

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

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ ԱՐՍԵՆ ԱՐԱՄԱՅԻՍԻ

**ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄԸ
ՄԵՔԵՆԱՅԱԿԱՆ ՈՒՍՈՒՑՄԱՆ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ**

Ե.09.01-«Էլեկտրատեխնիկա, էլեկտրամեխանիկա,
էլեկտրատեխնոլոգիաներ» մասնագիտությամբ
տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի
հայցման ատենախոսությամբ

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան 2026

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում (ՀԱՊՀ)

Գիտական ղեկավար

տ.գ.դ. Արեգ Խաչիկի Գրիգորյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ

տ.գ.դ. Բորիս Մամիկոնի Մամիկոնյան,

տ.գ.թ. Ներսես Հրաջայի Ներսիսյան,

Առաջատար կազմակերպություն

«Էներգետիկայի գիտահետազոտական
ինստիտուտ» ՓԲԸ

Պաշտպանությունը կայանալու է 2026թ. հուլիսի 15-ին ժամը 13⁰⁰ - ին ՀԱՊՀ 2445 լսարանում (հասցե՝ Երևան, Տերյան 105, 2-րդ մասնաշենք), 038 - «Էլեկտրատեխնիկա» մասնագիտական խորհրդի նիստում:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2026թ. հունիսի 13-ին:

Մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար, տ.գ.թ.



Դավիթ Դավթյան

ՆԵՐԱԾՈՒԹՅՈՒՆ

Աշխատանքի արդիականությունը: Ժամանակակից տեխնիկական համակարգերում կարևոր դեր ունեն տարատեսակ էլեկտրամագնիսական (ԷՄ) սարքերը, որոնք էլեկտրական էներգիան փոխակերպում են մագնիսականի, իսկ մագնիսականը՝ մեխանիկականի: Էլեկտրամագնիսական ուժի շնորհիվ դրանք կատարում են տարատեսակ գործողություններ՝ հրում/ձգում, բռնում, պտտում, տեղափոխում և այլն: ԷՄ սարքերը կիրառվում են բազմաթիվ բնագավառներում՝ ռոբոտատեխնիկա, արդյունաբերություն, բժշկություն և այլն: Չնայած այս համակարգերի բավականին լայն հնարավորություններին, որոշ դեպքում անհնար է լինում դրանց ինտեգրումը տարաբնույթ տեխնիկական կառուցվածքներում՝ էլեկտրամագնիսական ուժի, կառուցվածքային չափերի, սպառվող էլեկտրական հզորության, գնի, կշռի և այլ բնութագրերի տեսանկյունից: Ուստի նոր ստեղծվող ԷՄ սարքերի նախագծման փուլում կարևորագույն խնդիր է առաջադրվող պայմանների բավարարումը՝ ընդունելի կառուցվածք և չափեր, համեմատաբար փոքր կշիռ, էլեկտրաէներգիայի ոչ մեծ ծախս, աշխատանքային հնարավորինս բարձր ջերմաստիճան և այլն: Այս տեսանկյունից կարևորվում է ինչպես արդյունավետ հաշվարկա-նախագծային մեթոդների կիրառումը, այնպես էլ պարամետրերի արժեքների օպտիմալացման խնդիրների ձևակերպումն ու լուծումը: Ուստի ԷՄ սարքերի նախագծման և օպտիմալացման գործընթացում մեքենայական ուսուցման ժամանակակից մեթոդների կիրառումն արդիական գիտատեխնիկական խնդիր է:

Աշխատանքի նպատակը և հիմնական խնդիրները: Աշխատանքի նպատակը էլեկտրամագնիսական համակարգերի նախագծման գործընթացում մեքենայական ուսուցման կիրառումն է: Այս նպատակն իրագործելու համար դիտարկվել և լուծվել են հետևյալ խնդիրները.

1. Ուսումնասիրվել են մեքենայական ուսուցման մեթոդները և վերլուծվել դրանց կիրառման հնարավորություններն էլեկտրամագնիսական համակարգերի նախագծման գործընթացում, ընտրվել են հետազոտության օբյեկտ էլեկտրամագնիսները:

2. Ուսումնասիրվել են ուղղընթաց խարսխով էլեկտրամագնիսի և մագնիսառեոլոգիական հեղուկով էլեկտրամագնիսական արգելակի մաթեմատիկական մոդելները, ձևավորվել են այդ համակարգերի նախագծային տվյալների շտեմարանները:

3. Կազմվել է վերամբարձ էլեկտրամագնիսի մաթեմատիկական մոդելը, առաջարկվել է մագնիսական շղթան նկարագրող ոչ գծային հավասարումների համակարգի լուծման եղանակը, ձևավորվել է վերամբարձ էլեկտրամագնիսի նախագծային տվյալների շտեմարանը:

4. Մեքենայական ուսուցման դասակարգման մեթոդներով ուսուցանվել են հետազոտության օբյեկտ էլեկտրամագնիսական համակարգերի նախագծային

տվյալների շտեմարանները, լուծվել են այդ համակարգերի պարամետրերի արժեքների դասակարգման նախագծային խնդիրները:

5. Մեքենայական ուսուցման կանխատեսման մեթոդներով ուսուցանվել են հետազոտության օբյեկտ էլեկտրամագնիսական համակարգերի նախագծային տվյալների շտեմարանները, լուծվել են այդ համակարգերի պարամետրերի արժեքների կանխատեսման նախագծային խնդիրները:

6. Էլեկտրամագնիսական համակարգերի նախագծման գործընթացում լուծվել են այդ համակարգերի պարամետրերի արժեքների միջափանիջային և բազմաչափանիջային օպտիմալացման խնդիրները՝ օպտիմալացման և մեքենայական ուսուցման եղանակների համակցմամբ (հիբրիդ մեթոդներ):

Հետազոտության մեթոդները: Վերամբարձ էլեկտրամագնիսի մաթեմատիկական մոդելը կազմելու համար կիրառվել է մագնիսական շղթայի փոխարինման սխեմայի մեթոդը, իսկ այդ շղթան նկարագրող ոչ գծային հավասարումների համակարգը լուծվել է Նյուտոնի մեթոդի հիման վրա առաջարկված եղանակով: Հետազոտության օբյեկտների՝ ուղղընթաց խարսխով և վերամբարձ էլեկտրամագնիսների, մագնիսառեոլոգիական հեղուկով էլեկտրամագնիսական արգելակի նախագծային տվյալների շտեմարանների ուսուցման, ինչպես նաև նախագծային խնդիրների լուծման համար կիրառվել են մեքենայական ուսուցման դասակարգման և կանխատեսման մեթոդները: Էլեկտրամագնիսական համակարգերի պարամետրերի օպտիմալացման խնդիրները լուծվել են հիբրիդ մեթոդով՝ դասական և մեքենայական ուսուցման եղանակների համակցմամբ:

Աշխատանքի գիտական նորույթը.

1. Վերամբարձ էլեկտրամագնիսի մաթեմատիկական մոդելն ու մագնիսական շղթայի ուղիղ և հակադարձ խնդիրների համար մագնիսական շղթան նկարագրող ոչ գծային հավասարումների համակարգի լուծումը:

2. Նախագծային տվյալների ուսուցանված շտեմարանները, մեքենայական ուսուցման դասակարգման ու կանխատեսման մեթոդներով նախագծային խնդիրների լուծման եղանակները հետազոտվող էլեկտրամագնիսական համակարգերի համար.

- ուղղընթաց խարսխով էլեկտրամագնիս,
- վերամբարձ էլեկտրամագնիս,
- մագնիսառեոլոգիական հեղուկով էլեկտրամագնիսական արգելակ:

3. Էլեկտրամագնիսական համակարգերի բնութագրական պարամետրերի օպտիմալացման միաչափանիջային և բազմաչափանիջային խնդիրների լուծման հիբրիդ մեթոդներն օպտիմալացման և մեքենայական ուսուցման եղանակների զուգակցմամբ:

Աշխատանքի կիրառական նշանակությունը: Նախագծման և օպտիմալացման առաջարկվող մեթոդներն ու եղանակները կարող են արդյունավետ օգտագործվել տարատեսակ ԷՄ համակարգերի հետազոտության ու նախագծման գործընթացներում: Ատենախոսության արդյունքները կիրառվել են Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի (ՀԱՊՀ) ակադեմիկոս Հարություն

Թերզյանի անվան «Ավտոմատացում և էլեկտրամագնիսական համակարգեր» բազային գիտահետազոտական լաբորատորիայում՝ գիտատեխնիկական խնդիրների լուծման համար: Ստացված արդյունքները ներառվել են ՀԱՊՀ «Էլեկտրամագնիսական համակարգերը ավտոմատիկայում և ռոբոտատեխնիկայում» մագիստրոսական կրթական ծրագրի դասընթացում:

Աշխատանքի արդյունքների հրապարակում: Հետազոտությունների արդյունքներն արտացոլվել են 6 տպագիր աշխատություններում (երեքը՝ Scopus գիտատեղեկատվական շտեմարանի հանդեսներում): Արդյունքները ներկայացվել են ՀԱՊՀ 2021-2024թթ. տարեկան գիտաժողովներում, ՀԱՊՀ «Էլեկտրական մեքենաներ և ապարատներ» ամբիոնի և «Ավտոմատացում և էլեկտրամագնիսական համակարգեր» բազային գիտահետազոտական լաբորատորիայի գիտական սեմինարներում:

Ատենախոսության պաշտպանությանը ներկայացվող դրույթներն ու հետազոտությունների արդյունքները.

1. Վերամբարձ էլեկտրամագնիսի մաթեմատիկական մոդելի կազմում և մագնիսական շրջան նկարագրող ոչ գծային հավասարումների համակարգի լուծում:

2. Հետազոտության օբյեկտ էՄ համակարգերի՝ ուղղընթաց խարսխով և վերամբարձ էլեկտրամագնիսներ, մագնիսառեկտրոգիական հեղուկով էլեկտրամագնիսական արգելակ, նախագծային տվյալների շտեմարանների կազմում և ուսուցում մեքենայական ուսուցման մեթոդներով:

3. էՄ համակարգերի նախագծման գործընթացում նախագծային տվյալների դասակարգում մեքենայական ուսուցման մեթոդներով:

4. էՄ համակարգերի նախագծման գործընթացում նախագծային տվյալների կանխատեսում մեքենայական ուսուցման մեթոդներով:

5. էՄ համակարգերի նախագծման փուլում պարամետրերի օպտիմալացման միաչափանիշային և բազմաչափանիշային խնդիրների լուծում մեքենայական ուսուցման մեթոդների կիրառմամբ (հիբրիդ մեթոդներով):

Ատենախոսության կառուցվածքը և բովանդակությունը: Աշխատանքը կազմված է 4 գլուխներից, ներածությունից, եզրահանգումից ու զրականության ցանկից: Այն շարադրված է 125 էջում, պարունակում է 61 նկար, 21 աղյուսակ:

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

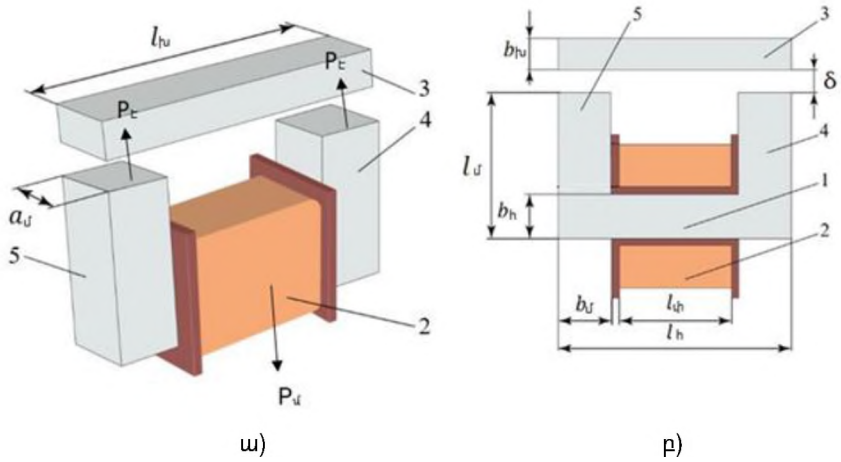
Առաջին գլխում վերլուծվել են մեքենայական ուսուցման երեք հիմնական տեսակները՝ ուսուցում ուսուցչով, ուսուցում առանց ուսուցչի և խրախուսմամբ ուսուցում, հիմնավորվել է դրանց կիրառելիությունը բարդ գործընթացների ավտոմատացման, նախագծման և համակարգերի օպտիմալացման խնդիրներում:

Նշվել են էլեկտրամագնիսական համակարգերի նախագծման դասական եղանակների սահմանափակումները, բարդությունները, ցույց է տրվել ՄՌԻ մեթոդների կիրառման արդյունավետությունն ու անհրաժեշտությունը նախագծման

և համակարգերի օպտիմալացման խնդիրներում: Ուսումնասիրվել են ՄՌԻ մեթոդների կիրառությունները էլեկտրամագնիսական համակարգերի հետազոտման, նախագծման, օպտիմալացման խնդիրներում:

Որպես հետազոտության օբյեկտներ ընտրվել են ավտոմատացման և ռոբոտատեխնիկայի տարաբնույթ համակարգերում կիրառվող ուղղընթաց խարսխով էլեկտրամագնիսը (նկ.1), վերամբարձ էլեկտրամագնիսը (նկ.2), մագնիսառեոլոգիական (ՄՌ) հեղուկով էլեկտրամագնիսական արգելակը (նկ.3):

Հետազոտվող ուղղընթաց խարսխով էլեկտրամագնիսի (նկ.1) մագնիսալարի հիմքի վրա տեղադրված կառավարման կոճի փաթույթի էլեկտրական հոսանքի մագնիսական դաշտի ազդեցությամբ ձևավորվում է ձգող էլեկտրամագնիսական P_{Σ} ուժը: Վերջինս բավարար արժեքի դեպքում հաղթահարում է P_{Σ} հակազդող մեխանիկական ուժը, և խարսխն ու միջուկները փոխադարձաբար ձգվում են:

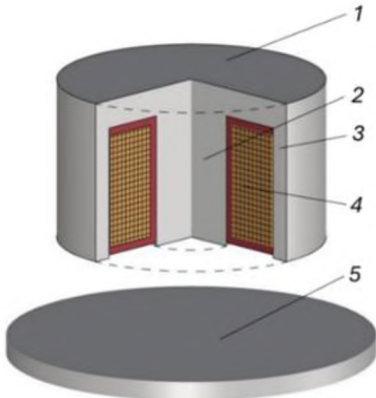


Նկ.1 Ուղղընթաց խարսխով էլեկտրամագնիսը (ա) և դրա հատույթը (բ). P_{Σ} – ձգող էլեկտրամագնիսական ուժ, P_{σ} – հակազդող մեխանիկական ուժ, 1-մագնիսալարի հիմք, 2-կառավարման կոճ, 3-խարսխ, 4, 5-միջուկներ:

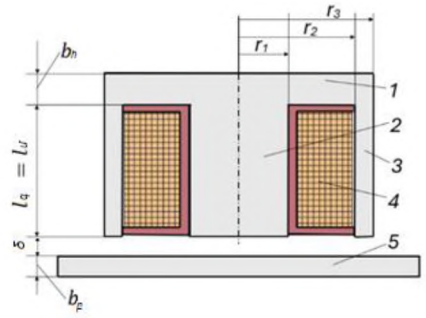
Վերամբարձ էլեկտրամագնիսի (նկ.2) մագնիսալարի միջուկի վրա տեղադրված կառավարման կոճի փաթույթի F մագնիսաշարժ ուժի (ՄՇՈՒ) մագնիսական դաշտի ազդեցությամբ առաջանում է ձգող էլեկտրամագնիսական P_{Σ} ուժը, որի բավարար արժեքի դեպքում էլեկտրամագնիսը հաղթահարում է բեռի կշռի P_{Σ} հակազդող ուժը և դեպի բևեռներ ձգում բեռը:

ՄՌ հեղուկով արգելակի էլեկտրամագնիսական համակարգի (նկ.3) ֆերոմագնիսական ռոտորի վրա տեղադրված կառավարման կոճի փաթույթի հոսանքի մագնիսական դաշտի ուժագծերն անցնում են ֆերոմագնիսական ռոտորով, մագնիսառեոլոգիական հեղուկով և ֆերոմագնիսական ստատորով, ձևավորելով մագնիսական շղթա: Մագնիսական դաշտով պայմանավորված P_{Σ}

Էլեկտրամագնիսական ուժը հաղթահարում է ՄՌ հեղուկի հակազդող P_h ուժը, և մագնիսական մասնիկները փոխադարձաբար ձգվում են, ձևավորում շղթաներ ու կամրջակներ, որոնք էլ մեխանիկապես միակցում են ստատորն ու ռոտորը: Քանի որ ստատորը անշարժ է, առաջանում է ռոտորի պտույտին հակազդող մեխանիկական մոմենտ, որն էլ արգելակում է շարժիչի լիսեռի պտտական շարժումը:

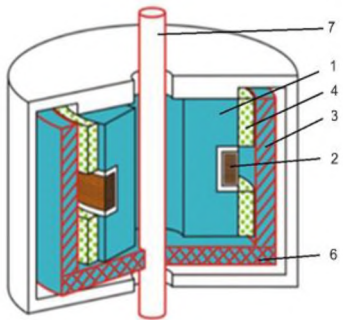


ա)

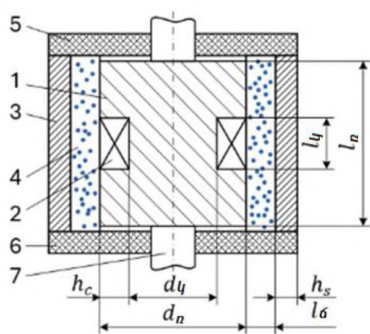


բ)

Նկ. 2 Վերամբարձ էլեկտրամագնիսը (ա) և դրա հատույթը (բ).
1-հիմք, 2-միջուկ 3- արտաքին գլան, 4-կառավարման կոճ, 5 – բեռ:



ա)



բ)

Նկ. 3 ՄՌ հեղուկով արգելակը (ա) և դրա կառուցվածքային սխեման (բ).
1-Ֆերոմագնիսական ռոտոր, 2-կառավարման կոճ, 3-Ֆերոմագնիսական ստատոր, 4-մագնիսառեղորդիական հեղուկ մագնիսական մասնիկներով, 5,6-ոչ մագնիսական կափարիչ, 7-լիսեռ:

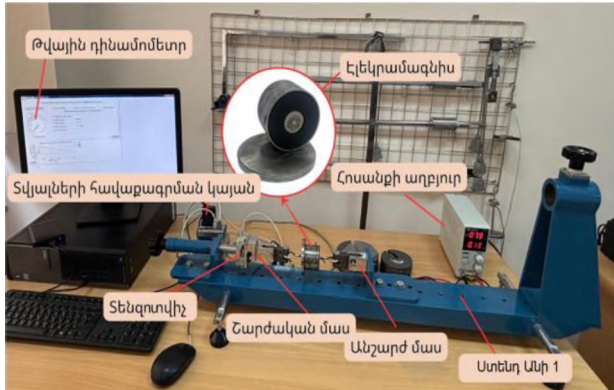
Երկրորդ գլխում ներկայացվել են հետազոտության օբյեկտների՝ ուղղընթաց խարսխով էլեկտրամագնիսի և ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական արգելակի մաթեմատիկական մոդելները, քննարկվել են դրանց կազմման համար կիրառված մեթոդները: Վերլուծվել են այս էլեկտրամագնիսական համակարգերի նախագծման ավտոմատացված համակարգերը, ստացվել են նախագծային տվյալների շտեմարանները, որոնք անհրաժեշտ են էՄ համակարգերի նախագծման գործընթացում ՄՌ մեթոդների կիրառման համար:

Ուղղընթաց խարսխով էլեկտրամագնիսի տվյալների շտեմարանն ընդգրկում է 1000000 նախագիծ: Շտեմարանի յուրաքանչյուր նախագծային տողը պարունակում է նախագծման համար առաջադրված ձգող էլեկտրամագնիսական ուժի արժեքը, կառավարման փաթույթի գալարների քանակը և փաթույթի հաշվարկային ջերմաստիճանը, օդային բացակի մագնիսական ինդուկցիայի արժեքը, կառուցվածքային գործակիցները, էլեկտրամագնիսի կառավարման կոճի հզորությունը և էլեկտրամագնիսի ակտիվ նյութերի (պողպատ, փաթույթային հաղորդալար) գինը (ԱՄՆ դոլարով): ՄՌ հեղուկով արգելակի շտեմարանը կազմված է շուրջ 650000 նախագծերի տվյալներից (տողերից): Այստեղ ընդգրկված են էլեկտրամագնիսի կառուցվածքային չափերը, կառավարման կոճի լարման, Փ մագնիսական հոսքի, ՄՌ հեղուկի մագնիսական մասնիկների կամրջակի ճակատի շարժման v արագության և այդ ճակատի վրա գործող P_t էլեկտրամագնիսական ուժի արժեքները, կառավարման փաթույթի ջերմաստիճանը:

Կառուցվել է վերամբարձ էլեկտրամագնիսի մագնիսական շղթայի փոխարինման սխեման, կազմվել է այդ շղթայի մաթեմատիկական մոդելը՝ $(2n+1)$ հատ ոչ գծային հավասարումների (1) համակարգը: Այստեղ, մագնիսական շղթայի ուղիղ խնդրի դեպքում, երբ հայտնի է Φ_δ մագնիսական հոսքը, անհայտ են F_k ՄՇՈՒ-ները (ընդհանուր դեպքում՝ F -ը) և $\Phi_{\delta i}, \Phi_{di}$ հոսքերը ($i = 1, \dots, n$): Հակադարձ խնդրի դեպքում, երբ հայտնի F ՄՇՈՒ-ի արժեքը, անհայտ են $\Phi_\delta, \Phi_{\delta i}$ և Φ_{di} մագնիսական հոսքերը: Երկու դեպքում էլ հայտնի են վերամբարձ էլեկտրամագնիսի կառուցվածքային չափերը՝ $r_1, r_2, r_3, l_\delta, b_h, b_p$ և δ : (1) համակարգը լուծվել է Նյուտոնի եղանակով:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_\delta R_{\delta_1} + \Phi_\delta R_{\delta_2} + f\left(\frac{\Phi_\delta}{S_p}\right) \cdot l'_p + f\left(\frac{\Phi_\delta}{S_{pm1}}\right) \cdot l'_{pm1} + \\ + f\left(\frac{\Phi_g}{S_{pm2}}\right) \cdot l'_{pm2} - \Phi_{d1} R_d - F_k = 0, \\ \left\{ \begin{array}{l} f\left(\frac{\Phi_{\delta i}}{S_q}\right) \cdot l'_{\delta k} + f\left(\frac{\Phi_{\delta i}}{S_q}\right) \cdot l'_{\delta k} + \Phi_{di} R_d - \\ - \Phi_{d(i+1)} R_d - F_k = 0, i = 1, \dots, n - 1; \\ f\left(\frac{\Phi_{\delta n}}{S_d}\right) \cdot l'_{\delta k} + f\left(\frac{\Phi_{\delta n}}{S_q}\right) \cdot l'_{\delta k} + f\left(\frac{\Phi_{\delta n}}{S_h}\right) \cdot l'_{\delta k} + \\ + f\left(\frac{\Phi_{\delta n}}{S_{hn1}}\right) \cdot l'_{hn1} + f\left(\frac{\Phi_{\delta n}}{S_{hn2}}\right) \cdot l'_{hn1} + \Phi_{dn} R_d - F_k = 0, \\ \left\{ \begin{array}{l} \Phi_\delta + \Phi_{d1} - \Phi_{\delta 1} = 0, \\ \Phi_{\delta i} + \Phi_{d(i+1)} - \Phi_{\delta(i+1)} = 0, i = 1, \dots, n - 1 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (1)$$

Ոչ գծային հավասարումների (1) համակարգի լուծման արդյունքներն իրական էլեկտրամագնիսի բնութագրերի հետ համեմատելու նպատակով կատարվել է գիտափորձ նվազագույն ծ օդային բացակի համար (բեռը բևեռներին ձգված վիճակում է): Այդ նպատակով պատրաստվել է էլեկտրամագնիսի փորձարարական նմուշը AISI 1045 պողպատով և $r_1 = 10.45$ մմ, $r_2=25.4$ մմ, $r_3=27.55$ մմ, $b_p=6.3$ մմ, $b_n=7.3$ մմ, $l_s=29.5$ մմ կառուցվածքային չափերով ու կառավարման կոճի $w = 2000$ գալյարներով: Գիտափորձը կատարվել է ՀԱՊՀ Ազգային ճարտարագիտական լաբորատորիայի «Անի-1» գիտափորձարարական սարքով (նկ.4): (1)-ի լուծումով և գիտափորձով ստացված P_t ուժի արժեքների առավելագույն շեղումը չի գերազանցել 6.9%-ը:



Նկ. 4 Վերամբարձ էլեկտրամագնիսի գիտափորձարարական սարքավորումը

Կատարված բազմաթիվ նախագծային հաշվարկների տվյալներով կազմվել է վերամբարձ էլեկտրամագնիսի նախագծային տվյալների շտեմարանը՝ մեքենայական ուսուցման մեթոդներով էլեկտրամագնիսի նախագծային խնդիրը լուծելու համար: Շտեմարանի հզորությունը շուրջ 14000 նախագծային տող է, որոնցից յուրաքանչյուրում ծ օդային բացակի չափերն են, ՄՇՈՒ-ի և P_t ձգող էլեկտրամագնիսական ուժի արժեքները:

Երրորդ գլխում քննարկվել են էլեկտրամագնիսական համակարգերի նախագծման գործընթացում ՄՈՒ դասակարգման և կանխատեսման մեթոդների կիրառման առանձնահատկությունները (ՄՈՒ կիրառմամբ էլեկտրամագնիսների նախագծման եղանակները):

Էլեկտրամագնիսական համակարգերի նախագծման գործընթացում կարևոր է, որ հենց սկզբնական փուլում կատարվի պարամետրերի այնպիսի արժեքների ընտրությունը, որոնց պարագայում նախագծվող էլեկտրամագնիսը կլինի աշխատունակ: Աշխատանքում աշխատունակությունը գնահատվում է կառավարման կոճի փաթեթի տաքացման թույլատրելի ջերմաստիճանի տեսանկյունից. եթե նախագծվող սարքի փաթեթի հաշվարկային ջերմաստիճանը գերազանցում է թույլատրելի արժեքը, ապա ապագա էլեկտրամագնիսը գնահատվում է որպես ոչ

աշխատունակ: Նախագծվող էլեկտրամագնիսի աշխատունակության գնահատման համար ընտրվել և իրագործվել են ՄՈՒ ուսուցչով ուսուցման դասակարգման ալգորիթմները: Տվյալների շտեմարանն ուսուցանվել է Python ծրագրավորման լեզվի scikit-learn գրադարանի դասակարգման մի քանի ալգորիթմներով, ստացվել են ուսուցանված շտեմարանի մոդելները, որոնք հնարավորություն են տվել գնահատել էլեկտրամագնիսի աշխատունակությունը նախագծման սկզբնական փուլում: Փորձարկվել են Decision Tree, Random Forest, Gradient Boosting, Support Vector և Naive Bayes դասակարգիչ ալգորիթմները, և լավագույն արդյունքը ստացվել է Decision Tree Classifier-ով:

Ըստ նախնական նախագծային պարամետրերի՝ ուղղընթաց խարսխով էլեկտրամագնիսի բնութագրական մեծությունների կանխատեսման համար (էլեկտրամագնիսի նախագծման համար) ընտրվել և իրագործվել են ուսուցչով ուսուցման կանխատեսման մի քանի ալգորիթմներ՝ Decision Tree, Gradient Boosting, Random Forest, Support Vector, MLP Regressor, և լավագույն արդյունքը ստացվել է MLP Regressor մեթոդով: Ուսուցումը կատարվել է երկշերտ նեյրոնային ցանցով՝ 1-ին շերտում 100, իսկ երկրորդում՝ 50 նեյրոնների քանակներով: Նկ. 5-ում նախագծված էլեկտրամագնիսի ակտիվ նյութերի գնի և կառավարման կոճի հզորության համար իրական ու կանխատեսված արժեքների կախվածությանների գրաֆիկներն են:



Նկ. 5 MLP Regressor - ով կանխատեսված և իրական արժեքների կախվածությունները գնի (ա) և հզորության (բ) համար

Ուղղընթաց խարսխով էլեկտրամագնիսի նախագծման՝ բավականին մեծ ճշտությամբ նախագծային տվյալների արժեքների, մասնավորապես ակտիվ նյութերի գնի և կառավարման կոճի հզորության արժեքների, որոշման գործընթացում նախագծման դասական՝ բազմափուլ (մագնիսական շղթայի ուղիղ և հակադարձ խնդիրների լուծում, կառավարման կոճի պարամետրերի հաշվարկ) և բավականին ժամանակատար եղանակը փոխարինվել է նախագծային տվյալների կանխատեսման գործողությամբ: Նախագծային տարբերակը ստանալու համար

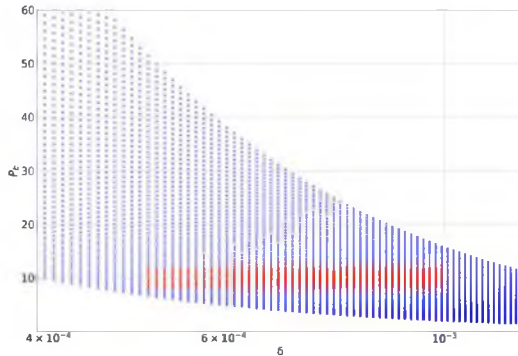
պահանջվել է միջինում 0.0003 վրկ, որը 400 անգամ փոքր է դասական եղանակով հաշվարկային ժամանակից, նույն հաշվարկային ռեսուրսի օգտագործման պարագայում:

Ինչպես ուղղընթաց խարսխով էլեկտրամագնիսի, այնպես էլ ՄՌ հեղուկով էլեկտրամագնիսական արգելակի նախագծման խնդրում, էլեկտրամագնիսի աշխատունակության որոշման համար, կիրառվել են մեքենայական ուսուցման դասակարգման ալգորիթմները: Այստեղ լավագույն արդյունքը ստացվել է Random Forest Classifier-ով: Նախագծման բնութագրական տվյալների, մասնավորապես, մագնիսական մասնիկների կամրջակի ճակատին ազդող P_t ուժի և այդ ճակատի շարժման v արագության արժեքների կանխատեսման համար կիրառված ալգորիթմներից լավագույնը եղել է Gradient Boosting Regressor-ը:

Վերամբարձ էլեկտրամագնիսները, բացի բեռը ձգելու, միջուկի և գլանի բևեռներին հպելու ու տեղափոխելու գործառույթից, կատարում են նաև կախոցի գործառույթ: Այս դեպքում բեռը ձգվում է դեպի էլեկտրամագնիսը, սակայն չի հպվում բևեռներին՝ «կախվում» է օդում այդ բևեռներից որոշակի հեռավորության վրա (որոշակի δ բացակով): Կախոց-էլեկտրամագնիսի աշխատունակության կարևոր բնութագիրը կայունության պայմանն է՝ բեռի P_p ծանրության ուժի և էլեկտրամագնիսական P_t ձգող ուժի հավասարակշռության պայմանը ($P_p = P_t$): Այս դեպքում, որպես նախնական նախագծային տվյալներ առաջադրվում են P_p ուժը և այն δ բացակը, որը պետք է կայուն պահպանվի կախոցի աշխատանքի ընթացքում: Կախոցի կայունության տիրույթը ձևավորվում է ինչպես δ -ի, այնպես էլ P_t ուժի արժեքների թույլատրելի շեղումներով:

Վերամբարձ էլեկտրամագնիսի նախագծային տվյալների շտեմարանն ուսուցանվել է ՄՌ դասակարգման և կանխատեսման ալգորիթմներով, վերլուծվել են ստացված արդյունքները և ընտրվել համեմատաբար բարձր ճշտություն ապահոված ալգորիթմները. տվյալների դասակարգման պարագայում՝ Decision Tree Classifier-ը և կանխատեսման դեպքում՝ CatBoost Regressor-ը: Տվյալների դասակարգման շնորհիվ հնարավոր է եղել պարզել հետազոտվող էլեկտրամագնիսի կիրառելի լինելը կախոց-էլեկտրամագնիսի կայունության տիրույթում: Կանխատեսման ալգորիթմները հնարավորություն են տվել կայունության տիրույթի բոլոր կետերի համար ուսուցանված շտեմարանից կանխատեսել-որոշել կառավարման կոճի ՄՇՌ-ի արժեքներն օդային բացակի և ձգող էլեկտրամագնիսական ուժի համապատասխան արժեքների համար:

Այլ. 6-ում ցույց են տրված Decision Tree դասակարգչով ստացված արդյունքները. կապույտով նշված են այն հաշվարկային կետերը, երբ էլեկտրամագնիսի կառավարման կոճի ՄՇՌ-ի տվյալ արժեքին համապատասխանող δ չափը և P_t ուժը դուրս են գտնվում սահմանված կայունության տիրույթից, իսկ կարմիրով նշված հաշվարկային կետերը համապատասխանում են կայունության տիրույթին: CatBoost Regressor-ով, 12.7Գբ օպերացիոն հիշողությամբ աշխատող առցանց հարթակում, ՄՇՌ-ի արժեքի կանխատեսումը կատարվում է մոտ 0.0004 վայրկյանում:



Նկ. 6 Decision Tree Classifier-ով ուսուցման և դասակարգման արդյունքները

Էլեկտրամագնիսական համակարգերի նախագծման գործընթացում կարևոր է ոչ միայն սարքի աշխատունակության ապահովումը, այլև դրա աշխատանքային, շահագործողական և տեխնիկականտնտեսական բնութագրերի օպտիմալացումը:

Չորրորդ գլխում առաջարկվել է էլեկտրամագնիսների օպտիմալ նախագծման խնդիրների լուծման հիբրիդ եղանակ՝ օպտիմալացման ալգորիթմների ու մեքենայական ուսուցման մեթոդների համակցմամբ: Այս դեպքում նպատակային ֆունկցիայի արժեքները կանխատեսվում են նախօրոք ուսուցանված տվյալների շտեմարաններից, իսկ որոշ սահմանափումների բավարարման ստուգումը փոխարինվում է դասակարգման գործողությամբ, օգտագործելով աշխատանքի երրորդ գլխում բնութագրական արժեքների որոշման համար ընտրված մեքենայական ուսուցման դասակարգման ու կանխատեսման մեթոդները: Առաջարկված ալգորիթմով լուծվել են ուղղընթաց խարսխով էլեկտրամագնիսի և մագնիսառեոլոգիական հեղուկով էլեկտրամագնիսի օպտիմալ նախագծման միաչափանիշային և բազմաչափանիշային խնդիրները:

Ուղղընթաց խարսխով էլեկտրամագնիսի օպտիմալ նախագծման խնդիրներում կիրառվել են գենետիկ ալգորիթմները և նպատակային ֆունկցիաների արժեքների կանխատեսման MLP Regressor-ով ուսուցանված տվյալների շտեմարանները, կառավարման կոճի փաթույթի տաքացման ջերմաստիճանի սահմանափակման բավարարումը ստուգվել է Decision Tree Classifier-ով դասակարգված տվյալների շտեմարանից աշխատունակ նախագծերի որոշմամբ:

Լուծվել են ուղղընթաց խարսխով էլեկտրամագնիսի բնութագրերի օպտիմալացման հետևյալ միաչափանիշային խնդիրները.

- նվազեցնել էլեկտրամագնիսի պատրաստման համար անհրաժեշտ ակտիվ նյութերի՝ պողպատի և պղնձե հաղորդալարի նվազագույն արժեքը (V), երբ $F = \text{const}$ (Խնդիր 1).

$$V(K_E, K_U, K_{U\bar{U}}, K_{\bar{U}}, K_H, K_{\Delta}, K_{\Phi}, B_{\delta}) \rightarrow \min: \quad (2)$$

- նվազեցնել էլեկտրամագնիսի կառավարման փաթույթի էլեկտրական հզորությունը, երբ $F = \text{const}$ (Խնդիր 2).

$$P(K_t, K_{\text{տ}}, K_{\text{ս}}, K_{\text{խ}}, K_h, K_{\Delta}, K_{\text{փ}}, B_{\delta}) \rightarrow \min: \quad (3)$$

(2) և (3) օպտիմալացման խնդիրներում փոփոխականները կառուցվածքային $K_t, K_{\text{տ}}, K_{\text{ս}}, K_{\text{խ}}, K_h, K_{\Delta}, K_{\text{փ}}$ գործակիցներն են և օդային բացակի ինդուկցիայի B_{δ} արժեքը, որոնց համար առաջադրվում են հետևյալ սահմանափակումները.

$$\begin{cases} 1.0 \leq K_t \leq 1.1, \\ 1.0 \leq K_{\text{տ}} \leq 1.1, \\ 1.5 \leq K_{\text{ս}} \leq 2.0, \\ 0.6 \leq K_{\text{խ}} \leq 0.8, \\ 1.0 \leq K_h \leq 1.1, \\ 0.02 \leq K_{\Delta} \leq 0.05, \\ 1.2 \leq K_{\text{փ}} \leq 2.0, \\ 0.9 \leq B_{\delta} \leq 1.2 (S_{\delta}): \end{cases} \quad (4)$$

Օպտիմալացման խնդրում միայն աշխատունակ էլեկտրամագնիսները դիտարկելու նպատակով (4) սահմանափակումներին միանում է նաև էլեկտրամագնիսի աշխատունակությունը բնորոշող՝ կառավարման կոճի փաթույթի ջերմաստիճանի պայմանը.

$$\theta_{\text{փ}} \leq 150 \text{ }^{\circ}\text{C}: \quad (5)$$

Ինչպես դիտարկվող, այնպես էլ մյուս օպտիմալացման խնդիրները, ինչպես նշվեց, լուծվել են գենետիկ ալգորիթմով, իսկ նպատակային ֆունկցիաների արժեքների հաշվման մեծաքանակ ու ժամանակատար գործողությունները փոխարինվել են նպատակային ֆունկցիաների արժեքների կանխատեսման արագագործ գործողություններով: (5) սահմանափակման ապահովման համար կառավարման կոճի փաթույթի ջերմաստիճանի հաշվման ընթացակարգը փոխարինվել է էլեկտրամագնիսների դասակարգման արագ գործողությամբ: Այսպիսով, իրագործվել է հիբրիդ եղանակը, որը զուգակցում է օպտիմալացման գենետիկ ու մեքենայական ուսուցման ալգորիթմները, և որի լուծման ժամանակը շուրջ 400 անգամ փոքր է դասական բազմափուլ եղանակով խնդրի լուծման ընդհանուր ժամանակից: Նկ. 7-ում, որպես օրինակ տրված է առաջադրված հիբրիդ եղանակով Խնդիր 2-ի լուծման ընթացակարգն ըստ իտերացիաների, իսկ աղյուսակ 1-ում՝ Խնդիր 1-ի և Խնդիր 2-ի լուծումներով ստացված արդյունքները:

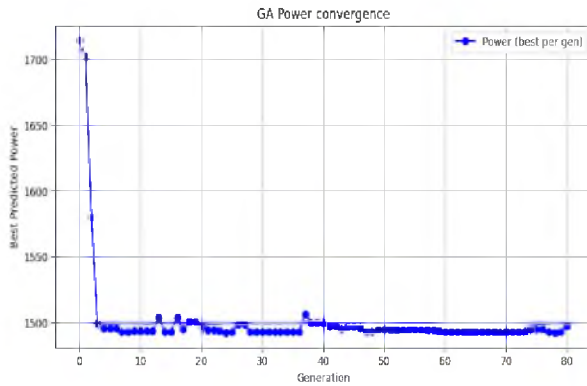
ՄԴ հեղուկով էլեկտրամագնիսական արգելակի համար, առաջադրվող հիբրիդ եղանակով, լուծվել են սարքի արագ արձագանք ապահովող բնութագրական մեծությունների օպտիմալացման խնդիրները.

- մաքսիմալացնել մագնիսական մասնիկների կամրջակի ճակատին գործող էլեկտրամագնիսական ուժը, երբ $F = \text{const}$ (Խնդիր 3).

$$P_t(d_n, h_s, h_c, l_n, l_q, U) \rightarrow \max, \quad (6)$$

- մաքսիմալացնել մագնիսական մասնիկների կամրջակի ճակատի շարժման արագությունը, երբ $F = \text{const}$ (Խնդիր 4).

$$v(d_n, h_s, h_c, l_n, l_q, U) \rightarrow \max: \quad (7)$$



Նկ. 7 Հիբրիդ եղանակով նպատակային ֆունկցիայի՝ հզորության, որոշման ընթացակարգն ըստ իտերացիաների (Generation)

Աղյուսակ 1.

Էլեկտրամագնիսի կառուցվածքային չափերն ըստ
 Խնդիր 1-ի և Խնդիր 2-ի օպտիմալ լուծումների

Կառուցվածքային չափերը	Խնդիր 1	Խնդիր 2
$a_d, մ$	0.1342	0.13
$b_d, մ$	0.1457	0.13
$l_d, մ$	0.205	0.2181
$l_h, մ$	0.3811	0.376
$b_h, մ$	0.1446	0.1345
$b_n, մ$	0.0999	0.0821
$h_{\phi}, մ$	0.0456	0.0727
$P, վադ$	1850.35	1492.08
$\gamma, ԱՄՆ դոլար$	188.05	290.875

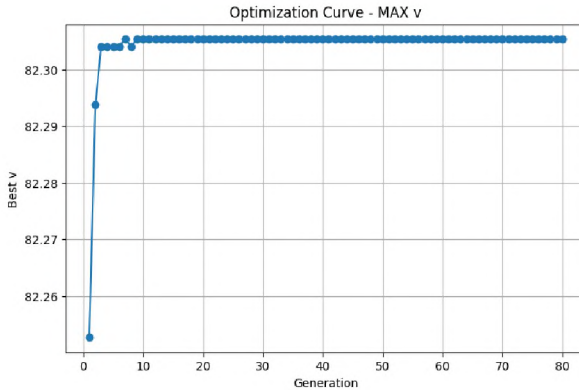
(6) և (7) նպատակային ֆունկցիաներով օպտիմալացման միաչափանիշային խնդիրներում փոփոխականների՝ կառուցվածքային $d_n, h_s, h_c, l_n, l_{\phi}$ պարամետրերի և U լարման համար, առաջադրվում են հետևյալ սահմանափակումները.

$$\begin{cases} 0.034 \leq d_n \leq 0.042, \\ 0.0031 \leq h_s \leq 0.0039, \\ 0.007 \leq h_c \leq 0.0085, \\ 0.028 \leq l_n \leq 0.034, \\ 0.01 \leq l_{\phi} \leq 0.012, \\ U = [12, 24, 48]. \end{cases} \quad (8)$$

Սահմանափակումների (8) համակարգին միանում է նաև կառավարման կոճի

փաթույթի ջերմաստիճանային (5) սահմանափակումը:

Նկ. 8-ում խնդիր 4-ի ընթացակարգն է ըստ խտրագիստների:



Նկ. 8. Հիբրիդ եղանակով նպատակային ֆունկցիայի՝ արագության որոշման ընթացակարգն ըստ խտրագիստների (Generation)

Ինժեներական նախագծերում հաճախ նպատակահարմար է դիտարկել օպտիմալացման չափանիշները միաժամանակ և ստանալ փոխզիջումային լուծումներ: Ուղղընթաց խարսխով էլեկտրամագնիսի համար բազմաչափանիշային օպտիմալացման խնդիրը ձևակերպվել է (2) և (3) չափանիշների համաժամանակյա մինիմալացմամբ՝ (4) և (5) սահմանափակումներով (խնդիր 5, խնդիր 6): Մո-հեղուկով արգելակի համար փոխզիջումային լուծումը ստացվել է (6) և (7) նպատակային ֆունկցիաների համաժամանակյա մաքսիմալացման երկչափանիշային խնդրի լուծմամբ՝ հիբրիդ եղանակով (խնդիր 7, խնդիր 8): Երկչափանիշային օպտիմալացման խնդիրները լուծելու համար օգտագործվել են ընդհանրացված նպատակային ֆունկցիայով բազմաչափանիշային խնդիրները լուծելու երկու՝ կշռային գործակիցների և իդեալական կետի եղանակները:

Կշռային գործակիցների եղանակով ուղղընթաց խարսխով էլեկտրամագնիսի երկչափանիշային խնդիրը լուծելու համար նախ նորմալորվել են նպատակային երկու ֆունկցիաները, կիրառելով V^{min} , V^{max} , p^{min} , p^{max} արժեքները, որոնք, համապատասխանաբար, ակտիվ նյութերի գնի մինիմալ ու մաքսիմալ և հզորության մինիմալ ու մաքսիմալ արժեքներն են տվյալների շտեմարաններում:

$$V^{norm}(X) = \frac{V(X) - V^{min}}{V^{max} - V^{min}}, \quad p^{norm}(X) = \frac{p(X) - p^{min}}{p^{max} - p^{min}}$$

որտեղ՝ $V(X) = V(K_t, K_{\bar{v}}, K_{\bar{u}}, K_{\bar{u}}, K_h, K_{\Delta}, K_{\bar{u}}, B_{\delta})$, $P(X) = P(K_t, K_{\bar{v}}, K_{\bar{u}}, K_{\bar{u}}, K_h, K_{\Delta}, K_{\bar{u}}, B_{\delta})$, $f(X) = f(K_t, K_{\bar{v}}, K_{\bar{u}}, K_{\bar{u}}, K_h, K_{\Delta}, K_{\bar{u}}, B_{\delta})$:

Ընդհանրացված նպատակային ֆունկցիան կազմվել է այսպես.

$$f(X) = \alpha V^{norm}(X) + (1-\alpha)P^{norm}(X) \rightarrow \min, \quad (9)$$

որտեղ $\alpha \in [0, 1]$ -ն կշռային գործակիցն է, որի արժեքով որոշվում է ընդհանրացված նպատակային ֆունկցիայում նյութերի գնի ու հզորության միմյանց նկատմամբ հարաբերակցությունը:

Խնդիր 5-ը լուծելու համար (2) և (3) նպատակային ֆունկցիաները փոխարինվում են (9) ընդհանրացված նպատակային ֆունկցիայով և խնդիրը լուծվում է առաջարկված հիբրիդ եղանակով: Յուրաքանչյուր խտրացիայում $V(X)$, $P(X)$ արժեքները կանխատեսվում են ուսուցանված շտեմարաններից, իսկ $\theta_{\text{փ}} \leq 150^\circ\text{C}$ սահմանափակումը ստուգվում է ուսուցանված շտեմարանից էլեկտրամագնիսի դասակարգմամբ՝ աշխատունակ կամ ոչ աշխատունակ: Հիբրիդ ալգորիթմով խնդիր լուծման արդյունքները կշռային α գործակից տարբեր արժեքների համար տրված են Աղյուսակ 2-ում:

Աղյուսակ 2.

Խնդիր 5-ի լուծման հաշվողական փորձարկումների արդյունքները

α	B, S_I	K_{δ}	$K_{\delta\delta}$	K_{μ}	K_{η}	K_{Δ}	K_{ω}	$V, \text{ԱՄՆ}$ <i>դոլար</i>	$P, \text{Վր}$
0.9	0.964454	1.1	1.5	0.799702	1.058203	0.049293	1.878623	190.012525	1858.01329
0.7	0.977320	1.099395	1.500092	0.705275	1.036968	0.046093	1.652794	190.492972	1837.09005
0.5	1.015013	1.099997	1.500009	0.799739	1.015372	0.05	1.933963	216.945334	1641.02920
0.3	0.930780	1.1	1.504788	0.765772	1.064715	0.039031	1.842703	241.391837	1553.17111
0.1	0.983103	1.081273	1.578794	0.750531	1.069770	0.043214	1.726178	270.059552	1492.88663

Բազմաչափանիշային օպտիմալացման խնդիրը լուծվել է նաև ընդհանրացված նպատակային ֆունկցիան իդեալական (ուտոպիական) կետի մեթոդով ստանալու ճանապարհով, օգտագործելով միաչափանիշային օպտիմալացման խնդիրների լուծմամբ ստացված $V^* = 188.054066$ (խնդիր 1) և $P^* = 1492.076$ (խնդիր 2) արժեքները.

$$\sigma = \left(\frac{P(X) - P^*}{P^*} \right)^2 + \left(\frac{V(X) - V^*}{V^*} \right)^2 \rightarrow \min: \quad (10)$$

(10) նպատակային ֆունկցիայով միաչափանիշային օպտիմալացման խնդիրը (խնդիր 6) կրկին լուծվել է առաջարկված հիբրիդ եղանակով: Ընդ որում, ինչպես նախորդ դեպքերում, օպտիմալացման գործընթացում անհրաժեշտ, բազմակի անգամներ լուծվող բոլոր խնդիրները՝ ուղիղ խնդիրը, հակադարձ խնդիրը, կառավարման փաթույթի նախագծման խնդիրը և այլն, փոխարինվել են փոփոխականների՝ $X = (K_t, K_{\delta}, K_{\delta\delta}, K_{\mu}, K_{\eta}, K_{\Delta}, K_{\omega}, B_{\delta})$ համախմբի համար ուսուցանված շտեմարաններից $P(X)$ և $V(X)$ արժեքների կանխատեսման անհամեմատ արագ գործողությամբ:

Աղյուսակ 3-ում, որպես օրինակ, տրված են ՄՌ հեղուկով արգելակի երկչափանիշային օպտիմալացման խնդրի (Խնդիր 7) կշռային գործակիցների եղանակով լուծման արդյունքները:

Աղյուսակ 3.

Խնդիր 7-ի լուծման հաշվողական փորձարկումների արդյունքները

α	$d_n, մ$	$h_n, մ$	$h_g, մ$	$l_n, մ$	$l_n, մ$	Ս, Վ	$v, մ/վ$	$P_t, Ն$	σ
0.9	0.041999	0.003876	0.007001	0.028000	0.010725	12	31.71986	82.27315	0.94479
0.7	0.041999	0.003887	0.007008	0.030715	0.010744	48	36.40287	81.74585	0.85883
0.5	0.041963	0.003899	0.007004	0.033999	0.010860	12	41.23242	80.77181	0.86737
0.3	0.042	0.003782	0.007081	0.033843	0.010768	48	40.90083	80.8587	0.88614
0.1	0.041999	0.0039	0.007296	0.033995	0.010509	48	41.41678	80.6205	0.927177

(6) և (7) նպատակային ֆունկցիաներով երկչափանիշային խնդիրը լուծվել է նաև իդեալական կետի եղանակով (Խնդիր 8):

ԵՐՐԱՀԱՆԳՈՒՄ

1. Կատարվել է գիտատեխնիկական գրականության վերլուծություն՝ բացահայտվել են մեքենայական ուսուցման մեթոդների կիրառման առանձնահատկություններն ու հնարավորությունները տարաբնույթ համակարգերի, այդ թվում՝ էլեկտրամագնիսների հետազոտման և նախագծման խնդիրներում:

2. Որպես հետազոտության օբյեկտներ ընտրվել են ինչպես դասական էլեկտրամագնիսական համակարգերի տիպային օրինակները՝ ուղղընթաց խարսխով ու վերամբարձ էլեկտրամագնիսները, այնպես էլ մագնիսառեւոլոգիական հեղուկով էլեկտրամագնիսական համակարգերի տարածված տեսակը՝ արգելակը: Քննարկվել են ուղղընթաց խարսխով և մագնիսառեւոլոգիական հեղուկով էլեկտրամագնիսական համակարգերի աշխատանքային առանձնահատկությունները, մաթեմատիկական մոդելներն ու նախագծման ավտոմատացված համակարգերը: Կազմվել է վերամբարձ էլեկտրամագնիսի մաթեմատիկական մոդելը, և առաջարկվել մագնիսական շղթան նկարագրող ոչ գծային հավասարումների համակարգի լուծման եղանակը:

3. Ձևավորվել և մեքենայական ուսուցման մեթոդներով ուսուցանվել են հետազոտության օբյեկտ էլեկտրամագնիսական համակարգերի նախագծային տվյալների շտեմարանները: Կատարվել է ուսուցման համար կիրառված դասակարգման ու կանխատեսման ալգորիթմների համեմատական վերլուծությունը, ընտրվել են արդյունավետ ալգորիթմները:

4. Առաջարկվել և իրագործվել է նախագծման սկզբնական փուլում նախագծվող սարքերի աշխատունակության գնահատման եղանակն ըստ

առաջադրված տվյալների համախմբերի՝ մեքենայական ուսուցման դասակարգման մեթոդների կիրառմամբ:

5. Առաջարկվել և իրագործվել է էլեկտրամագնիսների նախագծերի կատարման (նախագծային տվյալների որոշման) եղանակը մեքենայական ուսուցման կանխատեսման մեթոդների կիրառմամբ:

6. Առաջարկվել և իրագործվել է էլեկտրամագնիսների օպտիմալ նախագծման հիբրիդ եղանակը՝ օպտիմալացման և մեքենայական ուսուցման մեթոդների համակցված կիրառմամբ:

ԱՏԵՆԱԽՈՍՈՒԹՅԱՆ ԹԵՄԱՅՈՎ ՀՐԱՏԱՐԱԿՎԱԾ ԱՇԽԱՏԱՆՔՆԵՐԻ ՑԱՆԿ

1. A. Grigoryan, A. Avetisyan, An. Hovhannisyan, **Ar. Hovhannisyan**, A. Hovsepyan A solution method for direct and inverse problems of an electromagnet magnetic circuit //IEEE Access. 2026, V. 14, pp. 60375–60387. doi:10.1109/ACCESS.2026.3684728 (Scopus)
2. A. Grigoryan, A. Avetisyan, T. Melkonyan, **A. Hovhannisyan**, A. Hovsepyan Optimization of parameters of electromagnetic system with magnetorheological fluid //International Review of Electrical Engineering. 2024, 19(5), pp. 410-420. doi: 10.15866/iree.v19i5.25645 (Scopus)
3. A. Grigoryan, A. Avetisyan, N. Chukhajyan, **A. Hovhannisyan**, A. Hovsepyan Optimal design of an electromagnet using machine learning methods //International Review of Electrical Engineering. 2024, 19(4), pp.337-345. doi: 10.15866/iree.v19i4.25425 (Scopus)
4. **A. Hovhannisyan** Classification and selection of electromagnet design data using machine learning algorithms //Proceedings of NPUA: Electrical Engineering, Energetics, 2024. N 2, pp. 70–78. doi: 10.53297/18293328-2024.2-70
5. А.Х. Григорян, А.Г. Аветисян, Н.Г. Чухаджян, **А.А. Оганесян**, А.А. Овсепян Проектирование электромагнита с прямоходным якорем с применением методов машинного обучения //Вестник НПУА: Электротехника, энергетика, 2023, N 2. - С. 33–43. doi: 10.53297/18293328-2023.2-33
6. А.Х. Григорян, А.Г. Аветисян, **А.А. Оганесян**, А.Н. Бабаян Применение методов машинного обучения в процессе проектирования электромагнитных устройств //Вестник НПУА: Электротехника, энергетика. – 2022, N 2. - С. 41–49. doi: 10.53297/18293328-2022.2-41

АРСЕН АРАМАИСОВИЧ ОГАНЕСЯН

Диссертация на тему «**Проектирование электромагнитных систем с применением машинного обучения**» по специальности «Электротехника, электромеханика, электротехнологии» - 05.09.01
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Защита диссертации состоится 15.07.2026 в 13⁰⁰ в аудитории 2445 Национального политехнического университета Армении
на заседании специализированного совета 038 - «Электротехника»

РЕЗЮМЕ

Электромагнитные (ЭМ) устройства различных типов играют важную роль в современных технических системах, преобразуя электрическую энергию в магнитную, а магнитную - в механическую. Благодаря электромагнитной силе они выполняют разнообразные операции толкание/притяжение, захват, вращение, перемещение и другие. ЭМ устройства применяются во многих областях: робототехника, промышленность, медицина и другие. Несмотря на достаточно широкие возможности этих систем, в ряде случаев их интеграция в различные технические конструкции оказывается невозможной с точки зрения электромагнитной силы, конструктивных размеров, потребляемой электрической мощности, стоимости, массы и других характеристик. Поэтому на этапе проектирования вновь создаваемых ЭМ устройств важнейшей задачей является соблюдение предъявляемых условий - приемлемая конструкция и габариты, сравнительно небольшая масса, невысокий расход электроэнергии, максимально возможная рабочая температура и так далее. С этой точки зрения важную роль играют как применение эффективных расчётно-проектировочных методов, так и постановка и решение задач оптимизации параметров. Следовательно, применение современных методов машинного обучения в процессе проектирования и оптимизации ЭМ устройств является актуальной научно-технической задачей.

Целью работы является применение машинного обучения в процессе проектирования электромагнитных систем.

Научная новизна.

- Математическая модель подъёмного электромагнита и решение системы нелинейных уравнений, описывающих магнитную цепь, для прямой и обратной задач магнитной цепи.

- Обученные базы проектных данных и способы решения проектных задач с применением методов классификации и прогнозирования машинного обучения для исследуемых электромагнитных систем:

- электромагнит с прямоходным якорем,
- подъемный электромагнит,
- электромагнитный тормоз с магнитореологической жидкостью.

- Методы решения одно и многокритериальных задач оптимизации параметров электромагнитных систем с сочетанием методов оптимизации и машинного обучения (гибридные методы).

Основные выводы

1. Проведен анализ научно-технической литературы, выявивший специфику и возможности применения методов машинного обучения в исследованиях и проектировании различных систем, включая электромагнитные.

2. В качестве объекта исследования были выбраны типичные примеры классических электромагнитных систем – электромагнит с прямоходным якорем и подъемный электромагнит, а также распространенный тип электромагнитов с магнитореологической жидкостью – тормоз. Рассмотрены рабочие характеристики электромагнитных систем с прямоходным якорем и магнитореологической жидкостью, математические модели этих электромагнитов и автоматизированные системы проектирования. Составлена математическая модель подъемного электромагнита и предложен метод решения системы нелинейных уравнений, описывающей магнитную цепь.

3. Составлены и обучены базы проектных данных исследуемых электромагнитных систем, с использованием методов машинного обучения. Проведен сравнительный анализ алгоритмов классификации и прогнозирования, использованных для обучения, и выбраны наиболее эффективные алгоритмы.

4. Предложен и реализован способ оценки работоспособности разработанных устройств на начальном этапе проектирования на основе баз данных и с использованием методов классификации машинного обучения.

5. Предложен и реализован способ проектирования (определения проектных данных) электромагнитов с использованием баз данных и с использованием методов прогнозирования машинного обучения.

6. Предложен и реализован гибридный метод оптимального проектирования электромагнитов, с сочетанием методов оптимизации и машинного обучения.

ARSEN ARAMAYIS HOVHANNISYAN

Dissertation on the topic "**Design of electromagnetic systems using machine learning**" in the specialty "Electro engineering, Electromechanics, Electrotechnologies"
– 05.09.01 for the degree of Candidate of Technical Sciences

Dissertation defense will be held 15.07.2026 at 13⁰⁰ in the auditorium 2445 of the National Polytechnic University of Armenia at the meeting of the specialized council 038 - "Electrical Engineering"

SUMMARY

Electromagnetic (EM) devices of various types play an important role in modern technical systems, converting electrical energy into magnetic energy, and magnetic energy into mechanical energy. By means of electromagnetic force, they perform various operations pushing/pulling, gripping, and others. EM devices are used in numerous fields: robotics, industry, medicine, and others. Despite the broad capabilities of these systems, in certain cases their integration into various technical structures proves impossible, from the standpoint of electromagnetic force, structural dimensions, consumed electrical power, cost, weight, and other characteristics. Therefore, at the design stage of newly created EM devices, the most important task is satisfying the imposed conditions acceptable structure and dimensions, comparatively low weight, modest electrical energy consumption, the highest possible operating temperature, and so on. From this perspective, both the application of efficient computational-design methods and the formulation and solution of parameter value optimization problems are of great importance. Therefore, the application of modern machine learning methods in the process of designing and optimizing EM devices is a current scientific-technical challenge.

The goal of the work is the application of machine learning in the design process of electromagnetic systems.

Scientific novelty.

- The mathematical model of a lifting electromagnet and the solution of the system of nonlinear equations describing the magnetic circuit for the direct and inverse problems of the magnetic circuit.

- Trained databases of design data, and methods for solving design problems using machine learning classification and prediction methods for the electromagnetic systems investigated:

- electromagnet with a straight armature,
 - lifting electromagnet,
 - electromagnetic brake with magnetorheological fluid.
- Methods for solving one-objective and multi-objective problems of characteristic parameters optimization of electromagnetic systems, combining optimization and machine learning approaches (hybrid methods).

Main conclusions

1. A review of scientific and technical literature was carried out, revealing the features and possibilities of applying machine learning methods to the research and design of various systems, including electromagnets.

2. As the objects of the research, both typical examples of classical electromagnetic systems: electromagnet with a straight armature and lifting electromagnet, as well as a widely used type of electromagnetic system with magnetorheological fluid, namely the brake, were selected. The operating features, mathematical models, and computer-aided design systems of electromagnetic systems with a straight armature and magnetorheological fluid were considered. A mathematical model of a lifting electromagnet was developed, and a method for solving the system of nonlinear equations describing the magnetic circuit was proposed.

3. Databases of design parameters for the investigated electromagnetic systems were formed and trained using machine learning methods. A comparative analysis of the classification and prediction algorithms used for training was carried out, and the most efficient algorithms were selected.

4. A method for evaluating the operability of designed devices at the initial design stage based on the given data sets using machine learning classification methods was proposed and implemented.

5. A design method of electromagnets (design data determination) using machine learning prediction methods has been proposed and implemented.

6. A hybrid method for the optimal design of electromagnets based on the combined application of optimization and machine learning methods was proposed and implemented.

U. Kuyshabbaev