

**ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ  
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.27.06.2017.Т.07.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

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

**СУЛЮКОВА ЛАРИСА ФАРИТОВНА**

**БИКРЛИГИ КАМ БЎЛГАН ДЕТАЛЛАРГА ИШЛОВ БЕРУВЧИ  
ТЕХНОЛОГИК ТИЗИМЛАРНИ БОШҚАРИШ УСУЛЛАРИ ВА  
АЛГОРИТМЛАРИ**

05.01.02 – Тизимли таҳлил, бошқарув ва ахборотни қайта ишлаш

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



A  
C 96

АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ  
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.27.06.2017.Т.07.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

---

ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ  
ХУЗУРИДАГИ АХБОРОТ-КОММУНИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ  
ИЛМИЙ-ИННОВАЦИОН МАРКАЗИ

**СУЛЮКОВА ЛАРИСА ФАРИТОВНА**

**БИКРЛИГИ КАМ БЎЛГАН ДЕТАЛЛАРГА ИШЛОВ БЕРУВЧИ  
ТЕХНОЛОГИК ТИЗИМЛАРНИ БОШҚАРИШ УСУЛЛАРИ ВА  
АЛГОРИТМЛАРИ**

05.01.02 – Тизимли таҳлил, бошқарув ва ахборотни қайта ишлаш

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

Техника фанлари бўйича фан доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2017.1.DSc/T26 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 саҳифасида ([www.tuit.uz](http://www.tuit.uz)) ва «Ziyonet» Ахборот таълим порталида ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:

Азимов Бахтнёр Магруппович  
техника фанлари доктори

Расмий оппонентлар:

Игамбердиев Хусан Закирович  
техника фанлари доктори, академик

Равшанов Нормакмад  
техника фанлари доктори, профессор

Нурмухамедов Толаниддин Рамзиддинович  
техника фанлари доктори, доцент

Етақчи ташкилот:


Тошкент тўқимачилик ва енгил саноат институти

Диссертация ҳимояси Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги DSc.27.06.2017.T.07.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2019 йил «19» Келди соат 17<sup>00</sup> даги мажлисида бўлиб ўтди. (Манзил: 100202, Тошкент шаҳри, Амир Темур кўчаси, 108-уй. Тел.: (99871) 238-64-43, факс: (99871) 238-65-52, e-mail: [tuit@tuit.uz](mailto:tuit@tuit.uz)).

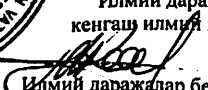
Диссертация билан Тошкент ахборот технологиялари университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин 1/25/23 рақам билан рўйхатга олинган. (Манзил: 100202, Тошкент шаҳри, Амир Темур кўчаси, 108-уй. Тел.: (99871) 238-65-44).

Диссертация автореферати 2019 йил «15» НО.2016 кунни тарқатилди.  
(2019 йил «3» ОК.2016 даги 18 рақамли реестр 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

  
М.А.Рахматуллаев  
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш  
қошидаги илмий семинар раиси, т.ф.д., профессор

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

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда бошқариш тизимларини такомиллаштиришда ахборот технологиялари ютуқларини ривожлантириш ва жорий қилиш ҳамда механик ишлов берувчи мураккаб технологик тизимларни бошқариш ва технологик жараёнларни лойihalашнинг замонавий усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш замонавий машинасозлик ишлаб чиқаришининг техник даражасини ва ишлаб чиқариладиган маҳсулот сифатини оширишнинг энг муҳим масалаларидан бири ҳисобланади. Жаҳон машинасозлигида юқори мустаҳкамликка ва махсус хусусиятларга эга бўлган материаллар кенг тарқала бошлади, натижада металл сарфи ва машина массасининг камайиши тенденцияси кузатилди, бу эса кўплаб бикрлиги кам бўлган деталларнинг шаклланишига олиб келди. Шунинг учун жаҳон бозорида машинасозлик маҳсулотларининг техник даражаси ва рақобатбардошлигини таъминлаш машина ва дастгоҳлар параметрларини тадқиқ қилиш ва оптималлаштиришнинг комплекс масалаларини ҳал қилиш билан чамбарчас боғлиқ. Дунёнинг ривожланган мамлакатларида, шу жумладан АҚШ, Буюк Британия, Германия, Хитой, Ҳиндистон, Россия Федерацияси ва бошқаларда механизм ва машиналарда тобора кўпроқ фойдаланиладиган бикрлиги кам бўлган деталларга ишлов бериш аниқлигини оширишнинг, айниқса материал-энергия ресурслар сарфини камайтиришнинг замонавий тенденциялари, ҳамда функционал мақсадли деталлардан кенг фойдаланиш катта муаммо бўлиб турибди. Бундай деталлар аниқ машинасозликда, асбобсозлик, авиация ва космик sanoатда маҳсулотнинг катта қисмини ташкил этади.

Дунёда ишлов бериладиган деталларнинг геометрик ўлчамлари ва шакллари аниқлигини таъминлаш муаммоларини ҳал этишга қаратилган илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда, бу эса ишлов беришнинг динамик тизимидаги эластик деформацияланган бикрлиги кам бўлган деталлар ҳаракати қонуниятларини очишга асосланган таҳлил усулларини такомиллаштириш, ишлов бериш аниқлиги ва сифатини ошириш йўллари излаш, технологик тизим ишлаши жараёнида шакл аниқлиги ва юза сифатини ошириш учун бошқарув ва математик моделлаштириш соҳасидаги усулларни ишлаб чиқишга олиб келди.

Ўзбекистон Республикасида машинасозлик деталлари ва дастгоҳларини ишлаб чиқариш жараёнларини модернизация қилишда ахборот-коммуникация технологияларини жорий этиш бўйича тадқиқотлар олиб борилмоқда. Бу йўналишда бошқарув усуллари ишлаб чиқиш, математик моделлаштириш, машинасозлик объектларининг технологик тизимлари параметрларини оптималлаштириш учун алгоритм ва дастур мажмуаларини яратиш бўйича ишлар олиб борилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан «...илмий ва инновация ютуқларини амалиётга жорий қилишнинг самарали механизмларини яратиш, ...илғор ахборот-коммуникация технологияларини жорий қилиш ва улардан фойдаланиш»<sup>1</sup> вазифалари белгиланган. Ушбу вазифаларни бажаришда динамикани таҳлил қилиш ва бикрлиги кам

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

деталларга ишлаб беришда хатоликлар ҳосил бўлиши механизмларини ўрганиш учун ахборот ва коммуникация тизимлари ёрдамида дастурлар мажмуаси ва технологияларни ишлаб чиқиш, бикрлиги кам деталларга токарлик ва силликлаш орқали ишлов беришда технологик тизимларнинг тавсифларини ҳисобга олган ҳолда бошқариш усуллари ва математик ифодалашни ишлаб чиқиш ва амалиётга жорий қилиш муҳим масалалардан ҳисобланади.

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 коммуникациялар соҳасини янада такомиллаштириш чора-тадбирлар тўғрисида»ги Фармонлари, 2017 йил 29 августдаги ПҚ-3245-сон «Ахборот ва ахборот технологиялари соҳасида лойиҳаларни бошқариш тизимини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги, 2017 йил 7 июлдаги ПҚ-3117-сон «Қишлоқ хўжалиги машинасозлиги соҳасида илмий-техникавий базаларни янада ривожлантириш бўйича чора-тадбирлар 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 технологияларини ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг IV.«Ахборотлаштириш ва ахборот-коммуникация технологияларини ривожлантириш»устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шарҳи<sup>2</sup>. Ишлов бериладиган бикрлиги кам бўлган деталлар аниқлиги ва сифатини ошириш мақсадида мураккаб технологик тизимларни бошқаришни оптималлаштириш, технологик тизимларни бошқариш усуллари ва алгоритмларини, математик моделлар ва ишлов бериш дастурларини ишлаб чиқиш, технологик тизимларни бошқариш усуллари танлаш ва ахборотни қайта ишлаш бўйича қарорларни қабул қилишни ўз ичига олган муаммоларни ҳал қилиш бўйича тадқиқотлар жаҳон илмий марказлари ва олий таълим муассасалари, шу жумладан University of Huddersfield (Буюк Британия), Institute of Production Engineering and Machine Tools University of Hannover (Германия), Cornell University School of Operations Research and Industrial Engineering, Department Electrical Engineering & Computer Science Northwestern University (АҚШ), Department of Mechanical Engineering Tianjin University (Хитой), Lublin University of Technology (Польша), МДТУ «Станкин»да, Н.Э.Бауман номли МДТУда, Омск давлат техника университетида (Россия Федерацияси) олиб борилмоқда.

Технологик тизимларни бошқариш учун усуллар ва алгоритмларни яратиш, механик ишловларни математик моделлаштириш бўйича мавжуд

<sup>2</sup>Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шарҳи <http://www.springer.com>, <https://www.sciencedirect.com/science/article>, [www.ifw.uni-stuttgart.de](http://www.ifw.uni-stuttgart.de), <https://www.researchgate.net/publication>, <http://eprints.hud.ac.uk/8597/>, <http://technomag.bmstu.ru/en/>, <https://jestec.taylorfs.edu/>, <https://www.unibo.it/en>, <https://www.mccormick.northwestern.edu/cecs>, <https://cyberleninka.ru/article/>, <http://ieeexplore.ieee.org/>, <https://scholar.google.ru>, <http://engjournal.ru/catalog/eng> ва бошқа манбалар асосида ишлаб чиқилган.

тадқиқотларни таҳлил қилиш натижасида бир қатор илмий натижалар, шу жумладан: замонавий дастурий таъминотдан фойдаланиб, механик ишлов бериш жараёнида кесиш кучлари ва колдик кучланишларни математик моделлаштириш натижалари келтирилган, бошқарув усуллари ва силликлаш жараёнларини бошқариш усуллари ва моделлаштириш таснифлари яратилди (University of Huddersfield, Буюк Британия); динамик тизимни бошқариш орқали ички силликлаш жараёнини оптималлаштириш усуллари ишлаб чиқилган (Institute of Production Engineering and Machine Tools, University of Hannover, Германия); ишлов бериш жараёнининг кириш параметрларини корреляцияси ва чиқиш тавсифлари учун самарадорликни, технологик жараёни бошқариш йўллари башоратлайдиган, ўзаро таъсир қилувчи кесиш кучларининг мувозанатини бошқариш имконини берадиган математик моделлар олинган (Department of Mechanical Engineering Worcester Polytechnic Institute, АҚШ); турли каналлар бўйича динамик тизимни математик моделлари ва бошқарув алгоритмлари (Lublin University of Technology, Польша); бикрлиги кам бўлган деталларга ишлов бериш жараёнларини тўғридан-тўғри сонли интеграллашни қўллаш билан тадқиқ қилиш имконини берувчи математик моделлар, мураккаб шаклли мослашувчан деталларни силликлаш жараёнларининг имитацион моделлари мажмуаси, тебраниш даражасини, шакли ва юза сифати оғишини баҳоловчи, мураккаб юза шаклли деталларга ишлов беришни моделлаштиришга ёндашув (Н.Э. Бауман номли МДТУ); юза шаклланишининг зарурий сифатини таъминловчи, дастгоҳли модулни бошқариш тизимини қуришнинг назарий ва амалга ошириш асослари шакллантирилган (СТАНКИН МДТУ); бошқариладиган ўзгарувчилар учун динамик тизимларни аналитик идентификация қилиш тавсия қилинган (Тольятти давлат университети, Россия Федерацияси).

Берилган аниқлик билан технологик жараёнларни лойиҳалашда аниқлик ва ишлов бериш самарадорлигини ошириш муаммоларини ҳал қилиш бўйича илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда, улар аниқликни бошқаришнинг конструкторлик ва тебранишларни бошқариш усулларини яратишга тааллуқли, математик моделлар ва эластик тизимни кесиш режимларни тўғридан-тўғри бошқариш усулларини ишлаб чиқиш. Динамик тизимнинг эластик деформациясини бошқариш тизимларини синтез қилиш усуллари ишлаб чиқилмоқда, технологик тизимни лойиҳалаш учун, кўп мақсадли дастгоҳларни қўллаш учун ҳам дастурий таъминот такомиллаштирилмоқда ва яратилмоқда. Технологик жараёни бориши ва дастгоҳларнинг ишлаши тўғрисидаги ўлчов маълумотларини қайта ишлашнинг компьютер усулларидан фойдаланган ҳолда энг янги усул ва бошқариш воситалари ишлаб чиқилмоқда.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Деталларга ишлов берувчи технологик тизим ҳаракатини бошқаришнинг усуллари ва алгоритмларини яратиш, математик моделлар ва ушбу жараёни бошқариш алгоритмларини ишлаб чиқишни ўз ичига олган бошқаришнинг назарий асосларини ишлаб чиқиш, технологик тизимни ва унинг динамик тавсифларини бошқаришнинг сифат кўрсаткичларига нисбатан асосий талабларини ишлаб чиқишнинг

кўпфакторли таҳлилини ўзида акс эттирадиган, механик ишлов бериш жараёнида кузатиладиган омилларнинг ўзаро таъсирини тадқиқ қилиш масалалари ўзининг катта ҳиссасини кўшган қуйидаги олимларнинг ишларида кўриб чиқилган: О.И.Драчев, А.М.Абакумов, В.А.Тараненко, С.А.Воронов, В.Г.Митрофанов, S.Malkin, A.A.Cardi, R.Bauer ва бошқалар.

Деталларни тайёрлаш аниқлигини таъминлаш, механик ишлов бериш жараёнларини оптималлаштириш ва бошқариш масалалари Б.С.Балакшин, З.Гейлер, А.М.Дальский, Ю.М.Соломенцев, В.А.Кудинов, М.С.Невельсон, В.И.Подураев, М.М.Тверской, В.А.Гаврилов, Van der Schaft, Macchelli A. ва бошқа тадқиқотчиларнинг ишларида етарли даражада тўлиқ ва кенг ёритилган. Чизикли моделлар ёрдамида турли операциялар учун кесиш жараёни турғунлигининг таҳлили Ю.Н.Санкин, В.Г.Грановский, Y.Altintas, S.D.Merdol ва бошқаларнинг ишларида келтирилган. Лекин бикрлиги кам бўлган деталларга ишлов бериш бўйича мақсадли тадқиқотлар сонининг чекланганлиги, бикрлиги кам бўлган деталларни юқори аниқликдаги силликлаш жараёнларини ривожлантириш ва такомиллаштиришни секинлаштиради.

Амалга оширилган ишларнинг таҳлили шуни кўрсатадики, деталларнинг аниқлигини ошириш мақсадида кўп босқичли моделлаштириш, ҳисоблаш тажрибалари ва параметрларни оптимал бошқариш тизимларини қуришга ҳамда дастурий воситаларини ишлаб чиқишга асосланган, бикрлиги кам бўлган деталларга механик ишлов берувчи технологик тизимни (ТТ) бошқаришнинг усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш, мулоқот режимида қарор қабул қилиш ва ишончли ахборот олиш ҳисобига технологик тизимларни бошқаришни амалга ошириш долзарб муаммо ҳисобланиб, ҳозир вақтда етарли даражада ҳал қилинмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Ахборот-коммуникация технологиялари илмий-инновацион марказининг илмий тадқиқот ишлари режасининг А-17-Ф008 «Ишлаб чиқариш тизимларини тафаккурли бошқариш ва лойиҳалашнинг моделлари, алгоритмлари ва дастур воситаларини ишлаб чиқиш» (2009-2011), А5-ФА-А018 «Технологик машина ва тизимларни лойиҳалаш учун усуллар, алгоритмлар ва ташхислаш, оптимал бошқариш ва қарор қабул қилишнинг дастур воситаларини ишлаб чиқиш» (2012-2014), А-5-008 «Технологик машинларнинг ишчи органлари ҳаракатини ва уларни тайёрлаш жараёнларини бошқаришнинг дастурий-алгоритмик воситаларини ишлаб чиқиш» (2015-2017), БВ-АТЕХ-2018-13 «Пахта териш машиналари турли шароитларда ҳаракатланганда параметрларини оптималлаштиришнинг моделлари, алгоритмлари ва дастурий воситаларини ишлаб чиқиш» (2018-2020) мавзулардаги илмий лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади бикрлиги кам бўлган деталларга механик ишлов берилганда талаб этилган юза аниқлигини ва сифатини таъминлаш учун технологик тизимларни бошқариш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқишдан иборат.



### **Тадқиқот вазибалари:**

айланма жисм шаклидаги бикрлиги кам бўлган деталларга механик ишлов берувчи технологик тизимларни тадқиқ қилиш ва бошқариш усулларининг тизимли тахлилини амалга ошириш;

бикрлиги кам бўлган эластик деформацияланувчи деталларга динамик режимда механик ишлов берувчи технологик тизимлар ҳаракатининг математик моделларини ишлаб чиқиш;

эластик деформацияланувчи деталларга механик ишлов беришнинг барқарор жараёнларини таъминлашнинг қонуниятларини ўрнатиш;

бикрлиги кам бўлган деталларга токарлик ишлови бериш ва силликлаш жараёнларида технологик тизимни моделлаштириш ва бошқаришнинг функционал тузилмасини ишлаб чиқиш;

бикрлиги кам бўлган деталларга ишлов бериш жараёнида тезкор, сифатли ва ресурс сарфини камайтирувчи ишлаб чиқаришни таъминлаш мақсадида технологик тизимни оптимал бошқариш алгоритмларини ишлаб чиқиш;

бикрлиги кам бўлган деталларга ишлов бериш жараёнида технологик тизимнинг ҳолатини баҳолаш моделлари ва энергетик ресурсларини бошқаришни яхшилаш алгоритминини ишлаб чиқиш;

машинасозликнинг ишлаб чиқариш объектларига олинган натижаларни амалий татбиқ қилиш учун дастурий мажмуани ишлаб чиқиш.

**Тадқиқотнинг объекти** эластик деформацияланувчи деталларга механик ишлов берувчи технологик тизим ҳисобланади.

**Тадқиқотнинг предмети** технологик тизимларни оптимал бошқариш ва энергетик ҳолатини баҳолаш усуллари ва алгоритмлари ҳисобланади.

**Тадқиқотнинг усуллари:** Тизимли таҳлил, деформацияланувчи каттик жисм механикаси назарияси, вариацион ҳисоблар ва оптимал тизимлар, математик моделлаштириш усуллари ҳамда машинасозлик технологияси ва замонавий ахборот технологиялари услубиятлари.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

IDEF0 услубияти асосида ҳақиқий жараёнларни акс эттирувчи, бикрлиги кам бўлган деталларга ишлов берувчи технологик тизимларнинг моделлари ва бошқариш алгоритмларининг функционал тузилмаси қурилган;

динамик режимдаги бикрлиги кам бўлган деталларга механик ишлов бериш жараёнларини бошқариш учун технологик тизимнинг ҳисоблаш тарҳи қурилди ва математик моделлари ишлаб чиқилган;

бикрлиги кам бўлган деталларга ишлов бериш жараёнида тезкор, сифатли ва ресурс сарфини камайтирувчи ишлаб чиқаришни таъминлаш мақсадида технологик тизимни оптимал бошқариш алгоритмлари ишлаб чиқилган;

бикрлиги кам бўлган деталларга ишлов бериш жараёнида технологик тизимнинг ҳолатини баҳолаш моделлари ва энергетик ресурсларини бошқаришни яхшилаш алгоритми ишлаб чиқилган;

динамик технологик тизимнинг намунавий тузилмалари учун эластик деформацияланувчи деталларга механик ишлов беришнинг барқарор жараёнларини таъминлаш қонуниятлари аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

бикрлиги кам бўлган эластик деформацияланувчи деталларга токарлик ишловини бериш ва силлиқлаш аниқлигини бошқариш, ишлов бериш жараёнини ва унга тенглаштирилган эластик тизимнинг динамик хусусиятларини тавсифловчи технологик тизимларнинг математик моделлари ишлаб чиқилган ва эластик деформацияланиш шароитида параметрларни оптималлаштириш амалга оширилган;

IDEF0 услубияти асосида бикрлиги кам бўлган деталларга ишлов берувчи технологик тизимни бошқаришнинг функционал тузилмасини куриш усуллари ишлаб чиқилган;

токарлик ишлови бериш ва худди шундай силлиқлаш жараёнлари учун характерли бўлган, бошқарув объекти параметрларининг ўзгариш чегараларини кенглиги сабабли, ўрнатилган ва ўтиш режимларида бошқаришнинг юқори сифат кўрсаткичларига оптимал бошқариш усуллари қўллаш орқали эришиш мумкинлиги аниқланган;

ишлов бериладиган деталь шакли ва юзаси сифати аниқлигини оширишни таъминловчи, бикрлиги кам бўлган деталларга механик ишлов берувчи технологик тизимни оптимал бошқариш, энергетик ҳолатини баҳолаш усуллари ишлаб чиқилган;

ишлов бериш режимида параметрларни оптималлаштириш, бикрлиги кам бўлган деталларга ишлов бериш аниқлигини оширишга олиб келувчи барқарор жараёни таъминлаши исботланган;

ўқ чизигига симметрик жойлашган бикрлиги кам бўлган деталларга токарлик ишловини берувчи ва силлиқлаш жараёнларининг технологик тизимларини оптимал бошқариш алгоритмлари, баҳолаш ва энергетик ҳолатини бошқаришни яхшилаш алгоритмлари ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги масса, энергия ва импульсни сақланиш қонунлари, каттик жисм механикаси қонунлари, ҳисоблаш математикасининг тасдиқланган усулларида фойдаланилганлиги ҳамда олинган натижаларнинг сифат ва миқдор жиҳатдан баҳоланганлиги билан асосланган, қаралаётган жараёнинг ишлаб чиқилган математик таъминотга мослиги материал мувозанати тенгламалари билан текширилган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти берилган аниқлик ва юза сифатини таъминлаш учун деталларни эластик деформацияланиш ҳолатидаги очиб берилган қонуниятларга, технологик тизимни математик ифодалашга ва бошқарув тузилмасини куришга асосланган бикрлиги кам бўлган деталларга ишлов бериш жараёнини бошқариш усуллари яратишдан иборат. Ишда келтирилган IDEF0 услубияти технологик тизимни қабул қилинган мезонларга жавоб берадиган, адекват моделлар ва таҳлиллаш воситалари ёрдамида тадқиқ қилиш ва бошқариш ҳамда энергетик ҳолатини баҳолаш жараёнларини акс эттиради. Бундай ёндашув ички ва ташқи муҳитнинг ўзгариши шароитида деталларга механик ишлов беришнинг олдиндан талаб

этилган натижаларини олиш эҳтимоли юқорилигини кафолатловчи, мақсадга йўналтирилган ҳаракатлар имконини беради.

Натижаларнинг амалий аҳамияти шундан иборатки, ишлаб чиқилган ва амалга оширилган моделлаштириш усули, ҳисоблаш тажрибалари натижалари ва технологик тизимни оптимал бошқаришнинг дастурий воситаси, бикрлиги кам бўлган деталларга механик ишлов беришда лойиҳалаш бўйича аниқ амалий таклифлар қабул қилиш, ишлашини таҳлил қилиш, тузатиш ва параметрларни ва материал-энергия ресурсларини оптимал танлаш ҳамда технологик тизимни меъёрий ишлашнинг ишончлилигини оширишни таъминлаш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Ишлаб чиқилган бикрлиги кам бўлган деталларга (БКБД) механик ишлови беришнинг ТТни оптимал бошқариш, энергетик ҳолатини баҳолаш усуллари ва алгоритмлари асосида:

ишлаб чиқилган БКБДларга токарлик ишлови бериш ва силликлашнинг ТТни оптимал бошқаришнинг дастурий воситалари мажмуаси «Трактор» МКБ УКда деталларга ишлов беришнинг технологик жараёнларини автоматлаштирилган ҳисоблаш ва лойиҳалаш жараёнларига жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2018 йил 12 октябрдаги 33-8/7656-сон, Ўзбекистон Республикаси «Ўзагротехсаноатҳолдинг» АЖнинг 2019 йил 15 январдаги АР-19-02/88 - сон маълумотномалари). Натижада ажратгич валига механик ишлов беришни автоматлаштирилган лойиҳалаш жараёни вақтини 80% камайтирган. Дастурий мажмуа пахта териш машинаси ажратгичи валига ишлов беришда кучларни ҳисоблаш, ажратгич валига ишлов берувчи технологик тизимининг қурилган динамик модели асосида чўзилишдаги валнинг бикрлик ва ковушқоқлик коэффицентларини аниқлаш ҳамда валга ишлов бериш аниқлигининг талаб қилинадиган параметрларини аниқлаш учун ўқ бўйича чўзувчи кучлар ва эгилишлар қийматини ҳисоблашни амалга ошириш имконини бераган;

механик ишлови берувчи технологик тизимини шакллантириш ва оптимал бошқариш алгоритмлари, кучларини ва эгувчи моментларни ҳисоблаш усуллари «Технолог» АЖнинг корхоналарига жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2018 йил 12 октябрдаги 33-8/7656-сон, Ўзбекистон Республикаси «Ўзагротехсаноатҳолдинг» АЖнинг 2019 йил 15 январдаги АР-19-02/88 - сон маълумотномалари). Натижада ишлов бериладиган деталнинг ўлчамлари ва шакли аниқлигини 10-15 марта ошириш ва ишлов беришнинг техник-иктисодий кўрсаткичларини яхшилаш имконини берган;

пахта териш машинаси ажратгичи валини кесишда кесишнинг ташкил қилувчи кучларини, ўқ бўйича чўзувчи ва эгувчи кучлар қийматини ҳисоблаш ҳамда пахта териш машинаси ажратгичи валига механик ишлов берилганда технологик параметрларнинг оптимал қийматларини ҳисоблаш усуллари «БМКБ-Агромаш» АЖда жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2018 йил 12 октябр-

даги 33-8/7656-сон, Ўзбекистон Республикаси «Ўзагротехсаноатхолдинг» АЖнинг 2019 йил 15 январдаги АР-19-02/88-сон маълумотномалари). Натижада ишлов бериладиган деталларнинг оптимал функционал параметрларини аниқлаш таъминланган, олдиндан берилган шартлар бўйича тизим ҳаракатини бошқаришни шакллантириш ва деталларнинг ўлчамлари аниқлигини ва шакл сифати кўрсаткичларини 2-4 марта ошириш имконини берган. Эластик эгилишлар катталиги токарлик ишлови берилганда 1.5÷8.7 мкм ва силлиқлашда 0.2÷3.5 мкм камайтирилган;

ишлаб чиқилган пахта териш машинаси териш аппарати ажратгичи валига механик ишлов берувчи технологик тизимининг энергетик ҳолатини баҳолашнинг оптимал бошқариш усуллари ва алгоритмлари, кучларни ҳисоблаш, энергетик ҳолатини баҳолаш, ишлов бериладиган деталларнинг параметрларини оптимал қийматларини аниқлаш усуллари «КТЦСМ» МЧЖда пахта териш машинаси териш аппарати ажратгичи валини тайёрлашнинг технологик жараёнларининг параметрларини аниқлаш учун лойиҳалаш жараёнларига жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2018 йил 12 октябрдаги 33-8/7656-сон, Ўзбекистон Республикаси «Ўзагротехсаноатхолдинг» АЖнинг 2019 йил 15 январдаги АР-19-02/88-сон маълумотномалари). Таклиф қилинаётган технологик жараённи моделлаштириш усули берилган шарт бўйича ва деталларнинг шакли аниқлигининг юқори кўрсаткичларини олиш учун хизмат қилган, механик ишлов беришнинг берилган назарий аниқлигига икки параметр бўйича бошқариш йўли билан эришилган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур назарий ва амалий тадқиқот натижалари 5 халқаро ва 4 республика илмий-техник конференцияларида маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Тадқиқотнинг асосий натижалари бўйича 31 та илмий иш чоп этилган бўлиб, жумладан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этишга тавсия этилган илмий нашрларда 20 та мақола, 14 таси республика журналларида ва 6 таси хорижий журналларда нашр қилинган, ҳамда 2 та ЭХМ учун яратилган дастурий воситаларни қайд қилиш гувоҳномалари олинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўрт боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати, иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 198 саҳифани ташкил қилади.

## **ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ**

Киришда диссертация мавзуси Ўзбекистон Республикасининг фан ва технологияларни ривожлантиришнинг устивор йўналишлари талабларига мувофиқ долзарблиги асосланди. Мақсад ва вазифалар шакллантирилди, тадқиқот объекти ва предмети аниқланди, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён этилди. Олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланди, назарий ва амалий аҳамияти очиб берилди. Тадқиқот

натижаларини амалда қўлланганлик рўйхати, нашр этилган ишлар ҳақида маълумотлар ва диссертация ишининг тузилиши келтирилган.

Диссертациянинг биринчи “Бикрлиги кам бўлган деталларга механик ишлов бериш жараёнларини моделлаштириш ва бошқаришнинг замонавий усулларини тизимли таҳлил қилиш” бобида математик моделлар, усуллар, технологик тизимларни бошқариш алгоритмларини, механик ишлов бериш аниқлигига таъсир қилувчи омилларни бошқариш йўллари ва ёндашувларни яратиш соҳасидаги мавжуд назарий натижалар ҳолати таҳлил қилинди ва тавсифланди.

Талаб қилинадиган аниқлик ва юза сифатини таъминлайдиган бикрлиги кам бўлган деталларга механик ишлов берувчи технологик тизимларни (ТТ) бошқариш масаласини ҳал қилишнинг қийинлиги шундан иборатки, ишлов беришда деталнинг ўзи, асбоб ва станокнинг қисмлари нисбатан ҳаракатда бўлганлиги мураккаб динамик тизим сифатидаифодаланади, унинг ҳаракатини мақсадли ва назарий тадқиқотларсиз олдиндан аниқлаб бўлмайди. Шакл хатосининг асосий сабаби кесиш кучлари таъсири остидаги валларнинг эластик деформацияси ва вал узунлиги бўйлаб ўзгарувчан бикрлиги ҳисобланади, бу эластик деформация шароитида аниқликни таъминлаш қийинлиги билан ифодаланади. Масалани ҳал қилиш учун энг тўғри йўналиш бу бикрлиги кам бўлган (БКБД)ларга механик ишлов берувчи технологик тизимни эластик деформацияланиш ҳолатида ишлов бериладиган деталга технологик таъсир қилишга асосланган бошқариш ҳисобланади.

Деталларга механик ишлов берувчи ТТни бошқаришнинг технологик усулларини тадқиқ қилиш натижалари ва уларнинг бикрлиги кам бўлган деталларни эластик деформацияланган ҳолатини бошқариш усулларини алоҳидагуруҳга ажратилган таснифи келтирилган. Деталларнинг умумий тавсифи ҳамдаўқига симметрик бўлган БКБДларҳилидаги ишлов берувчи ТТнинг тавсифи ва абзалликлари берилган. Тадқиқот олиб бориш учун вал хилидаги деталь танланган. Валнинг муҳим тавсифи, унинг узунлигини диаметрга нисбати билан аниқланадиган бикрлиги ҳисобланади. Тадқиқот объектини моделлаштириш ва бошқаришда унга ўхшаш деталларни афзалликларини ҳисобга олиш керак бўлади. Юқори талаблар, геометрик шаклларнинг аниқлиги ва юзаларнинг ўзаро жойлашуви, узунлик ўлчамлари ва бикрлиги кам деталларнинггоза сифати параметрларига нисбатан қўйилади. Бундакесиш операцияларида тайёрлаш аниқлиги ғадир-будирлиги  $R_a=0.63-2.5$  мкм бўлганда 8-11 квалитетга тўғри келиши керак. Кейинги силлиқлаш операцияларининг бажарилиши ва умуман ишлов бериш натижалари кесиб ишлов бериш операциясининг аниқ бажарилишига боғлиқ бўлиб, баъзи ҳолларда кесиб ишлов бериш операциялари якуний ишлов бериш тури ҳисобланади.

Бикрлиги кам бўлган эластик деформацияланган деталларга механик ишлов берувчи тизимни моделлаштиришнинг аниқланган хусусиятлари шуни кўрсатдики, бошқариш объекти (БО) тўғрисида етарлича тўлиқ маълумот бўлмаса, ҳисобланган тавсифлари ҳақиқийлардан сезиларли фарқ қилиши мумкин. Бундан ташқари, таҳлил қилинган тизимлар параметрлар-

нинг катта ўзгарувчанлиги билан ажралиб туради. Бикрлиги кам бўлган ишлов берилувчи детални ичига олган ТТда параметрлар битта деталга ишлов бериш цикли давомида сезиларли даражада ўзгариши мумкин. Ушбу таърифлар бошқарув тузилмасини ишлаб чиқиш муаммосига алоҳида ёндашув зарурлигини кўрсатади. БО тузилиши ТТнинг кесиш ёки силликланган жараёнини амалга оширишда юзага келадиган, куч таъсиридан келиб чиққан эластик деформацияларни бошқариш элементларини ўз ичига олади.

БКБДларга ишлов бериш аниқлигини ошириш учун математик моделлар, усуллар, йўллар ва ёндашувларни яратиш соҳасида мавжуд назарий натижаларнинг ҳолати таҳлил қилинди ва тавсифланди. БКБДларга механик ишлов берувчи ТТни бошқаришнинг технологик усулларини тадқиқ қилиш натижалари ва уларнинг таснифи, унда эластик деформацияланган ҳолатни бошқариш усуллари алоҳида гуруҳга ажратилганлиги келтирилган.

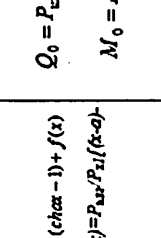
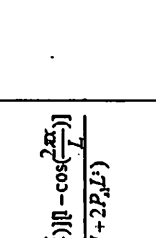
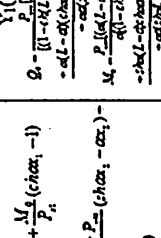
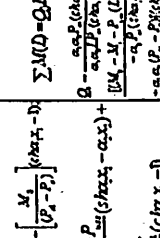
Назарий ва амалий ютуқларни танқидий таҳлил қилиш асосида фан соҳасида тадқиқотнинг мақсади ва вазифаларини шакллантириш амалга оширилди.

Диссертациянинг иккинчи «Бикрлиги кам бўлган эластик деформацияланган деталларга ишлов берувчи технологик тизимнинг тавсифларини тадқиқ қилиш» бобида эластик деформацияланган БКБДларга ишлов берувчи ТТнинг статик ва динамик тавсифларини ўрганиш натижалари баён қилинган. Барқарорлашган режимларда эластик деформацияланган БКБДларнинг математик моделларини куриш афзалликлари келтирилган.

БКБДларга ишлов берувчи ТТни бошқаришда уларнинг эластик деформацияланган ҳолатида ўзгаришига асосланган, алоҳида ёки комбинацияланган кучлар таъсири қўлланилади: марказий ва номарказий чўзилиш, номарказий сикилиш; кесиш жараёнида куч омилларини компенсациялашга йўналтирилган қўшимча кучлар таъсирини бошқариш; таянчлардаги эгувчи моментлар; деформацияланишдаги эгилиш-буралиш кучини бошқариш.

ТТнинг математик модели барқарорлашган режимда, кўрилатган кесимдаги деталнинг эластик деформацияланиши қийматида ташқи таъсирнинг таъсирини акслантирувчи функционал боғлиқлик кўринишида шакллантирилади. БКБДларнинг турли эластик-деформацияланган ҳолатларга эга бўлган ТТ учун функционал боғлиқлари олинган (1-расм).

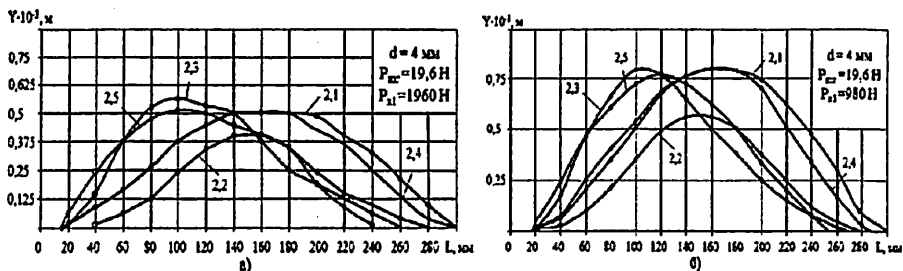
Деталларни маҳкамлаш, марказий чўзувчи кучлар ишлатилганда бўйлама силжиш имконияти билан амалга оширилиши мумкин (1-расм, 2.2 ва 2.3-чизмалар). Эластик эгилишни минималлаштириш мақсадида номарказий чўзишни ишлатиш орқали деталнинг маҳкамланган жойида бурилиш бурчагини бошқариш ҳам мумкин. Ушбу турдаги маҳкамлаш ҳаракатланувчи шарнирли таянч кўринишида ҳам бўлиши мумкин (1-расм, 2.4-чизма). Ушбу тархнинг асосий фарқи номарказий чўзиш ҳисобига детални маҳкамлаш нуктасида бошқарилувчи моментни қўзғатиш ҳисобланади.

№ пл	Мақсатлаш усули. Юклагырыш шарты. Деталдың эластик чыгыгының құрынышы	Чегаравий шартлар. Мувозанылык шарты. Деформацияны мос келуванчылык шарты	Эгилгышлар функциясы	Бошлангыч параметрлар $Q_0$ ва $M_0$
1	2	3	4	5
2.1	 <p><math>P_x = 0; M_1 = 0; \epsilon = 0; \beta = (L-a)/L; P_m = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}</math></p>	$X=0; Y(0)=0; Y'(0)=0; EI Y''(0) = M_0;$ $EI Y''(L) = Q_0; X=L; Y(L)=0;$ $\alpha = \sqrt{\frac{P_x}{EI}}$	$y(x) = \frac{Q_0}{P_x} (sh \alpha x - \alpha x) + \frac{M_0}{P_x} (ch \alpha x - 1) + f(x)$ $0 < x < a; f(x) = 0; 0 < x < L; f(x) = P_m/P_{x1} (x-a) sh \alpha(x-a)$	$Q_0 = P_{m0} \frac{(\beta \alpha L \cdot ch \alpha L - sh \beta \alpha L)}{(\alpha L ch \alpha L - sh \alpha L)}$ ; $M_0 = P_{m0} \frac{(\beta sh \alpha L - sh \alpha \beta L)}{(\alpha L ch \alpha L - sh \alpha L)}$
2.2	 <p><math>P_x = 0; \epsilon = 0</math></p>	$X=0; Y(0)=0; Y'(0)=0;$ $X=L; Y(L)=0; Y'(L)=0;$ $Y(L) = a_1 [1 + \cos(\alpha L)]$ $Dw/dx _L = 0$	$Y(x) = \frac{P_m L [1 - \cos(\frac{2\alpha x}{L})] - \cos(\frac{2\alpha x}{L})}{\pi (\delta \pi^2 \cdot EI + 2 P_x L^2)}$	
2.3	 <p><math>P_x = 0; \epsilon = 0</math></p>	$X_1=0; Y_1(0)=0; Y_1'(0)=0;$ $EI Y_1''(0) = M_0; EI Y_1''(L) = Q_0;$ $X_2=0; Y_2(0)=0; Y_2'(0) = Y_1'(a);$ $EI Y_2''(0) = EI Y_1''(a); EI Y_2''(L) = 0;$ $EI Y_2'''(a) = P_{x1};$ $\alpha = \sqrt{P_{x1} / EI}$	$0 < X_1 < a$ $Y_1(X_1) = \frac{Q_0}{\alpha^2 P_x} (sh \alpha x_1 - \alpha x_1) + \frac{M_0}{P_x} (ch \alpha x_1 - 1)$ $0 < X_2 < L$ $Y_2(X_2) = \frac{Q_0 ch \alpha a - M_0 \alpha ch \alpha a - P_x}{\alpha P_x} (sh \alpha x_2 - \alpha x_2) - \frac{Q_0 sh \alpha a - M_0 \alpha ch \alpha a}{\alpha P_x} (ch \alpha x_2 - 1)$	$Y_1(a) = -Y_2(a); Y_2'(L-a) = 0$ $Q_0 = \frac{P_x [(ch \alpha(L-a) - \alpha(L-a) sh \alpha(L-a)) - \alpha(L-a) (ch \alpha(L-a) - sh \alpha(L-a))]}{-\alpha P_x (ch \alpha(L-a) - sh \alpha(L-a))}$ $M_0 = \frac{P_x [(ch \alpha(L-a) - \alpha(L-a) sh \alpha(L-a)) - \alpha(L-a) (ch \alpha(L-a) - sh \alpha(L-a))]}{-\alpha P_x (ch \alpha(L-a) - sh \alpha(L-a))}$
2.4	 <p><math>M_1 = P_x; d/2; M_2 = P_{x1}; \epsilon</math></p>	$X_1=0; Y_1(0)=0; Y_1'(0)=0;$ $X_2=0; Y_2(0)=0; Y_2'(0) = Y_1'(a);$ $EI Y_1''(0) = M_0; EI Y_1''(L) = Q_0;$ $EI Y_2''(0) = EI Y_1''(a); P_{x1};$ $\alpha_1 = \sqrt{P_{x1} - P_x / EI}; \alpha_2 = \sqrt{P_{x1} / EI}$	$0 < X_1 < a$ $Y_1(X_1) = \left[ \frac{Q_0 \alpha_1}{(P_x - P_{x1})} sh \alpha_1 x_1 - \alpha_1 x_1 \right] + \left[ \frac{M_0}{(P_x - P_{x1})} (ch \alpha_1 x_1 - 1) \right]$ $0 < X_2 < L$ $Y_2(X_2) = \frac{Q_0 ch \alpha_2 a - M_0 \alpha_2 ch \alpha_2 a + P_x}{\alpha_2 P_x} (sh \alpha_2 x_2 - \alpha_2 x_2) + \frac{sh \alpha_2 (Q_0 \alpha_2) + M_0 \alpha_2 ch \alpha_2 a - M_0}{P_x} (ch \alpha_2 x_2 - 1)$	$Y_1(a) = -Y_2(a); Y_2'(L-a) = 0$ $\sum M(0) = Q_0 L + M_0 + P_x \cdot \frac{a}{2} + P_{x1} (L-a); P_{x1} \cdot L = 0$ $Q_0 = \frac{\alpha_1 P_x (ch \alpha_1 a - 1) - \alpha_1 P_x (L-a) - \alpha_1 (P_x - P_{x1})}{[\alpha_1 (L-a) - \alpha_1 (L-a) sh \alpha_1 (L-a)] - P_x \alpha_1 (L-a) - \alpha_1 (L-a)}$ $M_0 = \frac{P_x [(ch \alpha_1 (L-a) - \alpha_1 (L-a) sh \alpha_1 (L-a)) - \alpha_1 (L-a) (ch \alpha_1 (L-a) - sh \alpha_1 (L-a))] - P_x \alpha_1 (L-a) - \alpha_1 (L-a)}{[\alpha_1 (L-a) - \alpha_1 (L-a) sh \alpha_1 (L-a)] - P_x \alpha_1 (L-a) - \alpha_1 (L-a)}$

1-расм. Эластик деформацияланган холатини бошқарышда деталларни юклаш шартлары

Бунда битта бошқариладиган куч факторини қўллаш – номарказий чўзиш ишлов бериш зонасида, хусусан, ҳар қандай детални олдиндан берилган кесимида иккита куч омилини: кесиш кучига қарши турадиган, яъни детални эластик деформацияланиш ҳолатига йўналтирилган бўйлама  $P_{x1}$  куч ва  $M_2 = P_{x1} \cdot e$  эгувчи моментни яратишга имкон беради.

2-расмда ЭХМХ= $a$  ишлов бериш зонасидаги деталларнинг эластик дефекциялари қийматларининг сонли моделлаштиришдан олинган натижалари берилган, бундан ташқари аналитик боғлиқлик рақами жадвалдаги модель рақамига тўғри келади (1-расм). 2.5 боғлиқлик олдинги бабка патронига детални маҳкамланганда ва ўрнатиш жойида кесимни буралиши мумкин бўлмаган орқа бабкага цангалик сиқиш орқали экспериментал олинган (2.3 - модель). Бунда,  $d = 2 - 6$  мм ва  $L = 100 - 300$  мм, уларни чўзувчи куч 980-1960 Н бўлганда деталнинг бикрлигини ошиши эластик эгилиш 10-20%, мос равишда  $d = 8 - 12$  мм бўлганда эластик эгилиш 5-7% га камайишига,  $d > 16$  мм ортганда берилган узунликда статик бикрлик қийматига ва мос равишда детални эгилишига деярли амалда таъсир қилмайди.



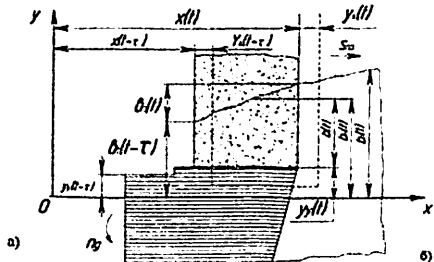
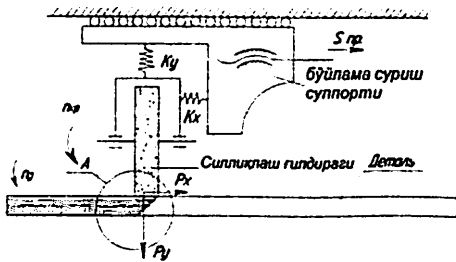
2-расм. Деталларнинг эластик эгилишларидаги ўзгаришларининг аналитик боғлиқликлари:

а –  $P_{x1}=1960$  Н; б –  $P_{x1}=980$  Н; 2.5 эгри чизик экспериментал олинган

Диссертациянинг иккинчи бобида келтирилган БКБДларга ишлов беришнинг математик модель (ММ) куришнинг умумий тамойилларини ҳисобга олган ҳолда, соддалаштирилган физик модель ва бўйлама суриш билан эластик деформацияланган бикрлиги кам валларни силликлашда қирқим кесими тарhini шакллантириш 3-а,б расмларда келтирилган. Жараён тарҳи, узунасига силликлашда радиал ва ўк бўйича ҳақиқий кесиш жараёни (қирқим кесимининг шакллантирилиши билан) ва жараёнга қўзғалтирувчи таъсир кўрсатишибилан тавсифланади.

Кўриб чиқилаётган ТТни кириш таъсирлари учун қуйидаги қийматлар олинади: марказий чўзишда чўзувчи куч  $P_{x1}$ ; номарказий чўзишда чўзувчи куч  $P_x$  ва эксцентриситет  $e$ ; детални ўрнатиш нуқталарига қўйилган  $M_1$  и  $M_2$  эгувчи моментлар. Қаралаётган ТТнинг чикувчи ўзгарувчилари учун кесиш кучини алоҳида ташкил қилувчилари  $P_x, P_y, P_z$  ва уларга мос келадиган ТТнинг  $u_x, u_y, u_z$  эластик деформацияси қабул қилинган.





3-расм. Силликлаб ишлов бериш жараёни тархи ва кесиладиган қатламнинг кесими: а – қиринди ҳосил бўлишининг соддалаштирилган модели; б –  $x$  ва  $y$  координаталари бўйича эластик деформацияни ҳисобга олган ҳолда қатламнинг кесими

Бикрлиги кам бўлган валларни тебранма думалок силликлашнинг умумлашган ММ учун тенгламалар тизими куйидаги кўринишда ёзилади:

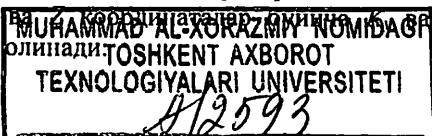
$$\left. \begin{aligned}
 P_{\xi}(s) &= m_{\xi} \cdot a(s) + n_{\xi} \cdot b(s), \\
 a(s) &= \frac{1}{s}(1 - e^{-st}) \cdot S_{np}(s) - (1 - e^{-st}) \cdot y_x(s), \\
 b(s) &= \frac{1}{st}(1 - e^{-st}) \cdot b_1(s) - y_y(s) - K_{b_2} \cdot y_z(s), \\
 y_y(s) &= K_{yy} \cdot P_y(s) + K_{xy} \cdot P_x(s) + K_{P_{x1}} \cdot P_{x1}(s) + K_c \cdot e(s) + K_{M_i} \cdot M_i(s), \\
 y_x(s) &= K_x \cdot P_x(s), \quad y_z(s) = K_z \cdot P_z(s), \\
 \xi &\in \{X, Y, Z\}.
 \end{aligned} \right\} (1)$$

бу ерда  $P_{\xi}(s)$  – кесиш кучининг ташкил қилувчиси;  $m_{\xi} = \left(\frac{dP_{\xi}}{da}\right)_0$ ;  $n_{\xi} = \left(\frac{dP_{\xi}}{db}\right)_0$  – кесиш қалинлиги  $a(t)$  ва кесиш чуқурлигининг  $b(t)$  мос равишда ортини бўйича кесиш кучларини ташкил қилувчилари учун узатиш коэффицентлари.

БО сифатида бикрлиги кам эластик деформацияланган валларни ташки думалоклаб ўйиб силликловчи ТТнинг математик модели, умумий ҳолда, кесиш жараёни ва ТТнинг эластик деформациясини ҳисобга олади.

Эластик деформацияланиш ҳолатини келтириб чиқарувчи, олдиндан санаб ўтилган объектга кирувчи таъсирлардан бири:  $P_{x1}, K_{P_{x1}}, K_c, e, M_i, K_{M_i}$  ва кўндаланг сижшишдаги суппортнинг  $S_{нопер}$  тезлиги,  $y_y$  координатаси бўйича эса чикувчи – ТТнинг эластик деформацияси.

Олдиндан қабул қилинган бошлангич коидаларга ва фаразларга қўшимча қилиш керак: силликлаш доимий кесиш тезлигида амалга оширилади, силликлаш гилдирагининг кесиш қобилияти ва ишлов бериладиган деталь материали хусусиятлари доимий бўлганда; силликлаш гилдирагининг кенглиги  $b = const$  ва силликлашда ишлов бериладиган деталлар ёки гилдирак кенлигига тенг. Бундан ташқари, фақат тизимнинг чизикли эластик деформацияси,  $Y$  ва  $K_z$  бикрликларнинг вариацияси ҳисобга



Эластик деформацияланган БКБДларни ўйиб силлиқлашда ТТнинг математик модели оператор кўринишида қуйидагича ифодаланиши мумкин:

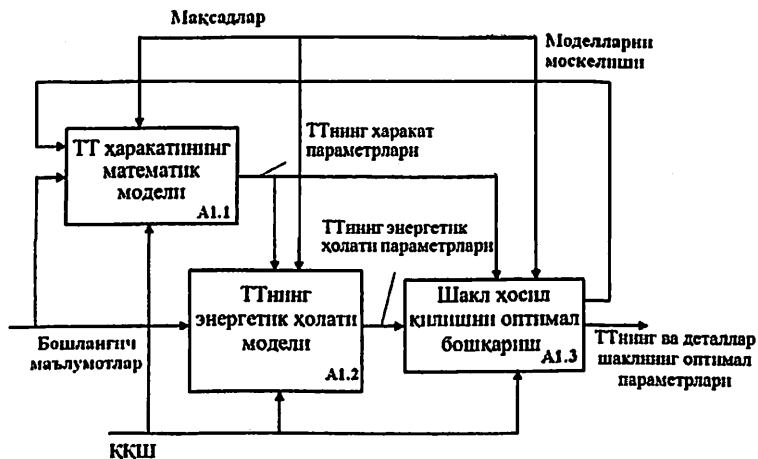
$$\left. \begin{aligned} P_{\xi}(s) &= m_{\xi} \cdot a(s), \\ y_y(s) &= K_{yy} \cdot P_y(s) + K_{P_{x1}} \cdot P_{x1}(s) + K_c \cdot e(s) + K_{M_i} \cdot M_i(s) + K_{b_z} \cdot y_z(s), \\ y_z(s) &= K_z \cdot P_z(s), \\ a(s) &= \frac{1}{s}(1 - e^{-st}) \cdot S_{nonep}(s) - (1 - e^{-st}) \cdot y_y(s). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

бу ерда  $\xi = \{y, z\}$ ,  $b = const$  – силлиқлаш кенглиги.

(2) да  $Z$  ўқи бўйича эластик деформациялар кесиш қалинлигини ўзгаришига олиб келади ва  $y_y$  ошиб боришини кўшимча ташкил қилувчилари кўринишида қаралиши мумкинлиги ҳисобга олинган. Кесиш чуқурлигининг  $b$ нинг ўсиши ва кесиш кучини ташкил қилувчи  $P_z$  орасида боғланишларни ўрнатувчи,  $K_{b_z}$  коэффиценти учун ифода  $K_{b_z} = \sin(y_{z0}/R) \approx y_{z0}/R$  кўринишда аниқланади.

Шундай қилиб, диссертациянинг иккинчи бобида эластик деформацияланган деталларнинг ММ ишлаб чиқилган. Токарлик ишлов берилиши жараёни ва шунингдек силлиқлаш жараёнлари учун хос бўлган БО параметрларини кенг миқёсда вариациялаш натижасида бўйлама-кўндаланг эгилишдаги параметрлар оптималлаштирилди. Барқарор ва ўтиш режимларда бошқариш сифатининг юқори кўрсаткичларига фақат оптимал бошқариш усулларидан фойдаланган ҳолда эришиш мумкинлиги аниқланди.

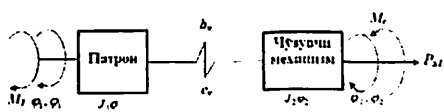
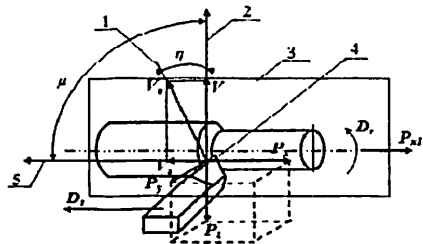
Диссертациянинг учинчи «Бикрлиги кам бўлган деталларга токарлик ишловини берувчи технологик тизимни моделлаштириш ва бошқаришнинг замонавий усулларини ишлаб чиқиш» боби токарлик ишловини берувчи ТТни моделлаштириш ва бошқаришнинг кўпбосқичли тузилмасини ишлаб чиқишга бағишланган. Оптимал бошқариш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш масалалари кўрилган.



4-расм. Деталларга ишлов берувчи ТТ учун IDEF0 жараёнлари диаграммаси

ТТни моделлаштириш ва бошқариш тузилмаси халқаро стандарт IDEF услубиятлари асосида ишлаб чиқилган. 4-расмда жараёнлар, операциялар ва амалдаги жараёнларни акс эттирувчи ўзаро таъсир кўрсатувчи ва ўзаро боғланган блоклар тўплами шаклида деталларга ишлов берувчи ТТнинг IDEF0 диаграммаси келтирилган. Ушбу диаграмма ТТнинг ишлашини тадқиқ қилиш стратегиясини акс эттиради.

Ишлаб чиқилган функционал модель, зарурий бошқарув манбалари мавжудлигида киришларни чиқишларга ўзгартирадиган диаграмма кўринишида моделлаштириладиган тизимни график кўринишида акс эттириш имконини беради. Ушбу диаграмма ТТнинг ишлашини моделлаштириш ва тадқиқ қилиш стратегиясини шажаравий тузилмасини акс эттиради.



5-расм. Валга токарлик ишлови берувчи ТТнинг кинематик схемаси

6-расм. ТТнинг динамик модели

5,6-расмларда келтирилган ТТни ҳисоблаш тархи ва динамик модели асосида иккинчи турдаги Лагранж тенгламасидан фойдаланиб, ТТхаракатининг дифференциал тенгламалар тизими тузилди:

$$\left. \begin{aligned} j_1 \ddot{\varphi}_1 &= M_1 - b_v(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) - c_v(\varphi_1 - \varphi_2) \\ j_2 \ddot{\varphi}_2 &= b_v(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + c_v(\varphi_1 - \varphi_2) - M_c \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

бу ерда  $j_1, j_2$  – ТТни айланувчи массаларининг инерция моментлари, Н·м·с<sup>2</sup>;  $\ddot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_2$  – ишлов бериш жараёнида ТТни айланувчи массаларнинг бурчак тезланиши, с<sup>-2</sup>;  $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2$  – ишлов бериш жараёнида ТТни айланувчи массаларининг бурчак тезлиги, с<sup>-1</sup>;  $\varphi_1, \varphi_2$  – ишлов бериш жараёнида ТТни айланувчи массаларининг бурчак силжиши, рад;  $b$  – ишлов бериладиган валнинг қовушқоқлик коэффициентини, Н·м·с/рад;  $c$  – ишлов бериладиган валнинг бикрлик коэффициентини, Н·м/рад;  $M_1, M_c$  – ТТнинг ҳаракатлантирувчи моменти ва қаршилик моменти, Н·м.

Кўрилатгани ТТни оптимал бошқариш учун зарурий шартларни тадқиқ қилиш учун Понтрягиннинг максимум принциpidан фойдаланамиз.

Вактнинг бошланғич моментида ТТқуйидаги

$$\varphi_i(0) = \varphi_0(0), \quad \dot{\varphi}_i(0) = \dot{\varphi}_0(0). \quad (4)$$

ҳолатда бўлсин.

Шундай  $u(t)$  бошқаришни топиш керакки, у ишлов берилётган вал ҳаракатини бошланғич ҳолатдан берилган ҳолатга олиб ўтсин:

$$\varphi_i(t) = \varphi_0(t), \quad \dot{\varphi}_i(t) = \dot{\varphi}_0(t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (i = \overline{1, n}). \quad (5)$$

Бунда ўтиш жараёни вақти қисқа бўлиши талаб қилинади. У ҳолда бошқаришдан мақсад функционални минимумга келтириш

$$J(\varphi_0, u(t), \varphi(t)) = \int_{t_0}^T f^0(\varphi(t), u(t), t) dt. \quad (6)$$

(4), (5) шартларда

$$\dot{\varphi}(t) = f(\varphi(t), u(t), t), \quad (7)$$

$$u \in U, \quad t_0 \leq t \leq T, \quad (8)$$

бу ерда  $f(\dots)$  – узлуксиз-дифференциалланувчи функция;  $u(t)$  –  $[t_0, T]$  ораликдаги қисмли узлуксиз функция.

Максимум принципини ТТ учун шакллантиришга Гамильтон-Понтрягин функциясини киритамиз:

$$H = (\varphi, u, t, \psi_1, \psi_0) = -f^0(\varphi, u, t) + \langle \psi, u \rangle \quad (9)$$

ва бошқарувга  $|u| \leq 1$  чегара қўйиб қўшма тизимни

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_1}{dt} = -\frac{\partial H_1}{\partial y_1} = -j_1^{-1} c_v \psi_2, & \quad \frac{d\psi_2}{dt} = -\frac{\partial H_1}{\partial y_2} = -\psi_1 + j_1^{-1} b_v \psi_2 \\ \frac{d\psi_1}{dt} = -\frac{\partial H_2}{\partial y_3} = -j_2^{-1} c_v \psi_2, & \quad \frac{d\psi_2}{dt} = -\frac{\partial H_2}{\partial y_4} = -\psi_1 + j_2^{-1} b_v \psi_2 \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

киритамиз.

Қаралаётган масалани ечиш учун куйидаги зарурий шарт бажарилиши керак

$$H(\varphi_i(t), u(t), t, \psi_1, \psi_0) = \max_{u \in U} H(\varphi_i(t), u, t, \psi_1(t), \psi_0). \quad (11)$$

Оптимал бошқаришни аниқлашга ўтишдан олдин функцияни шакллантирамиз:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 = y_1, \quad \dot{\varphi}_1 = y_2, \quad \dot{y}_2 = u_1 - \frac{1}{j_1} [b_v(y_2 - y_4) + c_v(y_1 - y_3)] \\ \varphi_2 = y_3, \quad \dot{\varphi}_2 = y_4, \quad \dot{y}_4 = \frac{1}{j_2} [b_v(y_2 - y_4) + c_v(y_1 - y_3)] - u_2 \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

ва  $u_1 = \frac{1}{j_1} M_1$  ишлов бериладиган вал ҳаракатининг ва  $u_2 = \frac{1}{j_2} M_2$ ,

$u_2 = u_c + u_0 \sin \omega t$  ( $u_0$  – ўртача қийматга нисбатан унинг тебраниш амплитудаси) бошқаришни характерловчи, асбобни қўллаш нуқтасидаги кучни характерловчи математик моделини оламиз.

Агар  $f^0 \equiv 1$  бўлса унда  $J(\varphi_0, u(t), \varphi(t)) = T - t_0$  – бу ҳолда (4)-(8) масалани тез ҳаракат масаласи дейилади.

Қаралаётган объект стационар тизим ҳисобланади ва (6) масала шуни кўрсатадики,  $f$  ва  $U$  вақтга боғлиқ эмас, яъни

$$f(t, y, u) = f(y, u), \quad U(t) = U. \quad (13)$$

Агар стационар масала (6), (13) оптимал бошқариш  $u(t)$  ва оптимал траектория  $\varphi_0(t)$  га эга бўлса, у ҳолда (11) шартни қониқтирувчи, тривиал

бўлмаган кўшма ўзгарувчилар  $(\psi_1(t), \psi_2(t))$ ,  $\psi(t) \in R^n$  вектори мавжудки, (9) максимум шарты бажарилади:

$$\psi_0(t) = \text{const} \leq 0. \quad (14)$$

Худди шундай (11) кўшма тизим  $\psi$ , га нисбатан бир жинсли ҳисобланади, (14) тенгламадаги ўзгармасни ихтиёрий танлаш мумкин, шундай қилиб

$$\psi_0(t) = -1 \quad 0 \leq t \leq T. \quad (15)$$

$\psi_2 \neq 0$  да  $\max_{|u|=1} H$  шартидан  $u = \text{sign} \psi_2$  келиб чиқади, агар  $\psi_2 \neq 0$  бўлса, унда максимум принципнинг чегаравий масаласи қуйидаги кўринишда ёзилади:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varphi}_1 = y_1, \quad \dot{\varphi}_1 = y_2, \quad \dot{y}_2 = \text{sign} \psi_2 - j_1^{-1} [b_v(y_2 - y_4) + c_v(y_1 - y_3)] \\ \dot{\varphi}_2 = y_3, \quad \dot{\varphi}_2 = y_4, \quad \dot{y}_4 = j_2^{-1} [b_v(y_2 - y_4) + c_v(y_1 - y_3)] - \text{sign} \psi_2 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Бу ҳолда максимум принципнинг чегаравий масаласи (16), (11) дан келиб чиқадиган чегаравий шартлари (4) ва (5) ва шарт (15) дан иборат бўлади.

Гамильтон-Понтрягин функциясини тузамиз:

$$\left. \begin{aligned} H_1 = \psi_0 + \psi_1 y_2 + \psi_2 \dot{y}_2 \\ H_2 = \psi_0 + \psi_1 y_4 + \psi_2 \dot{y}_4 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Бундан келиб чиқадики, (11) шарт  $u = \text{sign} \psi_2$ ,  $\psi_2 \neq 0$  функцияни ажратади.

Чегаравий масала (16) бу ҳолда у қуйидагидан иборат

$$H_i = -f^0 u + \psi_2(t) u_{\delta}. \quad (18)$$

У ҳолда

$$u_k = \text{sign} \psi_2(t) = \begin{cases} 1, & \psi_2(t) > 1 \\ -1, & \psi_2(t) < -1 \end{cases}, \quad k=2,4,\dots,2n, \quad (19)$$

ўришли, яъни бошқариш  $u_k(t)$  битта нуктада алмашлаб улаш имкониятига эга.

(3), (10), (16) тизимлар Рунге-Кутта сошли усулини қўллаб счилган. (11) функциянинг максимумини таъминлайдиган  $u_k(t)$  бошқаруви (19) соҳада аниқланди. (10) тизимни ечиш натижалари шуни кўрсатдики, инерция моментлари ва эластик диссипатив кучларнинг ўзгариши ўзгарувчиларнинг  $\psi_1, \dot{\psi}_1, \psi_2, \dot{\psi}_2$  функциясини, яъни ишлов берилётган вал ҳаракатини кескин ўзгартиради. Шунинг учун, ишлов бериладиган валларнинг ўлчамлари ва шакли аниқлигини ошириш учун ТТнинг нормал ишлашини таъминлайдиган кўшма тизим ўзгарувчиларини аниқлаш керак:

(3) тизимни сошли ечиш орқали ТТ функционал, конструктив ва геометрик параметрларининг оптимал қийматлари ўрнатилди; диссертациянинг 3.4 бўлимида БКБДларни эгилиши ва токарлик ишлови бериш аниқлигини ҳисоблаш амалга оширилди.

Деталларга шакл бериш жараёнини амалга ошириш учун ТТнинг энергетик ҳолатини баҳолаш асосий масалалардан бири ҳисобланади.

Тизимнинг энергетик ҳолатидаги ўзгаришларни баҳолаш учун биз қувватни тўғрилаш шартини ёзамиз:

$$|P_s - P_p| \leq \varepsilon. \quad (20)$$

Гамильтон функциясининг тўлиқ дифференциали ёрдамида ТТнинг энергетик ҳолати тенгламаларини қуйидаги кўринишда тузишга ўтамиз:

$$P_\varepsilon = \sum_{i=1}^n \left[ \left( -\frac{\partial H}{\partial \varphi_i} + Q_i \right) - \left( -\frac{\partial H}{\partial \varphi_i} + Q_p \right) \right] \dot{\varphi}_i = \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_p) \dot{\varphi}_i. \quad \times \quad (21)$$

Бу ерда энергетик ҳолатни тузатиш қуйидаги шартлар билан аниқланади:

$$|Q_i - Q_p| = \begin{cases} = 0, & \text{агарда тегишли ҳаракат параметрлари тенг бўлса;} \\ \neq 0, & \text{агарда параметрлар тенг бўлмаса.} \end{cases} \quad (22)$$

(21)га бурчак тезликлари  $\dot{\varphi}_i$  ва ҳаракатлантирувчи куч ва қаршилиқ моментлари  $Q_i = M_i = j_i \ddot{\varphi}_i$  қийматларини қўйиб, (20), (22) шартларга жавоб берадиган, бикрлиги кам бўлган деталларга ишлов берувчи ТТнинг энергетик ҳолатини аниқлаймиз.

Ўтказилган ҳисоблашлар натижасида валга токарлик ишловини бериш жараёнида ТТнинг сонли қийматлари ва график боғланишлари олинди. Олинган ҳаракат параметрлари ва энергетик ҳолатининг тенгламалари асосида қувватни тақсимлашни баҳолаш ҳисоблари олиб борилди, ишлов бериладиган валнинг бикрлик ва қовушқоқлик коэффициентларининг оптимал қийматлари, шунингдек технологик тизимнинг айланувчи массаларининг инерцияси моментлари аниқланади.

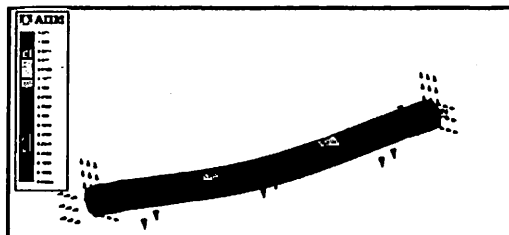
БКБДни кесиш орқали механик ишлов берувчи ТТнинг турғунлигини аниқлашда математик аппаратдан фойдаланиш зарурати асосланади. Тузилган математик модель асосида, тизимнинг турғунлиги учун зарур ва етарли шартларни ўз ичига олган Раус-Гурвиц мезонидан фойдаланиб, деталларни йўнибмеханик ишлов бериш жараёнининг турғунлиги тадқиқ қилинди.

Ишлаб чиқилган ТТ ҳаракатининг математик моделлари, оптимал бошқариш алгоритмлари ва ҳисоблаш экспериментларининг дастурий воситаларини амалга ошириш учун бикрлиги кам бўлган деталларга йўниб ишлов берувчи технологик тизимни оптимал бошқаришнинг дастурий воситалари мажмуаси ишлаб чиқилган.

Тўртинчи «Бикрлиги кам бўлган деталларни силлиқлаш жараёнида технологик тизимни бошқариш усуллари ва алгоритмлари» бобида бикрлиги кам бўлган деталларни силлиқлаш ТТнинг ишлашини ва энергетик ҳолатини бошқаришнинг усуллари ва алгоритмларини яратиш натижалари баён қилинган. Embarcadero Delphi XE3 муҳитида пахта териш машинаси ажратгичи валини силлиқлашда технологик параметрларнинг оптимал қийматларини ҳисоблашнинг дастурий воситаларни ишлаб чиқиш натижалари келтирилган.

КОМПАС-3D v17.1 дастурий маҳсулотига, илова қилиш орқали АРМ FEM (finite element method - чекли элементлар усули) ҳисоблаш учун деталларнинг чекли элемент модели (ЧЭМ) ва уни силлиқлаш ишловини бериш жараёни шакллантирилди.

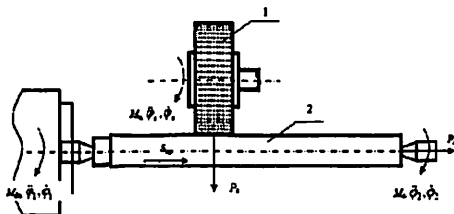
Жараён давомида кучланиш ва деформациянинг ўзгариши аниқ кўрсатилган (7-расм). Чуқурроқ нуқта, «МАХ» билан белгиланган, бу ерда силлиқлаш дастгоҳи чамбараги моделлаштириш вақтида ишлов бериладиган деталь билан ўзаро таъсирда бўлади ва эластик ва пластик деформацияни ўз ичига олади, шу билан бирга «MIN» деб қараладиган ноинтеграл қисм фақат пластик деформацияни ўз ичига олади.



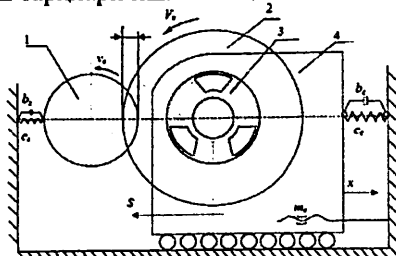
7-расм. Белгиланган нуқталарда асбобнинг жойлашиши учун «вал» деталларини моделлаштиришда сиртдаги кучланиш тарқалиши

Қия эгилишда балканинг мустаҳкамлик ва қаттиқликка, буралишга, чўзилишга ҳисоблаш бўйича формулаларидан фойдаланиб модель адекватликка текширилди. Олинган натижаларга асосида, асбобнинг турли ҳолатлари ва берилган кучларнинг вариантлари учун ҳисоблаш хатоси 3-5% дан ошмаслиги аниқланди. Бундай ҳолда, максимал деформация деталнинг ўртаси зонасида кузатилади, нуқта «МАХ» кўрсаткичи билан аниқланади. Натижада, максимал деформация куч қўйилган нуқтадан ташқарида юзалар бўйича тақсимланиши аниқланди.

ТТнинг математик тавсифини ишлаб чиқиш мақсадида 8 ва 9-расмларда келтирилган ТТнинг ҳисоблаш ва тузилиш тархлари ишлаб чиқилган.



8-расм. Ташқи юмалок силлиқлашнинг кинематик тархи



9-расм. Уч массали модел шаклидаги думалоқ силлиқлаш дастгоҳи тархи

Ҳисоблаш тарҳи асосида бикрлиги кам бўлган деталларни силлиқлаш жараёнининг аниқлигини бошқариш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш учун (8-расм) иккинчи турдаги Лагранж тенгламасидан фойдаланган ҳолда БКБДни силлиқлаш жараёнининг ТТни математик модели тузилган:

$$\left. \begin{aligned} j_1 \ddot{\varphi}_1 &= M_0 - b_v(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) - c_v(\varphi_1 - \varphi_2) \\ j_2 \ddot{\varphi}_2 &= b_v(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + c_v(\varphi_1 - \varphi_2) - M_c \\ j_3 \ddot{\varphi}_3 &= M_x - M_v \end{aligned} \right\}, \quad (23)$$

бу ерда  $j_1, j_2$  – ТТни айланувчи массаларининг инерция моментлари, Н·м·с<sup>2</sup>;  $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \dot{\varphi}_3$  – ишлов бериш жараёнида ТТни айланувчи массаларнинг бурчак тезланиши, с<sup>2</sup>;  $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \dot{\varphi}_3$  – ишлов бериш жараёнида ТТни айланувчи массаларнинг бурчак тезлиги, с<sup>-1</sup>;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  – ишлов бериш жараёнида ТТни айланувчи массаларининг бурчак силжиши, рад;  $b_c$  – ишлов бериладиган валнинг ковушқоқлик коэффиценти, Н·м·с/рад;  $c_c$  – ишлов бериладиган валнинг бикрлик коэффиценти, Н·м/рад;  $M_d, M_k$  – ишлов бериладиган валнинг ва силлиқлаш чамбарагининг ҳаракатлантурувчи моментлари, Н·м;  $M_c$  – валга ишлов бериш жараёнидаги қаршилиқ momenti, Н·м;  $M_v = j_2 \ddot{\varphi}_2$ , Н·м;  $r_v$  – ишлов бериладиган валнинг радиуси, м.

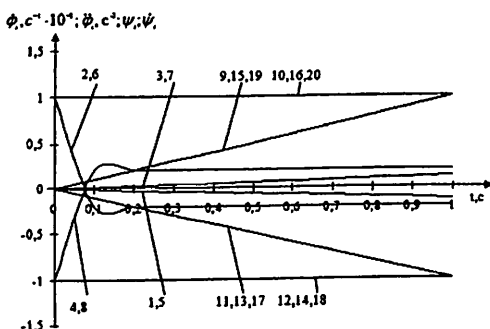
Дастгоҳнинг эластик тизимини ҳисобга олган ҳолда (9-расм), бикрлиги кам бўлган деталарни силлиқлаш жараёнининг ТТнинг математик модели куйидаги кўринишни олади:

$$\left. \begin{aligned} j_1 \ddot{\varphi}_1 &= M_d - b_v(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) - c_v(\varphi_1 - \varphi_2) \\ j_2 \ddot{\varphi}_2 &= b_v(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + c_v(\varphi_1 - \varphi_2) - k_{rc} \cdot j_3 \ddot{\varphi}_2 \\ j_3 \ddot{\varphi}_3 &= M_k - j_2 \dot{\varphi}_2 \sin \omega t \\ P_x &= k_{rx} \cdot \left( b_c \cdot \dot{x}_c + c_c(\Delta x_c - x_c) - \frac{j_2 \ddot{\varphi}_2}{r_v} \cos \dot{x}_c t \right) \end{aligned} \right\}, \quad (24)$$

бу ерда  $P_x$  –  $X$  ўқи бўйича кесиш кучи;  $x_c$  ва  $\dot{x}_c$  – станинанинг чизиқли силжиши ва тезлиги, м ва м/с;  $k_{rc}$  – сирпанишдаги ишқаланиш коэффиценти,  $k_{rx}$  – юмалаб ишқаланиш коэффиценти.

Токарлик ишлов берувчи ТТ учун қўлланиладиган усул каби бикрлиги кам бўлган валларга силлиқлаш ишловини берувчи ТТнинг моделлаштириш усули таклиф этилади.

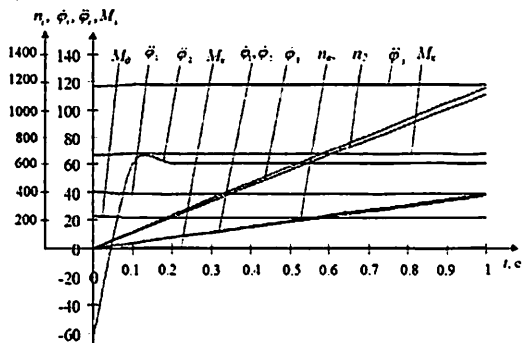
Понтрягиннинг максимум принципнинг чегаравий масаласини ечишда ишлов бериладиган вал учун ўтиш жараёни олинди (10-расм). Натижада, ишлов бериш жараёнида валнинг бир текис ҳаракатланишини таъминлайдиган конструктив-технологик параметрларнинг оптимал қийматлари олинди.



10-расм. ТТни ўтиш жараёнидаги ҳаракат параметрларининг ўзгариш графикалари



Чўзиш ҳисобига бикрликни ошириш ишлов бериладиган валнинг деформациясининг пасайишига ва ўтиш жараёнининг қисқаришига олиб келади. (23) тизимни сонли ечиш натижалари БКБДларга ишлов бериш параметрларининг оптимал қийматларини ва силлиқлашнинг ТТни ишлашининг график боғланишларини аниқлашга имкон беради (11-расм).



11-расм. Вални силлиқлаш жараёнида ТТ параметрларининг ўзгариши характери

Бошқариш усулини баҳолаш ва бўйлама-кўндаланг эгилишдаги деталнинг ҳаракати қонуниятларини ўрниатиш учун ҳисоблаш тарҳи асосида коэффициентлари доимий бўлган тўртинчи тартибли дифференциал тенглама шаклидаги БКБДнинг эластик чизиқли тенгламаси счилди:

$$y_i^4 - k^2 y_i'' = 0. \quad (25)$$

Чўзиладиган ва ихтиёрий кўндаланг юкланишни кўтарадиган деталлар учун ушбу тенгламанинг ечими эластик чизиқнинг умумий тенгламасини беради

$$y = y_0 + y_0' kx + y_0''(1 - \cos kx) + y_0'''(kx - \sin kx) + f(x).$$

Бу ерда  $y_0 = -\frac{P_v \cdot l}{48EI}$ ,  $y_0'$ ,  $y_0''$ ,  $y_0'''$  – мос равишда эгилиш, координата бошидаги иккинчи ва учинчи тартибдаги ҳосиласи;  $k = 3 \dots 102$  - ишлов бериладиган детални маҳкамлаш усулини аниқловчи коэффициент;  $f(x)$  – кўндаланг юкланишнинг таъсир функцияси.

I ва II участкаларда эластик чизиқ тенгламаси (диссертацияни 4-бобининг 4.10-расм) кўринишига эга:

$$\left. \begin{aligned} y_I &= y_0' kx + y_0''(1 - \cos kx) + y_0'''(kx - \sin kx) \\ y_{II} &= y_0' kx + y_0''(1 - \cos kx) + y_0'''(kx - \sin kx) + f(x) \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Бошланғич параметрлар аниқланди:

$$y_0' = -\frac{P_v}{kP_{II}} \left\{ \frac{[kl(\alpha - 1 + \cos \alpha kl) - \sin kl](1 - \cos kl)}{kl \cdot \cos kl - \sin kl} - (1 - \cos \alpha kl) \right\} + \frac{M}{P_{II}} \left[ \frac{(kl \sin kl + \cos kl - 1)(1 - \cos kl)}{kl \cos kl - \sin kl} + \sin kl \right],$$

$$y_0'' = \frac{P_v}{kP_{II}} \left[ \frac{kl(\alpha - 1 + \cos \alpha kl) - \sin \alpha kl}{kl \cdot \cos kl - \sin kl} \right] - \frac{M}{P_{II}} \left[ \frac{kl \sin kl + \cos kl - 1}{kl \cos kl - \sin kl} \right],$$

бу ерда  $\alpha = \frac{l-a}{l}$ ;  $a$  – кўндаланг юкланишнинг кўйилиши координатаси.

Координата бошида таянчга чўзувчи куч қўйилганини ҳисобга олсак, бошланғич  $y_0''$  параметрни аниқлаш зарур бўлади. (26) дифференциаллаб, топамиз:

$$y_{II}'' = -y_0'' k^2 \cos kx - y_0'' k^2 \sin kx. \quad (27)$$

(27) эгувчи ва чўзувчи бикрликка кўпайтирганимиздан сўнг, I участкадаги эгувчи момент тенгламасини

$$EJ_x = \frac{M_{ин}}{y_2''}; \quad EF = \frac{M_{ин} \cos \alpha}{y_2''};$$

ҳисобга олган ҳолда қуйидагиларни оламиз:

$$EI \cdot y_2'' = M_{ин}(x); \quad EF \cdot y_2'' = M_{ин}(x) \cdot \cos \alpha. \quad (28)$$

Агар  $x=0$ ,  $M_I(0)=M$  бўлишини ҳисобга олсак, унда қуйидагилар келиб чиқади:

$$y_0'' = -\frac{P_y \cdot y_2}{EI} + \frac{P_{x1} \cdot e}{EF}, \quad y_2 = r_a \cdot \varphi_k.$$

Кўндаланг юкланишнинг таъсир функцияси

$$f(x) = -\frac{P_y(x-a)}{P_{x1}} + \frac{P_y}{kP_{x1}} \sin k(x-a)$$

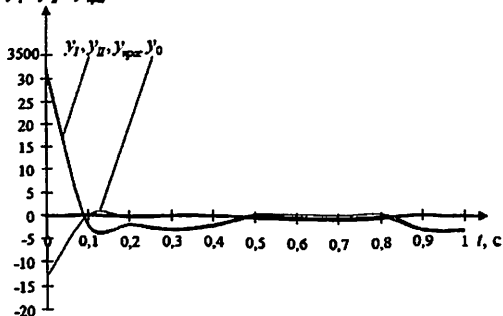
Участкалар бўйича эгилишларнинг тенгламалари тугалланган кўри-нишда бўлади:

$$\left. \begin{aligned} y_I(x) &= -\frac{P_y}{P_{x1}} [A(1 - \cos kl) - (1 - \cos \alpha kl)]x + \frac{M}{P_{x1}} [B(1 - \cos kl) - \sin kl]kx - \\ &\quad - \frac{M}{P_{x1}} (1 - \cos kx) + \left( \frac{P_y \cdot A}{P_{x1}} - \frac{M \cdot B}{P_{x1}} \right) (kx - \sin kx) \\ y_{II}(x) &= y_I(x) - \frac{P_y}{P_{x1}} (x-a) + \frac{P_y}{k \cdot P_{x1}} \sin k(x-a) \end{aligned} \right\}$$

бу ерда  $A = \frac{kl(\alpha - 1 + \cos \alpha kl) - \sin \alpha kl}{kl \cos kl - \sin kl}$ ,  $B = \frac{kl \sin kl + \cos kl - 1}{kl \cos kl - \sin kl}$ .

(23) тизимнинг сонли ечимлари натижалари ва ҳисоблаш тарҳи асосида, 12-расмда кўрсатилган ажратғич валининг эгилиши ва ишлов бериш аниқлигининг ҳисоблари келтирилган.

$y_0, y_I, y_{II}, y_{ин}, \text{ЛКС}$



12-расм. Силлиқлашнинг ТТ аниқлигини ўзгаришининг характери

Тез ҳаракат бўйича бошқариш жараёнида ишлов берувчи ТТни оптимал ҳаракати параметрларининг қийматлари аниқланади. Олинган натижалар энергетик ҳолатини ва ижрочи орган ва силликлаш жараёнида кесувчи куч ўртасидаги мувозанатни ўрнатишга имкон берди, бу эса материал ва энергия ресурслари сарфини сезиларли даражада камайтириш имконини беради. Ишлаб чиқилган дастурий мажмуа БКБДларни силлиқловчи ТТнинг ишлаши учун зарурий оптимал параметрлар билан таъминлайди.

## ХУЛОСА

Диссертация иши доирасида олинган асосий илмий ҳолатлар ва натижалар қуйнда келтирилади:

1. БКБДларга механик ишлов бериш технологик тизимларини бошқариш усулларини тизимли таҳлил қилиш натижасида ҳисобга олиниши лозим бўлган омиллар деталларнинг ва металлга ишлов бериш ускуналарининг нисбатан кам бикрлиги, шунингдек, БКБДларни эркин эластик деформациялари, шаклдан оғиш ва ишлов бериладиган юзалар сифатининг ёмонлашишига олиб келиши аниқланди.

2. Ишлов бериш аниқлигига омилларнинг таъсири технологик тизимларнинг динамик тавсифларини инobatта олган ҳолда ишлов бериш жараёнининг аниқлиги ва математик тавсифини ҳисоблаш усулларини ишлаб чиқиш, деталларни эластик деформацияланган ҳолатида ишлов бериш хатоларини шакллантирувчи механизмни ўрганишни талаб қилиниши аниқланди. Бикрлиги кам бўлган деталларга механик ишлов берувчи ТТ бошқариш усулларини таснифлаш деталларни эластик деформацияланган ҳолатини ва технологик тизимга ҳар томонлама таъсир қилиш усулларини яратишга асосланган бўлиши кераклиги кўрсатилди.

3. Ишлаб чиқилган математик моделларни таҳлил қилиш ва деталларни эластик эгилиши ўзгаришининг аналитик қурилган боғлиқликларида, марказий ва номарказий чўзувчи кучлардан ҳамда бўйлама-кўндаланг эгилишдан фойдаланган ҳолда эластик деформацияланиш шароитида деталларга ишлов берувчи ТТни бошқаришни таҳлил қилиш натижасида, назарий жиҳатдан ишлов бериш аниқлигига икки параметр бўйича бошқарилганда эришиш мумкин, бунда эластик эгилишнинг қиймати камайтирилиши мумкин ва у  $(3-4,5) \cdot 10^{-2}$  мм ташкил қилади ва амалда узунлиги бўйича барқарорлаштирилди.

4. Бикрлиги кам бўлган деталларга шакл беришда ТТнинг ишлашини тадқиқ қилиш ва бошқариш жараёнида ишлов бериладиган валнинг текис ҳаракати кесиш кучлари моментларининг катталигига боғлиқ эканлиги аниқланди. Кесиш кучларининг моментларини ўзгариши, ишлов бериладиган валнинг берилган бурчак тезлигидан ва ўтиш жараёни вақтидан оғишга олиб келади. Бу шуни англатадики, ишлов бериладиган валнинг берилган параметрлари учун кесиш кучлари моментларининг оширилиши кутилаётган ишлов бериш аниқлигига кескин таъсир қилади. Шунинг учун айланадиган массаларнинг инерция моментлари, ишлов бериладиган валнинг бикрлик ва

ковушқоқлик коэффициентларининг берилган қийматлари учун мос келадиган ҳаракатлантириш ва кесиш кучлари моментлари аниқланди.

5. IDEF0 методологияси асосида ишлаб чиқарилган технологик тизим моделларининг иерархик тузилишини акс эттирувчи декомпозиция, БКБДларга ишлов бериш жараёнининг параметрлари ва тавсифларини тадқиқ қилишга, энергетик ҳолатини баҳолашга ва бикрлиги кам бўлган деталларга механик ишлов берувчи ТТнинг оптимал бошқариш алгоритмларини ишлаб чиқишга имкон берди.

6. Териш аппарати ажратгичи валига ишлов бериш аниқлигини бошқаришда, ишлаб чиқилган математик моделлар ва ўрнатилган қонуниятлар асосида, бўйлама-кўндаланг эгилишда параметрларни оптималлаштириш, ишлов бериш жараёнида тортувчи куч, участкалар бўйича эгувчи моментлар ва эгилишларнинг қийматларини аниқлаш имконини берди.

7. Ишлаб чиқилган БКБДларга ишлов берувчи ТТнинг бошқариш усули бўйлама куч билан номарказий чўзиш ва эгувчи моментларни татбиқ қилиш ҳисобига ишлов бериш аниқлигини аввалги ишланмаларга солиштирганда бир поғона оширилишини таъминлайди. ММ сонли ечиш натижасида ўтиш жараёнининг оптимал қийматлари, ҳамда ишлов бериладиган вал ва ТТнинг функционал, конструктив ва геометрик параметрлари аниқланади.

8. Силлиқлаш жараёнида деталнинг қурилган 3D модели, моделлаштириладиган тизимни график кўринишда акслантириш, модель геометриясини яратиш масаласини ечади; физик ва механик хусусиятларини, чегара шароитларини аниқлаш имконини беради. Асбобнинг турли ҳолатлари ва кучнинг кўйилиши, валнинг ҳисоблашвариантлари, деформациянинг максимал қийматлари радиал йўналишда, сўнгра тангенциал ва энг кичиклари – ўк йўналишда кузатилади, бунда энг катта қийматлари эса деталнинг ўртасига тўғри келишини кўрсатмоқда.

9. Понтрягин максимум принципи асосида механик ишлов беришнинг технологик тизимларини моделлаштириш ва бошқариш усуллари ишлаб чиқилди. Ишлаб чиқилган оптимал бошқариш усулларидан фойдаланиш ишлов бериладиган деталларнинг оптимал функционал параметрларини аниқлашни таъминлайди, ишлов бериладиган маҳсулотларнинг ўлчамлари ва шакли аниқлигини 2-4 барабар оширишга, токарлик операциялари учун эластик эгилиш қийматининг  $1.5 \div 8.7$  мкм гача ва силлиқлашда  $0.2 \div 3.5$  мкм гача пасайтириш, ишлов беришнинг техник-иқтисодий кўрсаткичларини яхшилаш ва ТТнинг нормал ишлаши ишончлилигини ошириш имконини берди.

10. Бикрлиги кам бўлган деталларга механик ишлов берувчи ТТни оптимал бошқариш дастурий мажмуаси ўз ичига: кучни ташкил қилувчиларини ҳисоблаш, ишлов беришнинг оптимал параметрларини аниқлаш, ёрдамчи параметрларни ҳисоблаш, валга аниқ ишлов беришнинг талаб қилинадиган параметрларини аниқлаш учун ўк чизиғи бўйича чўзувчи кучларнинг қийматларини ҳисоблаш, бошқариш алгоритмлари ечимини ва механик ишлов беришни лойиҳалаш жараёнларини 80% автоматлаштириш имконини беради. Дастурлар мажмуасидан механик ишлов берувчи ТТни лойиҳалаш самарадорлигини таъминлаш учун фойдаланиш мумкин.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017.Т.07.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ  
УНИВЕРСИТЕТЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

---

**БАСАНО-ИННОВАЦИОННЫЙ ЦЕНТР ИНФОРМАЦИОННО-  
КОМУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ  
УНИВЕРСИТЕТЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**СУЛЮКОВА ЛАРИСА ФАРИТОВНА**

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ  
СИСТЕМАМИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАЛОЙ ЖЕСТКОСТИ**

05.01.02 – Системный анализ, управление и обработка информации

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

**Ташкент - 2019**

Тема докторской диссертации по техническим наукам (DSc) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за В2017.1.DSc/T26.

Диссертация выполнена в Научно-инновационном центре информационно-коммуникационных технологий при Ташкентском университете информационных технологий.

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 консультант:** Азимов Бахтиёр Магруппович  
доктор технических наук

**Официальные оппоненты:** Игамбердиев Хусан Закирович  
доктор технических наук, академик

Равшанов Нормаммад  
доктор технических наук, профессор

Нурмухамедов Толаниддин Рамзиддинович  
доктор технических наук, доцент

**Ведущая организация:** Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности

Защита диссертации состоится 29 ноября 2019 г. в 14:00 часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017.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 № 1/1993). (Адрес: 100202, г.Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-65-44).

Автореферат диссертации разослан «15» ноября 2019 года.  
(протокол рассылки № 14 от «3» октября 2019 г.).



**Р.Х.Хамдамов**  
член научного совета по присуждению  
учёных степеней, д.т.н., профессор

**Ф.М.Нуралiev**  
Ученый секретарь научного совета  
по присуждению учёных степеней, д.т.н., доцент

**М.А.Рахматуллаев**  
Председатель научного семинара при научном совете  
по присуждению ученых степеней, д.т.н., профессор

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

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире развитие и внедрение достижений информационных технологий в совершенствование систем управления и разработка современных методов и алгоритмов управления сложными технологическими системами механической обработки и проектирования технологических процессов является одной из важнейших задач повышения технического уровня производств и качества выпускаемой продукции современного машиностроения. В мировом машиностроении получили широкое распространение материалы с высокими прочностными и специальными свойствами, и как следствие, наметилась тенденция к снижению металлоемкости и массы машин, что привело к образованию большого числа деталей малой жесткости. В связи с этим обеспечение технического уровня и конкурентоспособности продукции машиностроения на мировом рынке тесно связано с решением комплексных задач исследования и оптимизации параметров машин и оборудования. В развитых странах мира, в том числе в США, Великобритании, Германии, Китае, Индии, Российской Федерации и др. особенно остро стоит проблема повышения точности обработки деталей малой жесткости, получающих все большее применение в механизмах и машинах, что связано с современными тенденциями к снижению материально-энергетических ресурсов, а также широким использованием деталей с функциональным специфическим назначением. Подобные детали составляют значительную долю номенклатуры изделий в точном машиностроении, приборостроении, авиационной и космической промышленности.

В мире проводятся научные исследования, направленные на решение задач обеспечения требуемой точности форм и геометрических размеров обрабатываемых деталей, что обусловило необходимость совершенствования способов анализа, поиска путей повышения точности и качества обработки, базирующихся на раскрытии закономерностей поведения упругодеформированных деталей малой жесткости в динамической системе механической обработки, разработки методов в области управления и математического моделирования при функционировании технологических систем для повышения точности форм и качества поверхности.

В Республике Узбекистан проводятся исследования по внедрению информационно-коммуникационных технологий в модернизацию производственных процессов изготовления деталей машин и оборудования. В этом направлении проводятся работы по разработке методов управления, математического моделирования, созданию алгоритмов и комплексов программ для оптимизации параметров технологических систем объектов машиностроения. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 гг. определены следующие задачи: «...создание эффективных механизмов внедрения научных и инновационных достижений в практику, ... внедрение информационно-коммуникационных технологий и их использование»<sup>1</sup>. При выполнении этих задач важными вопросами являются

<sup>1</sup> Указ Президента Республики Узбекистан «О стратегии действий по дальнейшему Развитию Республики Узбекистан», УП-4947 от 7 февраля 2017 года.

разработка с помощью информационно-коммуникационных систем комплексов программ и технологий для анализа динамики и изучения механизма образования погрешностей при обработке деталей малой жесткости, разработка и практическая реализация методов управления и математического описания с учетом динамических характеристик технологических систем при токарной обработке и шлифовании деталей малой жесткости.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных указами Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017г. «О стратегии действий по дальнейшему Развитию Республики Узбекистан» и №УП-5349 от 19 февраля 2018г., «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-3117 от 7 июля 2017г. «О мерах по дальнейшему развитию научно-технической базы в сфере сельскохозяйственного машиностроения» и другими нормативно-правовыми документами.

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

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации.<sup>2</sup> Исследования по решению задач оптимизации управления сложными технологическими системами (ТС), разработки методов и алгоритмов управления ТС, математических моделей и программного обеспечения механической обработки, охватывающие принятие решений по выбору методов управления технологическими системами и обработке информации с целью повышения точности изготовления и качества обработанных деталей малой жесткости (ДМЖ) ведутся в научных центрах мира и высших образовательных учреждениях, в том числе в University of Huddersfield (Великобритания), Institute of Production Engineering and Machine Tools University of Hannover (Германия), Cornell University School of Operations Research and Industrial Engineering, Department Electrical Engineering & Computer Science Northwestern University (США), Department of Mechanical Engineering Tianjin University (Китай), Lublin University of Technology (Польша), в МГТУ «СТАНКИН», в МГТУ им. Н.Э. Баумана, в Омском государственном техническом университете (Российская Федерация).

В результате анализа исследований, проведенных в мире по совершенствованию существующих и созданию методов и алгоритмов управления

<sup>2</sup>При обзоре зарубежных научных исследований по теме диссертации использовались источники: <https://www.sciencedirect.com/science/article>, <https://www.researchgate.net/publication>, <http://www.springer.com>, <http://eprints.hud.ac.uk/8597/>, [www.ifw.uni-stuttgart.de](http://www.ifw.uni-stuttgart.de), <https://jstec.taylorsof.com>, <https://www.unibo.it/en>, <https://www.mccormick.northwestern.edu/cecs>, <http://technomag.bmstu.ru/en/>, <https://cyberleninka.ru/article/>, <http://icceexplore.ieee.org>, <https://scholar.google.ru>, [32](http://engjournal.ru/catalog/engi др.</a></p></div><div data-bbox=)



ТС, математическому моделированию механической обработки выделен ряд научных результатов, в том числе: представлены результаты математического моделирования сил резания и остаточных напряжений в процессе механической обработки с помощью современного программного обеспечения, создана классификация методов управления и моделирования процесса шлифования (University of Huddersfield, Великобритания); разработаны методы оптимизации процесса внутреннего шлифования путем управления динамической системой (Institute of Production Engineering and Machine Tools, University of Hannover, Германия); получены математические модели процессов с прогнозируемой производительностью, способы управления технологическим процессом, позволяющие управлять балансом взаимодействующих сил резания для корреляции входных параметров процесса обработки деталей и выходных характеристик (Department of Mechanical Engineering Worcester Polytechnic Institute, США); математические модели и алгоритмы управления динамической системой по различным каналам (Lublin University of Technology, Польша); математические модели, позволяющие численно исследовать процесс обработки деталей с применением прямого численного интегрирования, комплексные имитационные модели процесса шлифования сложнопрофильных податливых деталей, подход моделирования обработки деталей со сложной формой поверхности, оценивающий уровень вибраций, отклонение формы и качество поверхности (МГТУ им. Н.Э. Баумана); сформированы теоретические и реализационные основы построения систем управления станочными модулями, обеспечивающими необходимое качество формообразования поверхностей (МГТУ «СТАНКИН»); предложены системы аналитической идентификации динамических систем для управляемых переменных (Тольяттинский государственный университет, Российская Федерация).

Ведутся научно-исследовательские работы решения проблем повышения точности и эффективности обработки как при проектировании технологических процессов с заданной точностью, которые могут быть отнесены к конструкторским методам управления точностью, так и за счет создания методов управления вибрациями, разработки математических моделей и методов непосредственного управления режимами резания, упругой системой. Разрабатываются методы синтеза систем управления упругими деформациями динамической системы, совершенствуется и создаётся программное обеспечение как для проектирования ТС, так и для применения на многоцелевых станках. Ведутся разработки новейших методов и средств управления с применением компьютерных способов обработки измерительной информации о ходе технологического процесса и функционировании станков.

**Степень изученности проблемы.** Исследования, посвященные вопросам взаимного влияния факторов, сопровождающих процесс механообработки, которые представляют собой сложную задачу многофакторного анализа, созданию методов и алгоритмов управления функционированием технологических систем обработки деталей, разработке теоретических основ управления, которые включают в себя разработку математических моделей и

алгоритмов управления этим процессом, разработке основных требований относительно показателей качества управления технологической системой и ее динамических характеристик рассмотрены в работах ученых внесших значительный вклад, таких как: О.И.Драчев, А.М.Абакумов, В.А.Таращенко, С.А.Воронов, В.Г.Митрофанов, S.Malkin, A.A.Cardi, R.Bauer и др.

Вопросы обеспечения точности изготовления деталей, оптимизации и управления процессами механической обработки достаточно полно и широко рассмотрены в работах Б.С.Балакшина, З.Гейлера, А.М.Дальского, Ю.М.Соломенцева, В.А.Кудинова, М.С.Невельсона, В.И.Подураева, М.М.Тверского, В.А. Гаврилова, Van der Schaft, Macchelli A. и других исследователей. Анализ устойчивости процесса резания для различных операций с помощью линейных моделей содержится в работах Ю.Н. Санкина, В.Г.Грановского, Y. Altintas, S.D. Merdol и других. Однако, число целевых исследований по обработке деталей малой жесткости весьма ограничено, что, безусловно, сдерживает развитие и совершенствование процессов шлифования маложестких валов высокой точности.

Проведенный анализ работ показывает, что разработка методов и алгоритмов управления ТС механической обработки деталей малой жесткости с целью повышения точности деталей, основывающаяся на построении многоуровневой системы моделирования, вычислительных экспериментов и оптимального управления параметрами, а также разработке программных средств, что позволяет в диалоговом режиме принимать решения и осуществлять управление технологическими системами за счет получения достоверной информации является актуальной проблемой, которая в настоящее время не решена в достаточной степени.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнена в рамках проектов: А-17-Ф008 «Разработка моделей, алгоритмов и программных средств интеллектуального управления и проектирования производственных систем» (2009-2011 гг.), А5-ФА-А018 «Разработка методов, алгоритмов и программных средств диагностирования, оптимального управления и принятия решений для проектирования технологических машин и систем» (2012-2014 гг.), А-5-008 «Разработка программно-алгоритмических средств управления функционированием и процессами изготовления рабочих органов технологических машин» (2015-2017 гг.), БВ-АТЕХ-2018-13 «Разработка моделей, алгоритмов и программных средств оптимизации параметров хлопкоуборочных машин при различных условиях движения» (2018-2020 гг.).

**Цель исследования** состоит в разработке методов и алгоритмов управления технологическими системами для обеспечения заданной точности и качества поверхности при механической обработке деталей малой жесткости.

#### **Задачи исследования:**

осуществить системный анализ методов исследования и управления технологическими системами механической обработки деталей малой жесткости типа тел вращения;

разработать математические модели функционирования технологических систем механообработки упругодеформированных деталей малой жесткости в динамических режимах;

установить закономерности обеспечения устойчивого процесса механической обработки упругодеформированных деталей малой жесткости;

разработать функциональную структуру моделирования и управления технологической системой в процессах токарной обработки и шлифования деталей малой жесткости;

разработать алгоритмы оптимального управления технологической системой с целью обеспечения оперативного, качественного и ресурсосберегающего производства в процессе обработки деталей малой жесткости.

разработать модели оценки состояния и алгоритм коррекции управления энергетическими ресурсами технологической системы в процессе обработки деталей малой жесткости;

разработать программный комплекс для практической реализации полученных результатов на производственных объектах машиностроения.

**Объектом исследования** является технологическая система механической обработки упругодеформированных деталей малой жесткости.

**Предметом исследования** являются методы и алгоритмы оптимального управления и оценки энергетического состояния технологических систем.

**Методы исследования:** Системный анализ, теория механики твердого деформируемого тела, вариационных исчислений и оптимальных систем, методы математического моделирования, а также технология машиностроения и методологии современных информационных технологий.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

на основе использования методологии IDEF0 построена функциональная структура моделей и алгоритмов управления технологическими системами обработки деталей малой жесткости, отображающая реальные процессы;

построены расчетные схемы и разработаны математические модели технологических систем для управления процессами механической обработки деталей в динамических режимах;

разработаны алгоритмы оптимального управления технологической системой с целью обеспечения оперативного, качественного и ресурсосберегающего производства в процессе обработки деталей малой жесткости.

разработаны модели оценки состояния и алгоритм коррекции управления энергетическими ресурсами технологической системы в процессе обработки деталей малой жесткости;

определены закономерности обеспечения устойчивого процесса механической обработки упругодеформированных деталей малой жесткости.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

разработаны математические модели технологических систем при управлении точностью токарной обработки и шлифования упругодеформированных маложестких деталей, характеризующие динамические свойства процессов обработки и эквивалентной упругой системы и осуществлена оптимизация параметров в условиях упругодеформированного состояния;

разработаны методы построения функциональной структуры управления технологическими системами обработки мало жестких деталей на основе методологии IDEF0;

выявлено, что вследствие широких пределов вариаций параметров объекта управления, характерных как для процесса токарной обработки, так и процессов шлифования, высокие показатели качества управления в установившихся и переходных режимах могут быть достигнуты только с использованием методов оптимального управления;

разработаны методы оптимального управления, оценки энергетического состояния технологических систем механической обработки деталей малой жесткости, обеспечивающие повышение точности форм и качества поверхностей обрабатываемых деталей;

доказано, что при оптимизации параметров режима обработки достигается обеспечение устойчивого процесса, приводящее к повышению точности обработки деталей малой жесткости;

разработаны алгоритмы оптимального управления ТС, алгоритмы оценки и коррекции управления энергетическими состояниями ТС токарной обработки и процессов шлифования осесимметричных ДМЖ.

**Достоверность результатов исследования.** Достоверность результатов исследования обосновывается использованием известных законов сохранения массы, энергии и импульса, законов механики твердых тел, апробированных методов вычислительной математики, а также качественной и количественной оценкой полученных результатов, адекватность разработанного математического обеспечения рассматриваемых процессов проверяется уравнением материального баланса.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Теоретическая значимость заключается в создании методов управления процессом обработки ДМЖ, которые базируются на раскрытых закономерностях упругодеформированного поведения деталей, математическом описании и построении структур управления ТС для обеспечения требуемой точности и качества поверхности. Представленная в работе графическая модель в рамках диаграммы функционального моделирования – IDEF0 отображает процессы исследования и управления функционированием, а также оценки энергетического состояния ТС с помощью адекватных моделей и инструментов анализа, отвечающих принятым критериям. Такой подход дает возможность целенаправленных действий, гарантирующих с высокой вероятностью получение заранее заданных результатов механической обработки деталей в условиях изменений внешней и внутренней среды.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработанные и реализованные методика моделирования, результаты вычислительных экспериментов и программные средства оптимального управления ТС, позволяют обеспечить оперативный и ресурсо-сберегающий режим производства в процессе механической обработки деталей малой жесткости, принять конкретные практические рекомендации по проектированию, анализу функционирования, корректировке и оптимальному выбору

параметров и материально-энергетических ресурсов, а также повысить надежность нормального функционирования технологических систем.

**Внедрение результатов исследования.** На основе разработанных методов и алгоритмов оптимального управления, оценки энергетического состояния ТС механической обработки деталей малой жесткости:

разработанный комплекс программных средств оптимального управления ТС токарной обработки и шлифования деталей малой жесткости внедрен в процесс автоматизированного расчета и проектирования технологического процесса обработки валов на УП СКБ «Трактор» (Справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций № 33-8 / 7656 от 12 октября 2018 года, Справка АО Республики Узбекистан «Узагротехсаноатхолдинг» № АР-19-02/88 от 15 января 2019 года). В результате время автоматизированного процесса проектирования механической обработки вала съёмника сокращено на 80%. Программный комплекс предоставил возможность расчета сил при обработке вала, определить значения жесткости и коэффициентов вязкого сопротивления вала при кручении и растяжении на основе построенной динамической модели ТС обработки вала съёмника, а также произвести расчет значений осевой растягивающей силы и прогибов для определения требуемых параметров точности обработки вала;

разработанные методики формирования и алгоритмы оптимального управления ТС механической обработки, расчетов сил и изгибающих моментов внедрены на предприятии АО «Технолог» (Справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций № 33-8/7656 от 12 октября 2018 года, Справка АО «Узагротехсаноатхолдинг» Республики Узбекистан № АР-19-02/88 от 15 января 2019 года). Использование результатов позволило повысить точность размеров и формы обрабатываемых изделий в 10-15 раз, улучшить технико-экономические показатели обработки;

разработанные методика расчета составляющих силы резания, значений осевой растягивающей силы и прогиба при точении вала съёмника хлопкоуборочной машины, а также методика расчета оптимальных значений технологических параметров при механической обработке вала съёмника хлопкоуборочной машины внедрены в АО «БМКБ-Агромаш» (Справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций № 33-8/7656 от 12 октября 2018 года, Справка АО Республики Узбекистан «Узагротехсаноатхолдинг» № АР-19-02/88 от 15 января 2019 года). В результате обеспечено определение оптимальных функциональных параметров обрабатываемых деталей, что позволило сформировать управление функционированием системы по заранее заданным условиям и повысить показатели точности размеров и качество формы деталей в 2-4 раза. Величина упругих прогибов снижена до 1.5÷8.7 мкм при токарной обработке и до 0.2÷3.5 мкм при шлифовании;

разработанные методы и алгоритмы оптимального управления оценки энергетического состояния ТС механической обработки вала съёмника

уборочного аппарата хлопкоуборочной машины, методики расчета сил при точении, оценки энергетического состояния, определения оптимальных значений параметров обрабатываемых деталей, внедрены на ООО «КТЦСМ» в процесс проектирования для определения параметров технологического процесса изготовления вала съёмника уборочных аппаратов хлопкоуборочных машин (Справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций № 33-8/7656 от 12 октября 2018 года, Справка АО Республики Узбекистан «Узагротехсаноатхолдинг» № АР-19-02/88 от 15 января 2019 года). Предложенная методика моделирования технологического процесса по заданным условиям служит для получения более высоких показателей точности форм деталей, теоретически заданная точность механической обработки достигнута путем управления по двум параметрам.

**Апробация результатов исследования.** Теоретические и прикладные результаты данного исследования докладывались и обсуждались на 5 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

**Опубликованность результатов исследования.** Основные результаты исследования опубликованы в 31 научной работе, из которых 20 опубликованы в журнальных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан, в том числе 6 в зарубежных и 14 в республиканских журналах, также получены 2 свидетельства о регистрации программных продуктов для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 198 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации 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 «Системный анализ современных методов моделирования и управления процессами механической обработки деталей малой жесткости» проанализировано и охарактеризовано состояние имеющихся теоретических результатов в области создания математических моделей, методов, алгоритмов управления ТС, способов и подходов по управлению факторами, влияющими на точность механической обработки.

Решение задач управления ТС механической обработки деталей малой жесткости, обеспечивающими требуемые точность и качество поверхности, затрудняются тем, что в процессе обработки сама деталь, инструмент и узлы станка, находясь в относительном движении, представляют собой сложную

динамическую систему, поведение которой заранее определить без целевых и теоретических исследований практически невозможно. Основной причиной погрешности формы являются упругие деформации валов под действием сил резания и переменная по длине вала жесткость, что выражается в сложности обеспечения точности в условиях упругодеформирования. Наиболее целесообразным направлением решения задачи является управление ТС механической обработки ДМЖ в упругодеформированном состоянии на основе научно обоснованных технологических методов воздействия на заготовку.

Приведены результаты исследования технологических методов управления ТС механической обработки деталей и их классификация, в которой в отдельную группу выделены методы управления упругодеформированным состоянием деталей малой жесткости. Дана общая характеристика деталей, а также характеристики и особенности ТС обработки деталей типа осесимметричных ДМЖ. Для исследования была выбрана деталь типа вал. Важной характеристикой указанного вала является его жесткость, которая определяется соотношением его длины к диаметру. Особенности подобной детали необходимо учитывать при моделировании и управлении объектом исследования. Высокие требования предъявляются к параметрам точности геометрических форм и взаимному расположению поверхностей, линейных размеров и качеству поверхностей маложестких деталей. При этом точность изготовления на операциях точения должна соответствовать 8-11 квалитетам точности при шероховатости  $R_a=0.63-2.5$  мкм. От точности исполнения токарной операции зависит выполнение последующих операций шлифования и результаты обработки в целом, а в ряде случаев токарные операции являются окончательным видом обработки.

Выявленные особенности моделирования систем механической обработки упругодеформированных ДМЖ показали, что при отсутствии достаточно полной информации об объекте управления (ОУ) рассчитанные характеристики могут существенно отличаться от истинных. Кроме того, анализируемые системы характеризуются большой вариабельностью параметров. В ТС, содержащих заготовку малой жесткости, параметры могут существенно изменяться в пределах цикла обработки одной детали. Эти определения указывают на необходимость особого подхода к проблеме разработки структуры управления. Структура ОУ содержит элементы управления упругими деформациями ТС, обусловленные силовыми воздействиями, возникающими при реализации процесса резания или шлифования.

Проведен анализ и охарактеризовано состояние имеющихся теоретических результатов в области создания ММ, методов, способов и подходов для повышения точности обработки ДМЖ. Приведены результаты исследования технологических методов управления ТС механической обработки маложестких деталей и их классификация, в которой в отдельную группу выделены методы управления упругодеформированным состоянием.

На основе критического анализа теоретических и практических достижений в предметной области осуществлена формулировка цели и постановка задач исследования.

Во второй главе диссертации «Исследование характеристик технологической системы обработки упругодеформированных деталей малой жесткости» изложены результаты исследования статических и динамических характеристик ТС обработки упругодеформированных ДМЖ. Приведены особенности построения математических моделей упругодеформированных ДМЖ в установившихся режимах.

При управлении ТС обработки ДМЖ, основанном на изменении их упругодеформированного состояния, используются отдельные или комбинированных силовых воздействий: центральное и внецентренное растяжение, внецентренное сжатие; управление дополнительными силовыми воздействиями, направленными на компенсацию силовых факторов от процесса резания; изгибающими моментами на опорах; управление изгибно-крутильным силовым деформированием.

Математическая модель ТС в установившихся режимах формируется в виде функциональной зависимости, отражающей влияние внешних воздействий на величину упругих деформаций детали в рассматриваемом сечении. Получены функциональные зависимости для ТС с различными видами упругодеформированного состояния ДМЖ (рис.1).

Закрепление детали при приложении центральной растягивающей силы может быть осуществлено с возможностью осевого перемещения (рис.1, строки 2.2 и 2.3). С целью минимизации упругого прогиба возможно также управление углом поворота детали в месте закрепления, путем приложения внецентренного растяжения. Эта разновидность закрепления может быть также представлена подвижной шарнирной опорой (рис.1, строка 2.4). Принципиальным отличием указанной схемы является возбуждение управляемого момента в точке закрепления детали за счет внецентренного растяжения. При этом приложение одного управляемого силового фактора – внецентренного растяжения дает возможность создания двух силовых факторов в любом наперед заданном сечении детали, в частности, в зоне обработки: продольной силы  $P_{x1}$  и изгибающего момента  $M_z = P_{x1} \cdot e$ , противодействующего силам резания, то есть целенаправленного упругодеформированного состояния детали.

На рис. 2 представлены результаты численного моделирования величин упругих прогибов деталей в зоне обработки  $X=a$  на ЭВМ, причем номер аналитической зависимости соответствует номеру модели в таблице (рис. 1) Зависимость 2.5 получена экспериментально при закреплении детали в патроне передней бабки и в цанговом зажиме задней бабки без возможности поворота сечения в месте крепления (модель 2.3).



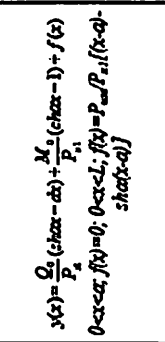
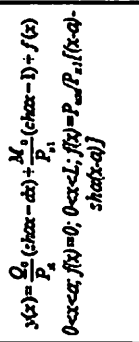
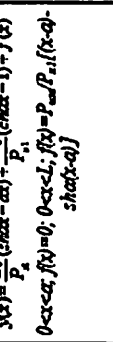
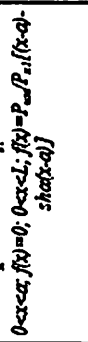
№ кл	Способ закрепления. Условия нагружения. Вид упругой линии детали.	Крайние условия. Условия равновесия. Условия совместности деформации	Функция прогибов	Начальные параметры $Q_0$ и $M_0$
		3	4	5
2.1	 <p><math>P_x=0; M_x=0; \sigma_x=0; \beta_x=(L-a)/L; z_x=\sqrt{P_x^2+P^2}</math></p>	$X=0; Y(0)=0; Y'(0)=0; EIY''(0)=M_0;$ $EIY'''(0)=Q_0; X=L; Y(L)=0;$ $\alpha = \sqrt{\frac{P_x}{EI}}$	$y(x) = \frac{Q_0}{P_x} (x \sin \alpha x - \alpha x) + \frac{M_0}{P_x} (\sin \alpha x - 1) + f(x)$ $0 < x < L; f(x) = P_x \int_0^x P_x [(x-\phi) \sin \alpha(x-\phi)]$	$Q_0 = P_x \frac{(P_x L - ch \alpha L - sh \beta \alpha L)}{(L ch \alpha L - sh \alpha L)}$ $M_0 = P_x \frac{(P_x h \alpha L - sh \alpha L)}{(L ch \alpha L - sh \alpha L)}$
2.2	 <p><math>P_x=0; \sigma_x=0</math></p>	$X=0; Y(0)=0; Y'(0)=0;$ $X=L; Y(L)=0; Y'(L)=0;$ $Y(0)=\alpha_1 [1 + \cos(2\alpha_1 L)]$ $Dw/dx _0=0$	$Y(X) = \frac{P_x L^2 [1 - \cos(\frac{2\alpha_1 X}{L})] [1 - \cos(\frac{2\alpha_1 L}{L})]}{x^2 (8x^3 - EI + 2P_x L)}$	
2.3	 <p><math>P_x=0; \sigma_x=0</math></p>	$X_1=0; Y_1(0)=0; Y_1'(0)=0;$ $EI_1 Y_1''(0)=M_0; EI_1 Y_1'''(0)=Q_0;$ $X_2=0; Y_2(0)=0; Y_2'(0)=0;$ $EI_2 Y_2''(0)=EI_1 Y_1''(a)+M_1; EI_2 Y_2'''(0)=EI_1 Y_1'''(a)+P_x$ $\alpha = \sqrt{P_x / EI}$	$Y_1(X_1) = \frac{Q_0}{\alpha P_x} (x \sin \alpha x - \alpha x) + \frac{M_0}{P_x} (\sin \alpha x - 1)$ $0 < X_1 < a$ $Y_2(X_2) = \frac{Q_0 ch \alpha a + M_0 \alpha sh \alpha a + P_x}{\alpha P_x} (sh \alpha x_2 - \alpha x_2) + \frac{Q_0 x_2 a + M_0 \alpha ch \alpha a}{\alpha P_x} (sh \alpha x_2 - 1)$ $0 < X_2 < a$	$Y_1(0) = Y_2(L-a); Y_1'(L-a) = 0$ $Q_0 = \frac{P_x [(sh \alpha(L-a) - \alpha L \cos \alpha(L-a)) \sin \alpha a + \alpha(L - X_1 sh \alpha(L-a)) \sin \alpha(L-a)]}{\alpha(L - X_1 sh \alpha(L-a)) \sin \alpha(L-a) + \alpha(L - X_2 sh \alpha(L-a)) \sin \alpha(L-a)}$ $M_0 = \frac{P_x [(sh \alpha(L-a) - \alpha L \cos \alpha(L-a)) \sin \alpha a + \alpha(L - X_1 sh \alpha(L-a)) \sin \alpha(L-a)]}{\alpha(L - X_1 sh \alpha(L-a)) \sin \alpha(L-a) + \alpha(L - X_2 sh \alpha(L-a)) \sin \alpha(L-a)}$
2.4	 <p><math>M_1 = P_x \cdot d/2; M_2 = P_x \cdot e</math></p>	$X_1=0; Y_1(0)=0; Y_1'(0)=0;$ $X_2=0; Y_2(0)=0; Y_2'(0)=0;$ $EI_1 Y_1''(0)=M_0; EI_1 Y_1'''(0)=Q_0;$ $EI_2 Y_2''(0)=EI_1 Y_1''(a)+M_1; EI_2 Y_2'''(0)=EI_1 Y_1'''(a)+P_x$ $\alpha = \sqrt{P_x / EI}$	$Y_1(X_1) = \frac{Q_0}{\alpha P_x} (x \sin \alpha x - \alpha x) + \frac{M_0}{P_x} (\sin \alpha x - 1)$ $0 < X_1 < a$ $Y_2(X_2) = \frac{Q_0 ch \alpha a + M_1 \alpha sh \alpha a + P_x}{\alpha P_x} (sh \alpha x_2 - \alpha x_2) + \frac{sh \alpha(Q_0/a) + M_2 \alpha ch \alpha a}{P_x} (sh \alpha x_2 - 1)$	$Y_1(0) = Y_2(L-a)$ $\Sigma M(D) = Q_0 L + M_0 + P_x \frac{L}{2} + P_x d \sin \alpha(L-a) - P_x L = 0$ $Q_0 = \frac{\alpha P_x [(sh \alpha(L-a) - \alpha L \cos \alpha(L-a)) \sin \alpha a - M_1 - P_x (L-a) \sin \alpha(L-a)]}{\alpha P_x [(sh \alpha(L-a) - \alpha L \cos \alpha(L-a)) \sin \alpha a + \alpha(L - X_1 sh \alpha(L-a)) \sin \alpha(L-a)]}$ $M_0 = \frac{\alpha P_x [(sh \alpha(L-a) - \alpha L \cos \alpha(L-a)) \sin \alpha a - M_1 - P_x (L-a) \sin \alpha(L-a)]}{\alpha P_x [(sh \alpha(L-a) - \alpha L \cos \alpha(L-a)) \sin \alpha a + \alpha(L - X_1 sh \alpha(L-a)) \sin \alpha(L-a)]}$

Рис. 1. Условия нагружения деталей при управлении упругодеформированным состоянием

При этом увеличение жесткости деталей с  $d = 2-6$  мм и  $L = 100-300$  мм при нагружении их растягивающей силой 980-1960 Н приводит к снижению упругих прогибов на 10-20%, соответственно, при  $d = 8-12$  мм на 5-7%, а при увеличении  $d > 16$  мм при данной длине практически не влияет на величину статической жесткости, и соответственно, на прогибы деталей.

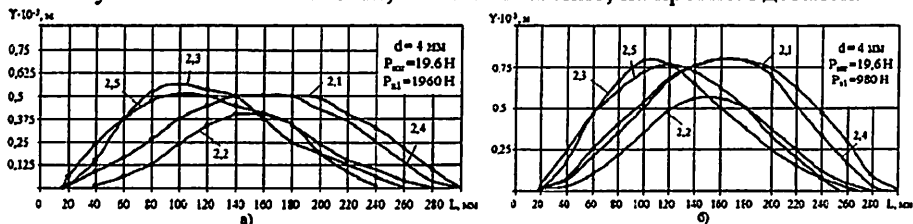


Рис. 2. Аналитические зависимости изменения упругих прогибов деталей: а –  $P_{x1} = 1960$  Н; б –  $P_{x1} = 980$  Н; кривая 2.5 получена экспериментально.

С учетом общих принципов построения ММ обработки деталей малой жесткости, представленными во второй главе диссертации разработаны упрощенная физическая модель и схема формирования сечения среза при шлифовании упругодеформированных маложестких валов с продольной подачей представлены на рис. 3, а, б. Схема процесса при продольном шлифовании характеризуется упругими связями в радиальном и осевом направлениях, собственно процессом резания (формированием сечения среза) и действующими на процесс возмущающими воздействиями.

За входные воздействия рассматриваемой ТС приняты величины: растягивающей силы  $P_{x1}$  при центральном растяжении; растягивающей силы  $P_{x1}$  и эксцентриситета  $e$  при внецентренном растяжении; изгибающие моменты  $M_1$  и  $M_2$ , приложенные в точках крепления детали. За выходные переменные ТС приняты отдельные составляющие силы резания  $P_x, P_y, P_z$  и соответствующие им упругие деформации ТС:  $y_x, y_y, y_z$ .

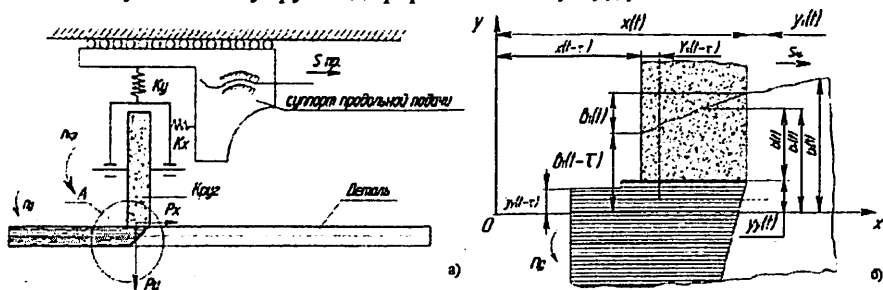


Рис. 3. Схема процесса обработки шлифованием и сечение срезаемого слоя при шлифовании: а – упрощенная модель стружкообразования; б – сечение слоя с учетом упругой деформации по координатам  $x$  и  $y$

Система уравнений для обобщенной ММ процесса круглого осциллирующего шлифования валов малой жесткости запишется в виде:

$$\left. \begin{aligned}
 P_{\xi}(s) &= m_{\xi} \cdot a(s) + n_{\xi} \cdot b(s), \\
 a(s) &= \frac{1}{s}(1 - e^{-s\tau}) \cdot S_{np}(s) - (1 - e^{-s\tau}) \cdot y_x(s), \\
 b(s) &= \frac{1}{s\tau}(1 - e^{-s\tau}) \cdot b_1(s) - y_y(s) - K_{bz} \cdot y_z(s), \\
 y_y(s) &= K_{yy} \cdot P_y(s) + K_{xy} \cdot P_x(s) + K_{P_{z1}} \cdot P_{z1}(s) + K_e \cdot e(s) + K_{M_i} \cdot M_i(s), \\
 y_z(s) &= K_x \cdot P_x(s), \quad y_z(s) = K_z \cdot P_z(s), \\
 \xi &\in \{X, Y, Z\}.
 \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $P_{\xi}(s)$  – составляющие сил резания;  $m_{\xi} = (\frac{dP_{\xi}}{da})_0$ ;  $n_{\xi} = (\frac{dP_{\xi}}{db})_0$  – коэффициенты для составляющих силы резания по приращению, соответственно, приведенной толщины среза  $a(s)$ , глубины резания  $b(s)$ .

Математическая модель ТС круглого врезного наружного шлифования упругодеформированных валов малой жесткости как объекта управления, в общем случае, учитывает процесс резания и упругие деформации ТС.

За входные воздействия на объект принимается одно из ранее перечисленных воздействий, создающих упругодеформированное состояние:  $P_{x1}$ ,  $K_{P_{z1}}$ ,  $K_e$ ,  $M_i$ ,  $K_{M_i}$  и скорость суппорта поперечной подачи  $S_{попер}$ , а за выходное – упругие деформации технологической системы по координате  $y_x$ .

К ранее принятым исходным положениям и допущениям необходимо добавить: шлифование осуществляется при постоянной скорости резания, при неизменных режущей способности шлифовального круга и свойствах материала обрабатываемых деталей; ширина шлифования  $b = const$  и равна при врезном шлифовании ширине обрабатываемой детали или круга. Кроме того, учитываются только линейные упругие деформации системы и вариации жесткости  $K_y$  и  $K_z$  по координатам  $Y$  и  $Z$ .

Математическая модель ТС при врезном шлифовании упругодеформированных ДМЖ в операторном виде может быть представлена в виде:

$$\left. \begin{aligned}
 P_{\xi}(s) &= m_{\xi} \cdot a(s), \\
 y_y(s) &= K_{yy} \cdot P_y(s) + K_{P_{z1}} \cdot P_{z1}(s) + K_e \cdot e(s) + K_{M_i} \cdot M_i(s) + K_{bz} \cdot y_z(s), \\
 y_z(s) &= K_x \cdot P_x(s), \\
 a(s) &= \frac{1}{s}(1 - e^{-s\tau}) \cdot S_{попер}(s) - (1 - e^{-s\tau}) \cdot y_y(s).
 \end{aligned} \right\} (2)$$

где  $\xi = \{y, z\}$ ,  $b = const$  – ширина шлифования.

В (2) учтено, что упругие деформации по оси  $Z$  приводят к изменению толщины среза и могут рассматриваться как дополнительные составляющие приращения  $y_y$ . Выражение для коэффициента  $K_{bz}$ , устанавливающего взаимосвязь между приращением глубины резания  $b$  и составляющей силы резания  $P_z$ , определяется как  $K_{bz} = \sin(y_{z0} / R) \approx y_{z0} / R$ .

Таким образом, во второй главе диссертации разработаны ММ обработки упругодеформированных деталей. Вследствие широких пределов вариаций параметров ОУ, характерных как для процесса токарной обработки,

так и процессов шлифования, проведена оптимизация параметров при продольно-поперечном изгибе. Выявлено, что высокие показатели качества управления в установившихся и переходных режимах могут быть достигнуты только с использованием методов оптимального управления.

Третья глава диссертации «Разработка современных методов моделирования и управления технологическими системами токарной обработки деталей малой жесткости» посвящена разработке многоуровневой структуры моделирования и оптимального управления ТС токарной обработки. Рассматриваются вопросы разработки методов и алгоритмов оптимального управления.

Структура моделирования и управления ТС разработана на основе международного стандарта IDEF методологии. На рис. 4 представлена IDEF0 диаграмма ТС обработки деталей в виде набора взаимодействующих и взаимосвязанных блоков, отображающих процессы, операции и действия процессов. Данная диаграмма отражает стратегию исследования процессов функционирования ТС.

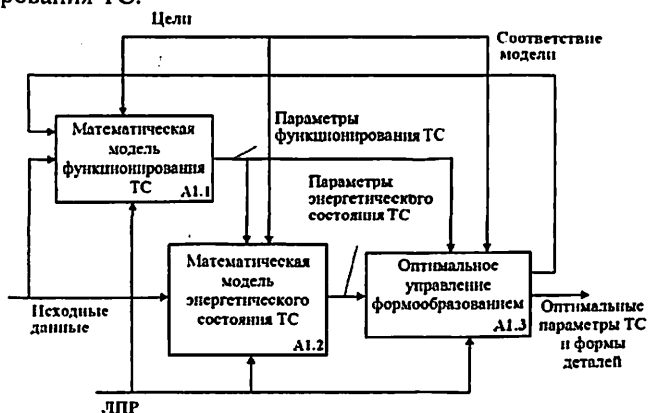


Рис. 4. Диаграмма процессов IDEF0 для ТС обработки деталей

Разработанная функциональная модель, позволяет графически отображать моделируемую систему в виде диаграммы, преобразующей входы в выходы при наличии необходимых ресурсов управления. Данная диаграмма отражает иерархическую структуру моделирования и стратегию исследования процессов функционирования ТС.

На основе расчетной схемы ТС и динамической модели ТС, приведенных на рис. 5 и 6, с помощью уравнения Лагранжа второго рода составлена система дифференциальных уравнений функционирования ТС токарной обработки:

$$\left. \begin{aligned} j_1 \ddot{\varphi}_1 &= M_1 - b_v(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) - c_v(\varphi_1 - \varphi_2) \\ j_2 \ddot{\varphi}_2 &= b_v(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + c_v(\varphi_1 - \varphi_2) - M_c \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $j_1, j_2$  – моменты инерции вращающихся масс ТС, Н·м·с<sup>2</sup>;  $\ddot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_2$  – угловые ускорения вращающихся масс ТС в процессе обработки, с<sup>-2</sup>;  $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2$  – угловые

скорости вращающихся масс ТС в процессе обработки, с<sup>-1</sup>;  $\varphi_1, \varphi_2$  – угловые перемещения вращающихся масс ТС в процессе обработки, рад;  $b$  – коэффициент вязкого сопротивления обрабатываемого вала, Н·м·с/рад;  $c$  – коэффициент жесткости обрабатываемого вала, Н·м/рад;  $M_1, M_c$  – движущий момент ТС и момент сопротивления, Н·м.

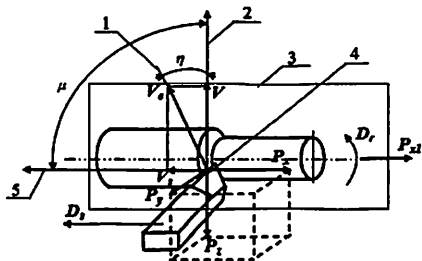


Рис. 5. Кинематическая схема ТС токарной обработки вала

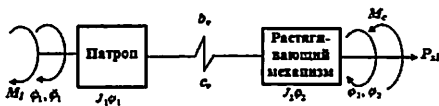


Рис. 6. Динамическая модель ТС

Для исследования необходимых условий оптимального управления рассматриваемой ТС воспользуемся принципом максимума Понтрягина.

В начальный момент времени ТС находится в состоянии

$$\varphi_i(0) = \varphi_0(0), \quad \dot{\varphi}_i(0) = \dot{\varphi}_0(0). \quad (4)$$

Требуется выбрать такое управление  $u(t)$ , которое переведет движение обрабатываемого вала в заранее заданное конечное состояние

$$\varphi_i(t) = \varphi_0(t), \quad \dot{\varphi}_i(t) = \dot{\varphi}_0(t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (i=1, n), \quad (5)$$

При этом требуется, чтобы время переходного процесса было наименьшим. Тогда цель управления сводится к минимизации функционала

$$J(\varphi_0, u(t), \varphi(t)) = \int_{t_0}^T f^0(\varphi(t), u(t), t) dt. \quad (6)$$

При условиях (4), (5)

$$\dot{\varphi}(t) = f(\varphi(t), u(t), t), \quad (7)$$

$$u \in U, \quad t_0 \leq t \leq T, \quad (8)$$

где  $f(\dots)$  – непрерывно-дифференцируемая функция со своими производными;  $u(t)$  – кусочно-непрерывная функция на отрезке  $[t_0, T]$ .

Для формулировки принципа максимума введем функцию Гамильтона-Понтрягина для ТС

$$H = (\varphi, u, t, \psi_1, \psi_0) = -f^0(\varphi, u, t) + \langle \psi, u \rangle \quad (9)$$

и сопряженную систему

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_1}{dt} &= -\frac{\partial H_1}{\partial y_1} = -j_1^{-1} c_1 \psi_2, & \frac{d\psi_2}{dt} &= -\frac{\partial H_1}{\partial y_2} = -\psi_1 + j_1^{-1} b_1 \psi_2 \\ \frac{d\psi_1}{dt} &= -\frac{\partial H_2}{\partial y_3} = -j_2^{-1} c_2 \psi_2, & \frac{d\psi_2}{dt} &= -\frac{\partial H_2}{\partial y_4} = -\psi_1 + j_2^{-1} b_2 \psi_2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

с ограничением на управление  $|u| \leq 1$ .

Для решения рассматриваемой задачи должно выполняться необходимое условие

$$II(\varphi_i(t), u(t), t, \psi_i, \psi_0) = \max_{u \in U} H(\varphi_i(t), u, t, \psi_i(t), \psi_0). \quad (11)$$

Переходя к определению оптимального управления на основе (9), сформируем функцию

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 = y_1, \quad \dot{\varphi}_1 = y_2, \quad \dot{y}_2 = u_1 - \frac{1}{j_1} [b_v(y_2 - y_4) + c_v(y_1 - y_3)] \\ \varphi_2 = y_3, \quad \dot{\varphi}_2 = y_4, \quad \dot{y}_4 = \frac{1}{j_2} [b_v(y_2 - y_4) + c_v(y_1 - y_3)] - u_2 \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

получим математическую модель, характеризующую управление  $u_1 = \frac{1}{j_1} M_1$

движением обрабатываемого вала и управление  $u_2 = \frac{1}{j_2} M_2$ ,  $u_2 = u_c + u_0 \sin \omega t$

( $u_0$  — амплитуда его колебания относительно среднего значения), характеризующее силу, в точке приложения инструмента.

Если  $f^0 = 1$ , то  $J(\varphi_0, u(t), \varphi(t)) = T - t_0$ , в этом случае задачу (4)–(8) называют задачей быстрого действия.

Рассматриваемый объект является стационарной системой и задача (6) означает, что  $f$  и  $U$  не зависят явно от времени, т.е.

$$f(t, y, u) = f(y, u), \quad U(t) = U. \quad (13)$$

Если стационарная задача (6), (13) имеет оптимальное управление  $u(t)$  и оптимальную траекторию  $\varphi_0(t)$ , то существует ненулевой вектор сопряженных переменных  $(\psi_1(t), \psi_2(t))$ ,  $\psi(t) \in R^n$ , удовлетворяющий условиям (11), т.е. выполнено условие максимума (9)

$$\psi_0(t) = \text{const} \leq 0. \quad (14)$$

Так как сопряженная система (10) является однородной относительно  $\psi_i$ , можно произвольным образом выбрать константу в (13) так, что

$$\psi_0(t) = -1 \quad 0 \leq t \leq T. \quad (15)$$

Из условий  $\max_{|u| \leq 1} II$  следует  $u = \text{sign} \psi_2$  при  $\psi_2 \neq 0$ . Тогда красная задача принципа максимума запишется в виде

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 = y_1, \quad \dot{\varphi}_1 = y_2, \quad \dot{y}_2 = \text{sign} \psi_2 - j_1^{-1} [b_v(y_2 - y_4) + c_v(y_1 - y_3)] \\ \varphi_2 = y_3, \quad \dot{\varphi}_2 = y_4, \quad \dot{y}_4 = j_2^{-1} [b_v(y_2 - y_4) + c_v(y_1 - y_3)] - \text{sign} \psi_2 \end{aligned} \right\}. \quad (16)$$

Красная задача принципа максимума в этих случаях будет состоять из (16), граничных условий (4) и (5), вытекающих из (11), и условия (15).

Составим функцию Гамильтона-Понтрягина, которая имеет вид

$$\left. \begin{aligned} H_1 = \psi_0 + \psi_1 y_2 + \psi_2 \dot{y}_2 \\ H_2 = \psi_0 + \psi_1 y_4 + \psi_2 \dot{y}_4 \end{aligned} \right\}. \quad (17)$$

Отсюда ясно, что условие (11) выделит функцию  $u = \text{sign} \psi_2$ ,  $\psi_2 \neq 0$ . Красная задача (16) в этом случае состоит из

$$H_i = -f^0 u + \psi_2(t) u_{\delta}. \quad (18)$$

Тогда

$$u_k = \text{sign} \psi_2(t) = \begin{cases} 1, & \psi_2(t) > 1 \\ -1, & \psi_2(t) < 1 \end{cases}, \quad k=2,4,\dots,2n, \quad (19)$$

т. е. управление  $u_k(t)$  может иметь только одну точку переключения.

Системы (3), (10), (16) решены с применением численного метода Рунге-Кутты. Управление  $u_k(t)$ , доставляющее максимум функции (11), определено в области (19). Обработка результатов решения системы (10) показала, что изменение моментов инерции и упругодиссипативных сил резко изменяет функцию переменных  $\psi_1, \dot{\psi}_1, \psi_2, \dot{\psi}_2$ , т.е. движение обрабатываемого вала. Поэтому для повышения точности размеров и формы обрабатываемых валов необходимо определить переменные сопряженной системы, обеспечивающие нормальное функционирование ТС.

Численным решением системы (3) установлены оптимальные значения функциональных конструктивных и геометрических параметров ТС; проведены расчеты прогибов и точности токарной обработки ДМЖ, представленные в параграфе 3.4 диссертации.

Одной из основных задач является оценка энергетического состояния ТС для реализации процесса формообразования деталей. Для оценки изменения энергетического состояния ТС запишем условие коррекции мощности

$$|P_s - P_p| \leq \varepsilon, \quad (20)$$

переходим к составлению уравнений энергетического состояния ТС с помощью полного дифференциала функции Гамильтона в виде:

$$P_\varepsilon = \sum_{i=1}^n \left[ \left( -\frac{\partial H}{\partial \varphi_i} + Q_i \right) - \left( -\frac{\partial H}{\partial \varphi_i} + Q_p \right) \right] \dot{\varphi}_i = \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_p) \dot{\varphi}_i. \quad (21)$$

Здесь коррекция энергетического состояния определяется условиями

$$|Q_i - Q_p| = \begin{cases} = 0, & \text{если равны соответствующие параметры} \\ & \text{функционирования,} \\ \neq 0, & \text{если параметры неравны.} \end{cases} \quad (22)$$

Подставляя значения угловых скоростей  $\dot{\varphi}_i$  и моментов движущих сил и сопротивлений  $Q_i = M_i = j_i \ddot{\varphi}_i$  в (21), определяем энергетическое состояние ТС обработки валов малой жесткости, удовлетворяющее сформулированным условиям (20), (22).

В результате проведенных расчетов получены численные значения и графические зависимости энергетического состояния ТС в процессе токарной обработки ДМЖ. На основе полученных параметров функционирования и уравнений энергетических состояний проводятся расчеты оценки распределения мощностей, определяются оптимальные значения коэффициентов жесткости и вязкого сопротивления обрабатываемой детали, а также моментов инерции вращающихся масс технологической системы.

Обоснована необходимость применения математического аппарата в определении устойчивости ТС механической обработки точением ДМЖ. На

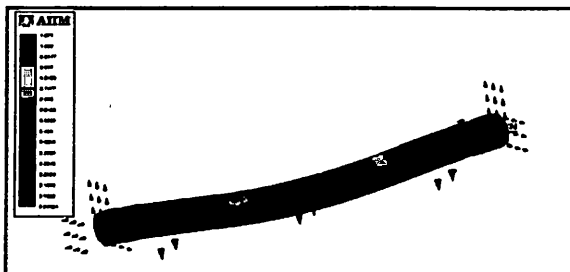
основе составленной математической модели исследована устойчивость процесса механической обработки деталей точением с применением критерия Рауса-Гурвица, который содержит необходимые и достаточные условия устойчивости системы.

Для практической реализации разработанных ММ функционирования ТС, алгоритмов оптимального управления и программных средств вычислительных экспериментов разработан программный комплекс оптимального управления ТС токарной обработки деталей малой жесткости.

В четвертой главе «Разработка методов и алгоритмов управления технологическими системами в процессе шлифования деталей малой жесткости» изложены результаты создания методов и алгоритмов оптимального управления процессами функционирования и энергетическим состоянием технологической системы, обеспечивающие эффективность проектирования ТС шлифования деталей малой жесткости. Приведены результаты разработки программных средств расчета оптимальных значений технологических параметров при шлифовании вала съёмника хлопкоуборочной машины в среде Embarcadero Delphi XE3.

В программном продукте КОМПАС-3D v17.1 с помощью приложения для расчетов АРМ FEM (finite element method – метод конечных элементов) сформирована конечно-элементная модель (КЭМ) детали и процесса ее обработки шлифованием.

Наглядно представлено (рис. 7) изменение напряжения и деформации во время процесса. Более глубокая точка, обозначенная "МАХ", показывает, где круг шлифовального станка взаимодействует с заготовкой во время моделирования и включает упругую и пластическую деформацию вместе, в то время как неинтегрированный участок, рассматриваемый как "MIN", включает только пластическую деформацию.



**Рис. 7. Распределение напряжений поверхности при моделировании детали «вал» для положений инструмента в реперных точках**

Модель проверена на адекватность с использованием формул по расчету балки на прочность и жесткость при косом изгибе, кручении, растяжении. На основе полученных результатов выявлено, что для различных положений инструмента и вариантов приложения силы, погрешность расчетов не превышает 3–5%. При этом максимальные деформации наблюдаются в зоне ближе к центру детали, точка определяется указателем «МАХ». В результате



выявлено, что максимальные деформации могут распределяться по поверхности и вне точки приложения силы.

С целью разработки математического описания ТС, разработаны расчетная и структурная схемы ТС, представленные на рис. 9 и рис.10.

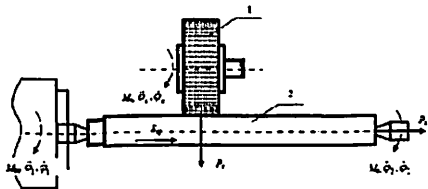


Рис. 8. Кинематическая схема круглого наружного шлифования

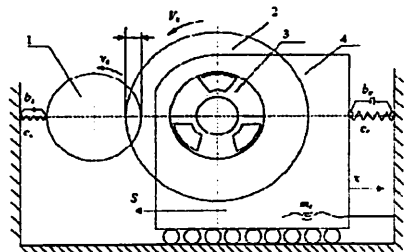


Рис.9. Схема круглошлифовального станка в виде трехмассовой модели

Для разработки методов и алгоритмов управления точности процессом шлифования деталей малой жесткости, на основе расчетной схемы (рис. 8) составлена математическая модель ТС шлифовального процесса обработки ДМЖ с помощью уравнения Лагранжа второго рода:

$$\left. \begin{aligned} j_1 \ddot{\varphi}_1 &= M_d - b_v(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) - c_v(\varphi_1 - \varphi_2) \\ j_2 \ddot{\varphi}_2 &= b_v(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + c_v(\varphi_1 - \varphi_2) - M_c \\ j_3 \ddot{\varphi}_3 &= M_x - M_v \end{aligned} \right\}, \quad (23)$$

где  $j_1, j_2, j_3$  – моменты инерции вращающихся масс ТС, Н·м·с<sup>2</sup>;  $\ddot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_2, \ddot{\varphi}_3$  – угловые ускорения вращающихся масс ТС в процессе обработки, с<sup>-2</sup>;  $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \dot{\varphi}_3$  – угловые скорости вращающихся масс ТС в процессе обработки, с<sup>-1</sup>;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  – угловые перемещения вращающихся масс ТС в процессе обработки, рад;  $b_v$  – коэффициент вязкого сопротивления обрабатываемого вала, Н·м·с/рад;  $c_v$  – коэффициент жесткости обрабатываемого вала Н·м/рад;  $M_d, M_x$  – движущие моменты обрабатываемого вала и шлифовального круга, Н·м;  $M_c$  – момент сопротивления в процессе обработки вала, Н·м;  $M_v = j_2 \ddot{\varphi}_2$ , Н·м;  $r_v$  – радиус обрабатываемого вала.

С учетом упругой системы станка (рис. 9), математическая модель технологической системы (ТС) процесса шлифования деталей малой жесткости примет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} j_1 \ddot{\varphi}_1 &= M_d - b_v(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) - c_v(\varphi_1 - \varphi_2) \\ j_2 \ddot{\varphi}_2 &= b_v(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + c_v(\varphi_1 - \varphi_2) - k_{\text{тс}} \cdot j_3 \ddot{\varphi}_2 \\ j_3 \ddot{\varphi}_3 &= M_x - j_2 \ddot{\varphi}_2 \sin \omega t \end{aligned} \right\}, \quad (24)$$

$$P_x = k_{\text{тс}} \cdot \left( b_c \cdot \dot{x}_c + c_c(\Delta x_c - x_c) - \frac{j_2 \ddot{\varphi}_2}{r_v} \cos \dot{x}_c t \right)$$

где  $P_x$  — сила резания по оси  $X$ ;  $x_c$  и  $\dot{x}_c$  — линейные перемещение и скорость перемещения станины, м и м/с;  $k_{тс}$  — коэффициент трения скольжения;  $k_{тк}$  — коэффициент трения качения.

Аналогично методу, применяемому для ТС токарной обработки, предлагается методика моделирования ТС обработки шлифованием валов малой жесткости.

Решением краевой задачи принципа максимума Понтрягина получены переходные процессы для обрабатываемого вала (рис.10). В результате получены оптимальные значения конструктивно-технологических параметров, обеспечивающие равномерность движения вала в процессе обработки.

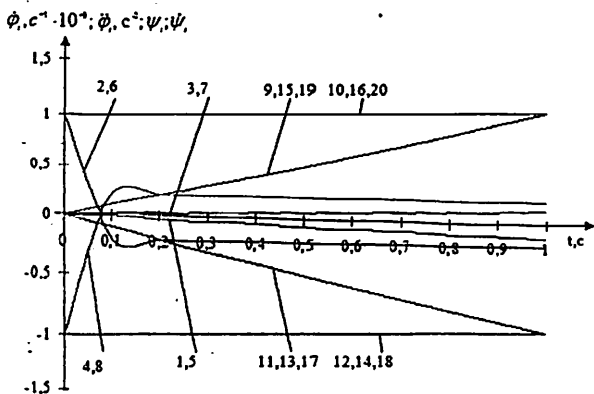


Рис. 10. Графики изменения параметров движения ТС в переходном процессе

Результаты численных решений системы (23) дают возможность определить оптимальные значения параметров обработки ДМЖ и графические зависимости функционирования ТС шлифования (рис. 11).

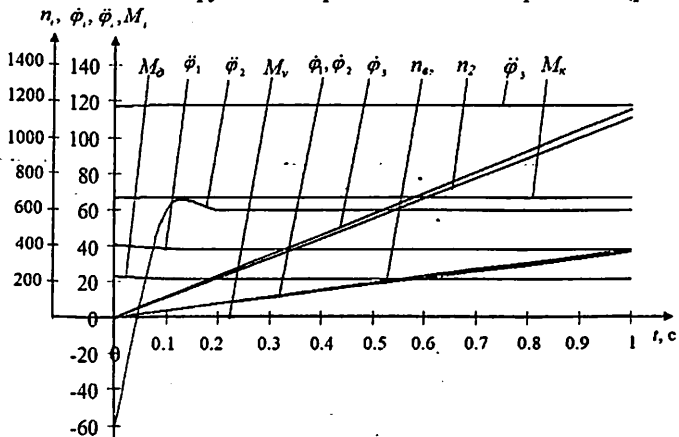


Рис. 11. Характер изменения параметров ТС в процессе шлифования

Для оценки метода управления и установления закономерностей поведения детали при продольно-поперечном изгибе, на основе расчетной схемы (см. рис. 4.10 главы 4 диссертации) решено уравнение упругой линии ДМЖ в форме дифференциальных уравнений четвертого порядка с постоянными коэффициентами:

$$y_i^4 - k^2 y_i'' = 0. \quad (25)$$

Для детали, растягиваемой и несущей произвольную поперечную нагрузку, решение этого уравнения даёт общее уравнение упругой линии:

$$y = y_0 + y_0' kx + y_0''(1 - \cos kx) + y_0'''(kx - \sin kx) + f(x),$$

где  $y_0 = -\frac{P_y \cdot l}{48EI}$ ,  $y_0'$ ,  $y_0''$ ,  $y_0'''$  – соответственно прогиб, вторая и третья производные в начале координат;  $k = 3 \dots 102$  коэффициент, определяющий способ закрепления заготовки;  $f(x)$  – функция влияния поперечных нагрузок.

Уравнения упругой линии на I и II участках (рис. 11) имеют вид

$$\left. \begin{aligned} y_I &= y_0' kx + y_0''(1 - \cos kx) + y_0'''(kx - \sin kx) \\ y_{II} &= y_0' kx + y_0''(1 - \cos kx) + y_0'''(kx - \sin kx) + f(x) \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Начальные параметры определяются:

$$y_0' = -\frac{P_y}{kP_{II}} \left\{ \frac{[kl(\alpha - 1 + \cos \alpha kl) - \sin kl](1 - \cos kl)}{kl \cdot \cos kl - \sin kl} - (1 - \cos \alpha kl) \right\} + \frac{M}{P_{II}} \left[ \frac{(kl \sin kl + \cos kl - 1)(1 - \cos kl)}{kl \cos kl - \sin kl} + \sin kl \right]$$

$$y_0''' = \frac{P_y}{kP_{II}} \left[ \frac{kl(\alpha - 1 + \cos \alpha kl) - \sin \alpha kl}{kl \cdot \cos kl - \sin kl} \right] - \frac{M}{P_{II}} \left[ \frac{kl \sin kl + \cos kl - 1}{kl \cos kl - \sin kl} \right],$$

где  $\alpha = \frac{l-a}{l}$ ;  $a$  – координата приложения поперечной нагрузки.

Учитывая, что на опоре в начале координат приложен растягивающий момент, необходимо определить начальный параметр  $y_0''$ . Дифференцируя (26), находим

$$y_{II}'' = -y_0'' k^2 \cos kx - y_0''' k^2 \sin kx. \quad (27)$$

После умножения (27) на жесткости изгибную и растягивающую, получим уравнение изгибающего момента на I участке с учетом

$$EJ_x = \frac{M_{II}}{y_2''}; \quad EF = \frac{M_{II} \cos \alpha}{y_2''};$$

получим

$$EI \cdot y_2'' = M_{II}(x); \quad EF \cdot y_2'' = M_{II}(x) \cdot \cos \alpha. \quad (28)$$

Если учесть, что при  $x=0$ ,  $M_I(0) = M$ , то из (28) следует

$$y_0'' = -\frac{P_y \cdot y_2}{EI} + \frac{P_{II} \cdot e}{EF}, \quad y_2 = r_0 \cdot \varphi_k.$$

С учетом функции влияния поперечной нагрузки

$$f(x) = -\frac{P_y(x-a)}{P_{x1}} + \frac{P_y}{kP_{x1}} \sin k(x-a),$$

окончательно уравнения прогибов по участкам принимают вид

$$\left. \begin{aligned} y_I(x) &= -\frac{P_y}{P_{x1}} [A(1 - \cos kl) - (1 - \cos \alpha kl)]x + \frac{M}{P_{x1}} [B(1 - \cos kl) - \sin kl]kx - \\ &\quad - \frac{M}{P_{x1}} (1 - \cos kx) + \left( \frac{P_y \cdot A}{P_{x1}} - \frac{M \cdot B}{P_{x1}} \right) (kx - \sin kx) \\ y_{II}(x) &= y_I(x) - \frac{P_y}{P_{x1}} (x-a) + \frac{P_y}{k \cdot P_{x1}} \sin k(x-a) \end{aligned} \right\}$$

где  $A = \frac{kl(\alpha - 1 + \cos \alpha kl) - \sin \alpha kl}{kl \cos kl - \sin kl}$ ,  $B = \frac{kl \sin kl + \cos kl - 1}{kl \cos kl - \sin kl}$ .

На основе результатов численных решений системы (23) и расчетной схемы проведены расчеты прогибов и точности обработки вала съемника, представленные на рис. 12.

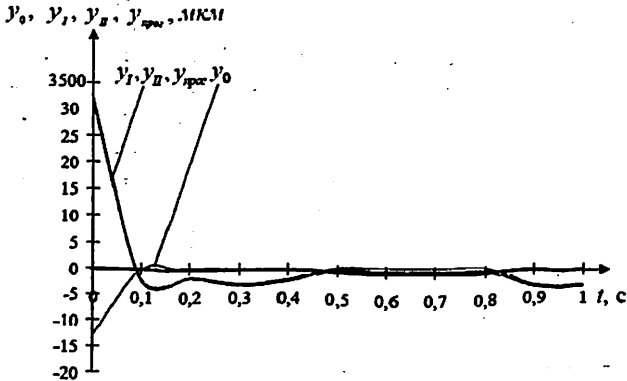


Рис.12. Характер изменения точности ТС шлифования

В процессе управления по быстрдействию определены значения оптимальных параметров функционирования ТС обработки. Полученные результаты позволили установить энергетические состояния и баланс между исполнительным органом и силой резания в процессе шлифования, что позволяет значительно сократить расходы материальных и энергетических ресурсов. Разработанный программный комплекс обеспечивает необходимые оптимальные параметры функционирования ТС шлифования ДМЖ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные положения и результаты, полученные в рамках диссертационной работы, сводятся к следующим:

1. В результате проведенного системного анализа методов управления технологическими системами механообработки ДМЖ, выявлено, что к факторам, которые необходимо учитывать, следует отнести относительно низкую жесткость детали и металлообрабатывающего оборудования, а также собственные упругие деформации ДМЖ, приводящие к отклонениям формы и ухудшению качества обрабатываемых поверхностей деталей.

2. Установлено, что влияние факторов на точность обработки требует изучения механизма образования погрешностей при обработке деталей в упругодеформированном состоянии, разработки методов расчета точности и математического описания процесса обработки с учетом динамических характеристик технологических систем. Показано, что классификация способов управления ТС механической обработки деталей малой жесткости должна базироваться на методах создания упругодеформированного состояния деталей и комплексного воздействия на технологическую систему.

3. Из анализа разработанных математических моделей и аналитически построенных зависимостей изменения упругих прогибов деталей при управлении ТС обработки деталей в упругодеформированном состоянии, используя приложение центрального и внецентренного растягивающих усилий, а также продольно-поперечного изгиба, следует, что теоретически заданной точности механической обработки можно достичь путем управления по двум параметрам, величина упругих прогибов при этом может быть уменьшена, составляет  $(3-4,5) \cdot 10^{-2}$  мм и практически стабилизирована по всей длине.

4. В процессе исследования и управления функционированием ТС при формообразовании деталей малой жесткости установлено, что равномерность движения обрабатываемого вала зависит от величины моментов сил резания. Изменение моментов сил резания приводит к отклонению от заданного угловой скорости обрабатываемого вала и времени переходного процесса. Это означает, что увеличение моментов сил резания для заданных параметров обрабатываемого вала резко влияет на ожидаемую точность обработки. Поэтому для заданных значений моментов инерции вращающихся масс, коэффициентов жесткости и вязкого сопротивления обрабатываемого вала определены соответствующие движущий момент и момент сил резания.

5. Произведенная на основе методологии IDEF0 декомпозиция, отражающая иерархическую структуру моделей технологической системы, позволила исследовать параметры и характеристики процесса обработки ДМЖ, оценить энергетическое состояние и разработать алгоритмы оптимального управления ТС механообработки маложестких деталей.

6. Разработанные математические модели при управлении точностью обработки вала съемника оборочного аппарата и оптимизация параметров при продольно-поперечном изгибе, на основе установленных

закономерностей позволили определить значения растягивающих сил, изгибающих моментов и прогибов вала по участкам в процессе обработки.

7. Разработанные методы управления ТС обработкой ДМЖ за счет внецентренного растяжения продольной силой и за счет приложения изгибающих моментов обеспечивают повышение точности обработки на порядок по сравнению с предыдущими разработками. В результате численных решений ММ определены оптимальные значения переходных процессов, а также функциональных, конструктивно-технологических и геометрических параметров обрабатываемого вала и ТС.

8. Построенная 3D модель детали в процессе шлифования, позволяющая графически отображать моделируемую систему, решает задачи создания геометрии модели; определения физико-механических свойств, определения граничных условий. Выполненные для различных положений инструмента и вариантов приложения силы, расчеты вала выявляют, что максимальные значения деформаций наблюдаются в радиальном направлении, затем – в тангенциальном и наименьшие – в осевом, при этом наибольшие величины соответствуют середине детали.

9. Разработаны методы моделирования и управления технологическими системами механической обработки на основе принципа максимума Понтрягина. Использование разработанных методов оптимального управления обеспечивает определение оптимальных функциональных параметров обрабатываемых деталей, позволили повысить точность размеров и формы обрабатываемых изделий в 2-4 раза, величина упругих прогибов для токарной операции снижена до  $1.5 \div 8.7$  мкм и до  $0.2 \div 3.5$  мкм при шлифовании, улучшить технико-экономические показатели обработки и повысить надежность нормального функционирования ТС.

10. Разработанный комплекс программных средств оптимального управления ТС механической обработки деталей малой жесткости, включающий в себя: расчет составляющих силы, определение значения оптимальных параметров обработки, расчет вспомогательных параметров, расчет значений осевой растягивающей силы и прогибов для определения требуемых параметров точности обработки вала, дает решение алгоритмов управления и позволяет автоматизировать процесс проектирования механической обработки. Программы могут быть использованы для обеспечения эффективности проектирования ТС механической обработки деталей.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES  
DSc.27.06.2017.T.07.01 AT TASHKENT UNIVERSITY  
OF INFORMATION TECHNOLOGIES**

---

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

**SULYUKOVA LARISA FARITOVNA**

**METHODS AND ALGORITHMS OF MANAGEMENT OF  
TECHNOLOGICAL SYSTEMS OF SMALL RIGIDITY DETAILS  
MACHINING**

**05.01.02 – System analysis, management and information processing**

**ABSTRACT OF THE DOCTORAL (DSc)  
DISSERTATION OF TECHNICAL SCIENCES**

**Tashkent – 2019**

The theme of doctoral (DSc) dissertation was registered with the number of B2017.1.DSc/T26 at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan.

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](http://www.tuit.uz) and on the website of «ZiyoNet» Information and educational portal [www.ziyo.net](http://www.ziyo.net).

Scientific adviser:

Azimov Bahtiyor Magrupovich  
doctor of technical sciences

Official opponents:

Igamberdiev Husan Zakirovich  
doctor of technical sciences, academician

Ravshanov Normahmad  
doctor of technical sciences, professor

Nurmuxamedov Tolaniddin Ramziddinovich  
doctor of technical sciences, docent

Leading organization:


Tashkent institute of textile and light industry

The defense will take place "29" november 2019 at 14 00 the meeting of Scientific council No. DSc.27.06.2017.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](mailto:tuit@tuit.uz)).

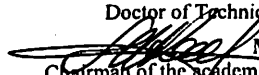
The dissertation can be reviewed at the Information Resource Centre of the Tashkent University of Information Technologies (is registered under No. 42893). (Address: 100202, Tashkent city, Amir Temur street, 108. Tel.: (+99871) 238-64-43, fax: (+99871) 238-65-52).

Abstract of dissertation sent out on "16" november 2019 y.  
(mailing report No. 18 on "3" october 2019 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, Docent

  
M. A. Rahmatullaev  
Chairman of the academic seminar under the  
scientific council awarding scientific degrees,  
Doctor of Technical Sciences, Professor



## **INTRODUCTION (abstract of the dissertation of doctor of science (DSc))**

**The aim of the research work** is the development of methods and algorithms of technological systems control to ensure a given accuracy and surface quality at the machining process of low rigidity parts.

**The object of the research work** is technological system of machining process of the elastically deformed low rigidity parts.

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

the functional structure of models and algorithms of technological systems control of small rigidity details machining, which represent real processes, have been constructed on the basis of use of methodology IDEF0;

calculation schemes are constructed and mathematical models of technological systems control have been developed for the machining of details in dynamic modes;

the algorithms of optimal control of the technological system have been developed to ensure operational, high-quality and resource saving production in the mechanical operation of low rigidity parts;

models of energy state estimating and the correction algorithm of the energy resources management of technology system in the process of machining low-rigidity parts have been developed;

the regularities for ensuring a stable process of machining the elastically deformed low rigidity parts have been determined.

**Implementation of obtained results.**

On the basis of the developed methods and algorithms of optimal control, estimate of the energy state of the technological system of mechanical processing of low rigidity parts:

the developed program complex for optimal control of technological systems of turning and grinding of low rigidity parts has been implemented in the process of automated calculation and design of the shaft machining process at UE SKB «Tractor» (reference of the Ministry of Information Technologies and Communications Development of the Republic of Uzbekistan dated October 12, 2018, № 33-8/7656; «Uzagrotechsanoatxolding» of the Republic of Uzbekistan dated January 15, 2019, № AP-19-02/88). As a result, the automated design process of the puller shaft machining reduced time by 80%. The software package provided the ability to calculate forces in machining the shaft, to determine stiffness values and coefficients of viscous resistance of shafts in torsion and tension to select treatment parameters based on the constructed dynamic models of technological system machining of shaft puller; and also to calculate values of axial tensile forces and deflections to determine the required parameters on precision machining of the shaft.

developed methods of formation and algorithms of optimal control of the machining technological system, calculation of forces and bending moments have been introduced at the enterprise of the JSC "Technolog" (reference of the Ministry of Information Technologies and Communications Development of the Republic of

Uzbekistan dated October 12, 2018, № 33-8/7656; reference of the JSC «Uzagrotechsanoatxolding» of the Republic of Uzbekistan dated January 15, 2019, № AP-19-02/88). The application of the research results allowed to increase the precision of the dimensions and shape of the processed details by 10-15 times, to improve the technical and economic performances of processing.

developed methods of calculating the components of cutting force, the axial tensile force and deflection in turning process the shaft puller of cotton pickers, as well as the method of calculating the optimal values of technological parameters in machining of shaft puller, has been implemented in JSC "BMKB-Agromash» (reference of the Ministry of Information Technologies and Communications Development of the Republic of Uzbekistan dated October 12, 2018, № 33-8/7656; reference of the JSC «Uzagrotechsanoatxolding» of the Republic of Uzbekistan dated January 15, 2019, № AP-19-02/88). The application of research results provided the definition of optimal functional parameters of the workpiece, allows to create the functioning control of the system on pre-existing conditions and to improve dimensional accuracy and shape quality of parts in 2-4 times. The deflection value is reduced to 1.5–8.7  $\mu\text{m}$  during turning process and to 0.2–3.5  $\mu\text{m}$  in grinding;

developed methods and algorithms of optimal control, estimating of energy state of the technological system of machining the shaft puller of cotton picking device of the harvesting machine, methods of forces calculation in turning process, the estimate of the energy state, determining the optimal values of the parameters of workpiece, have been introduced at LLC «KTCSM» in the design process to determine the parameters of the technological process of the shaft puller production (reference of the Ministry of Information Technologies and Communications Development of the Republic of Uzbekistan dated October 12, 2018, № 33-8/7656; «Uzagrotechsanoatxolding» of the Republic of Uzbekistan dated January 15, 2019, № AP-19-02/88). The proposed method of modeling of the technological process by the given conditions is used to obtain higher accuracy of part shape, theoretically specified machining accuracy achieved by controlling two parameters.

**Structure and volume of the dissertation.** The structure of the dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, references and appendices. The volume of the dissertation is 198 pages.

**ЭЪЛОНҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим (I часть; I part)**

1. Азимов Б.М., Сулюкова Л.Ф. Математическое моделирование функционирования и оптимальное управление приводными механизмами машиноиспытательного комплекса //Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». Ташкент, 2009. №2. С.3-7. (05.00.00; №5).

2. Азимов Б.М., Сулюкова Л.Ф., Игамбердиев Ж.Х. Методы моделирования, управления и минимизация материально-энергетических затрат в процессе проектирования механических систем //Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». Ташкент, 2010. №1. С.42-50.(05.00.00; №5).

3. Азимов Б.М., Рузиев Д., Сулюкова Л.Ф. Моделирование и управление процессами функционирования новой компоновки трансмиссии колесных тракторов// Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». Ташкент, 2010. №3. С.8-19. (05.00.00; №5).

4. Азимов Б.М., Кубаев С.Т., Сулюкова Л.Ф. Математическое моделирование и управление движением колесных машин в процессе испытаний// Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». Ташкент, 2010. №5. С.11-18. (05.00.00; №5).

5. Азимов Б.М., Сулюкова Л.Ф. Математическое моделирование и оптимальное управление технологической системой обработки деталей малой жесткости// Справочник. Инженерный журнал. - М.: Машиностроение. 2012. №3. С. 45-51. (05.00.00; №74)

6. Сулюкова Л.Ф. Моделирование и оптимальное управление точноно-шлифовальными процессами обработки нежестких деталей// Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». Ташкент, 2013. № 5-6. (05.00.00; №5).

7. Азимов Б.М., Сулюкова Л.Ф. Расчет составляющих силы резания, растяжения и оптимальное управление технологической системой обработки деталей малой жесткости// Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». Ташкент, 2014. №6. С.15-22. (05.00.00; №5).

8. Сулюкова Л.Ф. Расчет упругодеформированного состояния деталей малой жесткости при токарной обработке на основе результатов моделирования и оптимального управления технологической системой// Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». Ташкент, 2015. №1-2. С.61-67. (05.00.00; №5).

9. Азимов Б.М., Сулюкова Л.Ф. Расчет составляющих сил резания, растяжения и оптимальное управление точноно-шлифовальными процессами обработки валов малой жесткости//Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». Ташкент, 2015. №3-4. С.63-73. (05.00.00; №5).

10. Сулюкова Л.Ф. Принцип адаптивного управления технологическим процессом обработки нежестких деталей с использованием математических методов теории нечетких множеств// *Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики»*. Ташкент, 2016. №1. С.49-55. (05.00.00; №5).

11. Сулюкова Л.Ф. Адаптивное управление технологическим процессом упругодеформированных нежестких деталей в условиях неопределенности// *Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики»*. Ташкент, 2016. № 2. С.60-66. (05.00.00; №5).

12. Азимов Б.М., Сулюкова Л.Ф. Расчет и оптимальное управление технологическими процессами токарной обработки вала съёмника уборочного аппарата хлопкоуборочной машины// *Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики»*. Ташкент, 2016. № 3. С.46-58.(05.00.00; №5).

13. Азимов Б.М., Сулюкова Л.Ф. Оптимальное управление точношлифовальными процессами обработки вала съёмника хлопкоуборочной машины и их энергетическое состояние// *Журнал «Проблемы вычислительной и прикладной математики»*. Ташкент, 2017. №3. С.7-16. (05.00.00; № 23).

14. Azimov B.M., Sulyukova L.F. Optimal Control of Grinding Processes of Non-Rigid Shafts in Elastically Deformed State. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. Vol. 1210. 2019. (№3) Scopus, CiteScore 2019=0.51.

15. Azimov B.M., Sulyukova L.F. Methods for optimal control of grinding processing accuracy on low rigidity shafts. Journal of Engineering Science and Technology. School of Engineering, Taylor's University. Vol.13, № 12. December 2018. P.3995-4009. (№3) Scopus, CiteScore 2018=0.78.

16. Sulyukova L.F. Information approach in constructing mathematical models and in control of technological systems for processing the low rigidity parts// *International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJJET)*. Vol.11, Issue 1, August 2018. P. 22–27. (№5), Global Impact Factor, IF= 0.652.

17. Sulyukova L.F. Construction of mathematical models of technological systems of elastically deformed nonrigid shafts turning// *International journal of advanced research in science, engineering and technology*. Vol. 5, Issue 9, September 2018.P.6702–6706. India (05.00.00; №8).

## II бўлим (Ичасть; IIpart)

18. Azimov B. M., Sulyukova L. F. The Calculation and Optimal Control by the Technological Processes of a Cotton-Harvester Machine Harvester Device Puller Shaft Turning Processing// *American Journal of Science and Technology*. Vol. 4. № 1. American Association for Science and Technology, 2017. P. 5–12.

19. Азимов Б.М., Сулюкова Л.Ф. Расчет и поиск оптимальных параметров управления технологическими процессами токарной обработки мало жестких деталей/ Сборник Республиканской научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы применения информационных технологий в управлении». Джизак, 5-6 сентября 2016 г.С.29-35.

20. Сулюкова Л.Ф. Моделирование и алгоритм управления процессами механообработки нежестких деталей // *Материалы XVII Международной*

научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии». Том 3. Воронеж, Издательство «Научно-исследовательские публикации», ООО «Вэлборн». 2017. С. 417-423.

21. Сулюкова Л.Ф. Моделирование и управление точильно-шлифовальными процессами обработки нежестких деталей/ Современное состояние и перспективы развития информационных технологий: Доклады Республиканской научно-технической конференции, Ташкент, 5-6 сентября 2011 г. Т.2. С.139-143.

22. Сулюкова Л.Ф. Методы моделирования и оптимального управления технологическими системами. 5-ая Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии, системы и приборы в АПК». АГРОИНФО-2012, 10-11 октября 2012. Новосибирск, 2012.

23. Azimov B.M., Sulyukova L.F. Development of modern modeling and technology systems control methods on the basis of IDEF methodology. Восьмая всемирная конференция WCIS 2014 «Интеллектуальные системы для индустриальной автоматизации». Ноябрь 25-27, 2014. Ташкент. С. 51-54.

24. Салихов З.М., Азимов Б.М., Сулюкова Л.Ф., Кубаев С.Т., Мамиров У. Иерархическая структура моделирования и управления машиноиспытательными системами на основе IDEF методологии// Республиканская научно-техническая конференция «Моделирование и управление в реальном секторе экономики». 23-26 сентября 2009г. Совместный выпуск. Ташкент, 2009. С.246-250.

25. Азимов Б.М., Усманов И.И., Сулюкова Л.Ф., Саидов С.А. Моделирование движения направляющих колес хлопкоборочной машины МХ-1.8 и выбор критерий оптимальности управления// Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». Ташкент, 2012. №2-3. С.42-46.

26. Азимов Б.М., Усманов И.И., Сулюкова Л.Ф., Саидов С.А. Оптимальное управление движением направляющих колес хлопкоборочной машины МХ-1.8// Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». Ташкент, 2012. №4-5.

27. Абдазимов А.Д., Азимов Б.М., Сулюкова Л.Ф. Условия качения направляющих колес полунавесной хлопкоборочной машины МХ-1.8// Международной научно-практической конференции «Техника будущего: перспективы развития сельскохозяйственной техники». КубГАУ. 15-16 мая 2013 год. Краснодар, 2013. С.149-150.

28. Сулюкова Л.Ф. Методы оценки точности переходных процессов и частотных характеристик при управлении технологической системой обработки нежестких деталей/ Современное состояние и перспективы применения информационных технологий в управлении: Доклады Республиканской научно-технической конференции, Ташкент, 7-8 сентября 2015г. Центр разработки программных продуктов и аппаратно-программных комплексов при ТУИТ. Ташкент, 2015. С.231-241.

29. Азимов Б.М., Бахадиров Г.А., Сулюкова Л.Ф. Моделирование и управление функционированием привода валковой технологической машины/ Тезисы докладов Республиканской научно-технической конферен-

ции «Современное состояние и перспективы применения информационных технологий в управлении». Ташкент, 5-6 сентября 2017 г. С.83-89.

30. Азимов Б.М., Сулюкова Л.Ф., Рузикулов А.Р. Программа расчета составляющих силы резания, значений осевой растягивающей силы и прогиба при точении вала съёмника хлопкоуборочной машины. Зарегистрирован в государственном реестре программ для электронно-вычислительных машин Республики Узбекистан, в г. Ташкенте, 09.12.2016г. Агентство по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан. Свидетельство № DGU 04103.

31. Азимов Б.М., Сулюкова Л.Ф., Рузикулов А.Р. Пахта териш машинасининг ажраткичи валини силликлашда технологик параметрларнинг оптимал қийматларини ҳисоблаш дастури. ЎзР интеллектуал мулк агентлиги. ЭҲМ учун дастурни рўйхатдан ўтказиш ҳақида қарор. № DGU 20170539. 14.08.2017 й.

**Автореферат «Ҳисоблаш ва амалий математика муаммолари» илмий журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди ҳамда ўзбек, рус ва инглиз тилларида гиматнларини мослиги текширилди.**

**Бичими 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Рақамли босма усули. Times гарнитураси.  
Шартли босма табоғи: 4. Адади 100. Буюртма № 82.**

**Гувоҳнома геестр № 10-3719**

**“Тошкент кимё технология институти” босмаҳонасида чоп этилган.  
Босмаҳона манзили: 100011, Тошкент ш., Навоий кўчаси, 32-уй.**