

**ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ  
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.13/30.12.2019.Т.07.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ  
ҲУЗУРИДАГИ АХБОРОТ-КОММУНИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ  
ИЛМИЙ-ИННОВАЦИОН МАРКАЗИ**

**АРОЕВ ДИЛШОД ДАВРОНОВИЧ**

**ҲАРАКАТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛ-АЙИРМАЛИ ТЕНГЛАМАЛАР  
СИСТЕМАСИ БИЛАН ИФОДАЛАНУВЧИ САНОАТ РОБОТИНИ  
МАҚБУЛ БОШҚАРИШ УСУЛИ**

05.01.02–Тизимли таҳлил, бошқарув ва ахборотни қайта ишлаш

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

**Тошкент 2021**

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

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

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

**Ароев Дилшод Давронович**

Харакати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан  
ифодаланувчи саноат роботини мақбул бошқариш усули ..... 5

**Ароев Дилшод Давронович**

Оптимальный метод управления движением промышленного робота,  
описываемым системой дифференциально-разностных уравнений..... 23

**Aroev Dilshod Davronovich**

An optimal method for controlling the motion of an industrial robot  
described by a system of differential-difference equations..... 42

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ  
List of published orks..... 46

**ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ  
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖА БЕРУВЧИ DSc.13/30.12.2019.Т.07.01  
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ  
ҲУЗУРИДАГИ АХБОРОТ-КОММУНИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ  
ИЛМИЙ-ИННОВАЦИОН МАРКАЗИ**

**АРОЕВ ДИЛШОД ДАВРОНОВИЧ**

**ҲАРАКАТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛ-АЙИРМАЛИ ТЕНГЛАМАЛАР  
СИСТЕМАСИ БИЛАН ИФОДАЛАНУВЧИ САНОАТ РОБОТИНИ  
МАҚБУЛ БОШҚАРИШ УСУЛИ**

**05.01.02 – Тизимли таҳлил, бошқарув ва ахборотни қайта ишлаш.**

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

**Тошкент– 2021**

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2019.3.PhD/T1293 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги Ахборот-коммуникация технологиялари илмий-инновацион марказида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифада ҳамда «ZiyoNet» Ахборот-таълим порталида (www.ziyo.net.uz) манзилларига жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Опорбоев Баҳодиржон Очилбоевич  
техника фанлари доктори, профессор.

Расмий оппонентлар:

Мухамедиева Дилноз Тулкиновна  
техника фанлари доктори, профессор.

Якубжанова Дилфуза Кодировна  
техника фанлари бўйича фалсафа доктори.

Етакчи ташкилот:

Тошкент тўқимачилик ва енгил саноат  
институтини

Диссертация ҳимояси Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги илмий даража берувчи DSc.13/30.12.2019.T.07.01 Илмий кенгашнинг 2021 йил «14» январь соат 16<sup>00</sup> даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100202, Тошкент шаҳри, Амир Темура кўчаси, 108-уй. Тел.: (99871) 238-64-43, факс: (99871) 238-65-52, e-mail: tuit@tuit.uz).

Диссертация билан Тошкент ахборот технологиялари университети Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (\_\_\_ рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100202, Тошкент шаҳри, Амир Темура кўчаси, 108-уй. Тел.: (99871) 238-65-44).

Диссертация автореферати 2021 йил «1» январь да тарқатилди.  
(2021 йил «1» январь даги \_\_\_ рақамли реестр баённомаси.)



Р.Х.Хамдамов  
Илмий даража берувчи Илмий кенгаш  
раиси, т.ф.д., проф.

Ф.М.Нуралиев  
Илмий даража берувчи Илмий кенгаш  
илмий котиби, т.ф.д., доц

А.В.Қобулов  
Илмий даража берувчи Илмий кенгаш  
ҳузуридаги илмий семинар раиси, т.ф.д., проф.

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

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Жаҳон тажрибасидан маълумки, деярли барча техник системалардан самарали фойдаланиш учун уларни маълум мақсад сари бошқаришга тўғри келади. Уларнинг ҳаракатини математик моделлаштиришда моделлари дифференциал тенгламалар билан ифодаланувчи бошқарув функциясига боғлиқ бўлган системаларга олиб келинади. Бу системалар ичида чизиқли дифференциал тенгламалар системасининг дифференциал-айирмали кўриниши эътиборга молик.

Ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи объектларни бошқаришда бошқарув функцияси параметрлари сонини мақбуллаштириш, бу бошқарув объектларида содир бўладиган жараёнларни тезлаштириш ва уларга сарф бўлувчи энергетик ресурсларни тежаш демакдир. Бу эса амалий томондан, ишлаб чиқариш объектларининг катта қисмининг ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланиши, назарий томондан, ҳаракати ушбу дифференциал тенгламалар системаси билан ифодаланувчи объектларни бошқариш усулларини такомиллаштириш «Бошқариш назарияси»га муҳим ҳисса бўлиб кўшилиши ҳозирги кундаги молиявий-иқтисодий долзарб вазифалар қаторига киради.

Мамлакатимизда илм-фан соҳасидаги устувор йўналишларда, жумладан, «Бошқарув назарияси» ни ўрганиш бўйича муҳим натижалар олинган. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегиясига кўра, илмий тадқиқот ва инновацион фаолиятни ривожлантириш, илмий ва инновацион ютуқларни амалиётга жорий этишнинг эффектив механизмларини яратиш масалаларига оид муаммоларни ҳал қилишга алоҳида эътибор қаратилган.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги ва 2018 йил 19 февралдаги ПФ-5349-сон «Ахборот технологиялари ва коммуникациялари соҳасини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Фармонлари, 2017 йил 29 августдаги ПҚ-3245-сон «Ахборот-коммуникация технологиялари соҳасида лойиҳа бошқаруви тизимини янада такомиллаштириш чора тадбирлари тўғрисида»ги, 2018 йил 27 апрелдаги ПҚ-3682-сон «Инновацион ғоялар, технологиялар ва лойиҳаларни амалий жорий қилиш тизимини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги, Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2020 йил 7 майдаги ПҚ-4708-сон «Математика соҳасидаги таълим сифатини ошириш ва илмий-тадқиқотларни ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

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

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи объектларга доир адабиётлар таҳлили шуни кўрсатдики, кечикишга оид объект тушунчасининг тўла шарҳи биринчи бўлиб XX аср саноат роботлари 20-йилларининг бошларида Л.Эльсгольц ва В.Хан ишларида қайд қилинган. Ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи объектларни бошқариш бўйича эса биринчи бўлиб Евклид фазосида Л.Вейс нуль бошқарилувчанлик билан тўла бошқарилувчанликнинг устма-уст тушишини ўз ишларида келтирган. Л.Вейс барча ностационар системалар нуқтали тўла бошқарилувчан эмаслигини исботлаган ва ҳаракати чизиқли дифференциал-айирмали стационар системалар билан ифодаланувчи объектларни нуқтали тўла бошқарилувчанлиги ҳақидаги гипотезани олдинга сурган бўлсада, кейинчалик А.Зверкин ва В.Попов Л.Вейс гипотезасини инкор қилувчи мисоллар тузган. Охириги 10 йилликда, бу йўналишда А.Коробов илмий тадқиқот ишларини олиб борган ва керакли натижаларни олган бўлсада, ҳаракати чизиқли стационар дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи объектларни бошқаришда бошқарув функцияси параметрлари сонини мақбуллаштириш масаласи устида илмий изланишлар олиб бормаган.

Ўзбекистонда В.Қ.Қобулов, Н.А.Мўминов, О.М.Набиев, Х.З.Игамбердиев, З.З.Шамсиев, Ш.Й.Пулатов, Б.О.Онорбоев ва бошқа олимлар автоном бошқарилувчи тизимларни мақбул бошқариш моделлари ҳамда бошқариш алгоритмларини ишлаб чиқишга катта ҳисса қўшганлар ва қўшиб келмоқдалар.

Ҳаракати чизиқли стационар дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи саноат роботининг мураккаб фазовий операциясини амалга оширишида бошқарув функциясининг параметрлари сонини мақбуллаштириш етарли даражада ўрганилмаган.

**Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасасидаги илмий тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация иши Муҳаммад Ал-Хоразмий номидаги Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги Ахборот-коммукацион технологиялари илмий-инновацион марказининг Лойиха А-5-008 “Технологик машинларнинг ишчи органлари ҳаракатини ва уларни тайёрлаш жараёнларини бошқаришнинг дастурий-алгоритмик воситаларини ишлаб чиқиш” (2015-2017), Лойиха КА-3-017 “Валли технологик машиналарнинг юқори унумдор, ресурстежамкор қурилма ва механизмларини ишлов берилаётган материал хусусиятларини ҳисобга олган ҳолда такомиллаштириш ва яратиш” (2015-2017) мавзуларидаги лойиҳалари доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади.** Ҳаракати чизиқли дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи кечикишга оид объектларни бошқаришда бошқарув функцияси параметрлари сонини мақбуллаштириш орқали саноат роботларига татбиқ қилиш билан унинг иш унумдорлигини оширишнинг математик моделларини ишлаб чиқишдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

автоном бошқарилувчи тизимларнинг мавжуд бошқариш моделларини таҳлил қилиш;

ҳаракати чизиқли дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчини кечикишга оид объектларнинг бошқарув функциясининг параметрлари сонини мақбуллаштириш моделини ишлаб чиқиш;

ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи кечикишга оид объектлар синфига кирувчи робототехник тизимлар учун бошқарув функциясинг параметрлари сонини мақбуллаштириш моделини ишлаб чиқиш;

ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи робототехник тизимлар ҳаракатини турғунликка текшириш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида кечикишга оид объектлар синфига кирувчи саноат роботлари ҳаракати қаралган.

**Тадқиқотнинг предмети** саноат роботлари ҳаракатини оптимал бошқариш учун хизмат қиладиган модел, алгоритм ва дастурий воситалардан иборат.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Тадқиқот жараёнида тизимли таҳлил, дифференциал тенгламалар, алгебра ва сонлар назарияси ҳамда оптимал бошқарув назарияси усулларидан фойдаланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

ҳаракати чизиқли дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи кечикишга оид объектларнинг координатали кечикиш синфига тегишли объектларни бошқаришнинг мақбуллаштириш модели ишлаб чиқилган;

ҳаракати чизиқли узлуксиз дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи саноат роботлари ҳаракатини бошқаришни мақбуллаштириш мумкинлиги исботланган ва мос бошқариш модели ишлаб чиқилган;

ҳаракати чизиқли узлуксиз дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи саноат работи ҳаракатини бошқаришда бошқариш функцияси параметрлари сонини мақбуллаштириш модели ва ечишнинг умумий алгоритмлари ишлаб чиқилган;

саноат роботлари ҳаракатини ифодаловчи тенгламалар турлари бўйича асимптотик турғунликка текшириш учун ёндашув ишлаб чиқилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи саноат работи ҳаракатини моделлаштириш ва бошқарув

масалаларини такомиллаштириш учун математик моделлар ҳамда уларнинг дастурий таъминоти ишлаб чиқилган:

ҳаракати чизикли дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи кечикишга оид объектларнинг бошқарув функциясининг параметрлари сонини мақбуллаштириш модели ишлаб чиқилган;

ҳаракати чизикли дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи объектларнинг кузатувчанлиги ўрганилган;

ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи саноат роботлари учун бошқарув функциясининг параметрлари сонини мақбуллаштириш модели ишлаб чиқилган;

ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи саноат роботлари ҳаракатини турғунликка текшириш учун ёндашув ишлаб чиқилган;

саноат роботларининг мураккаб фазовий манипуляция операциясини амалга оширишида позицион аниқликни ошириш масаласи кўрилган;

назарий натижалар олти звеноли саноат роботида қўлланилган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги.** Тадқиқот ишининг ишончлилиги ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи кечикишга оид объектларни бошқаришда бошқариш функцияси параметрлари сонини мақбуллаштириш орқали саноат роботларига татбиқ қилиш билан унинг иш унумдорлигини оширишнинг математик моделларини ишлаб чиқиш ҳамда уларни назарий асослаш билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот ишининг илмий аҳамияти – ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи кечикишга оид объектларни бошқаришда бошқариш функцияси параметрлари сонини мақбуллаштириш моделини, уни саноат роботларига қўллаш мумкинлигини ва мос бошқариш моделини ҳамда робот ҳаракатини турғунликка текшириш моделини назарий асослаш билан изоҳланади.

Тадқиқот ишининг амалий аҳамияти – назарий натижалар асосида ишлаб чиқилган алгоритмлар ва дастурий воситадан, нафақат робототехник тизимларга, балки ишлаб чиқаришнинг ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи кечикишга оид объектлар учун тезкорликни ошириш, ҳаракат учун зарур бўлган энергетик ресурсларни тежашда фойдаланиш мумкин.

**Тадқиқот натижаларнинг жорий қилиниши.** Саноат роботи ҳаракатини тадқиқ этиш мақсадида яратилган математик моделлар, алгоритмлар ва дастурий мажмуалар асосида:

бошқарув функциясининг параметрлари сонини мақбуллаштириш моделлари ва алгоритмлари «Қишлоқ хўжалиги машинасозлиги конструкторлик-технолик маркази» МЧЖда деталларга турли ишлов беришга мўлжалланган марказ билан жиҳозланган роботлаштирилган технологик мажмуада қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси



«Ўзагротехсаноатхолдинг» АЖнинг 2019 йил 13 ноябрдаги №04-10/1972-сон маълумотномаси). Натижада роботлаштирилган технологик мажмуада саноат роботини бошқариш жараёнида кечикиш ҳолати ва саноат роботи фазовий манипуляция операциясини бажаришида робот эркин ўзгарувчиларининг ортиқчалиги кузатилди. Бошқарув функцияси параметрлари сонини мақбуллаштириш орқали саноат роботларига татбиқ қилиш ушлаш қурилмасининг тезлигини 11.5 мм/с, тезланишини эса 5 мм/с<sup>2</sup> га оширишга хизмат қилади;

ишлаб чиқилган модел ва алгоритмлар «Integral avtomatika servis» МЧЖда деталларга турли ишлов беришга мўлжалланган марказ билан жиҳозланган роботлаштирилган технологик мажмуада қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси «Ўзагротехсаноатхолдинг» АЖнинг 2019 йил 13 ноябрдаги №04-10/1972-сон маълумотномаси). Натижаси роботлаштирилган технологик мажмуада саноат роботининг 5-звеноси ва ушлаш қурилмасининг бошқарув функцияси параметрлари сонини 2тага камайтириш имконини берган ҳамда технологик жараёнларни бошқаришда материал-энергия ресурслар сарфини 10% камайтиришга эришилган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Тадқиқот натижалари 3 та халқаро ва 2 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокама қилинган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши.** Тадқиқот мавзуси бўйича асосий илмий натижалар жами 11 та илмий ишда нашр этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 5 та мақола, 1 таси хорижий ва 4 таси республика журналларида чоп этилган ҳамда 1 та электрон ҳисоблаш машиналари учун яратилган дастурий воситаларни қайд қилиш гувоҳномаси олинган.

**Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши.** Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ҳамда иловалардан ташкил топган бўлиб, умумий ҳажми 100 бетни ташкил этади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

**Кириш** қисмида тадқиқот мавзусининг долзарблиги ва зарурияти, республика фан ва технологиялар ривожланишининг устувор йўналишларига боғлиқлиги, муаммонинг ўрганилганлик даражаси, тадқиқотнинг мақсади, вазифалари, тадқиқотнинг назарий ва амалий аҳамияти, объекти, предмети, илмий янгилиги, тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши, тадқиқот натижаларининг ишончлилиги, тадқиқот натижаларининг апробацияси, тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши, диссертациянинг тузилиши ва ҳажми ҳақида маълумотлар берилган.

Диссертациянинг «**Харакати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи объектларни бошқаришнинг ҳозирги замон ҳолати. тадқиқот мақсади ва вазифалари**» деб номланган биринчи бобида автоном чизиқли дифференциал-айирмали тенгламалар системаси

билан ифодаланувчи кечикишга оид объектлар классификация қилинган. Ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи кечикишга оид бошқарилувчан объектларни бошқаришнинг мавжуд фундаментал ва амалий тадқиқот ишлари атрофлича таҳлил қилинган. Кечикишга оид объектларнинг координатали кечикиш синфини характерловчи саноат роботи (СР)ни яратиш ва ишлаб чиқаришга самарали қўллаш бўйича назарий ва амалий натижаларининг таҳлили келтирилган. Адабиётлар таҳлили шуни кўрсатдики, ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи СР ҳаракатини бошқаришда қуйидаги камчилик ва бўшлиқлар борлиги аниқланди:

1. Маълумки, СРнинг динамик ҳаракати Лагранжнинг II тур, Ньютон-Эйлер, Д'Аламбер, Гаусс, Аппель ва Кейн тенгламалари ёрдамида ифодаланади ва бу тенгламаларни ўзига хос бир қанча ечиш усуллари мавжуд. Бу тенгламаларни ечишда номаълумлар сонига нисбатан тенгламалар сони икки баробар кўпайиб кетади. Бу эса СРнинг фазовий мураккаб ҳаракатида оптимал траекторияни ягона эмаслигини билдиради. Қарор қабул қилувчи шахс мос траекторияни танлашда бир тўхтамга кела олмайди. Натижада, СРнинг ташқи муҳит предметлари билан тўкнашиши оқибатида жараён тўхтайдди. СР эса ишчи қўли тузилмасини ўзгартиради. Бундай ҳоллар СР кинематик занжирида ортиқча боғлиқликларни келтириб чиқаради. Бу эса бошқа ечим қабул қилишни ва қўшимча изланишларни келтириб чиқаради.

2. СРни оптимал бошқариш учун унинг ҳаракатини ифодаловчи 1-банддаги трапеция кўринишидаги тенгламалар системаси коэффициентларини ҳисоблашлардаги хатоликлар ва алоқа каналларидаги тўсиқларни ҳосил бўлиши робот звеноларини белгиланган вақтдан кечикиб ҳаракат қилишига ва технологик операция учун сарф бўладиган умумий вақтни ортишига олиб келади. Бундан ташқари, робот ҳаракатида турғунликни пасайишига ва унинг ишини ёмонлашувига сабабчи бўлади.

Кечикишга оид объектларнинг координатали кечикиш синфига тегишли бўлган СРнинг кинематик ҳаракати қуйидаги тенгламалар системаси билан берилган бўлсин:

$$\dot{x}(t) = Ax(t-h) + Bu(t) \quad (1)$$

бу ерда  $x = x(t) - n$  – ўлчовли системанинг  $t$  вақтдаги ҳолат вектори;

$A$  – системанинг фазовий ҳолатини ифодаловчи  $(n \times n)$  – ўлчовли ўзгармас матрица;

$B$  –  $(n \times m)$  – ўлчовли ўзгармас матрица;

$u(t)$  –  $(1 \times n)$  – ўлчовли бошқариш функцияси,  $h > 0$ ,  $t_0 \leq t \leq T$ .

СР ҳаракатини ифодаловчи коэффициентларни ҳисоблаш вақтларини ва белгиланган операциянинг умумий бажарилиш вақтини камайтириш мақсадида (1) тенгламалар системасига қуйидагича масала қўйилган бўлсин:

(1) система билан ифодаланувчи объектларнинг бошқарув функциясининг параметрлари сонини мақбуллаштириш орқали системани тўла бошқарилувчанлигини таъминлаш мумкинми?

Яъни, математик тилда  $f : R^1 \times R^n \times R^k \rightarrow R^n$  ( $f$  – узлуксиз функция)ни таъминловчи шундай  $v(t) \subset R^k \subset R^n$  – бошқариш функцияси мавжудми?

Масала шарт сифатида қуйидагилар олинади: 1) тизим чизиқли дифференциал-айирмали тенглама кўринишида; 2) тизим чекли ўлчовли.

Агар қўйилган масалалар ижобий ҳал қилинса, назарий ва амалий томондан қуйидаги афзалликларга эга бўлинади:

1. Автоном бошқарилувчи системалар, хусусан ҳаракати чизиқли дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи объектларни оптимал бошқаришда бошқарув функциясининг параметрларини мақбуллаштириш моделини ишлаб чиқиш “Бошқариш назарияси”нинг бошқарилувчанлик ва кузатувчанлик бўлимига назарий томондан муҳим ҳисса бўлиб қўшилади.

2. Ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи объектлар, хусусан СР ҳаракатини оптимал бошқариш учун бошқарув функциясининг параметрларини мақбуллаштириш моделини ишлаб чиқиш билан роботларга қўйилувчи тезкорлик, энергоресурслар сарфини тежаш ва минимал ишлаб чиқариш майдонидан фойдаланиш каби иқтисодий мезонларининг бажарилишини таъминлайди.

Диссертациянинг «**Ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи объектларнинг бошқарув функцияси параметрлари сонини мақбуллаштириш**» деб номланган иккинчи бобида автоном бошқарилувчи системалар, хусусан ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи объектлар учун тўла ва нисбатан бошқарилувчанлик тушунчалари келтирилган. СР ҳаракати ифодаловчи динамик тенгламалар ва уларнинг ечиш алгоритмларининг таҳлиллари келтирилган. Ҳаракати чизиқли дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи объектларни бошқаришда бошқарув функцияси параметрлари сонини мақбуллаштириш модели ишлаб чиқилган. Автоном бошқарилувчи тизимларнинг ва уларнинг дифференциал-айирмали ҳоли учун кузатувчанлик хоссаси таҳлил қилинган ва камчилиги аниқланган. Чизиқли системаларнинг тўла ва нисбатан кузатувчанлик тушунчалари келтирилган.

Ҳаракати (1) тенглама билан ифодаланувчи объектларнинг бошқарув функцияси параметрлари сонини камайитиришдан аввал, нуқтали бузилган ҳолат координаталар системасини қайси йўналишида эканлигини аниқлаш зарур.

Агар бузилган йўналишни аниқлаш имкони бўлмаса, у ҳолда ҳаракати (1) тенгламалар билан ифодаланувчи объектларни бошқаришда ва параметрлар оптималлигини таъминлашда муаммоли масалалар келиб чиқади.

Бузилган йўналишни аниқлаш учун  $R^n$  да шундай  $r = (a, b, c, d)$  вектор мавжудки, агар  $q^* r = 1, q^* e^A r = 0, q^* e^A A r = 0, q^* e^A A^2 r = 0, B = AZ - ZA$ , бу ерда  $Z = r q^* e^A$  тенгликлар бажарилса, у ҳолда (1) тенгламалар системаси  $q$

йўналиш бўйича бузилган ҳисобланади. Бундан ташқари, танланган  $r = (a, b, c, d)$  вектор учун  $(A, r)$  жуфтлик тўла бошқарилувчи бўлади.

Юқоридаги масалани ҳал қилиш учун икки томондан қарашга тўғри келади. Биринчи-мавжуд ишлаб турган системани бошқаришда бошқариш функцияси параметрларини камайтириш учун ёндашув ишлаб чиқиш, иккинчи-бузилган йўналиш аниқланиб, сўнгра тиклаш тенгламаси ёрдамидан фойдаланиб, бошқариш функцияси параметрларини камайтириш учун ёндашув ишлаб чиқиш зарур.

1. Биринчи масалани ҳал қилиш учун ёндашув ишлаб чиқишга тўхталамиз.

Система  $q kh$  вақтда нуқтали бузилган бўлиши учун шундай  $P, V$  матрицалар ва  $v$  вектор мавжудки, улар учун қуйидаги тенгликлар бажарилиши керак:

$$PA_k = 0, PB = VP, v^* P(e^{hB_k} - J_k) = 0, v^* P\bar{E}k = q^*$$

Фараз қилайлик,  $A$  матрицанинг хос сонлари  $k$  – каррали бўлсин.

$A$  матрица диагонал кўринишига келтирилган ҳамда ҳар бир диагонал матрица элементининг кўриниши мос равишда

$$J(A) = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & A_k \end{bmatrix}; A_j = \begin{bmatrix} \lambda_j & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_j & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_j & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda_j \end{bmatrix} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, k)$$

бўлсин.

$B$  матрицани  $(n \times n)$  – ўлчовгача тўлдириб, қуйидаги  $B_k$  матрица ҳосил қилинсин:

$$B_k = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$$

Бошқарув функцияси параметрлари сонини камайтиришни таъминловчи теоремага асосан шундай  $C$  матрица мавжуд бўлиб, уни  $(n \times n)$  – ўлчовгача тўлдирилади ва қуйидаги  $C_k$  матрица ҳосил қилинади<sup>1</sup>:

$$C_k = \begin{bmatrix} C \\ 0 \end{bmatrix}$$

Юқоридагилар асосида қуйидаги теоремани шакллантириш мумкин.

**Теорема.** (1) система  $q$  нуқтада нуқтали бузилишга эга бўлсин.  $A$  матрица хос сонининг  $k$  карралигига мос  $kh$  вақтда шундай  $n$  натурал сон мавжуд бўлиб,  $(n \times k)$  – ўлчовли  $C \subset A$  матрица топилсаки,

<sup>1</sup> Онорбоев Б.О. Разработка и применение метода “К-управляемости” для оптимального управления сложными технологическими системами. Автореф. докт. диссер. Спец. 05.13.01. Ташкент, 2005. 37 с

1.  $(n \times n)$  – ўлчовли  $P$  матрица мавжуд бўлиб,  $PB_k = C_k P$ .

2.  $\dot{x} = Ax(t-h) + (BC)v$ ,  $x(t) \in R^n$ ,  $v(t) \in R^k$  тенгламалар системаси тўла бошқарилувчи бўлса, (1) система  $k$  – бошқарилувчи ( $k \leq n$ ) бўлади.

2. Иккинчи масалани ҳал қилиш учун ёндашув ишлаб чиқишга тўхталамиз.

Иккинчи масалага асосан бузилган нуқталарни тиклаш учун тиклаш тенгламасидан фойдаланилади.

Бузилган нуқталарни тиклашда (1) системасидаги  $A$  матрица  $A(t)$  вақтнинг функцияси сифатида қаралади.

Қуйидаги дифференциал тенглама тиклаш тенгламаси дейилади:

$$\dot{x}(t) = \int_{-h}^0 A(\theta)x(t+\theta)d\theta + Bu(t) \quad (3)$$

(3) тенгламадан оддий дифференциал тенгламага ўтиш учун тенгламанинг ҳар икки томонидан  $t$  вақт бўйича ҳосила олинади.

$$\ddot{x}(t) = A(h)x(t-h) + B\dot{u}(t) \quad (4)$$

бу ерда  $A(0) = 0$  деб олинади.

Агар  $u(t)$  бошқариш функциясини узлуксиз ва чегараланганлиги ҳисобга олинса, унинг  $\dot{u}(t)$  ҳосиласи мавжуд. Бундан ташқари, (1) системанинг тўла бошқарилувчанлигидан шундай  $\varepsilon > 0$  мавжудки,  $u(t)$  бошқариш функцияси учун қуйидаги ўринли бўлади:

$$|u(t)| \leq \varepsilon, \quad |\dot{u}(t)| \leq \varepsilon, \quad \dots, \quad |u^{(r)}(t)| \leq \varepsilon$$

$A(h)$  бунинг ўзгармас матрица эканлиги ҳисобга олинса ва қуйидагича белгилаш киритилса:  $\dot{u}(t) = w(t)$ ,  $A(h) = D$ .

(4) тенглама қуйидаги кўринишга келади:

$$\ddot{x}(t) = Dx(t-h) + Bw(t) \quad (5)$$

(5) тенгламанинг тартиби пасайтирилса,

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = y(t) \\ \dot{y}(t) = Dx(t-h) + Bw(t) \end{cases} \quad (6)$$

Агар  $(x(t), y(t))$  система ҳолати  $-h \leq t \leq h$  оралиқда аниқланган бўлса, у ҳолда  $t > 0$  да  $u(t)$  бошқариш функцияси мавжуд бўлади.

(6) тенгламалар системаси учун юқоридаги теорема ўринли.

2-масала инвариант қисм фазолар ёрдамида ҳам бузилган нуқтани тиклаш мумкин. Унга асосан, система қаралаётган фазо “К-бошқарилувчанлик” қисм фазоларига бўлиб юборилади ва бузилган нуқта аниқланган инвариант қисм фазо топилади ҳамда хатолик тўғриланади.

Агар (1) системасининг кўриниши  $\dot{x}(t) = Ax(t-h) + Bu(t-h)$  бўлса, у ҳолда бу система учун бошқариш функцияси параметрлари сонини мақбуллаштириш мураккаб бўлиб, фақат бундай системалар учун тезкорлик масаласини ҳал қилиш мумкин.

Олинган натижалардан ишлаб чиқаришнинг ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи бошқариш объектлари учун тезкорликни ошириш, ҳаракат учун зарур бўлган энергетик ресурсларни тежашда фойдаланиш мумкин.

Физик нуқтаи назардан динамик системанинг барча ўзгарувчилари координаталар системаси билан боғланган ва чекли вақтда система ҳолатини аниқлаш мумкин бўлса, у ҳолда система кузатувчан бўлади. Системанинг детерминирланган ёки стохастик ҳолига қараб кузатувчанлик турлича тавсифланади.

Системанинг кузатувчанлиги системанинг бошқарилувчанлик хоссаси билан чамбарчас боғлиқ. Чизиқли тенгламалар системалар учун системанинг бошқарилувчанлик ва кузатувчанлик хоссалари унинг коэффицентларидан тузилган матрица ранги учун зарурий ва етарли шарти сифатида Кальман мезони олинади ва унга асосан матрица ранги система қаралаётган фазо ўлчови билан тенг бўлиши керак.

Худди шундай кузатувчанлик тушунчаси стохастик система ва жараёнлар учун ҳам мавжуд. У эҳтимолликни апостериор тақсимланишларининг асимптотик ҳолати ёки баҳолашни корреляцион матрицалари билан боғлиқ бўлади.

Стохастик системанинг кузатувчанлиги дискрет жараёнлар учун кузатувлар сони кўпайгани сари ва узлуксиз жараёнлар учун кузатув вақти узайгани сари эҳтимолликни баҳолаш векторининг ҳатолиги эҳтимоллик жиҳатдан нолга ёки охириги қийматига яқинлашишини кафолатлайди.

Маълумки, чизиқли детерминирланган дифференциал-айирмали тенглама билан ифодаланувчи система тўла бошқарилувчанлик хоссасини қаноатлантирсагина системанинг фазовий ҳолатини кузатиш мумкин. Лекин баъзи ҳолларда, система икки бошқарилувчан ва бошқарилмайдиган қисмларга бўлинади ёки бўлмаса, тадқиқот ишида ўрганилган системанинг бошқариш фазосини сиқиш натижасида, ҳосил бўлган система тўла бошқарилувчанлик хоссасини қаноатлантиради, лекин дастлабки системанинг кўриниши ўзгаради. Шундай ҳолларда системанинг умумий ҳолатини кузатиш мумкинми—деган саволга жавоб берилади.

Чизиқли детерминирланган дифференциал-айирмали тенгламалар системасининг умумий кўриниши куйидагича:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t-h) + Bu(t) \\ y(t) = Hx(t) \end{cases} \quad (7)$$

бу ерда  $x = x(t) - n$  — ўлчовли системанинг  $t$  вақтдаги ҳолат вектори;

$A$  — системанинг фазовий ҳолатини ифодаловчи  $(n \times n)$  — ўлчовли ўзгармас матрица;

$B$   $(n \times m)$  — ўлчовли ўзгармас матрица;

$u(t)$  —  $(1 \times n)$  — ўлчовли бошқариш функцияси,  $h > 0$ ,  $t_0 \leq t \leq T$ .

$y(t)$  —  $x$  вектор ҳолатига боғлиқ  $(1 \times n)$  — ўлчовли вектор;

$H$  —  $(r \times n)$  — ўлчовли ўзгармас матрица.

Агар (7) тенгламалар системаси чекли вақтда кирувчи ва чиқувчи параметрларни тўла ифодаласа, у ҳолда (7) автоном чизиқли кузатувчи система дейилади.

Агар (7) тенгламалар системасида  $H = 0$  бўлса, тўла кузатувчан бўлмаган система ҳосил бўлади. Юқорида айтилганидек, бошқарилувчан системаларни бошқарилувчан қисми ва бошқарилмайдиган қисмига ажратиш мумкин. Лекин системаларни кузатувчанлигини аниқлашда системани иккига бўлиб бўлмайди.

(7) системанинг ҳолатини кузатиш учун аввало система тўла бошқарилувчан бўлиши керак, акс ҳолда системанинг фазовий ҳолатини кузатишдан маъно қолмайди.

Маълумки, агар (7) системада  $A$  – матрицанинг хос сонлари турли хил бўлса, яъни каррали бўлмаса, у ҳолда (7) система кузатувчан бўлади. Бундан келиб чиқадики, агар (7) система  $k$  – бошқарилувчан бўлса, у ҳолда уни тўла кузатиб бўлмайди.

Шу жумлани икки томондан қараб чиқайлик.

Демак, фараз қилайлик, (7) системада  $A$  – матрицанинг хос сонлари каррали бўлсин. У ҳолда (7) чизиқли система тўла бошқарилувчан бўлмайди. Натижада, (7) системанинг кўриниши қуйидагича бўлади:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t-h) \\ y(t) = Hx(t) \end{cases} \quad (8)$$

(8) система учун ўлчови  $k$  ( $0 \leq k \leq n$ ) га тенг бўлган шундай чизиқли  $U$  қисм фазо мавжудки, биринчидан -  $U$  инвариант қисм фазо, иккинчидан (7) система  $U$  қисм фазода тўла кузатувчан эмас.

(8) система тўла кузатувчан бўлиши учун  $U = 0$  бўлиши керак. Бунга мос ҳолда координаталар системаси  $\bar{x} = \begin{pmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{pmatrix}$  бўлиб,  $U$  қисм фазо  $\bar{x}_2 = 0$  тенглама билан берилади. (8) тенгламалар системаси эса қуйидагича ифодаланади:

$$\begin{cases} \bar{x}_1 = \bar{A}_{11}\bar{x}_1 + \bar{A}_{12}\bar{x}_2, & y = \bar{H}_2\bar{x}_2 \\ \bar{x}_2 = \bar{A}_{22}\bar{x}_2 \end{cases} \quad (9)$$

(9) тенгламалар системасидан агар  $\bar{x}_1 = 0$  бўлса, у ҳолда  $k = n$  ва (9) системани кўриниши (8) система билан бир хил бўлади. Натижада, система тўла кузатувчан бўлади.

Маълумки, система кузатувчан бўлиши учун аввало, у бошқарилувчан бўлиши керак. Бу эса юқоридаги (7) системада  $A$  – матрицанинг хос сонлари каррали бўлмаса, бошқарилувчан бўлмайди – деган фикрга зид.

Иккинчи томондан теоремада берилган

$$\dot{x} = Ax(t-h) + (BC)v, \quad x(t) \in R^n, v(t) \in R^k$$

система (7) системага ўхшаш.

Равшанки, (7) система кузатувчан система бўлиши учун унга ўхшаш бўлган

$$\dot{x} = Ax(t-h) + (BC)v, \quad x(t) \in R^n, v(t) \in R^k$$

система тўла бошқарилувчан бўлиши керак.

Система тўла бошқарилувчан бўлиши учун эса Кальман мезони бажарилиши керак. Бу эса юқоридаги (7) тенгламалар системаси тўла кузатувчан бўлиши учун  $A$  матрица хос сонлари каррали бўлмаслиги керак–деган фикрга зид. Бу зиддиятлар бошқарилувчан системаларнинг кузатувчанлиги устида кўшимча илмий-тадқиқот ишларини олиб бориш заруриятини келтириб чиқаради.

Кечикишли объектлар ҳаракатини ифодаловчи дифференциал-айирмали тенгламалар системаси учун нисбатан кузатувчанлик ва тўла кузатувчанлик тушунчалари киритилади.

Агар  $\phi$  бошланғич функцияни аниқлаш учун чегараланган  $T$  вақтда кирувчи ва унга мос чиқувчи параметрлари етарли бўлса, у ҳолда (7) тенгламалар системаси билан ифодаланувчи чизиқли динамик объект тўла кузатувчан дейилади.

(7) тенгламалар системаси нисбатан кузатувчан бўлиши учун чегараланган  $T$  вақт ва  $A, H$  матрицалардан иборат қуйидаги шарт бажарилиши керак:

$$\text{rang}[(HT), A(HT), \dots, A^{n-1}(HT)] = n$$

Бошқа томондан, техник системаларда кузатувчанликка яқин бўлган идентификация тушунчаси мавжуд. Назарий томондан идентификация кузатувчанликни хусусий ҳоли деб қаралади. Лекин амалиётда идентификация алоҳида махсус йўналиш сифатида олинади.

Диссертациянинг «**Ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи саноат роботининг бошқарув функцияси параметрлари сонини мақбуллаштириш моделининг робототехник тизимларга тадбиғи**» деб номланган учинчи бобида кечикишга оид объектларнинг координатали кечикиш синфига тегишли СРнинг технологик қўлланиш характери бўйича ҳаракат моделлари келтирилган. Координатали кечикиш синфига тегишли объектларни ифодаловчи чизиқли дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи объектлар учун бошқариш функцияси параметрлари сонини мақбуллаштириш моделини робототехник тизимларга, хусусан СРга қўллаш мумкинлиги исботланган ва қўллаш хоссалари ишлаб чиқилган.

Автоном бошқарилувчи системалар турғунлигини текшириш мезонлари таҳлил қилинган ва улардан фойдаланиш бўйича таклифлар ишлаб чиқилган. Кечикишга оид объектларнинг координатали кечикиш синфига тегишли СРнинг асимптотик турғунликка текшириш модели келтирилган. Бундан ташқари, СРнинг технологик қўлланилиш характери бўйича ҳаракат траекториясини турғунликка текшириш моделлари тавсия қилинган.

СР ҳаракатини бошқариш мақбуллаштирилгандан сўнг унинг позицион аниқлиги масаласи иккига ички ва ташқи омиллар бўйича ўрганилган. Функционал-параметрик мослиги текширилган.



Ҳаракати чизикли дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи ва бошқарув функциясига боғлиқ СР тенгламасининг кўриниши куйидагича:

$$\ddot{x}(t) = Ax(t-h) + Bu(t) \quad (10)$$

бу ерда  $x = x(t) - n$  – ўлчовли СРнинг  $t$  вақтдаги ҳолат вектори;

$A$  – СРнинг фазовий ҳолатини ифодаловчи  $(n \times n)$  – ўлчовли ўзгармас матрица;

$B$  –  $(n \times m)$  – ўлчовли ҳаракатнинг бир звенодан иккинчи звенога ўтиш эҳтимоллиги матрицаси;

$u(t)$  –  $(1 \times n)$  – ўлчовли системани бошқарув функцияси,  $h > 0$ ,  $-h \leq t \leq T$ .

$h$  – чексиз кичик миқдор.

СР ҳаракатида  $m = n$  деб олинади чунки, СР звенолари ҳаракатда барчаси иштирок этади, деб фараз қилинади.

(10) тенгламани ечиш учун тартиби пасайтирилади ва куйидаги тенгламалар системаси ҳосил қилинади:

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = Ax(t-h) + Bu(t) \end{cases} \quad (11)$$

Агар  $(x(t), y(t))$  система ҳолати  $0 < t \leq h$  ораликда аниқланган бўлса, у ҳолда  $t > 0$  да  $u(t)$  бошқариш функцияси мавжуд бўлади.

(11) системани оптимал бошқаришда бошқарув функцияси параметрлари сонини мақбуллаштириш мумкинми? – деган саволга жавоб топиш керак.

(11) система кечикишли объектлар классификациясида координатали кечикишни характерлаганлиги учун СРнинг фазовий ҳаракатида ҳар бир звенонинг бошқарилувчанлигига аҳамият бериш зарур.

СР фазовий мураккаб операцияни амалга оширишида бошқариш функцияси параметрларини мақбуллаштириш учун роботнинг ҳар бир звеноси ҳаракатида бошқариш параметрларини мақбуллаштириш керак бўлади. Яъни, умумий система қисм системаларга бўлинади.

Энди, (11) системанинг 2-бобда берилган теорема шартларини қаноатлантиришини текширайлик.

2-бобда берилган СР ишчи қўли ҳаракатининг кинематик тенгламасини эътиборга олиб, бузилган йўналишни аниқлаш учун ҳар бир звенонинг мос координаталар системаси ўқларидан фойдаланилади. Бузилган йўналиш аниқлангандан сўнг, ҳар бир звенонинг фазовий жойлашиши ҳисобга олинади ва звенонинг ҳаракат матрицаси билан звенонинг фазода жойлашиш радиус вектори  $r_i = r_i(x, y, z, 1)$  иштирокидаги матрица ранги текширилади, яъни  $rank[(A_i, r)]$ . Бу ерда  $A_i$   $i$  – звенонинг ҳаракат матрицаси.

Агар Калман мезони бажарилса, яъни  $rank[(A_i, r)] = 4$  бўлса, бузилган йўналишли  $i$  – звено тўла бошқарилувчан ва унда иштирок этувчи бошқариш функциясини мақбуллаштириш мумкин бўлади.

2-бобда берилган мақбуллаштириш тўғрисидаги теоремани СРга қўллаш жараёнида,  $C_k, B_k$  матрицаларни танлашда  $(n \times n)$  – ўлчовли матрица  $((n+1) \times (n+1))$  – ўлчовли матрица орқали тасвирланиши СР ҳаракатининг кинематик тенгламасидан маълум бўлди.  $C_k, B_k$  матрицаларни кўриниши қуйидагича бўлади:

$$C_k = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B_k = \begin{bmatrix} B & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Теореманинг биринчи шартини бажарилиши учун СРнинг техник конструктив характеристикаларидан келиб чиқиб,  $P$  матрица танланади ва  $PB_k = C_k P$  тенгликни қаноатлантириши текширилади.

Иккинчи шарт бажарилиши учун  $A$  матрица хос сонларининг карралилик даражасига қараб, шундай ўлчови  $(n \times k)$  ( $k \leq n$ ) бўлган  $C$  қисм матрица топиладики, теорема шартида берилган системанинг тўла бошқарилувчанлиги текшириш учун  $[(BC), A(BC), A^2(BC), \dots, A^{n-1}(BC)]$  матрицани рангини эмас, балки  $[(B_k C_k), A(B_k C_k), A^2(B_k C_k), \dots, A^{n-1}(B_k C_k)]$  матрица ранги текширилади. Сабаби, робототехник тизимлар бошқа тизимларга нисбатан фарқ қилган ҳолда, тузилмавий мақбуллаштириш нуқтаи назардан қаралса, у ҳолда уч ўлчовли фазода тўртинчи компонент қўшилмайди. Агар мақбуллаштириш параметрик нуқтаи назардан қаралса, у ҳолда тўртинчи компонент қўшилади. СР учун параметрик мақбуллаштириш қаралганлиги учун (4) системанинг тўла бошқарилувчанлигини текширишдаги матрица 2-бобда берилган теорема шартидаги матрицадан фарқ қилади.

(2) тенглик  $A$  матрица элементларини  $C_k$  матрица элементларига бирқийматли акслантиришга эквивалент. Чунки  $B$  матрица  $A$  матрицанинг фазовий ҳолатида ҳаракатни бир нуқтадан иккинчи нуқтага ўтиш эҳтимоллигини ифодалайди.

(3) системага мақбуллаштириш модели тадбиқ қилингандан сўнг унинг турғунлиги қандай бўлади?

Турғунлик–микдор кўринишидаги эмас, сифат характериға эға бўлган ҳаракат хоссасидир.

Маълумки, доимий кечикишли чизикли дифференциал тенгламалар системаси турғун бўлиши учун зарурий ва етарли шарт сифатида характеристик тенгламанинг барча илдизлари координаталар системасининг чап ярим текислигида ётиши керак.

СР ҳаракатини ифодаловчи (11) тенгламалар системаси ечимининг турғунлигини билиш учун унга эквивалент бўлган қуйидаги:

$$\dot{y} = Ay(t-h), h > 0 \quad (12)$$

тенглама ечимини турғунликка текшириш керак бўлади.

$h$  нинг ( $h > 0$ ) етарлича кичик қийматларида (12) тенглама ечимининг турғунлиги қуйидаги тенглама ечимининг турғунлиги билан эквивалент:

$$\dot{y} = G(h)y(t), G(h) = Ae^{-hG(h)} \quad (13)$$

$G(h)$  матрицани  $h$  бўйича қаторга ёйиб топиш мумкин.

$$G(h) = A - hA^2 - \frac{h^2}{2}A^2 + O(h^2)$$

$G(h)$ нинг топилган қийматлари (13) тенгламалар системасига қўйилади ва система ечилади.

$h$  нинг ( $h > 0$ ) етарлича кичик қийматларида (13) тенгламалар системаси асимптотик турғун бўлади.

Асимптотик турғунлик тушунчаси Ляпунов маъносидаги турғунликка нисбатан тор тушунча. Агар система асимптотик турғун бўлса, у Ляпунов маъносида турғун бўлмаслиги мумкин.

Позицион аниқлик СРнинг муҳим характеристикаларидан биридир. У технологик жараёни бажариш учун СРдан фойдаланиш имкониятини аниқлайди. Амалда СР технологик операцияни амалга оширишида ушлаш қурилмаси берилган ёки режалаштирилган нуқтада тўхтамайди, балки шу нуқта атрофида тўхтайдди. СРнинг ушлаш қурилмасининг бу четлашиши позицион хатолик ёки позицион оғишганлик дейилади.

СРнинг позицион аниқлигини ошириш учун қуйидагича ёндошувни қарайлик.

СР технологик модул таркибида детал билан ҳаракатланганда идеал ҳолдаги траекторияга нисбатан оғишиш кузатилади. Бу оғишиш фазода эллипсоидни ифодалайди.

Робот технологик модул таркибида детал билан ҳаракатланганда  $\Omega$  йўналтирувчи текислик тушунчаси киритилади. Бу аниқ кўринишини тасвирлаш учун йўналтирувчи  $\Omega$  текислик эллипсоид кўринишида эмас, балки шар кўринишида олинади, сабаби робот детал билан ҳаракатланганда фазовий манипуляция вақтида детал ҳаракати шарга ички чизилади.

Роботнинг иш зонаси параллелепипед кўринишида бўлади. Лекин аниқликни янада ошириш мақсадида ҳажми параллелепипеддан кичик бўлган цилиндр олинади

Маълумки, шар фазода сфера тенгламаси билан ёзилади:

$$\Omega: x^2 + y^2 + z^2 = 1.$$

Цилиндр тенгламаси

$$R: \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad z = h.$$

Сфера ва цилиндр ўзаро кесишишиб, ечим ҳосил қилиши учун улар ягона система остида биргаликда ечилади.

Агар система ягона ечимга эга бўлса, у ҳолда СР детални белгиланган жойга қўя олади. Акс ҳолда, йўналтирувчи ва қамраб олувчи текисликлар кесишмайди.

СРнинг позицион аниқлигига қаршилик қилувчи нафақат, ички омиллар, балки ташқи омиллар ҳам мавжуд. Масалан, оғишганликни асосий сабабларидан СР звеноларини тайёрлашда технологик ноаниқлик, кинематик занжирларни уланиш жойидаги бўшлиқлар (зазорлар), алоҳида тугунларни

йиғишдаги хатолик, бошқариш тизими ҳаракатидаги ноаниқлик, эластик (қайишқоқ) деформация ва ҳ.к.

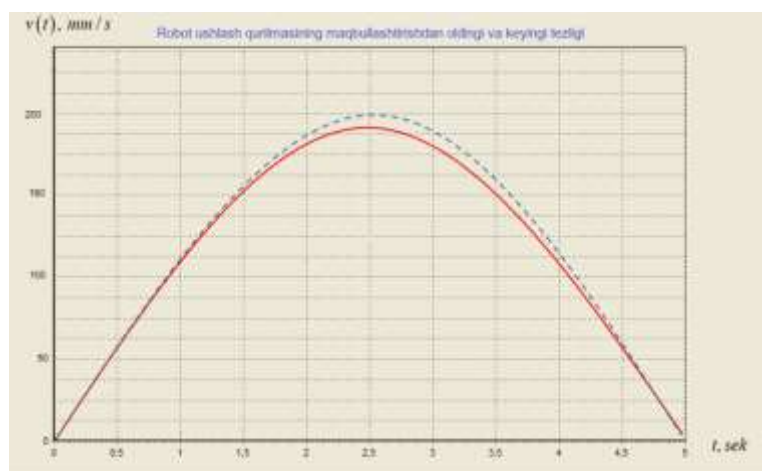
Кинематик звеноларни уланиш жойидаги бўшлиқлар люфт(тор оралик)ларни пайдо бўлишига олиб келади. Бу ўз навбатида нафақат статик, балки динамик хатоликни келтириб чиқаради. Агарда кинематик занжирда бирқанча люфтлар мавжуд бўлса, СР ишини ёмонлаштиради ва позицион хатоликни ошишига олиб келади.

Эластик деформация СР звеноларини эгиловчанлиги натижасида юзага келади. СР ҳаракатида эластик деформация динамикада алоҳида намоён бўлади ва ҳар бир звенода келиб чиқувчи хатолик умумий бажарувчи механизми хатолигини ошишига олиб келади.

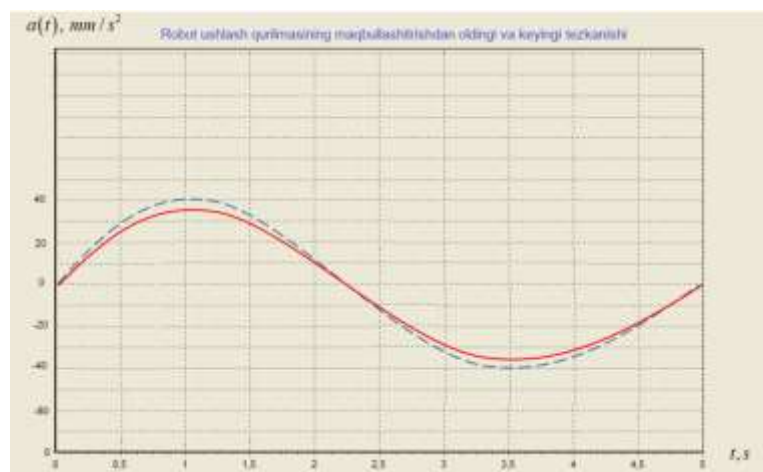
Позицион оғишишни аниқлаш учун СР звенолари ҳаракатида бир вақтда таъсир қилувчи ҳар бир юқоридаги хатолик манбасини таҳлил қилишга тўғри келади.

Диссертациянинг «**Ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи робототехник тизимлар учун бошқарув функцияси параметрлари сонини мақбуллаштириш моделининг умумий алгоритми ва унинг тадбиғи**» деб номланган тўртинчи бобида ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи кечикишга оид объектларнинг бошқариш функцияси параметрлари сонини мақбуллаштириш модели ва уни конкрет объект сифатида саноат роботига татбиқлари, татбиқий жараёндан кейинги робот ҳаракат траекториясининг турғунлиги, позицион аниқлигини ошириш моделининг алгоритмлари ва дастурий воситаси мазкур бобда қаралган. Бундан ташқари, олинган назарий натажалар асосида яратилган дастурий восита олти звеноли саноат роботига қўллаш амалга оширилган.

Ҳисоб тажрибаларда роботнинг ушлаш қурилмасининг бошқарув функциясининг параметрларини сонини мақбуллаштиришдан олдинги ва кейинги тезлик (1-расм) ҳамда тезланишини келтирамиз (2-расм).



**1-расм. Робот ушлаш қурилмасининг бошқарув функцияси параметрлари сонини мақбуллаштиришдан олдинги (қизил рангда) ва мақбуллаштиришдан кейинги тезлик (кўк рангда).**



**2-расм. Робот ушлаш қурилмасининг бошқарув функцияси параметрлари сонини мақбуллаштиришдан олдинги (қизил рангда) ва мақбуллаштиришдан кейинги тезланиши (кўк рангда).**

Иловада диссертация иши натижаларининг амалиётга қўлланилганлигини тасдиқловчи хужжатлар, Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигидан ЭХМ учун яратилган дастурларни расмий рўйхатдан ўтказилганлиги ҳақидаги гувоҳномалари нусхалари келтирилган.

## ХУЛОСА

«Ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи саноат роботини мақбул бошқариш усули» мавзусидаги диссертация иши бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим этилди:

1. Ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи бошқарилувчан автоном тизимларни мавжуд бошқаришдаги камчиликлар ўрганилган. Кечикишга оид объектларнинг координатали кечикиш синфига тегишли объектлар ва конкрет объект сифатида саноат роботи ҳаракатини оптимал бошқариш учун бошқариш параметрлари сонини мақбуллаштириш масаласи қўйилган.

2. Кечикишга оид объектларнинг координатали кечикиш синфига тегишли ҳаракати чизиқли дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаловчи объектларни оптимал бошқариш учун бошқарув параметрлари сонини мақбуллаштиришга хизмат қилади.

3. Автоном бошқарилувчи тизимларнинг ва уларнинг дифференциал-айирмали ҳоли учун мавжуд кузатувчанлик хоссаси таҳлил қилинган ҳамда камчилиги аниқланган.

4. Ишлаб чиқилган кечикишга оид объектларнинг координатали кечикиш синфига тегишли чизиқли дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи объектлар учун бошқарув функцияси параметрлари сонини мақбуллаштириш моделини робототехник тизимларга, хусусан саноат роботига қўллаш имконини беради.

5. Автоном бошқарилувчи системалар турғунлигини текшириш мезонларини таҳлил қилган ҳолда улардан фойдаланиш бўйича таклифлар ишлаб чиқилган бўлиб, кечикишга оид объектларнинг координатали кечикиш синфига тегишли саноат роботининг технологик қўлланилиш характери бўйича турғунликка текшириш имконини беради.

6. Саноат роботига мақбуллаштириш модели тадбиқ қилингандан сўнг унинг фазовий мураккаб операциясини амалга оширишида позицион аниқлигини таъминлашга хизмат қилади.

7. Назарий натижалар олти звеноли Arc Mate 100iB/6S роботига тадбиқ қилинган ва зарурий натижалар олинган.

8. Ишлаб чиқилган дастур воситаси «ҚХМКТМ» ҳамда «Integral avtomatika servis» масъулияти чекланган жамиятларда бир хил типдаги деталларга ишлов беришга мўлжалланган ишлов берувчи марказ билан жиҳозланган роботлаштирилган технологик мажмуада қўлланилган ҳамда материал-энергия ресурслар сарфини 10 % камайтиришга хизмат қилади.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.13/30.12.2019.Т.07.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

---

**НАУЧНО-ИННОВАЦИОННЫЙ ЦЕНТР ИНФОРМАЦИОННО-  
КОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ  
УНИВЕРСИТЕТЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИМЕНИ  
МУХАММАДА АЛ-ХОРАЗМИЙ**

**АРОЕВ ДИЛШОД ДАВРОНОВИЧ**

**ОПТИМАЛЬНЫЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ  
ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА, ОПИСЫВАЕМЫМ СИСТЕМОЙ  
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-РАЗНОСТНЫХ УРАВНЕНИЙ**

05.01.02 – Системный анализ, управление и обработка информации

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

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за №В2019.3.PhD/T1293

Диссертация выполнена в Научно-инновационном центре информационно-коммуникационных технологий при Ташкентском университете информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице научного совета ([www.tuit.uz](http://www.tuit.uz)) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

**Научный руководитель:**

**Онорбоев Баходиржон Очилбоевич**  
доктор технических наук, профессор.

**Официальные оппоненты:**

**Мухамедиева Дилноз Тулкиновна**  
доктор технических наук, профессор.

**Якубжанова Дилфуза Кодировна**  
доктор философии по техническим наукам

**Ведущая организация:**

Ташкентский институт текстильной и лёгкой промышленности

Защита диссертации состоится «14» 01 2021 г. в 16<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета DSc.13/30.12.2019 T.07.01 при Ташкентском университете информационных технологий. (Адрес: 100202, г.Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-64-43; факс: (99871) 238-65-52; e-mail: [tuit@tuit.uz](mailto:tuit@tuit.uz)).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского университета информационных технологий (регистрационный номер № \_\_\_\_\_). (Адрес: 100202, г.Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-65-44).

Автореферат диссертации разослан «1» 01 2021 года.  
(протокол рассылки № \_\_\_ от «1» 01 2021 г.).



**Р.Х. Хамдамов**

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

**Ф.М. Нуралиев**

Ученый секретарь научного совета по присуждению учёных степеней, д.т.н., доц

**А.В.Кобулов**

Председатель научного семинара при научном совете по присуждению ученых степеней, д.т.н., проф.



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

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** Мировой опыт показывает, что для эффективного управления всеми техническими системами необходимо управлять ими для достижения определенной цели. При математическом моделировании их движения, модели сводятся к системам, зависящим от функции управления, которая выражается дифференциальными уравнениями. Среди этих систем стоит отметить систему линейных дифференциально-разностных уравнений.

Оптимизация числа параметров функции управления объектов, представленных системой дифференциально-разностных уравнений, обеспечивает ускорение процессов, происходящих в управляемых объектах, и экономию затрачиваемых энергоресурсов. Это означает, что на практике большая часть работы производственных объектов основана на использовании системы дифференциально-разностных уравнений, а с теоретической точки зрения, формирование методов управления дифференциальными уравнениями является важным вкладом в теорию управления. Это представляет собой на сегодня одну из актуальных финансово-экономических задач.

В нашей стране были достигнуты значительные результаты в приоритетных областях науки, в том числе и в изучении Теории управления. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан особое внимание уделяется решению проблем по созданию эффективных механизмов развития научно-исследовательской и инновационной деятельности, внедрению научных и инновационных достижений.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных Указами Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 года №УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» и от 19 февраля 2018 года №УП-5349 «О мерах по дальнейшему совершенствованию информационных технологий и связи», Постановлениями Президента Республики Узбекистан от 29 августа 2017 года №ПП-3245 «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы управления проектами в сфере информационно-коммуникационных технологий», от 27 апреля 2018 года №ПП-3682 «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов», от 11 августа 2020 года №ПП-4708 «О мерах по повышению качества образования и развитию научных исследований в области математики» и другими нормативными актами, относящимися к данной сфере.

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

**Степень изученности проблемы.** Анализ литературы по объектам, представленным системой дифференциально-разностных уравнений, показал, что полный обзор концепции запаздывающих объектов впервые индустрия роботов упоминается в работах Л.Эльсгольца и В. Хана в начале 20-х годов XX века. Впервые вопросы управления объектами, представленными системой дифференциально-разностных уравнений, нашли отражение в работах Л. Вейса, где отмечалась последовательность нуль-управляемости с полной управляемостью в евклидовом пространстве. Хотя Л.Вейс доказывал, что не все нестационарные системы являются полностью управляемыми и выдвинул гипотезу, что линейные дифференциально-разностные стационарные системы с запаздыванием полностью управляемы, позже А.Зверкин и В. Попов привели примеры, отвергающие гипотезу Л.Вейса. А.Коробов в течение последних 10 лет вел исследования в этой области и хотя добился определенных результатов, однако исследований по оптимизации числа параметров функций управления в системе линейных стационарных дифференциальных уравнений не проводилось.

В Узбекистане большой вклад в разработку моделей и алгоритмов оптимального управления автономными системами управления внесли В.К.Кабулов, Н.А.Муминов, О.М.Набиев, Х.З.Игамбердиев, З.З.Шамсиев, Ш.Й.Пулатов, Б.О.Онорбоев и другие учёные.

Недостаточно изучены вопросы оптимизации числа параметров функций управления при реализации сложных пространственных операций промышленными роботами, действия которых выражаются системой линейных стационарных дифференциально-разностных уравнений.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнена в рамках научных работ Научно-инновационного центра информационно-коммуникационных технологий при Ташкентском университете информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий по проектам: А-5-008 «Разработка программно-алгоритмических средств управления движением рабочих органов технологических машин и процессами их подготовки» (2015-2017), КА-3-017 «Создание и совершенствование высокопроизводительных и ресурсосберегающих устройств и механизмов технологических машин Валли с учетом свойств обрабатываемого материала» (2015-2017).

**Целью исследования** является разработка математических моделей для повышения производительности промышленных роботов путем оптимизации числа функций управления при управлении объектами с запаздыванием, представленных системой линейных дифференциально-разностных уравнений.

**Задачи исследования:**

анализ существующих моделей управления автономно управляемыми системами;

разработка модели оптимизации числа параметров управления объектов с запаздыванием, представленных системой линейных дифференциально-разностных уравнений;

разработка модели оптимизации числа параметров функции управления для робототехнических систем класса объектов с запаздыванием, движение которых представлено системой линейных дифференциально-разностных уравнений;

проверка на устойчивость движения робототехнических систем, движение которых представлено системой дифференциальных-разностных уравнений.

**Объектом исследования** является функционирование промышленных роботов класса объектов с запаздыванием.

**Предмет исследования** - модели, алгоритмы и программные средства, служащие оптимизации движения промышленных роботов.

**Методы исследования.** В исследовании были использованы такие методы как системный анализ, дифференциальные уравнения, алгебра и теория чисел, а также теория оптимального управления.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

разработана модель оптимизации управления для объектов класса с координатным запаздыванием, которые представлены системой линейных дифференциальных-разностных уравнений;

доказана возможность оптимизации управления движениями промышленных роботов, представленных системой линейных непрерывных дифференциально-разностных уравнений, и разработана соответствующая модель управления;

разработана модель оптимизации числа параметров функции управления движения промышленного робота описываемого системой линейных непрерывных дифференциально-разностных уравнений и обобщенный алгоритм решения;

разработан подход к проверке типовых уравнений, описывающих движение промышленных роботов, на асимптотическую устойчивость.

**Практические результаты данного исследования:**

разработаны математические модели и их программное обеспечение для совершенствования вопросов моделирования и управления движением промышленными роботами, которые представлены системой дифференциально-разностных уравнений;

разработана модель оптимизации числа параметров функции управления объектами с запаздыванием, движение которых представлено системой линейных дифференциально-разностных уравнений;

исследовано наблюдаемость объектов, движение которых представлено системой линейных дифференциально-разностных уравнений;

разработана модель оптимизации числа параметров функции управления для промышленных роботов, движение которых представлено системой дифференциально-разностных уравнений;

разработан подход к проверке промышленных роботов на устойчивость движения, которое представлено системой дифференциально-разностных уравнений;

рассмотрены вопросы позиционной точности промышленных роботов при выполнении ими сложных пространственных манипуляций;

теоретические результаты были применены в шестизвенном промышленном роботе.

**Достоверность результатов исследования.** Достоверность исследования подтверждается разработкой адекватных математических моделей и теоретическим обоснованием эффективности их применения для промышленных роботов, оптимизацией числа параметров функций управления объектов с запаздыванием, представленных системой дифференциально-разностных уравнений.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость исследования заключается в создании модели оптимизации функций управления объектами с запаздыванием, соответствующей модели управления движением промышленных роботов, возможности ее применения относительно промышленных роботов и теоретическим обоснованием соответствующей модели управления и модели проверки движения робота на предмет устойчивости.

Практическая значимость исследования заключается в том, что алгоритмы и программное обеспечение, разработанные на основе теоретических результатов, могут быть использованы не только для роботизированных систем, но и для объектов с запаздыванием, которые представлены системой дифференциально-разностных уравнений, что позволяет сэкономить энергетические ресурсы, необходимые для их движения.

**Внедрение результатов исследования.** На основе разработанных математических моделей, алгоритмов и программных комплексов исследования движения промышленного робота:

**Внедрение результатов исследования.** На основе разработанных математических моделей, алгоритмов и программных комплексов исследования движения промышленного робота:

алгоритмы и модели оптимизации количества параметров функции управления применены в роботизированном технологическом комплексе, оснащенном центром различной обработки деталей, в ООО «Конструкторско-технологический центр сельскохозяйственного машиностроения» (справка АО «Узагротехсаноатхолдинг» Республики Узбекистан №04-10/1972 от 13 ноября 2019 года). Результаты применения показали, что в роботизированном технологическом комплексе произошло запаздывание в управлении промышленным роботом и ощущался избыток свободных переменных при выполнении промышленным роботом операций пространственного манипулирования. Внедрение в работу промышленных роботов оптимизации количества параметров функции управления позволили

повысить скорость захватного устройства на 11.5 мм/с и его ускорение на 5 мм/с<sup>2</sup>;

разработанные модели и алгоритмы применены в роботизированном технологическом комплексе, оборудованным обрабатывающим центром для различной обработки деталей, в ООО «Integral avtomatika servis» (справка АО «Узагротехсаноатхолдинг» Республики Узбекистан от 13 ноября 2019 г. №04-10/1972). Результаты применения позволили сократить на 2 ед. количество параметров функции управления захватным устройством и 5-звеном промышленного робота в роботизированном технологическом комплексе, а также снизить на 10% материально-энергетические затраты при управлении технологическими процессами.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты исследования обсуждались на 3 международных и 2 республиканской научных конференциях.

**Опубликованность результатов исследования.** По теме диссертации опубликованы 11 научных работ, их них 5 статей в научных изданиях, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов докторской диссертации, в том числе 1 - в зарубежном, 4 - в республиканских журналах, а также получено 1 свидетельство о регистрации программных продуктов для ЭВМ.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 100 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определены цель и задачи, объект и предмет исследования, приводится соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, изложены научная новизна, практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрывается теоретическая и практическая значимость результатов исследования, приведены внедрение результатов исследования, сведения об опубликованности результатов и структуре диссертации.

В первой главе диссертации «**Современное состояние управления движением объектов, представленных систем дифференциально-разностных уравнений, цели и задачи исследования**» приводится классификация объектов с запаздыванием, представленных в виде линейных дифференциально-разностных уравнений. Всесторонне проанализированы существующие фундаментальные и прикладные исследования по управлению объектами с запаздыванием, которые представлены системами дифференциально-разностных уравнений. Приведён анализ теоретических и практических результатов создания и эффективного применения в производстве промышленного робота, характеризующий класс объектов с

координированным запаздыванием. Анализ литературы показал, что в управлении действиями ПР, выражающимися системой дифференциально-разностных уравнений, существуют некоторые недостатки и пробелы:

1. Известно, что динамические действия ПР выражаются уравнениями Лагранжа II, Ньютона-Эйлера, Даламбера, Гаусса, Аппеля и Кейна, и существует несколько способов решения этих уравнений. При решении этих уравнений число уравнений удваивается относительно числа неизвестных. Это означает, что оптимальная траектория не является единственным ПР в сложном пространственном движении. Лицо, принимающее решение, не может принять однозначное решение по соответствующей траектории. В результате, процесс останавливается из-за столкновения ПР с предметами внешней среды. ПР меняет структуру захватных устройств. Такие случаи вызывает чрезмерную зависимость ПР от кинематической цепи. Это приводит к принятию других решений и дополнительным исследованиям.

2. Коэффициенты трапециевидной системы по пункту №1, которые представляют ее движения для оптимального управления ПР и появление препятствий на каналах связи, вызывают запаздывание движения робота относительно установленного времени, и увеличивают общее время, затрачиваемое на технологическую операцию. Кроме этого, это также приводит к снижению устойчивости робота и ухудшению его работы.

Пусть кинематическое действие ПР, принадлежащего к классу объектов с координатными запаздываниями, представлено следующей системой уравнений:

$$\dot{x}(t) = Ax(t-h) + Bu(t) \quad (1)$$

Здесь  $x = x(t)$  является  $n$ -мерным видом вектора по параметру времени  $t$ ;

$A$  – постоянная матрица размера  $(n \times n)$ –, которая представляет пространственное состояние системы;

$B$  – постоянная матрица размерностью  $(n \times m)$ ;

$u$  –  $(1 \times n)$ – мерная функция управления, где  $h > 0$ ,  $t_0 \leq t \leq T$ .

Чтобы уменьшить коэффициенты, рассчитанные по движению ПР и общему времени заданной операции, пусть задачей системы уравнений (1) будет:

Можно ли сохранить полную управляемость над системой путем оптимизации количества параметров функции управления объектов, характеризующихся системой (1)?

Иначе говоря, существует ли в математическом языке функция управления  $v(t) \in R^k \subset R^n$ –, обеспечивающая  $f : R^1 \times R^n \times R^k \rightarrow R^n$ – ( $f$  – непрерывную функцию)?

В качестве условия задачи пусть будет: 1) система в виде линейного дифференциально-разностного уравнения; 2) система одномерна.

Если поставленные вопросы решаются положительно, то с теоретической и практической точек зрения возникают следующие преимущества:

1. Разработка модели оптимизации параметров функции управления при оптимальном управлении автономными системами управления, в частности автономными линейными дифференциальными уравнениями, является теоретическим вкладом в раздел управления и наблюдений в теории управления.

2. Объекты, представленные системой дифференциальных уравнений движения, в частности, разработка модели оптимизации параметров управления для оптимального управления движением СР, обеспечивают устойчивость роботов, энергоэффективность и использование минимальных производственных площадей.

Во второй главе диссертации «**Оптимизация количества параметров функции управления движением объекта, представленных системой дифференциально-разностных уравнений**» описываются понятия полного и относительного управления для автономных управляемых систем, в частности, для объектов, выраженных системой дифференциально-разностных уравнений. Приводится анализ динамических уравнений и алгоритмов их решения, которые представляют действия ПР. Разработана модель оптимизации числа параметров функции управления при управлении объектами, выраженными системой линейных дифференциально-разностных уравнений. Были проанализированы свойства наблюдаемости автономно управляемых систем и их дифференциально-разностного выражения, а также выявлены недостатки. Описаны концепции полных и относительных наблюдений линейных систем.

Прежде чем уменьшить количество параметров функции управления объектов, действия которых выражаются системой уравнений (1), необходимо определить направление точно искаженной системы координат.

Если искаженное направление не может быть определено, то возникают проблемы в управлении объектами, выраженными системой (1) уравнений, и обеспечении оптимальности числа параметров.

Существует также вектор  $r = (a, b, c, d)$  для обнаружения искаженного направления, где выполняются уравнения  $q^* r = 1, q^* e^A r = 0, q^* e^A A r = 0, q^* e^A A^2 r = 0, B = AZ - ZA$ , при этом,  $Z = r q^* e^A$ , тогда система уравнений (1) считается искаженной в направлении  $q$ . Кроме того, пара  $(A, r)$  для выбранного вектора  $r = (a, b, c, d)$  будет полностью управляемой.

Для решения приведенной выше задачи, необходимо рассматривать ее с двух сторон. С одной стороны, нужна разработка подхода к сокращению параметров функции управления в управлении существующей функционирующей системой, с другой стороны, следует определив искаженное направление, а затем используя уравнение восстановления, разработать подход к сокращению числа параметров функции управления.

1. Диссертант сосредоточился на разработке подхода для решения первой задачи.

Существуют матрицы и векторы для системы, которая должна быть точно искажена во времени и для которой необходимо выполнение следующего уравнения:

$$PA_k = 0, PB = VP, v^* P(e^{hB_k} - J_k) = 0, v^* P \bar{E} k = q^*$$

Пусть числа  $A$  матрицы  $k$ -кратны. Матрица  $A$  ставится в диагональную форму

$$J(A) = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & A_k \end{bmatrix}$$

Вид каждого диагонального матричного элемента

$$A_j = \begin{bmatrix} \lambda_j & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_j & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_j & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda_j \end{bmatrix}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, k.$$

Матрица  $B$  заполняется до размера  $(n \times n)$ , чтобы сформировать следующую матрицу  $B_k$ :

$$B_k = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$$

Согласно теореме, соеращающей количество параметров управляющей функции, существует такая матрица  $C$ , которая заполняется до размера  $(n \times n)$ , и формируется следующая матрица:

$$C_k = \begin{bmatrix} C \\ 0 \end{bmatrix}$$

На основании вышеизложенного можно сформулировать теорему.

**Теорема.** Пусть система (1) имеет искажение в точке  $q$ . Если найдётся такая  $(n \times k)$ -мерная матрица  $C \subset A$ , где  $k$ -кратной матрице  $A$  в момент времени  $kh$  соответствует некоторое натуральное число  $n$ .

1. Существует  $(n \times n)$ - мерная матрица  $P$ , где  $PB_k = C_k P$ .

2. Система  $\dot{x} = Ax(t-h) + (BC)v$ ,  $x(t) \subset R^n, v(t) \subset R^k$  полностью управляема. Если выполняется условия 1 и 2, система (1) будет  $k$ -управляемой ( $k \leq n$ ).

2. Следует сосредоточиться на разработке подхода для решения второй задачи.

Основываясь на второй задачу, для восстановления искажения точек, используется уравнение восстановления.



При восстановлении искаженных точек матрица  $A$  в системе уравнений (1) рассматривается как функция времени.

Следующее дифференциальное уравнение называется уравнением восстановления:

$$\dot{x}(t) = \int_{-h}^0 A(\theta)x(t+\theta)d\theta + Bu(t) \quad (3)$$

Для перехода от уравнения (3) к простому дифференциальному уравнению производное выводится с обеих сторон уравнения по времени  $t$ .

$$\ddot{x}(t) = A(h)x(t-h) + B\dot{u}(t) \quad (4)$$

Здесь  $A(0) = 0$ .

Если функция управления  $u(t)$  непрерывна и ограничена, то его производным будет  $\dot{u}(t)$ . Кроме того, поскольку (1) является полностью управляемой системой уравнений, то для функции управления  $u(t)$  будет:

$$|u(t)| \leq \varepsilon, \quad |\dot{u}(t)| \leq \varepsilon, \quad \dots, \quad |u^{(r)}(t)| \leq \varepsilon.$$

При условии, что  $A(h)$  постоянная матрица и указано следующее:

$$\dot{u}(t) = w(t), \quad A(h) = D.$$

Уравнение (4) выглядит следующим образом:

$$\ddot{x}(t) = Dx(t-h) + Bw(t) \quad (5)$$

если снижаем порядок системы уравнений (5)

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = y(t) \\ \dot{y}(t) = Dx(t-h) + Bw(t) \end{cases} \quad (6)$$

Если положение системы  $(x(t), y(t))$  определено в промежутке  $-h \leq t \leq h$ , то при условии  $t > 0$  будет функция управления  $u(t)$ .

Для системы уравнений (6) уместна теория, приведенная выше.

Задача 2 также может восстановить искаженные точки, используя инвариантные подпространства. В этом случае, рассматриваемая система подразделяется на подпространства «К-управляемость», где идентифицируются инвариантные подпространства и исправляется искажение.

Если система (1) дифференциально-разностных уравнений в виде  $\dot{x}(t) = Ax(t-h) + Bu(t-\theta)$ , то трудно оптимизировать количество параметров функции управления, для таких систем возможно только решение проблемы ускорения.

Полученные результаты могут быть использованы для повышения ускорения, а также экономии энергоресурсов при движении объектов, выраженных системой дифференциально-разностных уравнений.

С физической точки зрения, все переменные динамической системы связаны с системой координат, и системой является наблюдаемой, если можно определить положение системы за ограниченное время. В

зависимости от детерминированного или стохастического состояний системы наблюдаемость может быть различной.

Наблюдаемость системы связана с управляемостью системы. Для линейных систем свойства управляемости и наблюдаемости системы являются необходимыми и достаточными условиями для ранга матрицы, составленной из ее коэффициентов, получаемым по критерию Кальмана, согласно которому ранг матрицы должен быть равен размеру подпространства рассматриваемой системы.

Такое же понятие наблюдаемости существует для стохастических систем и процессов. Это связано с асимптотическим состоянием вероятностных апостериорных распределений или корреляционных матриц оценки.

Наблюдаемость стохастической системы гарантирует, что отклонение вектора оценки вероятности будет приближаться к нулю или конечному значению по мере увеличения числа наблюдений для дискретных процессов и увеличения продолжительности времени для непрерывных процессов.

Известно, что пространственное положение системы может наблюдаться только в том случае, если система, выраженная линейными детерминированными дифференциально-разностными уравнениями, удовлетворяет свойствам полного управления. В некоторых случаях система может быть разделена на два компонента, т.е. на управляемую и неуправляемую части, или в результате сжатия пространства управления системы, изученной в исследовании, сформированная система может быть полностью управляемой, но общий вид исходной системы изменяется.

Система линейных детерминированных дифференциально-разностных уравнений имеет следующий общий вид:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t-h) + Bu(t), \\ y(t) = Hx(t). \end{cases} \quad (7)$$

Здесь  $x = x(t) - n$  – мерная система вектора в момент времени  $t$ ;

$A - (n \times n)$  – мерная матрица которая представляет систему пространственного состояния;

$B - (n \times m)$  – мерная постоянная матрица;

$u - (1 \times n)$  – мерная функция управления,  $h > 0, t_0 \leq t \leq T$ .

$(1 \times n)$  – мерный вектор связанный с вектором  $y - x$ ;

$H - (r \times n)$  – мерная постоянная матрица.

Если (7) система уравнений, полностью выражает входящие и исходящие параметры в ограниченный период времен, то (7) называется линейной автономной наблюдаемой системой.

Если в (7) системе уравнений  $H = 0$ , образуется частично наблюдаемая система. Как указывалось выше, управляемые системы можно подразделить на управляемые и неуправляемые подсистемы. Но при определении наблюдаемости систему нельзя подразделять на две части.

Чтобы контролировать состояние (7) системы, система должна сначала быть полностью управляемой, иначе нет смысла наблюдать за пространственным состоянием системы.

Известно, что если числовые значения матрицы в системе (7) различны, т.е. не кратны, то система (7) является наблюдаемой. Отсюда следует, что если (7) система управляема, то она не может быть полностью наблюдаема.

Пусть собственные значения матрицы  $A$  в системе (7) кратны. В этом случае линейная система (7) не будет полностью управляемой. В результате система (7) выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t-h), \\ y(t) = Hx(t). \end{cases} \quad (8)$$

Для системы (8) существует линейное подпространство  $U$ , равное  $k$  ( $0 \leq k \leq n$ ) для системы, во-первых  $U$  является инвариантным подпространством, а во-вторых система (7) не полностью наблюдаема в подпространстве  $U$ .

Чтобы (8) система была полностью наблюдаемой, необходимо  $U = 0$ .

Соответственно, система координат  $\bar{x} = \begin{pmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{pmatrix}$  и подпространство  $U$  должны быть заданы уравнением  $\bar{x}_2 = 0$ . Система уравнений (8) выражается следующим образом:

$$\begin{cases} \bar{x}_1 = \bar{A}_{11}\bar{x}_1 + \bar{A}_{12}\bar{x}_2, & y = \bar{H}_2\bar{x}_2 \\ \bar{x}_2 = \bar{A}_{22}\bar{x}_2 \end{cases} \quad (9)$$

если из (9) системы уравнений  $\bar{x}_1 = 0$ , то тогда  $k = n$  и вид (9) системы имеет такой же вид, как и (8). В результате система становится полностью наблюдаемой.

Для того, чтобы система была наблюдаемой, сначала она должна быть управляемой. Это означает, что если в описанной выше системе (7) собственные значения матрицы  $A$  не кратны, то это противоречит концепции о неуправляемости системы.

С другой стороны, в теореме

$$\dot{x} = Ax(t-h) + (BC)v, \quad x(t) \in R^n, v(t) \in R^k$$

система схожа с системой (7).

Очевидно, что система (7) будет наблюдаемой, если похожая система  $\dot{x} = Ax(t-h) + (BC)v, x(t) \in R^n, v(t) \in R^k$  полностью управляема.

$$\dot{x} = Ax(t-h) + (BC)v, \quad x(t) \in R^n, v(t) \in R^k.$$

Чтобы система была полностью управляемой, необходимо соответствие ее критерию Кальмана. Это противоречит концепции о том, что система уравнений (7), описанная выше, может быть полностью наблюдаемой при условии не кратности собственных значений матрицы  $A$ . Эти несоответствия предполагают проведение дополнительных исследований наблюдаемости управляемых систем.

Для системы дифференциально-дифференциальных уравнений, представляющих движение объектов с запаздыванием, вводятся понятия относительного и полного наблюдения.

Если для определения начальной функции  $\varphi(x)$  достаточно входных и исходных параметров в течение ограниченного времени  $T$ , то линейный динамический объект, представленный системой уравнений (7), называется полностью наблюдаемым.

Для того, чтобы система уравнений (7) была относительно наблюдаемой должно выполняться следующее условие, состоящее из ограниченного времени  $T$  и матриц  $A, H$ :

$$\text{rang}[(HT), A(HT), \dots, A^{n-1}(HT)] = n.$$

С другой стороны, технические системы имеют концепцию идентификации, близкую к наблюдаемой. Теоретически идентификация считается частным случаем наблюдения. Но на практике идентификация воспринимается как отдельное специфическое направление.

В третьей главе диссертации «**Внедрение в робототехнические системы модели оптимизации количества параметров функции управления движением промышленного робота, представленного системой дифференциально-разностных уравнений**» представлены модели действий по характеру технологического применения ПР, принадлежащего классу координатных запаздываний объектов. Обоснована возможность применения модели оптимизации числа параметров функции управления для объектов, представленных системой линейных дифференциально-разностных уравнений, которые представляют объекты, принадлежащие к классу координатных запаздываний относительно роботизированных систем, в частности к ПР, а также разработаны свойства приложения.

Проанализированы критерии тестирования устойчивости автономно управляемых систем и разработаны рекомендации по их использованию. Представлена модель асимптотической устойчивости ПР, принадлежащая классу координатных запаздываний объектов. Кроме того, рекомендуются модели для проверки устойчивости траектории движения в зависимости от характера технологического применения ПР.

Как только управление движением ПР оптимизировано, вопрос его позиционной точности изучается с точки зрения, как внутренних, так и внешних факторов. Проверена также его функционально-параметрическая совместимость.

Уравнение ПР, движение которого представлено системой линейно дифференциальных уравнений и зависит от функции управления, выглядит следующим образом:

$$\ddot{x}(t) = Ax(t-h) + Bu(t) \quad (10)$$

где  $x = x(t) - n$  – мерный вектор ПР в период времени  $t$ ;

$A$  – постоянная  $(n \times n)$ -мерная матрица, характеризующая пространственное состояние ПР;

$B$  –  $(n \times m)$ -мерная матрица вероятности перехода от одного звена к второму;

$u$  – функция управления  $(1 \times n)$ -мерной системой, где  $h > 0$ ,  $-h \leq t \leq T$ .

$h$  – бесконечно малая величина.

Поскольку  $m = n$  в движении ПР, предполагается, что все звенья в движении ПР считаются вовлечёнными (в движение).

Чтобы решить уравнение (10), снижается порядок и составляется следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x} = y, \\ \dot{y} = Ax(t-h) + Bu(t). \end{cases} \quad (11)$$

Если состояние системы  $(x(t), y(t))$  в промежутке  $0 < t \leq h$  определено, то функция  $u(t)$  существует при  $t > 0$ .

Необходимо найти ответ на вопрос: можно ли оптимизировать число параметров функции управления при оптимальном управлении системой уравнений (11)?

Поскольку система уравнений (11) характеризует координаты запаздывания в классификации объектов с запаздыванием, необходимо обратить внимание на управляемость каждого звена в пространственном движении ПР.

Чтобы оптимизировать параметры функции управления при выполнении пространственной сложной (комплексной) операции ПР, необходимо оптимизировать параметры управления при движении каждого звена робота, т.е. основная система делится на подсистемы.

Затем следует проверить, удовлетворяет ли система (11) условиям теоремы, приведенной в главе 2.

Учитывая кинематическое уравнение движения захватного устройства ПР, приведенное в главе 2, для определения искаженного направления используются соответствующие оси системы координат каждого звена. Как только определяется искаженное направление, учитывается пространственное местоположение каждого звена и проверяется ранг матрицы, включающей радиус-вектор  $r_i = r_i(x, y, z, 1)$  пространственного расположения звена, т.е.  $rank[(A_i, r)]$ , где  $A_i$  – матрица движения звена.

Если критерий Кальмана удовлетворен, тогда  $i$  – звено с искаженным направлением полностью управляемо и можно оптимизировать соответствующую функцию управления.

В процессе применения теоремы оптимизации, приведенной в главе 2, к ПР, при выборе матриц  $C_k, B_k$  стало очевидным отображение  $(n \times n)$ -мерной матрицы матрицей размерности  $((n+1) \times (n+1))$  с помощью кинематического уравнения движения ПР. Матрицы  $C_k, B_k$  имеют следующий вид:

$$C_k = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B_k = \begin{bmatrix} B & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Для выполнения первого условия теоремы, выбирается матрица  $P$ , исходя из на технико-конструктивных характеристик ПР, и проверяется соответствие равенству  $PB_k = C_k P$ .

Для выполнения второго условия, в зависимости от степени кратности значений, специфичных для матрицы  $A$ , находится равная (кратная) матрица размерности  $(n \times k)$  ( $k \leq n$ ), для проверки полной управляемости системы уравнений, заданной теоремой, нужно проверять ранг матрицы

$$[(B_k C_k), A(B_k C_k), A^2(B_k C_k), \dots, A^{n-1}(B_k C_k)],$$

а не ранг матрицы

$$[(BC), A(BC), A^2(BC), \dots, A^{n-1}(BC)].$$

Поскольку робототехнические системы отличаются от других систем тем, что с точки зрения структурной оптимизации четвертый компонент не добавляется в трехмерное пространство. Если оптимизация рассматривается с параметрической точки зрения, то добавляется четвертый компонент. Поскольку рассматривается параметрическая оптимизация для ПР, матрица для проверки полной управляемости системы (4) отличается от матрицы с условиями теоремы, приведенной в главе 2.

(2) Уравнение эквивалентно равномерному представлению элементов матрицы  $A$  элементам матрицы  $C_k$ . Это связано с тем, что матрица  $B$  представляет вероятность перемещения движения из одной точки в другую в пространственном состоянии матрицы  $A$ . Какова будет стабильность системы (3) после внедрения модели оптимизации?

Устойчивость - это свойство действия, которое носит качественный, а не количественный характер.

Известно, что все корни характеристического уравнения должны лежать в левой полуплоскости системы координат как необходимое и достаточное условие устойчивости системы линейных дифференциальных уравнений с постоянным запаздыванием.

Чтобы узнать устойчивость решения системы уравнений (11), представляющей движение ПР, необходимо проверить устойчивость решения следующей эквивалентной ей системы уравнений:

$$\dot{y} = Ay(t-h), h > 0 \quad (12)$$

решение уравнения нужно будет проверить на устойчивость. При  $h$ , где ( $h > 0$ ) достаточно малых значениях, устойчивость решения уравнения (12) эквивалентна устойчивости решения следующего уравнения:

$$\dot{y} = G(h)y(t), G(h) = Ae^{-hG(h)} \quad (13)$$

Матрицу  $G(h)$  можно найти, расписав ее по строке ряд  $h$

$$G(h) = A - hA^2 - \frac{h^2}{2}A^3 + O(h^2)$$

Найденные значения  $G(h)$  подставляются в систему уравнений (13) и система решается. При достаточно малых значениях  $h$  ( $h > 0$ ) система уравнений (13) становится асимптотически устойчивой.

Понятие асимптотической устойчивости является более узким понятием, чем устойчивость в смысле Ляпунова. Если система асимптотически устойчива, она может быть неустойчивой в смысле Ляпунова.

Точность позиционирования является одной из важных характеристик ПР. Выявляется возможность использования ПР для выполнения технологического процесса. На практике при выполнении технологической операции ПР захватное устройство не останавливается в заданной или планируемой точке, а останавливается вокруг этой точки. Это отклонение захватного устройства ПР называется позиционной ошибкой или позиционным отклонением.

Чтобы повысить точность позиционирования ПР, рассмотрим следующий подход.

Отклонение от идеальной траектории наблюдается при движении с деталями в технологическом модуле ПР. Это отклонение представляет собой эллипсоид в пространстве.

Понятие базовой плоскости  $\Omega$  применяется, когда робот осуществляет действие с деталями в технологическом модуле. Для описания точного представления, плоскость отсчета  $\Omega$  берется в форме сферы, а не эллипсоида, поскольку движение детали вписано внутри сферы во время пространственных манипуляций, когда робот движется вместе с деталью.

Рабочая зона робота имеет форму параллелепипеда. Но для дальнейшего повышения точности берется цилиндр меньшего размера, чем параллелепипед.

Известно, что шар в пространстве описывается уравнением сферы:

$$\Omega: x^2 + y^2 + z^2 = 1.$$

уравнение цилиндра

$$R: \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad z = h.$$

Они решаются вместе в единой системе, поскольку сфера и цилиндр пересекаются, образуя решение.

Если система имеет единственное решение, то ПР может поставить деталь на установленное место. В противном случае плоскости отсчета и покрытия не пересекаются.

Существуют не только внутренние факторы, но и внешние факторы, которые препятствуют точности позиционирования ПР. Например, основными причинами отклонения являются технологическая неопределенность при подготовке звеньев ПР, разрывы на стыке кинематических цепей, ошибки в сборке отдельных узлов, неопределенность в движении системы управления, упругая деформация и т.д.

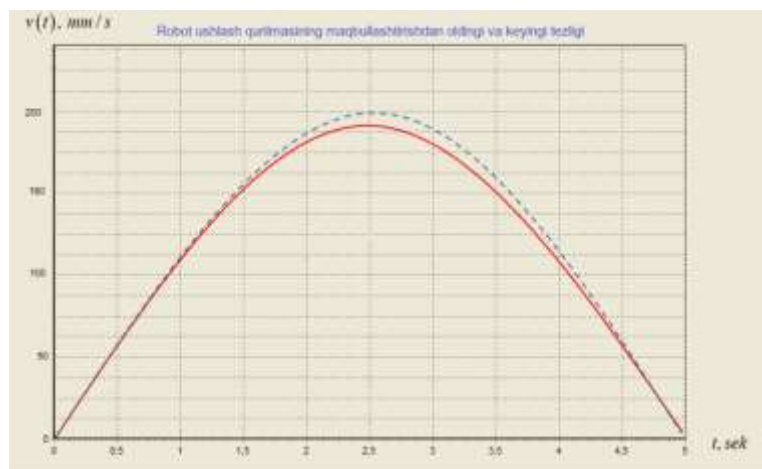
Разрывы на стыке кинематических звеньев приводят к появлению люфта (узких зазоров). Это, в свою очередь, вызывает не только статические, но и динамические погрешности. Если в кинематической цепи есть несколько зазоров (люфтов), то это ухудшит работу ПР и приведет к увеличению погрешности позиционирования.

Упругая деформация возникает в результате гибкости связей ПР. Упругая деформация в движении ПР проявляется отдельно в динамике, а погрешность, возникающая в каждом звене, приводит к увеличению погрешности всего работающего механизма (общего привода).

Чтобы определить отклонение положения, необходимо проанализировать каждый из перечисленных выше источников погрешностей, которые одновременно влияют на движение звеньев ПР.

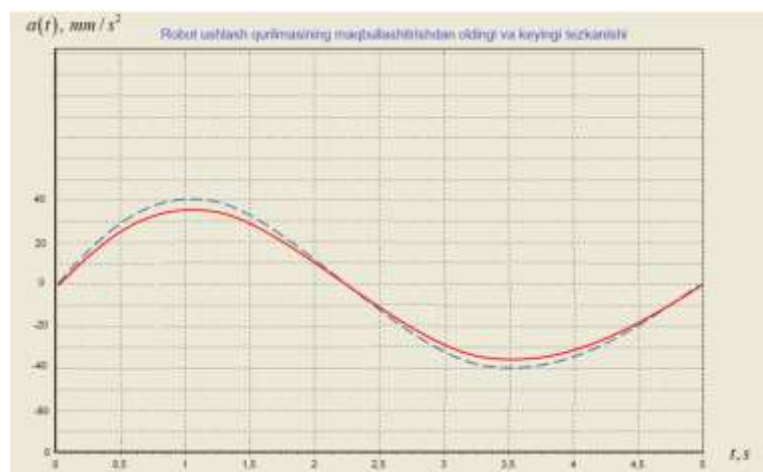
В четвертой главе диссертации Диссертациянинг «**Общий алгоритм оптимизации количества параметров функции управления движением робототехнических систем, представленных системой дифференциально-разностных уравнений, а также его применение**» рассматривается модель оптимизации числа параметров функции управления объектами с запаздыванием, представленной системой дифференциально-разностных уравнений, и ее применение по отношению к промышленному роботу как конкретному объекту. Кроме того, программное средство, основанное на полученных теоретических результатах, было применено в работе шестизвенного промышленного робота.

В вычислительных экспериментах приводится скорость (рис. 1) и ускорения (рис. 2) до и после оптимизации числа параметров функции управления захватным устройством.



**Рисунок 1. Скорость захватного устройства до (красная) и после (синяя) оптимизации числа параметров функции управления.**





**Рисунок 2. Ускорение захватного устройства до (красная) и после (синяя) оптимизации числа параметров функции управления.**

В приложении приведены документы, подтверждающие практическое использование результатов диссертационной работы, копии свидетельств об официальной регистрации программы для ЭВМ, выданных Агентством по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены следующие выводы в результате проведенных исследований по диссертационной работе на тему «Оптимальный метод управления движением промышленного робота, описываемым системой дифференциально-разностных уравнений»:

1. Изучены недостатки существующего управления автономными управляемыми системами, движение которых представлено системой дифференциально-разностных уравнений. Поставлена задача оптимизации числа управляющих параметров для оптимального управления движением промышленных роботов как объектов, относящихся к классу объектов с координатным запаздыванием и как конкретных объектов.

2. Движение объектов с запаздыванием, относящихся к классу координатного запаздывания, служит оптимизации числа управляющих параметров для оптимального управления объектами, представленными системой линейных дифференциально-разностных уравнений.

3. Проанализированы и выявлены недостатки существующих свойств наблюдаемости автономно-управляемых систем и их дифференциально-разностное состояние.

4. Разработанная модель оптимизации числа параметров функции управления для объектов, представленных системой линейных дифференциально-разностных уравнений, относящихся к классу координатно-запаздывающих объектов, позволяет применять ее по отношению к робототехническим системам, в частности к промышленным роботам.

5. На основе анализа критериев проверки устойчивости автономно-управляемых систем разработаны рекомендации по их использованию, позволяющие проверять устойчивость промышленного робота, относящегося к классу координатных запаздываний объектов по характеру технологического применения.

6. После применения модели оптимизации по отношению к промышленному роботу, она служит для обеспечения точности позиционирования при выполнении его сложных пространственных операций.

7. Теоретические результаты были применены к шестизвенному роботу Arc Mate 100iB / 6S и были получены необходимые результаты.

8. Разработанный программный комплекс использован в робототехническом технологическом комплексе, оборудованном обрабатывающим центром для обработки однотипных деталей, в обществах с ограниченной ответственностью «КТЦСМ» и «Integral avtomatika servis», и позволил снизить использование материальных и энергетических ресурсов на 10%.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES  
DSc.13/30.12.2019.T.07.01 AT TASHKENT UNIVERSITY OF  
INFORMATION TESHNOLOGIES**

---

**SCIENTIFIC AND INNOVATION CENTER OF INFORMATION AND  
COMMUNICATION TECHNOLOGIES AT THE TASHKENT  
UNIVERSITY OF INFORMATION TESHNOLOGIES**

**AROEV DILSHOD DAVRONOVICH**

**AN OPTIMAL METHOD FOR CONTROLLING THE MOTION OF AN  
INDUSTRIAL ROBOT DESCRIBED BY A SYSTEM OF DIFFERENTIAL-  
DIFFERENCE EQUATIONS**

05.01.02 – System analysis, management and information processing

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

**Tashkent – 2021**

The theme of doctor of philosophy (PhD) of technical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number №B2019.3.PhD/T1293.

The dissertation has been prepared at Scientific and Innovation Center of Information and Communication Technologies at the Tashkent University of Information Technologies.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website (www.tuit.uz) and on the website of «Ziyonet» Information and educational portal (www.ziyonet.uz).

**Scientific adviser:**

**Onorboev Bahodirjon Ochilboevich**  
Doctor of technical sciences, professor.

**Official opponents:**

**Muxamedieva Dilnoz Tulqinovna**  
Doctor of technical sciences, professor.

**Yakubjanova Dilfuza Kodirovna**  
doctor of philosophy on technical sciences

**Leading organization:**

**Tashkent Institute of Textile and Light Industry**

The defense at dissertation will take place on « 1 » 01 2021 y. at 16<sup>00</sup> the meeting of Scientific council No. DSc. 13/30.12.2019.T.07.01 at Tashkent University of Information Technologies (Address: 100202, Tashkent city, Amir Temur street, 108. Tel.: (+99871)238-64-43, fax: (+99871) 238-65-52, e-mail: tuit@tuit.uz).

The dissertation could be reviewed at the Information Resource Centre of the Tashkent University of Information Technologies at (is registered under No. \_\_\_\_\_). (Address: 100202, Tashkent city, Amir Temur street, 108. Tel.: (+99871) 238-64-43).

The abstract of dissertation is distributed on « 1 » 01 2021 y.  
(Protocol at the registr No. \_\_\_\_\_ on « 1 » 01 2021 y.).



**R.Kh. Khamdamov**  
Chairman of the Scientific council  
awarding scientific degrees,  
Doctor of Technical Sciences, Professor

**F.M. Nuraliev**  
Scientific Secretary of Scientific Council  
awarding scientific degrees,  
Doctor of Technical Sciences,

**A.V. Qobulov**  
Chairman of the Scientific Seminar of the  
Scientific Council awarding scientific degrees,  
Doctor of Technical sciences, Professor

## INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

**The aim of the research work** is to develop mathematical models to improve the productivity of industrial robots by optimizing the number of control functions when controlling objects with delay, represented by a system of linear differential equations.

**Objectives of the research:**

analysis of existing management models for autonomously managed systems;

development of a model for optimizing the number of control parameters of objects with delay, represented by a system of linear differential-difference equations;

development of a model for optimizing the number of parameters of a control function for robotic systems of a class of objects with delay, the movement of which is represented by a system of linear differential-difference equations;

checking the stability of movement of robotic systems, the movement of which is represented by a system of differential-difference equations.

**The object of the research work** is the functioning of industrial robots of the class of objects with delay.

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

a control optimization model has been developed for class objects with coordinate lag, which is represented by a system of linear differential-difference equations;

the possibility of optimizing the control of the movements of industrial robots, represented by a system of linear continuous differential-difference equations, has been proved, and the corresponding control model has been developed;

a model for optimizing the number of parameters of the control function and general algorithms for solving the motion of an industrial robot, represented by a system of linear continuous differential-difference equations;

an approach has been developed to test the typical equations describing the motion of industrial robots for asymptotic stability.

**Implementation of the research results.** Based on the developed mathematical models, algorithms, and software systems for studying the motion of an industrial robot:

algorithms and models for optimizing the number of parameters of the control function are applied in a robotic technological complex, equipped with a center for various processing of parts, in «KTTSSM» LLC (reference from Uzagrotekhsanoatholding JSC of the Republic of Uzbekistan No. 04-10/1972 dated November 13, 2019). The results of the application showed that in the robotic technological complex there was a delay in the control of the industrial robot and an excess of free variables was felt when the industrial robot performed spatial manipulation operations. The introduction of optimization of the number of control function parameters into the work of industrial robots made it possible to increase the speed of the gripper by 11.5 mm/s and its acceleration by 5 mm/s<sup>2</sup>;

the developed models and algorithms are applied in a robotic technological complex, equipped with a machining center for various processing of parts, in «Integral avtomatika servis» LLC (reference from Uzagrotekhsanoatholding JSC of the Republic of Uzbekistan dated November 13, 2019 №04-10/1972). The results of the application allowed to reduce by 2 units. the number of parameters of the control function of the gripper and the 5-link of an industrial robot in a robotic technological complex, as well as to reduce material and energy costs by 10% in controlling technological processes

**Structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, list of references and appendices. The volume of the dissertation is 100 pages.

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

**I бўлим (I часть; part I)**

1. D.D.Aroev. On the observatin of a system governed by differetial equations // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. India. Vol. 6, 2019. Is.8. P. 10513-10516. (05.00.00; №8).
2. Хонбобоев Х.И, Сиддиқов Р.Ў., Ароев Д.Д. Ноъмалум мухитда саноат роботининг ҳаракатини моделлаштиришга доир // Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». Ташкент, 2011. - №6. С. 31-34. (05.00.00; №5)
3. Д.Д.Ароев. К вопросу наблюдаемости автономно управляемой системы // Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». Ташкент, 2011. - №2. С. 25-29. (05.00.00; №5)
4. Б.О.Онорбоев, Х.И.Хонбобоев, Д.Д.Ароев. Ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи объектларни бошқаришда бошқариш функцияси параметрлари сонини мақбуллаштириш ҳақида // Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». Ташкент, 2011. - №1. С. 14-18. (05.00.00; №5)
5. Р.Ў.Сиддиқов, Д.Д.Ароев. Ўзгарувчан параметрли саноат роботини бошқаришнинг математик модели // Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». Ташкент, 2010. - № 6. С. 18-22. (05.00.00; №5)

**II бўлим (II часть; II part)**

6. Ароев Д.Д. Об оптимизации параметров функции управления объектами описываемым системой дифференциально-разностных уравнений // Материалы VIII международная научно-практическая конференция «Научные исследования молодых учёных». 17 декабрь Пенза, Россия, 2020. Ч-1, -С. 10-12.
7. Ароев Д.Д. Ҳаракати дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи объектларнинг бошқарув функциясининг параметрларини мақбуллаштириш ҳақида // Экономика и социум.-2020.- №12(79).
8. Ароев Д.Д. Чизикли дифференциал-айирмали тенгламалар системаси билан ифодаланувчи объектларнинг бошқарилувчанлиги ҳақида // Таълим-тарбия жараёнига инновацион ёндашувлар. Муоммо ва ечимлар. Республика илмий-амалий конференция материаллари. Декабрь 2020, Тошкент. –С 56-60.
9. В.О.Onorboev, D.D.Aroev. Question of observability of independently controlled system // Proceedings of the III Tashkent international innovation forum. - Tashkent, 2017. -pp 93-97.
10. Б.О.Онорбоев, Д.Д.Ароев. О проверке на устойчивость движения промышленных роботов которые относятся к классу координатного запаздывания // Материалы международной научно-практической

конференция «Современный этап мирового научного развития». 29 август 2019, - Екатеринбург. - С. 3-7.

11. Б.О.Онорбоев, Р.Ў.Сиддиқов, Д.Д.Ароев. Саноат роботлари харакатини турғунликка текшириш ҳақида // Материалы республиканскую научно-техническую конференция «Современное состояние и перспективы информационных технологий». 5-6 сентябрь 2011. - Ташкент. Т.2. - С. 185-188.