

**ՀՀ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ, ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ
ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ**

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ՄԵԼՔՈՆՅԱՆ ՏԱԹԵՎԻԿ ՈԱԶՄԻԿԻ

**ՄԱԳՆԻՍԱՌԵՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ՀԵՂՈՒԿՈՎ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ
ՍԱՐՔԵՐԻ ՆԱԽԱԳԾՄԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ
ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

Ե.13.02 - «Ավտոմատացման համակարգեր» մասնագիտությամբ
տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի
հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան 2025

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում (ՀԱՊՀ)

Գիտական ղեկավար

տ.գ.դ. Արեգ Գրիգորյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ

տ.գ.դ. Աշոտ Հարությունյան,
Ֆ.-մ.գ.թ. Վլադիմիր Սահակյան

Առաջատար կազմակերպություն

«Սինոփսիս-Արմենիա» ՓԲԸ

Պաշտպանությունը կայանալու է 2025թ. դեկտեմբերի 23-ին ժամը 14⁰⁰ - ին ՀԱՊՀ 17213 լսարանում (հասցե՝ Երևան, Տերյան 105, 17-րդ մասնաշենք), 032 - «Կառավարում և ավտոմատացում» մասնագիտական խորհրդի նիստում:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2025թ. նոյեմբերի 21-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար,
տ. գ. թ.



Անուշ Մելիքյան

ՆԵՐԱԾՈՒԹՅՈՒՆ

Աշխատանքի արդիականությունը: Մագնիսառեղուղիական (ՄՌ) հեղուկը կազմված է յուղից (տրանսֆորմատորային կամ սինթետիկ) և այդ յուղի մեջ լցված՝ «կախված» վիճակում գտնվող մագնիսական նյութի մասնիկներից: Արտաքին մագնիսական դաշտի առկայության դեպքում այդ մասնիկներն էլեկտրամագնիսական ուժի ազդեցությամբ ձգվում-միանում են և կազմում բազմաթիվ շղթաներ, իսկ դրանք էլ միավորվելով կազմում են կամրջակ: ՄՌ հեղուկները կիրառվում են էներգետիկայում, արդյունաբերությունում, ավտոմոբիլային տեխնիկայում, բժշկության և այլ ոլորտներում, հնարավորություն տալով ստեղծել մի շարք արդիական էլեկտրամագնիսական սարքեր, որոնց բնույթագրերը ձևավորվում են դրանց նախագծման փուլում: Ավտոմատացումը նպաստում է նախագծման գործընթացի արագ և արդյունավետ կատարմանը:

Էլեկտրամագնիսական համակարգերի, ընդհանրապես, և ՄՌ հեղուկով համակարգերի, մասնավորապես, նախագծման ավտոմատացման համակարգի ստեղծման խնդիրն արդիական է և ունի կարևոր գիտատեխնիկական նշանակություն:

Աշխատանքի նպատակը և հիմնական խնդիրները: Աշխատանքի նպատակը ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական սարքերի նախագծման ավտոմատացման համակարգի մշակումն է: Այս նպատակն իրագործելու համար դիտարկվել և լուծվել են հետևյալ խնդիրները.

1. ՄՌ հեղուկի և դրա կիրառմամբ էլեկտրամագնիսական սարքերի ու նախագծման միջավայր-գործիքների (COMSOL Multiphysics, FEMM, ANSYS, MATLAB և այլն) առանձնահատկությունների ուսումնասիրություն, հետազոտության օբյեկտի և առարկայի ընտրություն:
2. ՄՌ հեղուկով սարքերի էլեկտրամագնիսական համակարգերի մոդելավորում վերջավոր տարրերի թվային մեթոդով, մագնիսական շղթաների փոխարինման սխեմաների կազմում, մաթեմատիկական մոդելների մշակում և վերլուծություն:
3. ՄՌ հեղուկով սարքերի էլեկտրամագնիսական համակարգերի մագնիսական շղթաների ուղիղ և հակադարձ խնդիրների լուծում, մագնիսական մասնիկների կամրջակի ճակատային մակերևույթին գործող էլեկտրամագնիսական ուժի և այդ ճակատի տեղաշարժի արագության որոշում:
4. ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական սարքերում օգտագործվող նյութերի՝ նախագծման ավտոմատացման համակարգի գործարկման համար անհրաժեշտ գրադարանների ստեղծում:
5. ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական սարքերի օպտիմալացման խնդիրների ձևակերպում և լուծում, նախագծման ավտոմատացման համակարգի ստեղծում և գործարկում:

Հետազոտության մեթոդները: ՄՌ- հեղուկով էլեկտրամագնիսական սարքերի մագնիսական դաշտերի հետազոտության համար կիրառվել են վերջավոր տարրերի թվային մեթոդը և FEMM ծրագրային միջավայրը: Էլեկտրամագնիսի մագնիսական շղթայի փոխարինման սխեման կազմելու, համակարգի մաթեմատիկական մոդելը մշակելու համար կիրառվել են մագնիսական շղթաների հաշվարկի ու նախագծման մեթոդները: Էլեկտրամագնիսական համակարգի մաթեմատիկական մոդելի ոչ գծային հավասարումների համակարգերը լուծվել են Նյուտոնի եղանակով, իսկ էլեկտրամագնիսական համակարգն օպտիմալացվել է էվրիստիկ և էվոլյուցիոն մեթոդներով: Նախագծման ավտոմատացման համակարգը ստեղծվել է MatLab ծրագրային միջավայրում, իսկ գրաֆիկական ինտերֆեյսը՝ App Designer գործիքի և UI Components ֆունկցիայի միջոցով:

Աշխատանքի գիտական նորույթը.

1. ՄՌ- հեղուկով սարքերի մագնիսական դաշտի մոդելավորումը թվային մեթոդով, մոդելավորման արդյունքների վերլուծությունը,
2. ՄՌ- հեղուկով սարքերի էլեկտրամագնիսական համակարգերի խորանարդային, գնդային և հիբրիդ մաթեմատիկական մոդելները,
3. ՄՌ- հեղուկով սարքերի էլեկտրամագնիսական համակարգերի մագնիսական շղթաների ուղիղ և հակադարձ խնդիրների լուծումները,
4. ՄՌ- հեղուկի մագնիսական մասնիկներով կազմված կամրջակի ճակատային մակերևույթին գործող էլեկտրամագնիսական ուժի և այդ ճակատի տեղաշարժի արագության որոշումը,
5. ՄՌ- հեղուկով էլեկտրամագնիսական սարքերի օպտիմալացման խնդիրների ձևակերպումն ու լուծումը,
6. ՄՌ- հեղուկով էլեկտրամագնիսական սարքերի նախագծման ավտոմատացման համակարգը:

Աշխատանքի կիրառական նշանակությունը: ՄՌ- հեղուկով էլեկտրամագնիսական սարքերի նախագծման, վերլուծության, օպտիմալացման գործընթացներում ավտոմատացումն ունի կարևոր կիրառական նշանակություն: Այս սարքերի նախագծման ավտոմատացման համակարգը կնպաստի պահանջվող բնութագրերով արդիական սարքերի ստեղծմանը:

Ատենախոսության արդյունքները կիրառվել են Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի (ՀԱՊՀ) ակադեմիկոս Հարություն Թերզյանի անվան «Ավտոմատացում և էլեկտրամագնիսական համակարգեր» բազային գիտահետազոտական լաբորատորիայում՝ մեքենայական ուսուցման մեթոդներով էլեկտրամագնիսների նախագծման եղանակների մշակման գործընթացում:

Աշխատանքի արդյունքների հրապարակում: Հետազոտությունների արդյունքները հրատարակվել են 14 տպագիր աշխատություններում, այդ թվում՝ երեք հոդվածներ Scopus գիտատեղեկատվական շտեմարանի հանդեսներում: Արդյունքները ներկայացվել են ՀԱՊՀ 2019-2024թթ. տարեկան գիտաժողովներում, միջազգային գիտաժողովներում (XI International conference Stochastic and Analytic Methods in Mathematical Physics, Third international conference mathematics in

Armenian advances and perspectives), ինչպես նաև «Ավտոմատացում և էլեկտրամագնիսական համակարգեր» բազային գիտահետազոտական լաբորատորիայի գիտական սեմինարներում:

Ատենախոսության պաշտպանությանը ներկայացվող դրույթներն ու հետազոտությունների արդյունքները.

1. ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական սարքերի մագնիսական դաշտի մոդելավորումը թվային եղանակով,
2. ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական սարքերի մաթեմատիկական մոդելները,
3. ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական կախոցի և արգելակի մագնիսական շղթայի ուղիղ և հակադարձ խնդիրների առաջադրումն ու լուծումը,
4. ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական սարքերի օպտիմալացման խնդրի ձևակերպումը և լուծումը,
5. ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական սարքերի նախագծման ավտոմատացման համակարգը:

Ատենախոսության կառուցվածքը և բովանդակությունը: Աշխատանքը կազմված է 4 գլուխներից, ներառությունից, եզրահանգումից ու գրականության ցանկից: Այն շարադրված է 114 էջում, պարունակում է 64 նկար, 9 աղյուսակ:

Ատենախոսության առաջին գլխում ուսումնասիրվել և վերլուծվել են ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական սարքերը, դրանց առանձնահատկությունները, նախագծման ավտոմատացման միջավայր-գործիքները: Ընտրվել են հետազոտության օբյեկտը և առարկան, վերլուծվել դրանց առանձնահատկությունները:

Ատենախոսության երկրորդ գլխում ներկայացված են վերջավոր տարրերի թվային մեթոդով ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական սարքերի մագնիսական դաշտերի հետազոտության արդյունքները:

Աշխատանքի երրորդ գլուխը նվիրված է ՄՌ հեղուկով սարքերի էլեկտրամագնիսական համակարգերի մաթեմատիկական մոդելների մշակման, մագնիսական շղթաների ուղիղ և հակադարձ խնդիրների լուծման հարցերին:

Ատենախոսության չորրորդ գլխում անդրադարձ է կատարվել ՄՌ հեղուկով սարքերի նախագծման ավտոմատացման համակարգի ստեղծմանը. նկարագրվել են համակարգի բաղկացուցիչ կառուցվածքային մասերը, օգտագործվող նյութերի գրադարանները, լուծված խնդիրների ալգորիթմները, օգտագործողին հասանելի գրաֆիկական ինտերֆեյսն ու դրա աշխատանքի սկզբունքը, առաջադրվել է ՄՌ հեղուկով համակարգի օպտիմալացման խնդիրը՝ ընտրվել են օպտիմալացման նպատակային ֆունկցիաները և պարամետրերի փոփոխությունների միջակայքերը, իրագործվել են օպտիմալացման էվրիստիկ և էվոլյուցիոն մեթոդները, ներկայացվել և վերլուծվել են ստացված արդյունքները:

1. ՄԱԳՆԻՍԱՌԵՈՒՆԴԻԱԿԱՆ ՀԵՂՈՒԿՈՎ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՍԱՐՔԵՐԸ

ՄՌ հեղուկը կոլիդային լուծույթ է, որը ստանում են ջրում, օրգանական հեղուկում կամ այլ հեղուկ միջավայրում գերմիկրոսկոպային չափերի մագնիսական

մասնիկների դիսպերսման ճանապարհով (մագնիսական մասնիկները խառնվում են հեղուկում՝ միմյանցից անկախ վիճակում, առանց խոշոր կոտակումների ձևավորման): Այս հեղուկներում կոլոիդային մասնիկների չափերը կարող են լինել 1նմ-20մկմ:

Մագնիսական դաշտի ազդեցությամբ մագնիսական մասնիկները ձգվում և, ի վերջո, հավում են: Որպեսզի արտաքին մագնիսական դաշտը վերացնելուց հետո մնացորդային ինդուկցիայի հաշվին այդ մասնիկները չմնան իրար կապած վիճակում, մասնիկների մակերևույթը պատում են ոչ մագնիսական նյութով:

ՄՌ հեղուկի վերը քննարկված առանձնահատկությունների շնորհիվ դրանց կիրառմամբ էլեկտրամագնիսական սարքերը լայնորեն օգտագործվում են արտադրության տարբեր ոլորտներում՝ մեքենաշինություն, ավտոմոբիլաշինություն, ոռոգտաշինություն, բժշկական սարքաշինություն, նավաշինություն, օդագնացություն, բժշկություն: ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական սարքերից են՝ կցորդիչները (clutch), խտարարները (seals), թրթռամեղմիչները (damping shock absorber), փականները (valves), արգելակները (brakes), սեյսմիկ տատանումների մարիչները (seismic vibration dampers), զրահաբաճկոնները (body armor), լապարոսկոպիկ վիրաբուժության համար հաղորդակները (actuators for laparoscopic surgery):

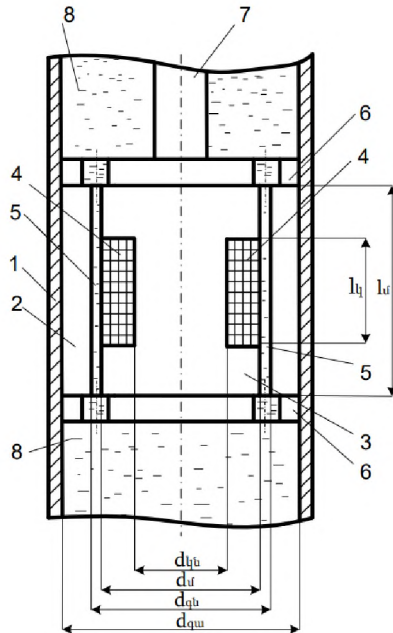
ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական սարքերի մոդելավորման և օպտիմալացման նպատակով կիրառվում են բազմաթիվ եղանակներ՝ վերջավոր տարրերի մեթոդը, դինամիկ, պարամետրական, վիճակագրական, ոչ հստակ մոդելավորման և այլ եղանակները: Վերջին տարիներին նշված խնդիրները լուծելու համար կիրառվում են նաև նեյրոնային ցանցերը, մեքենայական ուսուցման մեթոդները:

ՄՌ հեղուկներով սարքերի նախագծումը ներառում է բազմաթիվ ֆիզիկական երևույթներ, ներառյալ էլեկտրամագնիսական, ջերմային, մեխանիկական երևույթները: Նախագծող ինժեներներն այս բարդ համակարգերը մոդելավորելու, օպտիմալացնելու և կառավարելու համար օգտագործում են մասնագիտացված ծրագրային միջավայր-գործիքներ, որոնցից են COMSOL Multiphysics-ը, FEMM-ը, ANSYS-ը, MATLAB-ը: Միաժամանակ արդիական են ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական սարքերի նախագծման ավտոմատացման մասնագիտացված և ճկուն համակարգերի ստեղծման ուղղությամբ կատարվող աշխատանքները:

Կատարված վերլուծությունների հիման վրա, նկատի ունենալով ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական սարքերի առանձնահատկությունները (մագնիսական դաշտով կառավարվող հեղուկ, արագ արձագանք մագնիսական դաշտի փոփոխություններին, կիրառության լայն ոլորտ՝ կախոցներ, կցորդիչներ, արգելակներ, բժշկական սարքեր, էկզոկմախքներ և այլն), հետագա հետազոտությունների համար որպես օբյեկտ ընտրվել են ՄՌ հեղուկով սարքերի, մասնավորապես, կախոցի (թրթռամեղմիչի) և արգելակի էլեկտրամագնիսական համակարգերը, իսկ որպես հետազոտության առարկա՝ այդ համակարգերի

մաթեմատիկական մոդելավորումը, օպտիմալացումը, նախագծման ավտոմատացումը:

Նկ.1-ում ներկայացված է ՄՌ հեղուկով կախոցի էլեկտրամագնիսական համակարգը, իսկ նկ.2-ում՝ ՄՌ արգելակի էլեկտրամագնիսական համակարգը:

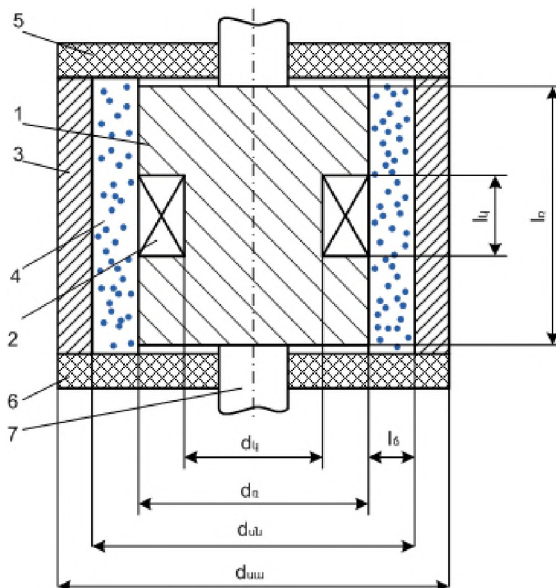


Նկ. 1 Մագնիսառելիքիական հեղուկով կախոցի էլեկտրամագնիսական համակարգը

1-կախոցի պատյան, 2-մխոցի արտաքին գլան, 3-մխոցի ներքին գլանաձև միջուկ, 4-կառավարման կոճ, 5-ներմխոցային ճեղք ՄՌ հեղուկով, 6-ամրակապող տափօղակ, 7-մխոցի ձող (հրիչ), 8-յուղ (ՄՌ հեղուկ), l_{κ} - մխոցի երկարություն, l_{μ} - կառավարման կոճի երկարություն, d_{κ} - կոճի ներքին տրամագիծ, d_{μ} - մխոցի ներքին գլանաձև միջուկի տրամագիծ, $d_{\text{գն}}$ - մխոցի արտաքին գլանի ներքին տրամագիծ, $d_{\text{գա}}$ - մխոցի արտաքին գլանի արտաքին տրամագիծ

Ընդհանուր առմամբ, հետազոտության օբյեկտ էլեկտրամագնիսական համակարգերի ուսումնասիրությունների ընթացքում, մագնիսական դաշտի թվային մոդելավորման և շղթայական մեթոդների կիրառմամբ, բացահայտվում են Փ մագնիսական հոսքի, B մագնիսական ինդուկցիայի, կառավարման կոճի $F = i\omega$ մագնիսաշարժ ուժի (ՄՀՈւ, i - կառավարման կոճի հոսանք, ω -կոճի փաթույթի գալարների քանակ), ՄՌ հեղուկի մագնիսական մասնիկների կամրջակի ճակատին

գործող R_t էլեկտրամագնիսական ուժի և այդ ճակատի շարժման v արագության մաթեմատիկական առնչությունները:



Նկ. 2 Մագնիսառելյոգիական հեղուկով արգելակի էլեկտրամագնիսական համակարգը

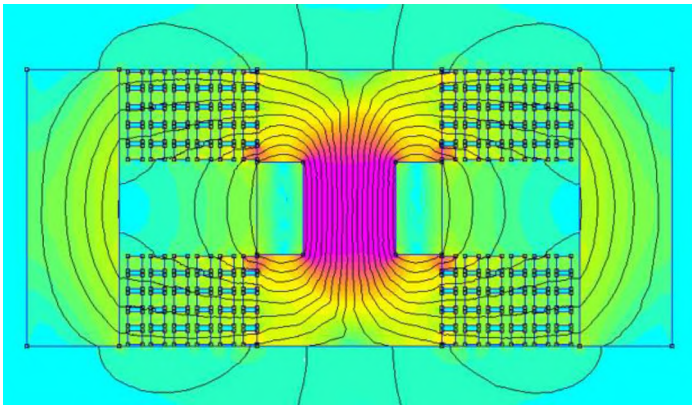
1-Ֆերոմագնիսական ռոտոր, 2-կառավարման կոճ, 3-Ֆերոմագնիսական ստատոր, 4-ՄՌ հեղուկ, 5,6-ոչ մագնիսական կափարիչ, 7-լիսեռ, l_n - ռոտորի երկարություն, l_k - կառավարման կոճի երկարություն, l_s - ՄՌ հեղուկով ճեղքի երկարություն, d_k - կառավարման կոճի ներքին տրամագիծ, d_n -ռոտորի տրամագիծ, d_{ss} - ստատորի ներքին տրամագիծ, d_{ss} - ստատորի արտաքին տրամագիծ

2. ՄԱԳՆԻՍԱՌԵԼՈՂԳԻԱԿԱՆ ՀԵՂՈՒԿՈՎ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՍԱՐՔԵՐԻ ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԴԱՇՏԻ ՀԵՏԱՋՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ՎԵՐՋԱՎՈՐ ՏԱՐԵՐԻ ԹՎԱՅԻՆ ՄԵԹՈՂՈՎ

Վերջավոր տարրերի թվային մեթոդը (ՎՏՄ) օգտագործվում է տարաբնույթ ոլորտներում: Մասնավորապես այն հաջողությամբ կիրառվում է մագնիսական դաշտերի հետազոտության համար, երբ անհրաժեշտ է լուծել բարդ երկրաչափական ձևերով և անհամասեռ միջավայրերով խնդիրները: Այս հանգամանքը պայմանավորված է մեթոդի համակարգվածությամբ ու ճշգրտությամբ:

Սույն հետազոտությունների շրջանակներում անդրադարձ է կատարվել ՎՏՄ-ի խնդիրներին: Առաջարկվել են անընդհատ երկչափ ֆունկցիայի ոչ կանոնավոր ցանցով կտոր-գծային մոտարկման և ցանցի ավտոմատացված կառուցման ալգորիթմները, ներկայացվել է մագնիսական հատիկներով ենթատիրույթներ պարունակող մագնիսական դաշտը ՎՏՄ-ով մոդելավորման ավտոմատացված համակարգը:

ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական սարքերի մագնիսական դաշտերի հետազոտությունները ՎՏՄ-ով կատարվել են FEMM ծրագրային միջավայրի կիրառմամբ. մոդելավորվել և ուսումնասիրվել է հետևյալ չափերով ՄՌ հեղուկով արգելակի (նկ.2) մագնիսական դաշտը. $\ell_n = 60$ մմ, $\ell_k = 20$ մմ, $d_{\text{սա}} = 140$ մմ, $d_{\text{սն}} = 100$ մմ, $d_n = 40$ մմ, կառավարման կոճի ներքին տրամագիծը՝ $d_k = 20$ մմ: Հետազոտության արդյունքում ստացվել է դաշտի նկարները (նկ.3), վերլուծվել է մագնիսական հոսքի բաշխումը համակարգում, չափվել և հաշվարկվել են ինչպես դաշտը բնութագրող ֆիզիկական մեծությունները, այնպես էլ ֆերոմագնիսական հատիկների վրա գործող էլեկտրամագնիսական ուժը և հատիկի շարժման արագությունը, կառուցվել և վերլուծվել են բնութագրական մեծությունների գրաֆիկական կախվածությունները:



Նկ.3 Թվային մոդելավորումով ստացված մագնիսական դաշտի նկարը

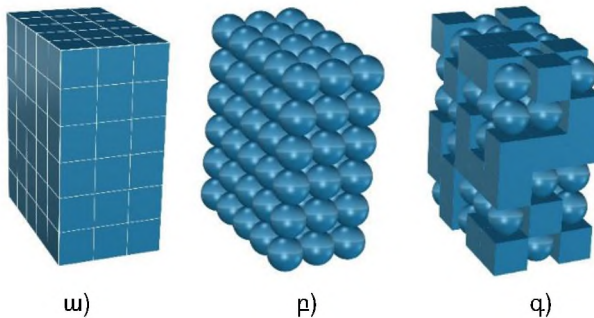
3. ՄԱԳՆԻՍԱՌԵՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ՀԵՂՈՒԿՈՎ ՍԱՐՔԵՐԻ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ, ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՇՐԹԱՅԻ ՈՒՂԻՂ ԵՎ ՀԱԿԱԴԱՐՁ ԽՆԴԻՐՆԵՐԻ ԱԿՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ԼՈՒԾՈՒՄԸ

ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական համակարգերի նախագծումը բազմափուլ գործընթաց է: Առաջին փուլում կատարվում է նախագծային հաշվարկը, որտեղ որոշվում են համակարգի չափերը, ընտրվում պողպատե տեղամասերի նյութը և ՄՌ

հեղուկի տեսակը: Այս փուլում լուծվում է մագնիսական շղթայի ուղիղ խնդիրը, երբ տրված է մագնիսական հոսքը, և անհրաժեշտ է որոշել մագնիսաշարժ ուժը: Հաջորդ փուլում՝ ստուգողական հաշվարկում, լուծվում է մագնիսական շղթայի հակադարձ խնդիրը, երբ տրված է մագնիսաշարժ ուժը, և անհրաժեշտ է որոշել մագնիսական հոսքը: Հաջորդ փուլում նախագծվում է կառավարման կոճը, իսկ վերջում կատարվում է համակարգի օպտիմալացումը:

Ինչպես ցանկացած էլեկտրամագնիսական համակարգի, այնպես էլ ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական կախոցների և արգելակների ուսումնասիրության, հաշվարկի և նախագծման, այդ թվում՝ ավտոմատացված հաշվարկի ու նախագծման մեթոդների մշակման համար կարևոր նշանակություն ունեն մաթեմատիկական մոդելները, որոնք մշակելու համար աշխատանքում կազմվել է մագնիսական շղթայի փոխարինման սխեման, հիմք ընդունելով FEMM միջավայրում կատարված հետազոտությունների արդյունքները:

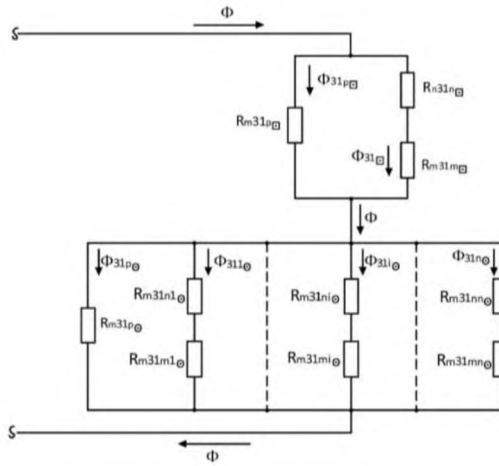
Ատենախոսական աշխատանքում մշակվել են երեք մաթեմատիկական մոդելներ: Առաջին մոդելում ՄՌ հեղուկի մագնիսական մասնիկները ներկայացվել են խորանարդների ձևով (նկ.4 ա), երկրորդում՝ գնդերի ձևով (նկ.4 բ), իսկ երրորդում՝ հիբրիդ մոդելում, մագնիսական մասնիկներն ունեն ինչպես խորանարդի, այնպես էլ գնդի ձևեր (նկ.4 գ):



Նկ.4 խորանարդներով (ա), գնդերով (բ) և խորանարդների ու գնդերի համադրությամբ (գ) կազմված կամրջակները

Բոլոր երեք մոդելների համար ստացվել են մագնիսական շղթան բնութագրող մեծությունների մաթեմատիկական արտահայտությունները, կազմվել և լուծվել են մոդելները նկարագրող հավասարումներն ու հավասարումների համակարգերը:

Նկ.5-ում, որպես օրինակ, պատկերված է հիբրիդ մոդելի մագնիսական շղթայի հատվածներից մեկը:



Նկ.5 Մագնիսական շղթայի հատվածներից մեկը հիբրիդ մոդելի համար

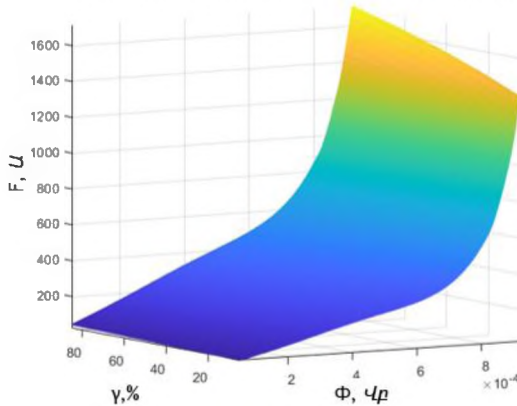
Հիբրիդ մոդելի համար մագնիսական շղթայի փոխարինման սխեման նկարագրող ոչ գծային հավասարումների համակարգը, որը լուծվել է Նյուտոնի մեթոդով, ունի այս տեսքը.

$$\left\{ \begin{array}{l} F = f\left(\frac{\Phi}{S_1}\right)l_1 + 2f\left(\frac{\Phi}{S_2}\right)l_2 + 2\Phi_{31p}\square R_{m31p}\square + 2\Phi_{31p}\circ R_{m31p}\circ + 2\Phi R_{m32} + f\left(\frac{\Phi}{S_4}\right)l_4, \\ \Phi_{31p}\circ + \Phi_{311}\circ + \dots + \Phi_{31i}\circ + \dots + \Phi_{31n}\circ = \Phi, \\ \Phi_{31p}\circ R_{m31p}\circ - \Phi_{311}\circ R_{m31n1}\circ - f\left(\frac{\Phi_{311}\circ}{S_{31q1}\circ}\right)l_{31m1}\circ = 0, \\ \vdots \\ \Phi_{31p}\circ R_{m31p}\circ - \Phi_{31i}\circ R_{m31ni}\circ - f\left(\frac{\Phi_{31i}\circ}{S_{31qi}\circ}\right)l_{31mi}\circ = 0, \\ \vdots \\ \Phi_{31p}\circ R_{m31p}\circ - \Phi_{31n}\circ R_{m31nn}\circ - f\left(\frac{\Phi_{31n}\circ}{S_{31qn}\circ}\right)l_{31mn}\circ = 0, \\ \left\{ \begin{array}{l} \Phi_{31p}\square + \Phi_{31}\square = \Phi, \\ \Phi_{31p}\square R_{m31p}\square - \Phi_{31}\square R_{m31n1}\square - f\left(\frac{\Phi_{31}\square}{S_{31q}\square}\right)l_{31m}\square = 0: \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (1)$$

(1) հավասարման լուծումը, երբ դիտարկվում է մագնիսական շղթայի ուղիղ խնդիրը, հանգում է F -ի և մագնիսական շղթայի մյուս կարևոր պարամետրերի արժեքների որոշմանը, երբ հայտնի է Φ -ի արժեքը: Մագնիսական շղթայի հակադարձ խնդրի լուծման պարագայում առաջադրված F -ի համար որոշվում է Φ -ն: F -ի և Φ -ի արժեքներով հաշվարկվում են էլեկտրամագնիսական համակարգի

այնպիսի կարևոր բնութագրական մեծությունների արժեքները, ինչպիսիք են ՄՌ հեղուկի մագնիսական մասնիկների կամրջակի ճակատին ազդող P_t էլեկտրամագնիսական ուժը և այդ ճակատի շարժման v արագությունը:

Մաթեմատիկական մոդելների համապատասխանությունը ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական համակարգում առկա ֆիզիկական երևույթներին, ինչպես նաև այդ համակարգի բնութագրական պարամետրերի վարքը գնահատելու նպատակով կատարվել է մոդելների պարամետրական վերլուծություն: Նկ.6-ում պատկերված է ստացված կախվածություններից մեկի գրաֆիկը:



Նկ.6 $F=f(\Phi, \gamma)$ կախվածության գրաֆիկը (γ -ն կամրջակում գնդերի տոկոսային պարունակությունն է)

Կատարված ուսումնասիրությունների և վերլուծությունների արդյունքների համադրմամբ արվել է եզրակացություն այն մասին, որ մաթեմատիկական մոդելներն աղեկվատ են՝ համապատասխանում են էլեկտրամագնիսական համակարգում առկա ֆիզիկական երևույթներին:

Հետագուովոլ էլեկտրամագնիսական համակարգերի մաթեմատիկական մոդելների, մասնավորապես հիբրիդ մոդելի, կազմման համար կիրառված մեթոդներն ու սկզբունքները կարելի է հաջողությամբ կիրառել նաև ՄՌ հեղուկով այլ սարքերի էլեկտրամագնիսական համակարգերի համար:

4. ՄԱԳՆԻՍԱՌԵՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ՀԵՂՈՒԿՈՎ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՍԱՐՔԵՐԻ ՆԱԽԱԳԾՄԱՆ ԱԿՏՈՄԱՏԱՑՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

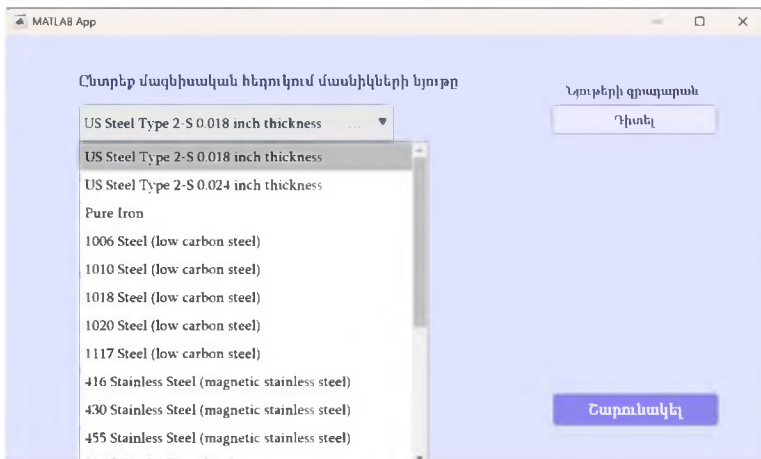
Աշխատանքում մշակված նախագծման ավտոմատացման համակարգը հնարավորություն է տալիս ավտոմատացնել ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական համակարգի նախագծման գործընթացը՝ մուտքային պարամետրերի արժեքների առաջադրումից մինչև նյութերի ընտրությունը, բնութագրական մեծությունների

արժեքների որոշումը: Ավտոմատացման համակարգում լուծվում են էլեկտրամագնիսական համակարգի նախագծման ուղիղ և հակադարձ խնդիրները, հաշվարկվում են կառավարման կոճի պարամետրերը, հետազոտվում է մագնիսական դաշտը FEMM միջավայրի կիրառմամբ, օպտիմալացվում են բնութագրական մեծությունների արժեքները:

Նախագծման ավտոմատացման համակարգն իրականացվել է MATLAB ծրագրային միջավայրում և բաղկացած է հետևյալ երեք հիմնական ֆունկցիոնալ շերտերից.

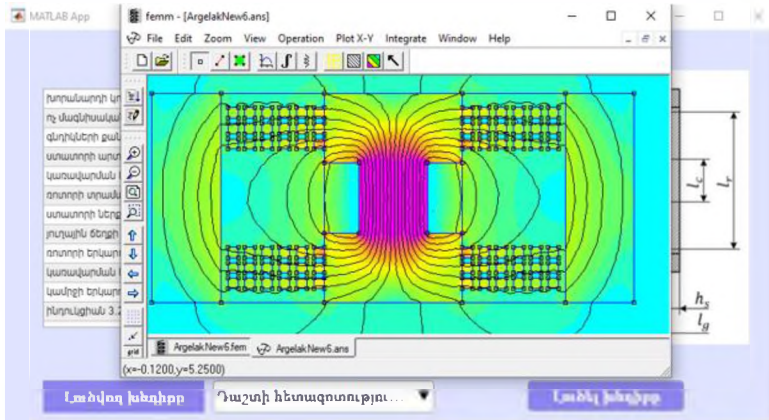
- գրաֆիկական ինտերֆեյս. նախագծման ելակետային տվյալների մուտքագրում և արդյունքների արտածում,
- օգտագործվող նյութերի գրադարաններ,
- միջուկ. պատասխանատու է բոլոր տիպի խնդիրների լուծման համար:

Գրաֆիկական շերտը նախագծողի և ավտոմատացված համակարգի երկխոսությանը հարմարեցված միջերես է, որն իրականացվել է App Designer գործիքի և UI Components ֆունկցիայի միջոցով: Համակարգի մեկնարկի պահից բացվում է հիմնական պատուհանը, որը «Սկսել նախագծումը» կոճակի սեղմումով նախագծողին հնարավորություն է տալիս մեկնարկել նախագծման գործընթացը: Այնուհետև նախագծողն ընտրում է էլեկտրամագնիսի տեսակը: «Շարունակել» կոճակը սեղմելուց հետո բացված պատուհանից ընտրվում են օգտագործվող նյութերի տեսակները (նկ.7): Այնուհետև, «Շարունակել» կոճակը սեղմելուց հետո, բացվում է մուտքային տվյալների պատուհանը (նկ.8) լուծվող խնդրի (նախագծման ուղիղ խնդիր, նախագծման հակադարձ խնդիր, կառավարման կոճի նախագծային հաշվարկ, մագնիսական դաշտի հետազոտություն FEMM միջավայրի կիրառմամբ, էլեկտրամագնիսի բնութագրական մեծությունների օպտիմալացում) տեսակն ընտրելու հնարավորությամբ:



Նկ. 7 Նյութի տեսակի ընտրության պատուհանը

մոդելավորվում և հետազոտվում է վերջավոր տարրերի թվային մեթոդով՝ FEMM միջավայր-գործիքով, որը ներդրվել է Նախագծման ավտոմատացման համակարգում: Այս դեպքում ստացվում է մագնիսական դաշտի նկարը (նկ.10), համակարգի տարբեր տեղամասերում չափվում են մագնիսական ինդուկցիայի արժեքները, հաշվարկվում ՄՌ հեղուկի մագնիսական մասնիկների վրա գործող էլեկտրամագնիսական ուժերը և այդ մասնիկների շարժման արագությունները:



Նկ. 10 Նախագծման համակարգում թվային մոդելավորումով ստացված մագնիսական դաշտի նկարը

Նախագծման ավտոմատացման համակարգը, ինչպես վերը նշվել է, հնարավորություն է տալիս նաև որոշել հետազոտվող սարքերի պարամետրերի օպտիմալ արժեքները, ինչն էապես բարձրացնում է Նախագծման արդյունավետությունն ու ճշգրտությունը: Օգտատերը կարող է ընտրել օպտիմալացման նպատակային ֆունկցիան: Համակարգը առաջարկում է նաև ընտրել օպտիմալացման մեթոդը՝ էվրիստիկ (հիպերսֆերիկ և կոորդինատային վայրէջքի) և գենետիկ:

Նկատի ունենալով այն հանգամանքը, որ տեխնոլոգիական համակարգերում կարևոր նշանակություն ունի սարքի արձագանքման արագությունը, օպտիմալացման խնդիրներն ընտրվել են այնպես, որ կատարվի արագ արձագանքման պայմանը: Այդ տեսանկյունից աշխատանքում առաջադրվել են օպտիմալացման հետևյալ միաչափանիշային խնդիրները.

1. Մաքսիմալացնել մասնիկների կամրջակի ճակատին գործող էլեկտրամագնիսական ուժը, երբ $F = \text{const}$.
2. Մաքսիմալացնել մասնիկների կամրջակի ճակատի շարժման արագությունը, երբ $F = \text{const}$.

$$v(d_n, h_s, h_c, l_n, l_l, U) \rightarrow \max_{d_n, h_s, h_c, l_n, l_l, U} \quad (3)$$

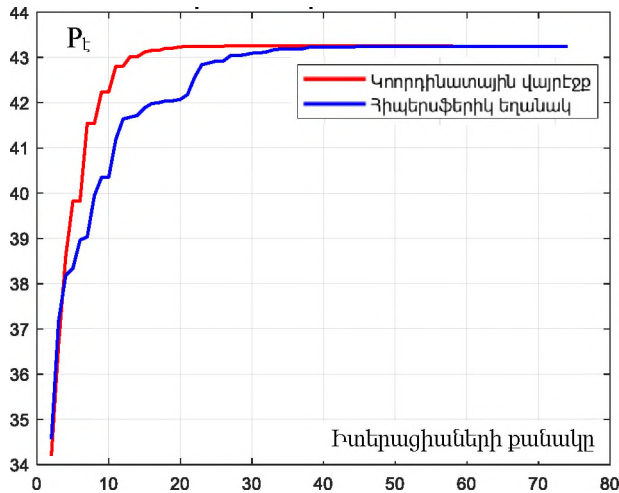
Օպտիմալացման խնդիրներում փոփոխականների՝ կառուցվածքային d_n, h_s, h_c, l_n, l_l պարամետրերի և կառավարման կոճի սնման U լարման, համար առաջադրվել են հետևյալ սահմանափակումները.

$$\begin{cases} 0.034 \leq d_n \leq 0.042, \\ 0.0031 \leq h_s \leq 0.0039, \\ 0.007 \leq h_c \leq 0.0085, \\ 0.028 \leq l_n \leq 0.034, \\ 0.01 \leq l_l \leq 0.012, \\ U = [12, 24, 48]: \end{cases} \quad (4)$$

Օպտիմալացման (2) և (3) խնդիրները լուծվել են նախագծման ավտոմատացման համակարգում ներդրված օպտիմալացման մեթոդներով, կատարվել են բազմաթիվ փորձարկումներ և ստացվել հետևյալ լուծումները.

$P_t^* = 43.2525$, $(d_n^*, h_s^*, h_c^*, l_n^*, l_l^*) = (0.04199994, 0.0039, 0.007, 0.034, 0.010003)$, $U^* = 24$,
 $v^* = 82.3225$, $(d_n^*, h_s^*, h_c^*, l_n^*, l_l^*) = (0.03901953, 0.0039, 0.007, 0.02800003, 0.012)$, $U^* = 48$:

Փորձարկումներից մեկի ընթացքում P_t նպատակային ֆունկցիայի արժեքների փոփոխությունն իտերացիաների ընթացքում ներկայացված է նկ. 11-ում:



Նկ. 11 Նպատակային P_t ֆունկցիայի արժեքի փոփոխությունը կախված իտերացիաների քանակից

Ինժեներական նախագծման խնդիրներում հաճախ անհրաժեշտ է լինում միաժամանակ օպտիմալացնել մի քանի չափանիշներ: (2) և (3) օպտիմալացման

խնդիրներով երկչափանիշային խնդիրը լուծելու նպատակով ընդհանրական նպատակային ֆունկցիան կազմվել է իդեալական կետի եղանակի կիրառմամբ, օգտագործելով առանձին չափանիշների համար վերը նշված օպտիմալ արժեքները.

$$\sigma = \left(\frac{P_t(d_n, h_s, h_c, l_n, l_p, U) - P_t^*}{P_t^*} \right)^2 + \left(\frac{v(d_n, h_s, h_c, l_n, l_p, U) - v^*}{v^*} \right)^2 = \\ = \left(\frac{P_t(d_n, h_s, h_c, l_n, l_p, U) - 43.2525}{43.2525} \right)^2 + \left(\frac{v(d_n, h_s, h_c, l_n, l_p, U) - 82.3225}{82.3225} \right)^2 \rightarrow \min_{d_n, h_s, h_c, l_n, l_p, U}; \quad (5)$$

Այս նպատակային ֆունկցիայով և $d_n, h_s, h_c, l_n, l_p, U$ փոփոխականներով մինիմալացման խնդիրը լուծվել է սահմանափակումների (4) համակարգի հաշվառմամբ, որի արդյունքում ՄՌ արգելակի օպտիմալ կառուցվածքային պարամետրերի համար ստացվել են $(d_n^*, h_s^*, h_c^*, l_n^*, l_p^*) = (0.042, 0.0039, 0.007, 0.034, 0.010125)$ արժեքները, իսկ լարման համար՝ $U^* = 12.4$ արժեքը: Այս արժեքների դեպքում՝ $P_t = 42.6750$ Ն և $v = 80.5224$ մ/վ: Ընդհանրական նպատակային ֆունկցիայի արժեքը կազմել է՝ $\sigma = 0.0004$:

Այսպիսով, MATLAB ծրագրային միջավայրում մշակվել է ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական համակարգերի նախագծման ավտոմատացման համակարգ, որը՝

- ունի գրաֆիկական ինտերֆեյս, որը նախագծողներին տրամադրում է հարմարավետ հարթակ՝ պարամետրերը մուտքագրելու, գրադարանից նյութերը ընտրելու և նախագծման արդյունքները պատկերավոր տեսնելու համար, ինչը մեծացնում է համակարգի ընդհանուր կիրառելիության աստիճանը,
- լուծում է էլեկտրամագնիսական համակարգերի ուղիղ և հակադարձ նախագծային խնդիրները, կատարում կառավարման կոճի հաշվարկը,
- ընձեռում է պարամետրական վերլուծության և ընտրված փոփոխականների միջև եռաչափ ֆունկցիոնալ կախվածությունների ստացման հնարավորություններ,
- օժտված է միաչափանիշային և երկչափանիշային օպտիմալ նախագծման հնարավորությամբ:

ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական համակարգերի նախագծման ավտոմատացման համակարգը.

- արդյունավետ է, շնորհիվ մշակված մաթեմատիկական մեթոդների ավտոմատացման, ինչը զգալիորեն կրճատում է նախագծային իտերացիաների և պարամետրերի օպտիմալացման համար պահանջվող ժամանակը,
- ապահովում է ՄՌ սարքերի մոդելավորման և օպտիմալ նախագծման բարձր ճշտություն,
- հարմարավետ է օգտագործողների համար և պարզեցնում է նախագծման գործընթացը՝ այն մատչելի դարձնելով տարբեր փորձառություն ունեցող ինժեներներին,
- ընդլայնվող է՝ ՄՌ հեղուկով տարբեր էլեկտրամագնիսական համակարգերի համար հնարավոր է ավելացնել համապատասխան բաժիններ:

ԵԶՐԱՀԱՆԳՈՒՄ

1. Ուսումնասիրվել են մագնիսառեոլոգիական (ՄՌ) հեղուկով էլեկտրամագնիսական սարքերը, ՄՌ հեղուկները և դրանց առանձնահատկությունները: Քննարկվել և վերլուծվել են նախագծման ավտոմատացման հայտնի միջավայր-գործիքները, ձևակերպվել է ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսների նախագծման ավտոմատացման ճկուն և մասնագիտացված համակարգի մշակման նպատակահարմարությունը: Որպես հետազոտության օբյեկտ ընտրվել են ՄՌ հեղուկով կախոցի և արգելակի էլեկտրամագնիսական համակարգերը:
2. Քննարկվել է վերջավոր տարրերի թվային մեթոդը, առաջարկվել են մագնիսական դաշտի տիրույթը, այդ թվում՝ ՄՌ հեղուկով հատիկավոր միջավայրի տիրույթը, եռանկյուն տարրերով պատելու արդյունավետ եղանակները: ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական համակարգի մագնիսական դաշտը մոդելավորվել է FEMM (Finite Element Method Magnetics) միջավայր-գործիքով. ստացվել են դաշտի նկարները, վերլուծվել է մագնիսական հոսքի բաշխումը, չափվել և հաշվարկվել են ինչպես դաշտը բնութագրող ֆիզիկական մեծությունների, այնպես էլ ֆեռոմագնիսական հատիկների վրա գործող էլեկտրամագնիսական ուժը և հատիկի շարժման արագությունը, կառուցվել և վերլուծվել են բնութագրական մեծությունների գրաֆիկական կախվածությունները [5, 6, 8, 11]:
3. Կազմվել են հետազոտվող համակարգերի մագնիսական շղթաների փոխարինման սխեմաները, որոնց հիման վրա մշակվել են մաթեմատիկական մոդելները՝ խորանարդներով մոդելը (մագնիսական մասնիկներն ունեն խորանարդի ձև), գնդերով մոդելը (մագնիսական մասնիկներն ունեն գնդի ձև) և հիբրիդ մոդելը (մասնիկների մի մասն ունի խորանարդի, մյուս մասը՝ գնդի ձև): Ստացվել են ոչ գծային հավասարումների համակարգեր, լուծվել են մագնիսական շղթայի ուղիղ և հակադարձ խնդիրները, ստացվել են էլեկտրամագնիսական համակարգերի բնութագրական մեծությունների արժեքները: Կատարվել է մշակված մաթեմատիկական մոդելների պարամետրական վերլուծություն, ցույց է տրվել դրանց աղեկվատությունը՝ համապատասխանությունը համակարգերում առկա ֆիզիկական երևույթներին [3, 4, 7, 9, 10, 12]:
4. Ձևակերպվել և լուծվել են ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական համակարգերի օպտիմալացման միաչափանիշային և երկչափանիշային խնդիրները: Ընտրվել են նպատակային ֆունկցիաները և սահմանափակումները: Օպտիմալացման խնդիրները լուծվել են էվոլյուցիոն մեթոդներով (հիպերսֆերիկ ու կոորդինատային վայրէջքի) և գենետիկ ալգորիթմով, վերլուծվել են ստացված արդյունքները [1, 2, 13]:
5. Մշակված հիբրիդ մաթեմատիկական մոդելի, հաշվարկի ու նախագծման եղանակների հիման վրա ստեղծվել է մասնագիտացված, ճկուն, օգտագործողի համար հարմարավետ՝ ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական սարքերի

նախագծման ավտոմատացման համակարգը երեք հիմնական շերտերով՝ գրաֆիկական ինտերֆեյս (նախագծման ելակետային տվյալների մուտքագրում և նախագծման արդյունքների արտածում), օգտագործվող նյութերի (ֆերոմագնիսական նյութերի, ՄՌ հեղուկի յուղերի, ՄՌ հեղուկի մագնիսական մասնիկների նյութերի և կառավարման կոճի հաղորդալարերի տեսակներ) գրադարաններ, միջուկ (պատասխանատու է հաշվարկի ու նախագծման բոլոր խնդիրների, այդ թվում՝ օպտիմալացման խնդիրների լուծման համար) [14]:

6. Գործարկվել է ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական սարքերի նախագծման ավտոմատացման համակարգը, կատարվել են շուրջ 600000 հատ նախագծեր: Դրանց արդյունքները ներմուծվել են նախագծման տվյալների շտեմարան, որը կիրառվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի ակադեմիկոս Հարություն Թերզյանի անվան «Ավտոմատացում և էլեկտրամագնիսական համակարգեր» բազային գիտահետազոտական լաբորատորիայում՝ մեքենայական ուսուցման մեթոդներով էլեկտրամագնիսների նախագծման խնդիրների լուծման ընթացքում [13, 14]:

ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅԱՆ ԹԵՄԱՅՈՎ ՀՐԱՏԱՐԱԿՎԱԾ ԱՇԽԱՏԱՆՔՆԵՐԻ ՑԱՆԿ

1. Терзян А.А., Сукиасян Г.С., Мелкоян Т.Р. О зависимости эффективности случайного поиска от размерности пространства при оптимизации электрических машин //Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2016, Т.69, N 3, С. 296-303.
2. Մելքոնյան Տ.Ռ. Օպտիմալ որոշումների ընդունման պատահական որոնման ալգորիթների համեմատական վերլուծություն //Հայաստանի ճարտարագիտական ակադեմիայի լրաբեր, 2016, 13. N4. -516-521 էջ:
3. Գրիգորյան Ա.Խ., Աղջոյան Գ.Ա., Մելքոնյան Տ.Ռ., Զովսաջյան Ն.Հ., Մագնիսականավարվող կախոցի էլեկտրամագնիսական համակարգի մաթեմատիկական մոդելավորումը և քննությամբ որոշումը //ՀՀ ԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. Տեխն. գիտ. սերիա. - 2017. - Հ. LXX, N 4. - 439-450 էջ:
4. Григорян А.Х., Аветисян А.Г., Мелкоян Т.Р. К расчету магнитной цепи электромагнитного тормоза с магнитореологической жидкостью //Вестник НПУА. Электротехника, Энергетика. - 2018. №1. - С. 9-20.
5. Мелкоян Т.Р., Сукиасян Г.С. О кусочно-линейной аппроксимации двумерной функции с нерегулярной сеткой //Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 2018, Т.71, N 1. - С. 80-85.
6. Мелкоян Т.Р., Сукиасян Г.С., Бабаян А.Н., О построении силовых линий кусочно-линейной аппроксимации двумерной функции с треугольной сеткой //Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2019, Т.72, N 1. - С. 113-119.

7. **Григорян А.Х., Аветисян А.Г., Мелконян Т.Р.** Математическое моделирование магнитной цепи электромагнитной системы с магнитореологической жидкостью //Вестник НПУА: Электротехника, Энергетика. - 2019. - №2. - С. 9-18.
8. **Сукиасян Г.С., Мелконян Т.Р., Григорян А.Х.** Автоматизированное моделирование электромагнитного поля для зернистых сред //Вестник НПУА. Информационные технологии, электроника, радиотехника. 2020.- №2.- С. 26-33.
9. **Գրիգորյան Ա.Խ., Ավետիսյան Ա.Գ., Մելքոնյան Տ.Ռ.** Մագնիսառեոլոգիական հեղուկով համակարգի մաթեմատիկական մոդելի պարամետրական վերլուծություն //Հայաստանի ճարտարագիտական ակադեմիայի լրաբեր, 2021, 18. N1. -25-29 էջ:
10. **Григорян А.Х., Аветисян А.Г., Мелконян Т.Р.** Гибридная математическая модель электромагнитной системы с магнитореологической жидкостью //Вестник НПУА. Электротехника, энергетика. - 2021, N 2. - С. 9-20.
11. **Մելքոնյան Տ.Ռ.** Մագնիսառեոլոգիական հեղուկով համակարգի մագնիսական դաշտի մոդելավորումը Femm միջավայրում //Հայաստանի ճարտարագիտական ակադեմիայի լրաբեր. - 2023, 20. N1. -34-40 էջ:
12. **Grigoryan A., Avetisyan A., Melkonyan T.** Parametric Study of a Hybrid Mathematical Model of an Electromagnetic Systems with a Magnetorheological Fluid //International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.). -2024, 19(1). 60-70pp. doi:10.15866/iree.v19i1.24117 (Scopus)
13. **Grigoryan A., Avetisyan A., Melkonyan T., Hovhannisyan A., Hovsepyan A.** Optimization of parameters of electromagnetic system with magnetorheological fluid //International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.). - 2024, vol. 19, N. 5. 410-420pp. doi:10.15866/iree.v19i5.25645 (Scopus)
14. **Grigoryan A., Avetisyan A., Melkonyan T., Yenokyan K.** Automated Modeling of an Electromagnet with Magnetorheological Fluid //Engineering, Technology & Applied Science Research. 15, 3 (Jun. 2025), 22937–22944pp. doi: 10.48084/etasr.10909 (Scopus)

МЕЛКОНЯН ТАТЕВИК РАЗМИКОВНА

Диссертация на тему «**Разработка системы автоматизации проектирования электромагнитных устройств с магнитореологической жидкостью**» по специальности «Системы автоматизации» - 05.13.02
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Защита диссертации состоится 23.12.2025г. в 14:00 в аудитории 17213
Национального политехнического университета Армении на заседании
специализированного совета 032 - «Управление и автоматизация»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследованы электромагнитные устройства с магнитореологической (МР) жидкостью, свойства МР-жидкостей и их особенности. Обсуждены и проанализированы известные среды и инструменты автоматизации проектирования, обоснована целесообразность разработки гибкой и специализированной системы автоматизации проектирования электромагнитов с МР-жидкостью. В качестве объекта исследования выбраны электромагнитные системы подвеса и тормоза с МР-жидкостью.
2. Рассмотрен метод конечных элементов, предложены эффективные способы разбиения области магнитного поля, включая область с гранулированной средой МР-жидкости, с использованием треугольных элементов. Магнитное поле электромагнитной системы с МР-жидкостью моделировалось в среде FEMM (Finite Element Method Magnetics): получены картины поля, проанализировано распределение магнитного потока, измерены и рассчитаны как физические величины, характеризующие поле, так и электромагнитная сила, действующая на ферромагнитные частицы, а также скорость движения частиц. Построены и проанализированы графические зависимости характерных величин [5, 6, 8, 11].
3. Составлены схемы замещения магнитных цепей исследуемых систем, на основе которых разработаны математические модели: кубическая модель (магнитные частицы имеют форму куба), сферическая модель (магнитные частицы имеют форму шара) и гибридная модель (часть частиц имеет форму куба, часть — шара). Получены системы нелинейных уравнений, решены прямая и обратная задачи магнитной цепи, получены значения характерных величин электромагнитных систем. Проведён параметрический анализ разработанных математических моделей, показана их адекватность - соответствие физическим явлениям в исследуемых системах [3, 4, 7, 9, 10, 12].
4. Сформулированы и решены задачи однокритериальной и двухкритериальной оптимизации электромагнитных систем с МР-жидкостью. Выбраны целевые функции и ограничения. Задачи оптимизации решены эвристическими методами

(гиперсферический и координатный спуск) и генетическим алгоритмом, проанализированы полученные результаты [1, 2, 13].

5. На основе разработанной гибридной математической модели, методов расчёта и проектирования создана специализированная, гибкая, удобная для пользователя система автоматизации проектирования электромагнитных устройств с МР-жидкостью, состоящая из трёх основных слоёв: графический интерфейс (ввод исходных данных проектирования и вывод результатов), библиотеки используемых материалов (ферромагнитные материалы, масла МР-жидкости, материалы магнитных частиц МР-жидкости и провода катушки управления), ядро — отвечает за решение всех задач расчёта и проектирования, включая задачи оптимизации [14].
6. Запущена система автоматизации проектирования электромагнитных устройств с МР-жидкостью, выполнено около 600 000 проектов. Их результаты внесены в базу данных проектирования, которая применялась в базовой научно-исследовательской лаборатории «Автоматизация и электромагнитные системы» имени академика Арутюна Терзяна Национального политехнического университета Армении при решении задач проектирования электромагнитов методами машинного обучения [13, 14].

MELKONYAN TATEVIK RAZMIK

Dissertation on the topic "**Development of an Automated Design System for Electromagnetic Devices with Magnetorheological Fluid**" in the specialty "Automation Systems – 05.13.02" for the degree of Candidate of Technical Sciences

Dissertation defense will be held 23.12.2025 at 14:00 in the auditorium 17213 of the National Polytechnic University of Armenia at the meeting of the specialized council 032 - "Control and automation"

CONCLUSION

1. Electromagnetic devices with magnetorheological (MR) fluids have been investigated, including the properties and characteristics of MR fluids. Known design automation environments and tools were discussed and analyzed, and the feasibility of developing a flexible and specialized automated design system for electromagnets with MR fluid was justified. The research focused on electromagnetic suspension and brake systems using MR fluid.
2. The finite element method was considered, and effective methods for meshing the magnetic field region - including the granulated MR fluid medium - using triangular elements were proposed. The magnetic field of the electromagnetic system with MR

fluid was modeled in FEMM (Finite Element Method Magnetics): field patterns were obtained, magnetic flux distribution was analyzed, and both physical quantities characterizing the field and the electromagnetic force acting on ferromagnetic particles, as well as particle velocity, were measured and calculated. Graphical dependencies of characteristic quantities were constructed and analyzed [5, 6, 8, 11].

3. Equivalent circuit diagrams of the magnetic circuits of the studied systems were developed, based on which mathematical models were created: a cubic model (magnetic particles are cube-shaped), a spherical model (magnetic particles are spherical), and a hybrid model (some particles are cube-shaped, others are spherical). Systems of nonlinear equations were obtained, and both direct and inverse problems of the magnetic circuit were solved, yielding characteristic values for the electromagnetic systems. A parametric analysis of the developed mathematical models was conducted, demonstrating their adequacy and correspondence to physical phenomena in the studied systems [3, 4, 7, 9, 10, 12].
4. Single-objective and bi-objective optimization problems for electromagnetic systems with MR fluid were formulated and solved. Objective functions and constraints were selected. The optimization problems were solved using heuristic methods (hyperspherical and coordinate descent) and a genetic algorithm, and the results were analyzed [1, 2, 13].
5. Based on the developed hybrid mathematical model, calculation and design methods, a specialized, flexible, user-friendly automated design system for electromagnetic devices with MR fluid was created. The system consists of three main layers: a graphical user interface (for inputting design parameters and outputting results), a materials library (ferromagnetic materials, MR fluid oils, magnetic particle materials, and coil wire materials), and a core responsible for solving all calculation and design tasks, including optimization [14].
6. The automated design system for electromagnetic devices with MR fluid was launched, and approximately 600,000 projects were completed. Their results were entered into a design database, which was used in the base research laboratory “Automation and Electromagnetic Systems” named after Academician Harutyun Terzyan at the National Polytechnic University of Armenia for designing electromagnets using machine learning methods [13, 14].

