

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

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

НАРКУЛОВ АКРАМ СИДИКОВИЧ

МАГНИТ МАЙДОНИДА ТОК ЎТКАЗУВЧИ ЮПҚА
ПЛАСТИНКАНИНГ МАГНИТОЭЛАСТИК ДЕФОРМАЦИЯЛАНИШ
ЖАРАЁНИНИ МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАШТИРИШ

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент– 2021

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

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

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

Наркулов Акрам Сидикович

Магнит майдонида ток ўтказувчи юпқа пластинканинг магнитоэластик деформацияланиш жараёнини математик моделлаштириш. 3

Наркулов Акрам Сидикович

Математическое моделирование процесса магнитоупругого деформирование токопроводящей тонкой пластинки в магнитном поле..... 21

Narkulov Akram Sidikovich

Mathematical modeling of the process of magnetoelastic deformation of a conductive thin plate in a magnetic field39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works 43

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

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

НАРКУЛОВ АКРАМ СИДИКОВИЧ

МАГНИТ МАЙДОНИДА ТОК ЎТКАЗУВЧИ ЮПҚА
ПЛАСТИНКАНИНГ МАГНИТОЭЛАСТИК ДЕФОРМАЦИЯЛАНИШ
ЖАРАЁНИНИ МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАШТИРИШ

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

ТЕХНИКА ФАНЛАР БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент– 2021

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2020.2.PhD/T1575 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) ва «Ziyonet» Ахборот таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Индиаминов Равшан Шукурович
физика-математика фанлари доктори, доцент

Расмий оппонентлар:

Полатов Асхад Мухамеджонович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Исомиддинов Анваржон Иномжонович
техника фанлари бўйича
фалсафа доктори (PhD)

Етакчи ташкилот:


Самарқанд давлат университети


Диссертация ҳимояси Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги DSc.13/30.12.2019.T.07.01 Илмий кенгашнинг 2021 йил «24» декабр соат 14⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100202, Тошкент шаҳри, Амир Темур кўчаси, 108-уй. Тел.: (99871) 238-64-43, факс: (99871) 238-65-52, e-mail: tuit@tuit.uz Тошкент ахборот технологиялари университети).


Диссертация билан Тошкент ахборот технологиялари университети Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (234 рақам билан рўйхатга олинган.). (Манзил: 100202, Тошкент шаҳри, Амир Темур кўчаси, 108-уй. Тел.: (99871) 238-65-44).

Диссертация автореферати 2021 йил «11» декабр куни тарқатилди.
(2021 йил «09» декабр даги 42 рақамли реестр баённомаси)




Р.Х. Ҳамдамов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш
раиси, техника фанлари доктори, профессор


Ф.М. Нуралиев
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш
илмий котиби, техника фанлар доктори, доцент


Ш.А. Садуллаева
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш
қошидаги илмий семинар раиси
физика-математика фанлари доктори, доцент

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертация аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда магнитоэластиклик муаммоларини ҳал қилиш зарурати ишлаб чиқаришнинг турли соҳаларидаги замонавий техник жараёнлар талаблари ва инновацион технологияларини яратиш эҳтиёжларидан келиб чиқади. Боғлиқли майдонлар механикасида туташ муҳит ҳаракатини электромагнит эффектларни ҳисобга олган ҳолда ўрганиш муҳим ўринни эгаллайди. Замонавий янги техн технологияларнинг ривожланиши бу эффектларни ҳисобга олиш зарур келтириб чиқаради. Жаҳон миқёсида замонавий техникада оптимал конструкцияларни яратиш чизиқли бўлмаган қонуният билан ўзгараётган таъсирни ҳисобга олган ҳолда юпқа пластинка шаклидаги конструктив элементларнинг кенг равишда ишлаб чиқаришда қўлланилиши долзарб ҳисобланади. Магнитоэластиклик ҳозирги даврга келиб жуда муҳим амалий самара бермоқда ва замонавий техниканинг турли соҳаларига татбиқ қилинмоқда. Электроника кристал элементлари, механика, информатика ва ўлчагич тизимларининг интеграллашуви, бу технологияларнинг бирлашишига ва микротизимли техниканинг яратилишига, ҳамда микроэлектромагнитомеханик тизимларнинг пайдо бўлишига олиб келди. Шу сабабли, дунёнинг ривожланган мамлакатлари, жумладан, АҚШ, Россия Федерацияси, Хитой, Германия, Франция, Япония, Саудия Арабистони, Украина, Эрон ва бошқа мамлакатларда ўтказувчанлик хоссаларининг анизотропиясини ҳисобга олган ҳолда ток ўтказувчи юпқа пластинка ва қобиклар шаклидаги конструктив микроэлементларнинг электромагнит майдони билан магнитоэластик ўзаро таъсири муаммолари муҳим аҳамият касб этмоқда.

Магнит майдони билан эластик муҳитнинг ўзаро таъсир механизмлари, қаралаётган жисмнинг геометрик хусусиятлари ҳамда физикавий хоссаларига боғлиқ ҳолдаги масалалар юзасидан бир қанча назарий ва амалий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Хусусан, бу таъсир механизмини тадқиқ этиш муаммоли масалалардан бири сифатида анизотроп электр ўтказувчанлик юпқа пластинкаларга нисбатан қаралганда бир қанча махсус хусусиятларга эга бўлади.

Ўзбекистон Республикасида конструктив элементларни ҳисоблашлар, замонавий ўлчагич тизимларини яратиш, шунингдек микроэлектроника, микронаноэлектроника ҳамда электротехниканинг турли соҳаларида учрайдиган электромагнит майдони таъсири остида ишлайдиган юпқа пластинка шаклидаги конструктив элементлар тебранишлари, мустаҳкамлиги кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатларини тадқиқ қилиш бўйича кенг қўламли илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегиясида, жумладан «...иқтисодиёт, ижтимоий соҳага, бошқариш тизимига инфорацион-коммуникацион технологияларни жорий этиш муҳандислик-коммуникация ва ижтимоий инфратузилмани ривожлантириш

ҳамда модернизация қилиш»¹ вазифалари белгиланган. Мазкур вазифаларни амалга оширишда лойиҳалаш жараёнига замонавий ахборот технологиялари асосида магнит майдонида ток ўтказувчи юпқа пластинка магнитоэластиклиги чизиксиз масалаларида ўтказувчанлик хоссаларининг ортотропиясини ҳисобга олган ҳолда кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатларини ифодаловчи умумлашган математик моделлар, ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш ва автоматлаштирилган тизимлар ишлаб чиқиш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

Ушбу тадқиқот иши Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги фармони, 2018 йил 12 февралдаги Ф-5209-сон «Ўзбекистон Республикасида космик тадқиқотлар ва технологияларни ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги фармойиши, 2021 йил 10 февралдаги ПҚ-4986 «Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини янада ривожлантиришга инвестицияларни жалб қилиш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарори ва ушбу соҳада қабул қилинган меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда назарда тутилган мақсад ва вазифаларни амалга оширишга муайян даражада хизмат қилади.

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

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Жаҳонда эластик жисмнинг электромагнит майдони билан ўзаро таъсирлари, юпқа электр ўтказувчан жисмларнинг электромагнит майдони таъсирида деформацияланиш жараёнларининг математик моделлари, пластинка ва қобик шаклидаги конструктив элементларининг магнитоэластиклигини тадқиқ қилиш масалалари бўйича бир қатор олимлар: Y.H.Bian, O.I.Zhupanska, I.I.Loos, T.Zhao, G.E. Bagdasaryan, C.A.Калоеров, Д.И.Бардзокас, С.А.Амбарцумян, М.В.Белубекян, Б.А.Кудрявцев, В.Д.Будак, Л.В.Мольченко, Я.М.Григоренко ва А.А.Ванцян каби бошқа хорижий олимлар томонидан тадқиқотлар олиб борилган.

Республикада эластик жисмларнинг магнитоэластиклик деформацияланиш жараёнларини математик моделлаштириш, чизикли ва чизикли бўлмаган тенгламаларини ечиш усуллари борасида Т.Ш. Ширинқулов, Ш.А. Назиров, Ф.М.Нуралиев, Р.Ш.Индиаминов каби мамлакатимиз олимлари илмий-тадқиқот ишларини олиб боришган.

Эластик жисмнинг электромагнит майдони билан ўзаро таъсири бўйича бажарилган ишларнинг тахлили шуни кўрсатадики, бугунги кунда анизотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда магнитоэластик ўзаро таъсири чизикли бўлмаган масалалари етарли даражада ўрганилмаган.

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

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим ва илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация Муҳаммад ал-Хоразмий номидаги ТАТУ ҳузуридаги Ахборот-коммуникация технологиялари илмий-инновацион маркази ва Самарқанд филиалининг илмий-тадқиқот ишлари режасига кирган Ф4-ФК-0-11951-Ф4-024 «Анизотроп электр ўтказувчанликни ҳисобга олган ҳолда ток ташувчи анизотроп қобиклар электромагнитоэластиклиги боғлиқли чизиклимас масалаларини ечиш методикаси, алгоритми ва дастурий таъминотини яратиш» (2012-2016) ва БВ-Ф4-014 «Электромагнит мослашувликни ҳисобга олган ҳолда электрон қурилмалар, микро- ва нанотизимлар юпқа элементлари магнит майдонида магнитоэластик тебранишлари масалаларини ечишнинг амалий усуллари ва магнитоэластикликнинг математик асосларини ривожлантириш» (2017-2020) фундаментал А-5-030 «Анизотроп жисмлар магнитотермоэластиклиги боғлиқли масалалари математик ва дастурий таъминоти» (2015-2017) амалий грантлар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади ток ўтказувчи юпқа пластинканинг ўзгарувчан электродинамик кучлар таъсиридаги магнитоэластик чизикли бўлмаган деформацияланишини математик моделлаштириш, сонли алгоритмлар ва дастурий мажмуини ишлаб чиқиш.

Тадқиқотнинг вазифалари:

электродинамик кучлар таъсиридаги анизотроп юпқа ток ўтказувчи пластинканинг деформацияланиши жараёнини математик моделлаштириш;

ток ўтказувчи ортотроп юпқа ҳалқавий пластинканинг ўзгарувчан электродинамик кучлар таъсиридаги магнитоэластик нозичикли деформацияланиши моделини ишлаб чиқиш;

ўзгарувчан электродинамик ва механик кучлар таъсиридаги ортотроп юпқа ҳалқавий пластинканинг магнитоэластиклиги боғлиқли масалаларини ечиш учун самарали сонли усулларни қўллаш;

ток ўтказувчи юпқа пластинканинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини тадқиқ қилиш имконини берадиган магнитоэластикликнинг боғлиқли масалаларини сонли ечиш учун ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий мажмуини ишлаб чиқиш;

ташқи бегона токнинг йўналиши ва зичлиги миқдорини танлаган ҳолда, шунингдек магнит индукциясини ўзгартириб, электромагнит майдони таъсиридаги юпқа пластинка эгилишини минималлаштиришга эришиш мумкинлигини баҳолаш.

Тадқиқот объекти сифатида ўзгарувчан электромагнит майдонида ток ўтказувчи юпқа пластинканинг магнитоэластик деформацияланиш жараёни олинган.

Тадқиқот предмети ўзгарувчан электромагнит майдони таъсири остида ишлайдиган юпқа пластинка шаклидаги конструктив микроэлементлар магнитоэластиклик деформацияланиш жараёнларини математик моделлари,

ҳисоблаш алгоритмлари, дастурий воситалари, кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатлари ва электромагнит эффектлар таҳлиллари ташкил этади.

Тадқиқот усуллари. Тадқиқот жараёнида деформацияланувчи қаттиқ жисм механикаси усуллари, ҳамда Ньюмарк, чизиклилаштириш ва турғун бўлган дискрет ортогоналлаштириш усуллари қўлланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

ўтказувчанлик хоссаларининг анизотропиясини ҳисобга олган ҳолда электродинамик кучлар таъсирида бўлган ток ўтказувчи пластинка шаклидаги конструктив элементнинг магнитоэластик деформацияланиш жараёнини тадқиқ этиш учун математик модель ишлаб чиқилган;

электромагнит ва механик кучлар таъсирларида бўлган юпқа ҳалқавий пластинка шаклидаги конструктив микроэлементнинг магнитоэластик деформацияланиши жараёни ўтказувчанлик хоссаларининг ортотропиясини ҳисобга олган ҳолда математик модели ишлаб чиқилган;

ток ўтказувчи пластинка кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини геометрик чизиклимасликни ҳисобга олган ҳолда тадқиқ қилиш имконини берадиган магнитоэластикликнинг икки ўлчамли математик модели ва боғлиқли масалаларни сонли ҳисоблаш алгоритмлари ҳамда дастурий мажмуаси ишлаб чиқилган;

электродинамик кучлар таъсирида бўлган ток ўтказувчи пластинка магнитоэластик деформацияланиши жараёнини тадқиқ қилишда геометрик, механик ва электромагнит параметрларини ўзгартирган ҳолда кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатлари таҳлили асосланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

эластик жисмнинг электромагнит майдон билан ўзаро таъсирининг янги эффектлари олинган, бу эффектлар янги техниканинг турли соҳаларидаги кўпгина амалий масалаларни ечишда қўлланилиши мумкин;

ҳосил қилинган тенгламаларга асосланиб, ишлаб чиқилган услубиятдан фойдаланган ҳолда ҳам материалнинг анизотропиясини ҳам пластинка ички электромагнит майдонининг анизотропиясини ҳисобга олиш имконияти яратилди, бу эса ўтказилган ишнинг амалий қиймати ҳисобланади;

Тадқиқот натижаларнинг ишончлилиги юпқа ток ўтказувчи жисмлар магнитоэластиклиги чегаравий масалаларининг қўйилиши, келтириб чиқарилган математик ифодаларнинг қатъийлиги билан, синовдан ўтган сонли усулларида фойдаланилганлиги, ечимларнинг аниқлиги баҳоланганлиги, ҳамда мавжуд масалаларнинг ечимлари билан таққосланганлиги билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти ўтказувчанлик хоссаларининг анизотропиясини ҳисобга олган ҳолда, электродинамик кучлар таъсирида бўлган юпқа ток ўтказувчи микропластинка магнитоэластиклиги боғлиқли масалаларини сонли ечиш услубиятини ишлаб чиқиш билан изоҳланади.

Тадқиқот ишининг амалий аҳамиятини ўзгарувчан электродинамик кучлар таъсирида бўлган, ортотроп электр ўтказувчанликка эга ток ўтказувчи

микропластинканинг геометрик, механик ва электромагнит параметрларини кенг диапазонда ўзгартириш ёрдамида, шунингдек, турли юкланишлар ва маҳкамланиш турларида кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатлари таҳлили, ҳисоблашлар учун ишлаб чиқилган алгоритмлар ва дастурий мажмуа ташкил этади. Электр ўтказувчанликнинг ортотропиясини ҳисобга олган ҳолда, магнит индукциясини ўзгартириб, ташқи бегона токнинг йўналиши ва зичлиги миқдорини танлаган ҳолда электромагнит майдони таъсирида бўлган юпка пластинка эгилишини минималлаштиришга эришиш мумкинлиги баҳоланган.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Электромагнит кучлар таъсиридаги анизотроп ток ўтказувчи пластинка шаклидаги микроэлементларнинг магнитоэластик деформацияланиши жараёнини тадқиқ этиш учун ишлаб чиқилган математик моделлар, сонли алгоритмлар ва дастурий воситалар:

электромагнит мослашувликни ҳисобга олган ҳолда, ток ташувчи жисмларга ўзгарувчан электромагнит майдонининг таъсирини аниқлаш мақсадида Самарқанд вилояти «Электромагнит мослашув хизмати» таъсирруфида бўлган ўлчов қурилмаларида ишлатиладиган ток ўтказувчи юпка конструктив микроэлементларига жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 07.05.2021йил №33-8/3342-сон маълумотномаси). Натижада ўзгарувчан электромагнит майдони таъсирида бўлган юпка ток ўтказувчи пластинка шаклидаги микроэлементнинг электромагнитомеханик параметрлари учун ишлаб чиқилган тавсиялар асосида пластинканинг мустаҳкамлиги 8-11% га орттирилишига эришилган, яратилган математик ва дастурий таъминот муҳандислик ҳисобларини ўтказишга кетадиган вақт ва меҳнат сарфини 6-10% га қисқартириш имконини берган;

ток ўтказувчи юпка пластинка шаклидаги конструктив микроэлементларнинг электромагнит майдони билан мураккаб ўзаро таъсир жараёнларини аниқлаш ва уларда пайдо бўладиган электромагнит эффектларини таҳлил қилиш мақсадида «AlNet» Шуба Корхонаси соҳа иш жараёнларида ишлатиладиган станцион ва ташқи роутер, коммутаторларнинг иккиламчи электр таъминот қурилмаларида ишлатиладиган диод ва транзисторлари таркибидаги конструктив микроэлементларига жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 07.05.2021йил №33-8/3342-сон маълумотномаси). Натижада ишлаб чиқилган тавсиялар асосида қурилмаларда ишлатиладиган микропластинкаларнинг ҳажмини қисқартиришга ҳамда мустаҳкамлигининг 9-12 % га оширилишига, юпка микропластинка эгилишини минималлаштиришга эришиш мумкинлигини баҳолашдаги иш унумдорлигини 8-10 % га оширишга имкон берган;

ток ўтказувчи пластинка шаклидаги микроэлементларнинг электромагнит кучлар таъсиридаги магнитоэластик деформацияланиш жараёнларини аниқлаш мақсадида «ЎЗБЕКТЕЛЕКОМ» АК Самарқанд филиали Кўшработ туман телекоммуникация боғламасига қарашли электрон автоматик станцияларининг электрон бошқарув машиналарида ишлатиладиган ток ўтказувчи

юпқа конструктив микроэлементларига жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 07.05.2021 йил №33-8/3342-сон маълумотномаси). Натижада ишлаб чиқилган тавсиялар асосида электромагнит майдони таъсиридаги юпқа ток ўтказувчи пластинка шаклидаги микроэлементнинг мустаҳкамлигини 10-15 % орттирилиши, юпқа пластинка эгилишини минималлаштиришга эришиш мақсадида яратилган математик ва дастурий таъминот муҳандислик ҳисобларини ўтказишга кетадиган вақт ва меҳнат сарфини 5-9 % га қисқартириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқотнинг назарий ва амалий натижалари 7 та халқаро ва 8 та республика илмий-амалий анжуманларда маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Тадқиқот мавзуси бўйича жами 25 та илмий иш чоп этилган бўлиб, жумладан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий натижаларини чоп этишга тавсия этилган илмий нашрларда 8 та мақола, 2 таси республика ва 6 таси хорижий журналларда нашр қилинган, ҳамда 2 та ЭҲМ учун яратилган дастурий воситаларни қайд қилиш гувоҳномалари олинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 110 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологияларни ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мос равишда долзарблиги ва зарурияти асосланган, мақсад ва вазифалар шакллантирилган, тадқиқотнинг объекти ва предмети кўрсатилган, унинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланган, назарий ва амалий аҳамиятлари очиқ берилган, тадқиқот натижаларининг амалиётга жорий этиш ҳолатлари, шунингдек, тадқиқот натижаларининг чоп этилганлиги ҳамда диссертация тузилиши ҳақида маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Магнитоэластиклик масалаларини тадқиқ қилиш усуллари ва моделларини ишлаб чиқиш бўйича адабиётлар таҳлили**» деб номланган биринчи бобида электромагнит майдонининг деформацияланувчи муҳит билан ўзаро таъсири муаммоларига бағишланган илмий манбаларнинг батафсил таҳлили, шунингдек, пластинка ва қобиклар боғлиқлиги магнитоэластиклиги масалаларини тадқиқ қилиш, математик моделларини ишлаб чиқиш, ҳамда кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини сонли ҳисоблаш алгоритмлари бўйича тадқиқотлар шарҳи келтирилган.

Эластик жисмнинг электромагнит майдони билан ўзаро таъсири бўйича бажарилган ишларнинг кўпчилиги ўтказувчанлик хоссаларининг анизотропиясини ҳисобга олмаган ҳолда қаралган. Агар ток ўтказувчи эластик жисмнинг материали анизотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик синг-

дирувчанлик хоссаларига эга бўлса, у ҳолда майдонларнинг ўзаро таъсири сезиларли равишда мураккаблашади. Ўтказувчанлик хоссаларининг анизотропиясини ҳисобга олган ҳолда ток ўтказувчи жисмлар магнитоэластиклиги боғлиқли чизиқлимас масалалари ечилмаган эканлиги келтирилган шарҳдан келиб чиқади. Бунга бошланғич боғлиқли магнитоэластик хусусий ҳосилалари дифференциал тенгламалар системасининг мураккаблиги, бундай масалаларни ечиш усуллари ва алгоритмлари мавжуд эмаслиги сабабдир, бу эса диссертация иши мақсади ва масалаларини аниқлаш имконини берди.

Диссертациянинг «Ток ўтказувчи жисмнинг деформацияланиш жараёнини тадқиқ қилиш учун магнитоэластиклик моделини ишлаб чиқиш» деб номланган иккинчи боби ток ўтказувчи жисм чизиқлимас магнитоэластиклигининг масала уч ўлчамли қўйилганда бошланғич физик ва математик ҳолатлар, муносабатларни шакллантиришга, ўтказувчанлик хоссаларининг анизотропиясини ҳисобга олган ҳолда ток ўтказувчи эластик жисм магнитоэластиклиги моделини ишлаб чиқишга бағишланган.

Мазкур ишда ўтказувчанлик хоссаларининг анизотропиясини ҳисобга олган ҳолда электромагнит майдони таъсирида бўлган ток ўтказувчи эластик жисм магнитоэластиклиги қуйидагича математик модели таклиф этилди:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \vec{J}_{cm}; \operatorname{div} \vec{B} = 0, \operatorname{div} \vec{D} = 0; \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \rho (\vec{f} + \vec{f}^{\wedge}) + \operatorname{div} \hat{\sigma} \quad (2)$$

$$\vec{B} = \mu_{ij} \vec{H}; \quad \vec{D} = \varepsilon_{ij} \vec{E}; \quad (3)$$

$$\vec{J} = \sigma_{ij} (\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}); \quad (4)$$

$$\rho \vec{f}^{\wedge} = \sigma_{ij} (\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \times \vec{B}. \quad (5)$$

мос равишда бошланғич ва чегаравий шартлар:

$$v_k (t_{ki} + \tau_{ki}) \Big|_{S_1} = [P_i + v_k \tau_{ki}^{(c)}] \Big|_{S_1}. \quad (6)$$

$$\vec{u} = 0, \quad \dot{\vec{u}} = 0, \quad \vec{B} = 0, \quad \vec{B}^{(c)} = 0, \quad \vec{H} = 0, \quad \vec{H}^{(c)} = 0 \quad (7)$$

Бу ерда \vec{E} - электр майдони кучланганлиги вектори; \vec{H} - магнит майдони кучланганлиги вектори; \vec{D} - электр индукцияси вектори; \vec{B} - магнит индукцияси вектори; \vec{J}_{cm} - бегона электр токи зичлиги; \vec{f} - ҳажмий куч; \vec{f}^{\wedge} - ҳажмий Лоренц кучи; \vec{J} - электр токи зичлиги; $\hat{\sigma}$ - ички кучланиш тензори; $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, \mu_{ij}$ - мос ҳолда чизиқли анизотроп токўтказувчи жисмнинг электр ўтказувчанлик, диэлектрик ва магнит сингдирувчанлик тензорлари ($i, j=1,2,3$); t_{ki} - кучланиш тензори; $\tau_{ki}, \tau_{ki}^{(c)}$ - жисм ва вакуумдаги Максвелл тензорлари; P_i - сирт кучлари ташкил этувчилари; v_k - бирлик нормал вектор компоненталари; S_1 - кучланишлар берилган жисм чегараси қисми; \vec{u} - қўчиш вектори, (c) - индекс миқдорларнинг ташқи муҳитга тегишли эканлигини кўрсатади.

Шундай қилиб, (1), (2) муносабатлар ва (3)–(5), ҳамда (6), (7) билан биргаликда, ўтказувчанлик хоссаларининг анизотропиясини ҳисобга олган ҳолда ток ўтказувчи эластик жисм магнитоэластиклиги моделини ташкил этади.

Диссертациянинг «Юпқа пластинканинг магнитоэластиклик деформацияланиши модели, алгоритми ва сонли ечиш усуллари» деб номланган учинчи боби ўтказувчанлик хоссаларининг ортотропиясини ҳисобга олган ҳолда, ўзгарувчан электродинамик ва механик кучлар таъсирларида бўлган ток ўтказувчи юпқа ортотроп пластинка кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини тадқиқ қилиш имконини берадиган магнитоэластикликнинг икки ўлчамли математик моделини ишлаб чиқишга ва пластинка чизиқли бўлмаган магнитоэластиклиги чегаравий масаласини ечишда самарали сонли усуллارни қўллашга, боғлиқли масалаларни сонли ечиш учун ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқишга бағишланган.

Ўтказувчанлик хоссаларининг ортотропиясини ҳисобга олган ҳолда юпқа ортотроп халқавий пластинканинг ўққа нисбатан симметрик магнитоэластик деформацияланиши масаласини қаралган.

Эластик пластинка материали чекли электр ўтказувчан бўлиб, ташқи магнит майдонида жойлашган. Бунда, пластинка текис тақсимланган ташқи бегона электр токини ўтказувчи ток ўтказгич ва электромагнит майдонининг деформация майдонига таъсири Лоренц кучи орқали содир этилади, деб ҳисобланган. Магнит майдонида ортотроп доиравий пластинканинг деформациясини тадқиқ қилишда, r, θ, z цилиндрик координаталар системасидан фойдаланилган. Бунда пластинканинг ўрта сирти қутб координаталар системаси билан боғланган ва пластинанинг маркази координаталар бошида бўлсин, деб олинган. Пластинкага қўйилган электромагнит ва механик юкланишлар ўққа нисбатан симметрикликни сақлаган ҳолда деформацияни вужудга келтиради. Пластинка магнитоэластиклиги масаласи тенгламаларида иштирок этувчи деформация ва электромагнит майдонларнинг ҳамма изланаётган компоненталари θ координатадан боғлиқ эмас, деб ҳисоблаб, қуйидаги боғланишларни қабул қиламиз:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} = 0, \quad v = 0, \quad E_r = 0, \quad B_\theta = 0, \quad S = 0, \quad H_\theta = 0, \quad f_\theta = 0, \quad f_\theta^{\wedge} = 0, \quad h = h(r); \quad (8)$$

бу ерда S – силжитувчи зўриқиш, v – доира бўйлаб кўчиш.

Кристаллографик тизимлар, кристал текисликлар ёки ёқлар ташкил этган учта бурчак ва қирралар узунликлари муносабатларидан аниқланувчи бирлик ячейканинг шаклидан бир биридан фарқланади. Ҳар хил тизимлар ва синфлардаги кристалларнинг электрик ва магнит хоссалари бир биридан фарқ қилади.

Кристаллофизикадан келиб чиққан ҳолда, кристал тузилиши ромбик бўлган қаралган ўтказувчи муҳитлар синфи учун $\sigma_{ij}, \mu_{ij}, \varepsilon_{ij}$ тензорлар диагональ кўринишни қабул қилади деб ҳисоблаб, ўзгарувчан электродинамик ва механик кучлар таъсирларида бўлган ток ўтказувчи ортотроп халқавий

пластинканинг магнитоэластиклиги чизиқли бўлмаган модели ишлаб чиқилди:

магнитоэластиклик тенгламалари

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial(rN_r)}{\partial r} - N_\theta + r(f_r + \rho f_r^\wedge) &= r\rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\
 \frac{\partial(rQ_r)}{\partial r} + r(f_z + \rho f_z^\wedge) &= r\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \\
 \frac{\partial(rM_r)}{\partial r} - M_\theta - rQ_r - rN_r \mathcal{G}_r &= 0, \\
 -\frac{\partial B_\gamma}{\partial t} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rE_\theta), \\
 \sigma_2 \left[E_\theta + 0,5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-) - \frac{\partial u}{\partial t} B_z \right] &= -\frac{\partial H_z}{\partial t} + \frac{H_r^+ - H_r^-}{h};
 \end{aligned} \tag{9}$$

кўчишлар ва деформациялар ўртасидаги муносабатлар

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{2} \mathcal{G}_r^2, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}, \quad \chi_r = \frac{\partial \mathcal{G}_r}{\partial r}, \quad \chi_\theta = \frac{1}{r} \mathcal{G}_r; \tag{10}$$

эластиклик муносабатлари

$$\begin{aligned}
 N_r &= \frac{e_r h}{1 - \nu_r \nu_\theta} (\varepsilon_r + \nu_\theta \varepsilon_\theta), & N_\theta &= \frac{e_\theta h}{1 - \nu_r \nu_\theta} (\varepsilon_\theta + \nu_r \varepsilon_r), \\
 M_r &= \frac{e_r h^3}{12(1 - \nu_r \nu_\theta)} (\chi_r + \nu_\theta \chi_\theta), & M_\theta &= \frac{e_\theta h^3}{12(1 - \nu_r \nu_\theta)} (\chi_\theta + \nu_r \chi_r);
 \end{aligned} \tag{11}$$

Лоренц кучи ташкил этувчилари

$$\begin{aligned}
 \rho f_r^\wedge &= \sigma_1 h \left[E_\theta B_z - \frac{\partial u}{\partial t} B_z^2 + 0,5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-) B_z \right], \\
 \rho f_z^\wedge &= -\sigma_2 h \left[0,5 E_\theta (B_r^+ + B_r^-) - \right. \\
 &\quad \left. - 0,25 \frac{\partial w}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-)^2 + \frac{1}{12} \frac{\partial w}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-)^2 - 0,5 \frac{\partial u}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-)^2 B_z \right].
 \end{aligned} \tag{12}$$

Бу ерда $\nu_r = \nu_{\theta r}$, $\nu_\theta = \nu_{r\theta}$, $e_r \nu_\theta = e_\theta \nu_r$; ν_r, ν_θ – Пуассон коэффициентлари; e_r, e_θ – Юнг модуллари; u, w – кўчиш вектори компоненталари; N_r, N_θ – тангенциал зўриқишлар; M_r, M_θ – эгувчи моментлар; Q_r – кесувчи зўриқиш; $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$ – чўзилиш ва силжиш тангенциал деформациялари; χ_r, χ_θ – пластинка ўрта сирти бош эгриликлари; B_r^\pm – пластинка сиртларидаги магнит индукцияси тангенциал ташкил этувчи компоненталари; $h = h(r)$ – пластинка қалинлиги; $\rho f_r^\wedge, \rho f_\theta^\wedge$ – координата ўқларига пондеромотор кучларнинг проекциялари.

Тенгламалар тўлиқ системаси (9)-(12) дан фойдаланиб, ток ўтказувчи халқавий пластинканинг магнитоэластиклигининг чизиқли бўлмаган моделини математик ёзиш имкониятини берадиган, ўзгарувчан механик ва электромагнит кучлар таъсири остида жойлашган, ўтказувчанлик хоссаларининг ортотропиясини ҳисобга олган ҳолда, ток ўтказувчи юпқа халқавий

пластинканинг магнитоэластиклик чизиқсиз дифференциал тенгламалари ҳал қилувчи боғлиқли системаси келтириб чиқарилди:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial u}{\partial r} &= \frac{1-\nu_r\nu_\theta}{e_r h} N_r - \frac{\nu_\theta}{r} u - 0,5 \mathcal{G}_r^2, \quad \frac{\partial w}{\partial r} = -\mathcal{G}_r, \quad \frac{\partial \mathcal{G}_r}{\partial r} = \frac{12(1-\nu_r\nu_\theta)}{e_r h^3} M_r - \frac{\nu_\theta}{r} \mathcal{G}_r, \\
\frac{\partial N_r}{\partial r} &= \frac{1}{r} (\nu_\theta - 1) N_r + \frac{e_\theta h}{r^2} u - \\
&- \left(F_r + \sigma_1 h \left[E_\theta B_z - \frac{\partial u}{\partial t} B_z^2 + 0,5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-) B_z \right] \right) + \rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\
\frac{\partial Q_r}{\partial r} &= -\frac{1}{r} Q_r - \left(F_z - \sigma_2 h \left[0,5 E_\theta (B_r^+ + B_r^-) - 0,25 \frac{\partial w}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-)^2 + \right. \right. \\
&+ \left. \left. \frac{1}{12} \frac{\partial w}{\partial t} (B_r^+ - B_r^-)^2 - 0,5 \frac{\partial u}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-)^2 B_z \right] \right) + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \\
\frac{\partial M_r}{\partial r} &= \frac{1}{r} (\nu_\theta - 1) M_r + \frac{e_\theta h^3}{12 r^2} \mathcal{G}_r + Q_r + N_r \mathcal{G}_r, \\
\frac{\partial B_z}{\partial r} &= -\sigma_2 \mu \left[E_\theta + 0,5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-) - \frac{\partial u}{\partial t} B_z \right] + \frac{B_r^+ - B_r^-}{h}, \\
\frac{\partial E_\theta}{\partial r} &= -\frac{\partial B_z}{\partial t} - \frac{1}{r} E_\theta.
\end{aligned} \tag{13}$$

Ўтказувчанлик хоссаларининг ортотропиясини ҳисобга олган ҳолда, ток ўтказувчи халқавий пластинканинг магнитоэластиклиги модели квадратик яқинлашишда қурилган. Ҳосил қилинган ҳал қилувчи (13) тенгламалар системаси ўзгарувчан коэффициентли саккизта биринчи тартибли хусусий ҳосиллали боғлиқли чизиқлимас дифференциал тенгламалардан иборат. Лоренц кучи тузувчилари пластинканинг деформацияланиши тезлиги, ташқи магнит майдони, ташқи магнит майдонига нисбатан ўтказиш токи кучланганлиги ва миқдорларини ҳисобга олади. Ҳаракат тенгламаларида чизиқлимасликни ҳисобга олиш Лоренц кучида чизиқлимасликни пайдо қилади.

Ҳосил қилинган системага бошланғич ва чегаравий шартларни қўшиб, чегаравий масалани ҳосил қиламиз.

Чизиқлимас чегаравий масалани вектор шаклда қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$\frac{\partial \vec{N}}{\partial r} = \vec{F} \left(r, t, \vec{N}, \frac{\partial \vec{N}}{\partial t}, \frac{\partial^2 \vec{N}}{\partial t^2} \right), \quad (r_0 \leq r \leq r_N, t_0 \leq t \leq t_N), \tag{14}$$

чегаравий шартлар

$$\vec{g}_1(\vec{N}(r_0, t)) = \vec{b}_1^*, \quad \vec{g}_2(\vec{N}(r_N, t)) = \vec{b}_2^* \tag{15}$$

ва бошланғич шартлар ($t = 0$ да)

$$\vec{N} = 0, \quad \partial \vec{N} / \partial t = 0, \tag{16}$$

бу ерда $\vec{N} = \{u, w, \theta, N_r, Q_r, M_r, E_\theta, B_z\}^T$ – изланаётган функциялар устун вектори; $\vec{F}, \vec{g}_1, \vec{g}_2, \vec{b}_1^*, \vec{b}_2^*$ – умумий ҳолда чизиқли бўлмаган вектор-функциялар.

Пластинка магнитоэластиклиги чизиқлимас масалаларини сонли ечиш учун таклиф этилаётган ёндошув чекли айирмали Ньюмарк схемаси, чизиқ-

лилаштириш ва дискрет ортогоналлаштириш усуллари кетма-кет қўлланилишига асосланган.

Ўзгарувчан электродинамик ва механик кучлар таъсирларида бўлган ток ўтказувчи ортотроп пластинка кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатларини аниқлаш масалаларида (14), (15) чегаравий масала фиксирланган вақт моментлари учун ечилади. Вақт координатаси бўйича хусусий ҳосилалар Ньюмаркнинг ошқормас схемаси чекли айирмали ифодалари билан аппроксимацияланади ва бу схема қўлланилгандан кейин чизиқлимас оддий дифференциал тенгламалар системаси учун чегаравий масалани қуйидаги кўринишда ҳосил қиламиз:

$$\frac{d\vec{N}}{dr} = \vec{F}(r, \vec{N}) \quad (17)$$

ва мос чегаравий шартлар

$$D_1\vec{N}(r_0) = \vec{d}_1, \quad D_2\vec{N}(r_1) = \vec{d}_2 \quad (18)$$

Чизиқлилаштириш усули ёрдамида бошланғич (17), (18) чегаравий масала чизиқли чегаравий масалалар кетма-кетлигига келтирилади ва уни қисқача қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$\frac{d\vec{N}^{k+1}}{dr} = \vec{G}(\vec{N}^{k+1}, \vec{N}^k), \quad (19)$$

$$B_1(\vec{N}^k)\vec{N}^{k+1}(r_0) = \vec{b}_1(\vec{N}^k), \quad B_2(\vec{N}^k)\vec{N}^{k+1}(r_N) = \vec{b}_2(\vec{N}^k), \quad (k=0,1,2,\dots). \quad (20)$$

бу ерда $\vec{N} = \{u, w, \theta_r, N_r, Q_r, M_r, E_\theta, B_z\}^T$; \vec{N}^{k+1} ва \vec{N}^k – мос ҳолда $k+1$ -чи ва k -чи итерациялардаги ечимлар; $\vec{G}(\vec{N}^{k+1}, \vec{N}^k)$ – тенгламалар системаси ўнг томони вектори; $\vec{B}_1(\vec{N}^k), \vec{B}_2(\vec{N}^k), \vec{b}_1(\vec{N}^k), \vec{b}_2(\vec{N}^k)$ – мос ҳолда чегаравий шартлар ўнг қисми матрицалари.

Чизиқлилаштириш усулини қўллаганилдан кейин (19) ҳал қилувчи система ёйилган ҳолда қуйидагича ёзилади:

$$\begin{aligned} \frac{du^{(k+1)}}{dr} &= \frac{1 - \nu_r \nu_\theta}{e_r h} N_r^{(k+1)} - \frac{\nu_\theta}{r} u_r^{(k+1)} + 0,5(\mathcal{G}_r^{(k)})^2 - \mathcal{G}_r^{(k+1)} \mathcal{G}_r^{(k)}, \\ \frac{dw^{(k+1)}}{dr} &= -\mathcal{G}_r^{(k+1)}, \quad \frac{d\mathcal{G}_r^{(k+1)}}{dr} = \frac{12(1 - \nu_r \nu_\theta)}{e_r h^3} M_r^{(k+1)} - \frac{\nu_\theta}{r} \mathcal{G}_r^{(k+1)}, \\ \frac{dN_r^{(k+1)}}{dr} &= \frac{1}{r} \left[(\nu_\theta - 1) N_r^{(k+1)} + \frac{e_\theta h}{r} u^{(k+1)} \right] - P_r^{(k+1)} - h J_{\theta cm} B_z^{(k+1)} - \\ &- \sigma_1 h \left[-E_\theta^{(k)} B_z^{(k)} + E_\theta^{(k+1)} B_z^{(k)} + E_\theta^{(k)} B_z^{(k+1)} - 0,5 \left(-\frac{\partial w^{(k)}}{\partial t} B_z^{(k)} + \frac{\partial w^{(k+1)}}{\partial t} B_z^{(k)} + \right. \right. \\ &+ \left. \frac{\partial w^{(k)}}{\partial t} B_z^{(k+1)} \right) (B_r^+ + B_r^-) - 2 \frac{\partial u^{(k)}}{\partial t} (B_z^{(k)})^2 + \frac{\partial u^{(k+1)}}{\partial t} (B_z^{(k)})^2 + \\ &+ \left. 2 \frac{\partial u^{(k)}}{\partial t} B_z^{(k+1)} B_z^{(k)} \right] + \rho h \frac{\partial^2 u^{(k+1)}}{\partial t^2}, \\ \frac{dQ_r^{(k+1)}}{dr} &= -\frac{1}{r} Q_r^{(k+1)} - P_z^{(k+1)} - 0,5 h J_{\theta cm} (B_r^+ + B_r^-) - \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
& -\sigma_2 h [0.5 E_\theta^{(k+1)} (B_r^+ + B_r^-) + 0.25 \frac{\partial w^{(k+1)}}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-)^2 + \frac{1}{12} \frac{\partial w^{(k+1)}}{\partial t} (B_r^+ - B_r^-)^2 - \\
& -0.5 (-\frac{\partial u^{(k)}}{\partial t} B_z^{(k)} + \frac{\partial u^{(k+1)}}{\partial t} B_z^{(k)} + \frac{\partial u^{(k)}}{\partial t} B_z^{(k+1)}) (B_r^+ + B_r^-)] + \rho h \frac{\partial^2 w^{(k+1)}}{\partial t^2}, \\
& \frac{dM_r^{(k+1)}}{dr} = \frac{1}{r} \left[(v_\theta - 1) M_r^{(k+1)} + \frac{e_\theta h^3}{12r} \mathcal{G}_r^{(k+1)} \right] + N_r^{(k+1)} \mathcal{G}_r^{(k)} + N_r^{(k)} \mathcal{G}_r^{(k+1)} - N_r^{(k)} \mathcal{G}_r^{(k)} + Q_r^{(k+1)}, \\
& \frac{dB_z^{(k+1)}}{dr} = -\sigma_2 \mu \left[E_\theta^{(k+1)} + 0.5 (B_r^+ + B_r^-) \frac{\partial w^{(k+1)}}{\partial t} - B_z^{(k)} \frac{\partial u^{(k+1)}}{\partial t} - B_z^{(k+1)} \frac{\partial u^{(k)}}{\partial t} + B_z^{(k)} \frac{\partial u^{(k)}}{\partial t} \right] + \\
& + \frac{B_r^+ - B_r^-}{h}, \quad \frac{dE_\theta^{(k+1)}}{dr} = -\frac{\partial B_z^{(k+1)}}{\partial t} - \frac{1}{r} E_\theta^{(k+1)}, \quad (k = 0, 1, 2, \dots).
\end{aligned}$$

Вақт бўйича $(k+1)$ – яқинлашишдаги ҳосилалар қуйидаги кўринишга эга:

$$\begin{aligned}
\left(\frac{\partial u^{(t+\Delta t)}}{\partial t} \right)^{(k+1)} &= \left[\frac{2(u^{(t+\Delta t)})}{\Delta t} - \frac{\partial u^t}{\partial t} \right]^{(k+1)}, \\
\left(\frac{\partial^2 u^{(t+\Delta t)}}{\partial t^2} \right)^{(k+1)} &= \left[\frac{u^{t+\Delta t} - u^t}{0.25(\Delta t)^2} - \frac{1}{0.25\Delta t} \frac{\partial u^t}{\partial t} - \frac{\partial^2 u^t}{\partial t^2} \right]^{(k+1)}.
\end{aligned}$$

Охири босқичда (19), (20) чизикли чегаравий масалаларнинг ҳар бири дискрет ортогоналлаштириш усули билан ечилди. Бу усул алоҳида олинган интеграллаш нуқталарида Коши масаласи вектор ечимларини ортогоналлаштиришда турғун ҳисоблаш жарёнини таъминлайди.

Диссертациянинг «Эгилувчан ортотроп халқавий пластинканинг магнитоэластик деформацияланишини сонли ҳисоблаш учун дастурий мажмуа ишлаб чиқиш» деб номланган тўртинчи боби магнит майдонида электромагнит кучлар таъсирида бўлган ток ўтказувчи юпқа халқавий пластинканинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатларини тадқиқ қилиш имконини берадиган магнитоэластикликнинг боғлиқли масалаларини сонли ечиш дастурий мажмуасини ишлаб чиқишга бағишланган. Масалани сонли ечиш жараёнида тақрибий олинган ечимлар бўйича олинган натижаларнинг ишончлилиги баҳоланган. Ток ўтказувчи халқавий пластинка магнитоэластик деформацияланиш жараёнини тадқиқ қилишда геометрик, механик ва электромагнит параметрларини ўзгартирган ҳолда кучланганлик ҳолатлари, ҳамда электромагнит эффектлар таҳлили келтирилган.

Магнит индукциясини ўзгартиб, ташқи бегона токнинг йўналиши ва зичлиги миқдорини танлаган ҳолда электродинамик кучлар таъсиридаги юпқа пластинка эгилишини минималлаштиришга эришиш мумкинлигини кўрсатилган.

Пластинка магнитоэластиклиги масалаларини боғлиқли масалаларини сонли ечиш ва натижаларни таҳлил қилиш учун дастурий мажмуа ишлаб чиқилган. Дастурий мажмуа “Compaq Visual Fortran” дастурлаш муҳити “Visual Fortan” дастурлаш тилида яратилган. Ишлаб чиқилган дастурий мажмуа қуйидаги дастурий модуллардан иборат. Модуллар қўлланилиши бўйича махсус ва умумий модулларга бўлинади.

Қўлланилиши бўйича махсус модуллар (*MAINE* бош модул ва *RAPART* қисмий дастур) лар чегаравий шартлардан, механик ва электромагнит таъсирлардан, пластинканинг геометрик ҳарактеристикаларидан, ишлатиладиган интерполяция формуласидан боғлиқдир.

RAPART қисмий дастурига пластинканинг геометрик, механик, электромагнит параметрлари ҳақидаги берилган маълумотлар бўйича қизиқли интерполяциялаш амалга оширилади ва системанинг ўнг қисми коэффициентлари ҳисобланади.

Қўлланилиши бўйича умумий модулларда қаралаётган масалаларнинг ҳамма синфи учун ўзгармайдиган ҳисоблаш жараёнинг қисми амалга оширилади.

1. *ORT* қисмий дастури. Бу қисмий дастур дастурнинг асосий қисми ҳисобланади. Бунда \vec{N}^{k+1} нисбатан қизиқли чегаравий масалани ечиш алгоритми жорий қилинган, ҳамда бошқа қисмий дастурлар бошқарилади.

2. *RESULT* қисмий дастури. Бунда натижаларни чиқариш нуқталаридаги ҳал қилувчи функцияларнинг вақт бўйича биринчи ва иккинчи тартибли ҳосилалари қийматларини печатга чиқаради.

3. *BC* қисмий дастури. Қисмий дастурнинг берилган маълумотлар бўйича *ADL*, *EL*, *ADP*, *EP* массивларида бош дастурнинг чап ва ўнг чегаравий шартлар кенгайтирилган матрицалари шакллантирилади.

4. *SYSTEM* қисмий дастури. Бу қисмий дастурда қизиқли алгебраик тенгламалар системасини ечиш амалга оширилади.

5. *PRINTS* қисмий дастури. Натижаларни чиқариш нуқталарида Максвелл тензори, Лоренц кучи ташкил этувчилари ва механик кучланиш тензори компоненталарини ҳисоблаш амалга оширилади.

Бу муҳитда дастурлаш учун у ўрнатилган каталогдан “Developer Studio” дастури ишга туширилади (1-расм).

Compaq Visual Fortran студиясида ишлаб чиқилган дастур асосида олинган натижаларнинг сонли кўринишини таҳлил икки ва уч ўлчамли диаграммалар асосида кўринишини ташкил қилиб бериш имкониятига эга бўлган “Compaq Array Visualizer” дастуридан фойдаланилади.

Бу дастур ёрдамида натижалар таҳлилининг турлича кўринишини келтирилади.

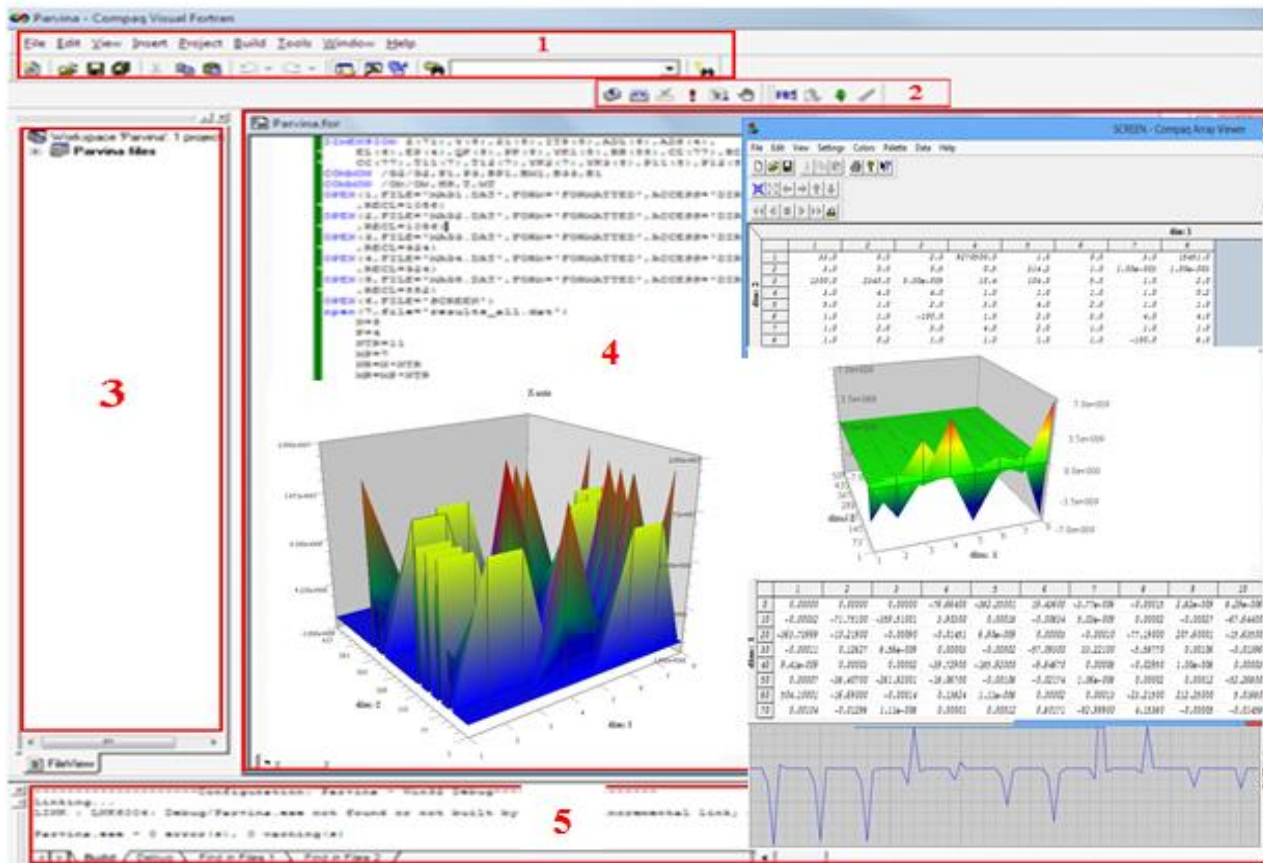
Ўзгарувчан электромагнит ва механик кучлар таъсирида бўлган радиуси бўйича қалинлиги ўзгарувчан халқавий пластинканинг кучланганлик деформацияланганлик ҳолати ҳақидаги магнитоэластиклик масаласи тадқиқ қилинган.

Чегаравий шартларни қуйидаги кўринишда олинган:

$$\begin{aligned} u = 0, \quad w = 0, \quad \mathcal{G}_r = 0, \quad B_z = 0.5 \sin \omega t, \quad r_0 = 0.005 \text{ м}, \\ N_r = 0, \quad Q_r = -100, \quad M_r = 0, \quad E_\theta = 0, \quad r_N = 0.009 \text{ м}. \end{aligned} \quad (22)$$

Бошланғич шартларни қуйидагича оламиз:

$$\vec{N}(r, t) \Big|_{t=0} = 0, \quad \dot{u}(r, t) \Big|_{t=0} = 0, \quad \dot{w}(r, t) \Big|_{t=0} = 0, \quad \dot{\mathcal{G}}(r, t) \Big|_{t=0} = 0. \quad (23)$$



1-расм. Дастурий мажмуаси ойнаси интерфейсининг умумий кўриниши

Пластинканинг физика-механикавий параметрларини қуйидагича олинган:

$$\begin{aligned}
 r_0 &= 0.005\text{ м}; r_1 = 0.009\text{ м}; h = 5 \cdot 10^{-4} (1 - \gamma r^2 / r_0) \text{ м}; \gamma = 10, \gamma = 0.06, \\
 \gamma &= 0.7, \sigma_1 = 0.454 \cdot 10^8 (\text{ом} \times \text{м})^{-1}, \sigma_2 = 0.200 \cdot 10^8 (\text{ом} \times \text{м})^{-1}, \nu_r = 0.262; \nu_\theta = 0.320; \\
 e_r &= 22.9 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2; e_\theta = 10.7 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2; \omega = 314.16 \text{ с}^{-1}; \\
 P_z &= 5 \cdot 10^3 \sin \omega t \text{ Н/м}^2; P_r = 0; \tau = 1 \cdot 10^{-2} \text{ с}; \mu = 1.256 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}; \\
 \rho &= 2600 \text{ кг/м}^3; J_{\text{ост}} = 3 \cdot 10^7 \sin \omega t \text{ А/м}^2; B_r^\pm = 0.5 \text{ Тл}; B_{r0} = 0.5 \sin \omega t.
 \end{aligned} \tag{24}$$

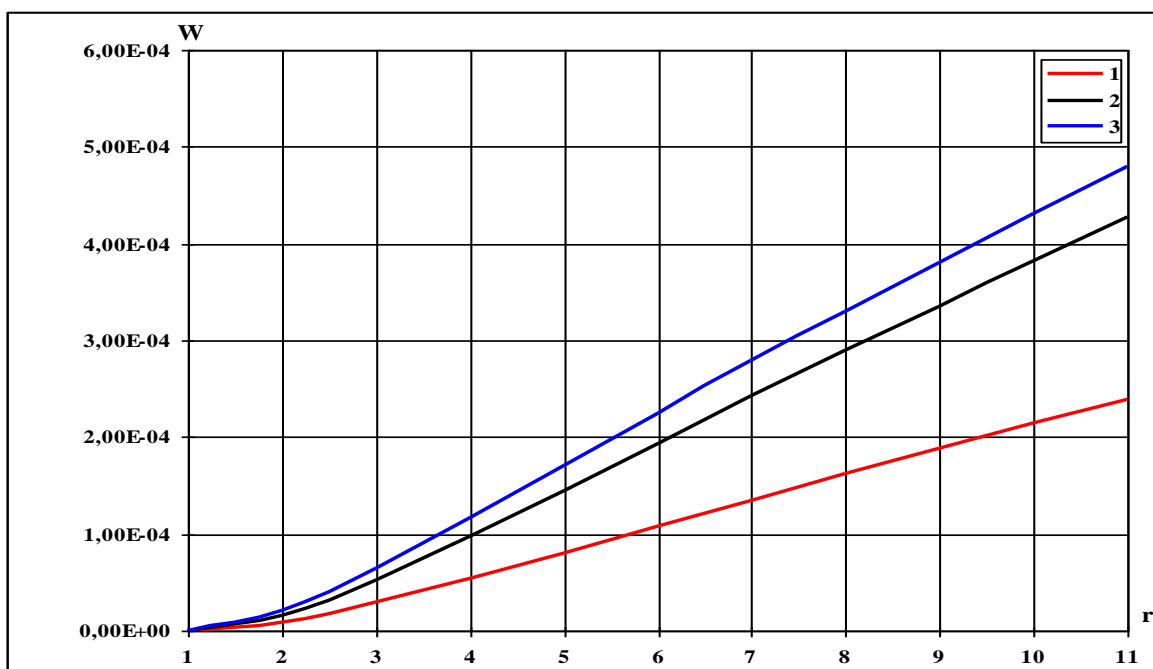
2-расмда пластинканинг радиал координатаси бўйича $t = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ вақт momentiдаги ташқи магнит индукцияси нормал ташкил этувчисининг учта қийматлари учун $w(r)$ эгилишининг ўзгариши графиклари келтирилган.

3-расмда $r = 0.0058 \text{ м}$ тенг бўлганда ташқи магнит индукцияси нормал ташкил этувчисининг учта қийматлари учун пластинка $w(t)$ эгилишининг вақт бўйича ўзгариши графиклари келтирилган.

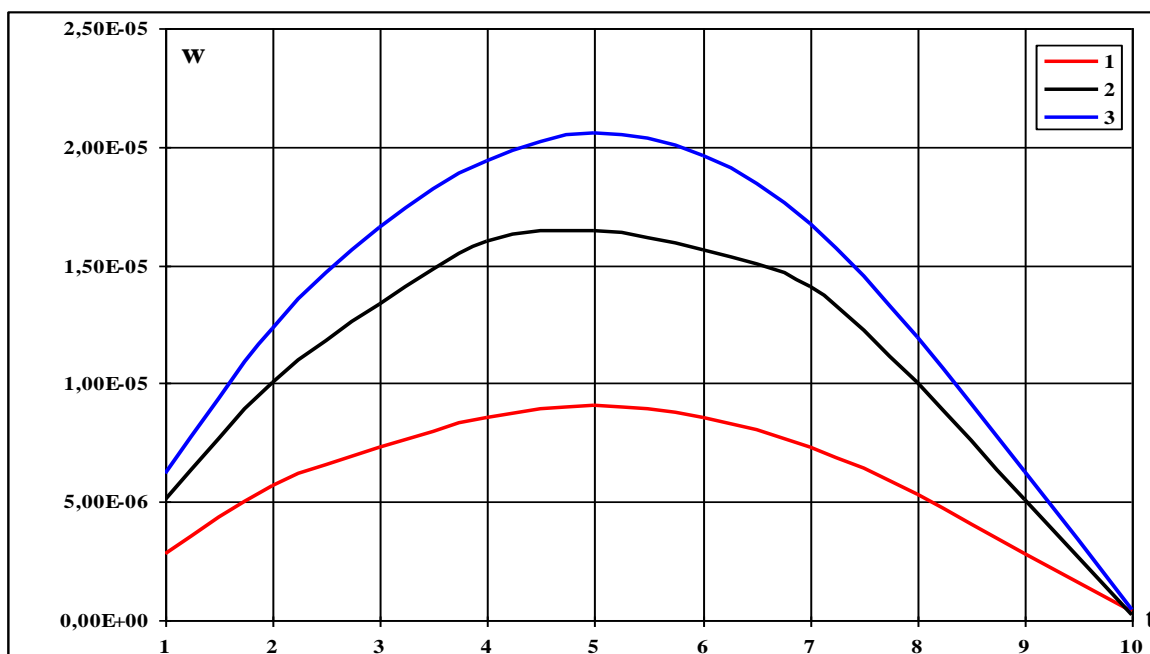
2 ва 3 расмларда келтирилган графикларни таҳлил қилиб ташқи магнит индукцияси нормал ташкил этувчисининг қийматлари ошиши билан пластинка эгилишининг ошишини кўришимиз мумкин.

Пластинка ички магнит майдони индукцияси микдорининг ўзгариши, ташқи магнит майдонининг ўзгариши ва ортотроп электр ўтказувчанликлардан боғлиқ равишда тадқиқ қилинган.

Ташқи магнит индукцияси нормал ташкил этувчисининг қиймати ошиши билан пластинка эгилиши ошишини олинган сонли натижаларимизнинг таҳлилидан кўришимиз мумкин.



2-расм. Ташқи магнит индукцияси нормал ташкил этувчисининг 1. $B_{z0} = 0.1$; 2. $B_{z0} = 0.2$; 3. $B_{z0} = 0.5$ қийматлари учун $t = 5 \cdot 10^{-3} c$ вақт momentiдаги пластинка радиал координатаси бўйича $w(r)$ эгилишининг ўзгариши графиклари



3-расм. Ташқи магнит индукцияси нормал ташкил этувчисининг 1. $B_{z0} = 0.1$; 2. $B_{z0} = 0.2$; 3. $B_{z0} = 0.5$ қийматлари учун $w(t)$ эгилишининг вақт бўйича ўзгариши графиклари

Ташқи магнит майдони индукцияси оширилганда ички магнит майдони индукцияси ҳам ошиши қонунияти ўрнатилган. Бу эса, пластинкада содир бўладиган ҳақиқий физик жараёнларга мос келади ва ўз навбатида олинган натижаларнинг ишончилигини тасдиқлайди.

ХУЛОСА

«Магнит майдонида ток ўтказувчи юпка пластинканинг магнитоэластик деформацияланиш жараёнини математик моделлаштириш» мавзусидаги диссертация иши бўйича олиб борилган тадқиқотлар асосида қуйидаги асосий натижалар олинган:

1. Электродинамик кучлар таъсирида бўлган ток ўтказувчи пластинка шаклидаги конструктив элементнинг ўтказувчанлик хоссаларининг анизотропиясини ҳисобга олган ҳолда магнитоэластик деформацияланиш жараёнини тадқиқ этиш учун математик модель ишлаб чиқилди.

2. Ўтказувчанлик хоссаларининг ортотропиясини ҳисобга олган ҳолда юпка токўтказувчи пластинканинг ўзгарувчан электродинамик кучлар таъсиридаги магнитоэластик нозизиқли деформацияланиши математик модели ишлаб чиқилди.

3. Ток ўтказувчи ортотроп пластинка кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини геометрик нозизиқлилиқни ҳисобга олган ҳолда тадқиқ қилиш имконини берадиган магнитоэластиклиқнинг икки ўлчамли математик модель ишлаб чиқилди.

4. Ўзгарувчан электродинамик ва механик кучлар таъсирларида бўлган юпка ортотроп юпка ҳалқавий пластинка шаклидаги конструктив микроэлементнинг магнитоэластиклиги масалаларини ечишнинг самарали сонли усуллар қўлланилган ва ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилди.

5. Пластинка магнитоэластиклиги боғлиқли масалаларни сонли ечиш учун дастурий мажмуаси ишлаб чиқилди.

6. Тақрибий олинган ечимлар бўйича масаланинг ечиш жараёни яқинлашишини баҳолаш ёрдамида олинган натижаларнинг ишончилигининг таҳлили ўтказилди.

7. Токўтказувчи юпка пластинка шаклидаги конструктив микроэлементларнинг магнитоэластик деформацияланиш жараёнини тадқиқ қилишда геометрик, механик ва электромагнит параметрларни ўзгартирган ҳолда кучланганлик ҳолатлари, ҳамда электромагнит эффектлар таҳлили асослаб берилди.

8. Магнит индукциясини танлаган ҳолда электромагнит майдони таъсирида бўлган юпка пластинка эгилишини минималлаштиришга эришиш мумкинлиги баҳоланди.

9. Диссертация ишининг натижалари Самарқанд вилояти «Электромагнит мослашув хизмати» тасарруфида бўлган ўлчов қурилмаларига, шунингдек, «ЎЗБЕКТЕЛЕКОМ» АК Самарқанд филиали Қўшработ туманига қарашли электрон автоматик станцияларининг микроэлементларига, ҳамда «AlNet» Шуба Корхонаси соҳа иш жараёни электр таъминот қурилмаларида ишлатиладиган транзисторлари таркибидаги конструктив микроэлементларига жорий этилди. Ток ўтказувчи юпка микроэлементларнинг ишлаш жараёналарига жорий қилинишлари натижасида электромагнит майдони таъсирида бўлган пластинка шаклидаги микроэлементнинг геометрик, механик ва электромагнит параметрлари учун ишлаб чиқилган тавсиялар асосида пластинканинг мустаҳкамлигини 8-11 % га ошириш имконини берди.

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

**НАУЧНО-ИННОВАЦИОННЫЙ ЦЕНТР ИНФОРМАЦИОННО-
КОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

НАРКУЛОВ АКРАМ СИДИКОВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
МАГНИТОУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЕ ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ
ТОНКОЙ ПЛАСТИНКИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

05.01.07 – Математическое моделирование. Численные методы и комплексы программ

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

Тошкент– 2021

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2020.2.PhD/T1575.

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) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель: **Индиаминов Равшан Шукурович**
доктор физика-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Полатов Асхад Мухамеджонович**
доктор физико-математических наук, профессор

Исомиддинов Анваржон Иномжонович
доктор философии (PhD)
по техническим наукам


Ведущая организация: **Самаркандский государственный университет**


Защита диссертации состоится «24» декабрь 2021 г. в 14⁰⁰ часов на заседании научного совета DSc.13/30.12.2019.T.07.01 при Ташкентском университете информационных технологий. (Адрес: 100202, г. Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Ташкентский университет информационных технологий. Тел.: (99871) 238-64-43; факс: (99871) 238-65-52; e-mail: tuit@tuit.uz).


С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского университета информационных технологий (регистрационный номер №234). (Адрес: 100202, г. Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-65-44).

Автореферат диссертации разослан «11» декабрь 2021 года.
(реестр протокола рассылки №42 от «09» декабрь 2021 года.)




Р.Х. Хамдамов
Председатель научного совета по присуждению учёных степеней, доктор технических наук, профессор


Ф.М.Нуралиев
Ученый секретарь научного совета по присуждению учёных степеней, доктор технических наук, доцент


Ш.А. Садуллаева
Председатель научного семинара при научном совете по присуждению ученых степеней, доктор физико-математических наук, доцент

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. Необходимость решения проблемы магнитоупругости в мире проистекает из требований современных технических процессов и необходимости создания инновационных технологий в различных областях производства. В механике связанных полей важную роль играет изучение движения сплошной среды с учетом электромагнитных эффектов. Развитие современной новой техники и технологий требует учета этих эффектов.

Актуальным на сегодняшний день в мире является создание оптимальных конструкций в современной технике которое связано с задачами широкого внедрения в производстве конструктивных элементов типа тонкостенных пластин с учетом их нелинейного взаимодействия. На сегодняшний день магнитоупругость имеет очень важное практическое значение и применяется в различных областях современной техники. Интеграция на кристалле элементов электроники, механики, информатики и измерительной техники привела к объединению этих технологий и созданию микросистемной техники и появлению микроэлектромагнитомеханических систем. Поэтому в развитых странах мира, включая США, Российскую Федерацию, Китай, Германию, Францию, Японию, Саудовскую Аравию, Украину, Иран и другие страны, учитывая анизотропию проводящих свойств, большое значение приобретают проблемы магнитоупругого взаимодействия конструктивных микроэлементов типа проводящих тонких пластинок и оболочек с электромагнитным полем.

Ряд теоретических и практических исследований проводится по механизмам взаимодействия магнитного поля с упругой средой, геометрическим и физическим свойствам рассматриваемого тела. В частности, этот механизм получают некоторые специфические особенности, когда рассматриваем проблемы относительно тонких пластин, обладающих анизотропной электропроводностью.

В Республике Узбекистан проводятся обширные научные исследования по расчету конструктивных элементов, созданию современных измерительных систем, а также исследованию колебаний, прочности и напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов в виде тонких пластинок, работающих под воздействием электромагнитных полей в микроэлектронике, микронаноэлектронике и различных областях электротехники. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы определены задачи, в том числе «... внедрение информационно-коммуникационных технологий в экономику, социальную сферу, систему управления, развитие и модернизацию инженерно-коммуникационной и социальной инфраструктуры»¹. При выполнении этих задач процесс проектирования на основе современных информационных технологиях разработке вычислительных алгоритмов, автоматизированных систем и

¹Указ Президента Республики Узбекистан УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О стратегии действия по дальнейшему развитию Республики Узбекистан»

обобщенных математических моделей представляющих напряженно-деформированного состояния, с учетом ортотропии проводящих свойств токопроводящей тонкой пластинки в магнитном поле, в нелинейных задачах магнитоупругости, является одной из важных задач.

Настоящая научно-исследовательская работа основана на Указе Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 года № УП-4947 «О Стратегии дальнейшего развития Республики Узбекистан», Постановление № У-5209 от 12 февраля 2018 года «О мерах по развитию космических исследований и технологий в Республике Узбекистан», Постановление ПП-4986 от 10 февраля 2021 года «О мерах по привлечению инвестиций в дальнейшее развитие информационных технологий и связи» и в определенной степени служит реализации целей и задач, изложенных в нормативных актах, принятых в этой сфере.

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

Степень изученности проблемы. В мире ряд зарубежных ученых такими, как Y.N.Bian, O.I.Zhuranska, I.I.Loos, T.Zhao, G.E. Bagdasaryan, C.A. Калоеров, Д.И.Бардзокас, С.А.Амбарцумян, М.В.Белубекян, Б.А.Кудрявцев, В.Д.Будак, Л.В.Мольченко, Я.М.Григоренко и А.А.Ванцян и другими исследованы взаимодействия упругого тела с электромагнитным полем, математические модели процессов деформации электромагнитных полей тонких электропроводящих тел, магнитоупругости элементов конструкций типа пластинок и оболочек.

О методах математического моделирования процессов магнитоупругого деформирования упругих тел, решении линейных и нелинейных уравнений в республике проводили научно-исследовательские работы ученые нашей страны такие, как Т.Ш. Ширинкулов, Ш.А. Назиров, Ф.М. Нуралиев, Р.Ш.Индиаминов.

Анализ проведенных работ по взаимодействию упругого тела с электромагнитным полем показывает, что на сегодняшний день вопросы нелинейных магнитоупругих взаимодействий с учетом анизотропной электропроводности, магнитного и диэлектрического проницаемости изучены недостаточно.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертация включена в план научно-исследовательских работ Научно-инновационного центра информационных и коммуникационных технологий при ТУИТ им. Мухаммада аль-Хорезми и Самаркандского филиала и выполнена в рамках фундаментальных и практических грантов: F4-FK-0-11951-F4-024 «Разработка методики, алгоритма и программного средства решение нелинейных связанных задач электромагнито-

упругости токонесущих анизотропных оболочек с учетом анизотропной электропроводностью» (2012-2016); БВ-Ф4-014 «Развитие математических основ магнитоупругости и прикладных методов решения задачи о магнитоупругих колебаниях тонкостенных элементов электронных устройств, микро- и нано- систем в магнитном поле с учетом электромагнитной совместимости» (2017-2020); А-5-030 «Математическое и программное обеспечение связанных задач магнитотермоупругости анизотропных тел» (2015-2017).

Целью исследования является разработка математического моделирования, численных алгоритмов и программного комплекса для магнитоупругой нелинейной деформации тонкой токопроводящей пластинки, под воздействием переменных электродинамических сил.

Задачи исследования:

математическое моделирование процесса деформирования анизотропной тонкой токопроводящей пластинки под действием электродинамических сил;
разработка модели магнитоупругой нелинейной деформации тонкой токопроводящей ортотропной кольцевой пластинки под действием переменных электродинамических сил;

применение эффективных численных методов для решения связанных задач магнитоупругости ортотропных тонких кольцевых пластин под воздействием переменных электродинамических и механических сил;

разработка вычислительных алгоритмов и программных комплексов для численного решения связанных задач магнитоупругости, позволяющих исследовать напряженно-деформированное состояние тонкой токопроводящей пластинки;

оценить возможность минимизации прогиба тонкой пластинки под действием электромагнитного поля путем выбора величины плотности и направленности стороннего тока, а также путем изменения магнитной индукции.

Объектом исследования был процесс магнитоупругой деформации тонкой токопроводящей пластинки в переменном электромагнитном поле.

Предметом исследования являются математические модели процессов магнитоупругого деформирования конструктивных микроэлементов типа тонких пластин, работающих под действием переменных электромагнитных полей, вычислительные алгоритмы, программные средства, напряженно-деформированное состояние и анализ электромагнитных эффектов.

Методы исследования. В процессе исследования применены методы механики деформируемого твердого тела, а также методы Ньюмарка, линеаризации и устойчивого метода дискретной ортогонализации.

Научная новизна исследования:

разработана математическая модель для исследования процесса магнитоупругого деформирования конструктивного элемента типа токопроводящей пластинки под воздействием электродинамических сил с учетом анизотропии проводящих свойств;

разработана математическая модель процесса магнитоупругого деформирования конструктивного элемента типа тонкой кольцевой пластинки под воздействием электромагнитных и механических сил с учетом ортотропии проводящих свойств;

разработаны двумерная математическая модель магнитоупругости и численных алгоритмов и программных комплексов для решения связанных задач, позволяющих исследовать напряженно-деформированного состояния токопроводящей пластинки с учетом геометрической нелинейности;

исследование процесса магнитоупругой деформации токопроводящей пластинки под действием электродинамических сил основано на анализе напряженно-деформированного состояния с изменением геометрических, механических и электромагнитных параметров.

Практические результаты исследования:

получены новые эффекты взаимодействия упругого тела с электромагнитным полем, которые могут быть применены при решении многих практических задач в различных областях новой техники;

на основании полученных уравнений, с помощью разработанной методики удалось учесть как анизотропию материала, так и анизотропию внутреннего электромагнитного поля пластинки, что является практическим значением проведенной работы;

Достоверность результатов исследований основана на постановке краевых задач магнитоупругости тонких токопроводящих тел, строгостью полученных математических выкладок, использованием проверенных численных методов, оценки точности решений, точности решений, а также сравнениями с решениями существующих задач.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования объясняется разработкой методики численного решения связанных задач магнитоупругости тонкой токопроводящей микропластинки под воздействием электродинамических сил с учетом анизотропии проводящих свойств.

Практическая значимость исследования заключается в широком диапазоне геометрических, механических и электромагнитных параметров токопроводящей микропластинки с ортотропной электропроводностью под воздействием переменных электродинамических сил, а также в анализе напряженно-деформированного состояния при различных нагрузках и типах закреплений, разработаны алгоритмы и программные средства для расчетов.

Принимая во внимание ортотропию электропроводности, было оценено, что за счет минимизации прогиба тонкой пластинки под действием электромагнитного поля путем выбора величины плотности и направленности стороннего тока, а также путем изменения магнитной индукции.

Внедрение результатов исследований. Разработаны математические модели, численные алгоритмы и программные средства для исследования процесса магнитоупругого деформирования микроэлементов типа анизотропной токонесущей пластинки под действием электромагнитных сил:

Для определения воздействия переменных электромагнитных полей на токонесущие тела с учетом электромагнитной совместимости внедрены в тонкие токонесущие микроэлементы, используемые в измерительных приборах, находящихся в распоряжении «Службы электромагнитной совместимости» Самаркандской области (Справка Министерства развития информационных технологий и связи № - 833-8/3342 от 07.05.2021 г.). В результате на основании разработанных рекомендаций по электромагнитомеханическим параметрам микроэлемента в виде тонкой проводящей пластинки под действием переменного электромагнитного поля прочность пластинки была увеличена на 8-11%, а разработанное математическое и программное обеспечение позволило сократить время и трудозатраты на инженерные расчеты на 6-10%;

С целью выявления сложных процессов взаимодействия конструктивных микроэлементов типа тонких токопроводящих пластинок с электромагнитным полем и анализа возникающих в них электромагнитных эффектов, в дочернем предприятии «AlNet» введены в конструкцию микроэлементы станции и внешнего маршрутизатора, используемые в производственных процессах, диоды и транзисторы, используемые в устройствах вторичного питания коммутаторов (Справка Министерства развития информационных технологий и связи № 33-8/3342 от 07.05.2021 г.). В результате на основе разработанных рекомендаций удалось уменьшить размеры и повысить прочность микропластины, используемых в устройствах на 9-12%, повысить эффективность работы на 8-10% при оценке возможности минимизации изгиба тонкого микропластины;

Для определения процессов магнитоупругого деформирования микроэлементов типа токопроводящих пластинок под действием электромагнитных сил в АО «УЗБЕКТЕЛЕКОМ» Самаркандском филиале Кушрабатского района внедрены токонесущие тонкие конструкционные микроэлементы, применяемые в электронных управляющих машинах электронных автоматических станций телекоммуникационной связи (Справка Министерства развития информационных технологий и связи № -833-8/3342 от 07.05.2021 г.). В результате, исходя из разработанных рекомендаций, прочность микроэлемента в виде тонкой проводящей пластинки под действием электромагнитных полей повышается на 10-15%, а математическое и программное обеспечение, предназначенное для минимизации изгиба тонких пластинок, сократило время и трудозатраты на выполнение инженерных расчетов на 5-9%.

Апробация результатов исследования. Теоретические и практические результаты этого исследования были представлены и обсуждены на 7 международных и 8 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. Всего по теме исследования опубликовано 25 научных работ, в том числе 8 статей в научных изданиях, рекомендованных к публикации основных результатов докторских диссертаций ВАК РУз, 2 в республиканских и 6 в зарубежных журналах, а

также получены 2 свидетельства о регистрации программного обеспечения, разработанного для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 110 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

Первая глава диссертации, озаглавленная **«Анализ литературы по разработке методов и моделей исследования проблем магнитоупругости»**, содержит подробный анализ научных источников по проблемам взаимодействия электромагнитных полей с деформируемыми средами, а также исследование связанных задач магнитоупругости пластин и оболочек, разработка математических моделей, а также обзор исследований по алгоритмам численного расчета напряженно-деформированного состояния.

Большая часть работ по взаимодействию упругого тела с электромагнитным полем рассмотрена без учета анизотропии свойств проводимости. Если материал токопроводящего упругого тела обладает свойствами анизотропной электропроводности, магнитной и диэлектрической проницаемости, то взаимодействие полей существенно усложняется.

Из приведенного выше обзора следует, что связанные нелинейные задачи магнитоупругости с учетом анизотропии свойств проводимости, не решены. Это связано со сложностью системы исходных связанных магнитоупругих дифференциальных уравнений частных производных, отсутствием методов и алгоритмов решения таких задач, которые позволили определить цель и задачи диссертации.

Вторая глава диссертации озаглавлена **«Разработка модели магнитоупругости для исследования процесса деформации токопроводящего тела»** и посвящена сформулированию исходных физических и математических положений и соотношений нелинейной магнитоупругости токопроводящих тел в трехмерной постановке, разработке модели магнитоупругости токопроводящего упругого тела с учетом анизотропии свойств проводимости.

В данной работе предлагается следующая математическая модель магнитоупругости токопроводящего упругого тела под действием электромагнитного поля с учетом анизотропии свойств проводимости:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \vec{J}_{cm}; \operatorname{div} \vec{B} = 0, \operatorname{div} \vec{D} = 0; \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \rho (\vec{f} + \vec{f}^{\wedge}) + \operatorname{div} \hat{\sigma} \quad (2)$$

$$\vec{B} = \mu_{ij} \vec{H}; \quad \vec{D} = \varepsilon_{ij} \vec{E}; \quad (3)$$

$$\vec{J} = \sigma_{ij} (\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}); \quad (4)$$

$$\rho \vec{f}^{\wedge} = \sigma_{ij} (\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \times \vec{B}. \quad (5)$$

начальные и граничные условия соответственно:

$$v_k (t_{ki} + \tau_{ki}) \Big|_{S_1} = [P_i + v_k \tau_{ki}^{(c)}] \Big|_{S_1}. \quad (6)$$

$$\vec{u} = 0, \quad \dot{\vec{u}} = 0, \quad \vec{B} = 0, \quad \vec{B}^{(c)} = 0, \quad \vec{H} = 0, \quad \vec{H}^{(c)} = 0 \quad (7)$$

Здесь \vec{E} - вектор напряженности электрического поля; \vec{H} - вектор напряженности магнитного поля; \vec{D} - вектор электрической индукции; \vec{B} - вектор магнитной индукции; \vec{J}_{cm} - плотность стороннего электрического тока; \vec{f} - объемная сила, \vec{f}^{\wedge} - объемная сила Лоренца, \vec{J} - плотность электрического тока, $\hat{\sigma}$ - тензор внутренних напряжений, $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, \mu_{ij}$ - соответственно тензоры электрической проводимости, диэлектрической и магнитной проницаемости линейно анизотропного токопроводящего тела ($i, j=1,2,3$), t_{ki} - тензор напряжения, $\tau_{ki}, \tau_{ki}^{(c)}$ - тензоры Максвелла в теле и вакууме, P_i - составляющие поверхностной силы, v_k - компоненты вектора единичной нормали, S_1 - часть границы тела, к которой приложены напряжения, \vec{u} - вектор перемещения; (c) - указывает, что значения индекса принадлежат внешней среде.

Таким образом, вместе с соотношениями (1), (2) и (3) - (5), а также (6), (7) образует модель магнитоупругости токопроводящего упругого тела с учетом анизотропии проводящих свойств.

Третья глава диссертации под названием «Модели, алгоритмы и численные методы решения магнитоупругого деформирования тонкой пластинки» посвящена разработке двумерной математической модели магнитоупругости позволяющую исследовать напряженно-деформированное состояние токопроводящей тонкой ортотропной пластины под воздействием переменных электродинамических и механических сил, с учетом ортотропии проводящих свойств, и применению эффективных численных методов при решении краевой задачи нелинейной магнитоупругости пластин, разработке вычислительных алгоритмов для численного решения связанных задач. Рассмотрена задача осесимметричное магнитоупругое деформирование тонкой ортотропной кольцевой пластинки с учетом ортотропии свойств проводимости. Материал упругой пластинки имеет конечную электрическую проводимость и находится во внешнем магнитном поле. При этом предполагалось, что пластинка служит проводником равно-

мерно распределенного стотонного электрического тока и влияние электромагнитного поля на поле деформации происходит посредством сила Лоренца.

При исследовании деформации ортотропной круглой пластинки в магнитном поле использовалась цилиндрическая система координат r, θ, z . В этом случае срединная поверхность пластинки связана с полярной системе координат, а центр пластинки берется за начало координат. Электромагнитные и механические нагрузки, приложенные к пластинке, вызывают деформацию при сохранении симметрии относительно оси. Предполагая, что все искомые составляющие деформационного и электромагнитного полей, входящие в уравнения задачи магнитоупругости пластинки, не зависят от координаты θ , примем следующие связи:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} = 0, \quad v = 0, \quad E_r = 0, \quad B_\theta = 0, \quad S = 0, \quad H_\theta = 0, \quad f_\theta = 0, \quad f_\theta^\wedge = 0, \quad h = h(r); \quad (8)$$

здесь S – сдвигающее усилие, v – перемещения по кругу.

Кристаллические системы отличаются друг от друга формой единичной ячейки, определяемой отношением длин ребер и тремя углами, образуемыми кристаллическими плоскостями или гранями. Электрические и магнитные свойства кристаллов в разных системах и классах отличаются друг от друга.

Исходя из кристаллофизики, для рассматриваемого класса проводящих сред с ромбической кристаллической структурой считая, что тензоры $\sigma_{ij}, \mu_{ij}, \varepsilon_{ij}$ принимают диагональный вид, была разработана нелинейная модель магнитоупругости токопроводящей ортотропной кольцевой пластинки под действием переменных электродинамических и механических сил:

уравнения магнитоупругости

$$\begin{aligned} \frac{\partial(rN_r)}{\partial r} - N_\theta + r(f_r + \rho f_r^\wedge) &= r\rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial(rQ_r)}{\partial r} + r(f_z + \rho f_z^\wedge) &= r\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial(rM_r)}{\partial r} - M_\theta - rQ_r - rN_r \vartheta_r &= 0, \\ -\frac{\partial B_r}{\partial t} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rE_\theta), \\ \sigma_2 \left[E_\theta + 0,5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-) - \frac{\partial u}{\partial t} B_z \right] &= -\frac{\partial H_z}{\partial t} + \frac{H_r^+ - H_r^-}{h}; \end{aligned} \quad (9)$$

взаимосвязь между перемещениями и деформациями

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{2} \vartheta_r^2, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}, \quad \chi_r = \frac{\partial \vartheta_r}{\partial r}, \quad \chi_\theta = \frac{1}{r} \vartheta_r; \quad (10)$$

соотношение эластичности

$$\begin{aligned} N_r &= \frac{e_r h}{1 - \nu_r \nu_\theta} (\varepsilon_r + \nu_\theta \varepsilon_\theta), \quad N_\theta = \frac{e_\theta h}{1 - \nu_r \nu_\theta} (\varepsilon_\theta + \nu_r \varepsilon_r), \\ M_r &= \frac{e_r h^3}{12(1 - \nu_r \nu_\theta)} (\chi_r + \nu_\theta \chi_\theta), \quad M_\theta = \frac{e_\theta h^3}{12(1 - \nu_r \nu_\theta)} (\chi_\theta + \nu_r \chi_r); \end{aligned} \quad (11)$$

составляющие силы Лоренца

$$\begin{aligned} \rho f_r^{\wedge} &= \sigma_1 h \left[E_{\theta} B_z - \frac{\partial u}{\partial t} B_z^2 + 0,5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-) B_z \right], \\ \rho f_z^{\wedge} &= -\sigma_2 h \left[0,5 E_{\theta} (B_r^+ + B_r^-) - \right. \\ &\left. - 0,25 \frac{\partial w}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-)^2 + \frac{1}{12} \frac{\partial w}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-)^2 - 0,5 \frac{\partial u}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-)^2 B_z \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь $\nu_r = \nu_{\theta r}$, $\nu_{\theta} = \nu_{r\theta}$, $e_r \nu_{\theta} = e_{\theta} \nu_r$; ν_r, ν_{θ} – коэффициенты Пуассона; e_r, e_{θ} – модуль Юнга; u, w – компоненты вектора перемещений; N_r, N_{θ} – тангенциальные усилия; M_r, M_{θ} – изгибающие моменты; Q_r – перерезывающие усилия; $\varepsilon_r, \varepsilon_{\theta}$ – тангенциальные деформации удлинения и сдвига; χ_r, χ_{θ} – изгибные деформации и кручение; B_r^{\pm} – тангенциальные составляющие напряженности магнитного поля на поверхностях пластинки; $h = h(r)$ – толщина пластинки; $\rho f_r^{\wedge}, \rho f_{\theta}^{\wedge}$ – проекции пондеромоторных сил на оси координат.

Используя полную систему уравнений (9) – (12), получим связанную систему нелинейных дифференциальных разрешающих уравнений магнитоупругости для токопроводящей тонкой кольцевой пластины. Эта система описывает математически нелинейную модель магнитоупругости токопроводящей кольцевой пластины под действием переменных механических и электромагнитных сил, с учетом ортотропии проводящих свойств:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial r} &= \frac{1 - \nu_r \nu_{\theta}}{e_r h} N_r - \frac{\nu_{\theta}}{r} u - 0,5 g_r^2, \quad \frac{\partial w}{\partial r} = -g_r, \quad \frac{\partial g_r}{\partial r} = \frac{12(1 - \nu_r \nu_{\theta})}{e_r h^3} M_r - \frac{\nu_{\theta}}{r} g_r, \\ \frac{\partial N_r}{\partial r} &= \frac{1}{r} (\nu_{\theta} - 1) N_r + \frac{e_{\theta} h}{r^2} u - \\ &- \left(F_r + \sigma_1 h \left[E_{\theta} B_z - \frac{\partial u}{\partial t} B_z^2 + 0,5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-) B_z \right] \right) + \rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial Q_r}{\partial r} &= -\frac{1}{r} Q_r - \left(F_z - \sigma_2 h \left[0,5 E_{\theta} (B_r^+ + B_r^-) - 0,25 \frac{\partial w}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-)^2 + \right. \right. \\ &\left. \left. + \frac{1}{12} \frac{\partial w}{\partial t} (B_r^+ - B_r^-)^2 - 0,5 \frac{\partial u}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-)^2 B_z \right] \right) + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial M_r}{\partial r} &= \frac{1}{r} (\nu_{\theta} - 1) M_r + \frac{e_{\theta} h^3}{12 r^2} g_r + Q_r + N_r g_r, \\ \frac{\partial B_z}{\partial r} &= -\sigma_2 \mu \left[E_{\theta} + 0,5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-) - \frac{\partial u}{\partial t} B_z \right] + \frac{B_r^+ - B_r^-}{h}, \quad \frac{\partial E_{\theta}}{\partial r} = -\frac{\partial B_z}{\partial t} - \frac{1}{r} E_{\theta}. \end{aligned} \quad (13)$$

Модель магнитоупругости токопроводящей кольцевой пластинки построена в квадратичном приближении с учетом с учетом ортотропии проводящих свойств. Полученная разрешающая система уравнений (13) состоит из восьми нелинейных дифференциальных уравнений частных производных первого порядка с переменными коэффициентами. Компоненты силы Лоренца учитывают скорость деформации пластинки, внешнее магнитное поле, величину и напряженность тока проводимости относительно

внешнего магнитного поля. Учет нелинейности в уравнениях движения вызывает нелинейность в силе Лоренца. Добавив к полученной системе уравнений начальные и граничные условия, получим краевую задачу.

Нелинейную краевую задачу можно записать в векторной форме следующим образом:

$$\frac{\partial \vec{N}}{\partial r} = \vec{F} \left(r, t, \vec{N}, \frac{\partial \vec{N}}{\partial t}, \frac{\partial^2 \vec{N}}{\partial t^2} \right), \quad (r_0 \leq r \leq r_N, t_0 \leq t \leq t_N), \quad (14)$$

граничные условия

$$\vec{g}_1(\vec{N}(r_0, t)) = \vec{b}_1^*, \quad \vec{g}_2(\vec{N}(r_N, t)) = \vec{b}_2^* \quad (15)$$

и начальные условия (в $t = 0$)

$$\vec{N} = 0, \quad \partial \vec{N} / \partial t = 0, \quad (16)$$

здесь $\vec{N} = \{ u, w, \theta_r, N_r, Q_r, M_r, E_\theta, B_z \}^T$ – вектор столбец искомых функций; \vec{F} , $\vec{g}_1, \vec{g}_2, \vec{b}_1^*, \vec{b}_2^*$ – в общем случае нелинейные вектор функции.

Предлагаемый подход к численному решению нелинейных задач магнитоупругости пластинки основан на последовательном применении методов конечноразностной схемы Ньюмарка, линеаризации и дискретной ортогонализации.

В задаче определения напряженно-деформированного состояния токопроводящей ортотропной пластинки под действием переменных электродинамических и механических сил, краевая задача (14), (15) решается для фиксированных моментов времени.

Частные производные по временной координате аппроксимируются конечноразностными выражениями неявной схемы Ньюмарка, после применения, которой получаем краевую задачу для системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений в виде:

$$\frac{d\vec{N}}{dr} = \vec{F}(r, \vec{N}) \quad (17)$$

и соответствующие граничные условия

$$D_1 \vec{N}(r_0) = \vec{d}_1, \quad D_2 \vec{N}(r_1) = \vec{d}_2 \quad (18)$$

С помощью метода линеаризации краевая задача (17), (18) сводится к последовательности линейных краевых задач, которую сокращенно можно записать в виде:

$$\frac{d\vec{N}^{k+1}}{dr} = \vec{G}(\vec{N}^{k+1}, \vec{N}^k), \quad (19)$$

$$B_1(\vec{N}^k) \vec{N}^{k+1}(r_0) = \vec{b}_1(\vec{N}^k), \quad B_2(\vec{N}^k) \vec{N}^{k+1}(r_N) = \vec{b}_2(\vec{N}^k), \quad (k = 0, 1, 2, \dots). \quad (20)$$

здесь $\vec{N} = \{ u, w, \theta_r, N_r, Q_r, M_r, E_\theta, B_z \}^T$; \vec{N}^{k+1} и \vec{N}^k – решения соответственно на $k+1$ -й и k -й итерациях; $\vec{G}(\vec{N}^{k+1}, \vec{N}^k)$ – вектор правой части системы уравнений; $B_1(\vec{N}^k), B_2(\vec{N}^k), \vec{b}_1(\vec{N}^k), \vec{b}_2(\vec{N}^k)$ – соответственно матрицы и правые части граничных условий.

После использования метода линеаризации (19) разрешающая система записывается следующим образом:

$$\begin{aligned}
\frac{du^{(k+1)}}{dr} &= \frac{1-v_r v_\theta}{e_r h} N_r^{(k+1)} - \frac{v_\theta}{r} u_r^{(k+1)} + 0,5(\mathcal{G}_r^{(k)})^2 - \mathcal{G}_r^{(k+1)} \mathcal{G}_r^{(k)}, \\
\frac{dw^{(k+1)}}{dr} &= -\mathcal{G}_r^{(k+1)}, \quad \frac{d\mathcal{G}_r^{(k+1)}}{dr} = \frac{12(1-v_r v_\theta)}{e_r h^3} M_r^{(k+1)} - \frac{v_\theta}{r} \mathcal{G}_r^{(k+1)}, \\
\frac{dN_r^{(k+1)}}{dr} &= \frac{1}{r} \left[(v_\theta - 1)N_r^{(k+1)} + \frac{e_\theta h}{r} u^{(k+1)} \right] - P_r^{(k+1)} - h J_{\theta cm} B_z^{(k+1)} - \\
&- \sigma_1 h \left[-E_\theta^{(k)} B_z^{(k)} + E_\theta^{(k+1)} B_z^{(k)} + E_\theta^{(k)} B_z^{(k+1)} - 0,5 \left(-\frac{\partial w^{(k)}}{\partial t} B_z^{(k)} + \frac{\partial w^{(k+1)}}{\partial t} B_z^{(k)} + \right. \right. \\
&+ \left. \frac{\partial w^{(k)}}{\partial t} B_z^{(k+1)} \right) (B_r^+ + B_r^-) - 2 \frac{\partial u^{(k)}}{\partial t} (B_z^{(k)})^2 + \frac{\partial u^{(k+1)}}{\partial t} (B_z^{(k)})^2 + 2 \frac{\partial u^{(k)}}{\partial t} B_z^{(k+1)} B_z^{(k)} \left. \right] + \rho h \frac{\partial^2 u^{(k+1)}}{\partial t^2}, \\
\frac{dQ_r^{(k+1)}}{dr} &= -\frac{1}{r} Q_r^{(k+1)} - P_z^{(k+1)} - 0,5 h J_{\theta cm} (B_r^+ + B_r^-) - \\
&- \sigma_2 h \left[0,5 E_\theta^{(k+1)} (B_r^+ + B_r^-) + 0,25 \frac{\partial w^{(k+1)}}{\partial t} (B_r^+ + B_r^-)^2 + \frac{1}{12} \frac{\partial w^{(k+1)}}{\partial t} (B_r^+ - B_r^-)^2 - \right. \\
&- 0,5 \left(-\frac{\partial u^{(k)}}{\partial t} B_z^{(k)} + \frac{\partial u^{(k+1)}}{\partial t} B_z^{(k)} + \frac{\partial u^{(k)}}{\partial t} B_z^{(k+1)} \right) (B_r^+ + B_r^-) \left. \right] + \rho h \frac{\partial^2 w^{(k+1)}}{\partial t^2}, \\
\frac{dM_r^{(k+1)}}{dr} &= \frac{1}{r} \left[(v_\theta - 1)M_r^{(k+1)} + \frac{e_\theta h^3}{12r} \mathcal{G}_r^{(k+1)} \right] + N_r^{(k+1)} \mathcal{G}_r^{(k)} + N_r^{(k)} \mathcal{G}_r^{(k+1)} - N_r^{(k)} \mathcal{G}_r^{(k)} + Q_r^{(k+1)}, \\
\frac{dB_z^{(k+1)}}{dr} &= -\sigma_2 \mu \left[E_\theta^{(k+1)} + 0,5(B_r^+ + B_r^-) \frac{\partial w^{(k+1)}}{\partial t} - B_z^{(k)} \frac{\partial u^{(k+1)}}{\partial t} - B_z^{(k+1)} \frac{\partial u^{(k)}}{\partial t} + B_z^{(k)} \frac{\partial u^{(k)}}{\partial t} \right] + \\
&+ \frac{B_r^+ - B_r^-}{h}, \quad \frac{dE_\theta^{(k+1)}}{dr} = -\frac{\partial B_z^{(k+1)}}{\partial t} - \frac{1}{r} E_\theta^{(k+1)}, \quad (k = 0, 1, 2, \dots).
\end{aligned} \tag{21}$$

По времени $(k+1)$ -произведения аппроксимации имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
\left(\frac{\partial u^{(t+\Delta t)}}{\partial t} \right)^{(k+1)} &= \left[\frac{2(u^{(t+\Delta t)})}{\Delta t} - \frac{\partial u^t}{\partial t} \right]^{(k+1)}, \\
\left(\frac{\partial^2 u^{(t+\Delta t)}}{\partial t^2} \right)^{(k+1)} &= \left[\frac{u^{t+\Delta t} - u^t}{0,25(\Delta t)^2} - \frac{1}{0,25\Delta t} \frac{\partial u^t}{\partial t} - \frac{\partial^2 u^t}{\partial t^2} \right]^{(k+1)}.
\end{aligned}$$

На последнем этапе каждая из линейных краевых задач (23), (24) решается методом дискретной ортогонализации. Этот метод обеспечивающим устойчивый вычислительный процесс благодаря процедуре ортогонализации векторов-решений задач Коши в отдельных точках интегрирования.

Четвертая глава диссертации под названием «**Разработка программного комплекса для численного расчета магнитоупругого деформирования гибкой ортотропной кольцевой пластины**» посвящена разработке программного комплекса для численного решения связанных задач магнитоупругости, позволяющей исследовать напряженно-деформированное состояние гибкой токопроводящей пластины, под действием электромагнитных сил в магнитном поле. В процессе численного решения задачи

оценивалась достоверность полученных результатов по приближенным решениям. При исследовании процесса магнитоупругой деформации токопроводящей кольцевой пластинки проведены анализ электромагнитных эффектов и напряженного состояния в широком диапазоне изменения геометрических, механических и электромагнитных параметров. Показано, что путем изменения магнитной индукции и выбрав направление и величину внешнего стороннего тока, можно минимизировать прогиба тонкой пластинки под действием электродинамических сил.

Разработан пакет программ для численного решения связанных задач магнитоупругости пластин и анализа результатов. Программный комплекс «Compaq Visual Fortran» создан на языке программирования «Visual Fortan».

Разработанный программный комплекс состоит из следующих программных модулей. Модули по своему назначению делятся на модули специального и общего назначения. Модули специального назначения (головная *MAINE* и программа *RAPART*) зависят от вида граничных условий механических и электромагнитных воздействий, геометрических характеристик оболочки, используемых формул интерполирования. В подпрограмме *RAPART* производится линейное интерполирование по заданной информации о геометрических, механических, электромагнитных параметрах пластинки, вычисляются коэффициенты правых частей системы.

В модулях общего назначения реализуется часть вычислительного процесса, являющаяся неизменной для всех задач рассматриваемого класса.

1. Подпрограмма *ORT*. Эта подпрограмма является основной частью программы. В ней реализован алгоритм решения линейной относительно \bar{N}^{k+1} краевой задачи, производится управление работой остальных подпрограмм.

2. Подпрограмма *RESULT*. Производит вывод на печать значений разрешающих функций первых и вторых производных по времени в точках выдачи результатов.

3. Подпрограмма *BC*. В теле подпрограммы по заданной информации в массивах *ADL*, *EL*, *ADP*, *EP*, головной программы производится формирование расширенных матриц левых и правых граничных условий.

4. Подпрограмма *SYSTEM*. В этой подпрограмме осуществляется решение систем линейных алгебраических уравнений.

5. Подпрограмма *PRINTS*. Осуществляет вычисление в точках выдачи результатов компонент тензора Максвелла, составляющих силы Лоренца и компонент тензора механических напряжений.

Для программирования в этой среде программа "Developer Studio" запускается из установленного каталога.

"Compaq Visual Fortran" использует "Compaq Array Visualizer", который имеет возможность анализировать числовых вид результатов на основе двух- и трехмерных диаграмм, полученных на основе разработанного программного обеспечения. Используя эту программу, мы представляем различных вида анализа результатов.

Исследована задача о магнитоупругости напряженно-деформированного состояния кольцевой пластинки переменной толщины по радиусу под действием переменных электромагнитных и механических сил.

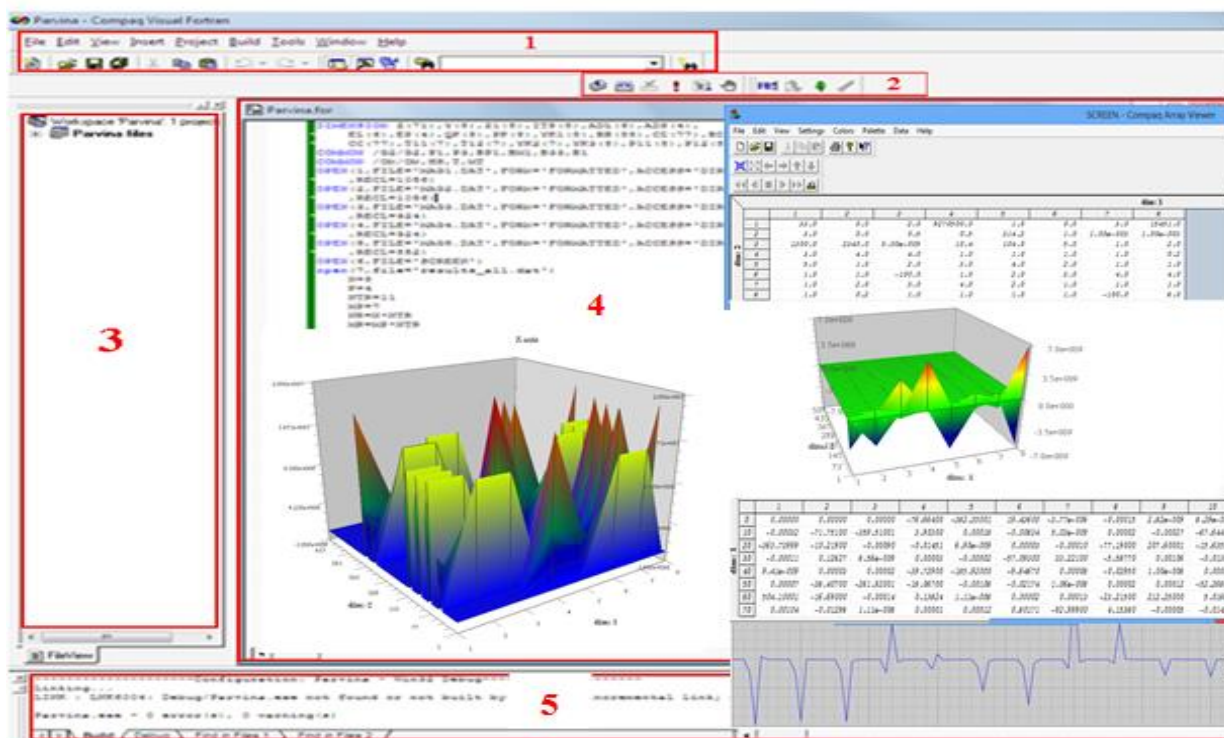


Рисунок 1. Обзор оконного интерфейса программного комплекса

Граничные условия принимаются следующим образом:

$$\begin{aligned} u = 0, w = 0, \mathcal{G}_r = 0, B_z = 0.5 \sin \omega t, r_0 = 0.005 \text{ м}, \\ N_r = 0, Q_r = -100, M_r = 0, E_\theta = 0, r_N = 0.009 \text{ м}. \end{aligned} \quad (22)$$

Принимаем следующие начальные условия:

$$\vec{N}(r, t) \Big|_{t=0} = 0, \dot{u}(r, t) \Big|_{t=0} = 0, \dot{w}(r, t) \Big|_{t=0} = 0, \dot{\mathcal{G}}(r, t) \Big|_{t=0} = 0. \quad (23)$$

Физико-механические параметры пластинки принимаем в следующем виде:

$$\begin{aligned} r_0 = 0.005 \text{ м}; r_1 = 0.009 \text{ м}; h = 5 \cdot 10^{-4} (1 - \gamma r^2 / r_0) \text{ м}; \gamma = 10, \gamma = 0.06, \\ \gamma = 0.7, \sigma_1 = 0.454 \cdot 10^8 (\text{ом} \times \text{м})^{-1}, \sigma_2 = 0.200 \cdot 10^8 (\text{ом} \times \text{м})^{-1}, \nu_r = 0.262; \nu_\theta = 0.320; \\ e_r = 22.9 \cdot 10^{10} \text{ Н} / \text{м}^2; e_\theta = 10.7 \cdot 10^{10} \text{ Н} / \text{м}^2; \omega = 314.16 \text{ с}^{-1}; \\ P_z = 5 \cdot 10^3 \sin \omega t \text{ Н} / \text{м}^2; P_r = 0; \tau = 1 \cdot 10^{-2} \text{ с}; \mu = 1.256 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} / \text{м}; \\ \rho = 2600 \text{ кг} / \text{м}^3; J_{\theta CT} = 3 \cdot 10^7 \sin \omega t \text{ А} / \text{м}^2; B_r^\pm = 0.5 \text{ Тл}; B_{r0} = 0.5 \sin \omega t. \end{aligned} \quad (24)$$

На рисунке 2 показаны для трех значений нормальной составляющей внешней магнитной индукции графики изменения прогиба $w(r)$ по радиальным координатам пластинки в $t = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ момента времени.

На рисунке 3 показаны для трех значений нормальной составляющей внешней магнитной индукции графики изменения прогиба пластинки $w(t)$ по времени при равенстве $r = 0.0058 \text{ м}$.

Напряженного состояния пластинки исследовано в зависимости от изменения величины индукции внутреннего магнитного поля пластинки, изменение внешнего магнитного поля и от ортотропной электропроводности.

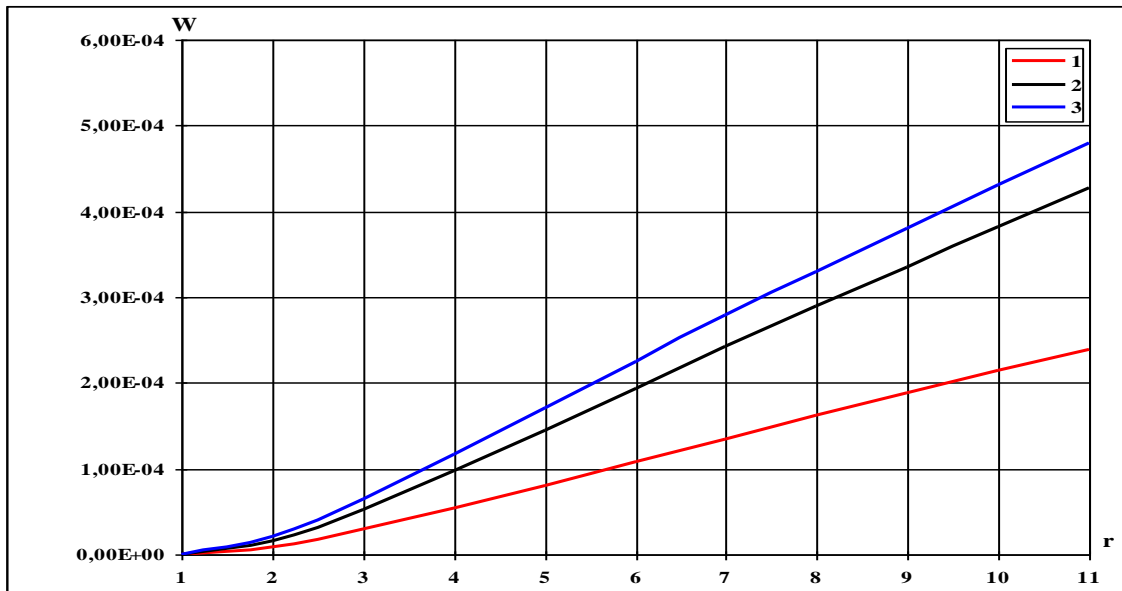


Рисунок 2. Для значений нормальной составляющей внешней магнитной индукции **1.** $B_{z0} = 0.1$; **2.** $B_{z0} = 0.2$; **3.** $B_{z0} = 0.5$ графики изменения изгиба $w(r)$ от радиальной координаты пластинки в момент времени $t = 5 \cdot 10^{-3} c$

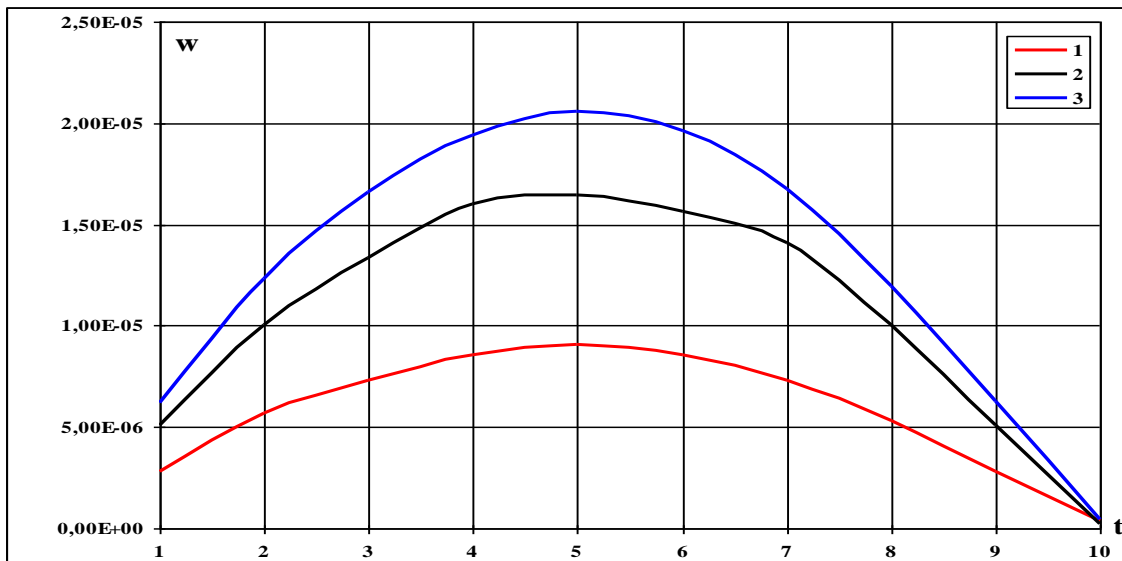


Рисунок 3. Для значений нормальной составляющей внешней магнитной индукции **1.** $B_{z0} = 0.1$; **2.** $B_{z0} = 0.2$; **3.** $B_{z0} = 0.5$ графики изменения по времени прогиба $w(t)$

Анализируя полученные численные результаты, можно увидеть, что с увеличением значений нормальной составляющей внешней магнитной индукции прогиб пластинки увеличивается.

По мере увеличения индукции внешнего магнитного поля увеличивается и индукция внутреннего магнитного поля пластинки.

Это соответствует реальным физическим процессам, происходящим на пластинке, что, в свою очередь, подтверждает достоверность полученных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы «Математическое моделирование процесса магнитоупругого деформирования токопроводящей тонкой пластинки в магнитном поле» получены следующие основные результаты:

1. Разработана математическая модель для исследования процесса магнитоупругой деформации конструктивного элемента типа токопроводящей пластинки под действием электродинамических сил с учетом анизотропии проводящих свойств.

2. Разработана математическая модель магнитоупругого нелинейного деформирования тонкой токопроводящей кольцевой пластинки под действием переменных электродинамических сил с учетом ортотропии проводящих свойств;

3. Разработана двумерная математическая модель магнитоупругости, позволяющих исследовать напряженно-деформированного состояния токопроводящей ортотропной пластинки с учетом геометрической нелинейности.

4. Применены ряд эффективных численных методов для решения задач магнитоупругости конструктивного микроэлемента типа тонкой ортотропной кольцевой пластинки под действием переменных электродинамических и механических сил, и разработаны вычислительные алгоритмы.

5. Разработан программный комплекс для решения связанных задач магнитоупругости пластинок.

6. Анализ достоверности полученных результатов проводился с использованием оценки сходимости процесса решения задачи по приближениям.

7. Исследовании процесса магнитоупругого деформирования конструктивных микроэлементов типа токопроводящих тонких пластинок основано на проведение анализе напряженно-деформированного состояния и электромагнитных эффектов с изменением геометрических, механических и электромагнитных параметров.

8. Установлено, что подбирая магнитную индукцию можно минимизировать прогиб тонкой пластинки под действием электромагнитного поля.

9. Результаты диссертационной работы внедрены на измирительных систем Самаркандской области «Служба электромагнитной совместимости», а также на микроэлементы электронных автоматических станций Кушрабатского района Самаркандского филиала АО «УЗБЕКТЕЛЕКОМ», а также дочерняя компания "AlNet" в конструктивных микроэлементы транзисторов, используемых в устройствах питания. В результате внедрения в процесс обработки токопроводящих тонких микроэлементов удалось повысить прочность пластинки на 8-11% на основе разработанных рекомендаций по геометрическим, механическим и электромагнитным параметрам тонкой проводящей пластинки под действием электромагнитного поля.

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

**RESEARCH AND INNOVATION CENTER FOR INFORMATION AND
COMMUNICATION TECHNOLOGIES AT TASHKENT UNIVERSITY OF
INFORMATION TECHNOLOGIES.**

NARKULOV AKRAM SIDIKOVICH

**MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF
MAGNETOELASTIC DEFORMATION OF A CONDUCTIVE THIN
PLATE IN A MAGNETIC FIELD**

05.01.07 – Mathematical modeling.Numerical methods and software complexes

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

Тошкент – 2021

The theme of doctor of philosophy (PhD) on technical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2020.2.PhD/T1575.

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

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

Scientific adviser: **Indiaminov Ravshan Shukurovich**
doctor of physical and mathematical sciences, docent

Official opponents

Polatov Asxad Muxamedjonovich
doctor of physical and mathematical sciences, professor

Isomiddinov Anvarjon Inomjonovich
doctor of philosophy (PhD)
on technical sciences

Leading organization: **Samarkand state university**

The defense will take place “24” december 2021 at 14⁰⁰ the meeting of Scientific council No. DSc.13/30.12.2019.T.07.01 at Tashkent University of Information Technologies (Address: 100202, Tashkent city, Amir Temur street, 108. Tel.: (+99871) 238-64-43, fax: (+99871) 238-65-52, e-mail: tuit@tuit.uz).

The dissertation can be reviewed at the Information Resource Centre of the Tashkent University of Information Technologies (is registered under No 234). (Address: 100202, Tashkent city, Amir Temur street, 108. Tel.: (+99871) 238-64-43, fax: (+99871) 238-65-52).

Abstract of dissertation sent out on “11” december 2021 y.
(mailing report No. 42 on “09” december 2021 y.



R.Kh. Khamdamov
Chairman of the scientific council
awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, professor

F.M. Nuraliev
Scientific secretary of scientific council
awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, docent

Sh.A.Sadullaeva
Chairman of the academic seminar under
the scientific council awarding scientific degrees,
doctor of physical and mathematical sciences, docent

INTRODUCTION (abstract of the PhD thesis)

The aim of the research is to develop mathematical modeling, numerical algorithms and a software package for magneto-elastic nonlinear deformation of a thin conductive plate under the influence of variable electrodynamic forces.

The object of the research is the process of magnetoelastic deformation of a thin conductive plate in an alternating electromagnetic field.

Scientific novelty of the research is as follows:

a mathematical model was developed to study the process of magnetoelastic deformation of a structural element such as a current-conducting plate under the influence of electrodynamic forces, taking into account the anisotropy of conducting properties;

a mathematical model of the process of magnetoelastic deformation of a structural element such as a thin ringed plate under the influence of electromagnetic and mechanical forces was developed, taking into account the orthotropy of conductive properties;

a two-dimensional mathematical model of magnetoelasticity and numerical algorithms and software packages for solving related problems were developed, allowing to study the stress-strain state of a conductive plate taking into account geometric nonlinearity;

the study of the process of magnetoelastic deformation of a conductive plate under the action of electrodynamic forces is based on the analysis of the stress-strain state with a change in geometric, mechanical and electromagnetic parameters.

Implementation of research results. Mathematical models, numerical algorithms and software were developed for studying the process of magnetoelastic deformation of microelements such as an anisotropic current-carrying plate under the action of electromagnetic forces:

To determine the effect of alternating electromagnetic fields on current-carrying bodies, taking into account electromagnetic compatibility; the results were introduced into thin current-carrying microelements in measuring instruments used by "Electromagnetic Compatibility Service" of the Samarkand region (Certificate of the Ministry of Development of Information Technologies and Communications No.-833-8/3342 dated 05/07/2021). As a result, on the basis of the developed recommendations on the electromechanical parameters of a microelement in the form of a thin conducting plate under the influence of an alternating electromagnetic field, the strength of the plate was increased by 8-11%, and the developed mathematical and program software made it possible to reduce by 6-10% the time and labor costs for engineering calculations;

In order to identify complex processes of interaction of structural microelements such as thin conductive plates with an electromagnetic field and to analyze the electromagnetic effects arising in them, in the subsidiary company "AlNet" microelements of the station and an external router used in production processes; diodes and transistors used in devices for the secondary power supply of switches were introduced into devices (Certificate of the Ministry of Development

of Information Technologies and Communications No.33-8/3342 dated 05/07/2021). As a result, on the basis of the developed recommendations, it was possible to reduce the size and increase the strength of the microplate used in devices by 9-12%, to increase the efficiency by 8-10% when assessing the possibility of minimizing the bending of a thin microplate;

To determine the processes of magnetoelastic deformation of micro-elements such as conductive plates under the influence of electromagnetic forces, UZBEKTELECOM JSC, Samarkand branch of the Kushrabat region, introduced current-carrying thin structural microelements used in electronic control machines of electronic automatic telecommunication stations (Certificate of the Ministry of Information Technologies Development and communication No.-833-8/3342 dated 05/07/2021). As a result, based on the developed recommendations, the strength of a microelement in the form of a thin conducting plate under the influence of electromagnetic fields increases by 10-15%, and mathematical and program software designed to minimize the bending of thin plates reduced the time and labor costs for performing engineering calculations by 5-9%.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a bibliography and appendices. The volume of the dissertation is 110 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Indiaminov, R., Narkulov, A., Butaev, R. Magnetoelastic strain of flexible shells in nonlinear statement // Journal AIP Conference Proceedings, 2021, 2365, 02 0002. (№3; Scopus; IF=0.54).

2. Indiaminov, R., Butaev, R., Narkulov, A. Nonlinear deformation of a current shell in a magnetic field // Journal AIP Conference Proceedings, 2021, 2365, 02 0001. (№3; Scopus; IF=0.54).

3. Indiaminov R., Kholjigitov S., Narkulov A. S. Nonlinear vibrations of a currentcarrying anisotropic cylindrical shell in a magnetic field // ISJ Theoretical & Applied Science, 01 (81), - P. 205-211. Philadelphia, USA, 2020. (№1; Web of Science; IF=6,0).

4. Indiaminov R. Sh., Narkulov A. S., Zarpullaev U. K. Mathematical modeling of magnetoelastic vibrations of a rod in a magnetic field // ISJ Theoretical & Applied Science, 03 (83), - P. 327-332. Philadelphia, USA, 2020. (№1; Web of Science; IF=6,0).

5. Индиаминов Р.Ш., Наркулов А.С., Исследование деформирования токнесущих ортотропных оболочек в нелинейной постановке // Узбекский журнал «Проблемы механики». 2018. – № 4. - С. 10-14. (05.00.00; №6)

6. Индиаминов Р.Ш., Наркулов А.С., Саидкулов Э. Магнитоупругое деформирование тонких оболочек в магнитном поле // Международный научный журнал «Инновационная наука». - Уфа, 2017. - С. 15-20. (№28; Advanced Science Index; IF=0,25).

7. Индиаминов Р.Ш., Наркулов А.С., Муртазаева У. Магнитоупругое деформирование гибких оболочек с учетом ортотропной электропроводности // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. - Курск, 2015.- №.6. - С. 145-149. (№28; Advanced Science Index; IF=0,25).

8. Indiaminov R., Narkulov A.S., Saidov U.M., Sh., Nuriyev S.A Toktashuvchi yuqqa halqaviy plastinkaning kuchlanganlik holatiga ponderomotor kuchlarning ta'sirini tekshirish.// Жиззах Давлат Педагогика Институтини. Ахборотномаси. 2013. - №1. - Б. 16-20. (№28; Advanced Science Index).

II бўлим (II часть; II part)

9. Индиаминов Р.Ш., Наркулов А.С., Муртазаева У. О численном исследовании нестационарных задач магнитоупругости гибких токнесущих ортотропных оболочек // Материалы IV международной научной конференции «Актуальные проблемы механики и машиностроения». – Алматы, 2014. – С. 298-304.

10. Индиаминов Р.Ш., Наркулов А.С., С.У.Рустамов. Математическое моделирование магнитоупругих колебаний стержня в магнитном поле //

Инновацион ва замонавий ахборот технологияларини таълим, фан ва бошқарув соҳаларида қўллаш истиқболлари. Халқаро илмий – амалий онлайн конференцияси материаллари, СамДУ, 14-15 май 2020. – Б. 60-64.

11.Индиаминов Р.Ш., Наркулов А.С., Казоков У.Ф. Исследование влияния граничных условий на напряженное состояние токонесущей оболочки // Материалы международной научно-технической конференции. «Современные проблемы строительных материалов, конструкций, механики грунтов и сложных реологических систем». Самарканд, 2013. – С. 86-90.

12.Индиаминов Р.Ш., Наркулов А.С., Бутаев Р.Б. Нелинейное деформирование токонесущей оболочки в агнитном поле // Abstracts of the Uzbekistan-Malaysia international online conference computational models and technologies. August 24-25, 2020. – С. 235-238.

13.Индиаминов Р.Ш., Наркулов А.С., Бутаев Р.Б. Магнитоупругое деформирование гибких оболочек в нелинейной постановке // Abstracts of the Uzbekistan-Malaysia international online conference computational models and technologies. August 24-25, 2020. – С. 232-235.

14.Indiaminov R., Narkulov A., Yusupov S., Rustamov R., Butaev S., Kholjigitov S. Isayev N. Nonlinear oscillations of a current-carrying shell in magnetic field // II International Scientific Conference CAMSTech-II 2021: Advances in Materials, Systems and Technologies. Camstech-II-1020.

15.Indiaminov R., Narkulov A., Yusupov.N., Zarpullaev.U., Abdullaev.A., Rustamov S. Nonlinear deformation of a current-conducting ring plate in a magnetic field // II International Scientific Conference CAMSTech-II 2021: Advances in Materials, Systems and Technologies. Camstech-II-5029.

16.Индиаминов Р.Ш., Наркулов А.С., Муртазаева У. Электромагнито-эластикликнинг чизиклимас масалалари // Муҳаммад ал-Хоразмий номидаги ТАТУ Самарқанд филиали профессор-ўқитувчиларининг IX илмий-амалий конференция материаллари тўплами, 2014. – Б. 121-123.

17.Индиаминов Р.Ш., Муродов Ф.А., Наркулов А.С. Математическое моделирование задач электромагнитоупругости // Ахборот коммуникация технологияларининг ҳозирги замон ривожланиш босқичида мутахассиснинг касбий компетентлигини мукаммаллаштириш. Муҳаммад ал-Хоразмий номидаги ТАТУ Самарқанд филиали Республика илмий-амалий конференция материаллари 2-қисм, 2013. – Б. 97-100.

18. Индиаминов Р.Ш., Наркулов А.С. Математическое моделирование магнитоупругих колебаний токонесущих элементов радиоэлектронных устройств // Сборник докладов Республиканской научно-технической конференции «Проблемы информационных и телекоммуникационных технологий. Тошкент, 2015. – С. 149-151.

19. Индиаминов Р.Ш., Наркулов А.С., Акбаев У.Х. Магнитоэластиклик масаларини тадқиқ қилишда ахборот технологияларини қўллаш // Замонавий ахборот-коммуникация технологиялари. ТАТУ Самарқанд филиали профессор-ўқитувчиларининг X илмий-амалий конференция материаллари тўплами. Самарканд, 2015. –Б. 76-79.

20. Индиаминов Р.Ш., Наркулов А.С., Уралов Ш., Ярашев У. Нелинейные колебания токопроводящего тела в магнитном поле // Ахборот коммуникация технологиялари ва дастурий таъминот яратиш. Профессор-ўқитувчилар ва талабаларнинг XIV илмий-амалий конференцияси материаллари тўплами. Самарқанд – 22-май 2019. -Б. 178-181.

21. Индиаминов Р.Ш., Наркулов А.С. Магнитоупругое деформирование токенесущей оболочки с учетом ортотропии проводящих свойств // Республиканской научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы применения инфор-мационных технологий в управлении» Самарқанд, 5-6 сентября 2019. – С.137-143.

22. Narkulov A.S., Zarpullaev U. Magnit maydonida yupqa plastinkaning magnitoelastiklik deformatsiyalanish modeli // Axborot kommunikatsiya texnologiyalari va dasturiy ta'minot yaratishda innovatsion g'oyalar. Muhammad al-Xorazmiy nomidagi TATU Samarqand filiali Respublika ilmiy-texnik konferensiyasining ma'ruzalar to'plami, 15-16 may 2020 yil. -Б. 34-36.

23. Indiaminov R.Sh, Narkulov A.S. Magnit maydonida halqaviy plastinkaning magnitoelastiklik deformatsiyalanishi modeli // «Axborot kommunikatsiya texnologiyalari va dasturiy ta'minot yaratishda innovatsion g'oyalar» Muhammad al-Xorazmiy nomidagi TATU Samarqand filiali Respublika ilmiy-texnik konferensiyasining ma'ruzalar to'plami, 2021. –Б. 90-92.

24.Indiaminov.R.Sh, Narkulov A.S., Butayev R.B. Plastinkaning kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini tadqiq qilish dasturi. O'zbekiston Respublikasi Intellektual mulk agentligining elektron hisoblash mashinalari uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro'yxatdan 06.05.2021 yil o'tkazilganligi to'g'risida guvohnoma. № DGU 12169.

25.Indiaminov.R.Sh, Narkulov A.S., Butayev R.B. Magnit maydonida yupqa plastinkaning deformatsiyalanishini tadqiq qilish dasturi. O'zbekiston Respublikasi Intellektual mulk agentligining elektron hisoblash mashinalari uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro'yxatdan 10.05.2021 yil o'tkazilganligi to'g'risida guvohnoma. № DGU 12170.

Автореферат «Муҳаммад ал-Хоразмий авлодлари» илмий журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларини мослиги текширилди.