

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТРАНСПОРТ УНИВЕРСИТЕТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.15/31.08.2022 Т.73.07 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ҚОРАҚАЛПОҚ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ЕСЕНБЕКОВ АЗАМАТ ЖОЛДАСБАЕВИЧ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИК ТИЗИМЛАР НАЗАРИЯСИ АСОСИДА
БОШҚАРИЛАДИГАН ЭЛЕКТРОМАГНИТЛИ ТИТРАТГИЧЛАРНИ
ИШЛАБ ЧИҚИШ

05.05.02 – Электротехника. Электр энергия станциялари, тизимлари.
Электротехник мажмуалар ва қурилмалар

ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2024

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)

Content of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)

Есенбеков Азамат Жолдасбаевич

Электромеханик тизимлар назарияси асосида бошқариладиган
электромагнитли титратгичларни ишлаб чиқиш 3

Есенбеков Азамат Жолдасбаевич

Разработка управляемых виброустройств на основе теории
электромеханических систем..... 21

Yesenbekov Azamat Joldasbayevich

Develop Development of controlled vibration devices based on the theory of
electromechanical systems..... 39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works..... 42

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТРАНСПОРТ УНИВЕРСИТЕТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.15/31.08.2022 Т.73.07 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ҚОРАҚАЛПОҚ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ЕСЕНБЕКОВ АЗАМАТ ЖОЛДАСБАЕВИЧ

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИК ТИЗИМЛАР НАЗАРИЯСИ АСОСИДА
БОШҚАРИЛАДИГАН ЭЛЕКТРОМАГНИТЛИ ТИТРАТГИЧЛАРНИ
ИШЛАБ ЧИҚИШ**

**05.05.02 – Электротехника. Электр энергия станциялари, тизимлари.
Электротехник мажмуалар ва қурилмалар**

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

Тошкент – 2024

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Олий таълим, фан ва инновациялар вазирлиги ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида № В2023.4.PhD/T4236 рақами билан рўйхатга олинган.

Диссертация Қорақалпоқ давлат университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз тилида (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (www.tashiit.uz) ва «ZiyoNet» ахборот таълим порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Ибадуллаев Мухтархан
техника фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Колесников Игор Константинович
техника фанлари доктори, профессор

Бегматов Шавкат Эрнестович
техника фанлари номзоди, профессор

Етакчи ташкилот:

Навой давлат кончилиқ ва технологиялар университети

Диссертация ҳимояси Тошкент давлат транспорт университети ҳузуридаги DS.с.15/31.08.2022 Т.73.07 рақамли Илмий кенгашнинг 2024 йил «__» _____ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100167, Тошкент ш., Темирийўлчилар кўчаси, 1-уй. Тел.: (99871) 299-00-01; факс: (99871) 293-57-54; e-mail: rektorat@mail.ru).

Диссертация билан Тошкент давлат транспорт университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (__ рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 100167, Тошкент шаҳри, Темирийўлчилар кўчаси, 1-уй. Тел.: (99871) 299-05-66

Диссертация автореферати 2024 йил «__» _____ куни тарқатилди.

(2024 йил «__» _____ даги №__ рақамли _____ баённомаси).

Р.В. Рахимов

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

Я.О. Рузметов

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

Р.М. Мирсаатов

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

Кириш (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда машиналарнинг ишончилигини ошириш ва уларнинг ишлаши пайтида пайдо бўладиган резонанс тебранишларни ҳисобга олиш ва ишлаб чиқиш масалаларига алоҳида аҳамият берилмоқда. Ҳозирги кунда ривожланган мамлакатларда иш хавфсизлигига, хизмат муддати ва меҳнат унумдорлигига алоҳида эътибор қаратилмоқда. Ушбу қурилмаларнинг самарадорлиги электр энергиясини механик энергияга ўзгартира билишига боғлиқ. Бу борада, жумладан, тебранишлар назарияси асосида механик энергиянинг турли манбалари, жумладан электромагнит титратгичлар (ЭМТ) ишлаб чиқаришга ва самарадорлигини оширишга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Жаҳонда белгиланган характеристикалар ва параметрларга эга бўлган электромагнитли тебраниш кўзгатувчиси (ЭМТҚ) билан автоматик тебранувчи электромеханик тизимлар масалалари бўйича қаратилган илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Ушбу йўналишда, жумладан, бунда унинг чиқишдаги кучланиши частотаси машинанинг ишчи қисмининг табиий частотадаги резонансига ростлаш бўйича тадқиқотлар устувор ҳисобланмоқда. Шу билан бирга, ушбу йўналишдаги тадқиқотлар, жумладан, энергия тежаш ҳисобига тизимнинг самарадорлигини оширишга ёрдам берадиган асосий омилларни аниқлаш долзарбдир, яъни ЭМТҚ нинг электр қувват сарфини ва унинг геометрик ўлчамларини камайтириш долзарб вазифалардан ҳисобланмоқда.

Республикамызда автоматлаштирилган электромеханик титратгич тизимларининг узлуксиз ва сифатли технологияларини ишлаб чиқиш, уларнинг электр энергиясини механик энергияга айлантириш самарадорлигини ошириш ва саноат корхоналарида ресурс тежовчи технологияларни жорий этишга алоҳида эътибор қаратилмоқда. 2022-2026-йилларга мўлжалланган янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегиясида, “Миллий иқтисодиётни жадал ривожлантириш ва юқори ўсиш суръатларини таъминлаш” йўналишларида “Иқтисодиётни электр энергияси билан узлуксиз таъминлаш ҳамда “Яшил иқтисодиёт”¹ технологияларини барча соҳаларга фаол жорий этиш, иқтисодиётнинг энергия самарадорлигини 20 фоизга ошириш ...иқтисодиётнинг энергия ва ресурс ҳажмини қисқартириш, энергия тежамкор технологияларни ишлаб чиқаришга кенг татбиқ этиш, қайта тикланадиган энергия манбаларидан фойдаланишни кенгайтириш” бўйича вазифалари белгиланган. Мазкур вазифаларни амалга оширишда, ишлаб чиқариш корхоналари фаолияти самарадорлигини баҳолаш ва ошириш учун электр энергиясини ҳисобга олишнинг маҳаллий интеллектуал тизимлари ҳамда энергия ресурсларини ҳисобга олиш ва мониторинг қилиш асбобларини ишлаб чиқиш, уларни моделлаштириш ва ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш зарур ҳисобланади.

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон «2022-2026 йилларга мўлжалланган янги Ўзбекистоннинг Тараққиёт стратегияси тўғрисида» ги Фармони

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон “2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида”ги Фармони, 2019 йил 22 августдаги ПҚ – 4422-сон “Иқтисодий тармоқлари ва ижтимоий соҳанинг энергия самарадорлигини ошириш, энергия тежовчи технологияларни жорий этиш ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришнинг тезкор чора-тадбирлари тўғрисида”ги ва 2023 йил 16 февралдаги ПҚ-57-сон “2023 йилда қайта тикланувчи энергия манбаларини ва энергия тежовчи технологияларни жорий этишни жадаллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялари ривожланишининг II. “Энергетика, энергия ва ресурс тежамкорлик” устувор йўналишига мос келади.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Титратгич механизмлар ва уларда қўлланиладиган технологияларнинг ишлашига таъсир қилувчи омилларни аниқлаш, титратгич қурилмаларини ишлаб чиқиш ва жорий этиш каби масалаларни ҳал қилишда бир қатор таниқли хорижий ва ўзбекистонлик олимлар Л.И. Мандельштам, Н.Д. Папалекси, А.А. Модеров, Ю.Е. Нитусов, В.А. Тафт, А.М. Shikhov, O.Solona, Л.А. Вайсберг, S.U. Levenson, J. Zare, У.Р. Рахимов, Н.Х. Базаров, О.А. Хошимов, З.И. Исмоилов, М.М. Тиллаходжаев, К. Алимходжаев, С.Ф. Амиров, М.И. Ибадуллаев, И.К. Колесников ва бошқалар катта ҳисса қўшганлар.

Олиб борилган илмий тадқиқотлар натижасида саноатда фойдаланиладиган электромагнит тебраниш қурилмалари назариясини ишлаб чиқиш масалаларини ҳал қилишда салмоқли натижаларга эришилган. Сезиларли муваффақиятларга қарамай, бу илмий-тадқиқот ишлари электромагнитли титратгичларнинг электр тизим параметрларини ўзгартириши ҳисобига электр энергияни механик энергияга ўзгартиришда ишончлилиги, самарадорлиги юқори бўлган ЭМТ ишлаб чиқишга бағишланган илмий тадқиқотлар олиб борилмаган.

Электр магнит назариясини ривожлантириш ва механик тебранишларнинг замонавий электр магнит титратгичларини ишлаб чиқиш мазкур ишнинг асосий вазифаларидан бири ҳисобланади.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Бердақ номидаги Қорақалпоқ давлат университети илмий-тадқиқот режаларининг 2-сонли “Ночизиқли электроферромагнитли занжирлар ва электромеханик тизимларда тебраниш жараёнларини ҳисоблаш назарияси ва усуллари” (2017-2022) мавзусидаги илмий-тадқиқот ишлари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади электромеханик тизимлар назарияси асосида бошқариладиган электромагнит титратгичларни ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқот вазифалари:

электромеханик тизимлар назарияси асосида электромагнит титратгич қурилмасини ишлаб чиқиш;

электромеханик ўхшашлик асосида MATLAB дастурининг Simulink пакети ёрдамида электромагнит титратгич қурилмасининг математик моделини ишлаб чиқиш;

бошқариладиган электромагнит титратгич қурилмасини ишлаб чиқиш;

частота ўзгартгич ёрдамида электромагнитли титратгични бошқариш тизимларини ишлаб чиқиш;

тескари алоқа боғланиши асосида электромагнитли титратгич электромеханик тизимларининг барқарор ишлашини таъминлайдиган конструкциясини ишлаб чиқиш.

Тадқиқот объекти сифатида ишлаб чиқаришда қўлланиладиган электромагнитли титратгич олинган.

Тадқиқот предметини бир ва икки тактли электромагнитли титратгич негизида саноат корхоналарида фойдаланиладиган қурилма лойиҳаси ташкил этади.

Тадқиқот усуллари. Тадқиқот жараёнида замонавий инструментал ва аналитик усуллар, икки контурли электромагнитли тебранувчан титратгичларни математик моделлаштириш, нозизиқли дифференциал тенгламаларни ечишда аналитик усуллар, автопараметрик тебранишлар назарияси, қурилма характеристикаларини қуришда эксперимент натижаларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

тебраниш юзаси ва тезлик бўйича тескари алоқали қабул қилгичнинг ўзаро таъсирини ҳисобга олган ҳолда, бир ва икки контурли титратгич кўзғатгичларини ҳисоблаш усуллари электромеханик тизимларнинг ҳаракат тенгламалари асосида такомиллаштирилган;

бир ячейка кучи ҳисобига ва магнит майдонни ростлаш орқали ўзгартиришнинг иккита зонасини яратиш учун математик модел ёрдамида титратгич қурилмасининг янги конструкцияси ишлаб чиқилган;

титратгич қурилмасининг иш режимини таъминлаш мақсадида частота, импульс давомийлиги ва амплитудасини ростлаш асосида ўзгартгич ишлаб чиқилган;

магнит оқимни ва ўзгарувчан магнит кучни шакллантириш учун электромагнит титратгичнинг бошқариш тизими майдонли транзисторлар асосида ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

электромагнитли кўзғатгичнинг ишини автоматик назорат қилувчи янги паст частотали микропроцессор технологияси асосида бошқариладиган схемаси ишлаб чиқилган;

тезлик, тезланиш, амплитуда ва тебраниш частотасини ўзгартириш орқали, икки тактли тебраниш кўзғатгичлари асосида катта қувватли титратгич қурилмалари ишлаб чиқилган;

электромагнит майдоннинг кучини кучайтириш ҳисобига катта қувватли электромагнитли тебранувчан титратгич конструкцияси математик модел ёрдамида ишлаб чиқилган;

MATLAB дастурининг Simulink моделлаштириш пакетини қўллаш билан оптимал параметлари ҳисоблаб чиқилиб, электромагнит майдон куч чизиқлари тарқалиш графиги келтирилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги электромеханик титратгичларда электромагнит жараёнларни автоматлаштирилган бошқаришнинг назарий асосланган концепцияларидан фойдаланиш орқали эришилди, бу эса замонавий математик моделлаштириш назарияси усулларидан фойдаланган ҳолда амалда тебраниш қурилмаларини қуриш муаммоларини самарали ҳал қилиш имконини берди. Назарий қисмининг амалий ва эксперимент натижалар билан мос келиши ва уларнинг ўзаро мувофиқлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти электромеханик тизимларнинг ҳаракат тенгламаларини ечиш ва улар асосида, битта ва икки контурли титратгичларни ҳисоблаш усуллари, шунингдек математик моделлаштириш асосида қурилманинг тавсифларини ҳисоблаш усуллари билан изоҳланган.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти электромагнитли титратгични математик моделлаштириш ва автоматик бошқариладиган комплекс усуллар асосида, энергия тежамкор режимида ишлайдиган иш тавсифларини таҳлил қилиш билан изоҳланган.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Электромагнит титратгичларда электромеханик тизим назарияси ва амалиёти натижалари асосида:

илмий тадқиқот натижалари асосида катта қувватли электромагнитли титратгич конструкцияси ишлаб чиқилиб уни “Нокис темир бетон буйимлари заводи” МЧЖда (“Ўзбекистон савдо-саноат палатаси Қорақалпоғистон Республикаси бошқармаси”нинг 2023 йил 07 ноябрдаги 01/10-167 - сонли маълумотномаси) бетон қоришмаси ёки тупроқни зичлаш учун фойдаланишга тадбиқ этилган. Натижада ишлаб чиқилган электромагнитли титратгич тузилиши оддий, ишончли ва энергия тежамкор бўлиб йиллик иқтисодий самарадорлиги 128,2 млн сўмни ташкил этган;

ишлаб чиқилган электромагнитли титратгич қурилмаси буғдой ва шолини элакдан ўтказиш учун “Қонират ун заводи” АЖ нинг “Қанликўл гуруч заводи” филиалида жорий қилинган (“Қонират ун заводи” АЖнинг 2023 йил 26 декабрдаги 251 - сонли маълумотномаси). Натижада технологик жараён тезлашди, буғдой ва шолини элакдан ўтказиш сифати яхшиланди. Электр энергиясини тежаш бўйича йиллик иқтисодий самарадорлиги 46270 кВт*соатни ташкил этган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 3 та илмий-амалий анжуманларда, шу жумладан 1 та халқаро ва 2 та республика анжуманларида апробациядан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 21 та илмий иш чоп этилган, шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 10 та мақолалар, жумладан 6 та республика ва 4 та чет эл илмий журналларида, даврий илмий журналларда 4 та ҳамда 4 та Scopus базасига кирувчи тўпламларда нашр этилган. Шу билан бирга, Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигининг 3 та ЭХМ учун дастурга гувоҳномаси олинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертация ҳажми 102 бетни ташкил қилади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва муҳимлиги асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалар шакллантирилган, тадқиқот объекти ва предмети тавсифи берилган, тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва техникаси ривожланишининг устувор йўналишига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари, олинган натижаларнинг ишончлилигини асослайди, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамиятини очиб беради, тадқиқот натижаларини амалиётга тадбиқ этиш рўйхати, иш натижаларини апробация қилиш рўйхати, нашр этилган ишлар тўғрисидаги маълумотлар ва диссертация тузилмалари тақдим этилади.

Диссертациянинг **“Тебранувчан электромеханик тизимлар техникадаги аҳамияти ва уларнинг ривожланиш истиқболлари”** деб номланган биринчи бобда электромагнитли тебранувчан қўзғатувчилари бўлган тизимлар ва уларнинг ишлаш фаолияти бўйича мавжуд бўлган илмий тадқиқот ишлари кўриб чиқилган.

Шунингдек, электромагнитли тебранувчан қўзғатувчиси (ЭМТҚ) бўлган схемалар ва конструкциялари шунингдек, синусоидал тебранишлар манбаи билан қувватланганда икки контурли занжирларда пайдо бўладиган автопараметрик тебранишларни ўрганишга бағишланган илмий ишлар келтирилган.

Худди шу бобда (ЭМТҚ) билан ЭМТ таснифлаш жадвалининг умумлаштирилган турлари ишлаб чиқилган бўлиб уларнинг ишлаши ва уланиш хусусиятларига кўра бўлинган. Маълумки, кўплаб технологик жараёнларда тебранишларнинг частотаси ва амплитудасини бошқариш имкониятини таъминлайдиган электромагнитли тебраниш қўзғатувчилари фойдаланиш мақбул бўлган. Бундай ЭМТ икки контурли тебранувчан тизим бўлиб қуйидагича тенгламалар билан ёзилади:

$$\begin{cases} \frac{d(Li)}{dt} + \frac{1}{c} \int idt + Ri = U_m \sin \omega t, \\ m \frac{d^2x}{dt^2} + \beta \frac{dx}{dt} + kx = F(x, i), \end{cases} \quad (1)$$

тенгламани турлича аналитик усулларда ечиш билан ток ва тебраниш частоталари ω ва $\frac{\omega_0}{2}$ топилган.

Келтирилган тенглама асосида частота ва амплитудани параметрик бошқариш тизимини яратиш имконияти ҳам тасдиқланган.

Изланувчилар тадқиқотни резонанс ҳолатда ишлайдиган электромагнитли титратгичларда кучайтиргич (усилитель) орқали инвертор билан бошқариладиган қурилмаларда ўтказишган. Бу турдаги қурилмаларда электр энергия сарфини ва моддий базасини тежашга эришилади. Бундай тизимлар мавжуд технологик линияларга осонгина ўрнатилади ва уларни резонанс режимига ростлаш билан электр энергияси ва бошқа ресурсларни сезиларли даражада тежашга эришилади.

Бунда инвертор асосий манба бўлиб электр энергияни механик энергияга ўзгартиради. Шунини таъкидлаш керакки, ЭМТҚ қўллашнинг муҳим афзаллиги унинг паст частотали 10-25 Гц тебранишлар режимида ишлашидир. Механик тебраниш амплитудаси куйидагича тенгламадан аниқланиб:

$$x = \frac{Q}{\sqrt{(c-m\omega^2)^2+(k\omega)^2}}, \quad (2)$$

бу ерда Q - электромагнит куч амплитудаси, резонанс частотада;

$\omega_p = \omega_0 = \sqrt{c/m}$ механик тебраниш амплитудаси x_p частотага тескари пропорционал, яъни:

$$x_p = \frac{Q}{k\omega_0}. \quad (3)$$

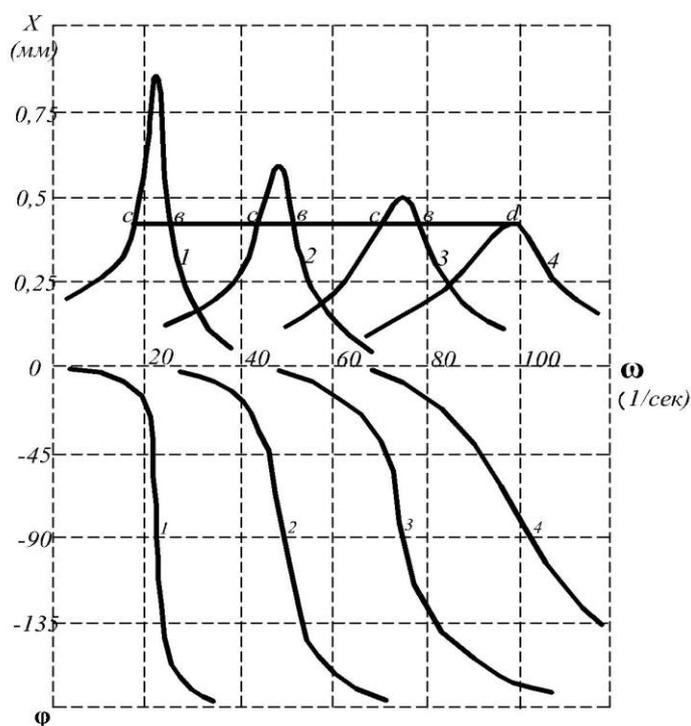
Резонанс частотаси ω_0 камайиши титратгичнинг амплитудасини кучайтиради. Шу сабабли паст частотали тебраниши асосида электромагнитли титратгичларни лойиҳалаш мумкин.

Малумки, паст частотали механик тебранишлар якка контурли ЭМТ чулғамларин, конденсатор билан кетма-кет ёки параллел схемада улашда параметрларнинг маълум қийматида ток ёки кучланишлар резонанси ҳосил бўлиши натижасида юзага келади.

Лекин частота камайиши ф.и.к. пасайиши сабаб бўлиб синхрон ҳолатдан узилади. Механик тебранишни тескари алоқа боғлиниши орқали ЭМТ бошқариш мумкин бўлиб, энергетик кўрсаткичи ошади. Ҳозирги кунда икки контурли ЭМТларда тескари алоқа боғлиниши билан боғлиқ масалалар кўрилмаган. 1-расмда ЭМТ ни амплитуда частотали ва фазо-частотали тавсифлари резонанс ҳолат учун келтирилган. Бундан кўрамизки, электромагнит куч билан якорь тебраниши бир хилдаги тавсифлар олиш учун фаза бурчагини ўзгартиришга боғлиқ.

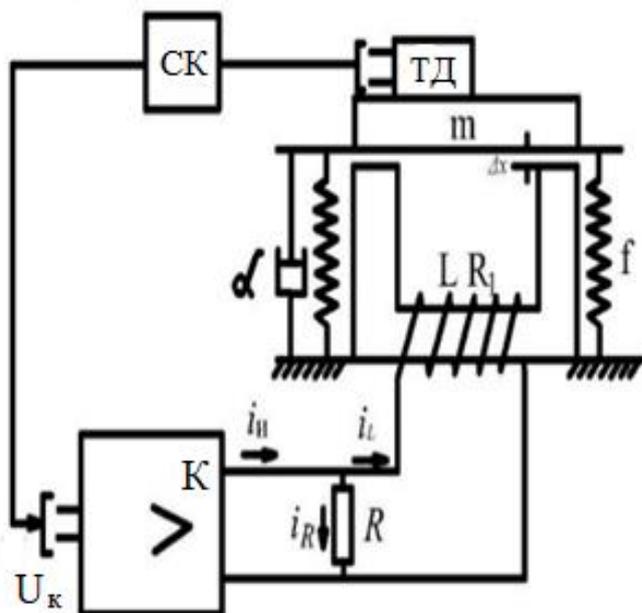
Амплитуда-частотатавий тавсифлари турлича бўлиб якорь тебраниши битта қийматига x , ω ва ω_0 частоталар иккита қиймати мос келади. Демак фаза-частотавий тавсифлардан тескари алоқа боғлиниш учун фойдаланиш мумкин. ЭМТларда автопараметрик жараён тескари алоқа боғлиниши кучланишга мос бўлиб, якорь тебраниш тезлиги, силжиши, тезланишига пропорционал. Тескари алоқа боғлинишга юк ўзгаришига нисбатан резонанс ҳолатни сақлаб тура билиш қобилиятига асосан танланади. Бундай тизимни тузишда автоматик тарзда доима резонансни ҳолатга мослаш зарур бўлади,

сабаби ω пасайса резонансга эришгунча x -амплитудаси гипербола бўйича ўзгаради ва ноқулай вазият юзага келади.



1- расм. ЭМТҚ амплитуда-частотавий ва фазо-частотали тавсифлари

Диссертациянинг иккинчи боби “**Электромагнитли титратгичларда автопараметрик тебраниш жараёнларини таҳлил қилиш**” бу бобда бошқариладиган электромагнитли тезлик датчик ва ночизикли тескари алоқа боғлиниши кучайтиргич орқали уланган ЭМТ схемасининг тебраниш амплитуди ва частотасини аниқлашдан иборат.



2- расм. Бир контурли автоном электромагнитли титратгичнинг функционал схемаси

Шу сабабли ЭМТ резонанс чегарасини барқорор сақлаш муҳим масала бўлиб тебраниш амплитудасини мослаштириш зарур. Ушбу эффектга эришиш учун келтирилган тавсифлардаги резонанс ҳолат нуқтасини 1-расмдаги “в” дан “с” нуқтага суриш кифоя қилади. Аслида бу тескари алоқа боғлинишига мословчи элемент (корректор) улаш билан эришилади. Демак диссертация ишида режалаштирилган мақсадга эришиш учун паст частотада тебранувчи ЭМТ бошқаришда автоматик бошқариладиган тизимлардан фойдаланилса юқори эффектга эришилади.

2- расмда юки m , камон қаттиқлик коэффиценти f ва ишқаланиш коэффиценти α бўлган демпферни ўз ичига олган бир контурли электромагнит титратгич функционал схемаси кўрсатилган. Электр қисми индуктивлиги L ва шунт қаршилиги R_1 бўлган электромагнит ғалтақдан ташкил топган. Электромагнит чулғамига параллел шунтланган R қаршилик уланган. Тизимнинг механик ва электр қисмлари ўртасида электродинамик алоқа амалга оширилади.

Кучайтиргич (К) тебраниш тизимидаги энергия оқимини бошқаради ва ночизикли элемент ҳисобланади. Тебраниш тезлиги тескари алоқали, сезгирлик коэффициенти СК бўлган тезлик датчиги (ТД) орқали амалга оширилади.

Электромеханик ҳаракат тенгламалари қуйидагича:

$$\begin{cases} \frac{L_0}{R} \dot{y} + by = K_1 \dot{x} - K_2 \dot{x}^3 - \frac{\rho}{R} (x\dot{y} + \dot{x}y), \\ \ddot{x} + h\dot{x} + \omega_0^2 x = U_2 y + \xi y^2 + \beta. \end{cases} \quad (4)$$

Бу ерда нисбий бирликда:

$$\begin{cases} b = \frac{1}{L_0} (R + R_1); K_1 = KS - U_1; K_2 = K^3 S_3; K_3 = \frac{\rho}{L_0} \\ L = L_0 + \rho x; U_1 = \frac{\rho i_0}{Rb}; U_2 = \frac{i_0 \rho}{b}; h = \frac{\alpha}{m}; \\ \omega_0^2 = \frac{f}{m}; \varepsilon = \frac{\rho}{2m}; \beta = \frac{\varepsilon i_0^2}{b^2}; y = i_L - \frac{i_0}{b}. \end{cases} \quad (5)$$

Бунда i_L – электромагнит ўрамидаги ток; x – якор тебраниши m – юк (масса); S_1 ва S_3 – ночизикли кучайтиргичнинг аппроксимация коэффициенти; L – индуктивлик; ρ – индуктивликдаги модуляция коэффициенти; I_0 – Кучайтиргич ўзгармас токи; f – механик контурдаги демпфер коэффициенти; α – пружинанинг букирлик коэффициенти.

(4) тенгламалар тизимини ечиш учун математикадан кичик параметрлар усулидан фойдаланамиз ва биринчи гармоникани ҳисобга оламиз:

$$x = A \cos \psi, \quad \dot{x} = -A\omega_0 \sin \psi, \quad \psi = \omega t + \xi. \quad (6)$$

(6) тенгламани (4) тенглама қўйиш билан асосий гармоникага нисбатан тенгламани оламиз:

$$y = -B \sin(\psi - \delta), \quad (7)$$

бу ерда

$$B = \frac{A\omega_0}{b} \left(K_1 - \frac{3}{4} K_3 \omega_0^2 A^2 \right) \cos \delta, \quad (8) \quad \text{tg} \delta = \frac{L_0 \omega_0}{Rb}, \quad (9)$$

(7) ифодан келиб чиқадики, уйғотиш ўрамдаги токнинг δ бурчагига кечикиш билан гармоник кўринишда ўзгаради.

(6,7) ифодани ҳисобга олган ҳолда, (4) даги тизимнинг иккинчи тенглама стандарт шаклга келади:

$$\begin{cases} \frac{dA}{dt} = -\frac{\varepsilon}{m\omega_0} [\alpha\omega_0 A \sin \psi - U_2 B \sin(\psi - \delta) - \beta] \sin \psi, \\ \frac{d\xi}{dt} = \omega_0 - \omega - \frac{\varepsilon}{m\omega_0 A} [\alpha\omega_0 A \sin \psi - U_2 B \sin(\psi - \delta) - \beta] \cos \psi. \end{cases} \quad (10)$$

Бу ерда амплитудаси ва частотаси турғун ҳолатда тебраниши (10) тенгламанинг ўнг томонини ψ нисбатан интегралланишдан сўнг тенглама чап томонини нолга тенглаш билан:

$$\frac{dA}{dt} = 0, \quad \frac{d\xi}{dt} = 0, \quad (11)$$

қуйидаги тенгламаларни оламиз:

$$A_0 = \sqrt{\frac{K_1 U_2 \cos^2 \delta - \alpha b}{\frac{3}{4} K_3 U_2 \omega_0^2 \cos^2 \delta}} \quad (12) \quad \omega^2 = \omega_0^2 + \varepsilon \frac{\omega_0 \alpha}{m} \operatorname{tg} \delta. \quad (13)$$

(12) ва (13) формулалар маълум бир параметр қийматларида турғун ҳолатда тебранишларнинг амплитудаси ва частотасини аниқлашга имкон беради. (13) тенгламадан кўришиб турибдики, уйғаниш частотаси механик куйи тизимнинг табиий тебраниш частотасига яқин, чунки частота ўзгариши ε коэффициент катталигига пропорционал.

Тебранишларнинг ўз-ўзидан кўзғалиш шарти (12) тенгламадаги радикал ифода ҳақиқий сон бўлиши билан ифодаланиб:

$$i_0 \rho \left(K S_1 - \frac{i_0 \rho}{R + R_1} \right) \cos^2 \delta > \alpha \left(1 + \frac{R_1}{R} \right)^2. \quad (14)$$

(14) тенгламадан кўришиб турибдики, агар датчик қуввати кучли бўлса, ўз-ўзидан тебранишлар содда, ишчи ўрамдаги шунтланган ва ночизиқли ток манбасининг ўзгариши юқори бўлади.

Тенгсизликдан (14) келиб чиқадики, $\frac{\pi}{2}, \frac{3}{2}\pi, \dots$ га тенг бўлган δ қийматларида ўз-ўзидан тебраниш мумкин эмаслиги келиб чиқади. Иккинчи ҳолатда муаммони $R \neq 0$, билан истисно қилинади.

Тебранишларнинг барқарор бўлиши куйидаги шартнинг бажарилиши билан боғлиқ:

$$\left| \frac{\partial F(A)}{\partial A} \right|_{A=A_0} < 0. \quad (15)$$

Агар (15) шартга турғун амплитуда (12) билан алмаштирилса, у турғун тебраниш шароитларни қондирадиган параметрларнинг қиймати учун бажарилганлиги аниқланади (11).

Шундай қилиб, автоном тизимда (2-расм) турғун амплитуда барқарорлиги шарти ҳар доим бажарилади ва механик тебранишларнинг максимал амплитудаси шунчаки нолга яқин δ қийматларида эришилади.

Бундай қийматлар δ шунт қаршилигини R ўзгартириш орқали эришилади.

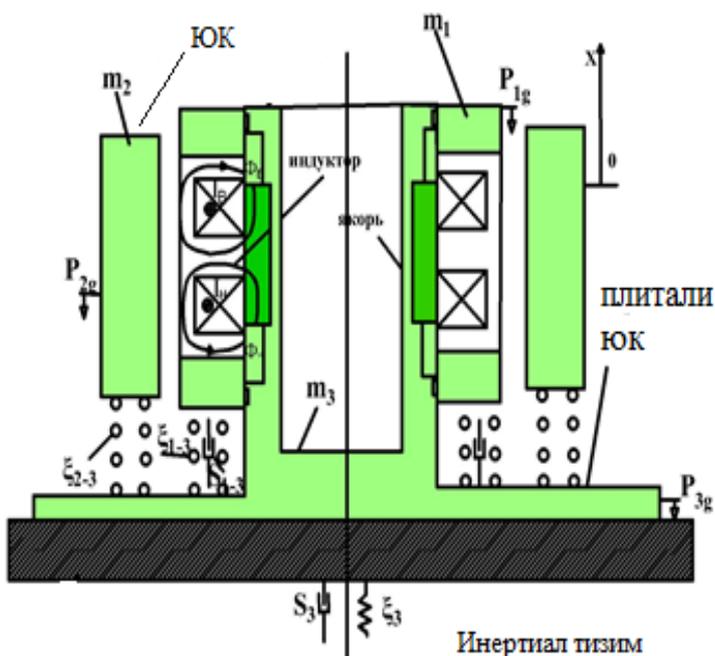
Схемада ўз-ўзидан тебраниш амплитудасини ошириш самарадорлиги; тескари алоқа учун чиқишдаги координатасини танлаш, тезлик датчиги сезгирлиги, шунингдек бошқарув тизимига боғлиқ эканлиги билан изоҳланган.

Учинчи бобда **“Титратгич қурилманинг математик модели”** компьютерда моделлаштириш ёрдамида юқори қувватли икки тактли электромагнит титратгични лойиҳалаш масалалари кўриб чиқилган.

Тебраниш қурилманинг ишлаши ва уни амалий мақсадларда ишлатишда муҳим рол ўйнайдиган токни ҳосил қилиш учун тиристорли бошқариш тизимидан фойдаланилиб, тебраниш мосламасининг динамикаси таҳлил қилинган. Титратгич қурилмаларнинг ишлаши тўғрисида керакли маълумотлар электромеханик ўхшашлик асосида математик моделини яратиш орқали олиниши мумкин. Умуман ҳарқандай механик тебраниш жараёнларни электр ўхшашлик схемаси билан алмаштириш мумкин.

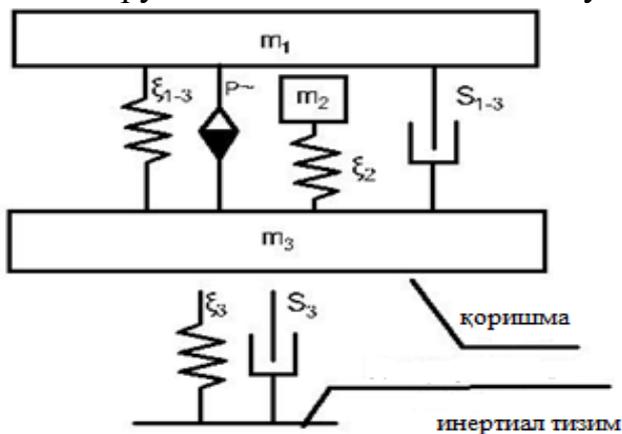
Электромагнитли титратгич (3-расм) таркибидаги плита, якорь, тупроқ массаси, плитали юк m_3 бўлиб, битта ясси блок билан боғланган. Ушбу блок

ерга ξ_3 - эластик коэффициент орқали тавсифланувчи босим ўтказади. Грунт эса ξ_3 га қарши тасир ўтказиб, деформацияланишдаги сарфни аниқлайди. Титратгич қурилманинг узликсиз ишлаши, сиқилувчи эластик пружина коэффициентини ξ_{2-3} , m_2 юкланишини ифодалайди.

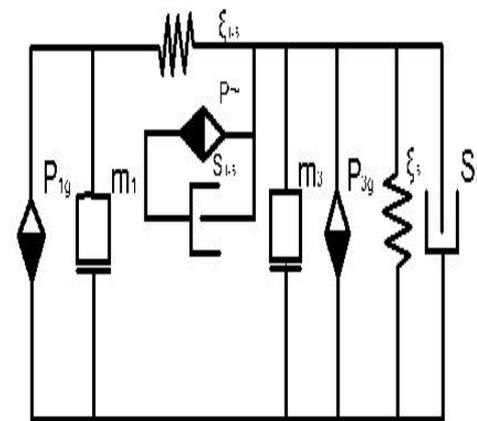


3- расм. Электромагнитли титратгич лойиҳаси

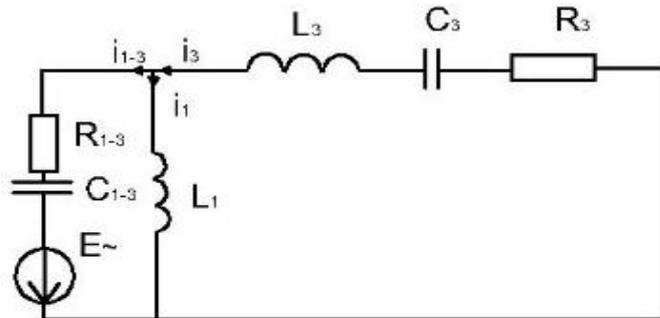
Конструкциядан механик қисмига ўтамиз (4 ва 5- расмлар.).



4- расм. Титратгич қурилмасининг конструкцияси



5- расм. Титратгич қурилмасининг ўхшашлик механика тизими



6- расм. Механика қисминининг электр ўхшашлик схемаси

Механик энергия исрофи подшибникларда m_1 ва m_2 кучга боғлиқ хусусиятини ифодалайди. Манба эса ўзгарувчан электромагнит кучи $P\sim$ билан ифодаланadi. Электромагнит кучнинг пайдо бўлиши учун биз I токи билан бошқариладиган чизиқли электромагнит двигателдан фойдаланамиз. Оғирлик кучнинг доимий таркибий қисмлари мосламанинг динамик ишлашига таъсир қилмайди шу сабабли ҳисобга олинмаган.

Титратгич қурилма конструкцияси (4- расм) механика қисмига (5- расм) ўхшашлик электр занжир схемага алмаштирамиз. 6 - расмда электромеханик тизимларининг ўхшашлик схемасига асосан дифференциал тенгламаларни ёзамиз:

Электр занжир қисми учун:

$$\begin{cases} \frac{di_3}{dt} = \frac{1}{L_3} [(R_3 + R_{13})i_3 + R_{13}i_1 - U_3 - U_{1-3} + E], \\ \frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C_3} i_3, \\ \frac{di_3}{dt} = \frac{1}{L_1} [R_{13}i_3 + R_{13}i_1 - U_{13} - E], \\ \frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C_{13}} (i_3 - i_1). \end{cases} \quad (16)$$

Механик тизим қисми учун, қуйидаги тенгламани ёзамиз:

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = \frac{1}{m_3} [(\mu_3 + \mu_{1-3})v_3 + \mu_{1-3}v_1 - P_{\xi_3} - P_{\xi_{1-3}} + P\sim], \\ \frac{dP_{\xi_3}}{dt} = \frac{1}{\xi_1} v_3, \\ \frac{dv_1}{dt} = \frac{1}{m_1} [\mu_{1-3}v + \mu_{1-3}v_1 - P_{\xi_{1-3}} - P\sim], \\ \frac{dP_{\xi_{1-3}}}{dt} = \frac{1}{\xi_{1-3}} (v_3 - v_1), \end{cases} \quad (17)$$

бу ерда v_3 ва v_1 - индуктор ва якор тезлиги; μ_{1-3}, μ_3 – сирпаниш коэффициентлари; ξ_1 и ξ_{1-3} – якор ва индуктор орасидаги тупроқ ва пружинанинг эластиклик коэффициентлари; P_{ξ_3} ва $P_{\xi_{1-3}}$ – пружиналарда пайдо бўладиган куч; $P\sim$ – титратгични қўзғатувчи кучи.

Қўзғатувчи куч манбаи икки тактли электромагнит бўлиб ордината ўқи бўйинча тепага ёки пастга ҳаракатланади. Бу куч x координатаси (якор ҳолати) ва магнитланиш кучи F га боғлиқ бўлиб.

$P(xF)$ функцияни аппроксимациялашда биквадрат тенгламадан фойдаланилган:

$$P(xF) = 1469 (5,903 \cdot 10^6 \cdot x^2 + 25,071 \cdot 10^3 x)F, \quad (18)$$

бу ерда x - якорнинг индукторга нисбатан жойлашиши, (мм); F - магнитланиш кучи, (кА).

ЭМТ динамикасини ҳисоблаш учун: $m_1 = 2000$ кг; $m_3 = 493$ кг; $\mu_1 = 6000$ кг/с; $\xi_{1-3} = 7,7 \cdot 10^{-7}$ М/Н; $\xi_3 = 7,7 \cdot 10^{-9}$ М/Н; $\mu_3 = 130000$ кг/с қабул қилинган.

Токни шакллантирувчи ўзгартгич даврий интервалларга бўлинган бўлиб, ҳар бир интервал учун чизикли дифференциал тенгламаси тузилиб, рақамли усулда ечиш натижасида олинган қийматлари n интервалнинг $(n+1)$ учун ушбу ҳолат бошланғич шарт сифатида фойдаланилган.

Токларнинг учта қисми учун тенгламаларни ёзамиз:

$$\begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} \frac{di}{dt} = \frac{U_c - iR}{L} \\ \frac{dv_c}{dt} = -\frac{i}{C} \end{array} \right., & \text{интервал } (t_0 \div t_1), \quad \left\{ \frac{di}{dt} = \frac{i}{R}, \right. & \text{интервал } (t_2 \div t_3), \\ \left\{ \begin{array}{l} \frac{di}{dt} = -\frac{U_c - iR}{L} \\ \frac{dv_c}{dt} = \frac{i}{C} \end{array} \right., & \text{интервал } (t_3 \div t_4). \end{cases} \quad (19)$$

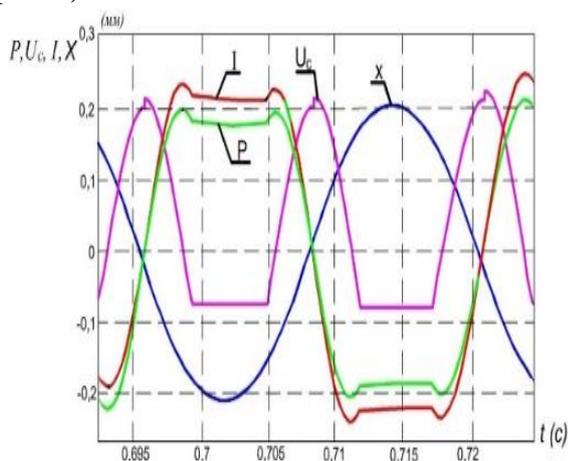
Тенгламалар электр занжир параметрларининг қуйидаги сонли қийматларида ечилган; $R = 1,08$ мОм – ўрамлар қаршилиги; $C = 4650$ пкФ -

конденсаторларнинг сифими, $L = 0,412$ мГн - индуктивлик; $U_c = 180$ В - сифимдаги кучланиш.

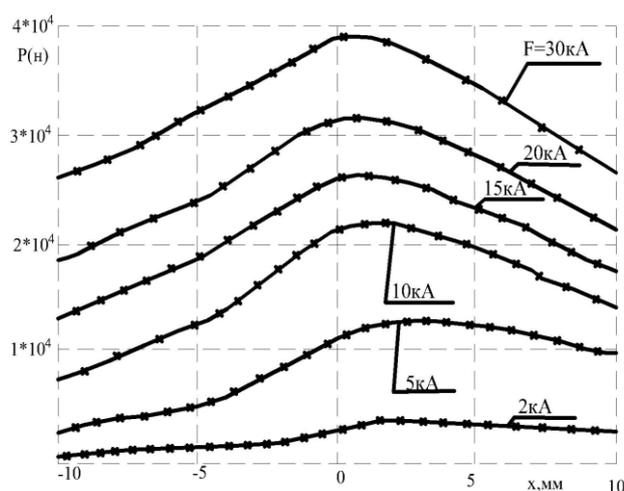
Моделлаштириш учун Simulink пакети ва MATLAB дастуридан фойдаланилган. Simulink дастурининг амалий пакети ўзида график интерфейси, математик модели учун функционал блокларини йиғишга олиб келади: интегратор – сумматор.

Диссертацияда электромагнит титратгич қурилмасининг конструкцияси келтирилган, электромеханик тизимларнинг ҳаракат тенгламаларини ҳисоблаш учун блок-схемаси тузилган. Инвертор ёрдамида импульсли кучланиш манбага уланган бошқарув тизим схемаси ишлаб чиқилган.

Токнинг ўзгариши графиги I , конденсатордаги кучланиш U_c электр қуввати P ва якор x нинг вақтга нисбатан ўзгариш графиги кўрсатилган. (7-расм)



7-расм. Титратгич қурилмасини математик моделлаштириш билан олинган натижалар, I , U_c , x , P . вақт диаграммалари – осциллограммалар



8-расм. Магнитланиш кучи F якор ҳолати x нисбатан тавсифи

Магнит тизим конструкциясининг ўлчамлари орқали: F -магнитланиш кучи; W_m -магнит майдон энергияси; W_{co} -конденсатор энергияси; $\Phi_{об}$ -ўрамдаги магнит оқим; Φ_{II} -индуктордаги магнит оқим; $\Phi_{я}$ -якордаги магнит оқим; P - электромагнит куч графикалари ҳисоблаб топилган рақамли қийматлари орқали қурилган. Ҳисоблаш тажрибаси натижаларига кўра 8- расмдаги график тузилган. Шуниндек диссертация ишида компьютерда ҳисоблаш билан электромагнитли титратгичнинг барча параметрлари ҳисоблаб чиқилиб, ускунани лойиҳалаш учун зарур бўлган технологик чизма ўлчамлари ҳам берилган.

Электромагнит индукция қонунига асосан қуйидагича тенглама ёзамиз:

$$U = \frac{d\Psi}{dt} = W \frac{d\Phi}{dt} = W \left(G \frac{dF}{dt} + F \frac{dG}{dt} \right), \quad (20)$$

бу ерда Ψ – илашган магнит оқим, Φ – магнит тизим орқали оқувчи магнит оқим, G – тизимнинг эквивалент ўтказувчанлиги, F – магнитланиш кучи, W – ғалтакнинг ўрамлар сони.

Амплитуда кучи $P_m = 25000H$, бўлиб $x = 0 \div 8$ мм оралиғида узгарганда, магнит майдан энергияси $W_m = 620Дж$ тенг, иккита магнит учун эса $W_m = 1240Дж$.

$$W_m = \frac{P_m x_m}{2} = \frac{50000 \cdot 0.08}{2} = 2000Дж. \quad (21)$$

Бунда ўрамлар сони:

$$w = U \left(G \frac{dF}{dt} \right) = 7, \quad (22)$$

бу ерда $\frac{dF}{dt}$ – ўрамларда магнитланиш кучининг ўсиши.

Ушбу ўсиш тезлигини $f = 80$ Гц ва $F_m = 17800A$ бўлса:

$$\frac{dF}{dt} = F_m w = 17800 \cdot 2\pi \cdot 80 = 9,4 \frac{A}{MCC}. \quad (23)$$

Шунингдек компьютерда моделлаштириш билан ғалтак ўрамлар сони $w=7$ ва мис симнинг кесими $S=137,5$ мм² аниқланган.

Симнинг кесими катта бўлгани учун, ўрам мис фолгадан иборат бўлиб изоляцияланган.

Шундай қилиб, моделлаштириш $P(F, X)$ функцияни модел ёрдамида аппроксимациялаш билан, ўрамдаги ток $I=29,66$ А, индуктивлиги $L = 0.412$ мГн тенг эканлиги ҳисоблаб топилган.

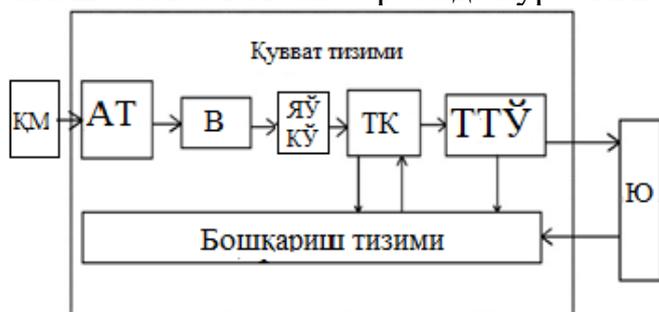
Электромагнит титратгични бошқариш тизимининг асосий вазифаси чўлғамларда импульсли токларни шакллантиришдир.

Импульсли ток магнит оқимларнинг пайдо бўлишига сабаб бўлиб ўзгарувчан электромагнит кучни ҳосил қилади. Электромагнит ўрамларда ҳосил бўлган тебранишлар токнинг амплитудаси, частотаси ва фазаси билан боғлиқ.

Шунинг учун токлар амплитудаси ва частотанинг ўзгариши маълум бир шаклдаги импульсларнинг пайдо бўлишига асосланган. Электромагнитли титратгич тизими икки секцияли уйғотиш чулғамдан иборат бўлиб биттасида юзага келган электромагнит куч якорни тепага, иккинчиси эса пастга босади. Ҳар иккала секция синхрон тезликда ишлайди. Шу мақсадда уйғотиш чулғамлар хужайрали бўлиб ўзаро кетма-кет ёки параллел уланади. Натижада бир томонлама зўриқувчи кучни ҳосил қилади. Ишлаб чиқилган қурилма иккита хужайрали бўлиб, қўзғатувчи қувват икки баробарга кучайтирилади. Бу ерда уйғотиш чулғамлари ўзаро параллел схемада уланса электромагнит майдон кучи ҳар хил бўлиб, номутоносиблик юзага келиб титратгичнинг ишлашига халақит беради. Шу сабабли уйғотиш чулғамларини кетма-кет уланганда ток ҳосил қиладиган магнит майдон кучи бир хил муносабатда бўлади. Бу ўз навбатида реактив қувватни кучайтиради, бу қувватни компенциялаш учун эса сиғим улаймиз.

Титратгичнинг бошқариш тизими кучланиш манба билан боғланмагани мақул, шунинг учун выпрямителдан олдин трансформатор ёки кучланишни бўлувчи ўзгартгич орқали уланиши зарур. Ишлаб чиқилган бошқариш тизими: ҚМ-қувватлантириш манбаси, АТ-автомат трансформатор, В-выпрямител, ЯЎКЎ - ярим ўтказгичли кучланишни ўзгартгич, ТК-ток коммутатор,

ТТЎ-тиристорли ток ўзгартгич ва бошқариш тизимидан иборат бўлиб, Ю - юклаш блок-схемаси 9- расмда кўрсатилган.



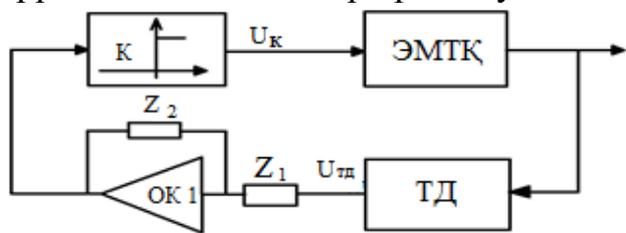
9-расм. Титратгичнинг бошқариш тизимининг блок-схемаси

Диссертация ишида электромеханик титратгичнинг бошқариш принципиал ва структуравий схемаси берилган бўлиб, ҳисоблаб топилган параметр қийматлари эксперимент натижалари билан солиштирилганда қониқарли эканлиги исботланган.

Тўртинчи боб “Электромагнитли титратгичнинг магнит тизими ҳисоблаш ва тавсиялар” бир ва икки тактли электромангнитли титратгич схемаларида ўтказилган эксперимент натижалари таҳлил қилиниб электромангнит қисмини ҳисоблаш усулари кўрсатилган. Электромеханик тизимнинг дифференциал тенгламалари ечиш билан таҳлил қилинган натижалар синов моделида ҳисоблаб топилган параметр қийматлари, амалда эксперимент ўтказиш билан тасдиқланган. Титратгичнинг уйғотиш чулғамларига кучланиш манбага эмас, кучайтиргичга уланган бўлиб, тебраниш жараёнини кучайтирилган энергия орқали бошқаради. Тескари алоқа боғлиниши эса титратгичнинг ишчи қисмига ўрнатилган электродинamik русумдаги датчикга уланган.

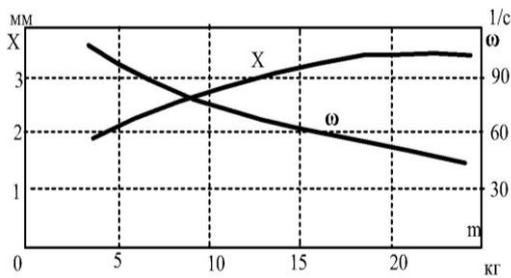
Магнит ўзаги тўйиниш хусусиятига эга эмас, лекин магнит оқим маълум қисми гистерезис ўйирма ток ҳисобига сарфланади, бу $\delta = \frac{\Phi}{\Phi_\delta} = 1,2 \div 1,4$ коэффиценти билан ҳисобга олинган. Тескари алоқа тебраниш тезланиш билан боғланганда тезликка нисбатан автопараметрик тебраниш амплитудаси 50-100% кучайтирилади. Ушбу жараённи ўзгартиришда операцион усилителга уланган тескари алоқа резистор қаршилигини ўзгартириш кифоя қилади.

Назарий асосда ва математик модел ёрдамида бажарилган тадқиқот натижалари асосида, автоном тарзда ишлайдиган тескари алоқали боғланган электромангнитли кўзгатгич схемада синов тажрибаси ўтказилган. Тажриба ўтказилган ускуна (10- расм) тескари алоқа операцион кучайтиргичга коррекцияловчи занжир орқали уланган бўлиб тебраниш тезлиги, тезланиш,

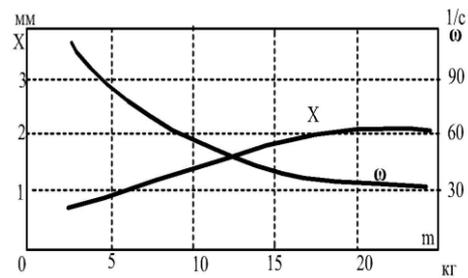


10-расм. Тескари алоқали боғланган электромангнитли титратгич блок схемаси

титратишига тасир ўтказиб, амплитудасини кучайтиради. Эксперимент тажрибада тескари алоқа тезланиш орқали боғланганда тезлик орқали боғланишга нисбатан тебраниш амплитудаси кучайиши кузатилди (11- расм, а,б).



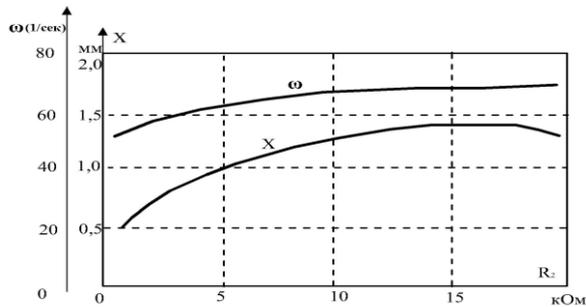
а) тескари алоқа тезланиш орқали боғланган



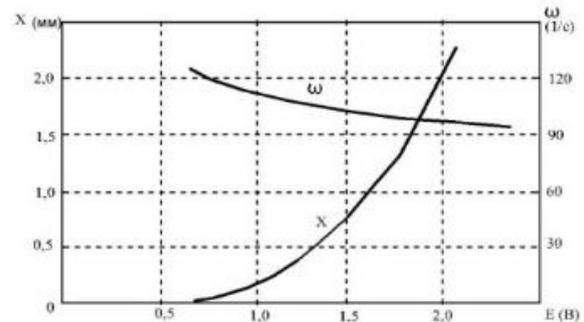
б) тескари алоқа тезлик орқали боғланган

11- расм. Автопараметрик тебраниш частота ва амплитуданинг юклага боғлиқ тавсифи

Токни кучайтирилса тебраниш амплитудаси ошади, частота эса бироз камяди. Бу (12,13,23) аналитик тенламаларда ҳам таъкидланган эди. Аналитик, математик моделда ҳисоблашда олинган натижалар тажрибадаги қийматлар билан солиштириганда 10-12% фарқ қилди. Титратгичларнинг якорь тезлигини бошқаришда тескари алоқа боғланган тизимдаги резистор қаршилигини ўзгартириш техник жиҳатдан жудаям қулай. 12- расмда реастот орқали частота-амплитуда ўзгариш графиги келтирилган. Буни кучайтиргичдаги кучланишни узгартириш билан ҳам амалга ошириш мумкин (13- расм). Тебраниш амплитуданинг ўзгариши токка нисбатан берилган. Паст частотада 10-20 Гц тебранувчи титратгич икки контурли сиғим билан боғланган схемада тажриба ўтказилган. Тебраниш амплитудасини нозизиқли кучайтиргичдаги кучланишни ўзгартириш билан ҳам эришиш мумкин. Токнинг кучайиши, амплитудани кучайтириб бироз частотанинг камайишига сабаб бўлади.



12-расм. Частота ва амплитуданинг тескари алоқага уланган резисторни ўзгаришига боғлиқ графиги



13-расм. Тебраниш амплитудаси ва частотасининг кучланишга нисбатан тавсифи

Лаборатория шароитида бир еки контурли ЭМТларда ўтказилган тажрибада олинган тавсиф қийматлар аналитик усул ва математик моделлаштиришда олинган параметр кўрсаткичлари билан сон в сифат жиҳатдан бир хил эканлиги тасдиқланди. Расмларда келтирилган график, тавсиф ва осциллограммалар ҳам автоном электромеханик тизимларда барқарор автопараметрик тебранишлар ҳосил бўлишини изоҳлайди.

Шунингдек, ушбу бобда электромагнитли титратгичнинг магнит параметрлари, оғирлиги, геометрик ўлчамлари, чулғамлар сони, магнит майдон кучи, механик энергия ва ҳақозоларни ҳисоблаш усуллари кўрсатилган. Амалда ҳисоблаш учун зарур бўлган тенгламалар ҳам берилган:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T i d\psi, \quad (24)$$

бунда $\psi = L(x) \cdot i(t)$ бўлиб қуввати: $P = \omega \frac{L_0 I_0^2}{2} M_1 \cos \theta$, бу ерда M_1 -тебраниш частота энергиясини ўзгартириш коэффициенти. Уйғотиш чулғамдаги магнит майдон энергияси: $W_0 = \frac{L_0 I_0^2}{2} = \frac{F_m X_m}{M_1}$.

Ишлаб чиқилган қурилмада ўтказилган тажриба юк ўзгарганда ҳам барқарор ишлаш мумкинлигини кўрсатди.

ХУЛОСА

«Электромеханик тизимлар назарияси асосида бошқариладиган электромагнитли титратгичларни ишлаб чиқиш» мавзусидаги фалсафа доктори (PhD) диссертацияси бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида куйидаги хулосалар тақдим этилди:

1. Саноат ишлаб чиқариш корхоналари электр таъминоти тизими элементларида, жумладан, титратгичли ускуналарда электр энергияси исрофларининг юқорилиги, ишончлилиқнинг паст даражаси ушбу қурилмалар ишлаш режими мақбул даражадан йироқлигини кўрсатди. Натижада автопараметрик тебраниш жараёнларни назарий тадқиқ қилиш асосида тескари алоқали бошқариладиган электромагнитли титратгичларни ишлаб чиқиш мумкинлиги исботланди.

2. Электромеханик тизимлар назарияси асосида бетон қоришмаларини зичлайдиган электромагнитли титратгич ускунаси ишлаб чиқилди. Натижада электромагнитли титратгич ускуналарини узликсиз тебранишлар технологиялар соҳасида қуллаш мумкинлиги эътироф этилди.

3. MATLAB дастурининг Simulink моделлаштириш пакети ёрдамида электромеханик ўхшашлиги асосида математик модели ва электромеханик титратгични бошқариш тизими ишлаб чиқилди. Натижада унинг оптимал ҳолатда иш жараёнини таъминловчи параметрлари ҳисоблаб чиқилган.

4. Электромагнитли титратгич иш ҳолатини амплитуда ва фазаси орқали автоматик бошқариш учун частота ўзгартиргич ишлаб чиқилган. Натижада электромагнит титратгичнинг барқарор ишлашини таъминловчи тоқлар амплитудаси импульснинг давомийлиги ва частотасининг мақбул параметрлари аниқланди.

5. Тебраниш тезлиги 28 мм/с дан 49 мм/с гача кучайтириш учун тезлик ва тезланишни тескари алоқа боғланиши орқали реостат ёрдамида бошқариладиган тизим ишлаб чиқилган. Натижада электромагнитли титратгич қурилмасинини кенг диапазонда тебраниш частотасини созлаш имкониятига эришилди.

6. Назарий ва экспериментал тадқиқотлар натижасига кура электромагнит титратгич паст частоталарда тебранишнинг барқарор ишлаши эътироф этилди. Натижада бошқариладиган электромагнит титратгичли қурилма ишлаб чиқилиб, ушбу қурилма бетон ёки тупроқни зичлаш мақсадида “No’kis temir beton buyimlari zavodi” МЧЖга тадбиқ қилинди ва йиллик иқтисодий самарадорлиги 128,2 млн сўмни ташкил этди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.15/31.08.2022 Т.73.07 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ
ТРАНСПОРТНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

КАРАКАЛПАКСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЕСЕНБЕКОВ АЗАМАТ ЖОЛДАСБАЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА УПРАВЛЯЕМЫХ ВИБРОУСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ
ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**05.05.02 – Электротехника. Электроэнергетические станции, системы.
Электротехнические комплексы и установки**

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

Ташкент – 2024

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при министерстве Высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № В2023.4.PhD/Т4236

Диссертация выполнена в Каракалпакском государственном университете.

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

Научный руководитель:

Ибадуллаев Мухтархан

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Колесников Игор Константинович

доктор технических наук, профессор

Бегматов Шавкат Эрнестович

кандидат технических наук, профессор

Ведущая организация:

Навоийский государственный горно-технологический университет.

Защита диссертации состоится «___» _____ 2024 г. в _____ часов на заседании Научного совета DSc.15/31.08.2022 Т.03.07 при Ташкентском государственном транспортном университете. (Адрес: 100167, г. Ташкент, ул. Темирийулчилар, 1. Тел.: (99871) 299-00-01; факс: (99871) 293-57-54; e-mail: rektorat@mail.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного транспортного университета (зарегистрировано №___). (Адрес: 100167, г.Ташкент, ул. Темирийулчилар, 1. Тел.: (99871) 299-05-66).

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2024 года.

(реестр протокола рассылки №___ от «___» _____ 2024 года).

Р.В. Рахимов

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

Я.О. Рузметов

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

Р.М. Мирсаатов

Председатель научного семинара
при научном совете по присуждению
учёных степеней, д.т.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире особое значение имеет обеспечение надёжности машин и механизмов при резонансных колебаниях, возникающих во время их работы. В настоящее время в развитых странах уделяется особое внимание безопасности труда, сроку службы и производительности труда. Надёжность этих устройств зависит от эффективного преобразования электрической энергии в механическую. В тоже время создается теория и разрабатываются различные источники механической энергии, в том числе, и электромагнитные вибровозбудители (ЭМВВ).

В мире проводятся исследования, посвященные вопросам автоматизированных колебательных электромагнитных систем на основе ЭМВВ, обладающих заданными характеристиками и параметрами, в которых частота его выходного напряжения подстраивается в резонанс к частоте собственных колебаний рабочей части машины. Исследование по этому направлению считается актуальными, в том числе определение основных факторов увеличения экономичности системы, за счет уменьшения тока, потребляемого ЭМВВ и уменьшения его габаритов.

В Республике Узбекистан уделяется особое значение по бесперебойной и качественной работе автоматизированных электромеханических колебательных систем, повышению их эффективности при преобразовании электрической энергии в механическую и внедрению ресурсосберегающих технологий на промышленных предприятиях.

Данное диссертационное исследование направлено на выполнение поставленных задач, предусмотренных Указами и Постановлениями Президента Республики Узбекистан на 2022-2026 годы по направлению: «Ускоренное развитие национальной экономики и поддержание высоких темпов роста», которые включают: «Бесперебойное энергоснабжение экономики и активное внедрение технологий «зеленой экономики» во всех сферах, повышение энергоэффективности. на 20%»². Задачами исследования являются разработка, моделирование, алгоритмизация и применение на практике локальных интеллектуальных систем учета электроэнергии и контрольно-измерительных приборов, учета и контроля энергоресурсов для оценки и повышения эффективности производственных предприятий.

Эти работы указаны в Президентских указах и постановлениях кабинета министров Республики Узбекистан от 28. 01.2022 г. № УП-60 О стратегии развития нового Узбекистана на 2022 – 2026 годы, от 22.08.2019 в №ПП-4422 “О оперативных мероприятиях по повышению энергоэффективности в экономике и социальной сфере, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии” № ПП-57 “О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и

² Указ Президента Республики Узбекистан № ПФ-60 от 28 января 2022 года «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы»

энергосберегающих технологий в 2023 году” от 16 февраля 2023 года, а также в других нормативно правовых документах, принятых в данной области.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики II. “Энергетика, энерго-ресурсосбережение”.

Степень изученности проблемы. Особый вклад в изучение виброустройств и факторов, влияющих на работу применяемых в них технологий, внесли зарубежные и ученые Узбекистана, такие как: Мандельштам Л.И., Папалекси Н.Д., Модеров А.А., Нитусов Ю.Е., Тафт В.А., Shikhov A.M., Solona O, Вайсберг Л.А., Levenson S.U., Zare J., Рахимов Г.Р. Базаров Н.Х., Исмаилов З.И., Тилляходжаев М.М., Алимходжаев К., Амиров С.Ф., Ибадуллаев М.И., Колесников И.К. и другие.

На основании результатов этих исследований разработана теория электромагнитных виброустройств для промышленных целей. Несмотря на достигнутые результаты, в этих разработках не изучены технологии получения надежных электромагнитных вибровозбудителей, в которых преобразование электрической энергии в энергию механических колебаний связано с изменением параметров электрической системы, что приводит к эффективному использованию электромагнитных вибраторов.

В настоящей работе важнейшими задачами считаются развитие теории электромагнитных процессов и разработка современных электромагнитных возбудителей механических колебаний.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ ВУЗа, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ по теме №2 «Теория и методы расчета автоколебательных процессов нелинейных электроферромагнитных и электромеханических систем» (2017-2022 гг.) плана научно-исследовательских работ Каракалпакского государственного университета имени Бердаха.

Целью исследования является создание управляемых электромагнитных вибровозбудителей на основе теории электромеханических систем.

Задачи исследования:

разработка электромагнитных вибровозбудителей на теоретической основе электромеханических систем;

разработка математической модели на основе электромеханической аналогии прикладным пакетом Simulink программы Matlab;

разработка управляемого устройств электромагнитных вибровозбудителей;

разработка преобразователя частоты в системах управления виброустройством;

разработка конструкции для получения одночастотных колебаний в электромеханических системах с электромагнитными вибровозбудителями с введением обратной связи.

Объектом исследования являются электромагнитные вибровозбудители, применяемые в вибрационных машинах производственного назначения.

Предметом исследования является разработка конструкций устройств на основе одноконтурной-двухконтурных вибровозбудителей.

Методы исследования основаны на применении современных аналитических методов и новых инструментов, а также математического моделирования двухконтурного электромагнитного вибровозбудителя; методов решения нелинейных уравнений, теории автоколебаний, методов экспериментального исследования характеристик разработанного устройства.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

Усовершенствованы методы расчета одно и двухконтурных вибровозбудителей на основе уравнений движения электромеханических систем с учетом взаимодействия вибрирующей поверхности и приемника с обратной связью по скорости;

разработана конструкция изготовления виброустройства с помощью математической модели, которая позволила создать две зоны преобразования за счет силы одной ячейкой, а другой изменением магнитного поля;

разработан преобразователь, обеспечивающий режим работы виброустройств, на основе регулирования частоты, длительности импульсов и амплитуды;

разработана система управления электромагнитным вибратором для формирования магнитных потоков и переменной электромагнитной силы на основе полевых транзисторов.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработана схема управления электромагнитного вибровозбудителя на основе новой микропроцессорной низкочастотной техники для автоматизированного контроля его работы;

разработаны виброустройства большой мощности на основе двухконтурных вибровозбудителей, с изменением скорости, ускорения, амплитуды и частоты колебаний;

разработана конструкция электромагнитного вибровозбудителя, на основе математического моделирования, большой мощности для увеличения силы электромагнитного поля (ЭМП);

получены силовые линии ЭМП в электромагнитном вибровозбудителе с применением программного приложения Simulink программы Matlab.

Достоверность результатов исследований достигнута применением теоретически обоснованных концепций автоматизированного управления электромагнитными процессами в электромеханических вибраторах, позволяющие эффективно решать задачи построения промышленных виброустройств с использованием методов современной теории математического моделирования и совпадением теоретических исследований с экспериментальными характеристиками.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследований заключается в разработке уравнений движения электромеханических систем и методов расчета одно и

двухконтурных вибровозбудителей, а также методики определения характеристик устройства.

Практическая значимость результатов исследования заключается в получении математических основ моделирования, а также автоматизированного управления вибрационных устройств, в виде программных комплексов, позволяющих анализировать характеристики устройств и обеспечивающих энергосберегающий режим работы.

Внедрение результатов исследования. На основе результатов по теории и практики электромеханических систем с электромагнитным вибровозбудителем:

устройство электромеханической системы с электромагнитным вибровозбудителем внедрено в ООО “Нокис темир бетон буйимлари заводи” (справка “Торгово-промышленная палата Республики Узбекистан Управление Республики Каракалпакстан” от 07 ноября 2023 года №01/10-16). В результате разработанные научные исследования позволили получить высококачественное виброустройство большой мощности для уплотнения грунта и бетонных изделий. Разработанный электромагнитный вибровозбудитель характеризуется простотой, удобством в эксплуатации, надежностью и энерго сбережением. Годовой экономический эффект составляет 128,2 млн сумов;

разработанная электромеханической системы с электромагнитным вибровозбудителем внедрена в “Канлыккул гуруч заводи” филиала “Кунграт ун заводи” АО для просеивания пшеницы и риса (справка АО “Кунграт ун заводи” от 26 декабря 2023 года №251). В результате ускорился технологический процесс и повысилось качество просеивания пшеницы и риса. Годовой экономический эффект по экономии электрической энергии составляет 46270 кВт*час.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования прошли апробацию и были обсуждены на 2 международных и 1 республиканской научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. Всего по теме диссертации опубликованы 21 научных работ, из них 4 в зарубежных журналах и 6 в республиканских журналах, рекомендованных к публикации основных научных результатов докторских диссертации ВАК РУз, 4 статей в периодических научных журналах и 4 статьи, индексируемые в базе Scopus, а также 3 авторских свидетельства на программный продукт для ЭВМ от Агентства интеллектуальной собственности Республики Узбекистан.

Структуре и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объём диссертации составляет 102 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность работы, освещено состояние вопроса, сформулированы цель и задачи исследования, дано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий в

республике, показана научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность, теоретическая и практическая значимость, приведены сведения о внедрении результатов научных исследований в производство.

В первой главе диссертации **“Колебательные электромеханические системы в технике и перспективы их развитие”** проведен анализ исследований различных механических систем с электромагнитными возбудителями и определены условия их работы.

Рассматриваются схемы и конструкции электромагнитных вибровозбудителей (ЭМВВ), а также работы, посвященные изучению автоколебаний, возникающих в двухконтурных схемах при питании от источника переменного напряжения.

В этой же главе разработан обобщенный вариант классификационной таблицы электромеханических систем (ЭМС) с ЭМВВ, подразделяющая по признакам их действий и подключения. Известно, что во многих технологических процессах наиболее целесообразными оказались электромагнитные вибровозбудители, обеспечивающие возможность управления частотой и амплитудой колебаний. Такие ЭМС, представляют двухконтурную колебательную систему, описываемая уравнениями:

$$\begin{cases} \frac{d(Li)}{dt} + \frac{1}{c} \int idt + Ri = U_m \sin \omega t, \\ m \frac{d^2x}{dt^2} + \beta \frac{dx}{dt} + kx = F(x, i). \end{cases} \quad (1)$$

Различными методами были найдены решения для тока и перемещения якоря при возбуждении колебаний на частотах $\Omega = \omega$ и $\Omega = \frac{\omega}{2}$

С помощью этих уравнений доказана возможность создания системы с параметрическим (бесконтактным) регулированием частоты и амплитуды.

В качестве исследования ЭМС с ЭМВВ было выбрано усовершенствованное устройство вибровозбудителя резонансного типа с управляющим инвертором и с усилением сигналов. Устройства резонансного типа позволило значительно сэкономить электроэнергию и материалы. Они хорошо вписываются в технологические линии и легко модернизируются. Источником таких систем являются инверторы, преобразующие механические колебания в электрические. Обычно используются колебания на рабочей частоте от 10 до 25 Гц. Амплитуда механических колебаний определяется:

$$x = \frac{Q}{\sqrt{(c - m\omega^2)^2 + (k\omega)^2}}, \quad (2)$$

где Q - амплитуда электромагнитной силы; $\omega_p = \omega_0 = \sqrt{c/m}$ - частота механических колебаний.

Амплитуда механических колебаний зависит от резонансной частоты:

$$x_p = \frac{Q}{k\omega_0}. \quad (3)$$

Уменьшение частоты ω_0 резонанса увеличивает амплитуду колебаний (вибраций). Таким образом режим низкочастотных колебаний (НЧК) можно использовать при проектировании колебательных ЭМС с ЭМВВ.

Известно, низкочастотные механические колебания возбуждаются в двухконтурных ЭМС с ЭМВВ, т. е. в схемах, где последовательно или параллельно с обмоткой ЭМВВ включается конденсатор, подобранным таким образом, что при некоторой величине воздушного зазора якоря возникает резонанс напряжений или токов.

Однако с понижением частоты коэффициент полезного действия таких систем уменьшается, ввиду выхода режима из синхронизма. Введение внешних обратных связей позволяет увеличить управляемость ЭМС, повысить ее энергетические показатели. Двухконтурные ЭМС с ЭМВВ с внешней обратной связью в настоящее время не исследованы. На рисунке 1 показаны амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики электромагнитного вибровозбудителя резонансного типа. Однозначная зависимость характеристик получается только изменением фаз между действующими электромагнитными силами и перемещением. Амплитудно-частотные резонансные характеристики многозначны, так как каждому значению x соответствует два значения частоты ω и ω_0 . Поэтому фазо-частотную характеристику можно использовать в качестве обратной связи.

В устройствах автоколебательных ЭМС с обратной связью возникает напряжение, которое пропорционально скорости, перемещению и ускорению. Критерием выбора вида обратной связи здесь служит возможность получения резонансного режима при изменении массы нагрузки. При построении таких ЭМС с обратной связью (ОС) задачу автоматической настройки в резонанс нужно рассматривать несколько шире, чем это делалось ранее. Дело в том, что при понижении частоты ω до резонансного режима амплитуда x возрастает по гиперболе. При определенном значении амплитуды наступает нежелательный режим работы ЭМВВ.

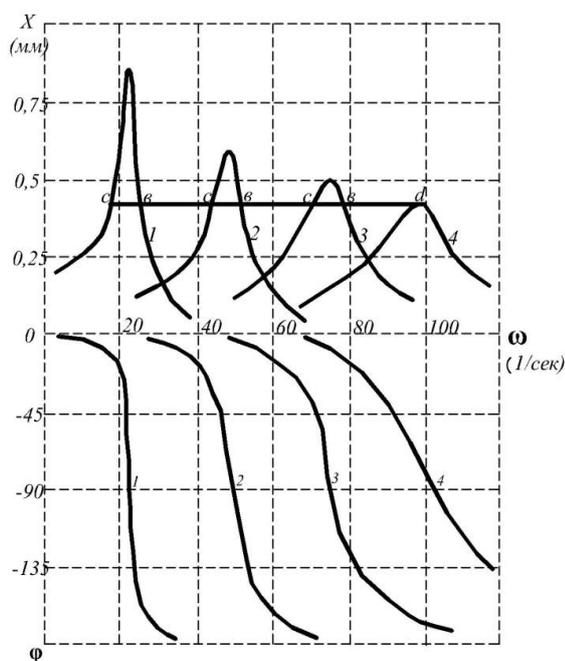


Рис. 1. Семейство амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик ЭМВВ

Следовательно, возникает задача разработки таких резонансных ЭМС, которые могли бы при необходимости уменьшать амплитуду колебания до безопасных пределов и стабилизировать ее. Такой эффект получается при смещении рабочего участка характеристики от резонансного влияния. Это достигается смещением резонансной точки в точку «в» или в точку «с». (рис. 1) Это можно достигнуть включением корректирующего устройства в обратную связь.

Решение поставленных вопросов позволило создать системы автоматического управления и повысить эффективность ЭМС с ЭМВВ в режимах низкочастотных колебаний.

Вторая глава диссертации “Анализ автоколебательных процессов электромагнитных вибровозбудителей” решает задачу определения частоты, амплитуды в электротехнических системах с электромагнитным возбудителем и нелинейным усилителем с обратной связью.

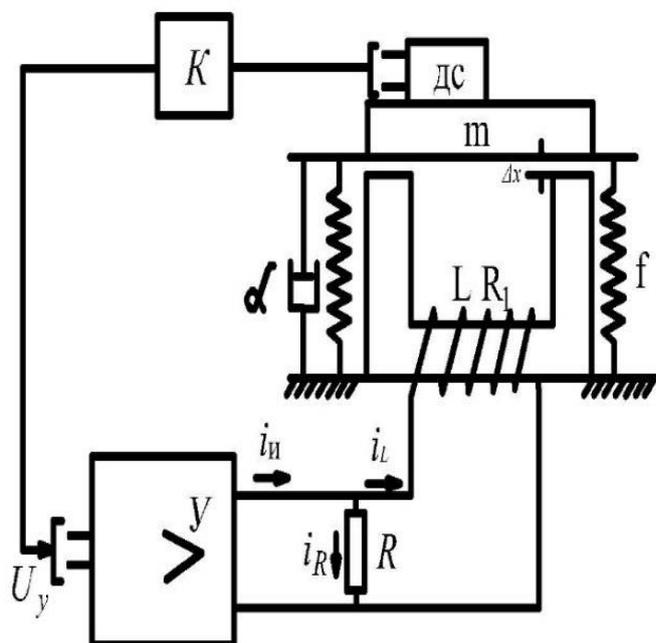


Рис. 2. Функциональная схема одноконтурной автономной электромеханической системы

Это система управляется электромагнитным датчиком скорости. На рисунке На (рис. 2) показан линейный механический колебательный контур, содержащий сосредоточенную массу m (якорь электромагнита), пружину с коэффициентом жесткости f и демпфер с коэффициентом трения α . Здесь же показана электрическая часть системы, состоящая из обмотки электромагнита индуктивностью L и сопротивлением R_1 .

Параллельно обмотке электромагнита подключено шунтирующее сопротивление R . Между механическим и электрическим частями системы осуществляется электродинамическая связь. Усилитель является нелинейным элементом; он управляет поступление энергии в колебательную систему. Обратная связь по скорости колебаний осуществляется датчиком с коэффициентом чувствительности K .

Уравнения движения описывается:

$$\begin{cases} \frac{L_0}{R} \dot{y} + by = K_1 \dot{x} - K_2 \dot{x}^3 - \frac{\rho}{R} (x\dot{y} + \dot{x}y), \\ \ddot{x} + h\dot{x} + \omega_0^2 x = U_2 y + \xi y^2 + \beta. \end{cases} \quad (4)$$

Где:

$$\begin{cases} b = \frac{1}{L_0} (R + R_1); K_1 = KS - U_1; K_2 = K^3 S_3; K_3 = \frac{\rho}{L_0} \\ L = L_0 + \rho x; U_1 = \frac{\rho i_0}{Rb}; U_2 = \frac{i_0 \rho}{b}; h = \frac{\alpha}{m}; \\ \omega_0^2 = \frac{f}{m}; \varepsilon = \frac{\rho}{2m}; \beta = \frac{\varepsilon i_0^2}{b^2}; y = i_L - \frac{i_0}{b}, \end{cases} \quad (5)$$

где i_L — ток в обмотке электромагнита; x — перемещение якоря; m — массы; S_1 и S_1 — коэффициенты аппроксимации характеристики нелинейного усилителя; L — индуктивность обмотки; ρ — коэффициент модуляции индуктивности; I_0 — постоянная составляющая тока усилителя; f — коэффициент демпфирования в механическом контуре; α — коэффициент жесткости пружин.

Для решения системы уравнений (4) воспользуемся методом усреднения и зададим решение, близкое к гармоническому:

$$x = A \cos \psi, \dot{x} = -A\omega_0 \sin \psi, \psi = \omega t + \xi. \quad (6)$$

Подставляя решение (6) в первое уравнение (4), получим решение y для основной гармоники, т. е.

$$y = -B \sin(\psi - \delta), \quad (7)$$

где:

$$B = \frac{A\omega_0}{b} \left(K_1 - \frac{3}{4} K_3 \omega_0^2 A^2 \right) \cos \delta, \quad (8) \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{L_0 \omega_0}{Rb}. \quad (9)$$

Из выражения (7) следует, что ток в обмотке возбуждения изменяется гармонически с запаздыванием на угол δ .

С учетом выражения (6,7) второе уравнение системы (4) приводится к стандартной форме:

$$\begin{cases} \frac{dA}{dt} = -\frac{\varepsilon}{m\omega_0} [\alpha\omega_0 A \sin \psi - U_2 B \sin(\psi - \delta) - \beta] \sin \psi, \\ \frac{d\xi}{dt} = \omega_0 - \omega - \frac{\varepsilon}{m\omega_0 A} [\alpha\omega_0 A \sin \psi - U_2 B \sin(\psi - \delta) - \beta] \cos \psi. \end{cases} \quad (10)$$

Амплитуда и частота стационарных автоколебаний определяется после усреднения правых частей (10) по Ψ , и принимая:

$$\frac{dA}{dt} = 0, \quad \frac{d\xi}{dt} = 0, \quad (11)$$

тогда:

$$A_0 = \sqrt{\frac{K_1 U_2 \cos^2 \delta - \alpha b}{\frac{3}{4} K_3 U_2 \omega_0^2 \cos^2 \delta}}, \quad (12) \quad \omega^2 = \omega_0^2 + \varepsilon \frac{\omega_0 \alpha}{m} \operatorname{tg} \delta. \quad (13)$$

Формулы (12) и (13) позволяют определить амплитуду и частоту стационарных автоколебаний при фиксированных значениях параметров. Как видно из формулы (13), частота автоколебаний близка к частоте собственных колебаний механической подсистемы, поскольку поправка на частоту пропорциональна величине порядка ε .

Условие самовозбуждения колебаний эквивалентно требованию вещественности подкоренного выражения в уравнении (12) и в исходных обозначениях запишется в виде:

$$i_0 \rho \left(K S_1 - \frac{i_0 \rho}{R + R_1} \right) \cos^2 \delta > \alpha \left(1 + \frac{R_1}{R} \right)^2. \quad (14)$$

Из выражение (14) видно, что самовозбуждение тем легче, чем мощнее датчик обратной связи, больше крутизна нелинейного источника тока и больше сопротивление, шунтирующее рабочую обмотку.

Из неравенства (14), следует, что автоколебания невозможны при значениях δ , равных $\frac{\pi}{2}, \frac{3}{2}\pi, \dots$. Последний случай исключен постановкой задачи: $R \neq 0$

Вопрос об устойчивости колебаний сводится к выполнению условия:

$$\left| \frac{\partial F(A)}{\partial A} \right|_{A=A_0} < 0. \quad (15)$$

Если подставить в условие (15) стационарную амплитуду (12), то окажется, что она выполняется для значения параметров, удовлетворяющих условиям стационарности (11).

Таким образом, в автономной системе (рис. 2) условие устойчивости стационарной амплитуды всегда выполняется, а максимальная амплитуда механических колебаний просто достигается при значениях δ , близкой к нулю. Такие значения δ удобно поддерживать, путем соответствующего изменения шунтирующего сопротивления R .

Эффективность повышения амплитуды автоколебаний в исследованной схеме определяется выбором выходной координаты для обратной связи, чувствительностью датчика скорости, а также системой управления.

В третьей главе “**Математическая модель виброустановки**” рассмотрены вопросы конструирования двухтактного электромагнитного вибратора большой мощности с применением компьютерного моделирования.

Проведен анализ динамики виброустановки при использовании системы управления тиристорами для формирования токов, которые играют важную роль при работе виброустановки и применении её в практических целях. Необходимые данные о работе виброустройств можно получить, построив математическую модель на основе электромеханических аналогий. Любые механические процессы, по аналогии могут быть заменены электрическими схемами.

Конструкция вибрационной установки (рис.3), состоящего из плиты, якоря и массы грунта, связанной с плитой, которые объединены в отдельный блок с массой m_3 . Этот блок производит на поверхность грунта давление с коэффициентом ξ_3 , характеризующий упругость грунта.

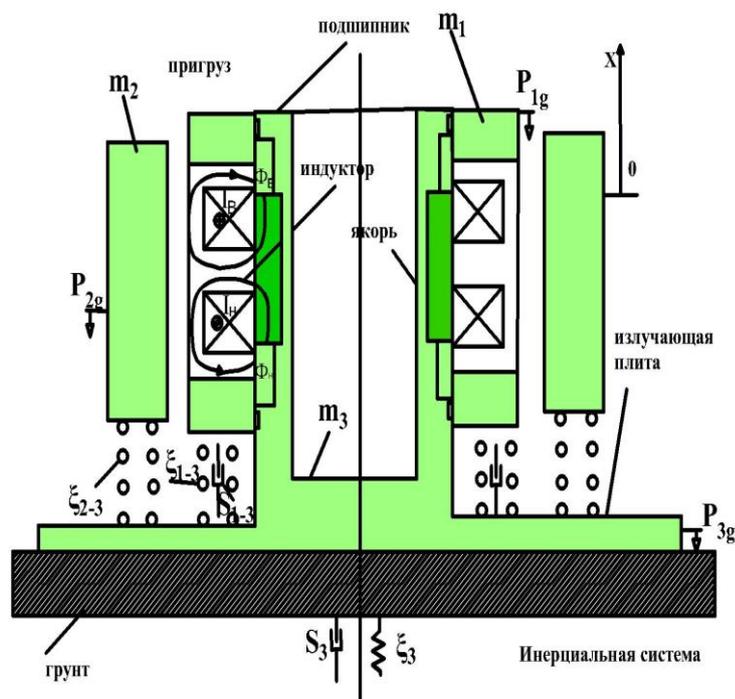


Рис.3. Конструкция вибрационной установки

Грунт оказывает противодействие с сопротивлением ξ_3 , определяет потери на неупругие деформации. Потери характеризуются сопротивлением между взаимными колебаниями масс m_1 и m_3 (в подшипниках). Источник характеризуется, изменяющейся по закону переменной силы $P \sim$. Для возникновения силы используем электромагнитный линейный двигатель, который управляется током I .

Постоянные составляющие силы такие, как вес, не влияют на динамическую работу установки и поэтому ими можно пренебречь. От конструкции перейдем к механической системе (рис. 4 и 5).

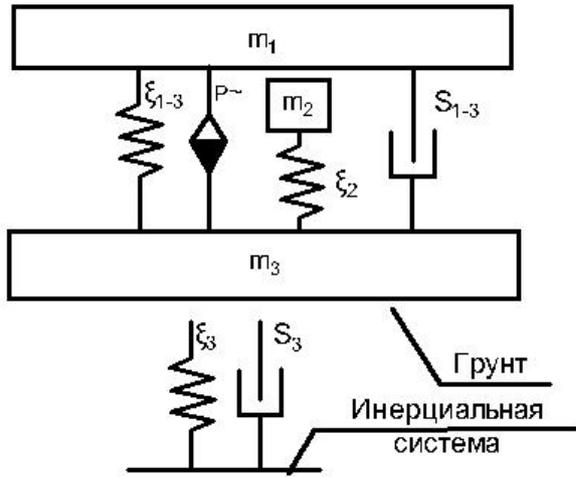


Рис. 4. Упрощенная конструкция разработанного устройства

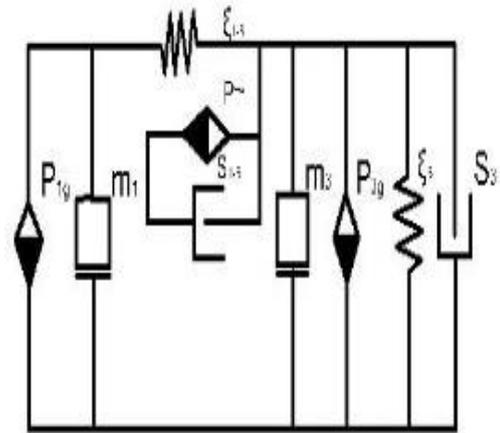


Рис. 5. Механическая часть разработанного устройства

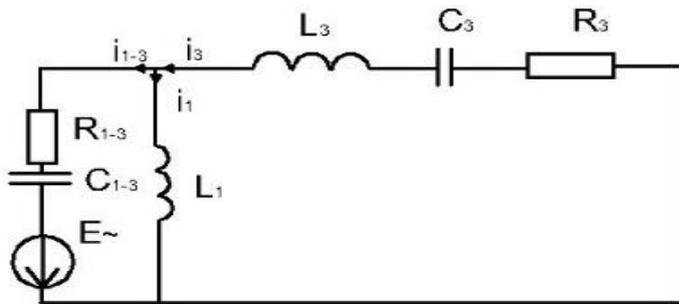


Рис. 6. Электрическая схема – аналог замещения механической части

От упрощенной конструкции вибратора (рис. 4) перейдем к механической подсистеме (рис. 5). Затем по аналогии механическую часть заменим на электрическую (рис. 6).

Для аналога схемы замещения запишем дифференциальные уравнения:

$$\begin{cases} \frac{di_3}{dt} = \frac{1}{L_3} [(R_3 + R_{13})i_3 + R_{13}i_1 - U_3 - U_{1-3} + E], \\ \frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C_3} i_3, \\ \frac{di_3}{dt} = \frac{1}{L_1} [R_{13}i_3 + R_{13}i_1 - U_{13} - E], \\ \frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C_{13}} (i_3 - i_1). \end{cases} \quad (16)$$

Перейдя к механической системе, получим:

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = \frac{1}{m_3} [(\mu_3 + \mu_{1-3})v_3 + \mu_{1-3}v_1 - P_{\xi_3} - P_{\xi_{1-3}} + P\sim], \\ \frac{dP_{\xi_3}}{dt} = \frac{1}{\xi_1} v_3, \\ \frac{dv_1}{dt} = \frac{1}{m_1} [\mu_{1-3}v + \mu_{1-3}v_1 - P_{\xi_{1-3}} - P\sim], \\ \frac{dP_{\xi_{1-3}}}{dt} = \frac{1}{\xi_{1-3}} (v_3 - v_1), \end{cases} \quad (17)$$

где: v_3 и v_1 - скорости якоря и индуктора; μ_{1-3}, μ_3 - коэффициенты трения; ξ_1 и ξ_{1-3} - коэффициент упругости грунта и пружины; P_{ξ_3} и $P_{\xi_{1-3}}$ - сила, возникающие в пружине; P_{\sim} - возбуждающая колебания сила.

Источником возбуждающей силы является двухтактный электромагнитный вибратор возвратно - поступательного движения. Эта сила определяется функцией координаты x (положения якоря) и намагничивающей силы F :

$$P(xF) = 1469 (5,903 \cdot 10^6 \cdot x^2 + 25,071 \cdot 10^3 x)F, \quad (18)$$

где x - положение якоря относительно индуктора (мм); F - намагничивающая сила (кА).

При расчетах были использованы: $m_1 = 2000$ кг; $m_3 = 493$ кг; $\mu_1 = 6000$ кг/с; $\xi_{1-3} = 7,7 \cdot 10^{-7}$ М/Н; $\xi_3 = 7,7 \cdot 10^{-9}$ М/Н; $\mu_3 = 130000$ кг/с.

Весь период работы формирователя токов разбивался на интервалы. Каждый интервал описывался системой линейных дифференциальных уравнений, затем стыковались численные решения. Полученные значения переменных состояний в конце “n” интервала использовались, как начальные значения этих переменных состояния для “(n+1)” интервала.

Запишем уравнения для трех участков токов:

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{U_c - iR}{L}, \\ \frac{dv_c}{dt} = -\frac{i}{C}, \end{cases} \quad \text{интервал } (t_0 \div t_1)$$

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{i}{R}, \end{cases} \quad \text{интервал } (t_2 \div t_3) \quad (19)$$

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = -\frac{U_c - iR}{L}, \\ \frac{dv_c}{dt} = \frac{i}{C}. \end{cases} \quad \text{интервал } (t_3 \div t_5)$$

Уравнения решались при следующих численных значениях параметров цепи: $R = 1,08$ мОм – сопротивление обмоток; $C = 4650$ пкФ - ёмкость конденсаторов, $L = 0,412$ мГн - индуктивность; $U_c = 180$ В - напряжения емкости.

Для моделирования использовался прикладной пакет Simulink и программы Matlab.

Прикладной пакет Simulink содержит графический интерфейс, который для математической модели сводится к компоновке функциональных блоков: интеграторов - сумматоров.

В диссертации приведена конструкция магнитной системы, вибрационной установки, составлена блок-схема расчета уравнений движения электромеханических систем. Разработана система управления с питанием импульсного напряжения от инвертора.

График изменения тока I , напряжения на емкости U_c электрической мощности P и якоря x во времени (рис. 7).

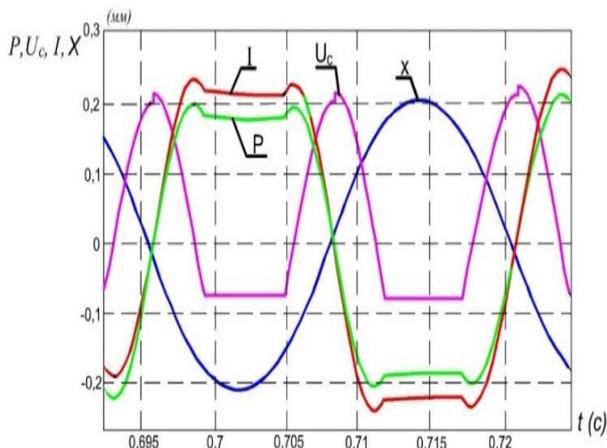


Рис 7. Результат математического моделирования, I, Uc и P в виброустановки. (временные диаграммы - осциллограммы)

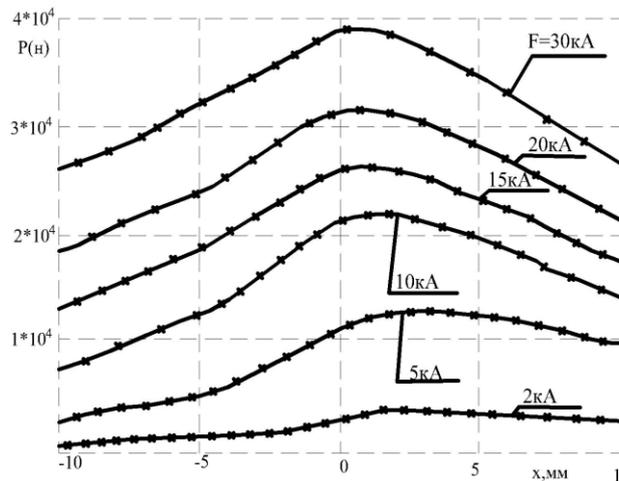


Рис.8. Зависимость нагрузочных сил от зазора якоря

Задаваясь размерами конструкции магнитной системы, были получены: намагничивающая сила - F ; энергия магнитного поля - W_m ; энергия конденсатора - W_{co} ; магнитный поток в обмотке - $\Phi_{об}$; магнитный поток в индукторе - $\Phi_{И}$; магнитный поток в якоре - $\Phi_{я}$; Электромагнитная сила - P . По результатам вычислительного эксперимента построен график на рис. 8. На разработанной конструкции ЭМВВ проведен вычислительный эксперимент, с помощью компьютерной модели определены параметры устройства, с целью проектирования для технологического изготовления.

Применяя закон электромагнитной индукции, можно записать:

$$U = \frac{d\Psi}{dt} = W \frac{d\Phi}{dt} = W \left(G \frac{dF}{dt} + F \frac{dG}{dt} \right), \quad (20)$$

где: Ψ – потокосцепление с обмоткой, Φ – поток через магнитную систему, G – эквивалентная проводимость системы, F – намагничивающая сила, W – число витков катушки.

При амплитуде сила $F_m = 25000H$, при $x = 0$ и амплитуде $x = 8mm$, энергия составляет $W_m = 620Дж$, для двух магнитов это будет $W_m = 1240Дж$;

$$W_m = \frac{F_m x_m}{2} = \frac{50000 \cdot 0,08}{2} = 2000Дж, \quad (21)$$

тогда число витков:

$$w = U \left(G \frac{dF}{dt} \right) = 7, \quad (22)$$

где $\frac{dF}{dt}$ – скорость нарастания намагничивающей силы в обмотке.

Эта скорость нарастания может быть определена при $f = 80$ Гц и $F_m = 17800A$:

$$\frac{dF}{dt} = F_m w = 17800 \cdot 2\pi \cdot 80 = 9,4 \frac{A}{MKS}. \quad (23)$$

Далее компьютерным моделированием определены количество число витков $w=7$, сечение медного провода $S=137,5$ мм².

Так как сечение провода большое, поэтому обмотка выполнена из медной фольги с изоляцией.

Таким образом моделирование помогло рассчитать систему вибрационной установки, аппроксимируя функцию $P(F, X)$, ток обмотки $I_m = 29.66A$ и индуктивность $L = 0.412$ мГн.

Основной задачей системы управления электромагнитным вибратором является формирование в катушках возбуждения импульсных токов.

Импульсы токов приводят к возникновению магнитных потоков, а следовательно, и переменной электромагнитной силы. Возбуждаемые в обмотках электромагнитов колебания, определяются амплитудой, частотой и фазой формирующихся токовых импульсов.

Поэтому токи должны обеспечивать возникновение импульсов заданной формы с изменением амплитуды и частоты.

Электромагнитная система вибратора имеет две секции с обмотками возбуждения. Одна секция служит для возникновения электромагнитной силы, заставляющая двигать якорь вверх, вторая секция – вниз. Обе секции работают синхронно. Для этой цели обмотки возбуждения включают последовательно или параллельно к одной ячейки. Это приводит к возникновению сонаправленных сил. Для разработанного вибрационного устройства необходимо иметь две ячейки. В ячейках должна возбуждаться удвоенная мощность. Так как электромагнитные поля неоднородные параллельное включение катушек возбуждения приводит к дисбалансу работы вибратора. Поэтому для разработанного устройства катушки возбуждения включены последовательно. При последовательном соединении, токи и создаваемые ими намагничивающие силы, будут совпадать. При этом могут возникнуть большие значения реактивной мощности, которые гасятся за счёт включения ёмкостных накопителей.

Схема управления должна быть гальванически развязана с сетью питания. Для этого перед мостом выпрямления помещается трансформатор или преобразователь напряжения с гальванической развязкой.

Разработана блок-схема вибрационной установки, включающая входной трансформатор с автоматом, выпрямитель, ППН, коммутатор тока, формирователь токов с ёмкостным накопителем, систему управления, преобразователь напряжения, коммутатор тока, тиристорный формирователь тока, систему управления. Блок схема показано на рис. 9.

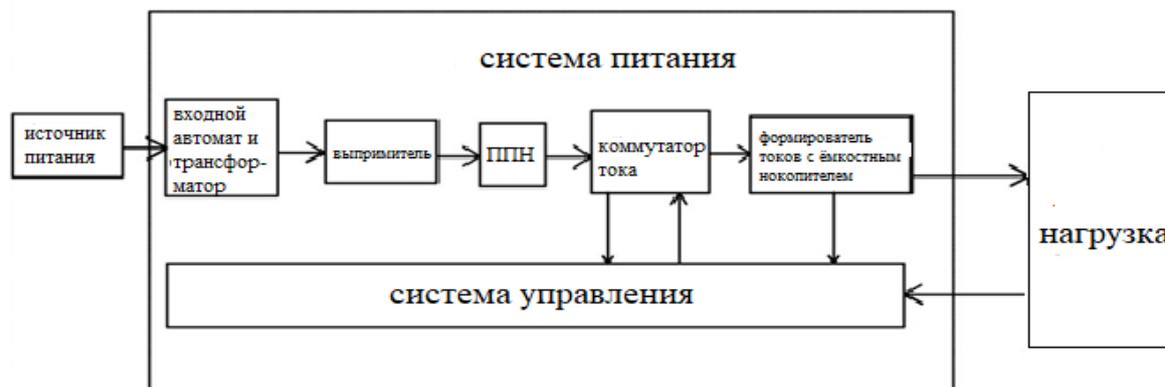


Рис. 9. Блок-схема системы вибрационной установки

Приведена принципиальная и структурная схема управления вибратора и проведен вычислительный эксперимент для подтверждения полученных результатов исследования.

Четвертая глава “Рекомендации по применению и инженерный расчет магнитных систем с электромагнитным вибровозбудителем” приведены результаты экспериментального исследования одно и двухконтурных схем ЭМВВ и разработан метод расчета силовой части вибровозбудителя с учетом энергетических показателей.

Аналитические решения уравнений подтверждены экспериментальными исследованиями на опытной модели ЭМВВ. Обмотка ЭМВВ питалась усилителем. Усилитель, являясь нелинейным элементом, управлял поступлением энергии в колебательную систему. Обратная связь осуществлялась им посредством датчика электродинамического типа, укрепленного на рабочем органе вибровозбудителя. Насыщение стали магнитопровода не присуще ЭМВВ. Результирующее влияние потерь на гистерезис, вихревые токи потоков рассеяния уменьшает полезный поток Φ_{δ} . Это влияние учитывается коэффициентом $\delta = \frac{\Phi}{\Phi_{\delta}} = 1,2 \div 1,4$. Обратная связь по виброперемещению в автоколебательной системе обеспечивает амплитуду колебаний на 50-100% больше, чем обратная связь по скорости. Регулирование при этом наиболее просто осуществляется изменением сопротивления резистора в цепочке, подключенного к операционному усилителю в цепи обратной связи.

Данные, полученные при исследовании вынужденных колебаний, помогли понять физические процессы в ЭМВВ при разомкнутой ОС и перейти к экспериментальному исследованию автономного ЭМВВ с обратной связью.

Блок-схема установка на рис. 10. Для образования обратной связи к линейному операционному усилителю подключена корректирующая цепь, в виде двухполюсника, которая осуществляет обратные связи по скорости, ускорению и виброперемещению. Определим вид ОС, дающий наибольшую амплитуду колебаний.

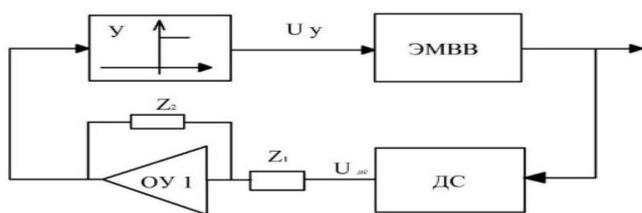
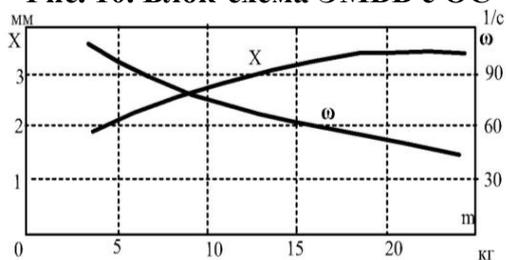
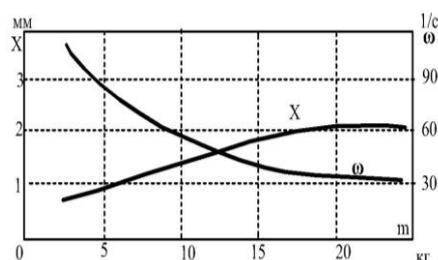


Рис. 10. Блок-схема ЭМВВ с ОС



а) ОС по ускорению

Из сравнения рисунков 11 а и б видно, что ОС по ускорению обеспечивает большую амплитуду автоколебаний по сравнению с ОС по скорости.



б) ОС по скорости

Рис. 11. Зависимость частоты и амплитуды автоколебаний от величины массы

Увеличивая ток увеличиваем амплитуду и, уменьшаем незначительно частоту. Это соответствует полученным аналитическим выражениям (12,13, 23). Различие экспериментальных значений от аналитических составляет 10-12% в первом приближении.

Регулирование колебаний с помощью резистора в слаботочных цепях устройства ОС технически реализовать гораздо проще других способов регулирования. Амплитудно-частотная характеристика регулирования реостатным способом колебаний представлена рисунком 12. Она также управляется и изменением напряжения усилителя. На рис. 13 представлена зависимость амплитуды автоколебаний от величины тока. Для получения, низкочастотных колебаний в диапазонах 10-20 Гц использованы двухконтурные ЭМВВ с конденсатором в силовой цепи. Для регулирования амплитуды колебаний применялось также изменение напряжения на нелинейном усилителе мощности. При увеличении тока амплитуда колебаний увеличивается при незначительном уменьшении частоты.

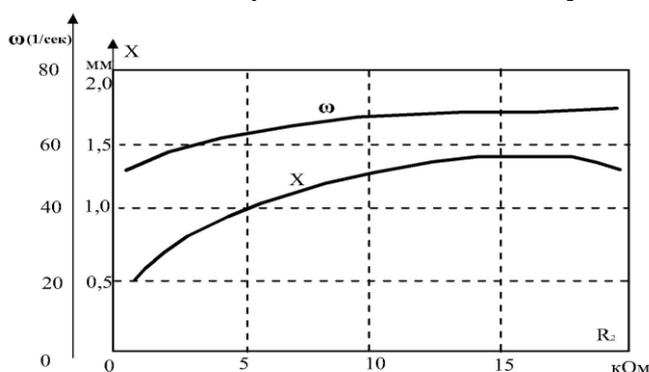


Рис. 12. Зависимости частоты и амплитуды перемещения от величины сопротивлений резистора в цепи ОС

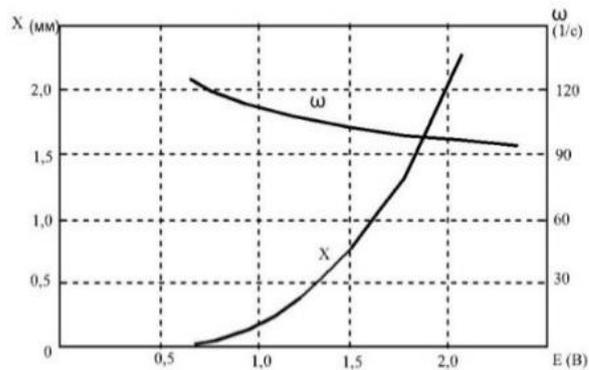


Рис 13. Амплитудно-частотные характеристики при регулировании напряжения

Результаты экспериментальных исследований основных характеристик ЭМВВ показали количественное и качественное совпадение с полученными аналитическими решениями параметров вибрации. Осциллограммы колебаний, возникающих в одноконтурных и двухконтурных автономных ЭМВВ, подтверждают выводы об устойчивости, полученных аналитических решений.

Согласно инженерному расчёту электромагнитного вибровозбудителя, определены параметры электромагнита, масс, габариты разработанного устройства, а также мощность:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T i d\psi, \quad (24)$$

где ψ определений от выражения $\psi=L(x)i(t)$.

Мощность можно выразить: $P = \omega \frac{L_0 I_0^2}{2} M_1 \cos \theta$, где M_1 - коэффициент энергопреобразования на частоте колебаний. Магнитное поле возбудителя определяется энергией: $W_0 = \frac{L_0 I_0^2}{2} = \frac{F_m X_m}{M_1}$.

Проверка разработанного устройства, показала устойчивую работу при изменении нагрузки. Различие между аналитическими выражениями и экспериментом составляет 12%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационной работы на тему «Разработка управляемых виброустройств на основе теории электромеханических систем» получены следующие научные результаты:

1. Высокий уровень потерь электроэнергии и низкий уровень надежности в элементах системы электроснабжения промышленных предприятий, в том числе вибрационном оборудовании, показали, что режим работы этих устройств не оптимален. В результате теоретических анализов автопараметрических колебаний процессов электромеханических систем с электромагнитными вибровозбудителями с обратной связью было доказана возможность создания управляемых вибрационных устройств.

2. На основе теории электромеханических систем разработан электромагнитный вибровозбудитель, позволивший создать вибрационную установку уплотнения бетона. В результате появилась возможность разработать конструкцию электромагнитного вибрационного устройства на технологии непрерывной вибрации.

3. В результате электромеханической аналогии в пакете Simulink программы MATLAB разработана математическая модель и система управления электромагнитным вибровозбудителем. В результате были рассчитаны параметры, обеспечивающие оптимальный режим работы устройства.

4. Разработан преобразователь частоты для автоматического регулирования амплитуды и фазы электромагнитного вибровозбудителя, который дал возможность определить оптимальные параметры длительности и частоты импульса амплитуды тока, обеспечивающие устойчивый режим работы электромагнитного вибровозбудителя.

5. Разработана система реостатного регулирования для увеличения скорости колебания от 28 мм/с до 49 мм/с с применением обратной связи. В результате появилась возможность расширения диапазона регулируемой частоты колебаний электромагнитного вибровозбудителя.

6. Результаты теоретических и экспериментальных исследований доказали возможность устойчивой работы электромагнитного вибровозбудителя при низких частотах, что дало возможность разработать управляемое вибрационное устройство, которое внедрено в качестве уплотнителя грунта или бетонных изделий в ООО “No’kis temir beton buyimlari zavodi” с годовой экономической эффективностью 128,2 млн сумов.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.15/31.08.2022 T.73.07 ON THE
ADMISSION OF SCIENTIFIC DEGREES AT THE
TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY**

KARAKALPAK STATE UNIVERSITY

YESENBEKOV AZAMAT JOLDASBAYEVICH

**DEVELOPMENT OF CONTROLLED VIBRATION DEVICES BASED ON
THE THEORY OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS**

**05.05.02. Electrical Engineering. Power stations, systems. Electric power complexes and
installations**

**ABSTRACT OF THE DISSERTATION
DOCTOR OF PHILOSOPHY (PHD)**

Nukus - 2024

The theme of doctor of philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan in number № B2023.4.PhD/T4236

The dissertation has been prepared at Tashkent State Transport University.

The Abstract of dissertation is posted in Three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) is placed on the web page of Scientific Council (www.tdtu.uz) and Information and Educational Portal «ZiyoNet» (www.ziyo.net).

| | |
|-------------------------------|---|
| Scientific supervisor: | Ibadullaev Mukhtarkhan Doctor of Technical Sciences, Professor |
| Official opponents: | Kolesnikov Igor Konstantinovich Doctor of Technical Sciences, Professor Begmatov Shavkat Ernestovich Doctor of philosophy of technical Sciences, Professor |
| Leading organization: | Navoi State Mining and Technology University |

The defense will be take place on «___» _____ 2024 at _____ the meeting of the scientific council DSc.15/31.08.2022 T.03.07. Tashkent state transport university. (Address: 100167, Tashkent, str. Temiryo‘lchilar-1, tel.: (99871) 299-00-1; fax: (99871) 293-57-54; e-mail: rektorat@tstu.uz.)

The doctoral (PhD) dissertation can be reviewed at the Information-Resource Center of the Tashkent state transport university (Registered number _____). (Address: 100167, Tashkent, str. Temiryo‘lchilar-1, tel.: (99871) 299-00-1; fax: (99871) 293-57-54; e-mail: rektorat@tstu.uz.)

Abstract of the dissertation was distributed on «___» _____ 2024 year.
(mailing report №___ on «___» _____ 2024 year).

R.V. Raximov

Chairman of scientific council
on awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, professor

Ya. O. Ruzmetov

Scientific secretary of the scientific council
on awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, professor

R. M. Mirsaatov

Chairman of this scientific seminar under scientific
council on awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, professor

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The purpose of the research is to create controlled electromagnetic vibration exciters based on the theory of electromechanical systems.

The object of the study is electromagnetic vibration exciters used in vibration machines for industrial purposes.

The scientific novelty of the study is as follows:

Methods for calculating single- and double-circuit vibration exciters have been improved based on the equations of motion of electromechanical systems, taking into account the interaction of the vibrating surface and the receiver with speed feedback;

a design for manufacturing a vibration device was developed using a mathematical model, which made it possible to create two transformation zones due to the force of one cell and the other by changing the magnetic field;

a converter has been developed that provides the operating mode of vibration devices based on regulation of frequency, pulse duration and amplitude;

an electromagnetic vibrator control system has been developed for the formation of magnetic fluxes and variable electromagnetic force based on field-effect transistors.

Implementation of research results. Based on the results of the theory and practice of electromechanical systems with an electromagnetic vibration exciter:

the device of an electromechanical system with electromagnetic vibration exciters was implemented in OOO "Nukus Steel Concrete Products Plant" (Certificate "Uzbekistan Trade and Industry Administration of the Republic of Karakalpakstan" dated November 7, 2023 No. 01/10-16). As a result, the developed scientific research made it possible to obtain a high-quality high-power vibration device for compacting soil and concrete products. The developed electromagnetic vibration exciter is characterized by simplicity, ease of use, reliability and energy saving. The annual economic effect is 128.2 million soums;

the developed electromechanical system with electromagnetic vibration exciters was implemented in "Konlikól rice factory" branch of "Konirat flour factory". JSC for sifting wheat and rice (certificate of "Konirat flour factory" JSC dated December 26, 2023 No. 251). As a result, the technological process has been accelerated and the quality of sifting wheat and rice has improved. The annual economic effect of saving electrical energy is 46270 kWh.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and applications. The volume of the dissertation is 102 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Товбоев А.Н., Ибадуллаев М., Есенбеков А.Ж., Назаров А.И. Частотно – энергетические соотношения при анализе автопараметрических колебаний // Горный вестник Узбекистана. Навоий, 2017. - №2. 165-167 с. (05.00.00 №7)
2. Есенбеков А.Ж., Тилляходжаев М.М., Ибадуллаев М. Резонансный электромагнитный вибровозбудитель колебаний с обратной связью по величине фазы // Проблемы энерго-ресурсосбережения. Ташкент, 2018. - №1-2. 53-57 с. (05.00.00 №21).
3. Ибадуллаев М., Нуралиев А.К., Есенбеков А.Ж., Назаров А.И., Маткаримов С. Статические характеристики электромеханических систем с электромагнитными вибровозбудителями // Проблемы энерго-ресурсосбережения. Ташкент, 2019. - №3-4. 345-350 с. (05.00.00 №21).
4. Есенбеков А.Ж. Ибадуллаев М. Исследование переходных процессов с помощью ЭМВ в управляемых вибровозбудителях // Вестник Каракалпакского отделения Академии наук Республики Узбекистан. Нукус, 2019. - №3. 5-8 с. (05.00.00 №19).
5. Ибадуллаев М., Нуралиев А.К., Есенбеков А.Ж., Назаров А.Н. Резонансный электромагнитный вибровозбудитель колебаний с обратной связью // Вестник МЭИ. Москва, 2020. - №1. 62-65 с. (05.00.00 №17).
6. Нуралиев А.К., Ибадуллаев М., Есенбеков А.Ж., Назаров А.Н. Автоколебательные процессы в системе двух электромагнитов соединенных по дифференциальной схеме // Вестник МЭИ. Москва, 2021. - №1. 71-75 с. (05.00.00 №17).
7. Ибадуллаев М., Товбоев А.Н., Есенбеков А.Ж. К общей теории анализа субгармонических колебаний в трехфазных феррорезонансных цепях и системах // Электричество. Россия, 2021. - №12. 35-45 с. (05.00.00 №94).
8. Ибадуллаев М., Нуралиев А.К., Есенбеков А.Ж. Разработка математической модели электромеханических систем // Проблемы энерго-ресурсосбережения. Ташкент, 2021. - №3. 103-118 с. (05.00.00 №21).
9. Нуралиев А.К., Есенбеков А.Ж., Ибадуллаев М. Математическая модель электромагнитного вибратора с источником питания на основе инвертора // Вестник МЭИ. Москва, 2022. - №1. 94-97 с. (05.00.00 №17).
10. Нуралиев А.К., Есенбеков А.Ж., Шеина Н.Е., Нуралиева М.А. Особенности применения электромагнитных вибраторов вибрационных технологиях производства // Проблемы энерго-ресурсосбережения. Ташкент, 2022. - №83. 137-140 с. (05.00.00 №21).

II бўлим (часть II; part II)

11. Реймов К.М., Есенбеков А.Ж., Юлдошов Т.М. Программа «E_VIB» для оптимизации параметров колебательных электромеханических систем с электро-магнитными вибровозбудителями // Агентство по

интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство DGU №07812 29.02.2020.

12. Есенбеков А.Ж., Ибадуллаев М. Элетромеханик титрагич учун дифференциал тенгламани ечиш дастури // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство DGU №13155 22.11.2021.

13. Есенбеков А.Ж Elektromagnit o'zgartkichli tebranish moslamasining yakor holati bo'yicha magnit maydonini hisoblash dasturi. // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство DGU №13156 22.11.2021.

14. Есенбеков А.Ж., Абубакиров А.Б., Назаров А.И., Ибадуллаев М. Исследование колебательных электромеханических систем с электромагнитными вибро возбудителями // Международный научный журнал «EuropeanAppliedSciences». Стуттгарт, Германия. 2017. - №3. 112-115 с.

15. Ibadullaev M., Tovbaev A.N., Esenbekov A.J. Self-oscillations at the frequency of subharmonics in nonlinear electric chains and systems // E3S Web of Conferences 139, 01054 (2019) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901054>.

16. Nuraliev A. K., Amirov T., Esenbekov A. J. On the energy efficiency of electromechanical systems with an electromagnetic vibration exciter // E3S Web of Conferences 216, 01108 (2020) <http://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601108>.

17. Ibadullaev M., Nuraliev A., Esenbekov A. Research of an electromagnetic vibrator with a non-linear power supply // MIP: Engineering-2020 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.862 (2020) 062031 <http://doi.10.1088/1757-899X/862/6/062031>.

18. Ибадуллаев М., Нуралиев А.К., Есенбеков А.Ж. Электромагнитное виброрито, применяемое в интенсивных вибротехнологиях // “Физика фанининг техника сохосидаги тутган урни” мавзусидаги Республика илмий-амалий конференция Нукус шаҳри 28 май 2021 йил. 153-156 с.

19. Нуралиев А.К., Есенбеков А.Ж., Амиров Т.А. Анализ степени намагничивания сердечника электромагнита с учетом положения якоря // Инновации в нефтегазовой отрасли . Ташкент, 2022. - №1. 69-73 с.

20. Нуралиев А.К., Есенбеков А.Ж., Есемуратова Ш. М., Толыбаев Б.А. Электромагнитное виброрито с регулированием частоты механических колебаний // “Инновацион техника технологияларнинг қишлоқ хўжалиги-озик-овқат тармагидаги муаммо ва истиқболлари” мавзусидаги II-Халқаро илмий ва илмий-техникавий анжумани. Тошкент шаҳри 22-23 апрель 2022 йил. 464-465 с.

21. Ibadullaev M., Nuraliev A., Esenbekov A. Resonance Electromagnetic Exciter with Nonlinear Power Supply // Cite as: AIP Conference Proceedings **2552**, 050036 (2023); <https://doi.org/10.1063/5.0133070> Published Online: 05 January 2023

Автореферат «Транспорт хабарномаси» илмий-амалий журнали
тахририятида таҳрирдан ўтказилди ва матнларни мослиги текширилди

Қоғоз бичими 84×60-1/16. Ризограф босма усули. Times гарнитураси

Шартли босма табағи: 4 б.т. Адади: 100 нусха.

Буюртма №

Нашрга рухсат этилди:

й.

Тошкент давлат транспорт университети босмахонасида чоп этилган.
Босмахона манзили: 100167, Тошкент шаҳар, Темирийўлчилар кўчаси, 1-уй.