \arg \min_{\Phi, L} J(\Phi, L, H) = \arg \min_{\Phi, L} J \|\varepsilon_{j+1|j}\|^2$ минималлаштиришнинг аргументли масаласига эга бўламиз, бунда қидириладиган вектор $\theta \in \Xi$ матрицалар Φ, L нинг элементларидан ташкил топади. Мунтазамлаштирилган минималлаштирувчи кетма-кетлик функционали $J(\theta)$ ни шакллантиришга ўтамиз. Фараз қиламиз, $\arg \min_{\theta \in \Xi} J(\theta) = J(\theta_0) = J_0$. Барча $\theta \in \tilde{\Xi}$ да аниқланган функционал $M^\alpha[\theta, J_\delta(\theta)] = J_\delta(\theta) + \alpha \Omega[\theta]$, $\alpha > 0$ ни кўриб чиқамиз, бу ерда $\Omega[\theta]$ – барқарорлаштирувчи функционал, $J_\delta(\theta)$ – барча $\delta \geq 0$ учун аниқланган функционалларнинг параметрик оиласи, $J(\theta)$ функционал $\tilde{\Xi} \subset \Xi$ тўпламда силлиқлантирувчи бўлганлиги учун $|J_\delta(\theta) - J(\theta)| \leq \delta \Omega[\theta]$.

Функционалларни минималлаштиришнинг турғун усуллари кузата туриб, аниқ қуйи чегара $M_{\alpha, \delta} = \arg \min_{\theta \in \tilde{\Xi}} M^\alpha[\theta, J_\delta(\theta)]$ мавжудлигини кўрсатиш мумкин. Унда элемент θ_0 га келувчи $M^{\alpha_n}[\theta, J_{\delta_n}(\theta)]$ функционалларни мос равишда деярли минималлаштируви $\theta_{\alpha_n}, \delta_n$ элементларнинг $\{\theta_{\alpha_n}, \delta_n\}$ кетма-кетлиги ўринли бўлади. Худди шундай $n \rightarrow \infty$ бўлганда α_n ва δ_n нолга интилади ва $\{\theta_{\alpha_n}, \delta_n\}$ кетма-кетлик $J(\theta)$ функционал учун

мунтазамлаштирилган минималлаштирувчи кетма-кетлик ҳисобланади. Энди мунтазам адаптив баҳолаш концепцияси асосида башоратловчи моделлардан фойдаланиб, бошқариш тизимларини синтезлаш масаласини кўриб чиқамиз. Қуйидаги тенгламалар тизими билан тавсифланадиган, кўп ўлчамли бошқариш объекти берилган бўлсин:

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t + w_t, x_0 = \bar{x}_0, \quad (23)$$

$$z_t = Hx_t + v_t, \eta_t = Gx_t. \quad (24)$$

(24) ифодада η_t – объект чиқишининг вектори. Тизимнинг чиқиш вектори η_t берилган вектор $\bar{\eta}_t$ га яқин бўладиган бошқариш стратегиясини аниқлаш лозим. Калманнинг экстраполяторидан фойдаланиб, оптимал бошқариш алгоритминини синтезлаймиз. Унда қуйидаги тенгламаларни ёзиш мумкин:

$$\hat{x}_{t+j|t} = A^{j-1}\hat{x}_{t+1|t} + \sum_{k=1}^{j-1} A^{j-k-1}Bu_{t+k|t}, \quad j = 2,3,\dots,N, \quad \hat{\eta}_{t+j|t} = GA^{j-1}\hat{x}_{t+1|t} + G\sum_{k=1}^{j-1} A^{j-k-1}Bu_{t+k|t}, \quad j = 2,3,\dots,N,$$

бу ерда $u_{t+i|t}$ – башоратлаш учун ишлатилган бошқариш, u_{t+i} – $t+i$ моментдаги бошқариш, N – башоратлаш горизонти.

Кўйилган масалани ечиш учун мақсад функцияси сифатида $J_t = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \{ \|\hat{\eta}_{t+k|t} - \bar{\eta}_t\|_C^2 + \|u_{t+k|t} - u_{t+k-1|t}\|_D^2 \}$ мезондан фойдаланамиз, бунда матрицалар $C > 0$ ва $D > 0$ – вазн матрицалари.

Унда башоратловчи моделлардан фойдаланиб, оптимал бошқариш усуллари асосида қуйидаги ифодага келиш мумкин:

$$U_t^* = -(\Phi^T \bar{C} \Phi + \bar{D})^{-1} (\Phi^T \bar{C} \Lambda \hat{x}_{t+1|t} - \Phi^T \bar{C} \bar{\Theta}_t) - [Du_t]^T \mid 0 \mid \dots \mid 0]^T, \quad (25)$$

бу ерда Φ , \bar{C} , \bar{D} , Λ ва $\bar{\Theta}_t$ матрицалар маълум муносабатлар асосида шакллантирилади.

Унда оптимал башоратловчи бошқариш қуйидаги кўринишга эга бўлади: $u_{t+1|t}^* = (I \mid 0 \mid \dots \mid 0)U_t^*$.

(25) тенгламани таҳлил қилган ҳолда, башоратловчи тенгламалар ва оптимал башоратловчи бошқаришни шакллантириш аниқлиги ҳолат ўзгарувчиси векторининг баҳоси $\hat{x}_{t+1|t}$ ни ҳисоблаш аниқлигига боғлиқ эканлигини кўрсатиш мумкин. Демак, турли даражадаги модели ноаниқлик шароитларида динамик тизимларни мослаштириш ва назорат қилишнинг таклиф этилган концепцияларидан фойдаланиш, ҳолат ўзгарувчиси векторини ҳисоблаш аниқлиги ва шу билан биргаликда динамик объектларни бошқариш жараёнлари сифатини оширишга имкон беради. Бобда шунингдек, бошқариш объектлари ҳолатларини, бошқариш объекти динамикаси тенгламалари матрицалари ва ғалаёнларнинг ковариацион матрицаларининг параметрларини адаптив баҳолаш масалаларидаги параметрик ғалаёнларни мунтазам баҳолаш алгоритмларини қуриш масалалари ҳам кўриб чиқилган. Уларни амалга оширишда турғун псевдомурожаат ва мунтазамлаштириш усулини ҳисоблаш схемалари самарали эканлиги кўрсатилган. Келтирилган алгоритмлар объект тавсифида ноаниқлик бўлганда ҳолатларни адаптив баҳолаш масаласини мунтазамлаштириш ва баҳолаш аниқлигини ошириш имконини беради.

Бешинчи бобда мунтазам адаптив баҳолашнинг ишлаб чиқилган усул ва алгоритмларини қатор саноат ишлаб чиқаришларининг технологик объектларини автоматлаштириш ва бошқариш масалаларида қўлланилиш натижалари келтирилган.

PS-Агро ишлаб чиқаришдаги кальций-сульфат-фосфатли пульпани гранулалари қуритиш жараёнини бошқаришнинг адаптив тизими. Қуритиш-гранулалаш жараёнини тавсифловчи асосий кўрсаткичлар сифатида қуйидаги ўзгарувчилар кўриб чиқилган: бошқарувчи параметрлар $U = (u_1, u_2, u_3)$, бу ерда u_1 – барабанли-грануляторли-қуритгич (БГҚ) киришидаги иссиқлик ташувчи ҳарорати; u_2 – суюқланма сарфи; u_3 – ретур сарфи; чиқиш параметрлари $Y = (y_1, y_2, y_3)$, бу ерда y_1 – ишлатилган иссиқлик ташувчи ҳарорати; y_2 – гранула намлиги; y_3 – маҳсулотнинг гранулометриқ таркиби; ғалаён таъсирлари $W = (w_1, w_2, w_3)$, бу ерда w_1 – кальций-сульфат-фосфатли пульпанинг намлик таркиби; w_2 – суюқланманинг гранулометриқ таркиби; w_3 – ретурнинг гранулометриқ таркиби. Жараённинг келтирилган ифодаланиши математик моделнинг структурасини қуйидаги кўринишда танлаш имконини беради:

$$x_{i+1} = A_i x_i + F_i x_{i-h} + B_i u_i + w_i, \quad y_i = H_i x_i + v_i. \quad (26)$$

Математик моделни олиш ва ундан амалий фойдаланиш учун Олмалик «АММОФОС-МАХАМ» акционерлик жамиятида PS-Агро ишлаб чиқаришдаги кальций-сульфат-фосфатли пульпани гранулалари қуритиш технологик жараёнини меъёрий фаолият кўрсатиш шароитида саноат тажрибаси ўтказилган. (26) тенгламадаги A_i, F_i ва B_i матрицаларнинг изланган қийматлари қабул қилинган вақт оралиғи учун қуйидагига тенг бўлади:

$$A = \begin{bmatrix} 0,748 & 0,187 & -0,479 \\ -0,964 & 0,671 & -0,896 \\ 0,255 & -0,964 & 0,723 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} -0,872 & 0,862 & -0,633 \\ 0,963 & -0,926 & 0,214 \\ -0,671 & 0,341 & 0,672 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0,844 & -0,971 & -0,523 \\ -0,997 & 0,127 & 0,352 \\ 0,246 & 0,882 & 0,612 \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Ишлаб чиқилган моделларнинг монандлигини қолдиқлар мезони асосида текшириш, (27) ифодадаги параметрларнинг қийматлари асосидаги (26) модель кўриб чиқиладиган жараённи монанд тавсифлашини кўрсатди.

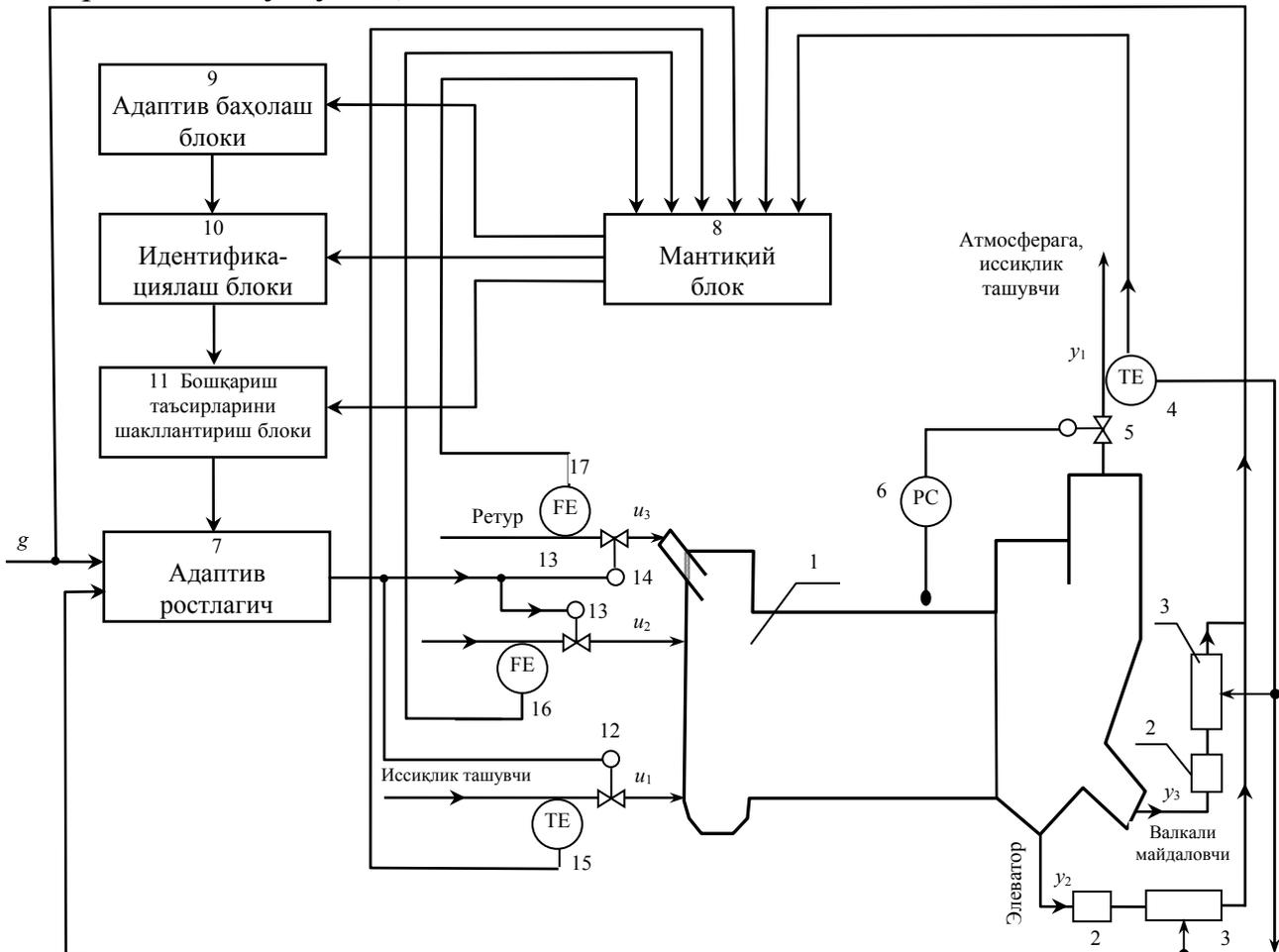
Барабанли-грануляторли-қуритгичнинг амалиётдаги фаолиятида аниқ мақсадли маҳсулотлар таркиби уларнинг олдиндан берилган қийматларидан муҳим даражада оғиши шуни кўрсатадики, дастлабки хомашёнинг таркиби ва сарфининг ўзгариши билан боғлиқ бўлган катта ва тез такрорланадиган ғалаёнларга эга бўлади. Шунинг учун кўриб чиқиладиган технологик жараённи бошқаришда объектнинг ишлаш режимида адаптив стабиллаш масаласи муҳим аҳамият касб этади. Бу масала ташқи ғалаёнли таъсирларнинг тавсифлари ва бошқариш объекти параметрлари қийматларини билмаган ҳолдаги ноаниқлик шароитида технологик жараённи бошқаришнинг асосий масаласи ҳисобланади. Кўриб чиқиладиган гранулалари қуритиш технологик жараёнини бошқариш вақт бўйича бир неча минутга кечикиши, ўрнатиш вақтининг узоклиги, нам суюқланманинг таркибидаги намликнинг катта диапазонда тебраниши ва суюқланманинг ўзининг хоссаларини ўлчаб бўлмайдиган ўзгаришлари каби номинал-фазавий хоссалари сабабли ниҳоятда мураккаб ҳисобланади. Объект (26) га ростлагич

$u_i = \mathcal{K}_i^T z_i$ ни улаймиз, бу ерда \mathcal{K} – ростлагич параметрларининг $n \times 2l$ -ўлчамли матрицаси. Фараз қиламиз, A, F, B, H матрицалар $\xi \in M$ номаълум параметрлар векторига боғлиқ, бунда M – синтезланаётган тизим мослашувчанлик синфини белгиловчи тўпلام.

Кўриляётган масалани ечиш учун қуйидаги кўринишли Ляпунов-Красовский функционалини оламиз:

$$V(x_s, k_s) = x_s^T L_0 x_s + \sum_{i=1}^m (k_i - k_{0i})^T L_i (k_i - k_{0i}) - \gamma \left[\frac{1}{2} (x_{i-h}^T x_{i-h} + x_i^T x_i) + \sum_{l=1-h}^{-1} x_{i+l}^T x_{i+l} \right],$$

бу ерда L_0, L_i – ҳақиқий симметрик мусбат аниқланган матрицалар; $k_{0i} - \mathcal{K}_0$ матрицанинг i -устуни, $\gamma > 0$.



1 - расм. Грануляцияли қуритиш жараёнини бошқаришнинг адаптив тизими функционал схемаси

Синтезланаётган тизим берилган M синфда адаптив бўлиши ва ростлагич параметрларини созлаш алгоритми қуйидаги кўринишга эга эканлигини кўрсатиш мумкин:

$$k_{i+1} = k_i - d_i^T z_i P_i \psi_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (28)$$

бу ерда P_i – ихтиёрий мусбат аниқланган матрицалар; d_i - тизимлар турғунлигининг частотавий теоремалари билан аниқланадиган \mathcal{D} матрицанинг i -устуни; $\psi^T = z_i^T z_{i-h}^T$.

Калман филътрининг тенгламаси қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$\hat{x}_{i+1} = A_i \hat{x}_i + F_i \hat{x}_{i-h} + B_i u_i + K_i^1 [y_i - \mathcal{K}_i \hat{x}_i - \mathcal{K}_i B_i u_i] - \frac{h}{n} \left[\frac{1}{2} (K_{i-h}^2 [y_{i-h} - \mathcal{K}_{i-h} \hat{x}_{i-h}] + K_{i,0}^2 [y_i - \mathcal{K}_i \hat{x}_i]) + \sum_{l=1-h}^{-1} K_{i,l}^2 [y_{i+l} - \mathcal{K}_{i+l} \hat{x}_{i+l}] \right]. \quad (29)$$

Кучайтириш коэффициентлари K_i^1 ва K_i^2 куйидаги тенгламалар билан аниқланади:

$$K_i^1 = [P_i - P_{i,0}] \mathcal{K}_i^T R_i^{-1}, \quad K_{i,s}^2 = P_{i,s} \mathcal{K}_{i+s}^T R_{i+s}^{-1}. \quad (30)$$

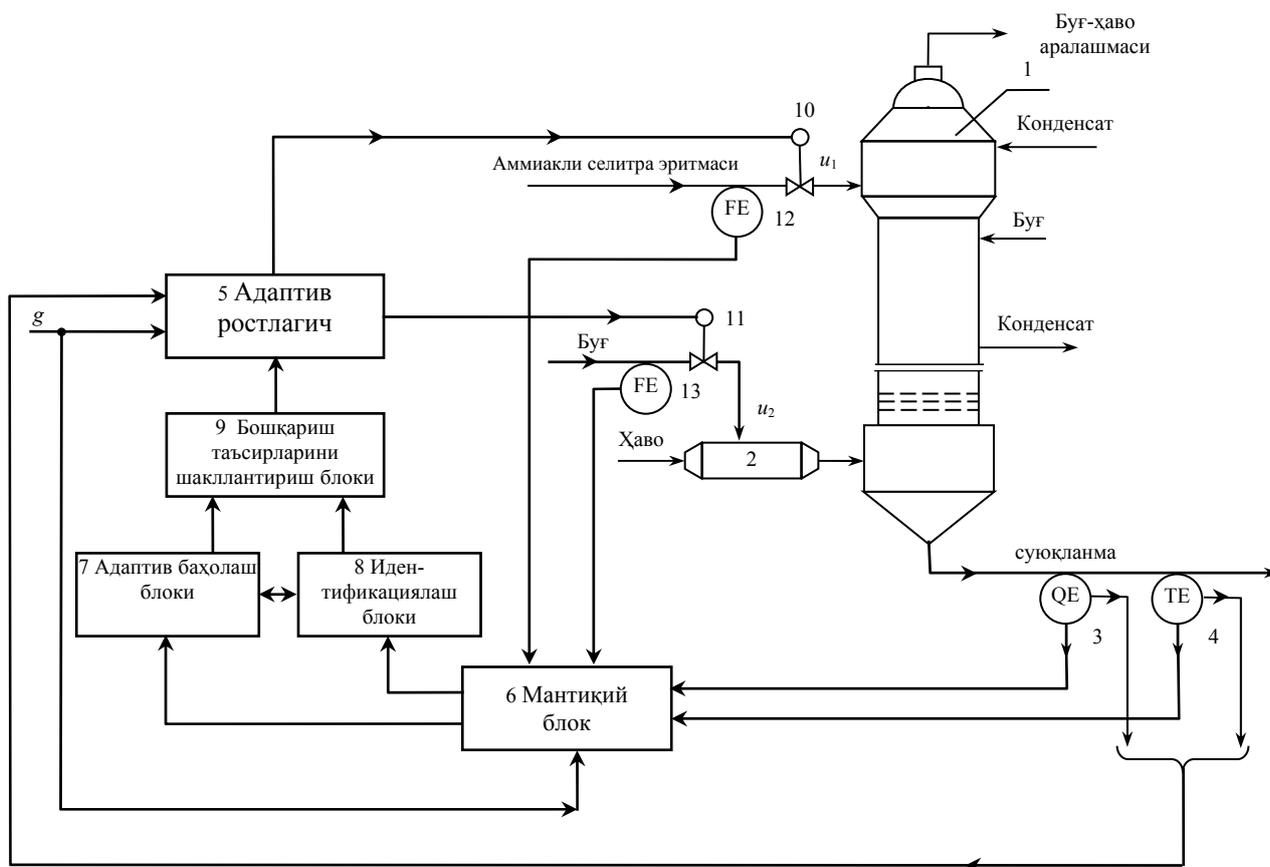
(28) – (30) ифодалар ва ҳолат векторини адаптив баҳолаш тизимларини синтезлашнинг ишлаб чиқилган юқоридаги алгоритмлари асосида кўрилатган жараённинг адаптив бошқариш тизимининг куйидаги вариантини таклиф этиш мумкин (1-расм). Бу ерда адаптив бошқариш тизими БГҚ 1, намлик датчиги 2, дискрет функционал ўзгартиргич 3, ҳарорат датчиги 4 ва ишлатилган иссиқлик ташувчининг сарфини ростлагич 5, БГҚ ичидаги босим датчиги 6, адаптив ростлагич 7, мантиқий блок 8, адаптив баҳолаш блоки 9, идентификациялаш блоки 10, бошқариш таъсирларини шакллантириш блоки 11, иссиқлик ташувчининг сарфини ростлагич 12, БГҚ нинг киришидаги пульпа 13 ва ретур 14 нинг сарфини ростлагич, иссиқлик ташувчининг ҳарорат датчиги 15, пульпа 16 ва ретур 17 нинг сарфи датчикларидан ташкил топган.

Адаптив бошқаришнинг таклиф этилган тизими жараённинг ҳарорат режимини барқарорлаштириш, маҳсулот сифат кўрсаткичларини ва агрегатнинг унумдорлигини 2,25 % га ошириш имконини беради.

Аммиакли селитра эритмасини буғлатиш жараёнини бошқаришнинг адаптив тизими. Аммиакли селитра эритмасини буғлатиш жараёнини тавсифловчи асосий кўрсаткичлар сифатида куйидаги ўзгарувчилар кўриб чиқилган: бошқарилувчи параметрлар $u=(u_1, u_2)$, бу ерда u_1 – буғлатишга берилаётган аммиакли селитра эритмаси сарфи; u_2 – буғ сарфи; чиқиш параметрлари $z = (z_1, z_2)$, бу ерда z_1 – буғланган эритма концентрацияси; z_2 – буғлатилган эритма ҳарорати; назорат қилинмайдиган ғалаёнли таъсирлар $w = (w_1, w_2)$, бу ерда w_1 – аппарат киришига берилаётган аммиакли селитра эритмаси концентрацияси; w_2 – чиқаётган эритма намлиги.

Буғлатиш жараёни самарадорлигининг асосий кўрсаткичлари буғлатилган эритманинг концентрацияси ҳисобланади, бошқаришнинг мақсади эса ушбу концентрациянинг маълум қийматда тутиб туришдан иборат. Адабий манбаларни таҳлил қилиш, буғлатиш аппаратида ростловчи таъсирнинг жуда кичик ўзгариши (буғлатишга берилган аммиакли селитра эритмаси сарфи ва буғ сарфи) кўриб чиқилаётган жараённинг ҳарорат режимда кучли акс этишини аниқлаш имконини берди. Бу жараён турғунлигини йўқотишга олиб келиши мумкин. Шундай қилиб, буғлатиш аппаратининг ҳарорат режимини бошқаришнинг шундай адаптив тизимини ишлаб чиқиш зарурки, у реал ғалаёнлар шароитида ростлашнинг зарурий сифати ва турғунликни таъминласин. Бундай тизим тизимнинг турғунлик соҳасини ростлаш органининг минимал силжишларидаги бошланғич шартлар бўйича етарлича диапазонга кенгайтириши керак. Бошқача сўз билан айтганда, ростлаш таъсирларининг минимал ўзгаришларини таъминлайдиган ва объектнинг чиқиш координаталарини барқарорлаштирувчи, ихтиёрий шаклдаги реал ғалаён таъсирлар таъсири остида ишлай оладиган, юқори аниқликдаги автоматик бошқариш тизимини синтезлаш лозим.

Адаптив баҳолашнинг юқорида ишлаб чиқилган алгоритмлар асосида математик модели ишлаб чиқилган ва кўриб чиқиладиган жараён фаолият кўрсатадиган асосий халақит-сигналли шароит аниқланган. Шу асосида аммиакли селитра эритмасини буғлатиш жараёнини бошқаришнинг адаптив тизимининг куйидаги варианты таклиф этилган бўлиб (2 - расм), у комбинирлашган буғлатиш аппарати 1, киздиргич 2, концентрация датчиги 3 ва буғлатилган эритма ҳарорати датчиги 4, адаптив ростлагич 5, мантиқий блок 6, адаптив баҳолаш блоки 7, идентификациялаш блоки 8, бошқариш таъсирларини шакллантириш блоки 9, буғлатишга берилган аммиакли селитра эритмаси сарфи ростлагичи 10, буғ сарфи ростлагичи 11, буғлатишга берилган аммиакли селитра эритмаси сарфи датчиги 12, буғ сарфи датчиги 13 дан иборат.



2 - расм. Аммиакли селитра эритмасини буғлатиш жараёнини бошқаришнинг адаптив тизими функционал схемаси

Тажрибавий тадқиқотлар шуни кўрсатадики, адаптив бошқаришда аммиакли селитра эритмаси концентрациясини амалга оширишнинг ўртача квадратик оғиш катталигининг қиймати оддий бошқаришдаги билан солиштирилганда, мос равишда 0.051 дан 0.022 гача камаяди. Бунда ишлаб чиқилган адаптив бошқариш тизимини амалга оширишдан олинadиган иқтисодий самаранинг асосий улушига аммиакли селитра эритмасини буғлатиш учун сарфланадиган буғ сарфини йилига 1223,2 Гкалорияга қискартириш ҳисобидан эришилади.

ХУЛОСА

Диссертацияда тизимли таҳлил, бошқаришнинг адаптив тизимлари назарияси, ноқоррект масалаларни ечиш усуллари ва динамик филтрлаш концепциялари асосида модели ноаниқлик шароитларида бошқаришнинг технологик объектлари ҳолатларини мунтазам адаптив баҳолашнинг конструктив услубияти ишлаб чиқилган ва қуйидаги натижалар олинган:

1. Қидирилаётган ечим мувофиқлигини таъминлаш билан биргаликда адаптив баҳолаш амалининг аниқлигини ошириш имконини берадиган ўзига хос ва ёмон шартланган матрицали чизиклантирилган тизимларнинг мумкин бўлган қийинчиликларини эътиборга олган ҳолда ноқизикли функционал тенгламаларни ечиш усуллари асосида объект шовқинининг ковариацион матрицасини баҳолашнинг мунтазам алгоритмлари ишлаб чиқилган.

2. Баҳолаш хатоликлари назарий ковариацион матрицаларини реал қийматларга боғланишини таъминлаш ва шу билан биргаликда Калман филтри кучайтириш матрицаларини ҳисоблашни реал ўлчашлардаги узилиб қолишини бартараф этиш имконини берадиган матрицаларнинг сингуляр ажратиш асосида ўлчашларда кетма-кет коррелирланган халақитлар бўлган шароитларда бошқариш объекти ҳолатини адаптив мунтазам баҳолаш алгоритмлари таклиф этилган.

3. Хусусий ҳосилаларни ҳисоблаш ёки силлиқлантиришни талаб этмайдиган, янгиланувчи жараён ва кесишувчилар усули асосида объект шовқини ва ўлчаш халақитларининг ковариацион матрицаларини адаптив мунтазам итерацион баҳолашнинг, қидирилаётган яқинлашишлар мувофиқлиги ва филтрни ғалаён таъсирлари ковариацион матрицаларининг ўзгарувчан қийматларига мослашишини таъминлаш имконини берадиган алгоритмлари таклиф этилган.

4. Градиентни проекциялаш усули асосида Калман филтрининг матрицали кучайтириш коэффициентини адаптив баҳолашнинг мунтазам алгоритмлари ишлаб чиқилган. Кучайтириш коэффициентини ҳисоблашнинг матрицали тенгламаси ўнг қисми хатолигини баҳолаш учун ифодалар олинган бўлиб, улар бевосита матрицали тенглама ечимини топмасдан туриб, тенглама ечимининг хатолигини баҳолаш имконини беради. Шунингдек, топилган ифодалар орқали тизимни келгусида қандай аниқлик билан ечиш бўйича сифатли хулосалар олиш учун ечим хатолигининг даражаси ҳақидаги априор ахборотларни ҳам олиш мумкин.

5. Филтрнинг матрицали кучайтириш коэффициентларини априор маълумотларга қатъий боғлиқлигини бартараф этиш имконини берадиган объектнинг корреляцияланган шовқинларида икки босқичли адаптив баҳолашнинг мунтазамлаштирилган алгоритмлари таклиф этилган. Бу масалани ечишда квазиоптималлик, кесишувчи қийматлилиқ ва L -эгри чизикли усуллар асосида мунтазамлаштириш параметрини танлаш орқали олиб бориладиган мавҳум мурожаат қилиш, мунтазамлаштириш, l_1 – минималлаштириш ва ўртача ишдан чиқиш усуллари энг самарали эканлиги кўрсатилган.

6. Чизикли алгебраик тенгламаларнинг тахминий бузилган ёки ёмон шартланган стохастик тизимларини ечиш усуллари асосида объект шовқини ва ўлчаш халақитлари автокорреляцияланган шароитларда адаптив баҳолашнинг мунтазам алгоритмлари таклиф этилган. Баҳолаш алгоритмларини шакллантиришда тақрибий стохастик тенгламалар тизими ечимларининг оптимал мунтазамлаштирилган баҳоларини олишни кафолатловчи боғланмаганлик тамойилининг статистик шаклидан фойдаланилган.

7. Динамик филтрнинг кучайтириш коэффициенти ҳисоблаш аниқлигини ошириш имконини берадиган объект шовқини ва ўлчаш халақитлари ўзаро корреляцияланган бўлганда, ўнг қисми тақрибий берилган ва мусбат аниқланган матрицали оператор тенгламалари ечимларини мунтазамлаштириш усуллари ҳамда шовқин ва халақитларни декорреляциялаш асосида адаптив баҳолашнинг мунтазам алгоритмлари ишлаб чиқилган.

8. Моделли ноаниқлик юқори даражада бўлган шароитларида бошқаришнинг адаптив тизимларини синтезлаш имконини берадиган вақтлик қаторлар концепцияси асосида ғалаёнлар ковариацион матрицаси ва бошқариш объектлари динамикаси тенгламалари матрицалари параметрларини адаптив баҳолашнинг мунтазам алгоритмлари таклиф этилган.

9. Қидирилаётган баҳоларнинг асосланганлиги ва мувофиқлигини таъминловчи итератив мунтазамлаштириш тамойили доирасида вариацион тенгсизликларни ечиш усуллари асосида бошқариш объектларининг ўтиш матрицаларини адаптив баҳолашнинг мунтазам алгоритмлари ишлаб чиқилган.

10. Тўлиқ априор моделли ноаниқлик шароитларида Калман туридаги динамик филтрнинг кучайтириш коэффициенти ва бошқарилувчи объектларнинг ўтиш матрицалари параметрларини адаптив баҳолашнинг, функционалларни минималлаштиришнинг мунтазам усуллари асосида кўриб чиқилаётган баҳолаш масаласини мунтазамлаштириш имконини берадиган мунтазам алгоритмлар таклиф этилган.

11. Бошқарув таъсирлари ва ҳолат ўзгарувчилари векторини ҳисоблаш аниқлигини ошириш имконини берадиган моделли ноаниқликнинг даражалари турлича бўлган шароитларда мунтазам адаптив баҳолаш асосида башоратловчи моделлардан фойдаланган ҳолда динамик объектларнинг бошқариш тизимларини синтезлаш алгоритмлари таклиф этилган.

12. Моделли ноаниқлик шароитларидаги бошқариш объектлари ҳолатларини адаптив баҳолашнинг таклиф этилган мунтазам алгоритмлари асосида PS-Агро ишлаб чиқаришдаги кальций-сульфат-фосфатли пульпани гранулаларни қуритиш ҳамда аммиакли селитрани буғлатиш технологик жараёнларини бошқаришнинг адаптив тизимлари ишлаб чиқилган. Кўрсатилган жараёнлар учун таклиф этилган бошқаришнинг адаптив тизимлари жараёнлар юз беришининг технологик режимини барқарорлаштириш ва уларнинг фаолияти самарадорлигини ошириш имконини беради.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА НАУК 16.07.2013.Т.02.01 ПРИ ТАШКЕНТСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ И
ИНСТИТУТЕ ЭНЕРГЕТИКИ И АВТОМАТИКИ**

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЗАРИПОВ ОРИПЖОН ОЛИМОВИЧ

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РЕГУЛЯРНОГО АДАПТИВНОГО
ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ
ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ**

**05.13.07 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами
(технические науки)**

АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Ташкент – 2014

Тема докторской диссертации зарегистрирована за № 30.09.2014/В2014.5.Т308 в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан.

Докторская диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете.

Полный текст докторской диссертации размещен на веб-странице научного совета по присуждению учёной степени доктора наук 16.07.2013.Т.02.01 при Ташкентском государственном техническом университете и Институте энергетики и автоматики по адресу www.tdtu.uz.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский) размещен на веб-странице по адресу www.tdtu.uz и Информационно-образовательном портале "ZIYONET" по адресу www.ziyonet.uz.

**Научный
консультант:**

Игамбердиев Хусан Закирович
доктор технических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:**

Бекмуратов Тулкин Файзиевич
академик АН РУз,
доктор технических наук, профессор

Адилов Фарух Тулкунович
доктор технических наук

Каипбергенов Батырбек Тулепбергенович
доктор технических наук

Ведущая организация:

ГАК «УЗКИМЁСАНОАТ»

Защита диссертации состоится «___» _____ 2014 г. в 10⁰⁰ часов на заседании научного совета 16.07.2013.Т.02.01 при Ташкентском государственном техническом университете и Институте энергетики и автоматики по адресу: 100095, г.Ташкент, ул.Университетская, 2. Тел.: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz.

С докторской диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (регистрационный номер ___). Адрес: 100095, Ташкент, ул.Университетская, 2. Тел.: (99871) 246-03-41.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2014 года.
(протокол рассылки №___ от «___» _____ 2014 г.).

Н.Р.Юсупбеков

Председатель научного совета по присуждению
учёной степени доктора наук,
д.т.н., профессор, академик АН РУз

А.Р.Марахимов

Ученый секретарь научного совета по
присуждению учёной степени доктора наук,
д.т.н., профессор

Ш.М.Гулямов

Председатель научного семинара при
Научном совете по присуждению
учёной степени доктора наук, д.т.н., профессор

АННОТАЦИЯ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность и востребованность темы диссертации. Комплексные меры, предпринимаемые Правительством Республики Узбекистан по развитию систем регионально-территориального автоматизированного управления и созданию единого информационного пространства, направлены на широкое внедрение информационно-управляющих систем на основе современных информационно-коммуникационных технологий. В связи с этим разработка эффективных методов и алгоритмов оценивания состояния и управления объектами различного функционального назначения отличается особой актуальностью и, вместе с тем, остается не полностью решенной теоретической и прикладной проблемой, имеющей большое народно-хозяйственное значение. Развитие сложных систем обработки информации и управления, в частности, систем управления технологическими объектами, стимулируется постоянным повышением требований к характеристикам точности. Эта задача особенно сложна в реальных условиях априорной неопределенности и непредвиденной изменчивости характеристик моделей и внешней среды. В этих условиях введение адаптации и контроля функционирования системы целесообразно осуществлять по отношению к существенным модельным нарушениям, которые не могут рассматриваться как простые мешающие факторы и оценивание которых позволит значительно улучшить качество функционирования системы в целом. Таким образом, развитие и разработка эффективных средств и методов адаптации систем управления в условиях повышенной априорной неопределенности в темпе реального времени позволяют эффективно обрабатывать данные наблюдений, существенно повысив точность и надежность систем обработки информации и управления.

Востребованность диссертации характеризуется тем, что широкое внедрение современных концепций автоматизации и контроля сложными технологическими объектами в различных отраслях промышленности, в том числе и химической, связано с требующими пристального внимания задачами оценивания, идентификации и управления объектами в условиях неопределенности.

Данная исследовательская работа ориентирована на обеспечение реализации Постановления Президента Республики Узбекистан за №ПП-677 от 27.07.2007 года «О Программе модернизации, технического и технологического перевооружения предприятий химической промышленности», в котором отмечается, что одними из важнейших задач программы являются повышение технического уровня и эффективности производства, обеспечение эксплуатационной надежности и экологической безопасности химических производств путем внедрения современных высокоэффективных технологий, оборудования и новейших систем управления технологическими процессами.

Исходя из этого, решение перечисленных задач требует проведения специальных исследований и разработок, направленных на дальнейшее

повышение эффективности систем управления технологическими процессами на основе современных информационных технологий.

При этом практическая реализация указанных методов адаптации и контроля сталкивается с необходимостью решения разнообразных обратных задач динамики управляемых объектов. Задачи подобного типа, по существу, являются плохо обусловленными. Они принадлежат к классу некорректно поставленных задач. В такой ситуации задачу синтеза методов и алгоритмов адаптивного оценивания состояния объектов управления в условиях неопределенности целесообразно рассматривать с точки зрения теории регулярного оценивания, определяющей методологию построения устойчивых алгоритмов обработки текущей информации. В этой связи разработка эффективных методов и алгоритмов регулярного адаптивного оценивания состояния технологических объектов управления в условиях модельной неопределенности и синтеза вычислительных схем их практической реализации приобретает весьма важное значение.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Диссертация выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологии: ППИ-17: «Разработка современных информационных систем, интеллектуальных средств управления и обучения, научно-технических баз данных и программных продуктов, обеспечивающих широкое развитие и внедрение информационных и телекоммуникационных технологий» и ППИ-5: «Разработка информационных технологий, телекоммуникационных сетей, аппаратно-программных средств, методов и систем интеллектуального управления и обучения, направленных на повышение уровня информатизации общества».

Обзор международных научных исследований по теме диссертации. В теории стохастического управления разработано большое количество методов и алгоритмов, описывающих различные подходы к получению численных решений различных задач. Предложены различные оптимальные и субоптимальные стратегии управления. Определены классы стратегий и основные характеристики стохастического управления. В классе адаптивных систем управления разработаны эффективные методы и алгоритмы оценивания, идентификации и принятия решений в условиях различной степени априорной неопределенности. В этой области были достигнуты определенные успехи учеными стран США, Великобритании, России, Японии, Китая, Южной Кореи, Германии, Голландии, Франции, Италии, Австралии и др.

В публикациях международных компаний и научных центров, таких как Honeywell, Siemens, Mitsubishi, ABB, Invensys, Festo, GE Fanuc, Rockwell, Advantech, Evoc, Kontron, Eurotech, Intel, SeaTech, MOX, Wonderware, Rockwell Automation, Iconics, Trace-Mode и др., отмечается, что развитие современных технологий управления происходит в направлении модификации и совершенствования систем оптимального и адаптивного управления.

Вместе с тем, по мере усложнения условий функционирования объектов управления, связанных, прежде всего, с неопределенностью их описания, активно ведутся исследования, направленные на разработку новых направлений и приложений, основанных на введении принципов адаптации и контроля функционирования системы по отношению к существенным модельным нарушениям. Аналитическое изучение научно-технической литературы в этой области показывает, что дальнейшее совершенствование систем управления динамическими объектами неразрывно связано с разработкой новых и модификацией известных методов синтеза систем управления различного функционального назначения в условиях модельной и сигнальной неопределенности на основе концепций адаптивной фильтрации.

Степень изученности проблемы. Анализ научно-технической литературы последних лет, касающийся исследований по разработке методов и алгоритмов адаптивного оценивания состояния технологических объектов управления в условиях модельной неопределенности, свидетельствует о достижении значительных теоретических и практических результатов в этой области. Опубликовано большое количество работ, посвященных проблемам адаптации и контроля функционирования систем управления, разработаны общетеоретические концепции, возрастает число решенных практических вопросов. Существуют и разрабатываются различные пути построения высокоточных фильтров, работающих в условиях различной степени априорной неопределенности статистических характеристик сигналов и помех. Различным теоретическим и прикладным вопросам в этой области посвящено большое число монографий, сборников и статей. Здесь следует отметить работы таких ученых, как Aliev R., Andrews A.P., Brayson A., Bucy R., Izerman R., Jaegeol Yim, Jaehun Joo, Kalman R., Lainiotis D., Landau I.D., Leondes C., Ljung L., Simon D., Tao G., Wiener N., Zhou J., Абдуллаев Д.А., Андриевский Б.Р., Бекмуратов Т.Ф., Буков В.Н., Булычев Ю.Г., Верлань А.Ф., Игамбердиев Х.З., Кадыров А.А., Камиллов М.М., Красовский А.А., Никифоров В.О., Огарков М.А., Поляк Б.Т., Пупков К.А., Семушин И.В., Сеницын И.Н., Фрадков А.Л., Цыпкин Я.З., Юсупбеков Н.Р., Ядыкин И.Б., Яковлев В.Б. и др. Однако постоянное усложнение и расширение круга объектов научных исследований требует разработки новых эффективных методов и алгоритмов обнаружения и диагностирования нарушений, идентификации, адаптивного оценивания состояния стохастических объектов управления в условиях неопределенности. Вместе с тем, в литературе недостаточно оценены возможности регулярных методов в задачах синтеза подсистем адаптивного оценивания состояния стохастических объектов управления в условиях неопределенности. В неполной мере разработаны регулярные методы и алгоритмы обнаружения и адаптации в классе стохастических систем управления в условиях модельной неопределенности. Требуют своего развития также регулярные методы адаптивного оценивания состояния стохастических объектов управления на основе идентификационного и прямого подходов, а также алгоритмов адаптивного

оценивания при наличии неопределенности в описании объекта. Кроме того, оказывается целесообразным осуществлять разработку регулярных методов и алгоритмов совместного обнаружения, идентификации и парирования нарушений на основе современных концепций регулярных методов, что позволит расширить спектр алгоритмических процедур построения и реализации адаптивных систем управления стохастическими объектами в условиях неопределенности и повысить эффективность их функционирования. В связи с вышеотмеченным возникает настоятельная необходимость дальнейшей модификации и создания эффективных методов и алгоритмов регулярного адаптивного оценивания состояния стохастических объектов управления в условиях модельной неопределенности.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ отражена в следующих проектах: Государственный научно-технический проект №А-14-045 – «Разработка и внедрение интеллектуализированных информационно-управляющих систем для промышленных производств с непрерывным характером технологических процессов» (2006-2008 гг.); № ЁА-17-05 – «Разработка регулярных алгоритмов и программных средств синтеза адаптивных стохастических систем управления непрерывными технологическими объектами» (2010-2011 гг.); № ОТ-Ф1-080 – «Разработка концепций и принципов построения интеллектуальных систем управления сложными технологическими процессами и производствами» (2007-2011 гг.); № Ф-4-56 – «Разработка теоретических основ и методов структурно-параметрического синтеза интеллектуальных систем управления сложными технологическими объектами на основе нечетко-множественных представлений» (2012-2016 гг.).

Цель исследования состоит в разработке методов и алгоритмов регулярного адаптивного оценивания состояния технологических объектов управления в условиях модельной неопределенности и их практическом применении при решении задач автоматизации и управления конкретными процессами производства.

Для реализации поставленной цели определены следующие **задачи исследования**:

системный анализ развития теории и методов адаптивной фильтрации в задачах синтеза систем управления динамическими системами;

разработка регулярных алгоритмов адаптивного оценивания на основе идентификационного подхода;

разработка регулярных алгоритмов адаптивного оценивания матричного коэффициента усиления калмановского фильтра;

разработка регулярных алгоритмов адаптивного оценивания при наличии неопределенности в модели динамики объекта;

применение разработанных методов и алгоритмов регулярного адаптивного оценивания в задачах управления технологическими объектами.

Объектом исследования являются методы и алгоритмы динамической фильтрации и оценивания состояния стохастических объектов управления.

Предмет исследования – методы и алгоритмы регулярного адаптивного оценивания состояния стохастических объектов управления.

Методы исследований. В диссертационной работе использована общая методология системного анализа, идентификации, динамической фильтрации, адаптивного управления и решения некорректно поставленных задач.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

разработаны алгоритмы регулярного оценивания ковариационной матрицы шума объекта на основе методов решения нелинейных функциональных уравнений с учетом возможной неразрешимости линеаризованной системы с особой или плохо обусловленной матрицей, позволяющие обеспечить сходимость искомого решения и тем самым повысить точность процедуры адаптивного оценивания;

предложены алгоритмы адаптивного регулярного оценивания состояния объектов управления в условиях последовательно коррелированной помехи в измерениях на основе сингулярного разложения матриц, позволяющие обеспечить привязку теоретической ковариационной матрицы ошибки оценивания к реальным значениям, и тем самым ликвидировать оторванность процесса вычисления матрицы усиления калмановского фильтра от реальных измерений;

предложены алгоритмы адаптивного регулярного итерационного оценивания ковариационных матриц шума объекта и помехи измерений на основе обновляющегося процесса и метода секущих, не требующие вычисления или аппроксимации частных производных, позволяющие адаптировать фильтр к изменяющимся значениям ковариационных матриц возмущающих воздействий;

разработаны регулярные алгоритмы адаптивного оценивания матричного коэффициента усиления калмановского фильтра на основе метода проекции градиента и получены выражения для оценки погрешности правой части матричного уравнения для вычисления коэффициента усиления, позволяющие, не производя непосредственного решения матричного уравнения, оценивать погрешность его решения;

предложены регулярные алгоритмы адаптивного оценивания в условиях авто- и взаимно-коррелированности шума объекта и помехи измерений на основе методов решения приближенных вырожденных или плохо обусловленных стохастических систем линейных алгебраических уравнений, позволяющих повысить точность вычисления коэффициента усиления динамического фильтра;

разработаны регулярные алгоритмы адаптивного оценивания переходной матрицы объектов управления на основе методов решения вариационных неравенств в рамках принципа итеративной регуляризации, обеспечивающие состоятельность и сходимость искомым оценкам;

предложены регулярные алгоритмы адаптивного оценивания параметров переходной матрицы управляемых объектов и коэффициента усиления динамического фильтра калмановского типа в условиях полной априорной модельной неопределенности, позволяющие regularизовать рассматриваемую задачу оценивания на основе регулярных методов минимизации функционалов.

Практические результаты исследования заключаются в следующем: разработан программный комплекс ARES (adaptation, regularization, estimation, system), состоящий из программных модулей, предназначенный для программно-алгоритмической поддержки решения задач адаптивного оценивания состояния динамических систем;

на основе результатов промышленного эксперимента в условиях нормального функционирования разработаны математические модели процессов грануляции-сушки кальций-сульфат фосфатной пульпы в производстве PS-Агро и гранулирования аммиачной селитры;

разработана подсистема адаптивного оценивания состояния управляемых объектов с учетом различных степеней модельной неопределенности с использованием контуров параметрической и сигнальной адаптации;

предложены системы автоматизации и управления технологическими процессами грануляции-сушки кальций-сульфат фосфатной пульпы и гранулирования аммиачной селитры с соответствующим техническим обеспечением, позволяющие повысить производительность агрегата на 2,25% и снизить расход пара на 1223,2 Гкал. в год соответственно.

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

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования. Теоретическая значимость результатов исследования состоит в разработке конструктивных методов и алгоритмов регулярного адаптивного оценивания состояния технологических объектов управления в условиях модельной неопределенности.

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке математического и алгоритмического обеспечения задач адаптивного оценивания и синтеза систем управления широким классом технологических объектов. Разработанные методы и алгоритмы адаптивного оценивания состояния стохастических объектов управления в условиях априорной неопределенности могут найти широкое применение при построении функциональной структуры и автоматизации проектирования адаптивных систем управления технологическими процессами с непрерывным характером производства.

Внедрение результатов исследования. Алгоритмы адаптивного оценивания и функциональные схемы автоматизации управления внедрены на предприятиях ГАК «УЗКИМЁСАНОАТ» в системах автоматизации управления технологическими процессами грануляции-сушки кальций-сульфат фосфатной пульпы на Алмалыкском АО «АММОФОС-МАКСАМ» (акт от 03.10.2014г.) и выпаривания аммиачной селитры на АО «FARG‘ONAAZOT» (акт от 21.05.2014 г.) с суммарным годовым экономическим эффектом 83 млн. 76 тыс. сум (справка ГАК «УЗКИМЁСАНОАТ» о внедрении за №01-5304/И от 17.11.2014 г.).

Апробация работы. Результаты исследования апробированы на 32 научно-практических конференциях, конгрессах и семинарах, в том числе, 25 международных: «Современное состояние и перспективы развития энергетики» (Ташкент, 2006); «Техника и технологии связи» (Ташкент, 2008); «Современная техника и технология горно-металлургической отрасли и пути их развития» (Навои, 2008, 2013); «World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation – WCIS-2008-2012» (Ташкент, 2008-2012); «Congress of the World Mathematical Society of Turkic Countries» (Almaty, 2009); «Интегральные уравнения-2009» (Киев, 2009); «Управление и оптимизация динамических систем – CODS-2009» (Ташкент, 2009); «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-23» (Саратов, 2010); «International Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing – ICAFS – 2010-2014» (Prague, 2010; Lisbon, 2012; Paris, 2014); «International School and Conference on Foliations, Dynamical Systems, Singularity Theory and Perverse Sheaves» (Samarkand, 2009); «International training-seminars on mathematics in conjunction with the joint mathematics meeting» (Samarkand, 2011); «Инновация» (Ташкент, 2010-2013); «Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий - Аль-Хорезми – 2012 - 2014» (Ташкент, 2012; Самарканд, 2014); «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте» (Коломна, 2013); «International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control – ICSCCW-2013» (Izmir, 2013); «Современные материалы, техника и технологии в машиностроении» (Андижан, 2014) и 7 республиканских конференциях.

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликовано 60 научных работ, в том числе – 2 монографии, 20 журнальных статей, из них 5 – в иностранных журналах, и получено 10 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, 4 приложений и содержит 198 страниц текста, включает 12 рисунков и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В первой главе диссертационной работы рассматриваются вопросы системного анализа развития теории и методов адаптивной фильтрации в задачах синтеза систем управления динамическими системами. В современной теории и практике автоматического управления проблемам адаптации уделяется все больше внимания. Решение этих проблем позволяет осуществить управление самыми разнообразными технологическими процессами в условиях неполноты априорной и текущей информации относительно характеристик объекта и воздействий внешней среды. Здесь следует заметить, что возникновение априорной неопределенности происходит уже на стадии формирования физической, химической или технологической модели автоматизируемых объектов и процессов. Текущая неопределенность, как правило, обусловлена неконтролируемым случайным характером изменения статических и динамических свойств управляемых объектов и воздействий внешней среды на объект в режиме нормальной эксплуатации. Адаптивные системы относятся к числу наиболее сложных в существующей иерархии систем управления. Их сложность определяется не только собственными топологическими особенностями, структурой операторов связей, разнообразием используемого математического аппарата, особенностями технической реализации и т.д. Сложность проблем адаптации в системах управления состоит в глубине самой концепции адаптивного поведения, будь то техническая, биологическая или иная система, в ее многоальтернативности, в многообразии характера неопределенности информации об управляемом процессе и внешней среде. Это объясняется прежде всего тем, что при создании систем управления сложными технологическими процессами обычно не располагают достоверными моделями объектов. Ни одна из существующих теорий не может претендовать на то, что единственно она дает правильное описание работы систем. Скорее, имеется целый спектр теорий, трактующих эти проблемы. При имеющемся сейчас узком рассмотрении лишь отдельных процессов и только на определенных уровнях описания получается одностороннее представление о системе, не позволяющее иметь достоверные оценки обо

всех процессах. Таким образом, можно констатировать, что введение адаптации и контроля функционирования системы целесообразно по отношению к существенным модельным нарушениям, которые не могут рассматриваться как простые мешающие факторы и оценивание которых позволит значительно улучшить качество системы в целом. При этом для правильной постановки и качественного решения задач оценивания состояния объектов управления и оценки нарушений необходимо учитывать целый ряд моментов, важнейшими из которых являются: вид неопределенности (модельная или параметрическая), тип неопределенности (неопределенность только на первом этапе, этапе проектирования, или на обоих этапах (проектирование и управление действующим процессом)). Модельная неопределенность означает, что отсутствует полная уверенность в том, какой математической моделью следует воспользоваться для некоторых технологических процессов, а параметрическая – что общая структура уравнений для каждого технологического процесса известна, но имеют место неопределенности в параметрах модели.

Резюмируя вышеотмеченное, можно заключить, что модельная неопределенность отображает концептуальную модель физического процесса ввиду того обстоятельства, что процесс отображения реальности практически осуществляется с помощью упрощенных моделей. При этом модельная неопределенность в свою очередь инициирует математическую неопределенность. Это обусловлено тем, что концептуальная модель в данном случае обычно реализуется в виде системы уравнений, решаемых, как правило, приближенными методами. Здесь возникает свой вид неопределенности результатов, который однако может быть количественно оценен.

Сложившееся положение требует развития новых подходов к проблеме адаптивного оценивания состояния управляемых объектов и систем в условиях приближенного задания исходных данных на основе методов обеспечения сопоставимости по точности моделей управляемых систем с наблюдениями. При этом в основу решения многогранной проблемы оценивания состояния в упомянутом выше смысле целесообразно положить концепцию совместного использования общей теории динамического оценивания и методов решения обратных некорректных задач. Удачной в этой связи видится методология системной градации задач синтеза адаптивных схем, основанная, в частности, на привлечении концепций обратных задач динамики управляемых объектов и регулярных методов. Отмеченные обстоятельства указывают на необходимость создания методов и алгоритмов регулярного адаптивного оценивания состояния технологических объектов управления в условиях модельной неопределенности и синтеза вычислительных схем их практической реализации при решении задач автоматизации и управления конкретными технологическими процессами промышленных производств.

Вторая глава посвящена разработке регулярных алгоритмов адаптивного оценивания состояния объектов управления на основе идентификационного подхода. Рассмотрим линейную или линеаризованную непрерывную динамическую систему, описываемую в разностном времени следующими уравнениями:

$$x_{i+1} = A_i x_i + B_i u_i + \Gamma_i w_i, \quad (1)$$

$$z_i = H_i x_i + v_i, \quad (2)$$

где x_i – вектор состояния системы размерности n , u_i – вектор управления размерности l ; z_i – вектор наблюдения размерности m , w_i и v_i – векторы шума объекта и помехи наблюдения размерности q и p соответственно, являющиеся последовательностью вида гауссовского белого шума с характеристиками $E[w_i] = 0$, $E[w_i w_k^T] = Q_i \delta_{ik}$, $E[v_i] = 0$, $E[v_i v_k^T] = R_i \delta_{ik}$, $E[w_i v_k^T] = 0$; A , B , Γ и H – матрицы соответствующих размерностей. Данные последовательности также не зависят от случайного начального состояния системы x_0 с математическим ожиданием \bar{x}_0 и ковариацией P_0 .

Для оценивания вектора состояния x_i динамической системы (1), (2) обычно используются традиционные уравнения фильтра Калмана вида

$$\hat{x}_{i|i} = A_{i,i-1} \hat{x}_{i-1|i-1} + B_{i,i-1} u_{i-1} + K_i [z_i - B_{i,i-1} u_{i-1} - H_i \hat{x}_{i-1|i-1}], \quad (3)$$

$$K_i = P_{i|i-1} H_i^T [H_i P_{i|i-1} H_i^T + R_i]^{-1}, \quad (4)$$

$$P_{i|i-1} = A_{i,i-1} P_{i-1|i-1} A_{i,i-1}^T + Q_{i-1}, \quad P_{i|i} = P_{i|i-1} - K_i H_i P_{i|i-1}, \quad \hat{x}_{0|-1} = \mu_0, \quad P_{0|-1} = M_0. \quad (5)$$

Однако сфера применения процедуры калмановской фильтрации (3) – (5) ограничена вследствие того, что этот алгоритм предполагает точное знание параметров системы. Предположим, что матрицы A , B , Γ и H соответствуют своим номинальным значениям, но матрицы ковариаций Q и R неизвестны. Тогда для реализации динамического фильтра (3) – (5) целесообразно использовать идентификационный подход, заключающийся в определении матриц ковариаций Q и R с последующим вычислением коэффициента усиления K согласно выражениям (4), (5).

В последующих уравнениях синтеза алгоритмов адаптивного оценивания в явном виде не учтено управление u_i . Однако управление всегда считается известной функцией времени. Поэтому оно может быть учтено через зависимость от дискретного времени i . Значительная часть алгоритмов идентификации или оценивания матриц ковариаций шумов Q_i и R_i может быть основана на методах анализа обновляющейся последовательности или невязки измерений $v_i = z_i - H_i \hat{x}_{i|i-1}$ в фильтре Калмана. Для определения ковариационной матрицы Q будем использовать уравнения:

$$\sum_{j=0}^{k-1} H A^j \Gamma Q \Gamma^T (A^{j-k})^T H^T = (P^* H^T)^T (A^{-k})^T H^T - H A^k (P^* H^T)^T - \sum_{j=0}^{k-1} H A^j \hat{V} (A^{j-k})^T H^T, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

$$\hat{V} = A \left[-K(P'H^T)^T - (P'H^T)K^T + K\hat{C}_0K^T \right] A^T.$$

Оценка матрицы измерительного шума строится на основе использования уравнения $C_0 = E(v_i v_i^T) = HP'H^T + R$, т.е. $\hat{R} = \hat{C}_0 - H(P'H^T)$. Перепишем систему уравнений (6) в виде

$$f(q) = 0,$$

где $q = \{q_1, q_2, \dots, q_q\}$ – вектор, составленный из элементов ковариационной матрицы Q .

Для вычисления вектора q будем использовать метод Ньютона

$$q_{r+1} = q_r - [F(q_r)]^{-1} f(q_r), \quad r = 0, 1, \dots,$$

где $F(q_r)$ – матрица Якоби, взятая при $q = q_r$.

В процессе вычисления вектора q возможны случаи, когда матрица $F(q_r)$ может быть не только плохо обусловленной, но и вырожденной в окрестности некоторой точки q^* . Для решения системы $F(q_r)\xi_r = -f_r$, $q_{r+1} = q_r + \xi_r$ оказывается целесообразным использовать следующую вычислительную схему М.М.Лаврентьева:

$$\alpha \xi_{r,n} + F(q_r)\xi_{r,n} = \alpha \xi_{r,n-1} - f_r, \quad n = 1, 2, \dots \quad (7)$$

Регуляризация в (7) осуществляется за счет большого числа итераций при фиксированном значении параметра регуляризации α . Показано, что отыскание вектора параметров q_r можно также производить на основе уравнения вида:

$$\Gamma(h_r, q_r)\xi_r = f(q_r), \quad q_{r+1} = q_r - \xi_r, \quad r = 0, 1, 2, \dots,$$

где $\Gamma(h_r, q_r)$ – разностная матрица, h_r – вещественные числа из некоторой заданной сходящейся последовательности.

В случае, когда моделью неопределенности в измерениях является аддитивная марковская последовательность, для синтеза адаптивного фильтра целесообразно определить новый вектор измерений $\mu_i = z_{i+1} - \Psi_i z_i$, в результате чего получаем следующую модель системы

$$x_{i+1} = A_i x_i + w_i, \quad \mu_i = H_i^* x_i + \varepsilon_i,$$

где $H_i^* = H_i A_i - \Psi_i H_i$, $\{\varepsilon_i\}$ – белая последовательность с нулевым средним, удовлетворяющая следующим соотношениям

$$E \left\{ \begin{bmatrix} w_i \\ \varepsilon_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_\tau^T & \varepsilon_\tau^T \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} Q_i & \hat{S}_i \\ \hat{S}_i^T & \hat{R}_i \end{bmatrix} \delta_{i-\tau}, \quad \hat{S}_i = Q_i H_i^T, \quad \hat{R}_i = H_i Q_i H_i^T + R_i,$$

Ψ_i – переходная матрица, определяемая выражением $v_{i+1} = \Psi_i v_i + \xi_i$.

Тогда оценка вектора переменной состояния может быть определена на основе выражения:

$$\tilde{x}_{i+1} = T_{i+1}^{(1)} \hat{x}_i + T_{i+1}^{(2)} \mu_{i+1},$$

где матрицы $T_{i+1}^{(1)}$ и $T_{i+1}^{(2)}$ определяются на основе сингулярного разложения матриц с использованием вычислительных процедур калмановской фильтрации.

Для совместного оценивания ковариационных матриц шума объекта и помехи измерений будем использовать следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} E(v_i v_i^T) - H P_{i|i-1} H^T - R &= 0, \\ E(v_i v_{i-1}^T) &= H A (I - K_{i-1} H) [P_{i-1|i-2} H^T - K_{i-1} R] = 0, \\ &\dots\dots \\ E(v_i v_{i-m}^T) &= H A (I - K_{i-1} H) A \dots A (I - K_{i-m}) [P_{i-m|i-m-1} H^T - K_{i-m} R] = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Перепишем систему уравнений (8) в виде

$$S(c) = 0, \quad (9)$$

где $S(c)$ – нелинейный оператор на E^β в E^β , $\beta = q + p$, $c = \{c_1, c_2, \dots, c_q; c_{q+1}, c_{q+2}, \dots, c_p\}$ – вектор, составленный из диагональных элементов ковариационных матриц Q и R , т.е.

$$c_1 = q_{11}, c_2 = q_{22}, \dots, c_q = q_{qq}; c_{q+1} = r_{11}, c_{q+2} = r_{22}, \dots, c_p = r_{pp}.$$

В сформулированных выше условиях требуется решить систему нелинейных уравнений вида:

$$S_i(c_1, c_2, \dots, c_\beta) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, \beta. \quad (10)$$

Для решения уравнения (10) будем использовать метод секущих в β -мерном пространстве. Согласно методу секущих уравнения $\beta+1$ точки в β -мерном пространстве и β гиперплоскостей можно записать в виде:

$$c^{i_\gamma} = (c_1^{i_\gamma}, c_2^{i_\gamma}, \dots, c_\beta^{i_\gamma})^T, \quad \gamma = 1, 2, \dots, \beta, \quad L^k(c) \equiv \sum_{j=1}^{\beta} a_j^k c_j + a_{\beta+1}^k = 0, \quad k = 1, 2, \dots, \beta.$$

При этом гиперплоскости должны удовлетворять условию вида:

$$L^k(c^{i_\gamma}) = S_k(c_\gamma^i), \quad \gamma = 0, 1, 2, \dots, \beta, \quad k = 1, 2, \dots, \beta,$$

$$\text{или } L^k(c^{i_\gamma}) - L^k(c^{i_0}) \equiv \sum_{j=1}^{\beta} a_j^k (c_j^{i_\gamma} - c_j^{i_0}) = S_k(c^{i_\gamma}) - S_k(c^{i_0}), \quad \gamma = 1, 2, \dots, \beta, \quad k = 1, 2, \dots, \beta.$$

Тогда регуляризованный вариант итерационного алгоритма для вычисления вектора c на основе (9) можно записать в виде:

$$c^{i+1} = c^i - (S(c^i, \varphi(c^i)) + \alpha_i B_i)^{-1} S(c^i), \quad (11)$$

где $\varphi_\gamma(c^i) = c_\gamma^i - S_\gamma(c^i)$, $\alpha_i = B(i+1)^{-1}$, $B \gg 0$.

Можно показать, что итерационный процесс (11) сходится с любого начального приближения $c^0 \in N_c$, т.е. $\lim_{i \rightarrow \infty} \|c^i - c^*\| = 0$, где $N_c = \{\|c - c^*\| \leq \rho\}$, $\rho > 0$ – достаточно малое число; $c^* = (c_1^*, c_2^*, \dots, c_\beta^*)$ – единственное решение системы $S(c) = 0$, $c = (c_1, c_2, \dots, c_\beta)$, $S = (S_1, S_2, \dots, S_\beta)$. Заметим, что итерационный алгоритм (11) не требует вычисления или аппроксимации частных производных, что выгодно отличает его от итерационных алгоритмов первого и второго порядков. Таким образом, приведенные регулярные алгоритмы позволяют получать оценки элементов ковариационных матриц шума объекта и помехи измерений для вычисления коэффициента усиления калмановского фильтра, и тем самым адаптировать фильтр по отношению к изменяющимся внешним помехо-сигнальным условиям.

В третьей главе диссертации приводятся результаты разработки регулярных алгоритмов адаптивного оценивания матричного коэффициента усиления динамического фильтра. Будем рассматривать динамическую систему, описываемую уравнениями

$$x_{i+1} = Ax_i + \Gamma w_i, \quad z_i = Hx_i + v_i. \quad (12)$$

Предположим, что ковариации шумов Q_i и R_i неизвестны. Для адаптации фильтра будем использовать соотношение $S = PH^T - KR_0$, которое справедливо для оптимального фильтра. Рассмотрим задачу минимизации функционала, определяемого в виде

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m s_{ij}^2, \quad (13)$$

где s_{ij} – (i,j) -й элемент матрицы S .

Для определения коэффициента усиления K , который приводит матрицу S к нулю, используем метод проекции градиента:

$$k_{i+1}^r = P_{\mathcal{K}}(k_i^r - \beta_i J'(k_i^r)), \quad i = 0, 1, \dots, \quad r = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (14)$$

где $P_{\mathcal{K}}(k)$ – проекция точки k на множество \mathcal{K} , $\beta_i > 0$; \mathcal{K} – выпуклое замкнутое множество.

Для решения рассматриваемой задачи минимизации воспользуемся методом регуляризации А.Н.Тихонова. Тогда можно показать, что последовательность $\{v_i\}$, определяемая условием

$$v_{i+1} = P_{\mathcal{K}_0}(v_i - \beta_i (J'_i(v_i) + \alpha_i v_i)), \quad i = 1, 2, \dots; \quad v_1 \in \mathcal{K},$$

сходится к точке $k_* \in \mathcal{K}_*$ с минимальной нормой, т.е. $\lim_{i \rightarrow \infty} \|k_i - k_*\| = 0$, при этом

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \|v_i - k_i\| = 0, \quad \beta_i > 0, \quad \lim_{i \rightarrow 0} \beta_i = 0, \quad \alpha_i = i^{-1/3}, \quad \beta_i = i^{-1/2}, \quad i = 1, 2, \dots, \quad \mathcal{K} \neq \emptyset, \quad J_* = \inf_{k \in \mathcal{K}} J(k) > -\infty,$$

$$\mathcal{K}_* = \{k : k \in \mathcal{K}, J(k) = J_*\} \neq \emptyset, \quad \mathcal{K} = \{k : k \in \mathcal{K}_0\}.$$

Для минимизации функционала (13) в соответствии с (14) необходимо вычислять уравнения в частных производных, где явно присутствует матрица S . Для определения S будем использовать следующее выражение

$$D \cdot \hat{S} = \hat{R}, \quad (15)$$

$$D = \begin{bmatrix} [HA]^T & \vdots & [H[A(I-KH)]A]^T & \vdots & \dots & \vdots & [H[A(I-KH)]^{j_{\max}-1}A]^T \end{bmatrix}^T,$$

$$\hat{R} = \begin{bmatrix} [\hat{R}_1]^T & \vdots & [\hat{R}_2]^T & \vdots & \dots & \vdots & [\hat{R}_{j_{\max}}]^T \end{bmatrix}^T,$$

$$\hat{R}_0 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N y_i y_i^T, \quad \hat{R}_j = \frac{1}{N-j} \sum_{i=1}^{N-j} y_{i+j} y_i^T, \quad j = 1, 2, \dots, j_{\max}, \quad j_{\max} = \eta.$$

Для регуляризации решения уравнения (15) оценим погрешность задания правой части. Сделаем предположение, что погрешности коэффициентов корреляции подчинены нормальному закону распределения. Тогда для доверительной вероятности $p = 0.95$ можно записать следующие выражения для погрешности правой части уравнения (15):

$$\Delta \hat{R} = \tilde{R} - \hat{R} = \begin{bmatrix} [\Delta \hat{R}_{1(i)}]^T & \vdots & [\Delta \hat{R}_{2(i)}]^T & \vdots & \dots & \vdots & [\Delta \hat{R}_{\eta(i)}]^T \end{bmatrix}^T_{\eta m \times 1},$$

$$\Delta \hat{R}_{\eta^{(i)}} = \left[\left[\pm \frac{2[1-r_{\eta^{(1i)}}^2]}{\sqrt{N-\eta-1}} \right] \middle| \left[\pm \frac{2[1-r_{\eta^{(2i)}}^2]}{\sqrt{N-\eta-1}} \right] \middle| \dots \middle| \left[\pm \frac{2[1-r_{\eta^{(mi)}}^2]}{\sqrt{N-\eta-1}} \right] \right]_{m \times 1}^T.$$

Тогда нормы абсолютных и относительных возмущений правой части уравнения (15) можно оценить на основе выражений:

$$\delta = \|\Delta \hat{R}\| = \|\tilde{R} - \hat{R}\| = 2 \left[\sum_{j=1}^{\eta} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \frac{|1-r_{j^{(ki)}}^2|^2}{N-j-1} \right]^{1/2},$$

$$\delta_{\text{отн}} = \frac{\|\Delta \hat{R}\|}{\|\hat{R}\|} = 2 \left[\sum_{j=1}^{\eta} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \frac{|1-r_{j^{(ki)}}^2|^2}{N-j-1} \right]^{1/2} / \left[\sum_{j=1}^{\eta} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m |r_{j^{(ki)}}^2|^2 \right]^{1/2}.$$

Полученные выражения позволяют, не производя непосредственного решения, оценивать погрешность решения уравнения (15).

При решении разнообразных задач оценивания и фильтрации возможны ситуации, когда шумы объекта и помехи измерений являются авто- и взаимно-коррелированными во времени. В случае автокоррелированности шумов объекта и помех измерений модель системы можно записать в виде:

$$x_{i+1} = A_{i+1|i} x_i + \Gamma_{i+1|i} \eta_i, \quad \eta_{i+1} = \tilde{A}_{i+1|i} \eta_i + \tilde{\mu}_i w_{i+1},$$

$$z_{i+1} = H_{i+1} x_{i+1} + \xi_{i+1}, \quad \xi_{i+1} = \tilde{H}_{i+1} \xi_i + \tilde{v}_i v_{i+1},$$

с априорными данными $w_i \sim N(0, Q_i)$, $v_i \sim N(0, R_i)$, $x_0 \sim N(\bar{x}_0, P_0)$, $\eta_0 \sim N(\bar{\eta}_0, P_0^{(\eta\eta)})$, $\text{cov}(x_0, \eta_0) = \text{cov}(x_0, w_i) = \text{cov}(\eta_0, w_i) = \text{cov}(\eta_0, v_i) = \text{cov}(v_i, w_i) = 0$.

При решении задачи оценивания в рассматриваемом случае коэффициенты усиления K_{i+1} и $K_{i+1}^{(\eta)}$ определяются на основе выражений

$$K_{i+1} P_{i+1|i}^{(22)*} = P_{i+1}^{(1)}, \quad (16)$$

$$K_{i+1}^{(\eta)} P_{i+1|i}^{(22)*} = P_{i+1}^{(2)}, \quad (17)$$

где $P_{i+1|i}^{(22)*}$, $P_{i+1}^{(1)}$ и $P_{i+1}^{(2)}$ представляют собой ковариационные матрицы ошибки оценивания.

Для вычисления K_{i+1} и $K_{i+1}^{(\eta)}$ целесообразно использовать регулярные процедуры. Регулярный алгоритм решения будем приводить относительно уравнения (16). Полученный алгоритм может быть также использован и при решении уравнения (17). Уравнение (16) запишем в следующем виде:

$$P_{i+1|i}^{(22)*T} k_{i+1,j} = p_{i+1,j}^{(1)},$$

где $k_{i+1,j}$ – j -ый столбец матрицы K_{i+1}^T , $j=1,2,\dots,n$; $d_{i,j}^{\delta}$ – j -й строка матрицы $P_{i+1}^{(1)T}$, $j=1,2,\dots,n$.

Здесь регуляризованную оценку решения $k_{i+1,j}$ целесообразно определять на основе совместного решения уравнений:

$$P_{i+1|i}^{(22)*T} k_{i+1,j}^{(\alpha)} + \alpha k_{i+1,j}^{(\alpha)} = P_{i+1|i}^{(22)*} \tilde{p}_{i+1,j}^{(1)}, \quad \left\| P_{i+1|i}^{(22)*T} k_{i+1,j}^{(\alpha)} - \tilde{p}_{i+1,j}^{(1)} \right\|^2 = Q_{\min} + \delta,$$

где $Q_{\min} = \inf_{k_{i+1,j} \in R^m} Q(k_{i+1,j})$, $Q(k_{i+1,j}) = \left\| P_{i+1|i}^{(22)*T} k_{i+1,j} - p_{i+1,j}^{(1)\delta} \right\|^2$, $\delta > 0$; параметр регуляризации α определяется из условия невязки.

При рассмотрении случая взаимнокоррелированности шума объекта и помехи измерений модель системы запишем в виде:

$$x_{i+1} = A_{i+1}x_i + \Gamma_i w_{i+1},$$

$$z_{i+1} = H_{i+1}x_{i+1} + G_i v_{i+1},$$

с априорными данными $w_{i+1} \sim N(0, Q_{i+1})$, $v_{i+1} \sim N(0, R_{i+1})$, $x_0 \sim N(\bar{x}_0, P_0)$,

$$\text{cov} \left(\begin{bmatrix} w_i \\ v_i \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} w_j \\ v_j \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} Q_i & C_i \\ C_i^T & R_i \end{bmatrix} \delta_{ij}, \quad Q_i \geq 0, \quad C_i \geq 0, \quad R_i > 0, \quad \text{cov}(x_0, w_i) = 0; \quad \text{cov}(x_0, v_i) = 0.$$

Для определения искомой матрицы усиления K_i^p запишем уравнение вида:

$$L_i k_{i,j} = d_{i,j}^\delta = d_{i,j} + \delta d_{i,j}, \quad (18)$$

где $L_i = (R_i^T G_i^T)$ – линейный оператор, действующий из гильбертового пространства H в H ; $k_{i,j}$ – i -ая строка матрицы K_i^{pT} , $j = 1, 2, \dots, n$; $d_{i,j}^\delta$ – i -й столбец матрицы $D_i = C_i^T \Gamma_i^T$ с условием аппроксимации вида $\delta^2 = \|\delta d_{i,j}\|_E^2$,

$$\delta_{\min}^2 < \|\delta d_{i,j}\|_E^2 < \delta_{\max}^2, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad d_{i,j} - \text{точное значение правой части уравнения (18)}.$$

Показано, что для регуляризации решения уравнения (18) оказываются эффективными следующие регулярные процедуры:

$$k_{i,j,\alpha} = (L_i + \alpha I)^{-1} d_{i,j}^\delta, \quad \bar{k}_{i,j,\alpha} = (L_i + \alpha I)^{-1} L_i k_{i,j,\alpha}, \quad \alpha^2 k_{i,j,\alpha} + L_i^2 k_{i,j,\alpha} = L_i d_{i,j}^\delta.$$

При реализации приведенных выше алгоритмов параметр регуляризации α целесообразно определять на основе способа невязки.

На основе методов решения некорректно поставленных задач можно показать, что для обеспечения существенно лучшей обусловленности системы (18) целесообразно рассматривать систему вида:

$$L_{i,\alpha} k_{i,j,\alpha} = \lambda d_{i,j}^\delta,$$

где $L_{i,\alpha} = [(\mathcal{D}_L + \alpha \mathcal{D}_L^{-1}) + (1 - \beta)(L_i - \mathcal{D}_L)]$, \mathcal{D}_L – диагональ матрицы L_i ,

$\lambda = \lambda_\alpha = (d_{i,j}^\delta, L_i \tilde{k}_{i,j,\alpha}) \left(\|L_i \tilde{k}_{i,j,\alpha}\|_E^{-2} \right)$, $\beta = 1 - \left[\left(\|\mathcal{D}_L + \alpha \mathcal{D}_L^{-1}\|_E^2 - \|\mathcal{D}_L\|_E^2 \right) \left(\|L_i - \mathcal{D}_L\|_E^{-2} \right) \right]^{1/2}$, $\tilde{k}_{i,j,\alpha}$ – решение системы $L_{i,\alpha} \tilde{k}_{i,j,\alpha} = d_{i,j}^\delta$.

Здесь величины λ и β находятся на основе выбранного значения параметра α .

В главе также рассмотрены вопросы построения регуляризованных алгоритмов адаптивного оценивания в условиях коррелированного шума объекта и адаптивного оценивания на основе субоптимального фильтра пониженного порядка. Показано, что при их практической реализации эффективными оказываются вычислительные схемы упрощенной регуляризации и метода регуляризации.

Приведенные алгоритмы позволяют регуляризовать задачу адаптивного оценивания матричного коэффициента усиления динамического фильтра калмановского типа.

Четвертая глава посвящена разработке регулярных алгоритмов адаптивного оценивания при наличии неопределенности в описании объекта. Предположим, что модель динамической системы описывается уравнениями вида (12). Пусть рассматриваемая система устойчива, не вырождена и вполне наблюдаема: $\text{rank}[H^T \mid (HA)^T \mid \dots \mid (HA^{n-1})^T]^T = n$. Матрицы A , Γ и ковариационные матрицы шумов Q и R полагаем постоянными, но неизвестными. Матрица H считается известной. Для оценивания матрицы A целесообразно использовать соотношения вида:

$$\hat{Z}_{i+n,n} = \left[[\hat{Z}_{i+n,n}^1]^T \mid [\hat{Z}_{i+n,n}^2]^T \mid \dots \mid [\hat{Z}_{i+n,n}^n]^T \right]^T = \left[[H\hat{A}]^T \mid [H\hat{A}^2]^T \mid \dots \mid [H\hat{A}^n]^T \right]^T,$$

где

$$\hat{Z}_{i+n,n} = E[Z_{i,n} \hat{x}_{i-n}^T] \cdot \Xi_{i-n}^{-1}, \quad Z_{i,n} = [z_{i-n+1}^T \mid z_{i-n+2}^T \mid \dots \mid z_i^T]^T, \quad \Xi_{i-n} = E[\hat{x}_i \hat{x}_i^T]. \quad (19)$$

Полагая последовательность матриц $\{\hat{A}_{i=1}^n \rightarrow A$ рассмотрим задачу вида $[[H]^T \mid [H\hat{A}]^T \mid \dots \mid [H\hat{A}^{n-1}]^T]^T \cdot \hat{A} = [[C_1]^T \mid [C_2]^T \mid \dots \mid [C_n]^T]^T = C$, где блочная матрица C является результатом обработки данных на основе соотношений (19). Тогда алгоритм будет состоять в последовательном решении уравнений

$$L_{i,n}(A_i) \cdot A_{i+1} = C, \quad i = 0, \dots, n-1, \quad (20)$$

дающих оценку \hat{A}_n , где $L_{i,n}(A_i) = [[H]^T \mid [HA_i]^T \mid \dots \mid [HA_i^{n-1}]^T]^T$. Запишем уравнение (20) в развернутой форме:

$$\mathcal{L}(a_j) = c_j, \quad a_j \in D(\mathcal{L}), \quad (21)$$

определенное оператором $\mathcal{L}: D(\mathcal{L}) \rightarrow G$, $D(\mathcal{L}) \subset G$, где G – вещественное гильбертово пространство. В (21) $\mathcal{L}(a_j) = L_{i,n}(\hat{A}) \cdot \hat{a}_j$, $j = 1, \dots, n$, \hat{a}_j и c_j – j -ые столбцы матрицы A и блочной матрицы C , соответственно. Определение вектора \hat{a}_j будем производить на основе минимизации функционала вида:

$$J(a_j) = \sum_{j=1}^n (\mathcal{L}(a_j) - c_j)^2, \quad \eta = m \cdot n \quad (22)$$

т.е. искомая оценка вектора \hat{a}_j есть $\hat{a}_j = \arg \inf_{a \in R^n} J(a_j)$. Функционал $J(a_j)$ в (22) является выпуклым дифференцируемым функционалом, определенным на замкнутом выпуклом множестве $Q \subset G$ гильбертова пространства G . Таким образом, необходимо определить такие a_j , для которых $(F(a_j), a_j - d_j) \leq 0$, $\forall d_j \in Q$, где $F(a_j) = J'(a_j)$ – монотонный оператор. Тогда регуляризованную итеративную последовательность $\hat{a}_{r,j}$ можно записать в следующем виде: $\hat{a}_{r+1,j} = P_Q(\hat{a}_{r,j} - \alpha_{r,j}(F_\delta(\hat{a}_{r,j}) + \varepsilon_{r,j} M(\hat{a}_{r,j})))$, $r = 0, 1, \dots$, где P_Q – метрический проектор; $M(\hat{a}_{r,j})$ – оператор, обладающий на $Q \subset G$ свойством сильной монотонности; $\alpha_{r,j} > 0$, $\varepsilon_{r,j} > 0$ – параметры регуляризации.

В рассматриваемом случае можно принять $M(a_{r,j}) = a_{r,j}$, $\alpha_{r,j} = (1+r)^{-1/2}$, $\varepsilon_{r,j} = (1+r)^{-p}$, $0 < p < 1/2$. Останов рассматриваемого итерационного процесса можно осуществлять на основе соотношений вида: $\lim_{\delta \rightarrow 0} \delta / \varepsilon_{r,j}(\delta) = 0$,

$\lim_{\delta \rightarrow 0} \delta^{1/2} / \varepsilon_{r,j(\delta)}^2 = 0$. Таким образом, придавая параметру i значения от 1 до n , согласно выше приведенным выражениям можно последовательно оценить матрицы A_1, A_2, \dots, A_n . В реальных условиях функционирования объектов управления по ряду причин параметры A, Γ, Q, R модели (12) могут быть точно не известны, что вынуждает определять их по данным измерений z_i . Для решения этой задачи обычно используют настраиваемую модель по типу уравнений фильтрации Калмана в виде: $\hat{g}_{i+1|i} = \Phi \hat{g}_{i|i-1} + L(z_i - C \hat{g}_{i|i-1})$, $i \geq 1$, $L = \Phi D$, соблюдая в ней условия невырожденности, устойчивости и полной наблюдаемости, так как они выполняются в системе (12). Для величины невязки можно написать выражение $\varepsilon_{j+1|j} = \Delta^+ (Z_{j+1} - \hat{U} \hat{g}_{j+1|j})$, $j \geq 0$, где $\Delta = [\Theta^T \mid (\Theta \Psi)^T \mid \dots \mid (\Theta \Psi^{n-1})^T]^T$, $\text{rank } \Delta = n$, $Z_{j+1} = [z_{j+1}^T \mid z_{j+2}^T \mid \dots \mid z_{j+n}^T]^T$.

Примем за критерий качества идентификации функционал вида: $J = J(\Phi, L, C) = \|\varepsilon_{j+1|j}\|^2$. Введем обозначение $(A_1, G_1, H_1) = \arg \min_{\Phi, L, C} J(\Phi, L, C)$, где $A_1 = SAS^{-1}$, $G_1 = SG$, $H_1 = HS^{-1}$. Тогда при известной H и неизвестных A, Γ, Q, R можно записать следующее выражение:

$$(A_1, G_1) = \arg \min_{\Phi, L} J(\Phi, L, H), \quad \hat{g}_{i+1|i}(A_1, G_1, H) = Sx_{i+1|i}, \quad H = HS.$$

Таким образом, имеем аргументную задачу минимизации $(A_1, G_1) = \arg \min_{\Phi, L} J(\Phi, L, H) = \arg \min_{\Phi, L} J\|\varepsilon_{j+1|j}\|^2$, при этом искомый вектор $\theta \in \Xi$ состоит из элементов матриц Φ, L . Перейдем к формированию регуляризованных минимизирующих последовательностей функционала $J(\theta)$. Полагаем, что $\arg \min_{\theta \in \Xi} J(\theta) = J(\theta_0) = J_0$. Рассмотрим функционал $M^\alpha[\theta, J_\delta(\theta)] = J_\delta(\theta) + \alpha \Omega[\theta]$, $\alpha > 0$, определенный на всех $\theta \in \tilde{\Xi}$, где $\Omega[\theta]$ – стабилизирующий функционал, $J_\delta(\theta)$ – параметрическое семейство функционалов, определенных для всех $\delta \geq 0$, аппроксимирующих функционал $J(\theta)$ на множестве $\tilde{\Xi} \subset \Xi$ так, что $|J_\delta(\theta) - J(\theta)| \leq \delta \Omega[\theta]$.

Следуя устойчивым методам минимизации функционалов, можно показать, что существует точная нижняя грань $M_{\alpha, \delta} = \arg \min_{\theta \in \tilde{\Xi}} M^\alpha[\theta, J_\delta(\theta)]$. Тогда имеет место последовательность $\{\theta_{\alpha_n}, \delta_n\}$ элементов $\theta_{\alpha_n}, \delta_n$, почти минимизирующих соответственно функционалы $M^{\alpha_n}[\theta, J_{\delta_n}(\theta)]$, сходящаяся к элементу θ_0 . Так как α_n и δ_n стремятся к нулю при $n \rightarrow \infty$, то последовательность $\{\theta_{\alpha_n}, \delta_n\}$ является регуляризованной минимизирующей последовательностью для функционала $J(\theta)$.

Рассмотрим далее задачу синтеза системы управления с использованием прогнозирующих моделей на основе концепций регулярного адаптивного оценивания. Пусть имеется многомерный объект управления, который описывается системой уравнений вида

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t + w_t, \quad x_0 = \bar{x}_0, \quad (23)$$

$$z_t = Hx_t + v_t, \quad \eta_t = Gx_t. \quad (24)$$

В (24) η_t – вектор выхода объекта. Необходимо определить стратегию управления, при которой вектор выхода системы η_t будет близок к заданному вектору $\bar{\eta}_t$. Будем синтезировать алгоритм оптимального управления, используя экстраполятор Калмана. Тогда можно записать следующие уравнения

$$\hat{x}_{t+j|t} = A^{j-1}\hat{x}_{t+1|t} + \sum_{k=1}^{j-1} A^{j-k-1}Bu_{t+k|t}, \quad j = 2, 3, \dots, N,$$

$$\hat{\eta}_{t+j|t} = GA^{j-1}\hat{x}_{t+1|t} + G\sum_{k=1}^{j-1} A^{j-k-1}Bu_{t+k|t}, \quad j = 2, 3, \dots, N,$$

где $u_{t+i|t}$ – управление, используемое для прогнозирования, u_{t+i} – действующее управление в момент $t+i$, N – горизонт прогнозирования.

Для решения поставленной задачи в качестве целевой функции будем использовать следующий критерий $J_t = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \{ \|\hat{\eta}_{t+k|t} - \bar{\eta}_t\|_C^2 + \|u_{t+k|t} - u_{t+k-1|t}\|_D^2 \}$, где матрицы $C > 0$ и $D > 0$ – весовые матрицы.

Далее на основе методов оптимального управления с использованием прогнозирующих моделей можно прийти к следующему выражению:

$$U_t^* = -(\Phi^T \bar{C} \Phi + \bar{D})^{-1} (\Phi^T \bar{C} \Lambda \hat{x}_{t+1|t} - \Phi^T \bar{C} \bar{\Theta}_t) - [Du_t]^T \mid 0 \mid \dots \mid 0]^T, \quad (25)$$

где матрицы Φ , \bar{C} , \bar{D} , Λ и $\bar{\Theta}_t$ формируются на основе известных соотношений.

Тогда оптимальное прогнозирующее управление будет иметь вид:

$$u_{t+1|t}^* = (I \mid 0 \mid \dots \mid 0) U_t^*.$$

Анализируя уравнение (25), можно видеть, что точность формирования прогнозирующих уравнений и оптимального прогнозирующего управления существенно зависит от точности вычисления оценки вектора переменной состояния $\hat{x}_{t+1|t}$. Следовательно, использование предложенных концепций адаптации и контроля динамических систем в условиях различной степени модельной неопределенности способствует повышению точности вычисления вектора переменных состояния и, тем самым, качества процессов управления динамическими объектами.

В главе также рассмотрены вопросы построения алгоритмов регулярного оценивания параметрических возмущений в задачах адаптивного оценивания состояния объектов управления, параметров матриц уравнения динамики объектов управления и ковариационных матриц возмущений. Показано, что при их практической реализации эффективными оказываются вычислительные схемы устойчивого псевдообращения и метода регуляризации.

Приведенные алгоритмы позволяют регуляризовать задачу адаптивного оценивания состояния при наличии неопределенности в описании объекта и повысить точность оценивания.

В пятой главе приводятся результаты применения разработанных методов и алгоритмов регулярного адаптивного оценивания в задачах автоматизации и управления технологическими объектами ряда промышленных производств.

Адаптивная система управления процессом грануляции-сушки кальций-сульфата фосфатной пульпы в производстве PS-Агро. В качестве основных показателей, характеризующих процесс сушки-грануляции, рассматривались следующие переменные: управляющие параметры $U = (u_1, u_2, u_3)$, где u_1 – температура теплоносителя на входе БГС; u_2 – расход пульпы; u_3 – расход ретур; выходные параметры $Y = (y_1, y_2, y_3)$, где y_1 – температура отработанного теплоносителя; y_2 – влажность гранул; y_3 – гранулометрический состав продукта; неконтролируемые возмущающие воздействия $W = (w_1, w_2, w_3)$, где w_1 – влагосодержание кальций-сульфат фосфатной пульпы; w_2 – гранулометрический состав пульпы; w_3 – гранулометрический состав ретур. Произведенная формализация процесса позволяет выбрать структуру математической модели в следующем виде:

$$x_{i+1} = A_i x_i + F_i x_{i-h} + B_i u_i + w_i, \quad y_i = H_i x_i + v_i. \quad (26)$$

Для получения и практического использования математической модели был проведен промышленный эксперимент в условиях нормального функционирования технологического процесса грануляции-сушки кальций-сульфата фосфатной пульпы в производстве PS-Агро на Алмалыкском АО «АММОФОС-МАКСАМ». Искомые значения матриц A_i , F_i и B_i уравнения (26) для принятого интервала времени оказались равными:

$$A = \begin{bmatrix} 0,748 & 0,187 & -0,479 \\ -0,964 & 0,671 & -0,896 \\ 0,255 & -0,964 & 0,723 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} -0,872 & 0,862 & -0,633 \\ 0,963 & -0,926 & 0,214 \\ -0,671 & 0,341 & 0,672 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0,844 & -0,971 & -0,523 \\ -0,997 & 0,127 & 0,352 \\ 0,246 & 0,882 & 0,612 \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Проверка адекватности разработанной модели на основе критерия остатков показала, что модель (26) со значениями параметров (27) адекватно описывает рассматриваемый процесс в области экспериментирования.

Имеющие место в практике работы БГС большие и частые возмущения, связанные с изменением расхода и состава исходного сырья, вызывают значительные отклонения состава целевых продуктов от их заданных значений. Таким образом, при управлении рассматриваемым технологическим процессом существенное значение приобретает задача адаптивной стабилизации режимов работы объекта, которая является одной из главных задач управления технологическими процессами в условиях неопределенности, обусловленной незнанием значений параметров объекта управления и характеристик внешних возмущающих воздействий. Управление рассматриваемым процессом грануляции-сушки осложняется также его неминимально-фазовыми свойствами с временами запаздывания в несколько минут, длительным временем установления, большим диапазоном колебаний влагосодержания сырой пульпы и неизмеримыми изменениями свойств самой пульпы. Для построения системы управления подсоединим к объекту (26) регулятор $u_i = K_i^T z_i$, где K – $n \times 2l$ -мерная матрица параметров регулятора. Предположим, что матрицы A , F , B зависят от вектора

неизвестных параметров $\xi \in M$, где M – множество, определяющее класс адаптивности синтезируемой системы.

Для решения рассматриваемой задачи возьмем функционал Ляпунова – Красовского в виде

$$V(x_s, k_s) = x_s^T L_0 x_s + \sum_{i=1}^m (k_i - k_{0i})^T L_i (k_i - k_{0i}) - \gamma \left[\frac{1}{2} (x_{i-h}^T x_{i-h} + x_i^T x_i) + \sum_{l=1-h}^{-1} x_{i+l}^T x_{i+l} \right],$$

где L_0, L_i – вещественные симметричные положительно определенные матрицы; k_{0i} – i -й столбец некоторой матрицы K_0 , $\gamma > 0$.

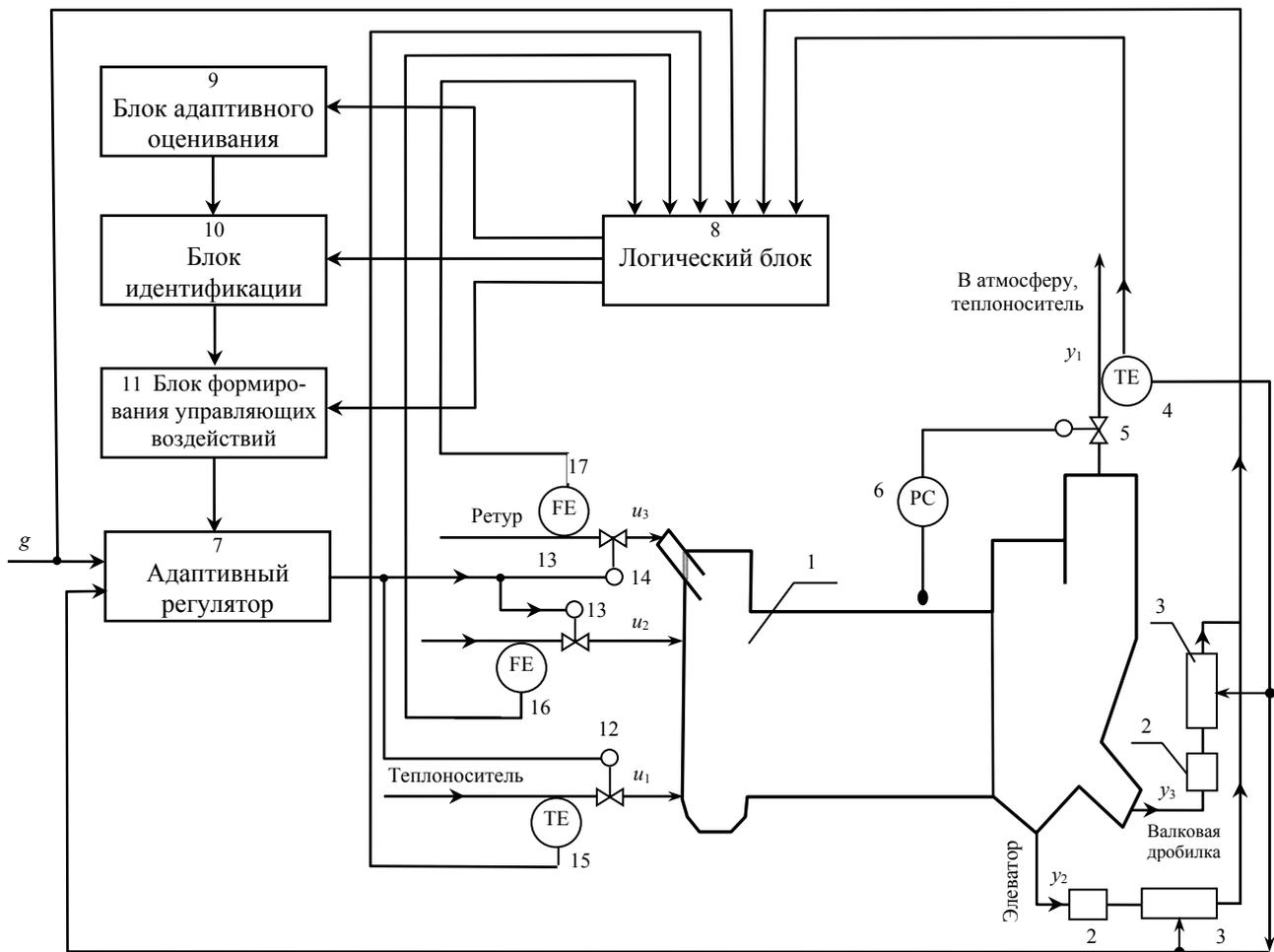


Рис.1. Функциональная схема адаптивной системы управления процессом грануляции-сушки

Синтезированная система является адаптивной в заданном классе M и алгоритм настройки параметров регулятора можно принять в виде

$$k_{i+1} = k_i - d_i^T z_i P_i \psi_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (28)$$

где P_i – произвольные положительно определенные матрицы; d_i – i -ый столбец матрицы \mathcal{D} , определяемой условиями частотной теоремы устойчивости; $\psi^T = z_i^T z_{i-h}^T$.

Уравнение калмановского фильтра здесь будет иметь вид:

$$\hat{x}_{i+1} = A_i \hat{x}_i + F_i \hat{x}_{i-h} + B_i u_i + K_i^1 [y_i - \mathcal{K}_i \hat{x}_i - \mathcal{K}_i B_i u_i] - \frac{h}{n} \left[\frac{1}{2} (K_{i,-h}^2 [y_{i-h} - \mathcal{K}_{i-h} \hat{x}_{i-h}] + K_{i,0}^2 [y_i - \mathcal{K}_i \hat{x}_i]) + \sum_{l=1-h}^{-1} K_{i,l}^2 [y_{i+l} - \mathcal{K}_{i+l} \hat{x}_{i+l}] \right]. \quad (29)$$

Коэффициенты усиления K_i^1 и K_i^2 определяются уравнениями

$$K_i^1 = [P_i - P_{i,0}] K_i^T R_i^{-1}, \quad K_{i,s}^2 = P_{i,s} K_{i+s}^T R_{i+s}^{-1}. \quad (30)$$

На основе соотношений (28) – (30) и разработанных выше алгоритмов адаптивного оценивания вектора состояния можно предложить следующий вариант адаптивной системы управления рассматриваемым процессом (рис.1), которая состоит из барабанного гранулятора-сушилки (БГС) 1, датчика влажности 2, дискретного функционального преобразователя 3, датчика температуры 4 и регулятора расхода 5 отработанного теплоносителя, датчика давления внутри БГС 6, адаптивного регулятора 7, логического блока 8, блока адаптивного оценивания 9, блока идентификации 10, блока формирования управляющих воздействий 11, регуляторов расхода теплоносителя 12, пульпы 13 и ретурна 14 на входе БГС, датчиков температур теплоносителя 15, расхода пульпы 16 и ретурна 17.

Предложенная система адаптивного управления позволяет стабилизировать температурные режимы процесса, повысить качественные показатели продуктов и производительность агрегата на 2,25 %.

Адаптивная система управления процессом выпаривания раствора аммиачной селитры. В качестве основных показателей, характеризующих процесс выпарки раствора аммиачной селитры, рассматривались следующие переменные: управляющие параметры $u=(u_1, u_2)$, где u_1 – расход раствора аммиачной селитры на упарку; u_2 – расход пара; выходные параметры $z = (z_1, z_2)$, где z_1 – концентрация упаренного раствора; z_2 – температура упаренного раствора; неконтролируемые возмущающие воздействия $w = (w_1, w_2)$, где w_1 – концентрация раствора аммиачной селитры на входе в аппарат; w_2 – влажность исходного раствора.

Основным показателем эффективности процесса выпаривания является концентрация упаренного раствора, а целью управления - поддержание определенного значения этой концентрации. Анализ литературных источников позволил установить, что в выпарном аппарате малейшие изменения регулирующих воздействий (расхода раствора аммиачной селитры на упарку и расхода пара) сильно отражаются на температурном режиме рассматриваемого процесса. Это может привести к потере устойчивости процесса. Таким образом, необходимо разработать такую адаптивную систему управления температурным режимом выпарного аппарата, которая обеспечит устойчивость и необходимое качество регулирования в условиях реальных возмущений. Такая система должна расширить в достаточном диапазоне область устойчивости системы по начальным условиям при минимальных перемещениях регулирующих органов. Другими словами, необходимо синтезировать высокоточную систему автоматического управления, обеспечивающую минимальное изменение регулирующих воздействий и стабилизирующую выходные координаты объекта, функционирующего в условиях реальных возмущающих воздействий произвольной формы.

На основе разработанных выше алгоритмов адаптивного оценивания была разработана математическая модель и выявлены основные помехо-сигнальные условия функционирования рассматриваемого процесса. На этом основании предлагается следующий вариант адаптивной системы управления процессом выпаривания раствора аммиачной селитры (рис.2), которая состоит из комбинированного выпарного аппарата 1, подогревателя 2, датчиков концентрации 3 и температуры упаренного раствора 4, адаптивного регулятора 5, логического блока 6, блока адаптивного оценивания 7, блока идентификации 8, блока формирования управляющих воздействий 9, регуляторов расхода раствора аммиачной селитры на упарку 10 и пара 11, датчиков расхода раствора аммиачной селитры на упарку 12 и пара 13.

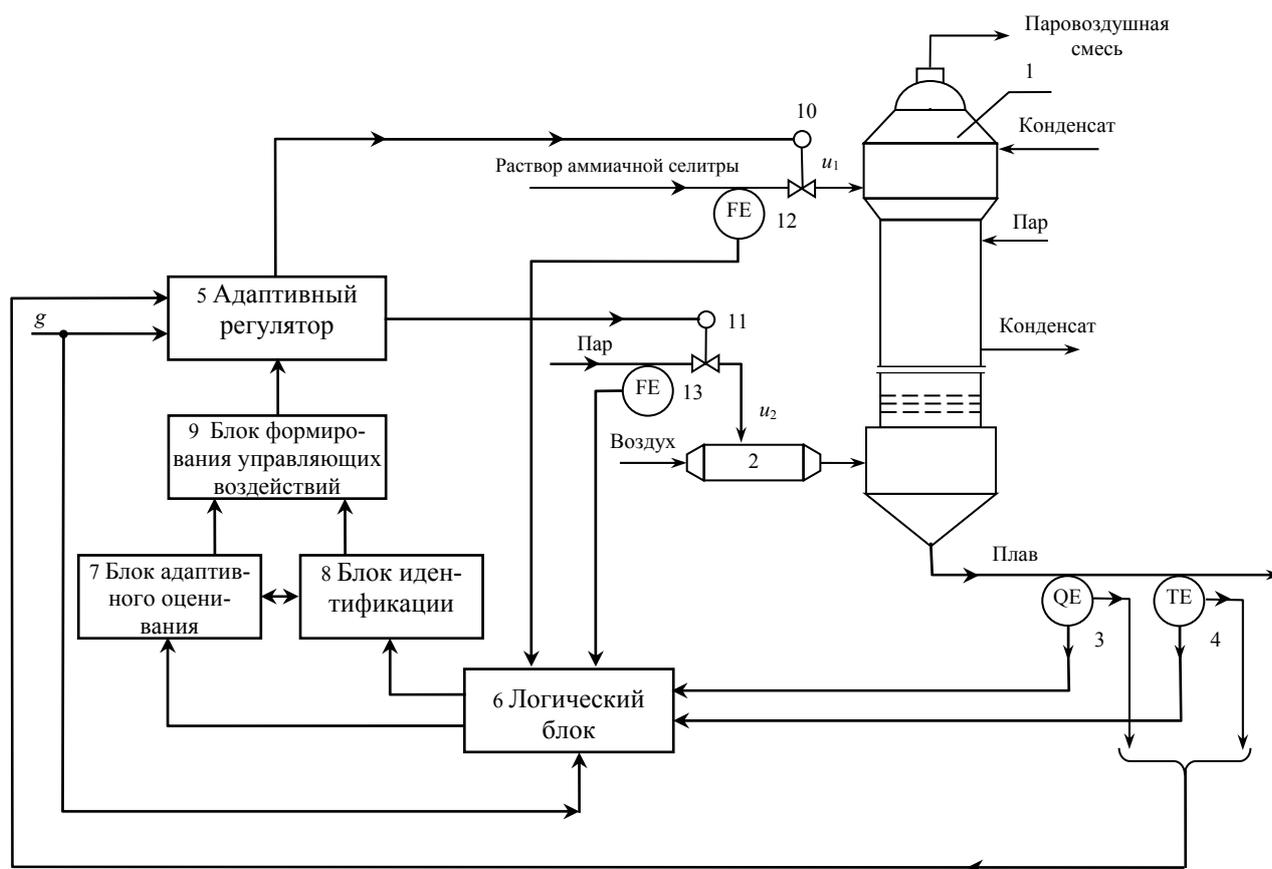


Рис.2. Функциональная схема адаптивной системы управления процессом выпаривания раствора аммиачной селитры

Экспериментальные исследования показали, что по сравнению с обычным управлением при адаптивном управлении величина среднеквадратического отклонения реализаций концентрации раствора аммиачной селитры уменьшается со значения 0.051 до 0.022 соответственно. При этом основная доля экономического эффекта от реализации разработанной системы адаптивного управления достигается за счет снижения расхода пара для выпаривания раствора аммиачной селитры на 1223,2 Гкал. в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основе концепций системного анализа, теории адаптивных систем управления, динамической фильтрации и методов решения некорректных задач разработана конструктивная методология регулярного адаптивного оценивания состояния технологических объектов управления в условиях модельной неопределенности.

В итоге получены следующие результаты:

1. Разработаны алгоритмы регулярного оценивания ковариационной матрицы шума объекта на основе методов решения нелинейных функциональных уравнений с учетом возможной неразрешимости линеаризованной системы с особой или плохо обусловленной матрицей, позволяющие обеспечить сходимость искомого решения и тем самым повысить точность процедуры адаптивного оценивания.

2. Предложены алгоритмы адаптивного регулярного оценивания состояния объектов управления в условиях последовательно коррелированной помехи в измерениях на основе сингулярного разложения матриц, позволяющие обеспечить привязку теоретической ковариационной матрицы ошибки оценивания к реальным значениям, и тем самым ликвидировать оторванность процесса вычисления матрицы усиления калмановского фильтра от реальных измерений.

3. Предложены алгоритмы адаптивного регулярного итерационного оценивания ковариационных матриц шума объекта и помехи измерений на основе обновляющего процесса и метода секущих, не требующие вычисления или аппроксимации частных производных, позволяющие обеспечить сходимость искомым приближений и адаптировать фильтр к изменяющимся значениям ковариационных матриц возмущающих воздействий.

4. Разработаны регулярные алгоритмы адаптивного оценивания матричного коэффициента усиления калмановского фильтра на основе метода проекции градиента. Получены выражения для оценки погрешности правой части матричного уравнения для вычисления коэффициента усиления, позволяющие не производя непосредственного решения матричного уравнения, оценивать погрешность его решения. По найденным выражениям можно также получать априорную информацию о порядке погрешности решения для получения качественных выводов о том, с какой точностью разумно далее решать систему.

5. Предложены регуляризованные алгоритмы двухэтапного адаптивного оценивания при коррелированных шумах объекта, позволяющие устранить жесткую зависимость матричного коэффициента усиления фильтра от априорных данных. Показано, что при решении этой задачи весьма эффективными оказываются методы псевдообращения, регуляризации, l_1 – минимизации и умеренной порчи с выбором параметра регуляризации на основе способов квазиоптимальности, перекрестной значимости и L -кривой.

6. Предложены регулярные алгоритмы адаптивного оценивания в условиях автокоррелированности шума объекта и помехи измерений на основе методов решения приближенных вырожденных или плохо обусловленных стохастических систем линейных алгебраических уравнений. При формировании алгоритмов оценивания использована статистическая форма принципа невязки, гарантирующая получение оптимальных регуляризованных оценок решений приближенных стохастических систем уравнений.

7. Разработаны регулярные алгоритмы адаптивного оценивания при взаимной коррелированности шума объекта и помехи измерений на основе декоррелирования шума и помехи, и методов регуляризации решения операторных уравнений с положительно определенными матрицами и приближенно заданной правой частью, позволяющие повысить точность вычисления коэффициента усиления динамического фильтра.

8. Предложены регулярные алгоритмы адаптивного оценивания параметров матриц уравнения динамики объектов управления и ковариационных матриц возмущений на основе концепций временных рядов, позволяющие синтезировать адаптивные системы управления в условиях высокой степени модельной неопределенности.

9. Разработаны регулярные алгоритмы адаптивного оценивания переходной матрицы объектов управления на основе методов решения вариационных неравенств в рамках принципа итеративной регуляризации, обеспечивающие состоятельность и сходимости искомых оценок.

10. Предложены регулярные алгоритмы адаптивного оценивания параметров переходной матрицы управляемых объектов и коэффициента усиления динамического фильтра калмановского типа в условиях полной априорной модельной неопределенности, позволяющие регуляризовать рассматриваемую задачу оценивания на основе регулярных методов минимизации функционалов.

11. Предложены алгоритмы синтеза систем управления динамическими объектами с использованием прогнозирующих моделей на основе концепций регулярного адаптивного оценивания в условиях различной степени модельной неопределенности, способствующие повышению точности вычисления вектора переменных состояния и управляющих воздействий.

12. На основе предложенных регулярных алгоритмов адаптивного оценивания состояния объектов управления в условиях модельной неопределенности разработаны адаптивные системы управления технологическими процессами грануляции-сушки кальций-сульфатфосфатной пульпы в производстве PS-Агро и выпаривания растворов аммиачной селитры. Предложенные адаптивные системы управления указанными процессами позволяют стабилизировать технологические режимы протекания процессов и повысить эффективность их функционирования.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARD SCIENTIFIC DEGREE OF
DOCTOR OF SCIENCES 16.07.2013.T.02.01 AT TASHKENT STATE
TECHNICAL UNIVERSITY AND INSTITUTE OF ENERGY
AND AUTOMATION**

TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY

ZARIPOV ORIPJON

**METHODS AND ALGORITHMS OF REGULAR ADAPTIVE STATE
ESTIMATION OF STOCHASTIC OBJECT CONTROL**

**05.13.07 - Automation and control of technological
processes and manufactures
(technical sciences)**

ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION

Tashkent – 2014

The subject of doctoral dissertation in registered Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan in number 30.09.2014/B2014.5.T308.

Doctoral dissertation is carried out at Tashkent State Technical University.

The full text of doctoral dissertation is placed on web-page of Scientific Council on award of the scientific degree of doctor of sciences 16.07.2013.T.02.01 at the Tashkent State Technical University and the Institute of Energy and Automation to the address www.tdtu.uz.

Abstract of dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English) is placed on the web-page to address www.tdtu.uz and Information-educational portal "ZIYONET" to the address www.ziyonet.uz.

**Scientific
consultant:**

Igamberdiev Khusan Zakirovich
doctor of technical sciences, professor

**Official
opponents:**

Bekmuratov Tulkin Fayzievich
Academician of the AS RUz,
doctor of technical sciences, professor

Adilov Farux Tulkunovich
doctor of technical sciences

Kaipbergenov Batirbek Tulepbergenovich
doctor of technical sciences

**Leading
organization:**

**State Joint Stock Company
«UZKIMYOSANOAT»**

Defense of dissertation will take place in "___" _____ 2014 at 10⁰⁰ o'clock at a meeting of the scientific council 16.07.2013.T.02.01 at the Tashkent state technical university and the Institute of Energy and Automation. (Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: (99871) 246-46-00; fax: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz).

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

Abstract of dissertation sent out on "___" _____ 2014 year
(mailing report № ____, on "___" _____ 2014 year)

N.R.Yusupbekov
Chairman of scientific council on award of
scientific degree of doctor of sciences,
doctor of technical sciences, professor,
Academician of the AS RUz

A.R.Marakhimov
Scientific secretary of scientific council,
doctor of technical sciences, professor

Sh.M.Gulyamov
The chairman of scientific seminar under
scientific council, doctor of technical sciences, professor

ANNOTATION OF DOCTORAL DISSERTATION

Topicality and demand of the subject of dissertation. Comprehensive measures taken by the Government of the Republic of Uzbekistan for the development of a regional and territorial control and automated creation system of a single information space, focused on the widespread introduction of information control systems based on modern information and communication technologies. In this regard, the development of efficient methods and algorithms for state estimation and control of various functional purpose and is of particular relevance, however, remains not completely solve theoretical and applied problems of wide national economic significance. The development of complex information processing systems and controls, in particular, systems of technological objects, stimulated constant increase of the performance requirements of accuracy. This task is especially difficult in real conditions of a priori uncertainty and unexpected variability of the models and the external environment. Under these conditions the introduction of the adaptation and monitoring of the system carried is expedient in relation to significant disturbance model, which can not be considered as a simple evaluation of interfering factors and which will significantly improve the quality of the system as a whole. Thus, the development and the development of effective means and methods of adaptation of the control system in conditions of high uncertainty a priori in the real-time rate will effectively handle the data of observations significantly improve the accuracy and reliability of information processing and control.

Demand dissertation is characterized by the widespread introduction of modern concepts of automation and control of complex engineering in various industries, including chemical, associated with tasks requiring close attention estimation, identification and management of objects in an uncertain environment.

This research work is focused on ensuring implementation of the Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan the №PP-677 of 27.07.2007 y. "About the Program of modernization, technical and technological modernization of the enterprises of chemical industry", which states that one of the main objectives of the Programme is to improve the technical level and production efficiency, ensuring operational reliability and environmental safety of chemical production by introduction of modern high technology equipment and advanced process control systems.

Accordingly, the solution of these problems requires special research and development aimed at further improving the efficiency of process control systems based on modern information technology.

Thus the practical implementation of these methods of adaptation and control faced with the need to solve a variety of inverse problems of managed dynamics objects. Problems of this type are essentially ill-conditioned. They belong to the class of ill-posed problems. In this situation, the problem of synthesis methods and algorithms for adaptive state estimation control objects in the face of

uncertainty should be considered in terms of the theory of regular evaluation, defining the methodology for constructing stable algorithms for processing the current information. In this regard, the development of efficient methods and algorithms for regular adaptive state estimation process facilities control under model uncertainty and synthesis of computing circuits for their implementation acquires great importance.

Conformity of research on priority directions on development of science and technologies of the Republic of Uzbekistan. Thesis completed in accordance with the priority areas of science and technology: the PPI-17 - "Development of modern information systems, intelligent control tools and training, scientific and technical databases and software products that provide broad development and implementation of information and communication technologies" and PPI-5 - "The development of information technology, telecommunications networks, hardware and software tools, methods and systems for intelligent control and training aimed at improving the information society".

International review of scientific researches on theme of dissertation. In the theory of stochastic control a large number of the methods and algorithms describing various approaches to obtaining numerical solutions of various tasks is developed. Various optimum and suboptimum strategy of control are offered. Classes of strategy and the main characteristics of stochastic control are defined. In a class of adaptive control systems effective methods and algorithms of estimation, identification and decision-making in the conditions of various degree of aprioristic uncertainty are developed. In this area certain success by scientists of the countries of USA, Great Britain, Russia, Japan, China, South Korea, Germany, Holland, France, Italy, Australia and others was achieved.

In publications of the international companies and scientific centers, such as Honeywell, Siemens, Mitsubishi, ABB, Invensys, Festo, GE Fanuc, Rockwell, Advantech, Evoc, Kontron, Eurotech, Intel, SeaTech, MOX, Wonderware, Rockwell Automation, Iconics, Trace-Mode et al. noted that the development of modern management techniques occurs in the direction of the modification and improvement of the systems of optimal and adaptive control.

However, as the complexity of conditions of facilities control related primarily to the uncertainty of their description, actively conducting research aimed at developing new trends and applications, based on the introduction of the principles of adaptation and control of the system with respect to the essential model violations. Analytical study of scientific literature in this area shows that further improvement of control systems dynamic objects are inextricably linked to the development of new and modification of the known methods for the synthesis of control systems of different functionality in terms of model uncertainty and the signal based on the concepts of adaptive filtering.

Degree of study of problem. Analysis of the scientific literature of recent years in research on the development of methods and algorithms for adaptive state estimation process facilities control under model uncertainty indicates that

achieving significant theoretical and practical results in this area. Published a large number of papers devoted to the problems of adaptation and control the functioning of control systems, developed general theoretical concepts, increasing the number of solutions to practical problems. There are various ways of developing and constructing high-precision filters, operating under conditions of varying degrees of a priori uncertainty of the statistical characteristics of signals and interferences. Various theoretical and applied aspects in this area in a large number of monographs, collections, and articles. Here we should mention the work of scholars such as Aliev R., Andrews A.P., Brayson A., Bucy R., Izerman R., Jaegeol Yim, Jaehun Joo, Kalman R., Lainiotis D., Landau I.D., Leondes C., Ljung L., Simon D., Tao G., Wiener N., Zhou J., Abdullaev D.A., Andrievskiy B.R., Bekmuratov T.F., Bukov V.N., Bulichev Yu.G., Verlan` A.F., Igamberdiev Kh.Z., Kadirov A.A., Kamilov M.M., Krasovskiy A.A., Nikiforov V.O., Ogarkov M.A., Polyak B.T., Pupkov K.A., Semushin I.V., Sinisin I.N., Fradkov A.L., Sipkin Y.Z., Yusupbekov N.R., Yadikin I.B., Yakovlev V.B. and others. However, the increasing complexity and expansion of the objects of scientific research requires the development of new efficient methods and algorithms for the detection and diagnosis of disorders, identification, adaptive state estimation of stochastic control objects in the face of uncertainty. However, the literature is insufficient to assessing the potential of regular methods of synthesis problems in the subsystems of the adaptive state estimation of stochastic control objects in the face of uncertainty. In imperfectly developed regular methods and algorithms to detect and adapt to the class of stochastic control systems in terms of model uncertainty. Demands the development and regular methods of adaptive state estimation of stochastic control objects on the basis of identification and direct approaches and algorithms for adaptive estimation in the presence of uncertainty in the model of the dynamics of the object. Also, it is helpful to carry out the development of methods and algorithms for regular joint detection, identification and parry violations based on modern concepts of regular methods that will expand the range of algorithmic procedures for constructing and implementing adaptive control systems stochastic objects in conditions of uncertainty and improve the efficiency of their operation. In connection with the above-noted there is an urgent need for further modification and creation of efficient methods and algorithms for regular adaptive state estimation of stochastic control objects in a model uncertainty.

Connection of dissertational research with the plans of scientific-research works is reflected in the following projects: State Science and Technology Project №A-14-045 - "Development and implementation intellectualized control information systems for the industrial production of continuous nature of the process" (2006-2008 yy); №YA-17-05 - "Development of regular algorithms and software tools for synthesis of stochastic control systems continuous technological objects" (2010-2011 yy); №OT-F1-080 - "Development of concepts and principles of construction of intelligent control systems for complex technological processes and manufactures" (2007-2011 yy); №F-4-56 -

"Development of theoretical foundations and methods of structural and parametric synthesis of intelligent control systems for complex technological objects based on fuzzy multiple representations" (2012-2016 yy).

Purpose of research is to develop methods and algorithms for regular adaptive state estimation process facilities control under model uncertainty and their practical application in solving problems of automation and control of specific production processes.

Tasks of research:

systematic analysis of the development theory and methods for adaptive filtering in the synthesis tasks of control systems for dynamic systems;

development of regular algorithms of adaptive estimation on the basis of the identification approach;

development of regular algorithms of adaptive estimation of the gain matrix of Kalman filter;

development of regular algorithms of adaptive estimation in the presence of uncertainty in the model of the dynamic object;

application of the developed methods and algorithms for regular adaptive estimation in problems of technological objects.

Object of research methods and algorithms for dynamic filtering and state estimation of stochastic control objects.

Subject of research - methods and algorithms for regular adaptive state estimation of stochastic control objects.

Methods of research. The thesis used the general methodology of system analysis, identification, dynamic filtering, adaptive control and solving ill-posed problems.

Scientific novelty of dissertational research consist in the following:

the algorithms of the regular evaluation of noise covariance matrix of the object developed, based on methods for solving nonlinear functional equations, taking into account the possible undecidability of the linearized system with singular or ill-conditioned matrix, allowing for the convergence of the desired solution, and thereby improve the accuracy of adaptive estimation procedures;

proposed adaptive algorithms regular state estimation control objects in a consistently correlated noise in measurements based on singular value decomposition of matrices, allowing for binding of theoretical covariance matrix of the estimation error to the actual value, and thereby eliminate the isolation process of calculating the gain matrix of Kalman filter from actual measurements;

proposed adaptive algorithms regular iterative estimation of noise covariance matrices of the object and noise measurements based innovation process and secant method that does not require calculation or approximation of partial derivatives, allowing the filter to adapt to the changing values of the covariance matrices of disturbances;

developed regular algorithms of adaptive estimation of the gain matrix of Kalman filter based on the gradient projection method and derive expressions for

the error estimates right side of the matrix equation for the calculation of the gain, allowing not made directly solving the matrix equation to estimate the error of his decision;

proposed regular algorithms of adaptive estimation under auto- and cross-correlation of noise and interference measurements of the object on the basis of approximate methods for solving ill-conditioned or singular stochastic systems of linear algebraic equations which can improve the accuracy of calculating the gain of a dynamic filter;

developed regular algorithms of adaptive estimation of the transition matrix of control objects on the basis of methods for solving variational inequalities in the framework of the principle of iterative regularization to ensure consistency and convergence of the required assessments;

proposed regular algorithms of adaptive parameter estimation of the transition matrix of managed objects and gain dynamic Kalman filter type in a complete a priori model uncertainty, allowing estimation regularize the problem under consideration on the basis of regular methods of minimizing functionals.

Practical results of research consist in the following:

developed a software package ARES (adaptation, regularization, estimation, system), consisting of software modules designed for software and algorithmic problem solving support adaptive state estimation of dynamic systems;

based on the results of industrial experiments in the normal functioning of the mathematical models of granulation-drying calcium sulfate processes and phosphate pulp production PS-Agro and granulation of ammonium nitrate;

developed an adaptive state estimation subsystem managed objects according to different degrees of model uncertainty using parametric contours as well as the adaptation of the signal;

proposed automation and process control of granulation-drying calcium sulfate and phosphate sludge granulation of ammonium nitrate with an appropriate technical support to expand the performance of the unit at 2.25% and reduce steam consumption at 1,223.2 Gcal. per year, respectively.

Reliability of obtained results is proved by methodologically sound theoretical calculations; application of theoretical concepts grounded adaptive estimation and control of dynamic objects on the basis of methods for solving ill-posed problems; using proven methods and algorithms of modern control theory; the required degree of convergence of the proposed methods and algorithms for adaptive estimation; with the results of theoretical and applied research, and their mutual consistency.

Theoretical and practical value of research results. The theoretical significance of the research results is to develop constructive methods and algorithms for regular adaptive state estimation process facilities control under model uncertainty.

The practical significance of the work results is to develop mathematical and algorithmic support tasks adaptive estimation and synthesis of control systems in a

wide class of technological objects. The developed methods and algorithms for adaptive state estimation of stochastic control objects in the conditions of a priori uncertainty can be widely used in the construction of the functional structure and automate the design of adaptive control systems of technological processes with the continuous nature of production.

Realization of results. Algorithms of adaptive estimation and functional diagrams of automation controls are introduced at the enterprises of State Joint Stock Companies «UZKIMYOSANOAT» in systems of automation of control of technological processes of granulation drying calcium-sulfate of a phosphatic pulp on Almalyk Stock Company "AMMOPHOS-MAXAM" (Act of 03.10.2014 y.) and evaporation of ammonium nitrate and on Stock Company «FARG‘ONAAZOT» (Act of 21.05.2014 y.) with a total annual economic benefit 83 million. 76 thous. soums (reference of State Joint Stock Companies «UZKIMYOSANOAT» about introduction for №01-2304/I of 17.11.2014 y.).

Approbation of work. Results of the study were tested at 32 scientific conferences, congresses and seminars, including 25 international, "Current status and prospects of power development" (Tashkent, 2006); "Technology and communication technologies" (Tashkent, 2008); "Modern technology and the technology of mining industry and the ways of their development" (Navoi 2008, 2013); «World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation - WCIS-2008-2012» (Tashkent, 2008-2012); «Congress of the World Mathematical Society of Turkic Countries» (Almaty, 2009); "Integral equations of 2009" (Kiev, 2009); "Control and optimization of dynamic systems - CODS-2009" (Tashkent, 2009); "Mathematical Methods in Engineering and Technology - MMET-23" (Saratov, 2010); «International Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing - ICAFS - 2010-2014» (Prague, 2010; Lisbon, 2012; Paris, 2014); «International School and Conference on Foliations, Dynamical Systems, Singularity Theory and Perverse Sheaves» (Samarkand, 2009); «International training-seminars on mathematics in conjunction with the joint mathematics meeting» (Samarkand, 2011); "Innovation" (Tashkent, 2010-2013); "Actual Problems of Applied Mathematics and Information Technology - Al-Khwarizmi - 2012 - 2014" (Tashkent, 2012, Samarkand, 2014); "Integrated models and soft computing in artificial intelligence" (Kolomna, 2013); «International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control -« ICSCCW-2013 »(Izmir, 2013); "Modern materials, equipment and technology in engineering" (Andijan, 2014) and 7 Republican conferences.

Publication of results. On the topic of the dissertation is published 60 scientific works, including - 2 monographs, 20 journal articles, 5 of them - in foreign journals, and has received 10 certificates of registration programs for computer.

Structure and volume of dissertation. Dissertation is consisted of introduction, five chapters, conclusion, bibliography, 4 applications and contains 198 text pages, includes 12 figures and 5 tables.

MAIN CONTENTS OF DISSERTATION

In the introduction the urgency and relevance of the dissertation topic, stated purpose and objectives, identified the object and subject of research, identify relevant research priority areas of science and technology of the Republic of Uzbekistan, presented scientific novelty and practical results of the study proved the reliability of the results obtained revealed theoretical and practical significance the results obtained are given a list of implementing the findings of research, testing operation, data from published work and structure of the dissertation.

In the first chapter of the thesis deals with the development theory of systems analysis and adaptive filtering methods in synthesis of control systems for dynamic systems problems. In the modern theory and practice of automatic control problems of adaptation has received increasing attention. Solving these problems allows for a wide variety of technological processes control under incomplete priori and current information regarding the characteristics of the object and the external environment. Here it should be noted that the emergence of a priori uncertainty occurs at the stage of formation of physical, chemical or technological model of automated facilities and processes. The current uncertainty is usually caused by uncontrolled random nature of the changes of static and dynamic properties of the managed objects and effects of the environment on the object in the normal operation mode. Adaptive systems are among the most complex in the existing hierarchy of control systems. Their complexity is determined not only by their own topological features, the structure of telecom operators, the variety of the mathematical apparatus, especially technical implementation, etc. The complexity of the adaptation problems in control systems is the depth of the concept of adaptive behavior, be it technical, biological or other system in its multialternative, in the variety of the nature of uncertainty information about the controlled process and the external environment. This is due primarily to the fact that the creation of control systems of technological processes complex usually do not have a reliable model objects. None of the existing theories can not claim that it only gives a correct description of the systems. Rather, there are a range of theories that treat these problems. With currently placed only narrowly considering individual processes and only at certain levels of description implies a unilateral view of the system, does not allow reliable estimates of all processes. Thus, it can be stated that the introduction of adaptation and control of the system is expedient in relation to significant infringements model, which can not be regarded as mere confounding factors and evaluation which will significantly improve the quality of the system as a whole. Thus for the correct formulation and qualitative problem solving state estimation and control objects and assessment of disorders must consider a number of points, the most important of which are the following: the type of uncertainty (modeling or parametric), the type of uncertainty (uncertainty

only in the first phase, the design phase, or at both stages (design and control of the current process). The model uncertainty means that there is no complete assurance that any mathematical model should be used for certain processes, and parametric - that the general structure of equations for each manufacturing process is known, but there are uncertainties in the model parameters.

Summarizing the above there may be concluded that the model uncertainty shows a conceptual model of the physical process in view of the fact that the process of displaying virtually reality by using simplified models. In this model the uncertainty in turn initiates mathematical uncertainty. This is because the conceptual model in this case is usually implemented as a system of equations to be solved, as a rule, approximate methods. This gives rise to a kind of uncertainty in the results, which nevertheless can be quantified.

This situation requires the development of new approaches to the problem adaptive estimation of the managed objects state and systems in terms of the approximate input data on the basis of methods to ensure comparability in terms of accuracy models of controlled systems with observations. In the framework decision multifaceted problem of state estimation in the above sense is advisable to put the concept of sharing the general theory of dynamic assessment and methods for solving inverse ill-posed problems. Successful in this regard seems methodology gradation system synthesis problems of adaptive schemes, based in particular on the involvement of the concepts of inverse dynamic problems of managed objects and regular methods. These circumstances indicate the need for methods and algorithms for regular adaptive state estimation process facilities control under model uncertainty and synthesis of computing schemes of their implementation in solving problems of automation and control a particular process of industrial production.

The second chapter is devoted to the development of regular algorithms adaptive state estimation control objects on the basis of the identification approach. Consider a linear or linearized continuous dynamic system described by the difference in time by the following equations

$$x_{i+1} = A_i x_i + B_i u_i + \Gamma_i w_i, \quad (1)$$

$$z_i = H_i x_i + v_i, \quad (2)$$

where the x_i - state vector of dimension n , u_i - control vector of dimension l ; z_i - observation vector of dimension m , w_i and v_i - the noise vector object and interference observation dimension q and p , respectively, is a sequence of the form of a Gaussian white noise with characteristics of $E[w_i] = 0$, $E[w_i w_k^T] = Q_i \delta_{ik}$, $E[v_i] = 0$, $E[v_i v_k^T] = R_i \delta_{ik}$, $E[w_i v_k^T] = 0$; A , B , D and H - matrices of appropriate dimensions. These sequences do not depend on a random initial state of the system x_0 with a mean \bar{x}_0 , and covariance of P_0 .

For estimation the state vector x_i of the dynamic system (1), (2) commonly used conventional Kalman filter equations of type

$$\hat{x}_{i|i} = A_{i,i-1}\hat{x}_{i-1|i-1} + B_{i,i-1}u_{i-1} + K_i [z_i - B_{i,i-1}u_{i-1} - H_i\hat{x}_{i|i-1}], \quad (3)$$

$$K_i = P_{i|i-1}H_i^T [H_iP_{i|i-1}H_i^T + R_i]^{-1}, \quad (4)$$

$$P_{i|i-1} = A_{i|i-1}P_{i-1|i-1}A_{i|i-1}^T + Q_{i-1}, \quad P_{i|i} = P_{i|i-1} - K_iH_iP_{i|i-1}, \quad \hat{x}_{0|0} = \mu_0, \quad P_{0|0} = M_0. \quad (5)$$

However, the scope of the Kalman filter procedure (3) - (5) is limited because the algorithm requires a precise knowledge of system parameters. We assume that the matrix A , B , D and H correspond to their nominal values, but the covariance matrix Q and R are unknown. Then, for the implementation of dynamic filters (3) - (5) it is advisable to use an identification approach is to determine the covariance matrices Q and R followed by calculating the gain of K according to the expressions (4) and (5).

In the following equations, the synthesis algorithms, adaptive estimation is not explicitly taken into account control u_i . However, control is always considered to be a known function of time. Therefore, it can be considered by the dependence on the discrete time i . A significant part of the algorithms of identification or estimation of noise covariance matrix Q_i and R_i may be based on the methods of analysis are upgraded sequentially or discrepancy in measurements $v_i = z_i - H_i\hat{x}_{i|i-1}$ Kalman filter. To determine the covariance matrix Q will use equation:

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^{k-1} HA^j \tilde{A}Q\tilde{A}^T (A^{j-k})^T H^T &= (P^i H^T)^T (A^{-k})^T H^T - \\ &- HA^k (P^i H^T)^T - \sum_{j=0}^{k-1} HA^j \hat{V} (A^{j-k})^T H^T, \quad k=1,2,\dots,n, \\ \hat{V} &= A \left[-K(P^i H^T)^T - (P^i H^T)K^T + K\hat{C}_0K^T \right] A^T. \end{aligned} \quad (6)$$

Evaluation matrix measuring noise based on the use of the equation $C_0 = E(v_i v_i^T) = HP^i H^T + R$, i.e. $\hat{R} = \hat{C}_0 - H(P^i H^T)$. We rewrite the system of equations (6) in the form

$$f(q) = 0,$$

where $q = \{q_1, q_2, \dots, q_q\}$ - vector, composed of covariance matrix Q elements.

To calculate the vector q will use Newton's method

$$q_{r+1} = q_r - [F(q_r)]^{-1} f(q_r), \quad r = 0, 1, \dots,$$

where $F(q_r)$ - Jacobi matrix, taken at $q = q_r$.

In the process of calculating the vector q may be cases when the matrix $F(q_r)$ can be not only ill-conditioned, but degenerate in a neighborhood of some point q^* . For the solution of the system

$$F(q_r)\xi_r = -f_r, \quad q_{r+1} = q_r + \xi_r$$

is it appropriate to use the following computational scheme M.M.Lavrentev:

$$\alpha \xi_{r,n} + F(q_r) \xi_{r,n} = \alpha \xi_{r,n-1} - f_r, \quad n = 1, 2, \dots \quad (7)$$

Regularization in (7) is carried out by a large number of iterations for a fixed value of the regularization parameter α . It is shown that the determination of the parameter vector q_r can also be made on the basis equation of the form:

$$\Gamma(h_r, q_r) \xi_r = f(q_r), \quad q_{r+1} = q_r - \xi_r, \quad r = 0, 1, 2, \dots,$$

where $\Gamma(h_r, q_r)$ - difference matrix, h_r - the real numbers from a given convergent sequence.

In a case where model uncertainty in the measurements is an additive Markov sequence for the synthesis of the adaptive filter is useful to define a new vector of measurements $\mu_i = z_{i+1} - \Psi_i z_i$, whereby we obtain the following system model

$$x_{i+1} = A_i x_i + w_i,$$

$$\mu_i = H_i^* x_i + \varepsilon_i,$$

where $H_i^* = H_i A_i - \Psi_i H_i$, $\{\varepsilon_i\}$ - white sequence with zero mean, satisfying the following relationships

$$E \left\{ \begin{bmatrix} w_i \\ \varepsilon_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_\tau^T & \varepsilon_\tau^T \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} Q_i & \hat{S}_i \\ \hat{S}_i^T & \hat{R}_i \end{bmatrix} \delta_{i-\tau},$$

$$\hat{S}_i = Q_i H_i^T, \quad \hat{R}_i = H_i Q_i H_i^T + R_i,$$

Ψ_i - transition matrix defined by expression $v_{i+1} = \Psi_i v_i + \xi_i$.

Then the estimate of the vector of the state variable can be defined on the basis of the expression

$$\tilde{x}_{i+1} = T_{i+1}^{(1)} \hat{x}_i + T_{i+1}^{(2)} \mu_{i+1},$$

where matrix $T_{i+1}^{(1)}$ and $T_{i+1}^{(2)}$ are determined based on singular value decomposition matrix using computational procedures Kalman filtering.

For joint estimation of the covariance matrices of noise and interference measurements of the object will use the system of equations

$$E(v_i v_i^T) - H P_{i|i-1} H^T - R = 0,$$

$$E(v_i v_{i-1}^T) = H A (I - K_{i-1} H) [P_{i-1|i-2} H^T - K_{i-1} R] = 0,$$

.....

$$E(v_i v_{i-m}^T) = H A (I - K_{i-1} H) A \dots A (I - K_{i-m} H) [P_{i-m|i-m-1} H^T - K_{i-m} R] = 0. \quad (8)$$

Rewrite the system of equations (8) in the form

$$S(c) = 0, \quad (9)$$

where $S(c)$ - nonlinear operator E^β on E^β , $\beta = q + p$, $c = \{c_1, c_2, \dots, c_q; c_{q+1}, c_{q+2}, \dots, c_p\}$ - vector consisting of the diagonal elements of the covariance matrices Q and R , i.e.

$$c_1 = q_{11}, c_2 = q_{22}, \dots, c_q = q_{qq}; c_{q+1} = r_{11}, c_{q+2} = r_{22}, \dots, c_p = r_{pp}.$$

In the above conditions required to solve the system of nonlinear equations of the form

$$S_i(c_1, c_2, \dots, c_\beta) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, \beta. \quad (10)$$

To solve the equation (10) will use the secant method in β -dimensional space. According to the method, secant equation $\beta+1$ points in β -dimensional space, and β hyperplanes can be written as:

$$c^{i_\gamma} = (c_1^{i_\gamma}, c_2^{i_\gamma}, \dots, c_\beta^{i_\gamma})^T, \quad \gamma = 1, 2, \dots, \beta,$$

$$L^k(c) \equiv \sum_{j=1}^{\beta} a_j^k c_j + a_{\beta+1}^k = 0, \quad k = 1, 2, \dots, \beta.$$

In this hyperplane must satisfy the condition of the form:

$$L^k(c^{i_\gamma}) = S_k(c_\gamma^i), \quad \gamma = 0, 1, 2, \dots, \beta, \quad k = 1, 2, \dots, \beta,$$

or

$$L^k(c^{i_\gamma}) - L^k(c^{i_0}) \equiv \sum_{j=1}^{\beta} a_j^k (c_j^{i_\gamma} - c_j^{i_0}) = S_k(c^{i_\gamma}) - S_k(c^{i_0}), \quad \gamma = 1, 2, \dots, \beta, \quad k = 1, 2, \dots, \beta.$$

Then regularized embodiment the iterative algorithm for computing based vector (9) can be written as:

$$c^{i+1} = c^i - (S(c^i, \varphi(c^i)) + \alpha_i B_i)^{-1} S(c^i), \quad (11)$$

where

$$\varphi_\gamma(c^i) = c_\gamma^i - S_\gamma(c^i), \quad \alpha_i = \mathcal{B}(i+1)^{-1}, \quad \mathcal{B} \gg 0.$$

It can be shown that the iterative process (11) converges from any initial approximation $c^0 \in N_c$, i.e.

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \|c^\bullet - c^i\| = 0,$$

where

$$N_c = \{\|c - c^\bullet\| \leq \rho\}, \quad \rho > 0 \text{ - fairly small number};$$

$$c^\bullet = (c_1^\bullet, c_2^\bullet, \dots, c_\beta^\bullet) \text{ - the only solution of the system}$$

$$S(c) = 0, \quad c = (c_1, c_2, \dots, c_\beta), \quad S = (S_1, S_2, \dots, S_\beta).$$

Note that the iterative algorithm (11) does not require the computation or approximation of the partial derivatives that favorably distinguishes it from the iterative algorithms of the first and second order.

Thus, these algorithms are used to obtain a regular assessment of elements of noise covariance matrices of the object and noise measurements to calculate the gain Kalman filter, and thus adapt the filter in relation to the changing external interference-signal conditions.

In the third chapter presents the results of the regular development algorithms of adaptive estimation of the gain matrix of dynamic filter. Let us consider a dynamic system described by equation

$$x_{i+1} = Ax_i + \Gamma w_i, \quad z_i = Hx_i + v_i. \quad (12)$$

Assume that a covariance of noise Q_i and R_i are unknown. To adapt the filter $S = PH^T - KR_0$ will use a ratio which is valid for the optimal filter. Let us consider the problem of minimizing the functional, defined as

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m s_{ij}^2, \quad (13)$$

where s_{ij} - (i, j) - element of the matrix S .

To determine the gain K , which reduces the matrix S to zero, we use a gradient method projection

$$k_{i+1}^r = P_{\mathcal{K}}(k_i^r - \beta_i J'(k_i^r)), \quad i = 0, 1, \dots, \quad r = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (14)$$

where $P_{\mathcal{K}}(k)$ - k for the projection of the set \mathcal{K} , $\beta_i > 0$; \mathcal{K} - closed convex set.

For solution the problem of minimizing use Tikhonov regularization method. Then we can show that the sequence $\{v_i\}$, defined by the condition

$$v_{i+1} = P_{\mathcal{K}_0}(v_i - \beta_i (J'_i(v_i) + \alpha_i v_i)), \quad i = 1, 2, \dots; \quad v_1 \in \mathcal{K},$$

converges to a point $k_* \in \mathcal{K}_*$ with minimal norm, ie, $\lim_{i \rightarrow \infty} \|k_i - k_*\| = 0$, with

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \|v_i - k_i\| = 0, \quad \beta_i > 0, \quad \lim_{i \rightarrow 0} \beta_i = 0, \quad \alpha_i = i^{-1/3}, \quad \beta_i = i^{-1/2}, \quad i = 1, 2, \dots, \quad \mathcal{K} \neq \emptyset, \quad J_* = \inf_{k \in \mathcal{K}} J(k) > -\infty,$$

$$\mathcal{K}_* = \{k : k \in \mathcal{K}, J(k) = J_*\} \neq \emptyset, \quad \mathcal{K} = \{k : k \in \mathcal{K}_0\}.$$

To minimize the functional (13) in accordance with (14) it is necessary to calculate the partial differential equation, which is clearly present matrix S . To determine the S shall use the following expression

$$D \cdot \hat{S} = \hat{R}, \quad (15)$$

wherein

$$D = \left[[HA]^T \mid [H[A(I - KH)]A]^T \mid \dots \mid [H[A(I - KH)]^{j_{max} - 1}A]^T \right]^T, \\ \hat{R} = \left[[\hat{R}_1]^T \mid [\hat{R}_2]^T \mid \dots \mid [\hat{R}_{j_{max}}]^T \right]^T, \\ \hat{R}_0 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N y_i y_i^T, \quad \hat{R}_j = \frac{1}{N-j} \sum_{i=1}^{N-j} y_{i+j} y_i^T, \quad j = 1, 2, \dots, j_{max}, \quad j_{max} = \eta.$$

For the regularization the solution of (15) to estimate the error job right. We make the assumption that the errors of the correlation coefficients are subject to the normal distribution law. Then for a confidence level of $p = 0.95$ can write the following expression for the error of the right side of equation (15):

$$\Delta \hat{R} = \tilde{R} - \hat{R} = \left[[\Delta \hat{R}_{1(i)}]^T \mid [\Delta \hat{R}_{2(i)}]^T \mid \dots \mid [\Delta \hat{R}_{\eta(i)}]^T \right]_{\eta m \times 1}^T, \\ \Delta \hat{R}_{\eta(i)} = \left[\left[\pm \frac{2[1 - r_{\eta(1)}^2]}{\sqrt{N - \eta - 1}} \right] \mid \left[\pm \frac{2[1 - r_{\eta(2)}^2]}{\sqrt{N - \eta - 1}} \right] \mid \dots \mid \left[\pm \frac{2[1 - r_{\eta(mi)}^2]}{\sqrt{N - \eta - 1}} \right] \right]_{m \times 1}^T.$$

Then the norm of absolute and relative perturbation right side of equation (15) can be estimated on the basis of expressions:

$$\delta = \|\Delta\hat{R}\| = \|\tilde{R} - \hat{R}\| = 2 \left[\sum_{j=1}^{\eta} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \frac{|1 - r_{j(ki)}^2|^2}{N - j - 1} \right]^{1/2},$$

$$\delta_{omni} = \frac{\|\Delta\hat{R}\|}{\|\hat{R}\|} = 2 \left[\sum_{j=1}^{\eta} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \frac{|1 - r_{j(ki)}^2|^2}{N - j - 1} \right]^{1/2} / \left[\sum_{j=1}^{\eta} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m |r_{j(ki)}^2|^2 \right]^{1/2}.$$

The obtained expressions allow no decision is made directly assess error solutions of equation (15).

When solving various problems of estimation and filtering may be situations where noise and interference measurements of the object are mutually correlated auto and time. In the case of autocorrelation noise and interference measurements of the object model of the system can be written as:

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= A_{i+1|i} x_i + \Gamma_{i+1|i} \eta_i, \\ \eta_{i+1} &= \tilde{A}_{i+1|i} \eta_i + \tilde{\mu}_i w_{i+1}, \\ z_{i+1} &= H_{i+1} x_{i+1} + \xi_{i+1}, \\ \xi_{i+1} &= \tilde{H}_{i+1} \xi_i + \tilde{v}_i v_{i+1}, \end{aligned}$$

with a priori data

$$\begin{aligned} w_i &\sim N(0, Q_i), v_i \sim N(0, R_i), x_0 \sim N(\bar{x}_0, P_0), \eta_0 \sim N(\bar{\eta}_0, P_0^{(\eta)}), \\ \text{cov}(x_0, \eta_0) &= \text{cov}(x_0, w_i) = \text{cov}(\eta_0, w_i) = \text{cov}(\eta_0, v_i) = \text{cov}(v_i, w_i) = 0. \end{aligned}$$

To solve the problem in this case estimation gains K_{i+1} and $K_{i+1}^{(\eta)}$ are determined on the basis of expressions

$$K_{i+1} P_{i+1|i}^{(22)*} = P_{i+1}^{(1)}, \quad (16)$$

$$K_{i+1}^{(\eta)} P_{i+1|i}^{(22)*} = P_{i+1}^{(2)}, \quad (17)$$

where $P_{i+1|i}^{(22)*}$, $P_{i+1}^{(1)}$ and $P_{i+1}^{(2)}$ represent the covariance matrix of the estimation error.

To calculate the K_{i+1} and $K_{i+1}^{(\eta)}$ it is advisable to use regular procedure. Regular solution algorithm will be given relative to the equation (16). The resulting algorithm may also be used in the solution of equation (17). Equation (16) can be written as follows:

$$P_{i+1|i}^{(22)*T} k_{i+1,j} = p_{i+1,j}^{(1)},$$

where $k_{i+1,j}$ - j -th column of the matrix K_{i+1}^T , $j=1,2,\dots,n$; $d_{i,j}^\delta$ - j -th row of the matrix $P_{i+1}^{(1)T}$, $j=1,2,\dots,n$.

Here regularized assessment solutions $k_{i+1,j}$ can usefully be measured on the basis of the joint equations solution:

$$P_{i+1|i}^{(22)*T} k_{i+1,j}^{(\alpha)} + \alpha k_{i+1,j}^{(\alpha)} = P_{i+1|i}^{(22)*} \tilde{p}_{i+1,j}^{(1)}, \quad \left\| P_{i+1|i}^{(22)*T} k_{i+1,j}^{(\alpha)} - \tilde{p}_{i+1,j}^{(1)} \right\|^2 = Q_{\min} + \delta,$$

with $Q_{\min} = \inf_{k_{i+1,j} \in R^m} Q(k_{i+1,j})$, $Q(k_{i+1,j}) = \left\| P_{i+1|i}^{(22)*T} k_{i+1,j} - p_{i+1,j}^{(1)\delta} \right\|^2$, $\delta > 0$; regularization parameter α is determined from the condition of the residuals.

When considering the case mutually correlated noise and interference measurements of the object and model the system will be written as:

$$x_{i+1} = A_{i+1i}x_i + \Gamma_i w_{i+1},$$

$$z_{i+1} = H_{i+1}x_{i+1} + G_i v_{i+1},$$

with a priori data $w_{i+1} \sim N(0, Q_{i+1})$, $v_{i+1} \sim N(0, R_{i+1})$, $x_0 \sim N(\bar{x}_0, P_0)$,

$$\text{cov}\left(\begin{bmatrix} w_i \\ v_i \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} w_j \\ v_j \end{bmatrix}\right) = \begin{bmatrix} Q_i & C_i \\ C_i^T & R_i \end{bmatrix} \delta_{ij}, \quad Q_i \geq 0, \quad C_i \geq 0, \quad R_i > 0, \quad \text{cov}(x_0, w_i) = 0; \quad \text{cov}(x_0, v_i) = 0.$$

To determine the required matrix gain K_i^p we write the equation of the form:

$$L_i k_{i,j} = d_{i,j}^\delta = d_{i,j} + \delta d_{i,j}, \quad (18)$$

where $L_i = (R_i^T G_i^T)$ - linear operator from a Hilbert space H to H ; $k_{i,j}$ - i -th row of the matrix K_i^{pp} , $j = 1, 2, \dots, n$; $d_{i,j}^\delta$ - i -th column of the matrix $D_i = C_i^T \Gamma_i^T$ with the condition of the approximation of form $\delta^2 = \|\delta d_{i,j}\|_E^2$, $\delta_{\min}^2 < \|\delta d_{i,j}\|_E^2 < \delta_{\max}^2$, $j = 1, 2, \dots, n$; $d_{i,j}$ - current value of the right side of equation (18).

It is shown that for the regularization the solution of equation (18) are effective following regular procedures:

$$k_{i,j,\alpha} = (L_i + \alpha I)^{-1} d_{i,j}^\delta,$$

$$\bar{k}_{i,j,\alpha} = (L_i + \alpha I)^{-1} L_i k_{i,j,\alpha},$$

$$\alpha^2 k_{i,j,\alpha} + L_i^2 k_{i,j,\alpha} = L_i d_{i,j}^\delta.$$

In implementing the above algorithms regularization parameter α is advisable to determine, based on the residual method.

On the basis of methods for solving ill-posed problems can be shown that for significantly better conditioning system (18) it is advisable to consider a system of the form:

$$L_{i,\alpha} k_{i,j,\alpha} = \lambda d_{i,j}^\delta,$$

where

$$L_{i,\alpha} = [(\mathcal{D}_L + \alpha \mathcal{D}_L^{-1}) + (1 - \beta)(L_i - \mathcal{D}_L)],$$

$$\mathcal{D}_L - \text{diagonal matrix } L_i,$$

$$\lambda = \lambda_\alpha = (d_{i,j}^\delta, L_i \tilde{k}_{i,j,\alpha}) \left(\|L_i \tilde{k}_{i,j,\alpha}\|_E^{-2} \right),$$

$$\beta = 1 - \left[\left(\|\mathcal{D}_L + \alpha \mathcal{D}_L^{-1}\|_E^2 - \|\mathcal{D}_L\|_E^2 \right) \left(\|L_i - \mathcal{D}_L\|_E^{-2} \right) \right]^{1/2}, \quad \tilde{k}_{i,j,\alpha} - L_{i,\alpha} \tilde{k}_{i,j,\alpha} = d_{i,j}^\delta \text{ of the decision.}$$

The quantities λ and β are based on the selected parameter value α .

The chapter also discussed issues of constructing regularized adaptive estimation algorithms in terms of the correlated noise and adaptive estimation of the object based on the reduced-order suboptimal filter. It is shown that for their implementation efficient computational schemes are simplified regularization and the regularization method.

These algorithms are used to regularize the problem of adaptive estimation of the gain matrix of the dynamic Kalman filter type.

The fourth chapter is devoted to the development of regular algorithms of adaptive estimation in the presence of uncertainty in the object description. We assume that the model of a dynamical system described by equations of the form (12). Let us consider the system is stable, non-degenerate and completely observable: $\text{rank}[H^T \mid (HA)^T \mid \dots \mid (HA^{n-1})^T]^T = n$. The matrices A , D and the noise covariance matrices Q and R are assumed to be constant but unknown. The matrix H is assumed known. For the evaluation of matrix A appropriate to use the ratio of the form

$$\hat{Z}_{i+n,n} = \left[[\hat{Z}_{i+n,n}^1]^T \mid [\hat{Z}_{i+n,n}^2]^T \mid \dots \mid [\hat{Z}_{i+n,n}^n]^T \right]^T = \left[[H\hat{A}]^T \mid [H\hat{A}^2]^T \mid \dots \mid [H\hat{A}^n]^T \right]^T,$$

where

$$\hat{Z}_{i+n,n} = E[Z_{i,n} \hat{x}_{i-n}^T] \cdot \Xi_{i-n}^{-1}, \quad Z_{i,n} = [z_{i-n+1}^T \mid z_{i-n+2}^T \mid \dots \mid z_i^T]^T, \quad \Xi_{i-n} = E[\hat{x}_i \hat{x}_i^T]. \quad (19)$$

Assuming that the sequence of matrices $\{\hat{A}\}_{i=1}^n \rightarrow A$ will consider the problem of the form $[H^T \mid [H\hat{A}]^T \mid \dots \mid [H\hat{A}^{n-1}]^T]^T \cdot \hat{A} = [C_1]^T \mid [C_2]^T \mid \dots \mid [C_n]^T]^T = C$, where the block matrix C is the result of data processing on the basis of the relations (19). Then the algorithm will consist in the sequential solution of equations

$$L_{i,n}(A_i) \cdot A_{i+1} = C, \quad i = 0, \dots, n-1, \quad (20)$$

giving an estimate of \hat{A}_n , where $L_{i,n}(A_i) = [H^T \mid [HA_i]^T \mid \dots \mid [HA_i^{n-1}]^T]^T$. The equation (20) in the expanded form:

$$\mathcal{L}(a_j) = c_j, \quad a_j \in D(\mathcal{L}), \quad (21)$$

definition of the operator $\mathcal{L}: D(\mathcal{L}) \rightarrow G$, $D(\mathcal{L}) \subset G$, where G - a real Hilbert space. In (21), $\mathcal{L}(a_j) = L_{i,n}(\hat{A}) \cdot \hat{a}_j$, $j = 1, \dots, n$, \hat{a}_j and c_j - j -s columns of the matrix A and the block C , respectively. Determining the vector \hat{a}_j will produce on the basis of minimizing the functional form:

$$J(a_j) = \sum_{j=1}^n (\mathcal{L}(a_j) - c_j)^2, \quad \eta = m \cdot n \quad (22)$$

i.e. desired estimate of the vector \hat{a}_j has a $\hat{a}_j = \arg \inf_{a \in R^n} J(a_j)$. The functional $J(a_j)$ in (22) is convex differentiable functional defined on a closed convex set of $Q \subset G$ a Hilbert space G . Thus, it is necessary to determine such a_j , for which $(F(a_j), a_j - d_j) \leq 0$, $\forall d_j \in Q$, where $F(a_j) = J'(a_j)$ - monotone operator. Then the regularized iterative sequence $\hat{a}_{r,j}$ can be written as follows:

$$\hat{a}_{r+1,j} = P_Q(\hat{a}_{r,j} - \alpha_{r,j}(F_\delta(\hat{a}_{r,j}) + \varepsilon_{r,j} M(\hat{a}_{r,j}))), \quad r = 0, 1, \dots,$$

where P_Q - metric projector; $M(\hat{a}_{r,j})$ - operator with a $Q \subset G$ -strong monotonicity property; $\alpha_{r,j} > 0$, $\varepsilon_{r,j} > 0$ - regularization parameters.

In this case, you can take $M(a_{r,j}) = a_{r,j}$, $\alpha_{r,j} = (1+r)^{-1/2}$, $\varepsilon_{r,j} = (1+r)^{-p}$, $0 < p < 1/2$. Stop An iterative process can be carried out on the basis

of relations of the form: $\lim_{\delta \rightarrow 0} \delta / \varepsilon_{r,j(\delta)} = 0$, $\lim_{\delta \rightarrow 0} \delta^{1/2} / \varepsilon_{r,j(\delta)}^2 = 0$. Thus, giving the parameter values of i from 1 to n according to the expressions given above can consistently estimate the matrix A_1, A_2, \dots, A_n . In the real world operation of facilities control number of reasons the parameters A, D, Q, R models (12) may be not known exactly what causes them to determine by measurements z_i . To solve this problem typically use a customized model-type equations of the Kalman filter in the form of

$$\hat{g}_{i+1|i} = \Phi \hat{g}_{i|i-1} + L(z_i - C \hat{g}_{i|i-1}), \quad i \geq 1, \quad L = \Phi D,$$

following in her non-degeneracy conditions, stability and full observability, as they are executed in the system (12). For the value of the discrepancy can write the expression

$$\varepsilon_{j+1|j} = \Delta^+ (Z_{j+1} - \hat{U} \hat{g}_{j+1|j}), \quad j \geq 0,$$

where $\Delta = [\Theta^T \mid (\Theta \Psi)^T \mid \dots \mid (\Theta \Psi^{n-1})^T]^T$, $\text{rank } \Delta = n$, $Z_{j+1} = [z_{j+1}^T \mid z_{j+2}^T \mid \dots \mid z_{j+n}^T]^T$.

We take quality criteria identifying functional form: $J = J(\Phi, L, C) = \|\varepsilon_{j+1|j}\|^2$. We set $(A_1, G_1, H_1) = \arg \min_{\Phi, L, C} J(\Phi, L, C)$ where $A_1 = SAS^{-1}$, $G_1 = SG$, $H_1 = HS^{-1}$. Then at known H and unknown A, D, Q, R , you can write the following expression:

$$(A_1, G_1) = \arg \min_{\Phi, L} J(\Phi, L, H), \quad \hat{g}_{i+1|i}(A_1, G_1, H) = g_{i+1|i} = Sx_{i+1|i}, \quad H = HS.$$

Thus, we have the problem of minimizing the argument $(A_1, G_1) = \arg \min_{\Phi, L} J(\Phi, L, H) = \arg \min_{\Phi, L} J \|\varepsilon_{j+1|j}\|^2$, wherein the desired vector consists of $\theta \in \Xi$ elements of the matrices Φ, L . Let us turn to the formation of regularized minimizing sequences functional $J(\theta)$. We believe that $\arg \min_{\theta \in \Xi} J(\theta) = J(\theta_0) = J_0$.

Consider the functional $M^\alpha[\theta, J_\delta(\theta)] = J_\delta(\theta) + \alpha \Omega[\theta]$, $\alpha > 0$, defined at all $\theta \in \tilde{\Xi}$, where $\Omega[\theta]$ - stabilizing functional, $J_\delta(\theta)$ - parameter family of functionals defined for all $\delta \geq 0$, approximating functional $J(\theta)$ on the set of $\tilde{\Xi} \subset \Xi$, so that $|J_\delta(\theta) - J(\theta)| \leq \delta \Omega[\theta]$.

Following sustainable methods of minimization of functionals can be shown that there is a greatest lower bound is $M_{\alpha, \delta} = \arg \min_{\theta \in \tilde{\Xi}} M^\alpha[\theta, J_\delta(\theta)]$. Then there is a sequence of elements $\{\theta_{\alpha_n}, \delta_n\}$ to $\theta_{\alpha_n}, \delta_n$, almost minimizing functionals $M^{\alpha_n}[\theta, J_{\delta_n}(\theta)]$ respectively converging to element θ_0 . Since the α_n and δ_n tend to zero at $n \rightarrow \infty$, then $\{\theta_{\alpha_n}, \delta_n\}$ is a sequence of regularized minimizing sequence for the functional $J(\theta)$.

Consider now the problem of synthesis of a control system using predictive models based on the concepts of regular adaptive estimation. Let there be a multidimensional object control, which is described by equations of the form

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t + w_t, x_0 = \bar{x}_0, \quad (23)$$

$$z_t = Hx_t + v_t, \eta_t = Gx_t. \quad (24)$$

The (24) η_t - output vector object. You must define the control strategy, in which the output vector of the system η_t will be close to a given vector $\bar{\eta}_t$. We synthesize optimal control algorithm using Kalman extrapolator. Then we can write the following equation

$$\hat{x}_{t+j|t} = A^{j-1}\hat{x}_{t+1|t} + \sum_{k=1}^{j-1} A^{j-k-1}Bu_{t+k|t}, \quad j = 2, 3, \dots, N,$$

$$\hat{\eta}_{t+j|t} = GA^{j-1}\hat{x}_{t+1|t} + G\sum_{k=1}^{j-1} A^{j-k-1}Bu_{t+k|t}, \quad j = 2, 3, \dots, N,$$

where $u_{t+i|t}$ - control used for prediction, u_{t+i} - control actions at the time $t+i$, N - horizon.

To solve the problem as the objective function will use the following criteria

$$J_t = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \left\{ \|\hat{\eta}_{t+k|t} - \bar{\eta}_t\|_C^2 + \|u_{t+k|t} - u_{t+k-1|t}\|_D^2 \right\},$$

where the matrices $C > 0$ and $D > 0$ - the weight of the matrix.

Then, based on the optimal control methods using predictive models can arrive at the following expression

$$U_t^* = -(\Phi^T \bar{C} \Phi + \bar{D})^{-1} (\Phi^T \bar{C} \Lambda \hat{x}_{t+1|t} - \Phi^T \bar{C} \bar{\Theta}_t) - [Du_t]^T \mid 0 \mid \dots \mid 0]^T, \quad (25)$$

where the matrices Φ , \bar{C} , \bar{D} , Λ and $\bar{\Theta}_t$ formed based on known relationships.

Then the optimal predictive control will be:

$$u_{t+1|t}^* = (I \mid 0 \mid \dots \mid 0)U_t^*.$$

Analyzing the equation (25) we can see that the accuracy of predictive equations forming and optimal predictive control essentially depends on the accuracy of computation of the state variable estimation vector $\hat{x}_{t+1|t}$. Consequently, the use of the proposed concept for adaptation and control of dynamic systems in a varying degree of model uncertainty contributes to improving the accuracy of calculation of the vector of variables state and, thus, the quality control processes of dynamic objects.

The chapter also discussed issues of constructing algorithms for regular estimation of parametric perturbations in problems of adaptive estimation of the state of the control objects, parameters, matrix equations of the dynamics of control objects and covariance matrices of perturbation. It is shown that for their implementation efficient computational schemes are sustainable and pseudo regularization method.

These algorithms are used to regularize the problem of adaptive state estimation in the presence of uncertainty in the description of the object and increase the accuracy of estimation.

The fifth chapter presents the application results of the developed methods and algorithms for regular adaptive estimation in the automation and control of technological objects of some industrial enterprises.

Adaptive control system during the granulation-drying calcium sulfate, phosphate pulp production PS-Agro. The main indicators characterizing the drying-granulation, the following variables were considered: the control parameters $\mathcal{U} = (u_1, u_2, u_3)$, where u_1 - the coolant temperature at the inlet of drum granulator-dryer (DGD); u_2 - consumption of pulp; u_3 - retur consumption; output parameters $\mathcal{Y} = (y_1, y_2, y_3)$, where y_1 - the coolant temperature of the exhaust; y_2 - humidity granules; y_3 - size distribution of the product; uncontrollable disturbance variables $\mathcal{W} = (w_1, w_2, w_3)$, where w_1 - moisture content of calcium-phosphate sulfate pulp; w_2 - size distribution of the slurry; w_3 - size distribution retur. Produced formalization of the process allows you to choose structure of the mathematical model in the form:

$$x_{i+1} = A_i x_i + F_i x_{i-h} + B_i u_i + w_i, \quad y_i = H_i x_i + v_i. \quad (26)$$

For practical use, and a mathematical model of an industrial experiment was conducted under conditions of normal operation of the technological process of granulation-drying calcium sulfate and phosphate pulp production PS-Agro on Almalyk Stock Company "AMMOPHOS-MAXAM". The required values of the matrices A_i , F_i and B_i of the equation (26) for the received time interval were found to be

$$A = \begin{bmatrix} 0,748 & 0,187 & -0,479 \\ -0,964 & 0,671 & -0,896 \\ 0,255 & -0,964 & 0,723 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} -0,872 & 0,862 & -0,633 \\ 0,963 & -0,926 & 0,214 \\ -0,671 & 0,341 & 0,672 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0,844 & -0,971 & -0,523 \\ -0,997 & 0,127 & 0,352 \\ 0,246 & 0,882 & 0,612 \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Verification of the adequacy of the developed model based on the criterion residues showed that the model (26) with the parameter values (27) adequately describes the process in a field of experimentation.

Taking place in the practice of DGD large and frequent disturbances associated with changes in flow rate and composition of the feedstock to cause significant deviations of the desired products from the specified values. Thus, when controlling the process considered essential task acquires adaptive stabilization modes of the object. This problem is one of the main tasks of process control in the face of uncertainty caused by ignorance of the control object parameters and characteristics of external perturbations. Management considers the process of granulation-drying is also complicated by its non-minimum phase properties are delayed a few minutes, a long time to establish greater fluctuation range of moisture content of crude pulp and immeasurable changes in the properties of the pulp. For the construction of the control system is connected to the object (26) regulator

$$u_i = \mathcal{K}_i^T z_i,$$

where $\mathcal{K} - n \times 2l$ -dimensional matrix regulator parameters. Suppose that the matrix A, F, B, H depend on the vector of unknown parameters $\xi \in M$, where M - set defining a class of adaptability of the synthesized system.

For the solution of this problem we take the Lyapunov functional - Krasowski as:

$$V(x_s, k_s) = x_s^T L_0 x_s + \sum_{i=1}^m (k_i - k_{0i})^T L_i (k_i - k_{0i}) - \gamma \left[\frac{1}{2} (x_{i-h}^T x_{i-h} + x_i^T x_i) + \sum_{l=1-h}^{-1} x_{i+l}^T x_{i+l} \right],$$

where L_0, L_i - real symmetric positive definite matrix; k_{0i} - i -th column of a matrix \mathcal{K}_0 , $\gamma > 0$.

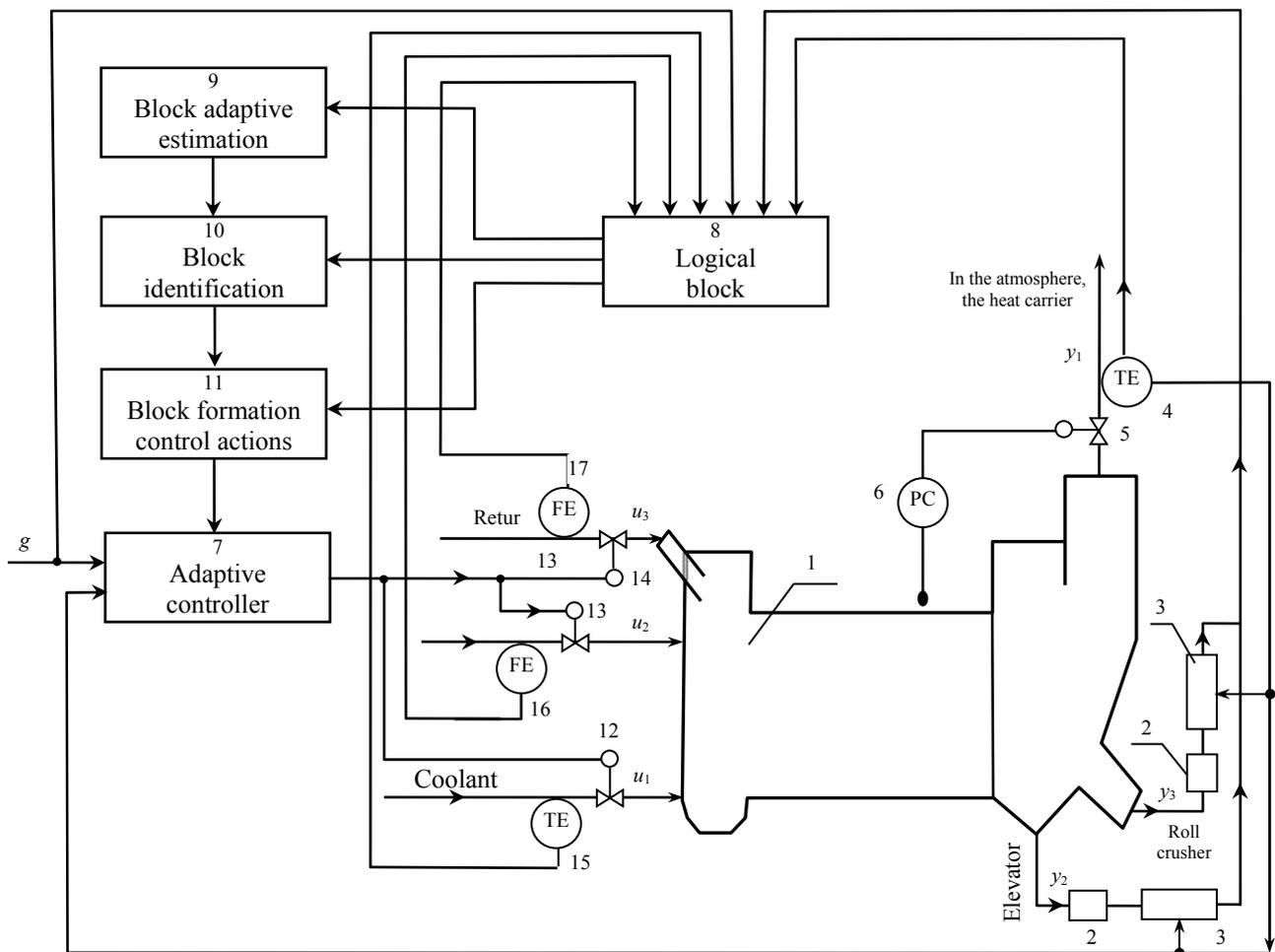


Fig.1. Functional diagram of the adaptive process control of granulation-drying

Synthesized system is adaptive in a given class M and algorithm tuning controller parameters can be taken as:

$$k_{i+1} = k_i - d_i^T z_i P_i \psi_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (28)$$

where P_i - arbitrary positive definite matrix; d_i - i -th column of the matrix \mathcal{D} , the frequency determined by the conditions of the theorem of systems stability; $\psi^T = z_i^T z_{i-h}^T$.

Kalman Filter equation here will be:

$$\hat{x}_{i+1} = A_i \hat{x}_i + F_i \hat{x}_{i-h} + B_i u_i + K_i^1 [y_i - \mathcal{K}_i \hat{x}_i - \mathcal{K}_i B_i u_i] - \frac{h}{n} \left[\frac{1}{2} (K_{i,-h}^2 [y_{i-h} - \mathcal{K}_{i-h} \hat{x}_{i-h}] + K_{i,0}^2 [y_i - \mathcal{K}_i \hat{x}_i]) + \sum_{l=1}^{-1} K_{i,l}^2 [y_{i+l} - \mathcal{K}_{i+l} \hat{x}_{i+l}] \right]. \quad (29)$$

The gains of K_i^1 and K_i^2 are defined by equations

$$K_i^1 = [P_i - P_{i,0}] \mathcal{K}_i^T R_i^{-1}, \quad K_{i,s}^2 = P_{i,s} \mathcal{K}_{i+s}^T R_{i+s}^{-1}. \quad (30)$$

On the basis of the relations (28) - (30) above and developed algorithms for adaptive estimation of the state vector can offer the following variant of the adaptive control system considers the process (Fig.1), which consists of DGD 1, 2 humidity sensor, digital functional converter 3, the temperature sensor 4 and 5 exhaust flow regulator coolant pressure sensor inside the BGS 6, 7, adaptive controller, logical block 8, 9 block adaptive estimation, identification unit 10, the control actions forming unit 11, water flow regulators 12, 13 pulp retour 14 and inlet BGS, the flow temperature sensor 15, the flow of pulp and 16 retour 17.

The proposed adaptive control system to stabilize the temperature conditions of the process, improve the quality parameters of products and equipment productivity by 2.25%.

Adaptive control system of the evaporation process of the solution of ammonium nitrate. The main parameters that characterize the process of evaporation of the solution of ammonium nitrate, the following variables were considered: the control parameters $u=(u_1, u_2)$, where u_1 - consumption ammonium nitrate solution at evaporate; u_2 - steam consumption; output parameters $z=(z_1, z_2)$, where z_1 - concentration of the evaporated solution; z_2 - the temperature of the evaporated solution; uncontrollable disturbance variables $w=(w_1, w_2)$, where w_1 - ammonium nitrate solution concentration at the inlet of the device; w_2 - moisture source solution.

The main indicator of the effectiveness of the evaporation process is the concentration of the evaporated solution, and the purpose of control - maintaining a certain value of the concentration. Analysis of the literature revealed that in the evaporator slightest change of control interventions (expense ammonium nitrate solution at evaporate and steam flow) strongly affect the temperature regime of the process. This can lead to loss of stability of the process. Thus, it is necessary to develop such adaptive temperature control of the evaporator, which will provide the necessary stability and quality control in terms of real disturbances. Such a system should expand at a sufficient stability region of the initial conditions with minimal movements regulators. In other words, it is necessary to synthesize a highly accurate automatic control system, which provides the minimum change of

control interventions and stabilizing output coordinates facility operating under the influence of real disturbances of arbitrary shape.

Based on the above algorithms developed adaptive estimation mathematical model was developed and identified major interference-signal operating conditions of the process. On this basis, we propose the following embodiment of an adaptive process control system evaporation ammonium nitrate solution (2), which consists of a combined evaporator 1, the heater 2 concentration sensors 3 and 4, the temperature of the evaporated solution, the adaptive controller 5, the logical block 6, the block adaptive evaluation 7, 8 identification unit, forming unit control actions 9, flow regulators ammonium nitrate solution at evaporate 10 and 11 couple, flow sensors ammonium nitrate solution at evaporate 12 and 13 couple.

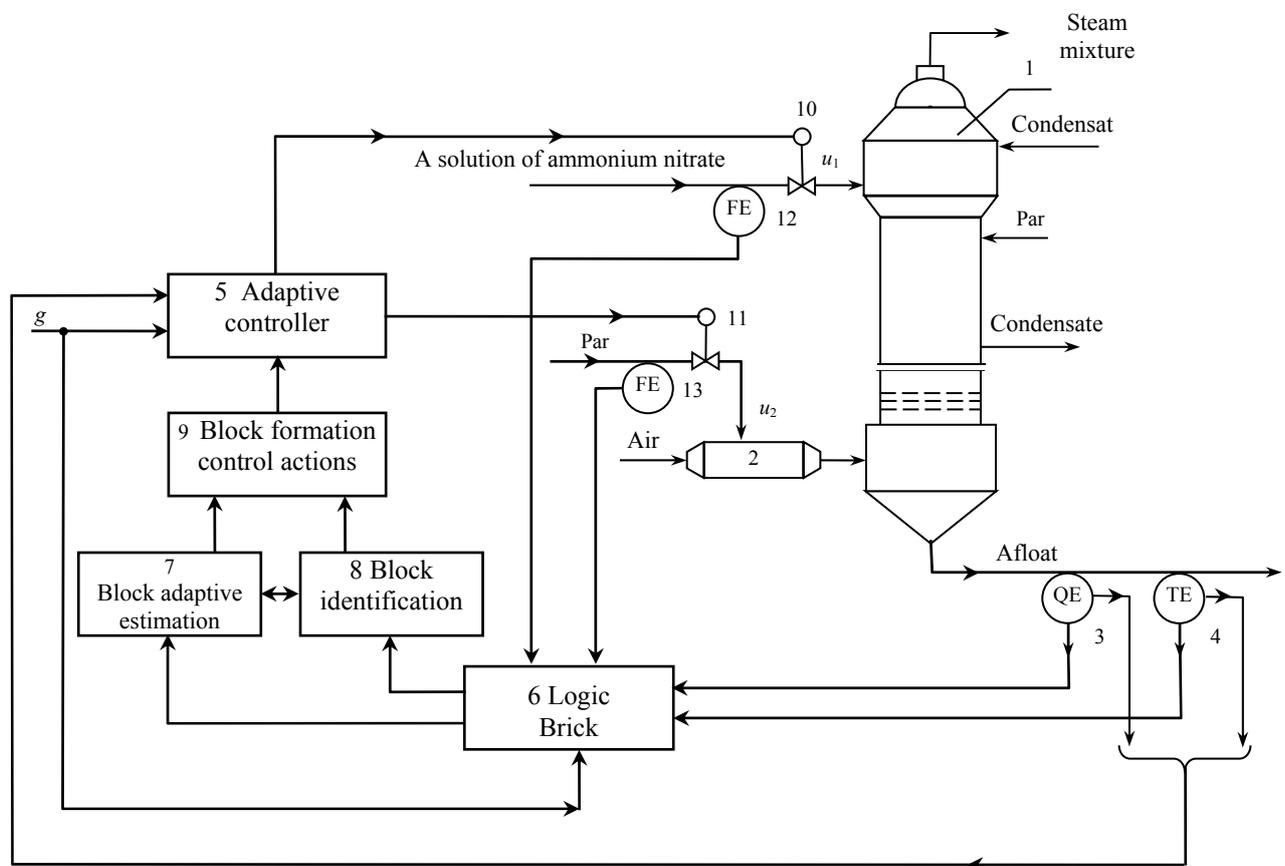


Fig.2. Functional diagram of the adaptive control system of the evaporation process of the solution of ammonium nitrate

Experimental studies have shown that, compared with normal control when the adaptive control value standard deviation implementations concentration of ammonium nitrate solution is reduced from 0.051 to 0.022, respectively. Thus the major share of economic benefit from the sale of the developed system of adaptive control is achieved by reducing steam consumption for evaporation of ammonium nitrate solution at 1,223.2 Gcal. per year.

CONCLUSION

The thesis is based on the concepts of system analysis, the theory of adaptive control systems, and methods for dynamic filtering solution of incorrect problems developed constructive methodology regular adaptive state estimation process facilities control under model uncertainty.

As a result, the following results:

1. Algorithms for the regular assessment of noise covariance matrix of the object, based on methods for solving nonlinear functional equations, taking into account the possible undecidability of the linearized system with singular or ill-conditioned matrix, allowing for the convergence of the desired solution, and thereby improve the accuracy of adaptive estimation procedure.

2. The algorithms of adaptive regular state estimation control objects in a consistently correlated noise in measurements based on singular value decomposition of matrices, allowing for binding of the theoretical covariance matrix of the estimation error to the actual values, and thereby eliminate the isolation process of calculating the gain matrix of the Kalman filter real measurements.

3. The algorithms of adaptive regular iterative estimation covariance matrices of noise and interference measurements of the object based on the innovation process and the secant method does not require calculation or approximation of partial derivatives, allowing for the convergence of approximations of the desired filter and adapt to the changing values of the covariance matrices of disturbances.

4. Develop a regular algorithms adaptive estimation of the gain matrix of Kalman filter based on the gradient projection method. The expressions for the error estimate the right side of the matrix equation for the calculation of the gain, allowing not made directly solving the matrix equation to estimate the error of his decision. For the resulting expression can also obtain a priori information about the order of error in the solution to obtain qualitative conclusions about the accuracy with which a reasonably continue to solve the system.

5. The proposed two-step regularized algorithms with adaptive estimation of correlated noise object to obviate the strict dependency matrix filter gain from a priori data. It is shown that the solution of this problem are very effective methods pseudoinversion regularization, l_1 - minimization and moderate damage to the choice of the regularization parameter based methods quasioptimality, cross significance and L -curve.

6. A regular algorithms of adaptive estimation in terms of noise autocorrelation of the object and noise measurements on the basis of approximate methods for solving ill-conditioned or singular stochastic systems of linear algebraic equations. In forming the estimation algorithms use statistical shape discrepancy principle, achieve the best possible estimates of the regularized solutions approximate stochastic systems of equations.

7. Develop a regular adaptive estimation algorithms with mutual correlation of noise and interference measurements of the object based on decorrelation noise and interference, and regularization methods for solving operator equations with positive definite matrices and approximately given right-hand side, to improve the accuracy of calculating the gain of a dynamic filter.

8. A regular adaptive algorithms for estimating the parameters of the equation matrices dynamics control objects and covariance matrices of perturbation based on the concepts of time series, allows to synthesize the adaptive control system in a high degree of model uncertainty.

9. Develop regular algorithms adaptive estimation of the transition matrix of control objects on the basis of methods for solving variational inequalities in the framework of the principle of iterative regularization to ensure consistency and convergence of the required assessments.

10. A regular adaptive algorithms for estimating the parameters of the transition matrix of managed objects and gain dynamic Kalman filter type in a complete a priori model uncertainty, allowing estimation regularize the problem under consideration on the basis of regular methods of minimizing functionals.

11. The algorithms of synthesis of control systems dynamic objects using predictive models based on the concepts of regular adaptive estimation under varying degrees of model uncertainty that improve the accuracy of the computation of the vector of state variables and control actions.

12. On the basis of the proposed adaptive algorithms for regular state estimation control objects in a model uncertainty developed adaptive process control system granulation-drying calcium sulfate and phosphate pulp production PS-Agro and evaporation of ammonium nitrate solution. The proposed adaptive control systems allow these processes to stabilize the technological regimes of the processes and increase the efficiency of their operation.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Игамбердиев Х.З., Юсупбеков А.Н., Зарипов О.О. Регулярные методы оценивания и управления динамическими объектами в условиях неопределенности. – Т.: ТашГТУ, 2012. - 320 с.
2. Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У., Зарипов О.О. Регулярные методы и алгоритмы синтеза адаптивных систем управления с настраиваемыми моделями. – Т.: ТашГТУ, 2014. – 160 с.
3. Зарипов О.О. Оценивание состояния динамических систем на основе регулярных методов // Научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». - Ташкент, 2005. - №2. –С.62-65.
4. Зарипов О.О. Регулярные алгоритмы идентификации динамических объектов на основе анализа поведения обновлений // Научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». – Ташкент, 2005. - №6. – С.53-55.
5. Зарипов О.О. Регуляризованные алгоритмы адаптивной фильтрации по последовательности скалярных измерений // Вестник ТашГТУ. – Ташкент, 2007. - №1. – С.61-64.
6. Игамбердиев Х.З., Зарипов О.О. Регулярные алгоритмы оценивания состояния динамических систем на основе концепций адаптивной фильтрации // Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». - Ташкент, 2009. - №6. – С.3-10.
7. Зарипов О.О., Абдуганиев А.Х. Регулярные алгоритмы адаптивной фильтрации на основе скаляризации измерений // Международный научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». - Ташкент, 2012. - №6. – С.73-75.
8. Зарипов О.О. Регулярные алгоритмы устойчивого оценивания состояния динамических систем // Журнал «Молодой учёный». - Чита, 2013. - №8(55). – С.90-93.
9. Zaripov O. The dynamic objects condition in the noise system conditions and measurements hindrances // The Advanced Science Journal. - USA, Volume 2013. - ISSUE 11. – PP.32-36.
10. Севинов Ж.У., Зарипов О.О., Ширинова Л.В. Регулярное адаптивное оценивание параметров векторной регрессионной модели с коррелированными ошибками измерений // Международный научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». - Ташкент, 2013. - №3. – С.64-67.
11. Зарипов О.О., Ботиров Т.В. Регулярные алгоритмы оценивания параметров регуляторов в адаптивных системах управления с эталонными моделями // Международный научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». - Ташкент, 2013. - №4. –С.75-78.
12. Зарипов О.О. Регуляризованные алгоритмы оценивания переходной матрицы динамических объектов управления // Международный научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». - Ташкент, 2013. - №6. –С.75-78.

13. Igamberdiyev H.Z., Zaripov O.O., Yusupbekov A.N. Steady estimation algorithms of the dynamic systems condition on the basis of concepts of the adaptive filtration and control // Ictact Journal On Soft Computing: Special Issue On Soft Computing In System Analysis, Decision And Control, July 2014. – Volume: 04, Issue: 04. – PP.796-803.
14. Игамбердиев Х.З., Зарипов О.О. Регулярные итерационные алгоритмы оценивания переходной матрицы динамических систем // Международный научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». - Ташкент, 2014. - №1. –С.53-58.
15. Игамбердиев Х.З., Зарипов О.О. Регуляризованные алгоритмы восстановления входного воздействия в системах управления // Журнал «Автоматизация и современные технологии». - Москва, 2014. - №7. – С.31-34.
16. Игамбердиев Х.З., Зарипов О.О. Регулярные алгоритмы адаптивного оценивания элементов матричного коэффициента усиления калмановского фильтра // Международный научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». - Ташкент, 2014. - №3. –С.64-70.
17. Игамбердиев Х.З., Зарипов О.О. Регулярные алгоритмы адаптивного оценивания в условиях последовательно коррелированной помехи в измерениях // Инновационные технологии. - Карши, 2014. - №3. – С.66-71.
18. Игамбердиев Х.З., Зарипов О.О. Регулярные алгоритмы адаптивного оценивания в условиях модельной неопределенности // Международный научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». - Ташкент, 2014. - №4. – С.64-75.
19. Игамбердиев Х.З., Зарипов О.О. Регулярные алгоритмы адаптивного оценивания состояния управляемых объектов при коррелированных шумах объекта и помех измерений // Вестник ТашГТУ. – Ташкент, 2014. – №2. – С.159-166.
20. Igamberdiyev H.Z., Zaripov O.O., Abduganiyev A.X. Regular Algorithm of Adaptive Estimation of the State of a Managed Object with Correlated Noise Object and Interference Measurements // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering (website: www.ijetae.com, ISSN 2250-2459, ISO 9001:2008 Certified Journal), September 2014. - Volume 4, Issue 9. – PP.797-803.

Патентлар (патенты; patents)

21. Игамбердиев Х.З., Зарипов О.О. Устойчивое оценивание состояния управляемых объектов на основе концепций адаптивной фильтрации // Государственное патентное ведомство РУз. Свидетельство №DGU 01423, 13.11.2007 г.
22. Игамбердиев Х.З., Улжаев Э.У., Убайдуллаев У.М., Зарипов О.О. Технологик агрегат ва машиналарнинг параметрларини назорат қилувчи ва ростловчи интеллектуал тизимнинг дастурий таъминоти // Государственное патентное ведомство РУз. Свидетельство №DGU 01671, 19.01.2009 г.
23. Игамбердиев Х.З., Зарипов О.О. Автокорреляцияланган шовкинлар мавжуд бўлган ҳолда ахборот-бошқарув тизимларида адаптив филтратсия масалаларини ечиш учун компьютер дастури // Государственное патентное ведомство РУз. Свидетельство №DGU 01672, 19.01.2009 г.

24. Игамбердиев Х.З., Улжаев Э.У., Убайдуллаев У.М., Зарипов О.О. Технологик жараёнларнинг параметрлари ва ишлаш режимларини назорат қилувчи ва ўлчовчи кўп каналли тизимнинг дастурий таъминоти // Государственное патентное ведомство РУз. Свидетельство №DGU 01685, 05.02.2009 г.
25. Игамбердиев Х.З., Зарипов О.О. Система модели ва ўлчашларнинг шовқинлари ўзаро коррелирлангандаги динамик объектларнинг ҳолатини турғун баҳолаш масалаларини ечиш учун компьютер дастури // Государственное патентное ведомство РУз. Свидетельство №DGU 02111, 23.12.2010 г.
26. Игамбердиев Х.З., Зарипов О.О. Объект шовқини ва ўлчаш хатоликлари ковариацион матрицаларининг априор ноаниклиги шароитида ҳолат векторини адаптив баҳолаш учун дастурий таъминот // Государственное патентное ведомство РУз. Свидетельство №DGU 02112, 23.12.2010 г.
27. Темербекова Б.М., Зарипов О.О., Банденок Е.А., Тошпулатова Ф.И., Рахмонбердиева Г.Т., Дошанова М.Ю. Технологик жараёнларни автоматик бошқариш тизимларида бирламчи ишлаб чиқариш технологик ахборотлар ишончилигини баҳолаш дастури // Государственное патентное ведомство РУз. Свидетельство №DGU 02268, 22.07.2011 г.
28. Игамбердиев Х.З., Зарипов О.О., Севинов Ж.У. Программное обеспечение для решения задач синтеза адаптивных стохастических систем управления непрерывными технологическими объектами // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство №DGU 02343, 04.11.2011 г.
29. Игамбердиев Х.З., Зарипов О.О., Севинов Ж.У., Абдуганиев А.Х. Программное обеспечение для решения задачи адаптивной фильтрации при параметрической априорной неопределенности // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство №DGU 02628, 25.10.2012 г.
30. Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У., Зарипов О.О. Программное обеспечение для решения задач синтеза адаптивных систем управления с настраиваемыми моделями // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство №DGU 02741, 03.04.2013 г.

II бўлим (II часть; II part)

31. Зарипов О.О. Регуляризованные алгоритмы синтеза систем управления непрерывными технологическими процессами // Материалы Республиканской научной конференции «Современные проблемы математического моделирования». – Нукус, 2005. - Том №2. – С.112-113.
32. Зарипов О.О. Регуляризованные алгоритмы синтеза адаптивных фильтров в информационно-управляющих системах // Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы развития энергетики». –Ташкент, 2006. –С.147-148.
33. Зарипов О.О. Регуляризованные алгоритмы синтеза систем управления технологическими объектами на основе концепций адаптивной фильтрации // Сборник докладов Республиканской научно-практической конференции аспирантов, докторантов и соискателей. –Ташкент, 2007, I-часть. –С.45-47.
34. Зарипов О.О., Ботиров Т.В., Игамбердиев Х.З. Регуляризованные алгоритмы оценивания состояния динамических систем // Труды шестой Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых

- специалистов государств участников РСС «Техника и технологии связи». – Ташкент, 2008. – С.265-268.
35. Игамбердиев Х.З., Зарипов О.О. Регулярные алгоритмы адаптивной фильтрации при наличии автокоррелированных шумов объекта и помех измерений // Материалы Международной научно-технической конференции «Istiqlof» на тему: «Современная техника и технология горно-металлургической отрасли и пути их развития». – Навоий, 2008. –С.303-305.
 36. Igamberdiyev H.Z., Zaripov O.O., Botirov T.V. Regular estimation conditions of the dynamic systems in condition correlation noise of the object and hindrances of the measurements // Proceedings Fifth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation «WCIS- 2008». –Tashkent, 2008. – PP.112-116.
 37. Зарипов О.О., Ботиров Т.В. Регулярное оценивание состояния динамических систем в условиях коррелированности шума объекта и помехи измерений // Материалы республиканской научно-технической конференции «Энергоснабжения при использовании альтернативных источников энергии: проблемы и решения». – Карши: КарГУ, 2008. –С.118-121.
 38. Igamberdiyev H.Z., Zaripov O.O., Abdurahmanova Y.M. Regular algorithms of estimation dynamic systems // Abstracts of the Third Congress of the World Mathematical Society of Turkic Countries, Almaty, June 30 – July 4, 2009, Volume 2. – pp.80.
 39. Игамбердиев Х.З., Абдурахманова Ю.М., Зарипов О.О. Регулярные итерационные процедуры оценивания динамических систем при коррелированных шумах // Тезисы докладов международной конференции «Управление и оптимизация динамических систем CODS-2009». –Ташкент, 2009. –С.44-45.
 40. Yusupbekov N.R., Igamberdiyev H.Z., Gulyamov SH.M., Zaripov O.O. Regular estimation of dynamic control objects conditions on the basis of adaptive filtering concepts // Proceedings Ninth International Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing. -Prague, 2010. – PP.291-299.
 41. Зарипов О.О. Алгоритмы устойчивого оценивания состояния динамических объектов управления на основе концепций адаптивной фильтрации // «Фан ва инновация фаолиятини ривожлантиришда ёшларнинг роли» илмий-амалий анжуман маърузалар матни. – Ташкент, 2010. - С.110-111.
 42. Zaripov O.O. Regularization recurrently-iterative algorithms of estimation of the dynamic systems condition // Proceedings Sixth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation “WCIS- 2010”. - Tashkent, 2010. –PP.176-179.
 43. Igamberdiyev Kh.Z., Abdurakhmanova Yu.M., Zaripov O.O. Regular algorithms of identification and estimation of dynamic systems // Abstracts of Plenary and Invited Lectures of International School and Conference on Foliations, Dynamical Systems, Singularity Theory and Perverse Sheaves, 6-21 October 2009. -Samarkand, printed by Samarkand State University, 2010. – PP.54-59.
 44. Igamberdiyev H.Z., Abdurakhmanova Y.M., Zaripov O.O. Synthesis of algorithms generalized estimation dynamic systems on the basis of regular methods // Proceedings International Training-Seminars on Mathematics in Conjunction with the Joint Mathematics Meeting. – Samarkand State University, 2011. -PP.125-126.
 45. Igamberdiyev Kh.Z., Abdurahmanova Y.M., Zaripov O.O. Algorithms of parametrical identification and estimation of dynamic objects of control on the basis of regular methods // Proceedings Tenth International Conference on Application of Fuzzy

- Systems and Soft Computing «ICAFS – 2012». –Lisbon, Portugal. b-Quadrat Verlag, 2012. – PP.237-242.
46. Игамбердиев Х.З., Зарипов О.О., Абдуганиев А.Х. Регулярные алгоритмы синтеза систем управления динамическими объектами на основе концепций калмановской фильтрации // Сборник научных статей международной научно-практической конференции «Инновация-2012», –Ташкент, 2012. –С.182-184.
47. Zaripov O.O., Abdurahmanova Yu.M., Umarova Ch.X. Adaptive estimation of the condition vector in the aprioristic uncertainty covariance matrixes of object noise and the measurements hindrance // Proceedings Seventh World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation “WCIS – 2012”. – Tashkent, Vol.I., 2012. – PP.318-321.
48. Зарипов О.О., Абдурахманова Ю.М., Абдуганиев А.Х. Адаптивные редуцированные алгоритмы оценивания состояния динамических систем // Труды Международная научная конференция «Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий - Аль-Хорезми 2012». – Ташкент, Том 1, 2012. – С.289-292.
49. Зарипов О.О. Алгоритмы регулярного адаптивного оценивания состояния объектов управления в условиях априорной неопределенности // Материалы VI-Международной научно-технической конференции «Современные техника и технологии горно-металлургической отрасли и пути их развития». – Навои, 2013. – С.468.
50. Абдурахманова Ю.М., Зарипов О.О., Регулярные алгоритмы адаптивного оценивания состояния динамических объектов управления // Сборник научных трудов VI-й Международной научно-практической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте». – Коломна, Том 3, 2013. –С.1169-1176.
51. Зарипов О.О. Алгоритмы адаптации и контроля процесса функционирования стохастических систем управления // «Ишлаб чиқаришдаги машиналар ва механик жихозлар инновацион технологиялари, ютуқ ва вазифалар» Республика илмий ва илмий-техник анжумани материаллари. – Фергана, 2013. – С.18-20.
52. Зарипов О.О. Вопросы обнаружения нарушения или разладки в задачах синтеза адаптивных систем управления стохастическими объектами // «Ишлаб чиқариш корхоналарининг долзарб муаммоларини ечишда инновацион технологияларнинг аҳамияти» Республика илмий-техник анжумани мақолалари тўплами. – Карши, 2013. – С.341-342.
53. Зарипов О.О. Регуляризованные алгоритмы адаптивной фильтрации в условиях априорной неопределенности // Сборник научных статей международной научно-практической конференции «Инновация-2013», –Ташкент, 2013. – С.231-232.
54. Igamberdiev H.Z., Yusupbekov A.N., Zaripov O.O. Regular algorithms of assessing operating influences and uncertain indignations in dynamic control systems // Proceedings Seventh International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control – «ICSCCW-2013». – Izmir, Turkey, 2013. –PP.335-342.
55. Игамбердиев Х.З., Зарипов О.О. Алгоритмы обнаружения нарушения и адаптации в системах управления динамическими объектами // «Ёқилғи-энергетика ресурсларидан самарали фойдаланиш муаммолари ва ечимлари» Республика илмий-амалий анжумани материаллари тўплами. –Қарши, 2013. – С.303-304.

56. Зарипов О.О. Алгоритмы обнаружения свойств сигналов с использованием индикатора неинформативного признака // Материалы XIII Республиканской научной конференции молодых ученых Каракалпакстана. – Нукус, 2013. – С.13-14.
57. Зарипов О.О. Алгоритмы устойчивого оценивания переходной матрицы динамических систем // Сборник материалов международной научно-технической конференции на тему «Современные материалы, техника и технологии в машиностроении». –Андижан, 2014. – С.154-155.
58. Зарипов О.О. Регуляризованные алгоритмы адаптивного оценивания состояния объектов управления на основе принципа итеративной регуляризации // Материалы научно-технической конференции «Перспективы науки и производства химической технологии в Узбекистане». –Навои, 2014. –С.209-210.
59. Yusupbekov A.N., Siddikov I.H., Zaripov O.O. Information-analytical intelligent system monitoring process equipment state petrochemical industries // Proceedings Eleventh International Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing – ICAFS-2014, September 2-3, 2014. Paris, France. – PP.105-110.
60. Игамбердиев Х.З., Зарипов О.О. Адаптивное оценивание состояния динамических объектов управления на основе концепций теории некорректных задач // Труды Международная научная конференция «Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий - Аль-Хорезми - 2014», Самарканд, 2014.- С.210-214.

Автореферат “ТошДТУ хабарлари” журнали тахририятида тахрирдан ўтказилди (15.11.2014 йил).

Босишга рухсат этилди: 18.11.2014
Ҳажми: 1,5. Адади: 100. Буюртма: № 57
“Top Image Media” босмахонасида босилди.
Тошкент шаҳри, Я.Ғуломов кўчаси, 74-уй.

