

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/30.12.2019. Т.03.04 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

ШАХОБУТДИНОВ РУСТАМ ЭРКИНБАЕВИЧ

**ИХТИЁРИЙ ДИАМЕТРДАГИ ШАРЛАРНИ ПРОКАТЛАШДАГИ ВИНТСИМОН
КАЛИБРЛАРНИ КЕСУВЧИ КУЛАЧОКЛИ ТИЗИМ МЕХАНИЗМЛАРИНИ
КИНЕМАТИКАСИ ВА ДИНАМИКАСИНИ МОДЕЛЛАШТИРИШ**

**05.02.02 – Механизмлар ва машиналар назарияси. Машинашунослик ва машина
деталлари**

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

ТОШКЕНТ – 2022

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси
автореферати мундарижаси**

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

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

Шахобутдинов Рустам Эркинбаевич

Ихтиёрий диаметрдаги шарларни прокатлашдаги винтсимон калибрларни кесувчи кулачокли тизим механизмларини кинематикаси ва динамикасини моделлаштириш3

Шахобутдинов Рустам Эркинбаевич

Моделирование кинематики и динамики кулачковых механизмов режущих систем витовых калибров для прокатки шаров произвольного диаметра19

Shaxobutdinov Rustam Erkinbayevich

Modeling of kinematics and dynamics of cam mechanisms of cutting systems of screw gauges for rolling balls of arbitrary diameter36

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works40

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/30.12.2019. Т.03.04 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

ШАХОБУТДИНОВ РУСТАМ ЭРКИНБАЕВИЧ

**ИХТИЁРИЙ ДИАМЕТРДАГИ ШАРЛАРНИ ПРОКАТЛАШДАГИ ВИНТСИМОН
КАЛИБРЛАРНИ КЕСУВЧИ КУЛАЧОКЛИ ТИЗИМ МЕХАНИЗМЛАРИНИ
КИНЕМАТИКАСИ ВА ДИНАМИКАСИНИ МОДЕЛЛАШТИРИШ**

**05.02.02 – Механизмлар ва машиналар назарияси. Машинашунослик ва машина
деталлари**

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

Тошкент – 2022

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида № В2017.1.PhD/Г74 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ислон Каримов номидаги Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (www.tdtu.uz) ва «ZiyoNET» Ахборот таълим порталида (www.ziyounet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Каримов Расуль Исмокович

техника фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Алимухамедов Шавкат Пирмухамедович
техника фанлари доктори, профессор

Абдукаримов Абдусалом
техника фанлари номзоди, доцент

Етакчи ташкилот:

Наманган муҳандислик қурилиш институти

Диссертация ҳимояси Тошкент давлат техника университети ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.03/30.12.2019. Т.03.04 рақамли Илмий кенгашнинг 2022 йил «26» феврал соат 11⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100095, Тошкент ш., Университет кўчаси, 2-уй. Тел./факс: (99871) 246-46-00/ 227-10-32, e-mail: tadqiqotchi@tdtu.uz).

Диссертация билан Тошкент давлат техника университети Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (244 рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100095, Тошкент, Университет кўчаси, 2-уй. Тел.: (99871) 246-03-41).

Диссертация автореферати 2022 йил « 11 » 02 тарқатилди.
(2022 йил « 11 » 02 даги 135 рақамли реестр баёниномаси)



Б.А. Каримов
Илмий даражалар берувчи
Илмий кенгаш раиси,
техника фанлари доктори, профессор

Ш.Б. Ташбулатов
Илмий даражалар берувчи
Илмий кенгаш илмий котиби,
техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)

А.А. Мухитдинов
Илмий даражалар берувчи Илмий
кенгаш қошидаги Илмий семинар
раиси, техника фанлари доктори, профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда руда ва маъданларни майдалашда қўлланиладиган шарларнинг ейилишбардошлигини ошириш, шарларни прокатлашда кулочокли механизмларнинг ишлаш принципини такомиллаштириш асосида ресурс тежамкор технологиялар ишлаб чиқиш алоҳида аҳамият касб этмоқда. Шу билан бирга ихтиёрий диаметрдаги шарларни прокатлашда кесувчи кулочокли механизмларни такомиллаштириш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади. Шу билан бир қаторда кулочокли тизим механизмларини динамик моделини ишлаб чиқиш муҳим вазифа ҳисобланади. Бу борада дунёнинг қатор мамлакатларида, жумладан саноати ривожланган АҚШ, Германия, Франция, Россия ва Украина давлатларида прокат шарларини ишлаб чиқаришда қўлланиладиган кулочокли механизмларни ишлаб чиқишга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Жаҳонда прокатлаш шарларининг хоссаларини ошириш, уларни ишлаб чиқаришда технологияларни модернизациялаш эвазига шарларни олишда ресурстежамкор технология яратиш ва шарларнинг эксплуатацион хоссаларини ошириш бўйича кенг қўлламада илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда. МДХ давлатларида, жумладан Россия, Украина ва Ўзбекистонда прокат шарларини ишлаб чиқаришда энергия ва ресурс тежамкорлигини таъминлайдиган технологияларни қўллаш муҳим аҳамият касб этмоқда. Шу билан бирга прокат шарларини ишлаб чиқаришда қўлланиладиган кулочокли механизмларининг конструкцияларини такомиллаштириш учун уларнинг моделини ишлаб чиқиш зарур вазифа ҳисобланади.

Республикада маъдан конлари маҳсулотларини майдалаш ва қайта ишлаш учун қўлланиладиган прокат шарларини олиш технологиясини такомиллаштириш бўйича кенг қамровли ишлар амалга оширилиб, муайян натижаларга эришилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида жумладан “... макроиктисодий барқарорликни мустаҳкамлаш ва юқори иқтисодий ўсиш суратларини сақлаб қолиш, миллий иқтисодиётнинг рақобатбардошлигини ошириш, ... иқтисодиётда энергия ва ресурслар сарфини камайтириш, ишлаб чиқаришга энергия тежайдиган технологияларни кенг жорий этиш”¹ бўйича муҳим вазифалар белгилаб берилган. Ушбу вазифаларни амалга оширишда, жумладан, прокат шарларини ишлаб чиқишда кесувчи кулочокли механизмларни ишлаб чиқиш муҳим аҳамият касб этмоқда.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 26 майдаги ПҚ-3012 «2017-2021 йилларда ижтимоий ва иқтисодий соҳада эффективликни ошириш, қайта тикланадиган энергияни ривожлантириш бўйича чоратадбирлар дастурида»ги Қарорида, 2016 йил 26 декабрдаги ПҚ-2698-сон

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

«2017-2019 йилларда тайёр махсулот турлари, бутловчи буюмлар ва материаллар ишлаб чиқаришни маҳаллийлаштириш истиқболли лойиҳаларини амалга оширишни давом эттириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарори, 2018 йил 27 апрелдаги ПҚ-3682-сон «Инновацион ғоялар, технологиялар ва лойиҳаларни амалий жорий қилиш тизимини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарори ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг Республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республикада фан ва техникани ривожлантиришнинг устувор йўналиши П. "Энергия, энергия ва ресурсларни тежаш" устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Дунё олимлари томонидан кулачокли механизмнинг тузилиши, кинематикаси ва динамикасини такомиллаштириш бўйича тадқиқотлар олиб борилган. Дунёнинг етакчи олимлари И.И. Вулфсон, Ю.В. Ворбьёв, Н.П. Бруевич ва бошқалар кулачокли механизмларни турли динамик ва технологик омилларни ҳисобга олган ҳолда лойиҳалаш усулларини ишлаб чиқишган.

МДХ олимлари И.И. Артоболевский, В.Ф. Юдин, В.Т. Швецов, В.М. Кунявский ва бошқалар кулачокли механизмларнинг кинематикаси ва динамикасини моделлаштириш масалаларни ечишга муваффақ бўлишган.

Республикамизда кулачокли механизмларнинг кинематикаси ва динамикасини моделлаштириш бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида механизмларнинг янги кинематик схемалари ишлаб чиқилган. Жумладан, академик Ҳ.Ҳ.Усмонхўжаев ва унинг шогирдлари Ғ.С.Қўзибаев, Ш.У.Раҳматқориев, А.А.Ризаев, Ш.П.Алимуҳаммедов, А.Жўраев, К.А.Каримов, Р.И.Каримов, С.Б.Ерафеев ва бошқалар томонидан кулачокларнинг турли юкланишлардаги ҳаракатларнинг моделлари ишлаб чиқилган.

Шу билан бирга, кулачок ҳаракатининг барча фазаларини тавсифловчи ягона математик моделларни яратиш, туртгичга таъсир қилувчи ўзгарувчан технологик кучларни ҳисобга олган ҳолда, кулачокли механизм бўғинлари юкланишини аниқлаш, ушбу моделларни компьютерга тадбиқ этиш дастурлари тўлақонли кўриб чиқилмаган. Шу билан бирга винтли калибрларини оқилона лойиҳалаш кулачокли механизмлар назариясини такомиллаштиришсиз амалда мумкин эмас. Жумладан, ИФТОММ томонидан кулачокли механизмларини лойиҳалашни такомиллаштириш долзарблиги таъкидланган. Шу сабабли, ҳақиқий технологик омилларни ҳисобга олган ҳолда, кулачокли механизмларини лойиҳалаш усулларини такомиллаштириш жуда муҳим вазифа ҳисобланади.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Тошкент давлат техника университетининг илмий–

тадқиқот ишлари режасининг ИТД-3-53 «Ихтиёрий диаметрдаги шарларни прокатлаш мақсадида винтли калибрларни қирқиш учун кулачокли механизмни яратиш ва лойихалаш тизимини ишлаб чиқиш» (2012-2014 йй.) мавзусидаги амалий лойихаси, «Диаметри 70 мм шар прокатлаш мақсадида бандаж вали винтли калибрини таёрлашда токарли винт қирқиш дастгоҳи учун кулачок нусхалаш ва чашкали кескич тайёрлаш ва ишланмалари» («Ўзметкомбинат» АЖ, 2017-2021 йй.) мавзусидаги хўжалик шартномаси доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади винтли калибрларни кесувчи тизим кулачокли механизмларининг кинематикаси ва динамикасини моделлаштиришдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари қуйидагидан иборат:

текис кулачокли механизм турткичининг ҳаракатланиш қонуниятларини тавсифловчи функционал муносабатларни ишлаб чиқиш;

аксиал, дезаксиал ва турткичи текис кулачокли механизмларни нисбий тезликларини аниқлаш мақсадида аналитик тенгламаларни тузиш;

аксиал, дезаксиал ва турткичи текис кулачокли механизмларни кучга ҳисоблаш методикасини яратиш;

аксиал, дезаксиал ва турткичи текис кулачокли механизмларни синтез қилиш методикасини такомиллаштириш;

пўлат майдалаш шарларини прокатлаш учун шарпрокатлаш валокларини калибровкасини ишлаб чиқиш;

техник ишланмани ишлаб чиқиш ва шарпрокатлаш валокларини кесиш учун профили назарий асосланган кулачокларни тайёрлаш;

тайёрланган кулачокларни мустақамликка ҳисоблаш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида винтли калибрларни кесувчи тизим уч турдаги кулачокли механизмлар қабул қилинган.

Тадқиқот предметини винтли калибр ариқчасининг талаб этилган радиусини таъминловчи кулачок профилини синтез қилишдан иборат.

Тадқиқот усуллари. Тадқиқот жараёнида назарий ва амалий механика, механизмлар ва машиналар назарияси, ариқчалар марказлари силжиган винтли калибри икки қиримли шарпрокатлаш валокларини калибровкалаш умумий усулларидадан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

- икки қиримли винтли калибрларининг ариқчалар маркази силжиган валокларни ишлаб чиқариш технологияси ариқчалар маркази кадамининг ўзгарувчанлик даражаси асосида ишлаб чиқилган;

- икки қиримли винтли калибрларининг ариқчалар маркази силжиган валокларни кесиш учун кулачокларни ишлаб чиқиш технологияси олинаётган шарларнинг диаметрига нисбатан винтли калибр ариқчаларининг диаметрларини мослиги асосида ишлаб чиқилган;

- кулачокнинг тўрт ҳаракатланиш фазалари учун турткичнинг силжиши, тезлиги ва тезланишларини аниқлаш математик моделлари силжиш параметрларининг ўзгариш динамикаси асосида ишлаб чиқилган;

- аксиал, дезаксиал ва турткичи текис кулачокли механизмлар учун нисбий тезликларни аниқлаш аналитик тенгламалари тезликларнинг ўзаро нисбатлари асосида ишлаб чиқилган;

- технологик қаршилик кучларни ҳисобга олган ҳолда кулачокли механизм кинематик жуфтларидаги реакция кучларини аниқлаш учун аналитик тенгламалар қаршилик кучларининг ўзгариш характери асосида ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

ГОСТ 7524-2015 га мувофиқ диаметри 70 мм бўлган пўлат шарларни прокалаш учун икки киримли винтли калибрлар ариқчалари маркази силжиган валокларни калибровкакаш методикаси ишлаб чиқилди.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги ишлаб чиқаришга жорий этиш ва экспериментал тадқиқотлар натижасида олинган маҳсулотнинг мавжуд аналоглар билан солиштириш орқали статистик ишлов бериш, натижаларни реал иқтисодий самара берувчи ишлаб чиқаришга жорий этиш маълумотларига асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти кулачокнинг тўрт ҳаракатланиш фазаси учун турткичининг силжиши, тезлиги ва тезланишини аниқлаш, технологик қаршилик кучини ҳисобга олган ҳолда кинематик жуфтлардаги реакцияларни аниқлаш ва аксиал, дезаксиал ва турткичи ясси кулачокли механизмларни лойиҳалашни илмий асослашдан иборат.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти икки киримли винтли калибрларининг ариқчалар маркази силжиган валокларни ишлаб чиқариш технологиясининг ишлаб чиқаришга жорий этилишида иқтисодий самараси билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Ихтиёрий диаметрдаги шарларни прокатлашдаги винтсимон калибрларни кесувчи кулачокли тизим механизмларини кинематикаси ва динамикасини моделлаштириш бўйича назарий ва экспериментал тадқиқотлар асосида:

икки киримли винтли калибрларнинг ариқчалар маркази силжиган валокларни ишлаб чиқариш технологияси “Ўзметкомбинат” АЖ га жорий этилган («Ўзметкомбинат» аксиядорлик жамиятининг 1 июнь 2021 йилдаги № 01-1/1181 -сон маълумотномаси). Натижада диаметри 70 мм бўлган майдаловчи пўлат шарларни ишлаб чиқариш йўлга қўйилиб, шарларнинг иш унумдорлиги 1,7-1,8 мартага ошган;

икки киримли винтли калибрларининг ариқчалар маркази силжиган валокларни кесиш учун профили назарий асосланган кулачокларни яратиш технологияси жорий этилган “Ўзметкомбинат” АЖ га жорий этилган жорий этилган («Ўзметкомбинат» аксиядорлик жамиятининг 1 июнь 2021 йилдаги № 01-1/1181 -сон маълумотномаси). Натижада бир киримли валокларга нисбатан майдаловчи пўлат шарларни прокатлашдаги иш унумдорлигини 1,8-2 мартага ошган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертациянинг тадқиқот натижалари 18 та, жумладан 13 та халқаро ва 5 та Республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 28 та илмий иш чоп этилган. Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 7 та мақола, жумладан, 4 таси Республика ва 3 таси хорижий журналда нашр этилган. Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлиги томонидан 2 та дастурий маҳсулотга гувоҳнома, 1 та фойдали моделга патентлар берилган ва 1 та монография нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертациянинг таркиби кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 120 бетни ташкил этади.

Диссертация ишимни илмий жиҳатларини ёзишда марҳум устозим т.ф.д., проф. Р.И. Каримовнинг вафотларидан сўнг менга кўрсатган ёрдамлари учун т.ф.д., проф. К.А. Каримовга ўз минатдорчилигимни билдираман.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзуси бўйича ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурияти асосланган, Ўзбекистон Республикаси фан ва технологияси тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқот мақсади ва вазифалари шакллантирилган, тадқиқот объекти ва предметлари аниқланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён этилган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланган, уларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиқ берилган, тадқиқот натижаларининг амалиётга жорий қилинганлиги, ишнинг апробация натижалари, эълон қилинган ишлар ва диссертациянинг тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Кулачокли механизмлар кинематикаси ва динамикаси ҳамда шарпрокатлаш валоклардаги арикчаларнинг шаклланиш жарайёнлари бўйича бажарилган ишлар таҳлили**» деб номланган биринчи бобида текис кулачокли механизмларнинг кинематикаси ва динамикаси ҳамда шарпрокатлаш валоклардаги арикчаларнинг шаклини ҳосил бўлиш жарайёнини таҳлили бажарилган.

Кулачокли механизмлар ва винтли калибрларда шакл ҳосил бўлиш бўйича изланишлар таҳлили шуни кўрсатадики, текис кулачокли механизмларни лойиҳалаш, турткичнинг тўрт фазаси учун аналитик тенгламаларни тузиш, кулачокли механизмлар кинетостатикаси ҳамда ихтиёрий диаметрдаги шарларни ишлаб чиқаришда винтли калибрларни калибровка қилиш технологиялари билан боғлиқ бўлган муаммоларнинг ечими замонавий адабиётларда тўлиқ ёритиб берилмаган.

Диссертациянинг «Текис кулачокли механизмларнинг кинематикасини моделлаштириш» деб номланган иккинчи бобида турткичи илгариланма ҳаракатланувчи кулачокли механизм турткичининг тўрта ҳаракатланиш фаза бурчаклари ҳамда аксиал, дезаксиал ва теккис турткичли кулачокли механизмларнинг нисбий тезликларини аниқлаш аналитик тенгламалари келтирилган.

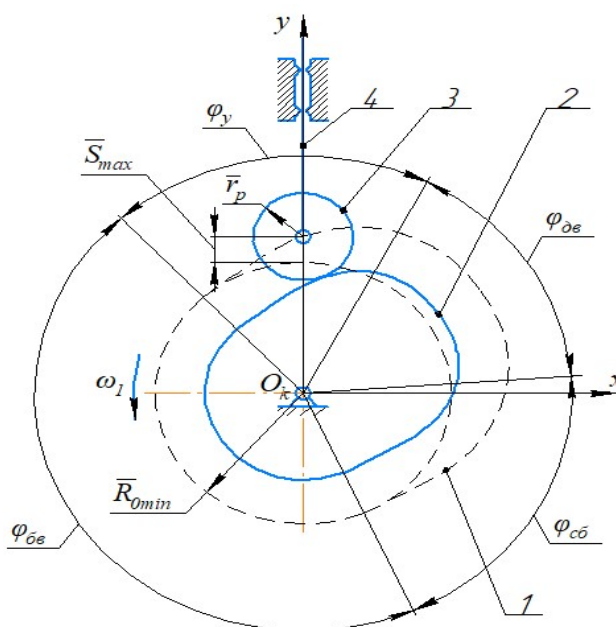
Турли ҳил функцияларни бажарувчи таркибида битта олий кинематик жуфт мавжуд теккис ёки фазовий кулачокли механизмлар технологик машиналарда кенг қўлланилади. Кулачокли механизмда кулачокнинг асосий вазифаси, етакланувчи звено турткичга илгариланма-қайтма ёки илагриланма-тебранма ҳаракатни ҳосил қилиб беришдан иборат. Биз турткичи илгариланма-қайтма ҳаракатланувчи кулачокли механизм кўриб чиқамиз.

1-расмда кулачокли механизм кинематик схемаси келтирилган.

Кулачокли механизмларнинг аксариятида турткичнинг силжиши аналитик кўринишда келтирилиши мумкин. Назарий нуқтаи назардан кулачокли механизмлар орқали турли ҳил ҳаракатланиш қонуниятларни ифодалаш мумкин, лекин амалда фақат кулачок профилига ишлов беришнинг содда технологиясини тامينлайдиган ва кулачокли механизм учун кинематик ва динамик талабларини қаноатлантирадиган ҳаракатланиш қонуниятлардан фойдаланилади. Ушбу қонуниятларни қуйидаги тўрта характерли ҳаракатланиш фаза бурчаглари орқали тадқиқ қилиш қулай: узоклашиш, узокда туриш, яқинлашиш ва яқинда туриш фаза бурчаглари.

Кулачокли механизмнинг берилган $\varphi_y = 120^\circ$, $\varphi_{os} = 60^\circ$, $\varphi_{cs} = 120^\circ$, $\varphi_{cs} = 60^\circ$, $h_{max} = 0.05m$ қийматлари орқали силжиши, тезлик аналоги ва тезланиш аналоглари қийматларини тенгтезланувчан, косинусоидал, чизиқли камаювчи ва синусоидал ҳаракатланиш қонуниятлари учун аналитик тенгламалар тузилиб, MathCAD 15 мухитида график кўринишдаги натижалар олинди. (2-5 расмлар).

Кулачокли механизмни ишлаш жараёнида олий кинематик жуфтлик элементларида ёйилиш пайдо бўлади. Кулачок профилининг ёйилишида асосий омиллардан бири нисбий сирпаниш тезлиги ҳисобланиб, ўз

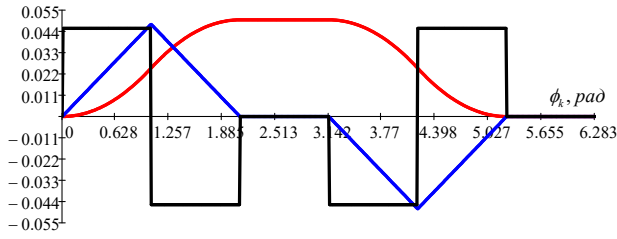


1-расм. Турткичи илгариланма-қайтма ҳаракат қилувчи кулачокли механизм кинематик схемаси

1-назарий профил, 2-амалий профил, 3-ролик, 4-турткич штангаси

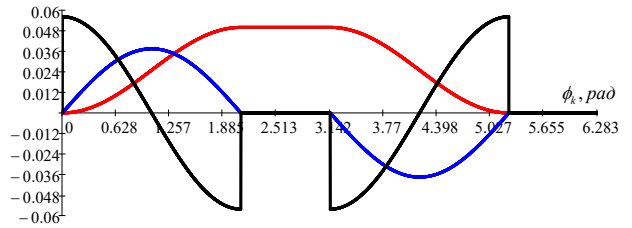
навбатида профилнинг турига, яъни турткичининг қонуният турига боғлиқ бўлади. Кулачок-турткич олий кинематик жуфтидаги нисбий сирпаниш

$$s_r(\phi_k), s_r'(\phi_k), s_r''(\phi_k), m$$



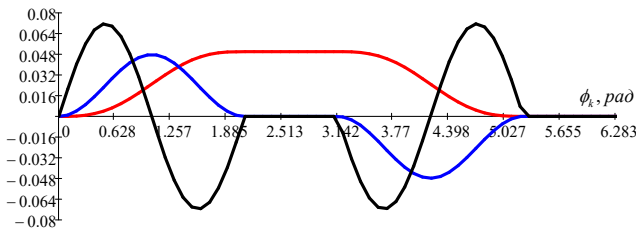
2-расм. Турткичининг текис тезланувчан ҳаракатланиш қонуниятида силжиш, тезлик ва тезланиш аналогининг ўзгариш графиклари

$$s_r(\phi_k), s_r'(\phi_k), s_r''(\phi_k), m$$



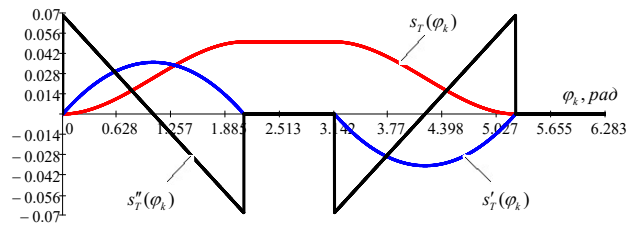
3-расм. Турткичининг косинусоидал ҳаракатланиш қонуниятида силжиш, тезлик ва тезланиш аналогининг ўзгариш графиклари

$$s_r(\phi_k), s_r'(\phi_k), s_r''(\phi_k), m$$



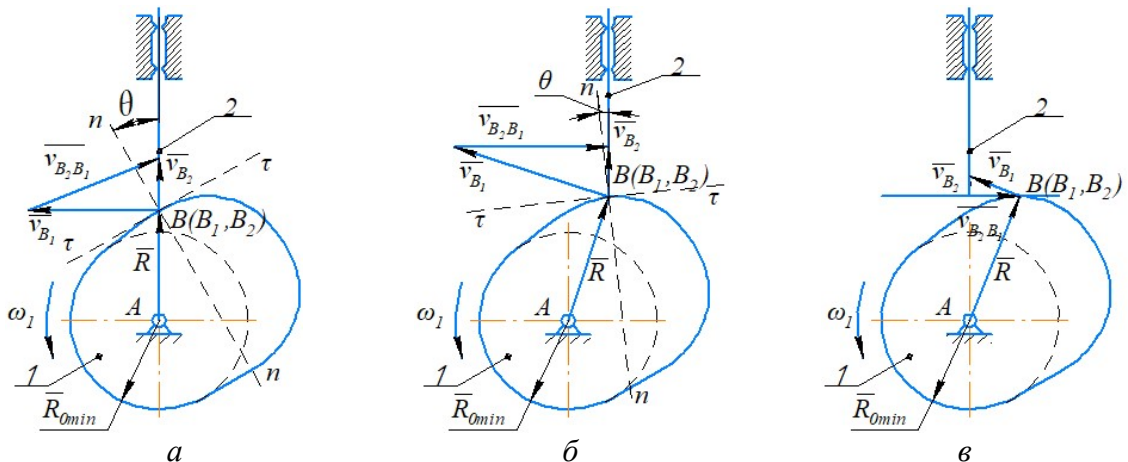
4-расм. Турткичининг синусоидал ҳаракатланиш қонуниятида силжиш, тезлик аналогини ва тезланиш аналогининг ўзгариш графиклари

$$s_r(\phi_k), s_r'(\phi_k), s_r''(\phi_k), m$$



5-расм. Турткичининг чизиқли камаювчи ҳаракатланиш қонуниятида силжиш, тезлик аналогини ва тезланиш аналогининг ўзгариш графиклари

тезлигини аниқлаш учун уч турдаги: аксиал, дезаксиал ва турткичи теккис кулачокли механизмлар кўриб чиқилди. (6-расм а-аксиал, б-дезаксиал, в-турткичи теккис)



6-расм. Кулачокли механизмларнинг кинематик схемалари

Профилнинг емирилишига сабабчи асосий омилларни аниқлаш тузилган аналитик тенгламаларни MathCAD15 муҳити орқали ечиш билан амалга оширилди ва ҳисоблашлар натижасида кулачок-турткич олий кинематик жуфтидаги нисбий тезликнинг қиймати ва ўзгариш қонуниятлари аниқланди.

Механизмнинг конструктив ва кинематик параметрларини тавсифловчи омилларнинг таъсирини тадқиқ қилиш мақсадида, бир хил тезлашган, косинусоидал, чизикли камаювчи ҳамда синусоидал қонуниятларни аниқлаш учун олий кинематик жуфтдаги нисбий сирпаниш тезлигининг қиймати, кулачокнинг бурчак тезлиги, кулачок профилининг минимал радиуси ва турткичнинг максимал силжиш қийматларини ўзгартириш орқали эришилди

Диссертациянинг «Текис кулачокли механизмларни кинетостатик ҳисоблаш» деб номланган учинчи бобида турткич таянчидаги, кулачок-турткич олий кинематик жуфтидаги реакцияларнинг, ҳамда, кулачок валидаги мувозанатловчи моментнинг ўзгариш қонуниятлари келтирилган.

Кулачокли механизмларнинг ишга лаёқатлиги, звеноларининг юкланганлиги билан аниқланади. Бунинг учун уч турдаги: аксиал, дезаксиал ва турткичи текис кулачокли механизмларнинг ҳисобий схемалар тузилди ва кўриб чиқилди.

Кулачокли механизмнинг кинематик жуфтларидаги реакцияларни ва мувозанатловчи моментни аниқлаш учун Даламбер тамоилидан фойдаланилди. Механизмнинг ҳар бир звеноси учун кинетостатика тенгламалари қуйидаги кўринишда тузилди:

аксиал кулачокли механизм учун

$$\begin{cases} R_{Ax} + F_{u1} \cdot \cos \varphi + R_B \cdot \sin \theta = 0 \\ R_{Ay} + F_{u1} \cdot \sin \varphi - R_B \cdot \cos \theta - F_1 = 0 \\ -R_B \cdot \sin \theta \cdot (R_0 + s_T(\varphi_k)) - F_1 \cdot AS_1 \cdot \cos \varphi + M_y = 0 \end{cases} \quad (1)$$

дезаксиал кулачокли механизм учун

$$\begin{cases} R_{Ax} + F_{u1} \cdot \cos \varphi + R_B \cdot \sin \theta = 0 \\ R_{Ay} + F_{u1} \cdot \sin \varphi - R_B \cdot \cos \theta - F_1 = 0 \\ -F_1 \cdot AS_1 \cdot \cos \varphi + M_y - R_B \cdot \sin \theta \cdot (R_0 + s_T(\varphi_k)) - R_B \cdot \cos \theta \cdot e = 0 \end{cases} \quad (2)$$

турткичи текис кулачокли механизм учун

$$\begin{cases} R_{Ax} + F_{u1} \cdot \cos \varphi = 0 \\ R_{Ay} + F_{u1} \cdot \sin \varphi - R_B - F_1 = 0 \\ -R_B \cdot s'_T(\varphi_k) - F_1 \cdot AS_1 \cdot \cos \varphi + M_y = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Турткининг кинетостатика тенгламаси қуйидаги ифодалар орқали аниқланди:

аксиал кулачокли механизм учун

$$\begin{cases} R_D - R_C - R_B \cdot \sin \theta = 0 \\ -R_B \cdot \cos \theta - F_2 + F_{u2} - F_{np} - F_{mc} = 0 \\ R_C \cdot z(t) - R_D \cdot (z(t) + l) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

дезаксиал кулачокли механизм учун

$$\begin{cases} R_D - R_C - R_B \cdot \sin \theta = 0 \\ -R_B \cdot \cos \theta - F_2 + F_{u2} - F_{np} - F_{mc} = 0 \\ R_C \cdot z(t) - R_D \cdot (z(t) + l) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

турткичи текис кулачокли механизм учун

$$\begin{cases} R_D - R_C = 0 \\ -F_2 + F_{u2} - F_{np} - F_{mc} - R_B = 0 \\ R_C \cdot z(t) - R_D \cdot (z(t) + l) + R_B \cdot s'_T(\varphi_k) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Бунда босим бурчаги θ куйидаги формулалар орқали аниқланди:
аксиал кулачокли механизм учун

$$\theta = \operatorname{arctg} \left(\frac{s'_T}{R_0 + s_T} \right) \quad (7)$$

дезаксиал кулачокли механизм учун

$$\theta = \arctan \frac{s'_2 - e}{\sqrt{R_0^2 - e^2 + s_2}} \quad (8)$$

(1)-(8) тенгламаларнинг ечими MathCAD15 муҳитида график ёки сон қиймати кўринишида амалга оширилди.

Диссертациянинг «Текис кулачокли механизмлар синтези» деб номланган тўртинчи бобида, MathCAD муҳитида аксиал, дезаксиал ва турткичи текис кулачокли механизмлар учун кулачокнинг тўрт фазаси профилларни аниқлаш имконини берувчи, профилларини тадқиқ қилиш уларни лойиҳалашни автоматлаштириш масалалари кўриб чиқилган.

Синтез қилиш билан уч турдаги, аксиал, дезаксиал ва турткичи текис кулачокли механизмлар учун кинематик параметрларини аниқлашни кўриб чиқамиз.

Кулачокли механизмларни лойиҳалашда босим бурчаги θ муҳим параметр ҳисобланади.

Турткичи илгариланма-қайтма ҳаракатланувчи аксиал кулачокли механизмда босим бурчаги куйидаги формула орқали аниқланади:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{s'_T}{R_0 + s_T} \quad (9)$$

бу ерда s_T – турткичнинг силжиши, s'_T – турткичнинг тезлик аналоги, R_0 – кулачокнинг марказий профили минимал радиуси.

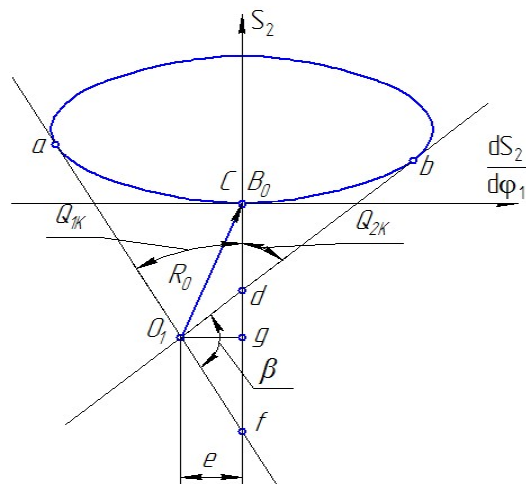
Турткичи илгариланма-қайтма ҳаракатланувчи дезаксиал кулачокли механизм учун:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{s'_T \pm e}{\sqrt{R_0^2 - e^2 + s_T}} \quad (10)$$

бу ерда e – турткич ўқининг силжиши, эксцентриситет.

Кулачокли механизмда босим бурчаги фақат узоқлашиш фаза бурчагида физик маънога эга, чунки куч орқали боғланган механизмда фақат ушбу бурчада кулачок турткични ҳаракатлантиради. Яқинлашиш фаза бурчагида унинг ҳаракати пружинанинг эластиклик кучи ёки турткичнинг оғирлик кучи орқали амалга оширилади. Натижада яқинлашиш фаза бурчагида босим бурчагини руҳсат этилган қийматини ошириш имкони пайдо бўлиши ҳисобига дезаксиални ҳосил қилиш мумкин.

Ушбу ҳисобий схема 7-расмда келтирилган, бунда кулачок соат стрелкаси йўналишига қарама-қарши ҳаракатланади, узоқлашиш фаза бурчагида тезлик аналогиси S_2 га нисбатан чап томонда белгиланган, яқинлашиш фаза бурчагида эса тезлик аналогиси S_2 га нисбатан ўнг томонда белгиланган, бу ерда: af – диаграммага $\theta_{1к}$ бурчак остида ўтказилган уринма, bd – диаграммага $\theta_{2к}$ бурчак остида ўтказилган уринма, O_1 – кулачокнинг айланиш ўқи, e – дезаксиал.



7-расм. Турткич йўли функциясида тезлик аналогиси диаграммаси бўйича босим бурчагининг қийматини аниқлаш

Ҳисобий схемадан минимал радиуснинг қиймати қуйидаги формула орқали аниқлаймиз:

$$R_0 = \sqrt{(B_0 g)^2 + e^2} \quad (11)$$

$B_0 g$ масофани қуйидаги формуладан аниқлаймиз:

$$B_0 g = \frac{S'_T}{\operatorname{tg} \theta_{1к}} - S_T \quad (12)$$

e дезаксиал ифодасини қуйидаги формуладан аниқлаймиз:

$$e = \frac{\sin \theta_{1к} \cdot \left(\left(\frac{S'_T}{\operatorname{tg} \theta_{1к}} - S_T \right) - \left(\frac{S'_T}{\operatorname{tg} \theta_{2к}} - S_T \right) \right)}{\sin(180^\circ - (\theta_{1к} + \theta_{2к}))} \quad (13)$$

Аниқланган босим бурчаклари олдиндан белгиланган θ_k критик қийматидан ошмаслиги керак. Босим бурчагининг критик қиймати лойиҳалаш жараёнида берилади.

Аксиал кулачокли механизм марказий профилининг минимал радиусини бурилиш бурчагининг ўзгаришига боғлиқ ҳолда аниқлаймиз:

$$R_0 = \frac{S'_T}{\operatorname{tg} \theta} - S_T \quad (14)$$

Олинган қийматлардан $R_0(\phi_k)_{\max}$ нинг максимал қиймати танланади ва уни кулачокнинг назарий профилининг минимал радиус-вектори деб қабул қилиниди. Сўнгра R_0 ни қийматини билган ҳолда марказий профильнинг параметрик шаклидаги координаталарини аниқлаймиз:

$$\left. \begin{aligned} x_c &= (R_0 + s'_T) \cdot \cos \phi_1 \\ y_c &= (R_0 + s'_T) \cdot \sin \phi_1 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Ролик радиусини қуйидаги муносабатларга асосан аниқлаш мақсадга мувофиқ:

$$r_p \leq 0,8 \rho_{\min} \quad \text{и} \quad r_p \leq (0,4 \dots 0,5) R_0 \quad (16)$$

(11) – (16) тенгламаларни ечиш MathCAD-15 мухитида амалга оширилди ва тузилган дастур орқали турткичи роликли илгариланма-қайтма

ҳаракатланувчи аксиал, дезаксиал ва турткичи ясси кулачокли механизмнинг профиллари ҳосил қилинди.

MathCAD-15 муҳитида тузилган дастур асосида яратилган методика механизм кулачоги профилини тўрта ҳаракатланиш фазаларининг барчасида аниқлаш имконини беради.

Диссертациянинг «**Шарпрокатлаш валокларини кесиш учун кулачокли механизмни ишлаб чиқиш**» деб номланган бешинчи бобида "Ўзметкомбинат" АЖнинг ишлаб чиқариш шароитида мавжуд прокат ускуналарини таҳлили, ариқчаларининг марказлари силжиган икки киримли винтли калибрга эга шарпрокатлаш валокини калибровкасини ишлаб чиқиш, куч омилларини ҳисобга олган ҳолда кулачокли механизм звеноларининг юкланишини аниқлаш ҳамда кулачок-турткич кинематик жуфтлиги орасидаги контакт кучланишни аниқлаш орқали мустақкамлигини текшириш каби масалалар кўриб чиқилган.

"Ўзметкомбинат" АЖ республикамиздаги тоғ-кон, цемент, энергетика ва олтин қазиб олиш соҳалари учун жуда зарур бўлган майдаловчи пўлат шарларни ишлаб чиқариш бўйича ягона корхона ҳисобланади ва бажарилган илмий-тадқиқот ишларининг ишлаб чиқаришга жорий этиш объекти ҳисобланади.

Майдаловчи пўлат шарлар давлатлар аро стандарт ГОСТ 7524-2015 га асосан ишлаб чиқарилади. Ушбу ГОСТга асосан диаметри 70 мм бўлган майдаловчи шарни номинал диаметри 73 мм га тенг. Майдаловчи пўлат шарларни ишлаб чиқариш шарпрокатлаш стани винтли калибрларида иссиқлайин прокатлаш усули орқали амалга оширилади. Шарпрокатлаш станининг асосий элементи ариқчаларининг маркази силжиган винтли калибрлар кесилган бочка ҳисобланади. Винтли ариқчаларни кесиш махсус нухалаш мослама билан жиҳозланган токарлик винт қирқиш дастгоҳида амалга оширилади. Копир сифатида ясси кулачоклар қўлланилади.

Винтли калибр ариқчалари радиуслари ва кулачок профили орасидаги боғланишни аниқлаш мақсадида «Ўзметкомбинат» АЖ ишлаб чиқариш шароитида мавжуд прокатлаш ускуналарини таҳлили бажарилди. Олиб борилган таҳлил натижасида прокатлаш валокларини лойиҳалашда калибровкалаш усулидан кенг миқёсда фойдаланилиши маълум бўлди.

Айниқса винтли прокатлаш станлари учун валокларни калибровкалашда – технологик жараённинг мураккаблиги ва масъулиятлиги асосий элемент сифатида қабул қилинади, чунки бунда металлнинг деформацияланиш шартлари билан бир қаторда винтли калибр геометриясини ҳамда уни кесиш технологиясини ўта мураккаблигини ҳисобга олиш зарур.

8-расмда токарлик винт қирқиш дастгоҳининг умумий кўриниши келтирилган.

Капирловчи усқунанинг узатиш нисбати $i=35$ га тенг. Шарпрокатлаш валокининг параметрлари қуйидагича: калибр диаметри $D_K=73,5$ мм ;

калибрнинг винтли ариқчалари киримлари сони $Z=2$, заготовканинг узунлиги $L=411$ мм.

ДИП 500 русумли токарлик винт қирқиш дастгоҳини созлаш мақсадида, унинг хужжатида берилган дастгоҳ қадами параметрига яқинроқ бўлган, икки киримли қадамни таъминловчи қийматни ҳисоблаймиз:

$$T_{cm} = \frac{3}{2} \cdot \frac{z_2}{z_1} \cdot T_M = \frac{3}{2} \cdot \frac{114}{106} \cdot 88 = 141,9623 \text{ мм/об} \quad (17)$$

бу ерда: $z_1=106$; $z_2=114$ - тастгоҳ гитараси алмашинувчи ташли ғилдираклар тишлари сони; $T_M=88$ мм/об -

дастгоҳнинг метрик қадами.

Ариқчалари марказлари силжиган винтли калибрнинг асосий қадамини аниқлаш:

$$T_{O.H} = (2 \cdot C + b) \quad (18)$$

бу ерда C - винтли калибрнинг ярим сфераси қалинлиги, b - винтли калибр ребордаси қалинлиги.

Ўнг ва чап валоклар винтли калибрларининг ярм сфераси қалинлиги:

$$C_B = \sqrt{R_k^2 - r_B^2}; \quad C_H = \sqrt{R_k^2 - r_H^2} \quad (19)$$

Ўнг ва чап валокларнинг ариқчалари маркази силжиган винтли калибрларни кесишнинг асосий қадами:

$$T_{O.H.B.} = (2 \cdot C_B + b_B); \quad T_{O.H.H.} = (2 \cdot C_H + b_H) \quad (20)$$

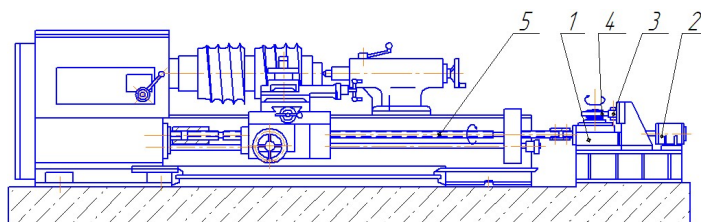
Калибрнинг ихтиёрий кесимидаги сиқилаётган металлни ҳажмини сақланиш шarti:

$$V_{обц} = V_\alpha + V_{C\alpha} + V_{S\alpha-360} + V_{\alpha-360} + V_{C\alpha-360} \quad (21)$$

MathCAD-15 мухитида компьютерда калибровка тенгламалари тузилди ва ГОСТ 7524-2015 бўйича майдаловчи пўлат шарларни прокатлаш учун икки киримли винтли калибрларининг ариқчалар маркази силжиган валокларни геометрик параметрлари аниқланди. График кўринишдаги геометрик параметрлар 9-10 расмларда келтирилган. Икки киримли винтли калибрларининг ариқчалар маркази силжиган валокларни кесиш учун кулачок профиллини яратиш талаб қилинади.

Калибровка ҳисоблаш натижасида, токарлик винт қирқиш дастгоҳи кесувчи асбобининг силжишини акс этувчи математик модел тузилди, унинг асосида кулачоклар конструкциялари ишлаб чиқилди ва тайёрланди.

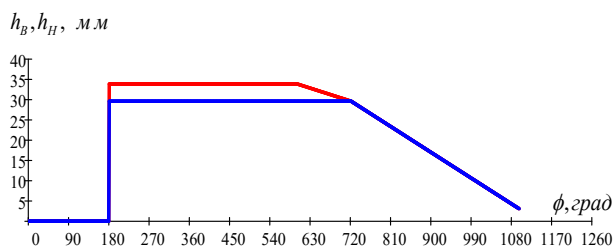
Механизмнинг қисмларини контакт кучланишга ҳисоблаш жараёни мураккаб ва катта аҳамият касб этади. Шарпрокатлаш валокларини токарлик винт қирқиш дастгоҳида кесишда кулачокга қуйидаги юкланишлир таъсир қилади: $F_{гц}$, H – гидроцилиндрнинг технологик қаршилик кучи, F_x , H – дастгоҳ станинасига таъсир этувчи фартукнинг оғирлик кучини



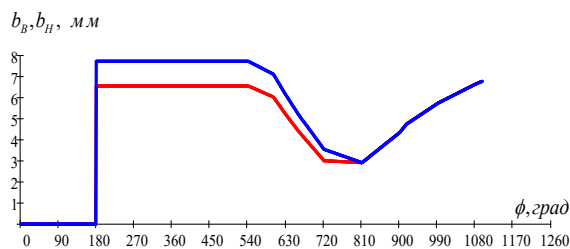
8-расм. Махсус кабирловчи ускуна билан жиҳозланган токарлик винт қирқиш дастгоҳи

1-червякли редуктор, 2-гидравлик станция, 3-ролик, 4-бошқарувчи кулачок, 5-дастгоҳнинг

ҳисобга олган ҳолда кескич томонидан таъсир этувчи куч, F_{II} , H – кулачокнинг инерция кучи, R_x, R_y H – кулачок таянчининг реакция кучиларининг ташкил этувчилари, R_B , H – кулачок-ролик олий кинематик жуфтидаги реакция кучи.



9-расм. Ўнг ва чап валокларнинг реборда баландликларини ўзгариш графиги



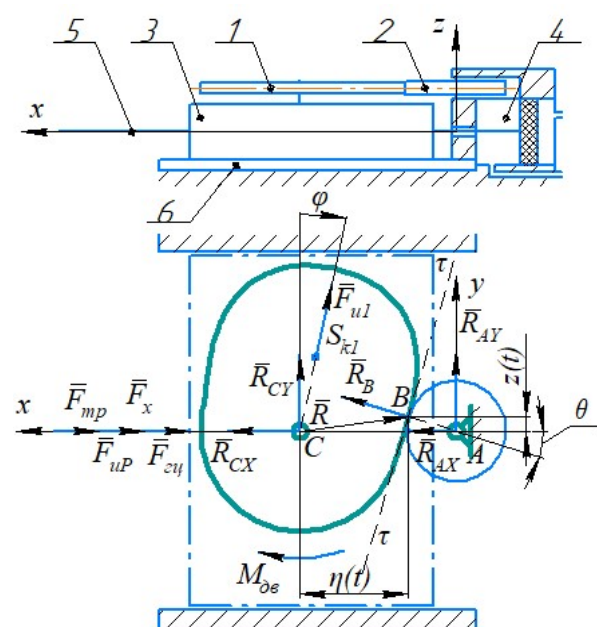
10-расм. Ўнг ва чап валокларнинг ребордаси қалинлигини ўзгариш графиги

11-расмда таъсир этувчи кучлар кинематик схемаси келтирилган.

Ҳисоблашни амалга ошириш жараёнида: токарлик винт қирқиш дастгоҳидаги кесиш кучи, дастгоҳнинг станинаси ва фартуки орасидаги ишқаланиш кучлари, кулачок ва редукторнинг инерция кучлари, цилиндрсимон ролик ҳамда кулачокнинг уриниш нуқтасидаги босим бурчаги ва контакт кучланишнинг максимал қийматлари аниқланди.

Мустаҳкамликка ҳисоблаш натижасида, тавсия этилаётган кулачок узоқ муддат давомида ишлай олиш қобилиятига эга эканлиги маълум бўлди. Ишлаб чиқилган кулачок конструкцияси ариқчаларининг марказлари силжиган винтли калибрларга эга шарпрокатлаш валокини кесиш орқали тоғ-кон ва цемент ишлаб чиқариш тармоқлари учун зарур бўлган импорт ўрнини босувчи янги турдаги маҳсулот ГОСТ 7524-2015 бўйича диаметри 70 мм бўлган пўлат шарларни ишлаб чиқариш имконини берди.

остидаги копирловчи ускунанинг



11-расм. Юкланишлар таъсир остидаги капирловчи ускунанинг кинематик схемаси

1– бошқарувчи кулачок, 2– ролик, 3– червякли редуктор, 4– гидроцилиндр, 5– дастгоҳнинг юрғазиш винти, 6– қўзғалмас салазкалар.

ХУЛОСА

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси бўйича «Ихтиёрий диаметрдаги шарларни прокатлашдаги винтсимон калибрларни кесувчи кулачокли тизим механизмларини кинематикаси ва динамикасини моделлаштириш» мавзuidaги ўтказилган тадқиқот натижалари қуйидагилардан иборат:

1. Аксиал, дезаксиал ва ясси турткичли кулачокли механизмларнинг кинематик параметрларини аниқлаш учун аналитик тенгламалар тузилди. Бу тенгламалар кулачокли механизмларнинг барча ҳаракатланиш фазалари ҳамда турткичнинг текистезланувчан, косинусоидал, чизиқли камаювчи ва синусоидал ҳаракат қонуниятлари учун ечимлар олиш имконини берди.

2. Математик моделларнинг параметрларни аниқлаш учун MathCAD-15 муҳитида дастурлар тузилди. Тузилган дастурлар кулачокнинг бурчак тезлиги, кулачок профилининг минимал радиуси, турткичнинг максимал силжиши ва дезаксиалнинг қийматларини ўзгартирган ҳолда параметрларни сонли ва график шаклларда аниқлаш имконини берди.

3. Кулачокли механизмлар бўғинларини кинетостатик ҳисоблаш учун аналитик тенгламалар тузилиб, уларни ечими MathCAD-15 муҳитида амалга оширилди. Тузилган дастур кулачокли механизмлар бўғинларидаги реакция кучларининг параметрларини аниқлаш ҳамда ушбу параметрларга дезаксиалнинг таъсирини ўрганиш имконини берди.

4. Аксиал, дезаксиал ва турткичи ясси кулачокли механизмлардаги барча ҳаракатланиш фаза бурчакларини ҳисобга олган ҳолда синтез қилиш дастури яратилди. Ушбу дастур юқорида таъкидланган кулачокли механизмларнинг назарий ва амалий профилларини синтез қилиш имконини берди.

5. Икки қиримли винтли калибрларнинг ариқчалар маркази силжиган валокларни ишлаб чиқариш технологияси жорий этилди. Ишлаб чиқилган технологиянинг қўлланилиши натижасида давлатлараро ГОСТ 7524-2015 стандартига жавоб берувчи янги турдаги импорт ўрнини босувчи маҳсулот-диаметри 70 мм бўлган майдаловчи пўлат шарларни ишлаб чиқариш йўлга қўйилди.

6. Икки қиримли винтли калибрларни маркази силжилган валокларни кесиш учун профили назарий асосланган кулачокларни яратиш технологияси жорий этилди. Жорий этилган технологияни қўлланилиши бир қиримли валокларга нисбатан майдаловчи пўлат шарларни прокатлашдаги иш унимдорлигини 2 баробарга ошириш имконини берди.

7. Ишлаб чиқаришга тадбиқ этиш натижасида кутилаётган йиллик иқтисодий самарадорлик 1 682 314 200 сўмни ташкил этди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019. Т.03.04 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ
ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

ШАХОБУТДИНОВ РУСТАМ ЭРКИНБАЕВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ И ДИНАМИКИ КУЛАЧКОВЫХ
МЕХАНИЗМОВ РЕЖУЩИХ СИСТЕМ ВИНТОВЫХ КАЛИБРОВ ДЛЯ
ПРОКАТКИ ШАРОВ ПРОИЗВОЛЬНОГО ДИАМЕТРА**

05.02.02– Теория механизмов и машин, машиноведение и детали машин

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

Ташкент – 2022

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2017.1.PhD/Г74.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете в г. Ташкенте.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-сайте (www.tdtu.uz) и на Информационно-образовательном портале «Ziynet» по адресу (www.ziynet.uz).

Научный руководитель:

Каримов Расул Исмокович

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Алимухамедов Шавкат Пирмухамедович

доктор технических наук, профессор

Абдукаримов Абдусалом

кандидат технических наук, доцент

Ведущая организация:

Наманганский инженерно строительный институт

Защита диссертации состоится «26» февраля 2022 года в 11⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.03/30.02.12.2019.T.03.04 при Ташкентском государственном техническом университете. Адрес: 100095, г.Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: (+99871) 246-46-00, факс: 227-10-32, e-mail: tstu_info@edu.uz; nauka@nuu.uz.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (зарегистрировано номером № 244) (Адрес 100095, г.Ташкент, ул. Университетская, 2, Тел.: (99871) 246-03-41).

Автореферат диссертации разослан « 11 » 02 2022 г.
(реестр протокола рассылки № 135 « 11 » 02 2022г).



К.А. Каримов
Председатель Научного совета по присуждению ученых степеней, д.т.н., профессор

Ш.Б. Ташбулатов
Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, PhD

А.А. Мухиддинов
Председатель Научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, д.т.н. профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире повышение износостойкости шаров, применяемых при измельчении руды и горных пород, разработка ресурсосберегающих технологий, основанных на совершенствовании принципа работы кулачковых механизмов при прокатке шаров, имеет особое значение. В то же время одной из важных задач при прокатке шаров произвольного диаметра является совершенствование режущих кулачковых механизмов. Кроме того, важной задачей является разработка динамической модели механизмов кулачковых систем. В связи с этим в ряде стран мира, в том числе в таких промышленно развитых странах, как США, Германия, Франция, Россия и Украина уделяется особое внимание разработке кулачковых механизмов, используемых при производстве катаных шаров.

Во всем мире проводятся обширные научные исследования по улучшению свойств прокатки шаров, созданию ресурсосберегающей технологии производства шаров за счет модернизации технологии их производства и улучшению эксплуатационных свойств. В странах СНГ, в том числе в России, Украине и Узбекистане, все большее значение приобретает использование энергосберегающих технологий при производстве катаных шаров. В то же время необходимой задачей является разработка модели с целью усовершенствования конструкции кулачковых механизмов, используемых для производства катаных шаров.

В нашей республике ведется большая работа и достигнуты определенные результаты по совершенствованию технологии прокатки шаров, используемых для измельчения и переработки горнорудных продуктов. В Стратегии действий развития Республики Узбекистан на 2017-2021 годы определены задачи, в частности, «... укрепление макроэкономической стабильности и сохранение высоких темпов экономического роста, повышение конкурентоспособности национальной экономики, ... снижение энерго- и ресурсоемкости экономики, широкое внедрение энергосберегающих технологий в производство»². При реализации этих задач, в частности, разработка режущих кулачковых механизмов для прокатки катаных шаров имеет большое значение.

Настоящее диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в следующих Постановлениях Президента Республики Узбекистан УП № 4947 от 7 февраля 2017 года «Стратегия действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан в 2017 - 2021 годах», УП № 3012 от 26 мая 2017 года «Программа мероприятий по повышению эффективности в социальной и экономической сферах, развитию возобновляемой энергетики на 2017-2021 годы», УП № 2698 от 26 декабря 2016 года «О мерах по дальнейшей реализации перспективных проектов локализации производства готовых

² Указ Президента Республики Узбекистана № УП 4947 от 7 февраля 2017 года «О стратегии действий по приоритетным направлениям развития Республик Узбекистан

видов продукции, комплектующих изделий и материалов на 2016-2019 годы», УП № 3682 от 27 апреля 2018 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практической реализации инновационных идей, технологий и проектов», а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики по направлению П. «Энергетика, энерго - и ресурсосбережение».

Степень изученности проблемы. Учеными мира проведены научные исследования по совершенствованию конструкции, кинематики и динамики кулачковых механизмов. Ведущие ученые мира И.И. Вольфсон, Ю.В. Ворбьёв, Н.П. Бруевич и др. разработали методы проектирования кулачковых механизмов с учетом различных динамических и технологических факторов.

Учеными СНГ И.И. Артоболевский, В.Ф. Юдин, В.Т. Швецов, В.М. Кунявский и другими удалось решить задачу моделирования кинематики и динамики кулачковых механизмов.

В нашей республике в результате исследований по моделированию кинематики и динамики кулачковых механизмов разработаны новые кинематические схемы этих механизмов. В том числе, академиком Х.Х.Усмонхужаевым, Г.С. Кузибаевым, Ш.У. Рахматкариевым, А.А. Ризаевым, Ш.П. Алимухамедовым, А.Ж. Жураевым, К.А. Каримовым, Р.И. Каримовым, С.Б. Ерофеевым и др. были разработаны модели движения кулачков при различных нагрузках.

Вместе с тем создание единых математических моделей, описывающих все фазы движения кулачка, определение нагруженности звеньев кулачковых механизмов, с учётом переменных технологических сил, действующих на толкатель, программы для реализации этих моделей на компьютере рассмотрены с ограничениями. Следует особо подчеркнуть, что рациональное проектирование винтовых калибров практически невозможно без совершенствования теории кулачковых механизмов. На протяжении ряда лет актуальность совершенствования проектирования кулачковых механизмов отмечалась в решениях ИГТОММ. Поэтому весьма важной задачей является совершенствование методов проектирования кулачковых механизмов с учётом реальных технологических факторов.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках плана фундаментальных научно-исследовательских работ, прикладных проектов и хоздоговорных работ Ташкентского государственного технического университета: ППИ-3. Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение. №Гос. регистрации ИТД-3-53 «Разработка системы проектирования и создание

кулачкового механизма для нарезания винтовых калибров с целью прокатки шаров произвольного диаметра» ТашГТУ (2012-2014 гг.); 1774-01/02/03/2017 - (10/17) «Разработка и изготовление кулачковых копиров и чашечного резца для нарезания на токарно-винторезном станке винтовых калибров бандажных валков с целью прокатки шаров диаметром в 70 мм» АО «Узметкомбинат» (2017–2019 гг.), хоздоговор, зарегистрированный под номером №648 на X республиканской инновационной ярмарке «Инновационные технологии и проекты», (10.05.2017 г.).

Целью исследования является моделирование кинематики и динамики кулачковых механизмов режущих систем винтовых калибров.

Задачи исследования:

- разработать функциональные соотношения, характеризующие закон движения толкателя плоского кулачкового механизма;
- составить аналитические зависимости с целью определения относительных скоростей аксиального, дезаксиального и кулачкового механизма с плоским толкателем;
- разработать методику силового расчёта аксиального, дезаксиального и кулачкового механизма с плоским толкателем;
- совершенствовать методику синтеза аксиального, дезаксиального и кулачкового механизма с плоским толкателем;
- разработать методику калибровки шаропрокатных валков для прокатки стальных помольных шаров;
- разработать техническое задание и изготовить кулачки с теоретически обоснованным профилем для нарезания шаропрокатных валков.
- провести расчёт на прочность изготовленных кулачков.

Объектом исследования являются кулачковые механизмы трёх видов режущих систем винтовых калибров.

Предметом исследования является синтез профиля кулачка, обеспечивающий необходимый радиус ручья винтового калибра.

Методы исследования. В процессе исследования использованы общие методы теоретической и прикладной механики, теории механизмов и машин, методы калибровок шаропрокатных валков с винтовыми калибрами со смещённым центром ручья.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- разработана технология изготовления валков с двухзаходными винтовыми калибрами со смещённым центром ручья на основе степени переменности шага центров ручья;
- разработана технология изготовления валков с двухзаходными винтовыми калибрами со смещённым центром ручья на основе идентичности диаметра шара и диаметра винтового ручья;
- разработаны математические модели по определению перемещения, скорости и ускорения кулачкового механизма для четырех фаз движения толкателя на основе изменения динамики параметров перемещения;

- разработаны аналитические зависимости по определению относительных скоростей для аксиального, дезаксиального и кулачкового механизма с плоским толкателем на основе взаимных отношений относительных скоростей;

- разработаны аналитические зависимости для определения реакции в кинематических парах кулачковых механизмов с учётом характера изменения сил технологического сопротивления.

Практические результаты исследования заключаются в следующем: разработана методика калибровки шаропрокатных валков с двухзаходными винтовыми калибрами со смещённым центром ручьёв для прокатки стальных помольных шаров диаметром 70 мм по ГОСТ 7524-2015.

Достоверность результатов исследования. Достоверность полученных результатов основывается на данных статистической обработки полученных результатов от внедрения в производство и экспериментальных исследований путем сравнения их с существующими аналогами, внедрением полученных результатов в производство с реальным экономическим эффектом.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в научном обосновании разработанных математических моделей для определения перемещений, скоростей и ускорений толкателя для четырёх фаз движения кулачка, динамическим анализом сил реакции в кинематических парах с учётом сил технологического сопротивления и разработанной совершенствованной методике синтеза аксиального, дезаксиального и кулачкового механизма с плоским толкателем.

Практическая ценность результатов исследования заключается в экономическом эффекте от внедрения в производство разработанной методики калибровки шаропрокатных валков с двухзаходными винтовыми калибрами со смещённым центром ручьёв.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований по моделированию кинематики и динамики кулачковых механизмов режущих систем винтовых калибров для прокатки шаров произвольного диаметра:

внедрена технология изготовления шаропрокатных валков с двухзаходными винтовыми калибрами со смещённым центром ручьёв. (справка акционерного общества «Узметкомбинат» от 1 июня 2021 года № 01-1/1181). В результате применения разработанной технологии налажено выпуск помольных шаров диаметром 70 мм, производительность которых увеличилась в 1,7-1,8 раза;

внедрена технология разработки кулачков с теоретически обоснованным профилем для нарезки шаропрокатных валков с двухзаходными винтовыми калибрами со смещённым центром ручьёв (справка акционерного общества «Узметкомбинат» от 1 июня 2021 года № 01-1/1181). В результате производительность прокатки стальных помольных

шаров увеличилась в 1,8-2 раза по сравнению с однозаходными винтовыми калибрами.

Апробация результатов исследования. Результаты настоящего исследования были обсуждены на 18 научно-практических конференциях, в том числе на 13 международных и 5 республиканских.

Публикация результатов исследования. По теме исследования опубликованы всего 28 научных трудов. Из них 7 научных статей, в том числе 4 в республиканских и 3 в зарубежных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, опубликована 1 монография, получены 1 патент на полезную модель и 2 свидетельства на программные продукты Республики Узбекистан.

Структура и объем диссертации. Содержание диссертации состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации состоит из 120 страниц текста, набранного на компьютере, включая рисунки и таблицы.

Выражаю благодарность д.т.н, проф. К.А.Каримову за оказанную помощь при написании научных аспектов моей диссертации после смерти моего научного руководителя д.т.н., проф. Р.И.Каримова.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан, сформулированы цели и задачи, указаны объект и предмет исследования, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены перечень внедрений результатов исследования в практику, сведения об опубликованных работах и структура диссертации.

В первой главе **«Анализ работ по кинематике и динамике кулачковых механизмов и процессам формообразования в шаропрокатных валках»** диссертации произведен обзор работ по научным исследованиям, посвящённым кинематике и динамике плоских кулачковых механизмов, а также по процессам формообразования в шаропрокатных валках.

Анализ исследований по кулачковым механизмам показал, что вопросы, связанные с проектированием плоских кулачковых механизмов, разработка аналитических выражений для четырёх фаз толкателя, а также связанные кинестатикой этих механизмов, не в достаточной степени представлены в научных исследованиях зарубежных и отечественных авторов.

Вопросы калибровки винтовых калибров для производства шаров произвольного диаметра освещены в современной литературе не в достаточной степени.

Во второй главе «**Кинематический анализ плоских кулачковых механизмов**» диссертации приводятся аналитические зависимости для четырёх фаз движения толкателя кулачкового механизма, ведомое звено которого совершает поступательное движение, а также для определения относительных скоростей аксиального, дезаксиального и кулачкового механизма с плоским толкателем.

Кулачковые механизмы, плоские или пространственные, имеющие в своём составе высшую кинематическую пару, выполняющие различные функции применяются в различных технологических машинах. Основная задача кулачка в кулачковом механизме является в задании ведомому звену возвратно-поступательного или возвратно-колебательного движения. Нами исследованы эти механизмы, ведомое звено которых совершает возвратно-поступательное движение.

На рис.1 представлена кинематическая схема кулачкового механизма.

Во всех кулачковых механизмах перемещение толкателя может быть выражено в аналитическом виде. Теоретически кулачковыми механизмами можно реализовать различные законы движения, однако на практике пользуются только теми, которые обеспечивают более простую технологию обработки профиля кулачка и удовлетворяют кинематическим и динамическим требованиям к кулачковому механизму. Изучение этих законов необходимо провести для четырёх характерных фаз движения: фаза удаления, фаза дальнего выстоя, фаза сближения и фаза ближнего выстоя.

Для определения перемещений, аналогов скоростей и ускорений для равноускоренного,

косинусоидального, линейно-убывающего, синусоидального законов изменения движения кулачкового механизма при $\varphi_y = 120^\circ$, $\varphi_{дв} = 60^\circ$, $\varphi_{сб} = 120^\circ$, $\varphi_{дв} = 60^\circ$, $h_{max} = 0.05 м$, составлены аналитические зависимости, которые реализованы в среде MathCAD 15 и получены результаты в графической форме, которые приведены на рис. 2-5.

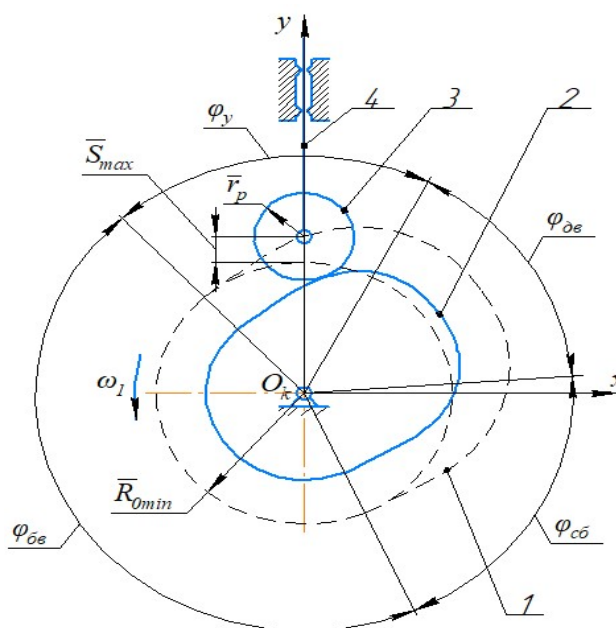


Рис.1. Кинематическая схема кулачкового механизма с толкателем совершающий возвратно-поступательное движение

1-теоретический профиль, 2-практический профиль, 3-ролик, 4-штанга толкателя

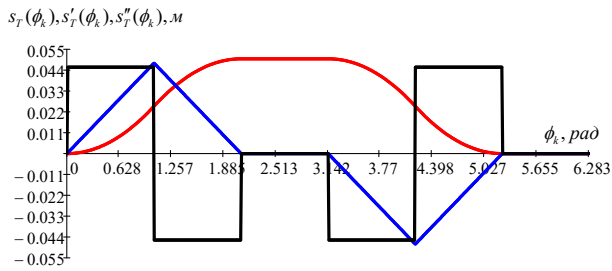


Рис. 2. Графики перемещений, аналога скорости и ускорения при равноускоренном законе движения толкателя

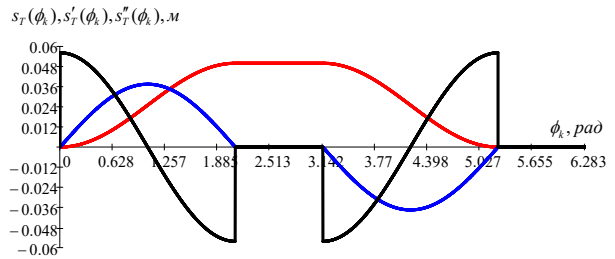


Рис. 3. Графики перемещений, аналога скорости и ускорения при косинусидальном законе движения толкателя

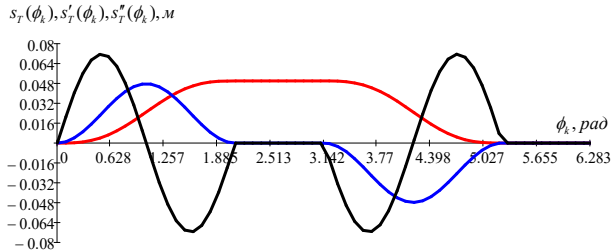


Рис. 4. Графики перемещений, аналога скорости и ускорения при синусидальном законе движения толкателя

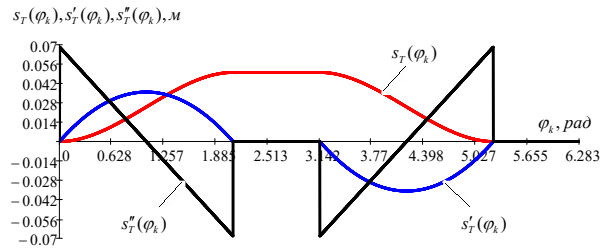


Рис. 5. Графики перемещений, аналога скорости и ускорения при линейно убывающем законе движения толкателя

При работе кулачкового механизма происходит износ его элементов в контакте высшей кинематической пары. Одним из основных факторов, влияющих на износ профиля кулачка, является скорость относительного скольжения, которая, в свою очередь, зависит от вида профиля кулачка, то есть от вида закона толкателя.

Для определения относительных скоростей скольжения в высшей кинематической паре кулачок-толкатель нами рассмотрены три вида кулачковых механизмов: аксиальный, дезаксиальный и кулачковый механизм с плоским толкателем. На рис.6 приведены расчётные кинематические схемы *а*-аксиального, *б*-дезаксиального и *в*-кулачкового механизма с плоским толкателем.

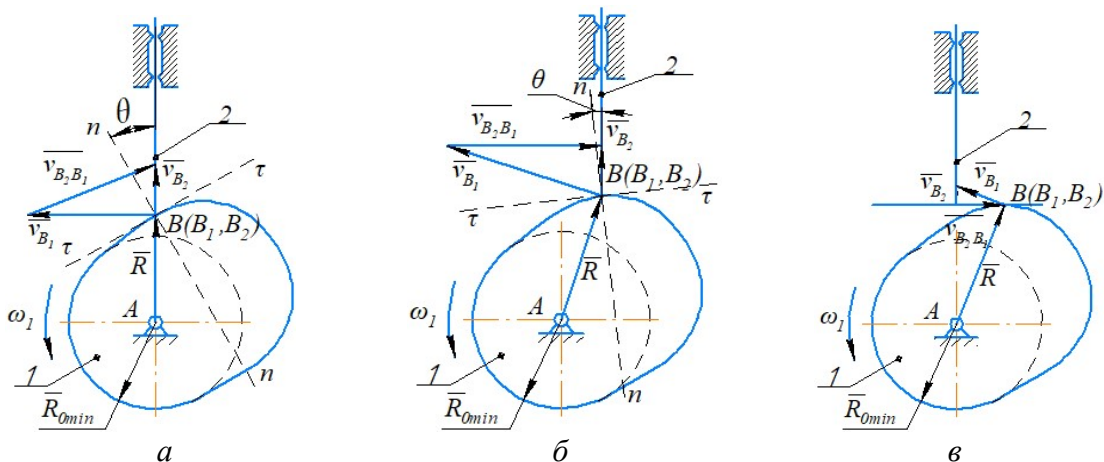


Рис. 6. Расчётные кинематические схемы кулачковых механизмов

Для определения основных факторов, влияющих на износ профиля, были составлены аналитические выражения для трёх видов кулачковых механизмов, которые были реализованы на компьютере в среде MathCAD15, по результатам расчётов были определены величины и закономерности изменения относительных скоростей в высшей кинематической паре кулачок-толкатель.

С целью исследования влияния основных факторов, характеризующих конструктивные и кинематические параметры механизма, скорость относительного скольжения в высшей кинематической паре определялась при вариации угловой скорости кулачка, минимального радиуса профиля кулачка и максимального хода толкателя для равноускоренного, косинусоидального, линейно-убывающего и синусоидального законов движения толкателя.

В третьей главе диссертации «**Динамический анализ плоских кулачковых механизмов**» приведены закономерности изменения реакций в опорах толкателя, в высшей кинематической паре кулачок-толкатель, а также уравновешивающего момента на валу кулачка.

Работоспособность кулачковых механизмов в значительной степени определяется нагруженностью его звеньев. Поэтому, определение реакции в кинематических парах кулачкового механизма, а также, факторов, влияющих на эти реакции, является весьма актуальной задачей при проектировании и в дальнейших исследованиях механизмов данного класса. Для определения вышеуказанных факторов нами рассмотрены три вида кулачковых механизмов: аксиального, дезаксиального и кулачкового механизма с плоским толкателем.

Составлены расчётные схемы для определения нагрузок, действующих на вышеупомянутые кулачковые механизмы (рис. 6).

Для определения реакций в кинематических парах и уравновешивающего момента кулачкового механизма используем принцип Даламбера [5]. Составим уравнения кинетостатики для каждого звена механизма в отдельности.

Условия равновесия кулачка выражаются тремя уравнениями:

для аксиального

$$\begin{cases} R_{Ax} + F_{u1} \cdot \cos \varphi + R_B \cdot \sin \theta = 0 \\ R_{Ay} + F_{u1} \cdot \sin \varphi - R_B \cdot \cos \theta - F_1 = 0 \\ -R_B \cdot \sin \theta \cdot (R_0 + s_T(\varphi_k)) - F_1 \cdot AS_1 \cdot \cos \varphi + M_y = 0 \end{cases} \quad (1)$$

дезаксиального

$$\begin{cases} R_{Ax} + F_{u1} \cdot \cos \varphi + R_B \cdot \sin \theta = 0 \\ R_{Ay} + F_{u1} \cdot \sin \varphi - R_B \cdot \cos \theta - F_1 = 0 \\ -F_1 \cdot AS_1 \cdot \cos \varphi + M_y - R_B \cdot \sin \theta \cdot (R_0 + s_T(\varphi_k)) - R_B \cdot \cos \theta \cdot e = 0 \end{cases} \quad (2)$$

с плоским толкателем

$$\begin{cases} R_{Ax} + F_{u1} \cdot \cos \varphi = 0 \\ R_{Ay} + F_{u1} \cdot \sin \varphi - R_B - F_1 = 0 \\ -R_B \cdot s'_T(\varphi_k) - F_1 \cdot AS_1 \cdot \cos \varphi + M_y = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Уравнения кинестатики для толкателя имеют следующий вид:

для аксиального

$$\begin{cases} R_D - R_C - R_B \cdot \sin \theta = 0 \\ -R_B \cdot \cos \theta - F_2 + F_{u2} - F_{np} - F_{mc} = 0 \\ R_C \cdot z(t) - R_D \cdot (z(t) + l) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

дезаксиального

$$\begin{cases} R_D - R_C - R_B \cdot \sin \theta = 0 \\ -R_B \cdot \cos \theta - F_2 + F_{u2} - F_{np} - F_{mc} = 0 \\ R_C \cdot z(t) - R_D \cdot (z(t) + l) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

с плоским толкателем

$$\begin{cases} R_D - R_C = 0 \\ -F_2 + F_{u2} - F_{np} - F_{mc} - R_B = 0 \\ R_C \cdot z(t) - R_D \cdot (z(t) + l) + R_B \cdot s'_T(\varphi_k) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

При этом угол θ определялся по следующей формуле:

$$\text{для аксиального} \quad \theta = \operatorname{arctg} \left(\frac{s'_T}{R_0 + s_T} \right) \quad (7)$$

$$\text{дезаксиального} \quad \theta = \operatorname{arctan} \frac{s'_2 - e}{\sqrt{R_0^2 - e^2 + s_2}} \quad (8)$$

Для определения реакций в кинематических парах толкателя и кулачка уравнения равновесия (1)-(8) были реализованы на компьютере. Для этого нами в среде MathCAD15 составлена программа, позволяющая определять эти реакции как графически, так и в численных формах.

В четвёртой главе диссертации «Синтез плоских кулачковых механизмов» рассмотрены вопросы создания методики синтеза профилей аксиального, дезаксиального и кулачкового механизма с плоским толкателем позволяющей определить профиль на всех четырёх фазах кулачка, и создания программы в среде MathCAD, позволяющей автоматизировать процесс проектирования вышеуказанных кулачковых механизмов.

Рассмотрим определения кинематических параметров для трёх видов кулачковых механизмов, аксиального, дезаксиального и кулачкового механизма с плоским толкателем.

Важным параметром при проектировании кулачковых механизмов является угол давления θ .

Угол давления в аксиальном кулачковом механизме, толкатель которого совершает возвратно-поступательные движения, как известно, определяется по следующей формуле

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{s'_T}{R_0 + s_T}, \quad (9)$$

где s_T – перемещение толкателя, s'_T – аналог скорости толкателя, R_0 – минимальный радиус центрального профиля кулачка.

Для дезаксиального кулачкового механизма толкатель которого совершает возвратно-поступательные движения

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{s'_T \pm e}{\sqrt{R_0^2 - e^2 + s_T}}, \quad (10)$$

где e – смещение оси толкателя, эксцентриситет.

Угол давления в кулачковом механизме имеет физический смысл только на фазе удаления, так как именно на этой фазе в механизме с силовым замыканием кулачок вызывает движение толкателя. На фазе сближения его движение обеспечивается силой упругости пружины или силой веса толкателя. С учетом этого появляется возможность на фазе сближения толкателя увеличить значение допускаемого угла давления.

Данная расчетная схема представлена на рис.7, при этом кулачок вращается против часовой стрелки, аналог скорости на фазе удаления отложен слева от оси S_2 , аналог скорости на фазе сближения отложен справа от оси S_2 , где: af – касательная к диаграмме проведенная под углом $\theta_{1к}$, bd – касательная к диаграмме, проведенная под углом $\theta_{2к}$, O_1 – ось вращения кулачка, e – дезаксиал.

Из расчетной схемы минимальный радиус можно определить по формуле

$$R_0 = \sqrt{(B_0g)^2 + e^2} \quad (11)$$

Расстояние B_0g определим по следующей формуле

$$B_0g = \frac{S'_T}{\operatorname{tg} \theta_{1к}} - S_T \quad (12)$$

Формула дезаксиала e имеет следующий вид:

$$e = \frac{\sin \theta_{1к} \cdot \left(\left(\frac{S'_T}{\operatorname{tg} \theta_{1к}} - S_T \right) - \left(\frac{S'_T}{\operatorname{tg} \theta_{2к}} - S_T \right) \right)}{\sin(180^\circ - (\theta_{1к} + \theta_{2к}))} \quad (13)$$

С целью предотвращения возможности заклинивания кулачкового механизма необходимо, чтобы угол давления за один период движения механизма не превышал заданного его критического значения θ_k [1]. Критический угол давления задаётся при проектировании.

Определяем минимальный радиус центрального профиля аксиального кулачкового механизма в зависимости от изменения угла поворота

$$R_0 = \frac{s'_T}{\operatorname{tg} \theta} - s_T \quad (14)$$

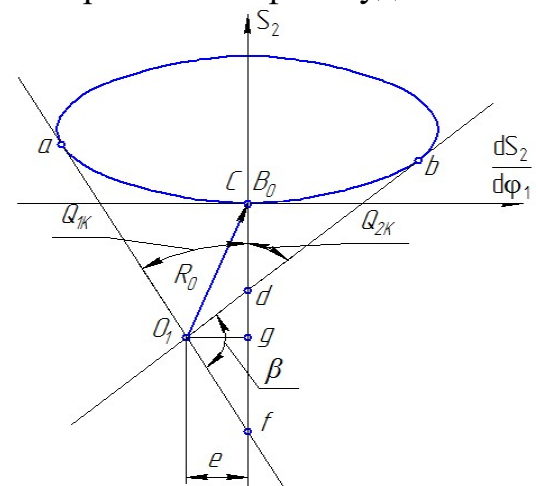


Рис. 7. Определение значения угла давления по диаграмме аналога скорости в функции перемещения толкателя

Из полученных на компьютере данных выбираем максимальное значение $R_0(\phi_x)_{\max}$, которое принимается за минимальный радиус-вектор теоретического профиля кулачка. Далее зная R_0 , определяем координаты центрального профиля в параметрической форме

$$\left. \begin{aligned} x_c &= (R_0 + s'_T) \cdot \cos \varphi_1 \\ y_c &= (R_0 + s'_T) \cdot \sin \varphi_1 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Радиус ролика целесообразно определять по следующим соотношениям

$$r_p \leq 0,8\rho_{\min} \quad \text{и} \quad r_p \leq (0,4 \dots 0,5)R_0 \quad (16)$$

Выражения (11) – (16) были реализованы в среде MathCAD 15. По результатам расчетов на компьютере в среде MathCAD 15 была составлена программа, при помощи которой были получены профили аксиального, дезаксиального с роликовым и кулачкового механизма с плоским толкателем, совершающим возвратно-поступательное движение.

Созданная методика позволяет определить профиль кулачка на всех четырёх фазах движения толкателя. Составленная программа в среде MathCAD-15 позволяет автоматизировать процесс проектирования вышеуказанных кулачковых механизмов.

В пятой главе диссертации «**Разработка кулачкового механизма для нарезания шаропрокатных валков**» рассмотрены вопросы анализа существующего прокатного оборудования в производственных условиях АО «Узметкомбинат», разработки калибровки шаропрокатного валка с двухзаходными винтовыми калибрами со смещённым центром ручьёв, определения нагруженности звеньев кулачкового механизма с учётом конструкции и силовых факторов и прочностного расчёта по контактными напряжениям в контакте высшей кинематической пары «кулачок-толкатель».

Акционерное общество «Узметкомбинат» является единственным в республике предприятием по выпуску стальных помольных шаров, весьма необходимых для горнорудной, цементной, энергетической и золотодобывающей отраслей промышленности.

Стальные помольные шары выпускаются по межгосударственному стандарту ГОСТ 7524-2015. По данному ГОСТу номинальный размер помольного шара диаметром 70 мм равен 73 мм. Выпуск стальных помольных шаров производится на шаропрокатных станах методом горячей прокатки в винтовых калибрах. Основным элементом шаропрокатного стана является прокатный валок, бочка с нарезанными винтовыми ручьями со смещённым центром ручьёв. Нарезание винтовых ручьёв выполняется на токарно-винторезном станке с оснащённым специальным копирующим устройством. В качестве копира применяются плоские кулачки.

Для определения связи между радиусом винтового ручья и профилем кулачка были проведены обзорные исследования существующего прокатного оборудования в производственных условиях АО «Узметкомбинат» и было выявлено, что разработка прокатных валков производится методом калибровки.

Калибровка валков, особенно для станов винтовой прокатки - наиболее ответственный и сложный элемент технологического процесса, так как наряду с условиями деформации металла необходимо учитывать сравнительно сложное построение геометрии винтового калибра и технологию нарезки калибра.

На рис. 8 представлен общий вид токарно-винторезного станка с оснащённым копирувальным устройством.

Передаточное отношение копирувального устройства равно $i=35$. Параметры шаропркатного валка: диаметр калибра $D_K=73,5$ мм; число заходов винтовых ручьёв калибра $Z=2$, длина заготовки $L=411$ мм.

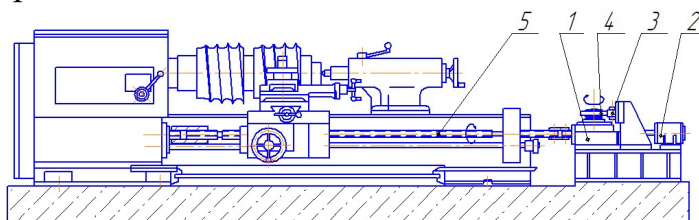


Рис. 8. Общий вид токарно-винторезного станка оснащённым специальным копирувальным устройством

1-червячный редуктор, 2-гидравлическая станция, 3-ролик, 4-управляющий кулачок, 5-ходовой винт станка

Для настройки токарно-винторезного станка модели ДИП-500, по паспортным данным станка, определим ближайшее значение шага станка, удовлетворяющий двухзаходной нарезки:

$$T_{cm} = \frac{3}{2} \cdot \frac{z_2}{z_1} \cdot T_M = \frac{3}{2} \cdot \frac{114}{106} \cdot 88 = 141,9623 \text{ мм/об} \quad (17)$$

где: $z_1=106$; $z_2=114$ - числа зубьев сменных шестерён гитары станка; $T_M=88$ мм/об - метрический шаг станка.

Основной шаг нарезки винтового калибра со смещённым центром ручьёв определяется выражением:

$$T_{O.H} = (2 \cdot C + b) \quad (18)$$

где C - ширина полусферы винтового калибра, b - толщина реборды винтового калибра.

Ширина полусферы винтового калибра для правого и левого валка определяется выражениями:

$$C_B = \sqrt{R_k^2 - r_B^2}; \quad C_H = \sqrt{R_k^2 - r_H^2} \quad (19)$$

Основной шаг нарезки винтового калибра со смещённым центром ручьёв для правого и левого валка

$$T_{O.H.B.} = (2 \cdot C_B + b_B); \quad T_{O.H.H.} = (2 \cdot C_H + b_H) \quad (20)$$

Условия постоянства объема, обжимаемого металла в любом сечении калибра имеет следующий вид:

$$V_{общ} = V_\alpha + V_{C\alpha} + V_{S\alpha-360} + V_{\alpha-360} + V_{C\alpha-360} \quad (21)$$

Уравнения калибровки реализованы на компьютере в среде MathCAD 15 и получены геометрические параметры шаропркатного валка с двухзаходными винтовыми калибрами со смещённым центром ручьёв для

прокатки стальных помольных шаров диаметром 70 мм по ГОСТ 7524-2015 в графическом виде которые приведены на рис. 9, 10. Для нарезки шаропркатного вала с винтовыми калибрами со смещённым центром ручьёв требуется разработать конструкцию кулачкового копира.

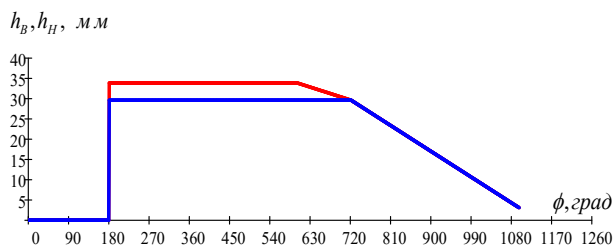


Рис. 9. График изменения высоты реборды правого и левого валков

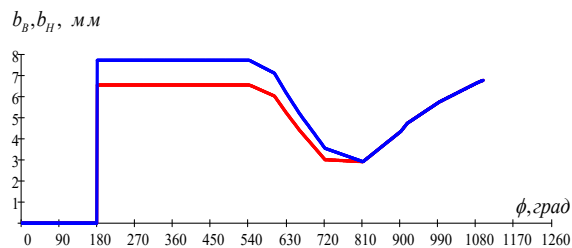


Рис. 10. График изменения толщины реборды правого и левого валков

По результатам расчётов калибровки была составлена математическая модель, описывающая перемещения режущего инструмента токарно-винторезного станка, на основе которой была разработана и изготовлена конструкция кулачковых копиров.

Наибольшее значение и трудность при расчете деталей кулачкового механизма имеет расчет кулачка на контактные напряжения. При нарезании на токарно-винторезном станке шаропркатных валков, на кулачковый копир действуют следующие нагрузки: F_{cy} , H – сила технологического сопротивления гидроцилиндра, F_x , H – сила, действующая со стороны резца при учёте силы тяжести фартука, действующего на станину станка, F_{II} , H – сила инерции кулачкового копира, R_x, R_y H – составляющие силы реакции на опоре кулачкового копира, R_B , H – сила реакции в высшей кинематической паре кулачок-ролик. На рис. 11. приведена кинематическая схема копировального устройства с действующими нагрузками.

При проведении расчётов были определены: значение силы резания токарно-винторезного станка, силы трения между фартуком и станиной станка, сил инерции кулачков, сил инерции редуктора, угла давления в высшей кинематической паре и наибольшее контактное напряжение при касании цилиндрического ролика и кулачка.

Проведённый расчёт на прочность показал, что толкатель и кулачок обладают достаточной

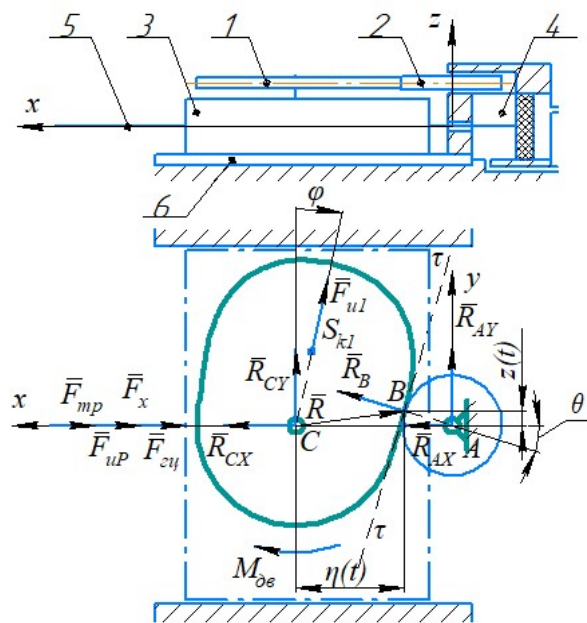


Рис. 11. Кинематическая схема копировального устройства под действующими нагрузками

1-управляющий кулачок, 2-ролик, 3-червячный редуктор, 4-гидроцилиндр, 5-ходовой винт станка, 6-неподвижные салазки

прочностью для долговременной эксплуатации. Разработанная конструкция кулачковых копиров дала возможность нарезать шаропрокатные валки с двухзаходными винтовыми калибрами со смещённым центром ручьёв, которые позволили получить новый вид стальных помольных шаров диаметром 70 мм по ГОСТ 7524-2015 необходимые для горнорудной и цементной отрасли промышленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования по диссертационной работе доктора философии по техническим наукам (PhD) на тему «Моделирование кинематики и динамики кулачковых механизмов режущих систем винтовых калибров для прокатки шаров произвольного диаметра» представлены следующие выводы:

1. Составлены аналитические зависимости для определения кинематических параметров аксиального, дезаксиального и кулачкового механизма с плоским толкателем. Эти зависимости дали возможность получить решения для всех четырёх фаз кулачкового механизма с учётом равноускоренного, косинусоидального, линейно-убывающего и синусоидального законов движения толкателя.

2. Для реализации полученных математических моделей на компьютере в среде MathCAD 15 составлены программы. Составленные программы позволили получить исследуемые параметры как в численной, так и в графических формах при вариации угловой скорости, минимального радиуса профиля кулачка, максимального хода толкателя и дезаксиала.

3. Составленные аналитические уравнения для кинетостатического расчета звеньев кулачкового механизма реализованы в среде MathCAD 15. Разработанная программа позволила определить параметры сил реакции в кинематических парах кулачковых механизмов и изучить влияние дезаксиала на эти параметры.

4. Разработана программа синтеза, учитывающая все фазовые углы движения в аксиальном, дезаксиальном и кулачкового механизма с плоским толкателем. Разработанная программа позволила синтезировать теоретические и практические профили вышеупомянутых кулачковых механизмов.

5. Внедрена технология изготовления валков с винтовыми калибрами со смещённым центром ручьёв. В результате применения разработанной технологии освоен выпуск нового вида импортозамещающей продукции, отвечающей межгосударственному стандарту ГОСТ 7524-2015 - стальные мелющие шары диаметром 70 мм.

6. Внедрена технология разработки кулачка с теоретически обоснованным профилем, удовлетворяющий нарезку валков с двухзаходными винтовыми калибрами со смещённым центром ручьёв. В результате применения разработанной технологии производительность выпуска стальных помольных шаров увеличилось в 2 раза относительно с однозаходными винтовыми калибрами.

7. В результате внедрения в производство ожидаемая годовая экономическая эффективность составила 1 682 314 200 сумов.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/30.12.2019.T.03.04 ON AWARDING
SCIENTIFIC DEGREES AT THE TASHKENT STATE TECHNICAL
UNIVERSITY AND NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY

SHAXOBUTDINOV RUSTAM ERKINBAYEVICH

**MODELING OF KINEMATICS AND DYNAMICS OF CAM
MECHANISMS OF CUTTING SYSTEMS OF SCREW GAUGES FOR
ROLLING BALLS OF ARBITRARY DIAMETER**

05.02.02 – Theory of mechanisms and mashines. Engineering science and machine parts

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

Tashkent – 2022

The theme of dissertation doctor of philosophy on technical sciences (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number № B2017.1.PhD/T74.

The dissertation is carried out at.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) is placed on web-page of Scientific Council at the address (www.titli.uz) and information-educational portal Ziyonet at the address (www.ziyonet.uz).

Scientific adviser:

Karimov Rasul Ishokovich

doctor of technical sciences, professor

Official opponents:

Alimuxamedov Shavkat Pirmuxamedovich

doctor of technical sciences, professor

Abdukarimov Abdusalom

candidate of technical sciences, associate professor

Leading organization:

Namangan institute of givil engineering

The defense of the dissertation will take place on «26» february at 11⁰⁰ o'clock at a meeting of Scientific Council DSc.03/30.12.2019.T.03.04 at Tashkent state technical university named after Islam Karimov (Address: 100174, Tashkent, city, University street, 2. Tel./fax: (+99871) 246-46-00, 227-10-32, e-mail: tstu_info@tstu.uz; nauka@nuu.uz).

The dissertation can be reviewed at the Information Centre of the Tashkent state technical university (is registered under N 244) (Address: 100095, Tashkent, city, University street, 2. Tel. (+99871) 246-03-41).

Abstract of the dissertation sent out on "11" 02 2022 y.
(mailing report № 135 on 11 02 2022 y.)



K.A. Karimov

Chairman of the scientific council on
awarding scientific degrees,
Doctor of technical sciences, Professor

Sh.B. Tashbulatov

Scientific secretary of scientific council
awarding scientific degrees,
Doctor of technical sciences, Professor

A.A. Muxitdinov

Chairman of the academic seminar under
the scientific council awarding scientific degrees,
Doctor of technical sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the research work is the simulation of the kinematics and dynamics of the cam mechanisms of cutting systems of screw calibers.

Objectives of the study:

- to develop functional relationships that characterize the law of motion of the pusher of a flat cam mechanism;
- make analytical dependencies in order to determine the relative speeds of the axial, desaxial and cam mechanism with a flat pusher;
- develop a method for power calculation of axial, desaxial and cam mechanism with a flat pusher;
- to improve the method of synthesis of axial, desaxial and cam mechanism with a flat pusher;
- develop a method for calibrating ball-rolls for rolling steel grinding balls;
- develop terms of reference and manufacture cams with a theoretically substantiated profile for cutting ball-rolling rolls.
- to calculate the strength of the manufactured cams

The object of the research work cam mechanisms of three types of screw-gauge cutting systems.

Scientific novelty of the research work is following:

- a technology has been developed for manufacturing rolls with two-start screw calibers with a displaced center of the streams based on the degree of variability of the pitch of the centers of the streams;
- a technology has been developed for manufacturing rolls with two-start screw calibers with a displaced center of the streams based on the identity of the ball diameter and the diameter of the screw stream;
- mathematical models have been developed to determine the movement, speed and acceleration of the cam mechanism for the four phases of the movement of the pusher based on changes in the dynamics of the movement parameters;
- developed analytical dependencies to determine the relative velocities for axial, desaxial and cam mechanism with a flat pusher based on the mutual ratio of relative velocities;
- developed analytical dependencies to determine the reaction in the kinematic pairs of cam mechanisms, taking into account the nature of the change in the forces of technological resistance.

Implement of research results. Based on the results of theoretical and experimental studies on modeling the kinematics and dynamics of cam mechanisms of cutting systems of screw calibers for rolling balls of arbitrary diameter:

a technology for manufacturing ball-rolling rolls with two-start helical calibers with a displaced center of the streams was introduced. (certificate of the joint-stock company "Uzmetkombinat" dated June 1, 2021 No. 01-1 / 1181). As a result of the application of the developed technology, the production of grinding balls with a diameter of 70 mm was launched, the productivity of which increased by 1.7-1.8 times;

the technology for developing cams with a theoretically substantiated profile for cutting ball-rolling rolls with two-start screw calibers with a displaced center of the streams was introduced (certificate of the Uzmetkombinat joint-stock company dated June 1, 2021 No. 01-1/1181). As a result, the productivity of rolling steel grinding balls increased by 1.8-2 times compared to single-start screw calibers.

The structure and volume of the thesis. The content of the dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of references. The volume of the thesis consists of 120 pages of text typed on a computer, including figures and tables.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Каримов Р.И., Садуллаев Ш.А., Шахобутдинов Р.Э. Кулачковые и кулачково-рычажные механизмы. Основы теории и конструкции. // Монография. – Ташкент: ТашГТУ, 2014. –180 с.
2. Каримов Р.И., Бегимов Н.Н., Шахобутдинов Р.Э. Силовой расчёт кулачкового механизма при учёте упругости ведомого звена. // Узбекский журнал: Вестник ТашГТУ, №3, 2014, – С. 95-99 (05.00.00; №16).
3. Каримов Р.И., Баратов Н.Б., Шахобутдинов Р.Э. Определение законов движения и нагруженности звеньев машинного агрегата с кулачковым исполнительным механизмом. // Германский журнал: European applied sciences # 8, Германия, 2014, – С. 38-41. (05.00.00; №3).
4. Каримов Р.И., Баратов Н.Б., Шахобутдинов Р.Э. Разработка системы проектирования и создание кулачкового механизма для нарезания винтовых калибров с целью прокатки шаров произвольного диаметра. // Узбекский журнал, №3, «Вестник ТГТУ» 2015. – С.138-144. (05.00.00; №16).
5. Каримов Р.И., Бегимов Н.Н., Баратов Н.Б., Шахобутдинов Р.Э. Исследование динамики кулачкового механизма при учете упругости привода. // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences №1-2 2016, – С.22-25 (05.00.00; №3).
6. Каримов Р.И., Шахобутдинов Р.Э., Хожибеков Т.Д. Исследование факторов, влияющих на относительные скорости в кулачковых механизмах при синусоидальном законе движения толкателя// Узбекский журнал. «Вестник ТГТУ» №2/2018. – С.130-136. (05.00.00; №16).
7. Каримов Р.И., Шахобутдинов Р.Э., Хожибеков Т.Д. Исследование нагруженности звеньев плоского дезаксиального кулачкового механизма. // Узбекский журнал «Вестник ТГТУ» №3/2018. – С.112-116. (05.00.00; №16).
8. Шахобутдинов Р.Э. Калибровка шаропрокатных валков с двухзаходными винтовыми калибрами со смещённым центром ручьёв для прокатки стальных помольных шаров диаметром 70 мм по ГОСТ 7524-2015. // «Калибровочное бюро» №18 2021. – С.25-30. (05.00.00; №3).

II бўлим (II часть; II part)

9. Шахобутдинов Р.Э. Освоение выпуска нового вида импортозамещающей продукции стальных помольных шаров диаметром 70 мм по ГОСТ 7524-2015 в производственных условиях

- АО “Узметкомбинат” // Машинасозликда инновацияла, энерготежамкор ва ресурслардан фойдаланиш самарадорлигини ошириш. Халқаро миқёсдаги илмий-амалий анжуман материаллари тўплами. 1-китоб. - Наманган, 2021. – Б. 41-44.
10. Бегимов Н.Н., Шахобутдинов Р.Э., Хожибеков Т.Д., Шаумаров Р.А. Разработка первого кулачкового копира для нарезания на токарно-винторезном станке шаропрокатных валков с винтовыми калибрами со смещённым центром ручьёв // Машинасозликда инновацияла, энерготежамкор ва ресурслардан фойдаланиш самарадорлигини ошириш. Халқаро миқёсдаги илмий-амалий анжуман материаллари тўплами. 1-китоб. - Наманган, 2021. – Б. 45-48.
 11. Шахобутдинов Р.Э. Результаты внедрения в АО «Узметкомбинат» нового вида импортозамещающей продукции – стальных помольных шаров диаметром 70 мм по ГОСТ 7524-2015 // Сборник научных статей Международной научной конференции «Инновация-2021» Ташкент, ТашГТУ, – С.264-265.
 12. Каримов Р.И., Шахобутдинов Р.Э. Разработка кулачкового механизма с учётом нагружённости его звеньев для нарезания на токарно-винторезном станке шаропрокатных валков с винтовыми калибрами со смещённым центром. // Сборник научных статей Международной научной конференции «Современные проблемы инновационного развития науки, образования и производства». Андижан. 2020, – С.158-161.
 13. Каримов Р.И., Шахобутдинов Р.Э. Исследование синусоидального и косинусоидального законов движения толкателя на нагружённую звеньев аксиального кулачкового механизма // Машинашуносликнинг долзарб муаммолари ва уларнинг ечими. Фкадемик Х.Х. Усмонхўжаев таваллудининг 100 йиллигига бағишланган Республика илмий-амалий конференцияси мақолалар тўплами. 1-қисм. – Тошкент, 2019, – Б. 55-57.
 14. Каримов Р.И., Шахобутдинов Р.Э., Хожибеков Т.Д. Определение скоростей скольжения в плоских кулачковых механизмах при косинусоидальном законе движения толкателя. // Сборник докладов республиканской научно-практической конференции «Механика деформируемого твёрдого тела» Ташкент, 2018. – С.25-32.
 15. Каримов Р.И., Шахобутдинов Р.Э., Хожибеков Т.Д. Моделирование кинематики и динамики эксцентрикового кулачкового механизма. // Сборник научных статей Международной научной конференции «Инновация-2018» Ташкент. ТашГТУ, – С.84-85.
 16. Каримов Р.И., Шахобутдинов Р.Э., Хожибеков Т.Д. Определение скоростей скольжения в плоских кулачковых механизмах при косинусоидальном законе движения толкателя. // Материалы XXVI международной научно-технической конференции «Прикладные задачи математики», Севастополь, 17-21 - сентября 2018. – С.68-71.

17. Каримов Р.И., Шахобутдинов Р.Э. Определение геометрических параметров бандажных валков для прокатки помольных шаров. // Сборник научных статей Международной научной конференции «Инновация-2017» Ташкент, ТашГТУ, – С.107-108.
18. Каримов Р.И., Шахобутдинов Р.Э. Результаты испытаний прибора для контроля толщины режущей части калибра бандажного валка в производственных условиях АО «Узметкомбинат». // Сборник трудов конференции. Жиззах. 2017. – С.124-125.
19. Каримов Р.И., Шахобутдинов Р.Э. Разработка конструкции копировального устройства для нарезания конической части винтового калибра. // Материалы IX международной научно-технической конференции: «Достижения проблемы и современные тенденции развития горно-металлургического комплекса» Навои. 2017. – С.135-136.
20. Каримов Р.И., Шахобутдинов Р.Э. Исследование влияния колебаний привода на нагружённость высшей кинематической пары управляющего кулачка // Нелинейные колебания механических систем. Труды X всероссийской научной конференции им. Ю.И. Неймарка. Нижний Новгород, 2016, – С.449-452.
21. Каримов Р.И., Бегимов Н.Н., Шахобутдинов Р.Э. Определение геометрических параметров управляющего кулачка для нарезания винтовых калибров с целью прокатки шаров диаметром в 70 мм. // Сборник научных статей Международной научной конференции «Инновация-2016» Ташкент, ТашГТУ, – С. 99-100.
22. Каримов Р.И., Шахобутдинов Р.Э. Синтез кулачкового механизма с плоским толкателем. // III Международная научно-практическая конференция «Современные материалы, техника и технологии в машиностроении». II- секция, Андижан. 2016. – С.52-55.
23. Каримов Р.И., Баратов Н.Б., Бегимов Н.Н., Шахобутдинов Р.Э. Кинетостатический расчёт кулачкового механизма при синусоидальном законе движения ускорения толкателя. // Материалы XXIII международной научно-технической конференции «Прикладные задачи математики», Севастополь, 14-18 - сентября 2015. – С.89-92.
24. Каримов Р.И., Шахобутдинов Р.Э. Исследование колебаний кулачкового механизма при синусоидальном законе движения толкателя // Международная научно-техническая конференция «Современные материалы, техника и технологии в машиностроении». I- секция, Андижан. 2014. – С.90-93.
25. Каримов Р.И., Шахобутдинов Р.Э. Проектирование кулачковых механизмов в среде MathCAD // Международная научно-практическая конференция «Современные материалы, техника и технологии в машиностроении». Андижан. 2012. – С.592-594.
26. Каримов Р.И., Бегимов Н.Н., Шахобутдинов Р.Э. Патент на программный продукт для синтеза кулачкового механизма с коромысловым толкателем. // № DGU 0508, 23.05.2016.

- 27.** Каримов Р.И., Бегимов Н.Н., Шахобутдинов Р.Э. Патент на программный продукт для синтеза кулачкового механизма с плоским толкателем. // № DGU 0510, 23.05.2016.
- 28.** Каримов Р.И., Баратов Н.Б., Асатов О.Э., Файзуллаев Д.С., Шахобутдинов Р.Э. Устройство к токарно-винторезному станку для срезки реборды калибрующей части бандажного вала // Свидетельство на полезную модель. № FAP 20140101. 30.04.2018.

