

**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**

СИДДИҚОВ РАСУЛЖОН ЎКТАМОВИЧ

**ЎЗГАРУВЧАН ШАРОИТЛАРДА ҲАРАКАТЛАНУВЧИ САНОАТ
РОБОТЛАРИНИ ОПТИМАЛ БОШҚАРИШНИНГ МАТЕМАТИК
МОДЕЛЛАРИ ВА АЛГОРИТМЛАРИ**

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 автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)
по техническим наукам**

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)
on technical sciences**

Сиддиков Расулжон Ўктамович

Ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи саноат роботларини оптимал
бошқаришнинг математик моделлари ва алгоритмлари 5

Сиддиков Расулжон Уктамович

Математические модели и алгоритмы оптимального управления
движением промышленных роботов, движущихся при изменяющихся
условиях..... 22

Siddikov Rasuljon Uktamovich

Mathematical models and algorithms in the optimal control of robots in
industry under changing conditions 38

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 39

**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**

СИДДИҚОВ РАСУЛЖОН ЎКТАМОВИЧ

**ЎЗГАРУВЧАН ШАРОИТЛАРДА ҲАРАКАТЛАНУВЧИ САНОАТ
РОБОТЛАРИНИ ОПТИМАЛ БОШҚАРИШНИНГ МАТЕМАТИК
МОДЕЛЛАРИ ВА АЛГОРИТМЛАРИ**

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 В2018.2.PhD/Т681 рақам билан рўйхатга олинган.

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

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасига (www.tuit.uz) ва «ZiyoNet» ахборот-таълим порталида (www.ziyounet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Онорбоев Баҳодиржон Очилбоевич
техника фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Қобулов Анвар Восилович
техника фанлари доктори, профессор

Кубаев Сайидазим Ташбаевич
техника фанлари номзоди, доцент

Етакчи ташкилот:

Тошкент тўқимачилик ва енгил саноат институти

Диссертация химояси Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги DSc.13/30.12.2019.Т.07.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2021 йил «14» 01 соат 14⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100202, Тошкент шаҳри, Амир Темур 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 Темур кўчаси, 108-уй. Тел.: (99871) 238-65-44).

Диссертация автореферати 2021 йил «1» 01 да тарқатилди.

(2021 йил «1» 01 даги ___ рақамли диссертация баённомаси.)



Р.Х.Хамдамов

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

Ф.М.Нуралиев

Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш илмий котиби, т.ф.д., доцент

А.В.Қобулов

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

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертация аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда замонавий инфор­мацион технологиялар ривожланган ҳозирги вақтда робототехник тизимлар саноатнинг барча тармоқларида изчил суратда қўлланилмоқда. Айниқса, инсон оғир меҳнاتини енгиллаштириш учун экстремал шароитларда робототехник тизимлардан фойдаланиш кенг миқёсда авж олдирилган. Маълумки, ўзгарувчан шароитларда, ҳаракатланувчи роботларнинг ишчи органи ўзгарувчан тузилмали бўлиб, бундай роботлар илмий тадқиқотларда ҳам, ишлаб чиқаришда ҳам қўлланилади.

Бугунги кунда ўзгарувчан шароитларда роботларни бошқариш жуда мураккаб. Бунинг асосий сабаби биринчидан, ташқи муҳит таъсирига нисбатан робот ўз манипуляция ҳаракатини ўзгартирса, иккинчидан, унинг аниқ ҳаракат моделининг йўқлигидадир. Ҳаракат модели аниқ бўлмаса, бошқарув модели ҳам аниқ бўлмайди, роботнинг бошқарув параметрларини аниқлаш ҳам қийин бўлади. Шунинг учун, бу камчиликларни бартараф қилиш мақсадида, ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи роботлар ҳаракатини математик моделини тузиш ва у асосида мақбул бошқариш муҳим вазифалар сирасига киради.

Ўзбекистон Республикасида ахборот-коммуникация технологиялари асосида технологик жараёнларни лойиҳалаш, моделлаштириш ва бошқаришнинг замонавий усулларни ишлаб чиқиш орқали ёқилғи-энергетика сарфини минималлаштириш бўйича кенг қамровли илмий-тадқиқот ишлари амалга оширилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан «иктисодиётда энергия ва ресурслар сарфини камай­тириш, ишлаб чиқаришга энергия тежайдиган технологияларни кенг жорий этиш, илмий ва инновация ютуқларини амалиётга жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш, илғор ахборот-коммуникация технологияларини жорий қилиш ва улардан фойдаланиш» вазифалари белгилаб берилган.

Мазкур вазифаларни ижросини таъминлашда ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи роботларни техник кўриш тизимлари, сезувчанлиги, киёфаларни аниқлаш, номаълум технологик тўсиқлар ва динамик чегараланишларни ўрганиш учун ахборот ва коммуникация тизимлари ёрдамида дастурлар мажмуаси ва технологияларни ишлаб чиқиш, саноат роботлари (СР)нинг ҳаракатида энергия ресурслардан самарали фойдаланиш, кичик параметрик оғишишларни тўғри ва эргашган баҳолашларини ҳисобга олган ҳолда сезувчанликни оширувчи математик модел ишлаб чиқиш ва амалиётга жорий қилиш муҳим масалалардан ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича чора-тадбирлар стратегияси тўғрисида»ги ПФ-4947-сонли ва «2018 йил 19 февралдаги «Ахборот технологиялари ва коммуникатциялар соҳасини янада такомиллаштириш тўғрисида»ги ПФ-5349-сонли Фармонларида, Ўзбекистон

Республикаси Президентининг 2017 йил 29 августдаги «Ахборот ва ахборот технологиялари соҳасида лойиҳаларни бошқариш тизимини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги қарори, хусусан, соҳаларда илмий-тадқиқотлар, инновацион ва тажриба конструкторлик ишларини мувофиқлаштириш ва бошқа норматив ҳужжатларнинг амалий масалалари бўйича илмий-тадқиқотлар ва инновацион ишларни ўтказишни назарда тутилган вазифаларини бажаришда муайян даражада хизмат қилади.

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

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Саноат роботларининг ҳаракатини моделлаштириш ва бошқариш масалалари кўплаб хорижий ва республика олимлари: П.Н.Белянин, Д.А.Добрынин, Дж.Бейктал, Фу, Гонсалес, С.Капустин, В.Л.Конюх, В.П.Макарычев, А.Г.Булгаков ва бошқаларнинг ишларида етарлича кўриб чиқилган.

Ўзбекистонда В.Қ.Қобулов, Н.А.Мўминов, З.З.Шамсиев, Б.М.Исмаилов, Ш.Й.Пўлатов, Б.О.Онорбоев ва бошқа олимлар технологик тизимларда саноат роботлари ҳаракатининг математик моделлари ва бошқариш алгоритмларини ишлаб чиқишга катта ҳисса қўшиб келган ва келмоқдалар.

Ҳозирги кунда СР учун ишлаб чиқилган усулларда унинг кинематик ва динамик хусусиятлари ўзгарувчан шароитларга нисбатан етарлича ҳисобга олинмаган. Ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи СР учун қисқа ва хавфсиз ҳаракат маршрутларини шакллантириш, мақбуллаштириш, ҳаракат моделлари ва бошқарув алгоритмларини такомиллаштириш зарур даражада ўрганилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий тадқиқот муассасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан мослиги. Диссертация тадқиқоти Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги Ахборот-коммуникация технологиялари илмий-инновацион маркази илмий-тадқиқот ишлари режасининг Лойиҳа А-5-008 «Технологик машинларнинг ишчи органлари ҳаракатини ва уларни тайёрлаш жараёнларини бошқаришнинг дастурий-алгоритмик воситаларини ишлаб чиқиш» (2015-2017.), Лойиҳа 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 ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи саноат роботини моделлаштириш, берилган ҳаракат фазосида оптимал бошқариш алгоритмларини ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

Ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи СРни мураккаб манипуляция операциясини амалга оширишига оид мавжуд ҳаракат ва бошқариш моделларини таҳлил қилиш;

эҳтимоллик ўлчовини киритган ҳолда саноат роботининг ҳаракат тенгламасини тузиш ва берилган ҳаракат фазосида чегараланган, узлуксиз бошқариш функцияси мавжудлигини исботлаш;

Ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи СРнинг сезгирлиги ва позицион аниқлигини ошириш моделларини ишлаб чиқиш;

Ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи СРни оптимал бошқаришнинг математик ва дастурий таъминотини ишлаб чиқиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи саноат роботини оптимал бошқаришнинг математик ва дастурий таъминотлари олинган.

Тадқиқотнинг предмети ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи саноат роботини математик моделлаштириш ва оптимал бошқариш.

Тадқиқотнинг усуллари дифференциал тенгламалар, эҳтимоллар назарияси ва математик статистика, математик логика, алгебра ва сонлар назарияси ва оптимал бошқарув назарияси усулларида фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

Ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи СРнинг ҳаракат тенгламаси тузилган ва эҳтимоллар назарияси элементларидан фойдаланган ҳолда СРнинг бажарувчи механизмининг фазовий жойлашиш ҳолатларини математик модели ва алгоритмлари ишлаб чиқилган;

СРнинг ўзгарувчан шароитларда ҳаракати асосида бошқарув фазоси ва унда чегараланган, узлуксиз бошқариш функциясининг мавжудлиги исботланган;

СРнинг ўзгарувчан шароитларда ҳаракатида энергия ресурсларидан самарали фойдаланишнинг математик модели ишлаб чиқилган;

кичик параметрик оғишишларни тўғри ва эргашган баҳолашларини ҳисобга олган ҳолда ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи СРнинг сезувчанлигини оширувчи математик модел ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

Ўзгарувчан шароитда ҳаракатланувчи СРнинг бир муҳитдан иккинчи муҳитга ўтишини моделлаштириш усули ишлаб чиқилган;

СРнинг берилган ҳаракат фазосида чегараланган, узлуксиз бошқариш функцияси мавжудлиги исботланган;

Ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи СР ҳаракатида энергоресурсларни звеноларга оптимал тақсимлашнинг математик модели ишлаб чиқилган;

кичик параметрик оғишишларни ҳисобга олган ҳолда СР бажарувчи механизмининг мураккаб фазовий ҳаракатида сезувчанликни оширишга хизмат қилувчи математик модел ишлаб чиқилган;

сенсорли бошқарувга эга СРнинг позицион аниқлигини таъминлашда бажарувчи механизмининг мураккаб манипуляцион операцияларни

бажаришини оптимал бошқариш моделлари ва алгоритмлари ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончилиги ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи СРларни оптимал бошқаришнинг математик моделлари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш ва уларни назарий асослаш ҳамда ишланмаларни СРларга татбиқ қилиш орқали иш унумдорлигини ошириш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти СРнинг ўзгарувчан шароитлардаги ҳаракат тенгламасини тузиш ва берилган ҳаракат фазосида чегараланган, узлуксиз бошқариш функциясининг мавжудлигини исботлаш, шу билан бирга роботнинг фазовий мураккаб операциясини амалга оширишида сезувчанлик ва позицион аниқликни оширишнинг математик моделлари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти тадқиқ қилинувчи роботларни бошқаришнинг алгоритмлари ва дастурий воситаларидан ишлаб чиқаришнинг замонавий робототехник тизимлар билан жиҳозланган барча тармоқларида, илмий-тадқиқот ишларида сезувчанлик борасида зарурий маълумотлар билан таъминлашда ҳамда ҳаракат учун зарур бўлган энергетик ресурсларни тежашда фойдаланиш мумкинлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларнинг жорий қилиниши. Ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи саноат роботларини оптимал бошқаришнинг математик моделлари ва алгоритмлари асосида яратилган дастурий воситаларни ишлаб чиқаришга жорий этилиши борасида қуйидагилар амалга оширилган:

роботларни бошқариш алгоритмлари ва технологик жараёнларни автоматик бошқаришда қўлланилган дастурий восита «Integral avtomatika servis» МЧЖга жорий этилган (Ўзбекистон Республикаси «O'ZAGROTEXSANOATXOLDING» АЖнинг 2019 йил 15 январдаги № АР 19-02/87-сон маълумотномаси). Натижалар СРнинг позицион аниқлигини ошириш ва уни умумий бошқарув алгоритмларини ишлаб чиқиш учун қўлланилган;

роботни ўзгарувчан шароитларда фазовий операцияларни амалга оширишини таъминлашга йўналтирилган бошқарув алгоритмлари ва дастур воситалари «Қишлоқ хўжалиги машинасозлиги конструкторлик технологик маркази» МЧЖга жорий этилган (Ўзбекистон Республикаси «O'ZAGROTEXSANOATXOLDING» АЖнинг 2019 йил 15 январдаги № АР 19-02/87-сон маълумотномаси). Натижада, СРнинг сенсорли бошқарувга эга синфи учун технологик жараёнларни автоматик бошқаришда материал-энергия ресурслари сарфини 10% камайтириш имконини берган;

дастурий воситалар ишлаб чиқаришнинг робототехник тизимлар билан жиҳозланган тармоқларида сезгирликни ошириш ҳамда ҳаракатланишда энергия тежамкорлигига эришиш учун қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси «O'ZAGROTEXSANOATXOLDING» АЖнинг 2019 йил 15 январдаги № АР 19-02/87-сон маълумотномаси). СРларни сенсорли

бошқариш усуллари ва алгоритмларини қўлланилиши технологик жараёнларни автоматлаштирилган лойиҳалашга ижобий таъсир кўрсатди. Натижада, технологик жараёнларни лойиҳалашда ишлов беришнинг техник-иктисодий кўрсаткичларини 15% оширишга эришилган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқотнинг асосий натижалари 3 та халқаро ва 4 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Тадқиқот мавзуси бўйича асосий илмий натижалар жами 14 та илмий ишда нашр этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 7 та мақола, улардан 3 таси хорижий ва 4 таси республика журналларида чоп этилган ҳамда электрон ҳисоблаш машиналари учун яратилган дастурнинг расмий рўйхатдан ўтказилганлиги тўғрисида гувоҳнома олинган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертация матни 103 бетда келтирилган.

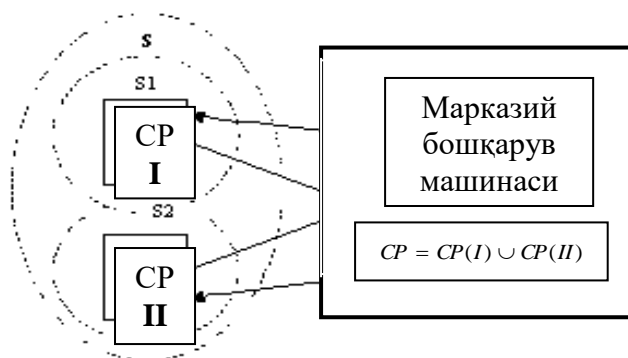
ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялари тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, муаммонинг ўрганилганлик даражаси, диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий тадқиқот муассасининг илмий тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги баён этилган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари келтирилган, тадқиқот объекти ва предмети тавсифланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги, олинган амалий натижалари, илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши, нашр қилинган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «Саноат роботлари ҳаракатини бошқариш тизимларининг ҳозирги ҳолати ва масалалари» деб номланган биринчи бобида диссертация мавзуси бўйича назарий ва амалий ишларининг таҳлили келтирилган. Бу масала билан боғлиқ бўлган асосий илмий йўналишлар ёритилган. Стохастик бошқарув тизимига эга СР учун қуйидаги масала қўйилган.

Фараз қилинсинки, СР S_1 муҳитда ҳаракат қилаётган бўлсин. Ҳаракати S_1 муҳитдан номаълум бўлган S_2 муҳитгача ўзгариши талаб этилсин (1-расм).

Шу $S = S_1 \cup S_2$ муҳитда СРнинг ҳаракатини самарали бошқариш мумкинми?



1-расм. CP шароитнинг ўзгаришига мос ҳаракат фазосининг кўриниши

Қўйилган масала йўналишида мавжуд бошқариш моделларининг таҳлили асосида тадқиқотнинг мақсади ҳамда вазифалари шакллантирилган. Қўйилган масалаларнинг ечиш усуллари таклиф этилган.

Танлаб олинган тадқиқот мавзуси юзасидан робототехник тизимлар иштирокидаги технологик жараёнларни моделлаштириш ва бошқариш соҳасида мавжуд фундаментал ва амалий тадқиқот ишлари атрофлича таҳлил қилинган. Асоси ҳаракатланувчан CP ҳаракатини моделлаштириш ва бошқариш борасидаги изланишлар натижалари шуни кўсатадики, ҳар бир ҳолда объект ҳаракат тизимининг аниқлиги, бошқарув тизими, ҳаракат модели ва ўзига хос камчилик ҳамда афзалликларга эгаллиги билан характерланади.

Стохастик ҳол учун

1. Ҳаракат тизими – аниқмас (ноидентификацияли).
2. Бошқарув тизими – стохастик.
3. Ҳаракат моделининг кўриниши – чизиксиз дифференциал тенглама

$$A(q, \xi)\ddot{q} + b(q, \dot{q}, \xi) = u.$$

4. Моделнинг афзалликлари.

Объектнинг, математик кўринишда ифодаланган хусусиятларидан келиб чиқиб, модели асосида бошқарувни уч хил кўринишда қараш мумкин:

- а) берилган модел асосида бошқарув;
- б) авторегрессион модел асосида бошқарув;
- в) оғишганлик бўйича бошқарув.

5. Моделнинг камчиликлари.

5.1. Модел фақат ташқи муҳит таъсиридаги оғишишларни кўпроқ ҳисобга олади, моделда тизимнинг ички оғишишлари ифодаланмайди. Буни оқибатида, тизимнинг турғунлигини текширишда мураккабликлар келиб чиқади.

5.2. Шарнирли бирикмали роботларда бирикмалар орасидаги реакция кучлари ҳисобга олинмайди. Бу эса берилган траектория билан CP ҳаракатидаги реал траектория орасидаги фарқни катталашшига олиб келади.

5.3. Ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи CPни бошқаришнинг учала моделида ҳам берилган траектория билан реал траектория ўртасидаги фарқ ташилаётган юкнинг массасига боғлиқлиги кузатилади. CP юксиз

ҳаракатланганида максимал хатолик $\pm 0,25$ ммдан $\pm 0,35$ ммгача, ярим юкланган ҳолатида хатолик $\pm 0,60$ ммдан $\pm 1,15$ ммгача, максимал юкланган ҳолатида эса хатолик $\pm 1,2$ ммдан $\pm 1,5$ ммгача бўлади.

Норавшан ҳол учун

1. Норавшан қоидалар асосида хулосаларни генерация қилувчи модел.
2. Моделнинг афзалликлари.

Норавшан моделлар кўп қирралилиги билан тавсифланади ва хоҳлаган бир объектни исталган аниқликдаги норавшан модел билан ифодалаш имконини беради. Аниқ мантиққа эга моделларнинг ютуғи шундаки, улар объектнинг моделини, экспертдан ёки тажрибалар натижасида олинган эвристик маълумотларга асосланиб, синтез қилиш имкониятини тақдим этади.

3. Моделнинг камчиликлари.

Норавшан моделларни синтез қилиш учун барқарор алгоритмлар мавжуд эмаслиги ва бу моделлар кўп сонли бошқариш қоидаларига эга бўлиши туфайли паст тезликда ишлаши каби камчиликлар билан тавсифланади. Бу каби камчиликлар СРни оптимал бошқариш алгоритмлари ишига салбий таъсир кўрсатади. Бу эса, ҳаракатда узилишлар келиб чиқишига сабаб бўлади. Ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи роботнинг бошқарув моделларидаги бу каби бўшлиқ ва камчиликлар кўшимча илмий-тадқиқот ишлари олиб бориш зарурлигини тақозо этади.

Диссертациянинг «**Ўзгарувчан шароитларда саноат роботларининг ҳаракат модели**» деб номланган иккинчи бобида роботлаштирилган ишлаб чиқариш ячейкасини моделлаштиришнинг умумий схемаси ҳамда бошқариш тизими моделларининг кўринишлари келтирилган. Ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи СРни бир муҳитдан иккинчи муҳитга ўтиш алгоритми ишлаб чиқилган. СРнинг ҳаракат фазосида уч (ушлаш қурилмаси, оралик звенолар, бажарувчи механизм) компонентлари бўйича жойлашиш ҳолатлари ўрганилган. Ўзгарувчан шароитларда СРнинг тўла функционал вазифасини бажариши учун ҳаракат траекториясини режалаштириш амалга оширилади.

Биринчи бобда қўйилган масалани ҳал қилиш учун, авваломбор, эҳтимоллик катталикларини киритган ҳолда СР ишчи кўлининг ҳаракат тенгламасини тузиш талаб этилади. Бу, қуйидаги ёндашув асосида амалга оширилади.

СРнинг $S = S_1 \cup S_2$ муҳитда ҳаракатланишини ифодалаш учун унинг ҳар икки муҳитдаги ҳаракат эҳтимоллиги матрицалари бирлаштирилади.

S_1 муҳитда СР ҳаракатининг эҳтимоллик матрицаси

$$P_i^1 = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mn} \end{bmatrix}$$

$d_1 = D(P^1)$. $d_1 - P_i^1$ матрицанинг дисперсияси.

S_2 муҳитда СР ҳаракатининг эҳтимоллик матрицаси

$$P_i^2 = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mn} \end{bmatrix}$$

$d_2 = D(P^2)$. $d_2 - P_i^2$ матрицанинг дисперсияси.

$$\bar{P}_i = \begin{cases} P_i^1, & d_1 \geq R, d_2 < R \\ P_i^2, & d_2 \geq R, d_1 < R \\ P_i^1 \oplus P_i^2, & \text{акс холда} \end{cases},$$

бу ерда R – S_1 дан S_2 га ўтиш бўсағасидаги қийматлар (ўртача квадратик оғишишлар ва ҳ.к.) дисперсияси.

$\bar{P}_i - S_1$ муҳитдан S_2 муҳитга СРни ўтиш алгоритми.

Бундан ташқари, СРнинг S муҳитдаги фазовий ҳолати қуйидагилар орқали ифодаланади, биринчи – бажарувчи механизм ушлаш қурилмасининг ҳолати, иккинчи – бажарувчи механизм оралиқ звенолари занжирининг ҳолати, учинчи – бажарувчи механизмнинг ҳолати.

СР ҳаракати Марков занжирини характерлайди. Марков занжирида объектнинг ҳолати ўзидан битта олдинги ҳолатига боғлиқ бўлиб, ундан аввалги оралиқ ҳаракатларга боғлиқ эмас.

Агар СРга m та датчик ўрнатилган ва унинг бажарувчи механизми l та звенодан ташкил топган бўлса, робот бошқарув тизимига кирувчи параметрлар $X = 2^m$ та сигналлардан, чиқувчи параметрлар звеноларнинг $Y = 2^l$ та ҳаракатларидан иборат бўлади.

Марков занжирига боғлиқ ҳолда ҳаракатни ўтиш эҳтимоллиги матрицаси қуйидагича ифодаланади:

$$P(a,b) = \begin{pmatrix} P_{11}^{(a,b)} & P_{12}^{(a,b)} & \dots & P_{1l}^{(a,b)} \\ P_{21}^{(a,b)} & P_{22}^{(a,b)} & \dots & P_{2l}^{(a,b)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{m1}^{(a,b)} & P_{m2}^{(a,b)} & \dots & P_{ml}^{(a,b)} \end{pmatrix}, \sum_{j=1}^l P_{ij}^{(a,b)} = 1.$$

Бу ерда, a, b – S муҳитдаги кесма бўлиб, мос равишда СРнинг ҳаракатидаги бошланғич ва охириги позициялар.

$P(a,b)$ матрицанинг сатри кирувчи сигналларни, устунлари эса ҳаракатни билдиради.

Берилган траектория асосида ўзгарувчан шароитда ҳаракатланувчи СР ҳаракатининг оғишганлигини аниқлаш учун динамиканинг тескари масаласи Лагранж-Эйлер динамик тенгламаси кўринишида шакллантирилади.

Динамиканинг тескари масаласи робот траекториясининг оғишишига сабабчи бўлган куч ва моментларни топишга қаратилади.

Юқоридагиларни ҳамда ички омиллар параметрик нуқтаи назардан ҳисобга олинса, ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи СРни ҳаракат тенгламасининг матрицавий кўриниши куйидагича бўлади:

$$A(q, \xi)\ddot{q} + b(q, \dot{q}, \xi) = \tau,$$

бу ерда, $A(q, \xi)$ – элементлари $(A)_{ki} = a_{0k}^i$, $k, i = 1, 2, \dots, n$ кўринишда бўлган $(n \times n)$ -ўлчовли матрица-функция;

$$b(q, \dot{q}, \xi) \text{ – элементлари} \quad b_k = b_{k1} + b_{k2} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n a_{1k}^{ji} \dot{q}_j \dot{q}_i + a_{2k}, \quad k = 1, 2, \dots, n$$

кўринишдаги n -ўлчовли вектор-функция бўлиб, йиғиндининг 2-кўшилувчиси k -бирикма моментини тавсифлайди;

τ – $(1 \times n)$ ўлчовли умумлашган куч вектори;

ξ – СР ишчи кўлини ҳамда бир нуқтадан иккинчи нуқтага кўчирилувчи юк параметрлари вектори (звенолар узунлиги, звенолар оғирлиги ҳамда инерция моментлари, юкнинг оғирлиги ҳамда инерция моментлари ва бошқалар);

q – умумлашган ўзгарувчиларнинг вектори;

\dot{q}, \ddot{q} – мос равишда тезлик ва тезланишларни ифодаловчи ўзгарувчилар вектори.

Умумий ҳолда, ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи СРнинг ҳаракати

$$\dot{x}(t) = F[x(t), u(t), \xi(t)] + \pi(t), \quad x(t_0) = x_0, \quad t_0 \leq t \leq T \quad (1)$$

тенглама билан ёзилади.

Бу ерда, $x = x(t)$ – СРни ишчи кўлининг t вақтдаги n ўлчовли ҳолат вектори;

$u = u(t)$ – m ўлчовли бошқарув функцияси вектори;

$\xi(t)$ – параметрларнинг ўзгариши, яъни вақтнинг t momentiда СР ишчи кўлини ҳамда бир нуқтадан иккинчи нуқтага кўчирилувчи юк параметрларининг l ўлчовли вектори (звенолар узунлиги, звенолар оғирлиги ҳамда инерция моментлари, юкнинг оғирлиги ҳамда инерция моментлари ва бошқалар);

$F(\bullet)$ – $x(t), u(t), \xi(t)$ ўзгарувчиларнинг вектор-функцияси;

$\pi(t)$ – СРни ишчи кўлининг узлуксиз ҳаракатида n ўлчовли оғишиш вектори;

x_0 – бошланғич ҳолат.

Агар ξ маълум ва $\pi(t) \equiv 0$ бўлса, у ҳолда (1) тенгламанинг ечими ассимптотик турғун бўлади. Бу идеал ҳол ҳисобланади.

Амалиётда $\pi(t)$ маълум ва бирор вақт оралиғида ўзгариши мумкин эмас, агар ўзгарса ҳам у текис чегараланган деб олинади, яъни $\forall t, \|\pi(t)\| \leq C_\pi, t_0 \leq t$.

ξ нинг ноаниқлиги бошқаришда уни τ билан баҳолашни келтириб чиқаради, яъни $\|\xi(t)\| \leq \tau$. Натижада, системада параметрик оғишиш ҳосил бўлади. Бу эса траекториянинг аниқлиги ва турғунлигини пасайтиради.

Ўзгарувчан шароитларда СРнинг бажарувчи механизми моментларини бошқаришда энергетик ресурсларни мақбуллаштириш ва звенолари бўйича энергетик ресурсларни тўғри тақсимланиши каби масалаларни ҳам ҳал этиш лозим бўлади.

(1) тенглама Декарт координаталар тизимида ва каноник кўринишда қуйидагича берилган бўлсин:

$$\ddot{x}(t, \xi) + f(x(t, \xi), \dot{x}(t, \xi))\dot{x}(t, \xi) + c(x(t, \xi)) = u(t, \xi), \quad (2)$$

бу ерда, $f(\bullet)$ – n ўлчовли фазода биринчи тартибли узлуксиз ҳосилага эга;

$c(\bullet)$ – n ўлчовли фазода узлуксиз функция;

$$|u(\bullet)| \leq M < \infty.$$

(2) тенгламани тартибини пасайтириш орқали қуйидаги тенгламалар системаси ҳосил қилинади:

$$\dot{x} = y, \quad \dot{y} = -f(x, y) - c(x) + u. \quad (3)$$

Бу система ўзгарувчан коэффициентли ва кўриниши мураккаб бўлгани учун унинг ечими мавжудлигини аниқлаш зарур.

Бунинг учун, СР ишчи қўлининг энергия таъминотини ифодаловчи функция киритилган бўлсин:

$$V(x, y) = \frac{y^2}{2} + \int_0^x c(s) ds. \quad (4)$$

(4)ни звенолар бўйича ифодаси қуйидагича:

$$V_i(x, y) = \frac{y_i^2}{2} + \int_0^x c_i(s) ds, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

СР учун энергоресурслар сарфини камайтириш асосий вазифалардан бири ҳисобланади.

$$\frac{dV}{dt} \leq M|y| \leq M \left(\frac{y^2}{2} + 1 \right);$$

$$\frac{dV}{dt} [V(t) + 1] \leq M[V(t) + 1].$$

Охирги тенгсизликдан қуйидагини ёзиш мумкин:

$$V(t) + 1 \leq [V(0) + 1]e^{Mt} \quad \Rightarrow \quad V(t) \leq [V(0) + 1]e^{Mt}. \quad (5)$$

(4) тенгликдан фойдаланилса,

$$y^2 \leq 2[V(0) + 1]e^{Mt}.$$

(1) тенгламанинг (3) тенгламалар системасидаги ечими қуйидаги кўринишда бўлади:

$$x(t) = x_0 + \int_0^t y(s) ds.$$

Охирги тенгсизликдан фойдаланилса,

$$x(t) \leq x_0 + Ce^{Mt}, 0 \leq t \leq \tau.$$

(5) тенгсизликдан $V(t)$ функциянинг чегараланганлиги ва бундан (3) системани ечими вақтнинг $0 \leq t < \infty$ оралиғида мавжудлиги келиб чиқади.

Агар ўзгарувчан шароитларда ишловчи роботларда ҳаракат траекторияси ҳар бир звено ҳаракати учун мос графиклар кўринишида акс эттирилиши лозимлиги эътиборга олинса, энергоресурслар сарфини тежаш ва уларни тўғри тақсимлаш масаласини ҳал қилиш учун шартли экстремум масаласидан фойдаланилади.

(4) дан вақт бўйича ҳосила олинади.

$$\frac{dV_i}{dt} = y_i \dot{y}_i + c_i(x) \dot{x}_i = -f_i(x_i, y_i) y_i^2 + y_i u_i. \quad (6)$$

(6) тенглама нолга тенгланади ва $V_i(x, y)$ функциянинг экстремумга эришиши учун қулайлик туғдирувчи нуқталар аниқланади.

Диссертациянинг «**Ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи саноат роботларини оптимал бошқариш модели**» деб номланган учинчи бобида ўзгарувчан шароитларда СРни самарали ҳаракат қилиши учун бажарувчи механизмга ўрнатилган датчикларнинг роли ва функционал вазифасини бажаришида мавжуд бўлган хатоликлар ўрганилган. Ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи СРнинг кичик параметрик оғишишларини тўғри ва эргашган баҳолашларини ҳисобга олган ҳолда сезувчанлик тенгламаси тузилган. Сезувчанликни ошириш учун тузилган тенгламага Лагранж типигадаги сифат мезони кўйилган.

Лагранж кўпайтувчилари усулидан фойдаланиб сенсорли бошқарувга эга СРнинг, фазовий мураккаб операцияни бажаришида позицион аниқлигини оширишга мўлжалланган, математик модели ишлаб чиқилган.

Кичик параметрик оғишишлар таъсири остида сифат функционалининг четлашиши оптимал бошқарув масаласида сезувчанликни табиий ўлчови ҳисобланади. Бу ҳол кўпроқ Лагранж типигадаги сифат функционаллариға хосдир.

Агар (1) тенгламада $\pi(t) \equiv 0$ бўлса, у ҳолда (2) тенгламанинг кўриниши куйидагича бўлади:

$$\dot{x}(t) = F[x(t), u(t), \xi(t)], \quad x(t_0) = x_0, \quad t_0 \leq t \leq T.$$

Бу тенгламанинг ечими бир параметрли, x га нисбатан ечимлар оиласи дейилади.

x га нисбатан ечимлар оиласини билган ҳолда тизимни ξ га нисбатан параметрлар оғишишини аниқлаш мумкин.

$$U(t) = \frac{\partial x(t, \xi)}{\partial \xi} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial \xi_1} & \frac{\partial x_1}{\partial \xi_2} & \dots & \frac{\partial x_1}{\partial \xi_l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial x_m}{\partial \xi_1} & \frac{\partial x_m}{\partial \xi_2} & \dots & \frac{\partial x_m}{\partial \xi_l} \end{bmatrix}.$$

$U(t)$ матрица-функция сезувчанлик матрицаси дейилади.

Сезувчанлик матрицасини ихтиёрий j устуни учун:

$$U_j(t) = \frac{\partial x(t, \xi)}{\partial \xi_j} = \left(\frac{\partial x_1}{\partial \xi_j} \quad \frac{\partial x_2}{\partial \xi_j} \quad \dots \quad \frac{\partial x_m}{\partial \xi_j} \right)^*, \quad j = 1, 2, 3, \dots, l.$$

Агар (2) тенгламанинг ўнг томони узлуксиз ҳосилага эга бўлса, у ҳолда куйидагиларни ёзиш мумкин:

$$\begin{aligned} \dot{U}_j - \Gamma U_j &= \Delta_j \\ U_j(t_0) &= 0, \quad j = 1, 2, \dots, l, \end{aligned} \quad (7)$$

бу ерда, Γ – $(n \times n)$ ўлчовли ўзгармас матрица;

$\Delta_j = F_j(x + x_p, u, \xi) - F_j(x + x_p, u, \tau) -$ параметрик оғишишни
характерловчи вектор-функция.

(7) сезувчанлик тенгламаси дейилади.

(7) тенгламадан кўриниб турибдики, агар Γ матрица турғун бўлса, у ҳолда тенглама турғун бўлади.

(7) тенглама ечими

$$U_j = \int_{t_0}^T \exp[\Gamma(t - \theta)] \Delta_j d\theta.$$

Фараз қилайлик, $\|\Delta_j\| \leq c_j$ бўлсин ва Γ матрицанинг хос сонларини ҳақиқий қисмининг энг катта қийматга эга бўлгани γ билан белгиланса, у ҳолда U_j бошқарув c_j га тўғри пропорционал, γ га эса тескари пропорционал бўлади.

Сезувчанликнинг ўсиши ёки камайиши γ га боғлиқ бўлади. Агар γ нинг қиймати ошса, сезувчанлик камайди, γ камайса, сезувчанлик ошади.

Диссертациянинг «**Ишлаб чиқилган моделлар, алгоритмлар ва дастурларни ишлаб чиқаришга жорий қилиш натижалари**» деб номланган тўртинчи бобида СРнинг ўзгарувчан шароитларда ҳаракатини моделлаштириш ва бошқаришга оид олинган назарий натижалар ва ишлаб чиқилган алгоритмлар асосида яратилган дастур воситалари ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи тўрт звеноли СРга нисбатан тажриба-синовларидан ўтказилган ҳамда дастур воситаларининг ишлаб чиқаришга жорий қилиш ҳақида маълумотлар келтирилган.

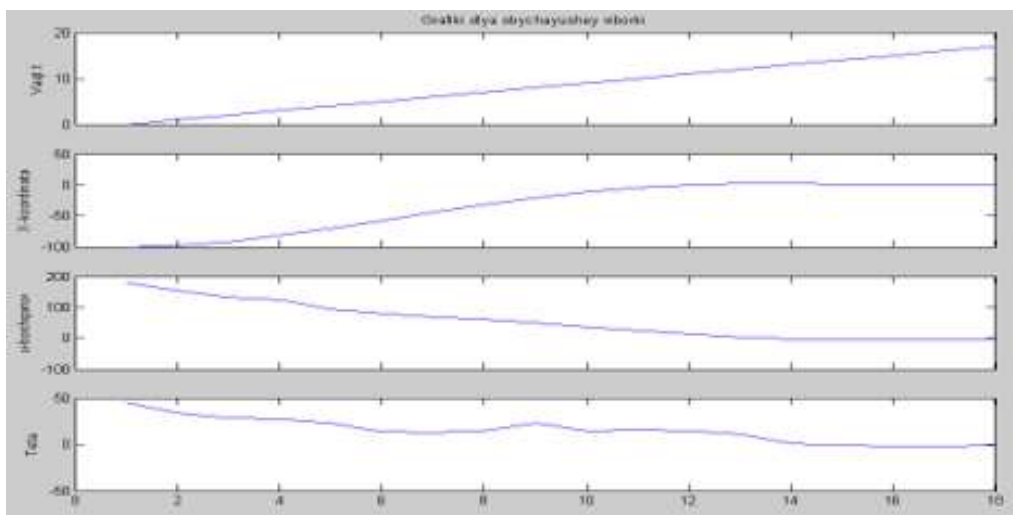
Сенсорли бошқарувга эга СР учун позицион аниқлик масаласи ечиш алгоритми ишлаб чиқилган. Сферик координаталар системасида ҳаракатланувчи СР учун иш зонасининг кўриниши радиуси R бўлган сферанинг ичида ётувчи асосининг радиуси r ва баландлиги H бўлган цилиндрдан иборат бўлсин. Ушбу асосда, цилиндрга ички чизилган параллелепипед томонларини ҳисоблаб топиш ва улар асосида тўққизта нуқтадан бир маротабадан ўтувчи Гамильтон синиқ чизиқлари орасидан энг минимал узунликдагисини танлаш масаласини ечиш алгоритми ишлаб чиқилган.

Ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи СРнинг бошқарилувчанлигини, сезгирлиги ва позицион аниқлигини ошириш имконини берувчи математик ва дастурий таъминотнинг кўриниши 2-расмда келтирилган.

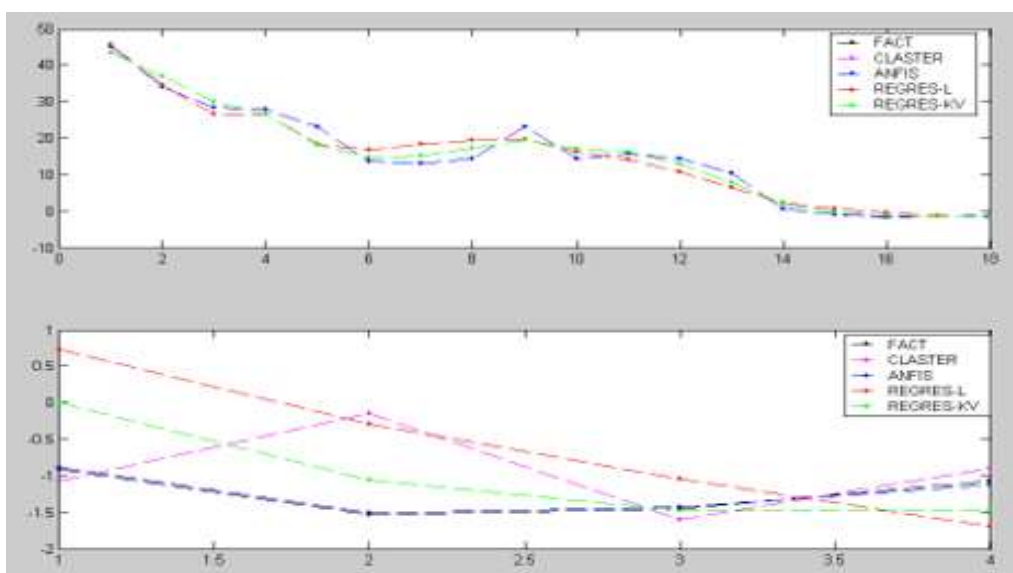


2-расм. Ўзгарувчан шароитларда СРнинг бошқарилувчанлиги, сезувчанлиги ва позицион аниқлигини таъминловчи математик ва дастурий таъминот схемаси

Роботни ҳаракати масаласини ечиш учун классик (бир ўлчовли) тегишлилик функциясига эга норавшан системалардан фойдаланиш масаласи қариб чиқилган. 3-4-расмларда бир ўлчовли тегишлилик функциясига эга норавшан тизимлар учун ечимлар соҳасининг график тасвирлари кўрсатилган.



3-расм. Ўқув танланмасининг график тасвири



4-расм. Норован тизимлар учун ҳар хил моделлар орқали олинган ечимлар соҳасининг график тасвирлари.

Ушбу усулни афзаллиги сифатида қуйидагиларни кўрсатиш мумкин:

- норован қоидалар тақсимланишини ва тегишлилик функцияси танловини автоматлаштирилиши;
- муҳитни ўзгаришида тегишлилик функциясини аниқлашни автоматлаштирилиши, бу эса ўз навбатида нейрон тармоқларни ўқитиш имкониятларини таъминлайди.

ХУЛОСА

«Ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи саноат роботларини оптимал бошқаришнинг математик моделлари ва алгоритмлари» мавзусидаги диссертация иши бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим этилди:

1. Ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи СРнинг бир муҳитдан номаълум бўлган иккинчи муҳитга ўтишида бошқарув фазосининг мавжудлиги масаласи қўйилган, бу масала йўналишида мавжуд бошқариш моделлари таҳлил қилинган ва улар асосида тадқиқотнинг мақсади ҳамда вазибалари шакллантирилган. Қўйилган масалаларнинг ечиш усуллари таклиф этилган.

2. Ўзгарувчан шароитларда СРнинг бир муҳитдан иккинчи муҳитга ўтиш алгоритми ишлаб чиқилган. Параметрик нуқтаи назардан биринчи ва иккинчи муҳитлар бирлашмаси учун СРни мақбул ҳаракатини таъминлаш учун хизмат қилади.

3. Ўзгарувчан шароитларда СРни биринчи ва иккинчи муҳитлар бирлашмаси учун берилган ҳаракат фазосида чегараланган, узлуксиз бошқарув функциясининг мавжудлиги исботланган.

4. СРнинг ички омиллари таъсирини ҳисобга олган ҳолда, СРни ҳаракатида энергоресурслар сарфини звенолар бўйича оптимал тақсимланишнинг математик модели ишлаб чиқилган.

5. Ўзгарувчан шароитлар учун СРнинг сезувчанлик тенгламаси тузилган ва унга Лагранж типидagi сифат мезони қўйилиб, оптималлаштириш масаласи ечилган. Лагранж кўпайтувчилари усули ёрдамида сенсорли бошқарувга эга СР учун позицион аниқликни оширувчи ёндашув ишлаб чиқилган. Энг қисқа узунликка эга Гамильтон занжирини топиш керакли позицион аниқликни таъминлашга хизмат қилади.

6. Ўзгарувчан шароитларда СРни оптимал бошқаришнинг математик моделлари асосида умумлашган алгоритм ишлаб чиқилган. Умумлашган алгоритм стратегик, тактик ва ижро босқичларига бўлинган. Диссертация ишида олинган назарий натижалар ва алгоритмлар асосида ишлаб чиқилган дастур воситалари ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи тўрт звеноли СРга нисбатан тажриба-синовларидан ўтказилган. Дастурлар мажмуаси ҳисоб тажрибаларни амалга оширишга хизмат қилади.

7. «ҚХМКТМ» ҳамда «Integral avtomatika servis» масъулияти чекланган жамиятларида СРни сенсорли бошқариш усуллари, алгоритмлари ва яратилган дастурлар мажмуасини технологик жараёнларни автоматлаштирилган лойиҳалаш учун қўллаш ижобий натижалар берди. Бунда, технологик жараёнларни лойиҳалашнинг техник-иқтисодий кўрсаткичларини 15% га оширишга эришилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕ 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**

СИДДИКОВ РАСУЛЖОН УКТАМОВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ОПТИМАЛЬНОГО
УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ,
ДВИЖУЩИХСЯ ПРИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ УСЛОВИЯХ**

05.01.02 –Системный анализ, управление и обработка информации

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

Ташкент 2021

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за №B2019.3.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) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель:

Онорбоев Баходиржон Очилбоевич
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

Кабулов Анвар Васильевич
доктор технических наук, профессор.

Кубаев Сайидазим Ташбаевич
кандидат технических наук, доцент

Ведущая организация:

Ташкентский институт текстильной и лёгкой промышленности

Защита диссертации состоится «14» 01 2021 г. в 14⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.13/30.12.2019 T.07.01 при Ташкентском университете информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий. (Адрес: 100202, г.Ташкент, ул. Амира Темура, 108.Тел.: (99871) 238-64-43; факс: (99871) 238-65-52; e-mail: tuit@tuit.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий (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

член 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. Из мирового опыта известно, что сегодня, с развитием современных информационных технологий, робототехнические системы используются во всех отраслях промышленности. Используются также робототехнические системы в экстремальных условиях, когда использование труда человека проблематично, а иногда и невозможно. Известно, что рабочий орган роботов, движущихся при изменяющихся условиях, особенно при экстремальных условиях, имеет изменяемую структуру.

На сегодняшний день управление роботами при изменяющихся условиях является сложным процессом, и основная причина этого заключается, во-первых, в том, что робот изменяет свое манипулятивное поведение в зависимости от воздействия внешней среды, а во-вторых, у него нет четкой модели движения. Если модель движения не определена, то сложно будет определить параметры управления движением робота. Поэтому для преодоления этих недостатков одной из основных задач является создание с помощью математических методов модели движения роботов, движущихся при изменяющихся условиях, и разработки на основе этой модели оптимального управления их движением.

Согласно стратегии дальнейшего развития Республики Узбекистан, особое внимание уделяется развитию научных исследований и инноваций, созданию эффективных механизмов внедрения научных и инновационных достижений.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных указами Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017 г. «О стратегии действий по дальнейшему Развитию Республики Узбекистан» и №УП-5349 от 19 февраля 2018 г. «О мерах по дальнейшему совершенствованию сферы информационных технологий и коммуникаций», постановлениями Президента Республики Узбекистан от 29 августа 2017 г. №ПП-3245 «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы управления проектами в сфере информационно-коммуникационных технологий», ПП №-3682 от 27 апреля 2018 г. «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практической реализации инновационных идей, технологий и проектов».

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

Степень изученности проблемы. Моделированием и управлением промышленных роботов (ПР) занимались следующие зарубежные и отечественные исследователи. В частности, П.Н.Белянин, Д.А.Добрынин, Дж.

Бейктал, Фу, Гонсалес, С.Капустин, В.Э.Карпов, В.Л.Конюх, В.П.Макарычев, А.Г.Булгаков, П.Н.Белянин и др.

В Узбекистане большой вклад в разработку математических моделей и алгоритмов оптимального управления автономными системами управления внесли В.К.Қобулов, Н.А.Мўминов, З.З.Шамсиев, Б.М.Исмаилов, Ш.Й.Пулатов, Б.О.Онорбоев и другие учёные.

На сегодняшний день, в разработанных методах для ПР, его кинематические и динамические характеристики учтены не достаточно. Для ПР, движущихся при изменяющихся условиях, формирование коротких и безопасных маршрутов, оптимизация, совершенствование моделей движения алгоритмов управления изучены в недостаточной степени.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках научно-исследовательского плана Научно-инновационного центра информационно-коммуникационных технологий Ташкентского университета информационных технологий по проектам А-5-008 «Разработка программно-алгоритмических средств управления функционированием и процессами изготовления рабочих органов технологических машин» (2015-2017), Проект КА-3-017 «Совершенствование и создание высокопроизводительных, ресурсосберегающих устройств и механизмов технологических машин с учетом свойств и характеристик обрабатываемого материала» (2015-2017).

Цель исследования состоит в моделировании функционирования промышленного робота, движущегося при изменяющихся условиях, разработка оптимальных алгоритмов управления его движением в заданном пространстве.

Задачи исследования:

анализ существующих моделей движения и управления ПР, движущихся при изменяющихся условиях, при выполнении сложных манипуляционных операций;

построение уравнения движения ПР, включая вероятностную меру, и доказательство существования непрерывной функции управления, ограниченной в заданном пространстве движений;

разработка моделей повышения чувствительности и точности позиционирования ПР, движущихся при изменяющихся условиях;

разработка математического и программного обеспечения для оптимального управления ПР, движущихся при изменяющихся условиях.

Объектом исследования являются математическое и программное обеспечение оптимального управления ПР, движущихся при изменяющихся условиях.

Предметом исследования являются математическое моделирование и оптимальное управление ПР, движущихся при изменяющихся условиях.

Методы исследования. Были использованы методы дифференциальных уравнений, теории вероятностей и математической

статистики, математической логики, алгебры и теории чисел и теории оптимального управления.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

построено уравнение движения ПР, движущегося при изменяющихся условиях и разработаны математическая модель и алгоритмы для определения пространственного положения исполнительного механизма ПР с использованием элементов теории вероятностей;

доказано существование пространства управления движением ПР при изменяющихся условиях и наличие в нем ограниченной, непрерывной функции управления;

разработана математическая модель эффективного использования энергоресурсов при движении ПР при изменяющихся условиях;

разработана математическая модель, повышающая чувствительность ПР, движущегося при изменяющихся условиях, с учетом прямых и последующих оценок малых параметрических отклонений;

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработан метод моделирования перехода ПР, движущегося при изменяющихся условиях, из одной среды в другую;

доказано существование непрерывной функции управления ПР, ограниченной в заданном пространстве движения;

разработана модель оптимального распределения энергоресурсов по звеньям движения ПР, движущегося при изменяющихся условиях;

разработана математическая модель, позволяющая повысить чувствительность исполнительного механизма ПР в сложном пространственном движении с учетом малых параметрических отклонений;

разработаны модели и алгоритмы оптимального управления ПР, в целях обеспечения точности позиционирования при выполнении сложных манипуляционных операций исполнительного механизма ПР с сенсорным управлением.

Достоверность результатов исследования. Достоверность результатов исследований выражается в разработке математических моделей и алгоритмов оптимального управления ПР, функционирующего при изменяющихся условиях, повышение его производительности путем внедрения разработок, а также их теоретическим обоснованием.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования заключается в построении уравнения движения ПР, движущегося при изменяющихся условиях, доказательстве существования непрерывной функции управления, ограниченной в заданном пространстве движения, а также разработке математических моделей и алгоритмов повышения его чувствительности и позиционной точности.

Алгоритмы и программные средства для управления исследуемыми роботами могут быть использованы во всех отраслях промышленности, оснащенных современными робототехническими системами, для

предоставления необходимой информации в научных исследованиях по чувствительности и экономии энергоресурсов.

Внедрение результатов исследования. По внедрению в производство программных средств, составленных на основе разработанных математических моделей и алгоритмов оптимального управления ПР, движущихся при изменяющихся условиях, осуществлено следующее:

внедрены в производство в ООО «Integral avtomatika servis» алгоритмы управления ПР и программные средства, использованные в автоматическом управлении технологических процессов (Справка АО «O‘ZAGROTEX-SANOATXOLDING» Республики Узбекистан от 15 января 2019 г. № AP 19-02/87). Результаты использованы для повышения точности позиционирования ПР и разработки общих алгоритмов его управления;

алгоритмы управления и программные средства, ориентированные для выполнения роботом пространственных операций, при изменяющихся условиях, внедрены в ООО «Конструкторско-технологический центр сельскохозяйственного машиностроения» (Справка АО «O‘ZAGROTEXSANOATXOLDING» Республики Узбекистан от 15 января 2019 г. № AP 19-02/87). В результате, удалось снизить расход материальных и энергетических ресурсов на автоматическое управление технологическими процессами для класса промышленных роботов, с сенсорным управлением, на 10%;

разработанные программные средства внедрены для повышения чувствительности и экономии энергетических ресурсов в отраслях, оборудованных роботизированными системами (Справка АО «O‘ZAGROTEXSANOATXOLDING» Республики Узбекистан от 15 января 2019 г. № AP19-02/87). Применение методов и алгоритмов сенсорного управления ПР положительно повлияли на процессы автоматизированного проектирования технологических процессов. В результате, при проектировании технологических процессов достигнуто повышение технико-экономических показателей на 15%.

Апробация результатов исследования. Основные результаты исследования обсуждались на 3 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. Основные научные результаты по теме исследования опубликованы в 14 научных статьях, в том числе 7 статей в научных изданиях, рекомендованных к публикации докторских диссертаций ВАК Республики Узбекистан, из них 3 в зарубежных и 4 в республиканских журналах и получено 1 свидетельство об официальной регистрации программы для электронных вычислительных машин.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Текст диссертации составляет 103 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность диссертационного исследования в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан. Сформулированы цель и задачи, выявлены объект и предмет исследования, изложены научная новизна и практические результаты исследования. Обоснована достоверность, раскрыты теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Приведены перечень внедрений в практику результатов исследования, сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе диссертации «Современное состояние и проблемы систем управления промышленных роботов» приведен анализ теоретических и практических работ по теме диссертации. Освещены основные научные направления, связанные с этой проблемой. Осуществлена постановка задачи для промышленных роботов (ПР) с системой стохастического управления.

Предположим, что ПР движется в среде S_1 , требуется изменение движения из среды S_1 в неизвестную среду S_2 (рис. 1). Можно ли осуществить эффективное управление движением ПР в среде $S = S_1 \cup S_2$?

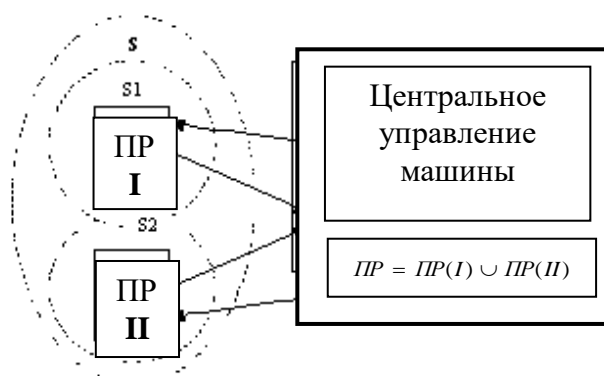


Рис. 1. Вид пространства движения ПР, соответствующего изменению условия

На основе анализа существующих моделей сформулированы цели и задачи исследования. Предложены методы решения поставленных задач.

По теме диссертации подробно проанализированы существующие фундаментальные и прикладные научные работы в области моделирования и управления процессами, в которых участвуют робототехнические системы. Результаты исследований по моделированию и управлению движением ПР с двигающимися основами показывает, что объект, в каждом случае, характеризуется точностью системы движения, модели управления, видом модели движения, специфическими недостатками и преимуществами.

Для стохастического состояния

1. Система движения – неопределенная (неидентифицируемая).

2. Система управления – стохастическая.

3. Вид модели движения – нелинейное дифференциальное уравнение $A(q, \xi)\ddot{q} + b(q, \dot{q}, \xi) = u$.

4. Преимущества модели.

Управление на основе модели объекта, свойства которого описаны в виде математических выражений, можно рассматривать в трех видах:

- а) управление на основе заданной модели;
- б) управление на основе авторегрессионной модели;
- в) управление по отклонениям.

5. Недостатки модели.

5.1. Модель учитывает, в большинстве, отклонения, вызванные под воздействием внешней среды. А внутренние отклонения системы в модели не выражаются. В результате, возникают сложности при проверке устойчивости системы.

5.2. В роботах с шарнирными соединениями силы реакции между соединениями не учитываются. А это приводит к увеличению разницы между заданной траекторией и реальной траекторией движения ПР.

5.3. Во всех трех моделях управления движением ПР при изменяющихся условиях, наблюдается, что увеличение нагрузки приводит к увеличению разницы между заданной и реальной траекториями. Максимальная ошибка при движении ПР без груза составляет от $\pm 0,25$ до $\pm 0,35$ мм, при полузагруженном состоянии от $\pm 0,60$ до $\pm 1,15$ мм, а при максимально нагруженном состоянии составляет от $\pm 1,2$ до $\pm 1,5$ мм.

Для нечеткого состояния

1. Модель, генерирующая выводы на основе нечетких правил.

2. Преимущества модели.

Нечеткие модели характеризуются многогранностью, и любой объект может быть представлен нечеткой моделью с любой точностью. Преимущества моделей с точной логикой заключается в том, что они позволяют синтезировать модель объекта на основе эвристических данных, полученных от эксперта или в результате опытных исследований.

3. Недостатки модели.

Нечеткие модели характеризуются такими недостатками, как отсутствие устойчивых алгоритмов для их синтеза и работой с низкой скоростью вследствие использования большого количества правил управления. Такие недостатки отрицательно влияют на работу алгоритмов оптимального управления ПР. Это вызывает перебои в движении. Подобные пробелы и недостатки в моделях управления движением ПР, при изменяющихся условиях, требуют дополнительных научных исследований.

Во второй главе «**Модель движения промышленных роботов при изменяющихся условиях**» приведены схема моделирования роботизированной производственной ячейки и виды моделей системы управления. Разработан алгоритм перехода ПР, движущегося при изменяющихся условиях, из одной среды в другую. Изучены положения исполнительного механизма в пространстве перемещения ПР в трех

различных видах (захватное устройство, промежуточные звенья, исполнительный механизм). Для полного выполнения функциональных задач ПР при изменяющихся условиях на основе уравнения движения ПР планируется его траектория движения.

Для решения задачи, поставленной в первой главе, требуется сначала построить уравнение движения рабочей руки ПР, введя показатели вероятности. Для этого используется следующий подход:

Для описания движения ПР в среде $S = S_1 \cup S_2$ матрицы вероятностей движения его в обеих средах объединяются.

Матрица вероятностей движения ПР в среде S_1 :

$$P_i^1 = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mn} \end{bmatrix}$$

$d_1 = D(P^1)$. d_1 – дисперсия матрицы P_i^1 .

Матрица вероятностей движения ПР в среде S_2

$$P_i^2 = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mn} \end{bmatrix}$$

$d_2 = D(P^2)$. d_2 – дисперсия матрицы P_i^2 .

$$\bar{P}_i = \begin{cases} P_i^1, & d_1 \geq R, d_2 < R \\ P_i^2, & d_2 \geq R, d_1 < R \\ P_i^1 \oplus P_i^2, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

здесь R – дисперсия значений (среднеквадратичные или среднеквадратические отклонения и т. д.) на пороге перехода из S_1 в S_2 ,

\bar{P}_i – алгоритм перехода ПР из среды S_1 в среду S_2 .

Кроме этого, пространственное положение ПР в среде S описываются следующим образом: первое – положение исполнительного механизма захвата устройства, второе – положение промежуточного звена цепи исполнительного механизма, третье – положение исполнительного механизма.

Движение ПР характеризует цепь Маркова. В цепи Маркова состояние объекта зависит от его предыдущего состояния и не зависит от предыдущих промежуточных движений.

Если в ПР установлены m датчиков и его исполнительный механизм состоит из l звеньев, то параметры, входящие в систему управления робота будут состоять из $X = 2^m$ сигналов, а исходящие параметры из $Y = 2^l$ движений звеньев.

В зависимости от цепи Маркова матрицы вероятностей перехода движения выражаются следующим образом:

$$P(a,b) = \begin{pmatrix} P_{11}^{(a,b)} & P_{12}^{(a,b)} & \dots & P_{1l}^{(a,b)} \\ P_{21}^{(a,b)} & P_{22}^{(a,b)} & \dots & P_{2l}^{(a,b)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{m1}^{(a,b)} & P_{m2}^{(a,b)} & \dots & P_{ml}^{(a,b)} \end{pmatrix}, \sum_{j=1}^l P_{ij}^{(a,b)} = 1.$$

Здесь a, b – отрезок в среде S , начальная и конечная позиции в движении ПР соответственно.

Строка матрицы $P(a,b)$ представляет собой входящие сигналы, а столбцы – движение.

При определении отклонений движения ПР от заданной траектории, при изменяющихся условиях, обратная задача динамики формируется в виде уравнения Лагранжа-Эйлера. Обратная задача динамики заключается в нахождении сил и моментов, которые вызывают отклонение траектории движения ПР. С учетом вышеизложенного и внутренних факторов с параметрической точки зрения, матричный вид уравнения движения ПР, движущегося при изменяющихся условиях, выглядит следующим образом:

$$A(q, \xi) \ddot{q} + b(q, \dot{q}, \xi) = \tau,$$

где $A(q, \xi)$ – матрица-функция с размерностью $(n \times n)$ –, элементы которой имеют вид $(A)_{ki} = a_{0k}^i$, $k, i = 1, 2, \dots, n$;

$b(q, \dot{q}, \xi)$ – n -мерная вектор-функция, элементы которой имеют вид,

$$b_k = b_{k1} + b_{k2} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n a_{1k}^{ij} \dot{q}_j \dot{q}_i + a_{2k}, \quad k = 1, 2, \dots, n$$

второе слагаемое в сумме моментов k – -го соединения;

τ – вектор обобщённых сил с размерностью $(1 \times n)$

ξ – вектор рабочей руки ПР и параметров груза, перемещающийся из одной точки в другую (длина звеньев, вес звеньев и моменты инерций, вес нагрузки и моменты инерций и т. д.);

q – вектор обобщенных переменных;

\dot{q}, \ddot{q} – векторы переменных, представляющие скорости и ускорения, соответственно.

В общем случае, движение ПР при изменяющихся условиях, выражается уравнением:

$$\dot{x}(t) = F[x(t), u(t), \xi(t)] + \pi(t), \quad x(t_0) = x_0, \quad t_0 \leq t \leq T. \quad (1).$$

Здесь $x = x(t)$ – n – вектор состояния, с размерностью n , рабочей руки ПР в момент времени t ;

$u = u(t)$ – вектор-функция управления с размерностью m ;

$\xi(t)$ – изменение параметров, т.е. вектор рабочей руки ПР с размерностью l и параметров груза, перемещающийся из одной точки в другую (длина звеньев, вес звеньев и моменты инерций, вес нагрузки и моменты инерций и т. д.) в момент времени t ;

$F(\bullet) - x(t), u(t), \xi(t)$ – вектор-функция переменных;
 $\pi(t)$ – вектор отклонений, с размерностью n , в непрерывном движении рабочей руки ПР;
 x_0 – начальное состояние.

Если ξ известно и $\pi(t) \equiv 0$, то решение уравнения (1) будет асимптотически устойчивым. Это считается идеальным случаем.

На практике принимается, что $\pi(t)$ известно и невозможно его изменение в отрезке определенного времени, если даже изменение возникает, то $\pi(t)$ принимается равномерно ограниченным, т.е. $\forall t, \|\pi(t)\| \leq C_\pi, t_0 \leq t$.

Неопределенность ξ в управлении приводит к сравнению его с τ , то есть $\|\xi(t)\| \leq \tau$. В результате, в системе возникает параметрическое отклонение. А это уменьшает точность траектории и устойчивость системы.

При управлении моментами исполнительных механизмов ПР при изменяющихся условиях возникают такие вопросы, как оптимизация энергоресурсов и правильное распределение энергоресурсов по звеньям.

Допустим, уравнение (1) задано в Декартовой системе координат в канонической форме в следующем виде:

$$\ddot{x}(t, \xi) + f(x(t, \xi), \dot{x}(t, \xi))\dot{x}(t, \xi) + c(x(t, \xi)) = u(t, \xi), \quad (2)$$

здесь $f(\bullet)$ – имеет произведение первого порядка в n мерном пространстве;

$c(\bullet)$ – непрерывная функция в n мерном пространстве; $|u(\bullet)| \leq M < \infty$.

Понижением порядка уравнения (2) получается следующая система уравнений:

$$\dot{x} = y, \quad \dot{y} = -f(x, y) - c(x) + u. \quad (3)$$

Поскольку, система уравнений имеет переменные коэффициенты и система имеет сложную форму, необходимо определить существование ее решения.

Допустим, для этого введена функция, отражающая питание энергией рабочей руки ПР:

$$V(x, y) = \frac{y^2}{2} + \int_0^x c(s) ds. \quad (4)$$

Выражение (4) для звеньев выглядит следующим образом:

$$V_i(x, y) = \frac{y_i^2}{2} + \int_0^x c_i(s) ds, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Снижение энергопотребления для ПР считается одной из основных задач.

$$\frac{dV}{dt} \leq M|y| \leq M \left(\frac{y^2}{2} + 1 \right);$$

$$\frac{dV}{dt} [V(t) + 1] \leq M [V(t) + 1]$$

Из последнего неравенства можно записать следующие:

$$V(t) + 1 \leq [V(0) + 1]e^{Mt} \Rightarrow V(t) \leq [V(0) + 1]e^{Mt}. \quad (5)$$

Если использовать равенство (4), то

$$y^2 \leq 2[V(0) + 1]e^{Mt}$$

Решение уравнения (1) в системе уравнений (3) выглядит следующим образом:

$$x(t) = x_0 + \int_0^t y(s)ds$$

Если использовать последнее неравенство, то

$$x(t) \leq x_0 + Ce^{Mt}, 0 \leq t \leq \tau$$

Из уравнения (5) вытекает, что функция $V(t)$ является ограниченной. Отсюда вытекает существование решения системы (3) в промежутке времени $0 \leq t < \infty$.

Если учесть, что траектория движения ПР, функционирующего при изменяющихся условиях, требует отображения перемещения каждого звена ПР в виде соответствующих графиков, то для решения задачи снижения энергозатрат и правильного распределения энергетических ресурсов используется задача условного экстремума.

Определяя производную по времени из уравнения (4) получим

$$\frac{dV_i}{dt} = y_i \dot{y}_i + c_i(x) \dot{x}_i = -f_i(x_i, y_i) y_i^2 + y_i u_i. \quad (6)$$

Уравнение (6) приравнивается к нулю и решением его определяются точки, являющиеся наиболее удобными для достижения экстремума функции $V_i(x, y)$.

В третьей главе диссертации «**Модель оптимального управления промышленных роботов, движущихся при изменяющихся условиях**» изучены роль и функциональные возможности, а также погрешности датчиков, установленных на исполнительном механизме ПР, для его эффективной работы при изменяющихся условиях. Построено уравнение чувствительности ПР, движущегося при изменяющихся условиях, с учетом прямых и второстепенных оценок малых параметрических отклонений. Для повышения чувствительности применяется критерий качества задачи Лагранжа.

Разработана математическая модель для повышения позиционной точности ПР с сенсорным управлением, при реализации пространственно сложных операций, с использованием метода множителей Лагранжа.

Под влиянием небольших параметрических отклонений изменение в отрицательную сторону функционала качества является естественной мерой чувствительности с точки зрения оптимального управления. Это, в большей степени, свойственно к функционалам качества задачи Лагранжа.

Если в уравнении (1) $\pi(t) \equiv 0$, то уравнение (2) будет выглядеть следующим образом:

$$\dot{x}(t) = F[x(t), u(t), \xi(t)], \quad x(t_0) = x_0, \quad t_0 \leq t \leq T.$$

Решение этого уравнения называется семейством однопараметрических решений относительно x .

Зная семейство решений относительно x , можно определить отклонения параметров относительно ξ .

$$U(t) = \frac{\partial x(t, \xi)}{\partial \xi} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial \xi_1} & \frac{\partial x_1}{\partial \xi_2} & \dots & \frac{\partial x_1}{\partial \xi_l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial x_m}{\partial \xi_1} & \frac{\partial x_m}{\partial \xi_2} & \dots & \frac{\partial x_m}{\partial \xi_l} \end{bmatrix}.$$

Матрица-функция $U(t)$ называется матрицей чувствительности.

Для произвольного столбца j матрицы чувствительности:

$$U_j(t) = \frac{\partial x(t, \xi)}{\partial \xi_j} = \left(\frac{\partial x_1}{\partial \xi_j} \quad \frac{\partial x_2}{\partial \xi_j} \quad \dots \quad \frac{\partial x_m}{\partial \xi_j} \right)^*, \quad j = 1, 2, 3, \dots, l.$$

Если правая часть уравнения (2) имеет непрерывную производную, то уравнение можно записать в следующем виде:

$$\dot{U}_j - \Gamma U_j = \Delta_j \tag{7}$$

$$U_j(t_0) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, l,$$

здесь Γ – постоянная матрица с размерностью $(n \times n)$;

$\Delta_j = F_j(x + x_p, u, \xi) - F_j(x + x_p, u, \tau)$ – вектор-функция,

характеризующая параметрическое отклонение.

Уравнение (7) называется уравнением чувствительности.

Из уравнения (7) видно, что если матрица Γ устойчива, то уравнение будет устойчивым.

Решение уравнения (7)

$$U_j = \int_{t_0}^T \exp[\Gamma(t - \theta)] \Delta_j d\theta.$$

Предположим, что $\|\Delta_j\| \leq c_j$ и γ наибольший из значений действительной части собственных чисел матрицы Γ , то U_j прямо пропорционально c_j и обратно пропорционально γ .

Повышение или понижение чувствительности зависит от γ . Если значение γ повышается, то чувствительность понижается, если же γ понижается, то чувствительность повышается.

В четвертой главе, «**Результаты внедрения в промышленность разработанных моделей, алгоритмов и программ**» программные средства,

составленные на основе полученных теоретических результатов и разработанных алгоритмов для моделирования и управления движением ПР в изменяющихся условиях апробированы применительно к четырехзвенному ПР, движущемуся при изменяющихся условиях, а также приведены сведения о внедрении программных средств в производство.

Разработан алгоритм решения задачи позиционной точности ПР с сенсорным управлением. Пусть для ПР, движущегося в сферической системе координат с радиусом сферы R , форма рабочей зоны описывается с помощью цилиндра, радиус основания которого равен r и высота H . Применительно этому, разработан алгоритм решения задачи нахождения сторон параллелепипеда, вписанного в цилиндр, и выбор ломаной, с самой наименьшей длиной, среди ломаных Гамильтона, проходящей по одному разу все девять точек.

Математическое и программное обеспечение, позволяющее повысить управляемость, чувствительность и точность позиционирования ПР, движущегося при изменяющихся условиях, представляется в виде, приведенном на рис. 2.



Рис. 2. Схема математического и программного обеспечения, обеспечивающих управляемость, чувствительность и позиционную точность движения ПР при изменяющихся условиях

Рассмотрена задача использования нечетких систем с классической (одномерной) функцией принадлежности для решения задачи движения робота. На рисунках 3 - 4 показаны графические представления области решения для нечетких систем с одномерной функцией принадлежности.

Преимущества этого метода заключаются в следующем:

- автоматизация распределения нечетких правил и выбора функции принадлежности;
- автоматизация определения функции принадлежности при изменении среды, что, в свою очередь, дает возможность обучать нейронные сети.

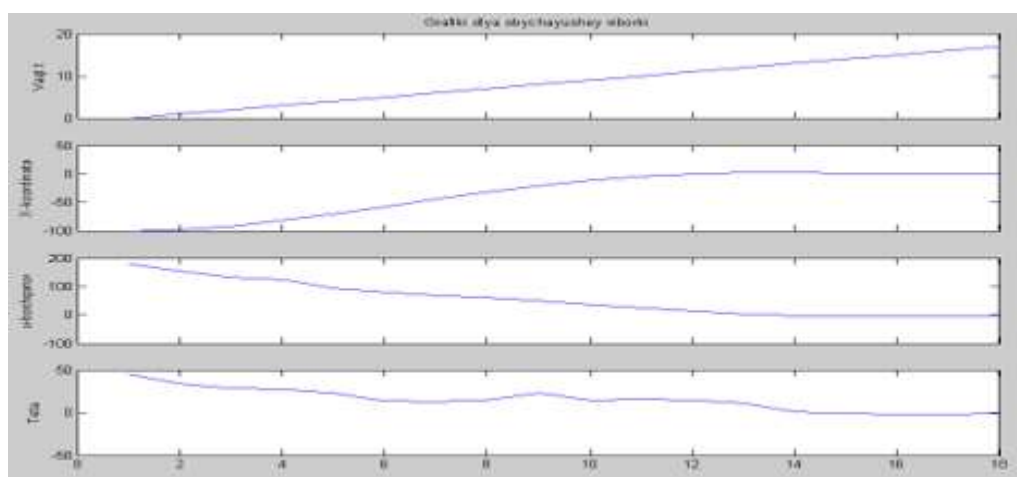


Рис. 3. Графическое представление обучающей выборки

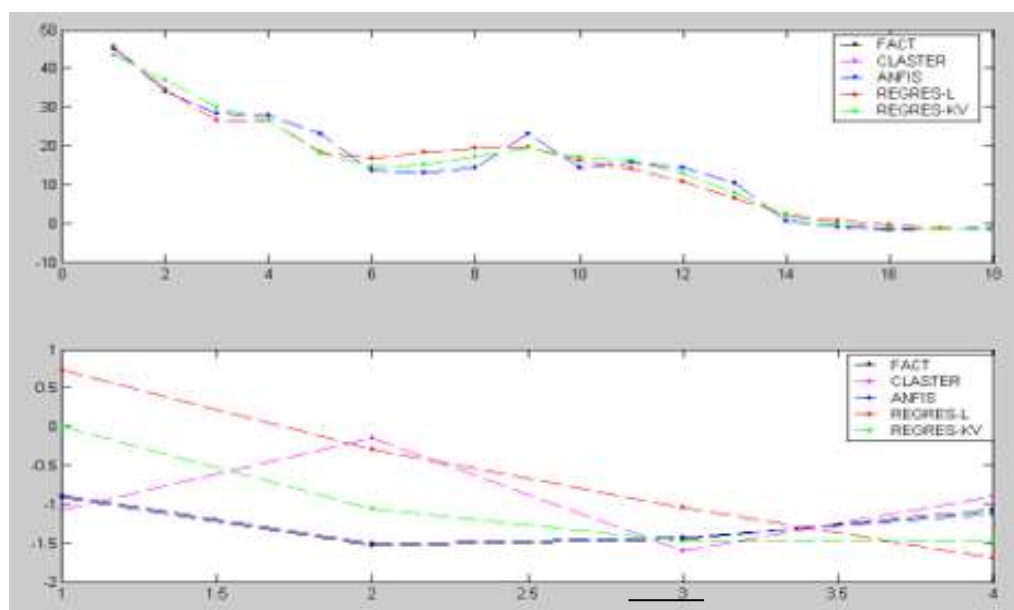


Рис. 4. Графические представления области решений, полученные с помощью разных моделей нечетких систем

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований, проведенных в диссертационной работе по теме «Математические модели и алгоритмы в оптимального управления движением промышленных роботов, движущихся при изменяющихся условиях» представляются следующие выводы:

1. Поставлена задача существования управляющего пространства при переходе движения ПР из одной среды в другую неизвестную среду при изменяющихся условиях. На основе анализа существующих моделей управления в направлении решения поставленной задачи сформулированы цель и задачи исследования. Приняты методы решения поставленных задач.

2. Разработан алгоритм движения ПР из одной среды в другую с изменяющимися условиями. С параметрической точки зрения это служит для обеспечения оптимального движения ПР в пространстве, являющемся объединением первой и второй среды.

3. Доказано существование непрерывной функции управления, ограниченного в пространстве движения ПР при изменяющихся условиях, являющейся объединением первой и второй среды.

4. Разработана математическая модель оптимального распределения энергозатрат по звеньям ПР с учетом влияния внутренних факторов при его движении.

5. Построено уравнение чувствительности ПР, функционирующего в изменяющихся условиях, и решена оптимизационная задача с применением критерия качества типа Лагранжа. Разработан подход, повышающий точность позиционирования с помощью метода множителей Лагранжа для ПР с сенсорным управлением. Нахождение короткой цепи Гамильтона служит для обеспечения требуемой точности позиционирования.

6. Разработан обобщенный алгоритм на основе математических моделей оптимального управления ПР при изменяющихся условиях. Обобщенный алгоритм разделен на три этапа: стратегический, тактический и исполнительный. Программное обеспечение, разработанное на основе теоретических результатов, полученных в диссертации, было применено к четырехзвенному ПР, движущемуся при изменяющихся условиях. Комплекс программ служит для выполнения экспериментальных расчётов.

7. Применение сенсорных методов управления ПР, разработанных алгоритмов управления и программного комплекса для автоматизированного проектирования технологических процессов в ООО «Конструкторско-технологический центр сельскохозяйственного машиностроения» и «Integral avtomatika servis» дали положительные результаты. В результате, достигнуто повышение технико-экономических показателей проектирования технологических процессов на 15%.

**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**

SIDDIKOV RASULJON UKTAMOVICH

**MATHEMATICAL MODELS AND ALGORITHMS IN THE
OPTIMAL CONTROL OF ROBOTS IN INDUSTRY UNDER
CHANGING CONDITIONS**

05.01.02 – System analysis, management and information processing

**ABSTRACT OF DISSERTATION
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:

Qobulov Anvar Vosilovich
Doctor of technical sciences, professor

Kubayev Sayidazim Tashbayevich
Candidate of technical sciences, Docent

Leading organization:

Tashkent Institute of Textile and Light Industry

The defense at dissertation will take place on «14» 01 2021 y. at 14⁰⁰ 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. It consists of modeling an industrial robot moving in changing conditions and developing optimal control algorithms in a given motion space.

The object of research work is the mathematical and software of optimal control of a variable-structured industrial robot.

Scientific novelty of the research is as follows:

the equation of motion of an industrial robot moving under changing conditions is constructed and the spatial positioning of the robot actuator is developed using elements of probability theory;

the control space for the motion of an industrial robot under changing conditions and the existence of a limited, continuous control function in it have been proven;

a mathematical model of the efficient use of energy resources in the motion of an industrial robot under changing conditions has been developed;

developed a sensitivity model that takes into account the correct and follow-up estimates of small parametric deviations of an industrial robot moving in changing conditions;

Implementation of the research results. Based on the model, algorithms and software tools developed for mathematical models and algorithms for optimal control of industrial robots moving in changing conditions:

algorithms for robot control and software used for automatic control of technological processes can be used by Integral Automation Service LLC.

The result was used to increase the positional accuracy of an industrial robot and to develop general control algorithms for an industrial robot moving in changing conditions;

the method of control algorithms for performing spatial operation of the robot in changing conditions was introduced in LLC «Center of agricultural machinery communication technologies». The research resulted in a 10% reduction in the consumption of material and energy resources in the automatic control of technological processes for the class subject to sensory control of industrial robots;

software used to increase sensitivity and energy efficiency in traffic in industries equipped with robotic systems (Handbook of JSC «O‘ZAGROTEXSANOATXOLDING» of the Republic of Uzbekistan dated January 15, 2019 No AP 19-02/87). As a result of the application, the impact on automated design processes through the application of sensory control methods and algorithms of industrial robots in technological processes was focused on positive quality.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of references. The text of the dissertation is presented on 103 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Siddikov R. Touch Subordinates Management of Industrial Robots Improving the Positional Accuracy of the Mathematical Model // Published in BEST: International Journal of Management, Information Technology and Engineering (BEST: IJMITE). Volume 4, Issue 8, August 2016. –PP. 1-6. (№5; Global Impact Factor)

2. Siddikov R. Planning the movement of moving mobile robots in a changing environment // Azian Journal of Multidimensional Research ISSN: 2278-4853. Vol 7, Issue 11, November 2018. IF: SJIF 2017=5.443. –PP. 419-426. (№23; Scientific Journal Impact Factor; IF=5.443)

3. Siddikov.R Module management module determined by defosition procedure // International Journal of Advanced Research in Science, Engineerring and Technology ISSN: 2350-0328. Vol 7, Issue 3, March 2020. –PP. 13139-13141 <http://www.ijarset.com/currentissue.html>. (№8; 05.00.00)

4. Онорбоев Б.О., Хонбобоев Х.И., Абдуллаев А.Қ., Сиддиқов Р.Ў. Ўзгарувчан тузилмани саноат роботларини бошқариш модели // «Информатика ва энергетика муаммолари» Ўзбекистон журнали. –Тошкент, 2007. №2. 8-12-б.(№5; 05.00.00)

5. Сиддиқов Р.Ў. Саноат роботининг ўзгарувчан шароитдаги ҳаракатида оптималлаштириш масаласи // «Информатика ва энергетика муаммолари» Ўзбекистон журнали. –Тошкент, 2009. №6. 18-22-б. (№5; 05.00.00)

6. Сиддиқов Р.Ў., Ароев Д.Д. Ўзгарувчан параметрли саноат роботини бошқаришнинг математик модели // «Информатика ва энергетика муаммолари» Ўзбекистон журнали. –Тошкент, 2010. №6. 26-29-б. (№5; 05.00.00)

7. Сиддиқов Р.Ў. Ўзгарувчан тузилмани роботлар ҳаракатида датчикларнинг роли // «Информатика ва энергетика муаммолари» Ўзбекистон журнали. –Тошкент, 2018. №2. 55-59-б. (№5; 05.00.00)

II бўлим (II часть; II part)

8. Б.О.Онорбоев, Р.Ў.Сиддиқов, Д.Д.Ароев. Саноат роботлари ҳаракатини турғунликка текшириш ҳақида // «Современное состояние и перспективы информационных технологий». Республика илмий-техник анжумани материаллари. –Тошкент, 2011. Том II. 185-188 б.

9. Сиддиқов Р. Модули нечетко-нейронного управления движения работа // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат.науки, 2014. №1 (8). –С. 71-74.

10. Сиддиқов Р.Ў. Ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи роботлардан ишлаб чиқаришда фойдаланишнинг назарий ва амалий

аҳамияти // iScience Актуальные вызовы современной науки. Сборник научных трудов. Выпуск 6 (14). Часть 2. –Переяслав-Хмельницкий, 2017. – С. 60-63.

11. Сиддиқов Р.Ў. Ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи саноат роботлари ҳаракатининг бошқариш тизимлари // «Инновацион ғоялар, ишланмалар ва уларни ишлаб чиқариш ҳамда таълимда қўллашнинг замонавий муоммолари» Халқаро илмий-амалий конференция, 2019 йил 15 апрель. –Андижон. 316-318-б.

12. Сиддиқов Р.Ў. Ўзгарувчан шароитларда ҳаракатланувчи саноат роботларининг ҳаракат модели // Ахборот -коммуникация технологиялари ва телекоммуникацияларнинг замонавий муаммолари ва ечимлари» Республика илмий-техник анжуманининг маърузалар тўплами. III-қисм. 2019 йил 30-31 май. –Фарғона, 544-546-б.

13. Мухамедиева Д.Т., Сиддиқов Р. Робот ҳаракатининг нейроноравшан бошқарув модуллари // «Инновацион ғоялар, ишланмалар ва уларни ишлаб чиқариш ҳамда таълимда қўллашнинг замонавий муоммолари» Халқаро илмий-амалий конференция, 2019 йил 15 апрель. – Андижон, 53-54-б.

14. Siddikov.R. It varies bu entering probability measures industrial robots' mobility model under conditions // Monografia pokonferencyjna Science Research, development № 23. Rotterdam (The Netherlands) 29.11.2019-30.11. 2019. – PP. 39-43.

15. Мухамедиева Д.Т., Сиддиқов Р. Норавшан берилган ахборот ҳолатида робот ҳаракатини бошқариш дастури // ЭҲМ учун дастурнинг расмий рўйхатдан ўтказилганлиги ҳақида Гувохнома. № DGU 06294. 2019.