

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,
ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ ՎԱՐԴԱՆ ԴԱՎԻԹԻ

**ՓՈՓՈԽՎՈՂ ԲԵՌՈՎ ԷԼԵԿՏՐԱԲԱՆԵՑՄԱՆ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ
ԲԱՐԵԼԱՎՈՒՄՆ ԱՐՇԵՍՏԱԿԱՆ ՆԵՅՐՈՆԱՅԻՆ ՑԱՆՑԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ**

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

Ս Ե Ղ Մ Ա Գ Ի Ր

ԵՐԵՎԱՆ 2026

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

Оганнисян Вардан Давидович

**УЛУЧШЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С
ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ
НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.09.01 - “Электротехника, электромеханика,
электротехнологии”

ЕРЕВАН 2026

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում (ՀԱՊՀ)

Գիտական ղեկավար՝
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝

տ.գ.դ. Մարինկա Քաջիկի Բաղդասարյան
տ.գ.դ. Բորիս Մամիկոնի Մամիկոնյան
տ.գ.թ. Էդուարդ Արմենակի Հակոբյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

«Էներգետիկայի գիտահետազոտական
ինստիտուտ» ՓԲԸ

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2026թ. Հունիսի 12-ին, ժամը 13⁰⁰-ին Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում գործող ՀՀ ԲԿԳԿ-ի 038 մասնագիտական խորհրդի նիստում: Հասցե՝ 0009, ք. Երևան, Տերյան փ., 105:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ-ի գրադարանում:
Սեղմագիրն առաքված է 2026թ. մայիսի 12-ին:

Մասնագիտական խորհրդի
Գիտական քարտուղար, տ.գ.թ.՝



Դ.Վ. Դավթյան

Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом университете
Армении (НПУА)

Научный руководитель:
Официальные оппоненты:

д.т.н. Маринка Каджиковна Багдасарян
д.т.н. Борис Мамиконович Мамиконян
к.т.н. Эдуард Арменакович Акопян

Ведущая организация:

ЗАО «Научно-исследовательский
институт энергетики»

Защита диссертации состоится 12-го июня 2026г. в 13⁰⁰ часов на заседании Специализированного совета КВОН РА 038, действующего при Национальном политехническом университете Армении, по адресу: 0009, Ереван, ул. Теряна, 105.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.
Автореферат разослан 12-го мая 2026г.

Ученый секретарь
Специализированного совета, к.т.н.



Д.В. Давтян

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ՆԿԱՐԱԳԻՐԸ

Թեմայի արդիականությունը: Արդյունաբերության տարբեր ոլորտներում կիրառվող տեխնոլոգիական գործընթացների պատշաճ կազմակերպումը հիմնականում պայմանավորված է մեխանիզմների աշխատանքն ապահովող էլեկտրաբանեցման համակարգերի անխափան աշխատանքով և արդյունավետ շահագործմամբ: Էլեկտրաբանեցման համակարգերի ավտոմատացված կառավարումն ուղեկցվում է մեծ թվով էլեկտրամեխանիկական համակարգերի օգտագործմամբ, որոնց օգնությամբ լուծվում են արտադրանքի որակի և տեխնոլոգիական սարքավորումների արդյունավետության բարձրացման խնդիրները: Շատ դեպքերում տեխնոլոգիական գործընթացների կառավարման նպատակով օգտագործվում են տասնյակ էլեկտրաբանեցումներ, որոնք միացված են կառավարման, սնման և բեռի շղթաներով: Տարբեր ոլորտներում լայն տարածում ունեն այնպիսի համակարգերը, որոնք գործում են պատահականորեն փոփոխվող բեռների պայմաններում: Նման դեպքում կառավարման խնդիրները դառնում են առավել բարդ և պահանջում են ճկուն, ադապտիվ և բարձր ճշգրտությամբ լուծումներ: Դինամիկ բեռնվածությամբ էլեկտրաբանեցման համակարգի շահագործման ընթացքում մեխանիկական մասում առաջացող առաձգական, անկանոն և անկանխատեսելի թրթռոցները կարող են հանգեցնել համակարգի անկայունության, ինչպես նաև մեխանիկական հանգույցների աստիճանաբար մաշվածության և դեֆորմացիայի: Այդ պատճառով առանձնահատուկ կարևորություն է ստանում խելացի և արագ արձագանքող կառավարման համակարգերի մշակումը և ներդրումը, որոնք կարող են օպերատիվ կերպով հարմարվել տեխնոլոգիական գործընթացների ընթացքում առաջացող բեռի փոփոխություններին:

Դինամիկ բեռով էլեկտրաբանեցման կառավարման համակարգերին վերաբերող հայտնի աշխատությունների համալիր վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ այդ ոլորտում ձեռք են բերվել զգալի արդյունքներ՝ հիմնականում ուղղված առանձին մասնակի խնդիրների լուծմանը: Մշակվել են սինխրոն և ասինխրոն համակարգերի ադապտիվ ու օպտիմալ կառավարման մեթոդներ, մեխանիկական մասի կարգավորման ալգորիթմներ, ինչպես նաև բարելավվել են գրգռման համակարգերը: Սակայն դրանք արդյունավետ են միայն կոնկրետ խնդիրների դեպքում և չեն ապահովում պահանջվող արդյունք տարբեր աշխատանքային ռեժիմներում: Միաժամանակ ակնհայտ է, որ, չնայած ինտելեկտուալ մոտեցումների կիրառմանը, կառավարման համակարգերի կատարելագործման զգալի ներուժ դեռ առկա է: Ասվածը հիմք է տալիս արձանագրելու, որ արդյունաբերության մարտահրավերներին դիմակայող և

Ժամանակակից մեխանիզմների էլեկտրաբանեցումը լավագույնս ապահովող կառավարման համակարգերի արդյունավետության բարձրացմանը միտված խնդիրներն արդիական են և գիտատեխնիկական հետաքրքրություն են ներկայացնում:

Հաշվի առնելով էլեկտրաբանեցման համակարգի շահագործման արդյունավետության բարձրացման համար համակարգի կայունության մասին ճշգրիտ ինֆորմացիայի առկայության կարևորությունը, կայունության գնահատման մոդելի սինթեզի համար ինտելեկտուալ մոտեցումների կիրառման արդյունավետությունը, անորոշ փոփոխություններով աշխատող մեխանիզմների էլեկտրաբանեցման համակարգի մեխանիկական մասի կառավարման առանձնահատկությունները և դրա բարելավման հնարավորությունները, ինչպես նաև ելնելով սինխրոն էլեկտրաբանեցման գրգռման կարգավորման բարելավման անհրաժեշտությունից ձևավորվել է սույն ատենախոսական աշխատանքի նպատակը և դրա իրականացման համար լուծվող խնդիրները:

Աշխատանքի նպատակը: Ատենախոսության նպատակը փոփոխվող բեռով կառավարման էլեկտրաբանեցման համակարգի բարելավումն է արհեստական նեյրոնային ցանցի կիրառմամբ դրա մեխանիկական մասի բաբախումները մեղմող, անկայուն վիճակը հայտնաբերող մոդելների մշակման և փորձարկման ճանապարհով:

Աշխատանքում առաջադրված նպատակն իրագործելու համար լուծվել են հետևյալ խնդիրները.

- էլեկտրաբանեցման կառավարման համակարգերի հայտնի մեթոդների վերլուծություն,
- փոփոխվող բեռով էլեկտրաբանեցման կառավարման համակարգերի բարելավմանը միտված ուղիների գնահատում և ընտրություն,
- էլեկտրաբանեցման մեխանիկական մասի երկզանգված և եռազանգված համակարգի կառավարման առանձնահատկությունների ուսումնասիրություն,
- էլեկտրաբանեցման համակարգի մեխանիկական մասի ադապտիվ կառավարում «նեյրո - ֆազի» մոդելի հենքով,
- դինամիկ բեռով էլեկտրաբանեցման համակարգի մեխանիկական մասի կայունության պայմանների գնահատման մաթեմատիկական մոդելի մշակումը,
- դինամիկ բեռով աշխատող էլեկտրաբանեցման համակարգի անկայունության վիճակի հայտնաբերում՝ արհեստական նեյրոնային ցանցի կիրառմամբ,

- սինխրոն մեքենայի գրգռման նեյրոցանցային կանխատեսող կարգավորիչ համակարգի մշակումը,
- փոփոխվող բեռով էլեկտրաբանեցման համակարգի փորձնական մոդելի մշակում և հետազոտում:

Գիտական նորույթը

1. Մշակվել է անորոշ պայմաններում աշխատող փոփոխվող բեռով երկզանգված և եռազանգված էլեկտրաբանեցման մեխանիկական մասի կառավարման «նեյրո - ֆազի» էտալոնային մոդել, որի դեպքում համակարգը կարող է ինքնուրույն հարմարվել արտաքին պայմանների փոփոխություններին և արդյունավետ գործել տարբեր իրավիճակներում՝ ապահովելով կարգավորման բարձր արագագործություն, ճշտություն, ադապտիվություն և փոքր գերկարգավորում:

2. Մշակվել է «էլեկտրաբանեցման շարժիչ - մեխանիզմ» համակարգի կայունության պայմանների հայտնաբերման և գնահատման մաթեմատիկական մոդել, ինչը հնարավորություն է տալիս գեներացնել անկայունության բացահայտման համար անհրաժեշտ տվյալների բազմությունը:

3. Արհեստական նեյրոնային ցանցի կիրառմամբ մշակվել է էլեկտրաբանեցման համակարգի անկայունության վիճակի հայտնաբերման մոդել, որն ապահովում է բարձր արտադրողականություն և կառավարման համակարգում համաձայնեցված աշխատելու հնարավորություն:

4. Մշակվել է սինխրոն մեքենաների գրգռման համակարգի նեյրոցանցային կանխատեսող կարգավորիչ, որի բարձր արագագործությունն ու նվազագույն գերկարգավորումը հնարավորություն են տալիս այն կիրառել տարբեր հզորության և շահագործման պայմաններ ունեցող սինխրոն շարժիչների ու գեներատորների համար:

Պաշտպանությանը ներկայացվող հիմնական դրույթները

1. Երկզանգված և եռազանգված էլեկտրաբանեցման համակարգերի մեխանիկական մասի առաձգական տատանումները զսպող կառավարման «նեյրո-ֆազի» մոդելը:

2. Դինամիկ բեռով էլեկտրաբանեցման համակարգի կայունության պայմանների գնահատման մաթեմատիկական մոդելը:

3. Անկայունության վիճակի հայտնաբերման նեյրոցանցային մոդելը:

4. Գրգռման համակարգի կառավարման համար մշակված արհեստական նեյրոնային ցանցի վրա հիմնված կանխատեսող կարգավորիչը և դրա ուսուցման համար երկվորյակ մոդելի օգտագործումը:

5. Արհեստական նեյրոնային ցանցի հենքով մշակված էլեկտրաբանեցման համակարգի փորձնական մոդելի միջոցով ստացված արդյունքները:

Աշխատանքի կիրառական նշանակությունը:

Փոփոխվող բեռով էլեկտրաբանեցման մեխանիկական մասի կառավարման «նեյրո – ֆազի» էտալոնային համակարգը հաջողությամբ կարելի է կիրառել տարբեր ոչ հստակ պայմաններում շահագործվող տեխնոլոգիական մեխանիզմների բանեցման համակարգերի աշխատանքի արդյունավետության և հուսալիության բարձրացման համար: Առաջարկվող համակարգն ունի զարգացման լայն հնարավորություններ, շնորհիվ կանոնների բազայի ընդլայնման և դրանց արդյունավետ ուսուցման կարողության: Դա հնարավորություն է տալիս ապահովել տարատեսակ կառավարման համակարգերի հետ ինտեգրված աշխատելու հնարավորություն:

Դինամիկ բեռով էլեկտրաբանեցման համակարգի անկայուն վիճակի հայտնաբերման արհեստական նեյրոցանցային մոդելները կարող են կիրառվել տարբեր տեխնիկատնտեսական պահանջներ ունեցող էլեկտրամեխանիկական համակարգերի աշխատանքի բարձր արդյունավետությունն ապահովող համակարգերի մշակման կամ առկա մոդելների մոդիֆիկացման համար, ինչպես նաև այն կարող են ներդնել իրական միկրոքոնթրոլլերների մեջ և համաձայնեցված աշխատել կառավարման համակարգում:

Գրգռման կառավարման համար արհեստական նեյրոնային ցանցի վրա հիմնված կանխատեսող կարգավորիչը հնարավորություն է տալիս դինամիկ բեռով համակարգերի համար ապահովել շահագործման բարձր արդյունավետություն, կայունություն ու հուսալիություն, անկախ հզորությունից ու կիրառման բնագավառից:

Տրապարակումները: Կատարված հետազոտությունների հիմնական դրույթներն ու արդյունքները զեկուցվել և քննարկվել են «էլեկտրական մեքենաներ և ապարատներ» ամբիոնի գիտական սեմինարներում:

Ատենախոսության դրույթներն ու արդյունքներն արտացոլված են հրատարակված 6 աշխատություններում:

Ատենախոսության կառուցվածքը և ծավալը: Ատենախոսությունը կազմված է ներածությունից, չորս գլխից, եզրակացություններից և օգտագործված գրականության ցանկից: Աշխատանքը շարադրված է 130 էջի վրա, պարունակում է 97 նկար, 17 աղյուսակ և 88 անուն ընդգրկող գրականության ցանկ:

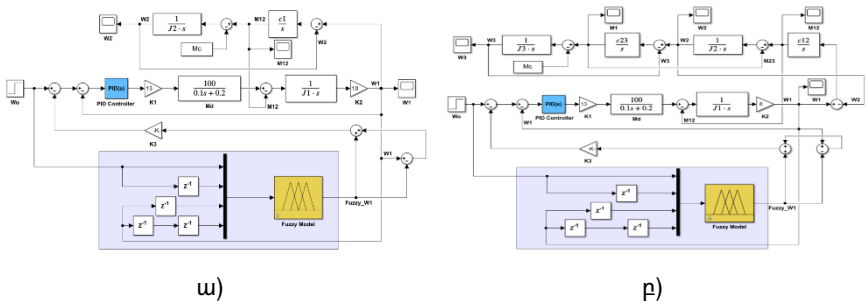
ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՀԻՄՆԱԿԱՆ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ներածությունում հիմնավորված է խնդրի արդիականությունը, ձևակերպված են հետազոտման նպատակը և խնդիրները, ներկայացված են

գիտական նորույթը և աշխատանքի կիրառական նշանակությունը, ինչպես նաև պաշտպանության ներկայացված հիմնական դրույթները:

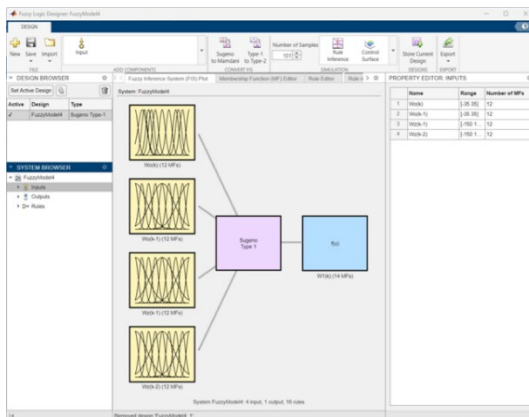
Առաջին գլխում վերլուծվել են արդյունաբերական համալիրներում կիրառվող էլեկտրաբանեցման համակարգերի աշխատանքի արդյունավետության և կառավարման որակի վրա ազդող գործոնները: Հիմնավորվել է դինամիկ բեռով աշխատող համակարգերի կառավարման կատարելագործման անհրաժեշտությունը՝ հաշվի առնելով դրանցում առաջացող լարման պատահական անկումները, հարմոնիկ աղավաղումները և բեռի փոփոխման պատահական բնույթը: Վերլուծվել են էլեկտրաբանեցման կառավարման համակարգերի հայտնի մեթոդները, մոդելները և ալգորիթմները: Բացահայտվել է, որ գոյություն ունեցող մոտեցումները հիմնականում միտված են մասնակի խնդիրների լուծմանը, որոնք արդյունավետ չեն տարբեր ռեժիմներում աշխատող համակարգերի ու 5-րդ սերնդի արդյունաբերության մարտահրավերների պայմաններում: Հիմնավորվել է ինտելեկտուալ կառավարման մոտեցումների կիրառման անհրաժեշտությունը՝ դասական համակարգերին բնորոշ թերություններից խուսափելու նպատակով: Էլեկտրաբանեցման համակարգերի կառավարման որակի բարձրացման և բարելավման համար ընտրվել են հետևյալ ուղղությունները. ոչ հստակ տրամաբանությամբ աշխատող մեխանիկական մասի ադապտիվ կառավարման մոդելի մշակում, անցումային գործընթացներում անկայունության վիճակի հայտնաբերման ինտելեկտուալ մոդելի ստեղծում, ինչպես նաև սինխրոն մեքենայի գրգռման համակարգի համար ուսուցանվող և կանխատեսող հատկություններով օժտված կարգավորիչի մշակում:

Երկրորդ գլխում վերլուծվել են փոփոխվող բեռով աշխատող էլեկտրաբանեցման մեխանիկական մասում առաջացող վթարավտանգ երևույթները և դրանց կանխման հնարավորությունները: Երկզանգված և եռազանգված էլեկտրաբանեցման համակարգերի համար MATLAB-ի «Fuzzy Logic Toolbox» միջավայրում մշակվել է Սուգենո տիպի «նեյրո – ֆազի» կարգավորիչ՝ Գաուսյան պատկանելության ֆունկցիաներով: Համակարգի կանոնների բազան և պատկանելության ֆունկցիաների պարամետրերը օպտիմալացվել են Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) գործիքակազմի նեյրոնային ուսուցման ալգորիթմների միջոցով՝ ապահովելով տվյալների հիման վրա համակարգի ճշգրիտ հարմարեցումը: Նկարագրված երկզանգված և եռազանգված էլեկտրաբանեցման համակարգի մեխանիկական մասի ադապտիվ կառավարման մոդելները բերված են նկ. 1 - ում: Մշակված մոդելները թույլ են տալիս արդյունավետորեն մարել մեխանիկական տատանումները և բարձրացնել համակարգի դինամիկ կայունությունը աշխատանքային տարբեր ռեժիմներում:



Նկ. 1. Երկզանգված (ա) և եռազանգված (բ) համակարգերի ադապտիվ կառավարման մոդել

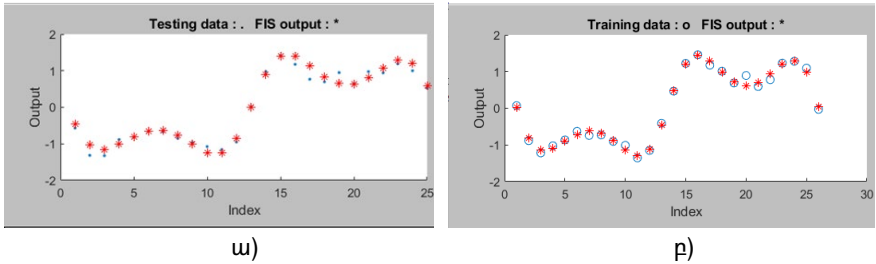
Ոչ հստակ համակարգի մուտքային հաջորդականությունները ձևավորվում են էլեկտրաշրժիչի անկյունային արագության ընթացիկ և ստացված ազդանշանների հիման վրա (նկ. 2.): Կարգավորիչի ելքային ազդանշանը ձևավորվում է հաշվի առնելով ուշացման աստիճանը:



Նկ. 2. Ոչ հստակ կարգավորիչի կառուցվածքային սխեման

Դիտարկվող էլեկտրաբանեցման համակարգի մեխանիկական մասի համար մուտքային ազդանշանների թիվը սահմանվել է 12: Անորոշ տրամաբանությամբ կարգավորիչի մուտքային և ելքային ազդանշանների հաջորդականությունների հիման վրա ձևակերպվել է 16 կանոն: Մոդելի ուսուցումն ու թեստավորումն իրականացվել է հավաքագրված 2000 տվյալների հիման վրա (բաշխումը՝ 50% ուսուցում, 25% թեստավորում, 25% ստուգում): Ուսուցման գործընթացը կայունացել է 40-րդ ցիկլում՝ ապահովելով $RMSE = 0.0013$ ճշտություն: Ուսուցման

և թեստավորման սխալները կազմել են համապատասխանաբար 0.015 և 0.024, ինչը փաստում է մոդելի բարձր համարժեքությունը (նկ. 3):



Նկ. 3. (ա) թեստավորման և (բ) ուսուցման տվյալները

ANFIS-ի հնգաշերտ ճարտարապետությունն իրականացնում է մուտքերի ֆազիֆիկացիա, Գաուսյան պատկանելության ֆունկցիաների պարամետրերի հարմարեցում (սխալի հետադարձ տարածման մեթոդով), կանոնների ակտիվացում և Sugeno-տիպի ելքի ձևավորում (դեֆազիֆիկացիա): Մշակված ադապտիվ կառավարման համակարգը փորձարկվել է առածական օղակների կապի կոշտության տարբեր արժեքների համար, որոնք համեմատվել են նույն տվյալներով Համեմատական ինտեգրող դիֆերենցող(ՀԻԴ) կարգավորիչով կառավարվող համակարգի արդյունքների հետ (աղ. 1):

Աղյուսակ 1

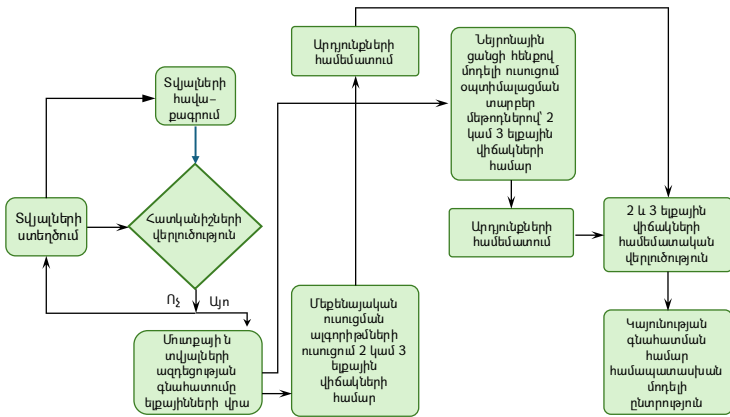
ՀԻԴ կարգավորիչով և «Նեյրո-ֆազի» մոդելով ադապտիվ կառավարման համակարգերի աշխատանքային ռեժիմները բնութագրող պարամետրեր

Կապի կոշտության արժեքները, նմ/նսդ	Կառավարման համակարգի տեսակը	Աճման ժամանակը, վ	Գերկարգավորում, %	Կարգաբերման ժամանակը, վ
I $c_{12} = 560000$ $c_{23} = 420000$	ՀԻԴ	1.4	6.8	6
II $c_{12} = 560000$ $c_{23} = 1260000$				
III $c_{12} = 560000$ $c_{23} = 140000$	Նեյրո-ֆազի	0.9	6.2	2.4
I $c_{12} = 186667$ $c_{23} = 420000$	ՀԻԴ	1.5	7	6.1
II $c_{12} = 186667$ $c_{23} = 1260000$				
III $c_{12} = 186600$ $c_{23} = 140000$	Նեյրո-ֆազի	0.93	6.4	2.5

Երրորդ գլխում մշակվել են դինամիկ բեռով էլեկտրաբանեցման համակարգի մեխանիկական մասի կայունության պայմանների գնահատման

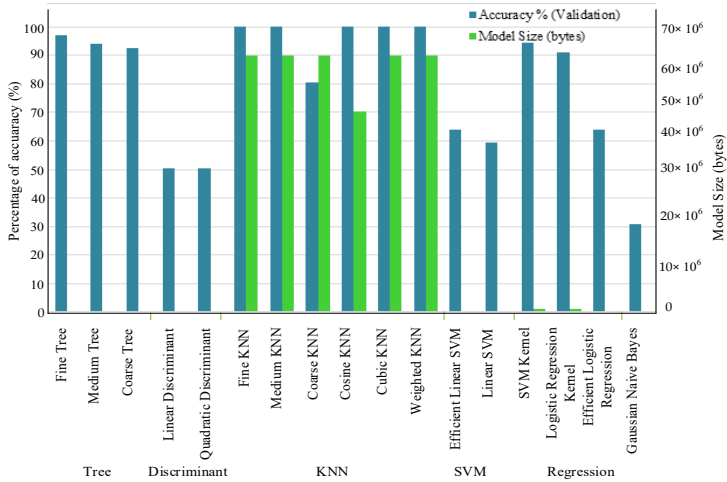
մաթեմատիկական մոդել, արհեստական նեյրոնային ցանցի հիմքով անկայունության վիճակի հայտնաբերման ալգորիթմ և սինխրոն մեքենայի համար գրգռման նեյրոցանցային կանխատեսող կարգավորիչ համակարգ:

Համակարգի կայունությունը գնահատվել է երեք հիմնական վիճակների (անկայուն, կայուն առանց պաշարի և կայուն պաշարով) համար՝ կիրառելով երկու և երեք ելքային ազդանշաններով մոդելներ: Ստացված կայունության պայմանների հենքով ձևավորվել է տվյալների բազա, կատարվել է մուտքային տվյալների ազդեցության վերլուծություն, նեյրոնային ցանցերի ու մեքենայական ուսուցման ալգորիթմների համեմատական գնահատում և կայունության որոշման գործիքի մշակում (նկ. 4): Նկ. 4-ում ներկայացված ալգորիթմը փորձարկվել է հանքաքարի աղացի էլեկտրաբանեցման համար, քանի որ, այն դինամիկ բեռով աշխատող համակարգի տիպիկ օրինակ է: Էլեկտրաբանեցման համակարգի կայունության գնահատման համար ստեղծվել է 500,000 նմուշից բաղկացած տվյալների բազա (8 մուտքային պարամետրերով): ANOVA մեթոդի կիրառմամբ վերլուծվել է պարամետրերի ազդեցությունը կայունության պաշարի վրա՝ հաստատելով պտտման արագության որոշիչ դերը կայուն ռեժիմների ապահովման գործում:

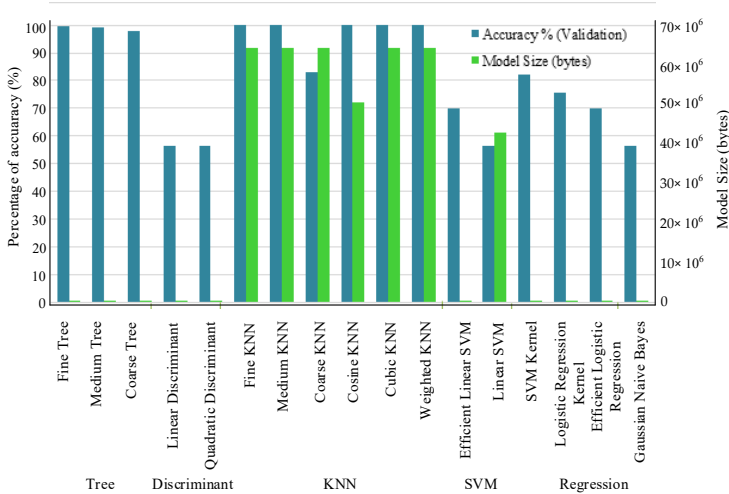


Նկ. 4. Էլեկտրաբանեցման համակարգի մեխանիկական մասի անկայունության վիճակի հայտնաբերման ալգորիթմ

Համակարգի վիճակի դասակարգումն իրականացվել է երկու մոտեցմամբ՝ բինար (կայուն/անկայուն) և բազմադաս (անկայուն, կայուն պաշարով և առանց պաշարի): Լավագույն լուծումը գտնելու համար համեմատվել են MATLAB-ի Classification Learner Toolbox-ի 6 դասական ալգորիթմներ (նկ. 5, նկ. 6) և տարբեր կառուցվածքի նեյրոնային ցանցեր:



Նկ. 5. Անկայունության, կայունության պաշարով և առանց պաշարի ազդարարման մոդելի ճշգրտությունը և ծավալը, մեքենայական ուսուցման փարբեր ալգորիթմների համար



Նկ. 6. Անկայունության և կայունության ազդարարման մոդելի ճշգրտությունը և ծավալը մեքենայական ուսուցման փարբեր ալգորիթմների համար

Ներդրանքային մոդելների հետազոտման փուլում կիրառվել է 10 մուտքային ներդրում և մեկ թաքնված շերտով ճարտարապետություն: Ըստ խնդրի տիպի՝

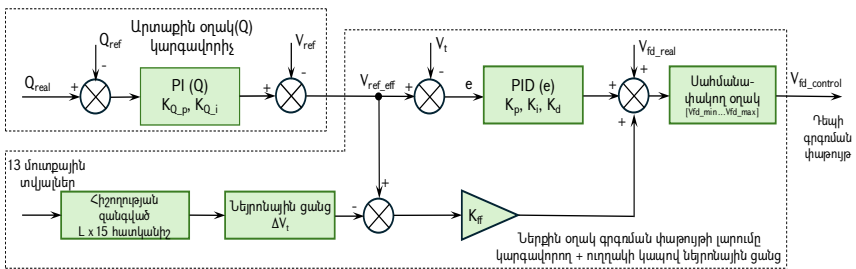
ելքային շերտում կիրառվել են Sigmoid (քինար դասակարգման համար) կամ SoftMax (բազմադաս դասակարգման համար) ակտիվացման ֆունկցիաները: Համակարգի արտադրողականության օպտիմալացման նպատակով փորձարկվել են 9 տարբեր ճարտարապետություններ և 5 գրադիենտային օպտիմալացման մեթոդներ (Adam, RMSprop, SGD, AdaDelta, Nadam):

Հետազոտությունները ցույց են տվել, որ նեյրոնային ցանցերի կիրառումը բազմադաս դասակարգման (երեք վիճակների ազդարարում) համար տվյալ խնդրում արդյունավետ չէ. տվյալների բազայում «առանց պաշարի կայուն» վիճակի սակավությունը (9.2%) նվազեցնում է ճշտությունը և երկարացնում ուսուցման տևողությունը: Փոխարենը, քինար դասակարգման (կայուն/անկայուն) մոդելներն ապահովում են զգալիորեն բարձր ճշտություն և արագագործություն: Օպտիմալացման գրադիենտային մեթոդների համեմատականը բացահայտել է.

Առավելագույն ճշտություն (96.65%) ստացվել է Nadam մեթոդի կիրառմամբ՝ 20 նեյրոնանոց թաքնված շերտի և Sigmoid ակտիվացման ֆունկցիայի պարագայում (70 ցիկլից սկսած):

Ի տարբերություն մեքենայական ուսուցման դասական ալգորիթմների, նեյրոնային ցանցերը դրսևորում են կայուն բնութագրիչներ կանխատեսման արագության և հիշողության ծավալի տեսանկյունից: Թեև թաքնված շերտի նեյրոնների քանակն ազդում է ճշտության վրա, այդ փոփոխությունը չի գերազանցում 1.7%-ը (RMSprop-ի դեպքում):

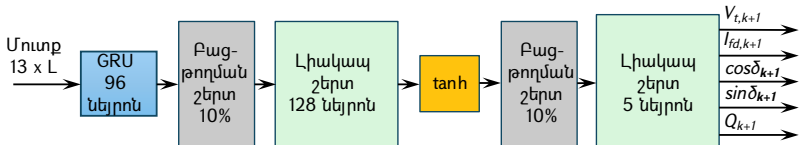
Հետազոտության շրջանակներում մշակվել է սինխրոն շարժիչի գրգռման համակարգի հիբրիդային «NN-augmented PID» կարգավորիչ: Համակարգի հուսալիությունն ու արագագործությունն ապահովվում է նեյրոնային ցանցի (ուղիղ կապի ճյուղ) և դասական ՀԻԴ կարգավորիչի (հետադարձ կապի ճյուղ) համակցմամբ (նկ. 7.): Նեյրոցանցային բաղադրիչը ծառայում է որպես թվային երկվորյակ (Digital Twin), որն իրականացնում է ստատորի լարման և ռեակտիվ հզորության մեկ քայլ առաջ կանխատեսում:



Նկ. 7. Նեյրոցանցային կարգավորիչի կառուցվածքային սխեման

MATLAB-Simulink միջավայրում հավաքագրվել է շուրջ 580,000 նմուշ, որոնք ներառում են 13 դինամիկ հատկանիշներ (բեռի անկյուն, լարում, հզորություն և դրանց ածանցյալները):

Կիրառվել է GRU (Gated Recurrent Units) կրկնվող բջիջներով ճարտարապետություն (նկ. 8) (96 նեյրոն), որն ունի «հիշողության» հատկություն և թույլ է տալիս մշակել ժամանակային շարքերը 10 քայլ հետագծով: Համակարգն ունի նաև Dropout (10%) և Fully Connected (128 նեյրոն) շերտեր:



Նկ. 8. երկվորյակ նեյրոնացային մոդելի կառուցվածքը

Ուսուցումն իրականացվել է Adam օպտիմալացման ալգորիթմով (20 ցիկլ), ինչի արդյունքում գրանցվել է MSE = 0.144 ցածր սխալանք:

Մոդելը ցուցաբերել է կանխատեսման բարձր ճշտություն՝ դետերմինացիայի գործակիցը հասնում է 0.955-ի: Բազմաքայլ (50 քայլ) կանխատեսման դեպքում ստատորի լարման սխալը կազմել է ընդամենը 0.0056:

Առաջարկվող նեյրոնային կարգավորիչը փորձարկվել է «MATLAB-Simulink» միջավայրում կառուցված սինխրոն շարժիչի կառավարման համակարգում: Ստացված արդյունքները ցույց են տալիս, փոփոխվող բեռնվածության դեպքում նեյրոնացային կանխատեսող կարգավորիչի առավելություններն ավանդական ՀԻԴ կարգավորիչի նկատմամբ: Դա արտահայտվում է կայունացման ժամանակի և գերկարգավորման փոքրացմամբ, ինչպես նաև մինչ կայունացումը տատանումների ամպլիտուդի փոքրացմամբ (աղ. 2):

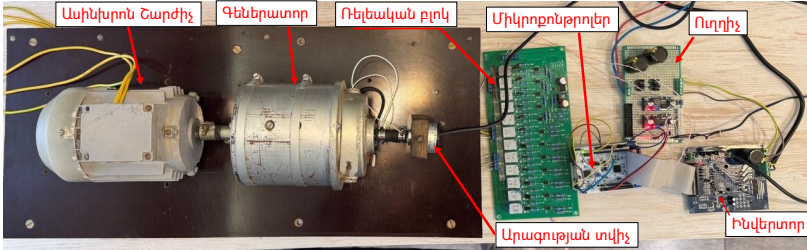
Աղյուսակ 2

ՀԻԴ կարգավորիչով և կանխատեսող նեյրոնային կարգավորիչով համակարգերի աշխատանքային ռեժիմները բնութագրող պարամետրեր

Կարգավորիչի տեսակը	Կարգավորման ժամանակը, վ	Գերկարգավորում, %	Աճման ժամանակը, վ
ՀԻԴ կարգավորիչի	11.997	21.6389	2.9685
Նեյրոն + ՀԻԴ կարգավորիչ	6.394	18.45	1.91

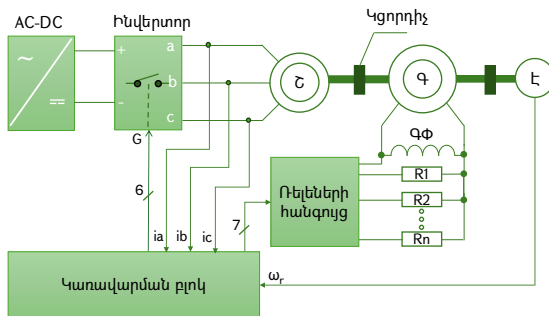
Չորրորդ գլխում Կառուցվել է փոփոխվող բեռով էլեկտրաբանեցման կառավարման փորձնական մոդել՝ նեյրոնային ցանցի հենքով (նկ. 9): Դրա

իրականացման համար մշակվել է համակարգի էլեկտրական սխեման, միջրոքոնթրոլների ներդրված ծրագիրը և օպերատորի համար համակարգի կառավարման ծրագիր:



Նկ.9. Էլեկտրաբանեցման համակարգի փորձարկման մոդել

Համակարգն իրականացնում է անսինխրոն շարժիչի (ԱՇ) վեկտորային կառավարում, որի ֆունկցիոնալ սխեման բերված է նկ. 10-ում՝ օգտագործելով միաֆազ ցանցից սնվող ուղղիչ-ինվերտորային կերպափոխիչ: Միկրոքոնթրոլները, հիմնվելով հոսանքի և դիրքի տվյալների վրա, հաշվարկում է հոսանքի վեկտորի i_d լայնական և i_q երկայնական բաղադրիչները՝ ձևավորելով ինվերտորի բանալիները կառավարող ԼԻՄ (PWM) ազդանշաններ: Որպես մեխանիկական բեռ ծառայում է ԱՇ-ին միացված հաստատուն հոսանքի գեներատորը: Ադապտիվ կառավարման ալգորիթմների արագագործությունը ստուգելու նպատակով բեռնվածքի մոմենտը փոփոխվում է դիսկրետ եղանակով (7 տարբերակ)՝ ռելեների միջոցով գեներատորի ելքային շղթայում դիմադրությունների միացմամբ:



Նկ.10. Վեկտորային կառավարման ֆունկցիոնալ սխեմա

PyTorch մեքենայական ուսուցման գրադարանի միջոցով իրականացվել է նեյրոնային ցանցի սինթեզն ու ուսուցումը, որի արդյունքում 220 ցիկլի ընթացքում ստացվել են կշիռների օպտիմալ մատրիցներ՝ ապահովելով դետերմինացիայի

$R^2 = 0.757$ գործակից և 0.02 Ա կանխատեսման միջին սխալ: Մոդելը STMicroelectronics-ի X-CUBE-AI գործիքակազմի միջոցով փոխակերպվել է միկրոքոնթրոլլերի համար օպտիմալացված C լեզվով ծրագրային կոդի, որը զբաղեցրել է ընդամենը 1 կբ հաստատուն և 96 բայթ օպերատիվ հիշողություն, ինչը հնարավորություն է տալիս այն արդյունավետորեն ներդնել սահմանափակ ռեսուրսներ ունեցող ներդրված համակարգերում:

Նեյրոնային և ավանդական համեմատող – ինտեգրող (<Ի) կարգավորիչների համեմատական վերլուծության նպատակով իրականացվել են փորձարարական հետազոտություններ, որոնք ներառել են ռոտորի պտտման արագության փոփոխություններ տարբեր միջակայքերում (0-500-0 և 0-1000-0 պտ/ր)՝ գերկարգավորման ու կայունացման ժամանակների գնահատմամբ, ինչպես նաև համակարգի արձագանքի ուսումնասիրություն բազմաքայլ արագության փոփոխությունների և հաստատուն արագության պայմաններում բեռնվածքի փոփոխության նկատմամբ (աղ. 3):

Աղյուսակ 3

ՀԻ և նեյրոցանցային կարգավորիչով համակարգերի բնութագրիչների քանակական արդյունքները

Փորձնական տվյալներ	Ցուցանիշ	ՀԻ կարգավորիչ	ՀԻ + ՆՑ (<Իբրիդ)	Լավարկում (%)
1000 պտ/ր	Գերկարգավորում	26%	14%	46%
	Կայունացման ժամանակ	1.3 վ	0.9 վ	31%
500 պտ/ր	Գերկարգավորում	43%	18%	58%
	Կայունացման ժամանակ	1.3 վ	0.7 վ	46%
Դինամիկ	Հետևման սխալ	Բարձր	Ցածր	~45%

ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆ

1. Էլեկտրաբանեցման կառավարման համակարգերին ներկայացվող մարտահրավերների համակողմանի ուսումնասիրության, ինչպես նաև դիտարկվող հիմնախնդրին վերաբերող հայտնի աշխատությունների վերլուծության արդյունքում հիմնավորվել է ինտելեկտուալ մոտեցումների կիրառմամբ բարձր արդյունավետությամբ կառավարման համակարգի բարելավմանը միտված խնդիրների լուծման հրատապությունը:

2. Մշակվել և հետագա կիրառման համար առաջարկվել է անորոշ պայմաններում աշխատող մեխանիզմների էլեկտրաբանեցման համակարգի

մեխանիկական մասի ադապտիվ կառավարման նոր մոտեցում, որի բարձր արագագործությունը, ճշտությունը և ադապտիվությունն իրագործվում է ի շնորհիվ համակարգում օգտագործվող ոչ տրամաբանական էտալոնային մոդելի և ՀԻԴ կարգավորիչների համաձայնեցված աշխատանքի, ինչպես նաև նեյրոնային ցանցի արագագործ և ճշգրիտ ուսուցման կարողությունների: Մշակված համակարգն ունի գերազանց ցուցանիշներ: Մասնավորապես դասական կարգավորման համեմատ այն ապահովում է աճման ժամանակի 33%, կարգաբերման ժամանակի 40% և գերկարգավորման 8.8% նվազում:

3. Կառավարման բարելավման համար առաջարկվող «նեյրո-ֆազի» ադապտիվ համակարգի արդյունավետությունը հիմնավորվել է, ինչպես երկզանգված, այնպես էլ եռազանգված էլեկտրաբանեցման համակարգի մեխանիկական մասի դիտարկումների և հետազոտությունների հիման վրա: Ի տարբերություն հայտնի ադապտիվ կառավարման համակարգերի, որոնք հիմնականում կիրառելի են կոնկրետ մեխանիզմի համար, ատենախոսական աշխատանքում առաջարկված մոդելն ապահովում է մեխանիկական տատանումների զսպման լավագույն արդյունքներ՝ անորոշ պայմաններում աշխատող և տարբեր օրենքներով փոփոխվող մեխանիզմների կառավարման համար:

4. Ստացվել է «էլեկտրաբանեցման շարժիչ - մեխանիզմ» համակարգի կայունության պայմանների հայտնաբերման և գնահատման մաթեմատիկական մոդել: Այն հաջողությամբ օգտագործվել է էլեկտրաբանեցման համակարգի կառավարման բարելավմանը միտված անկայուն վիճակի հայտնաբերման արհեստական նեյրոցանցի ուսուցման համար անհրաժեշտ տվյալների բազայի ձևավորման համար:

5. Մեքենայական ուսուցման հնարավորությունների կիրառմամբ մշակել է էլեկտրաբանեցման համակարգի մեխանիկական մասի կայունության վիճակի գնահատման մոդելներ՝ հաշվի առնելով, համակարգի անկայուն, կայուն առանց պաշարի և կայուն՝ պաշարով վիճակներում հայտնվելու հնարավորությունները: Ստացված փորձնական արդյունքների համեմատական վերլուծությունը արձանագրել է, որ

- կայունության գնահատման բարձր արտադրողականությամբ նեյրոցանցային մոդելի մշակման համար անհրաժեշտ է, որ նրա ճարտարապետությունը, ակտիվացման ֆունկցիան և ուսուցման ալգորիթմը ընտրվեն համաձայնեցված,

- տարբեր համակարգում համաձայնեցված աշխատելու հնարավորությամբ առանձնանում են արհեստական նեյրոնային ցանցի և մեքենայական ուսուցման ծառի հենքով ստեղծված մոդելները,

- համակարգի առանց կայունության պաշարի ռեժիմում հայտնվելու հավանականությունը փոքր է՝ մինչև 9,2%:

6. Մշակվել է սինխրոն մեքենայի գրգռման կարգավորման «Արհեստական նեյրոնային ցանց + ՀԻԴ» հիբրիդային մոդելը, որը շնորհիվ կանխատեսող մեխանիզմի ֆունկցիա կատարող փոխարինող նեյրոցանցի և ավանդական ՀԻԴ կարգավորիչի համաձայնեցված աշխատանքի բարձրացնում է համակարգի ճշտությունն ու հուսալիությունը: Առաջարկված մոդելը շնորհիվ փոխարինող ցանցի համար առաջարկված ճարտարապետության և ուսուցման ալգորիթմի մոտարկում է էլեկտրական մեքենայի բարդ դինամիկական պրոցեսները, ինչի շնորհիվ ավանդական ՀԻԴ կարգավորիչների համեմատ, շուրջ 39%-ով կրճատում է հաստատված ռեժիմ մտնելու ժամանակը, 15%-ով նվազեցնում է գերկարգավորումը և 36%-ով՝ աճման ժամանակը:

7. Մշակվել է փոփոխվող բեռով էլեկտրաբանեցման համակարգի փորձնական մոդել արհեստական նեյրոնային ցանցի հենքով, ինչը գիտափորձի միջոցով կոնկրետ օրինակի համար փաստել է խելացի մոդելի կիրառման արդյունավետությունը:

Ատենախոսության թեմայով հրատարակվել են հետևյալ աշխատությունները

1. Baghdasaryan M., Ulikeyan A., **Hovhannisyan V.** Adaptive Control of the Mechanical Part of the Electric Drive System Using a Reference Model of Neuro-Fuzzy Logic // International Review of Electrical Engineering (IREE). - 2024. - vol. 19, №5. - P. 421-431. doi:10.15866/iree.v19i5.24886, (Scopus)
2. Baghdasaryan M., **Hovhannisyan V.** Stability Assessment of an Ore Mill Electric Drive Using Machine Learning // HighTech and Innovation Journal. - 2024. - vol. 5, № 2. - P. 213-230, doi:10.28991/HIJ-2024-05-02-01. (Scopus)
3. **Hovhannisyan V.** The Improvement of The Electric Drive System Operating Dynamic Load Using an Artificial Neural Network // Proceedings NPUA Electrical Engineering, Energetics. - 2024. - №2. - P. 49-59, doi:10.53297/18293328-2024.2-49
4. Багдасарян М., Бабаян А., Аветисян А., **Оганнисян В.** Разработка Математической Модели для Выявления и Оценки Условий Устойчивости Системы // Вестник НПУА: Электротехника, энергетика. – 2023. - №1. - С. 38-49. doi: 10.53297/18293328-2023.1-38
5. Baghdasaryan M., **Hovhannisyan V.**, Hakobyan T. Evaluating the Possibilities of Applying an Artificial Neural Network for Control and Diagnosis of The Electric Drive Systems // Proceedings NPUA Electrical Engineering , Energetics. – 2022. - №1. - P. 9-27, doi: 10.53297/18293328-2022.1-9
6. Айрапетян А., Багдасарян М., Варданян Л., **Оганнисян В.** Трехфазный Автономный Инвертор Тока На Тиристорах С Двумя Группами Конденсаторов // Вестник НПУА: Электротехника, энергетика. – 2022, №2. - С. 30-40. doi: 10.53297/18293328-2022.2-30

ВАРДАН ДАВИДОВИЧ ОГАННИСЯН

УЛУЧШЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

РЕЗЮМЕ

Промышленные процессы, возникающие в условиях переменной нагрузки, требуют эффективного и надежного управления электроприводом. Упругие колебания, возмущения, отклонения напряжения и изменения нагрузки могут привести к снижению устойчивости, ухудшению динамических характеристик и уменьшению эффективности системы. Поэтому разработка интеллектуальных и адаптивных методов управления такими системами имеет важное научное и практическое значение.

На основе проведенных ранее в данной области исследований разработаны адаптивные и оптимальные методы управления, алгоритмы регулирования механической части электромеханических систем, а также усовершенствованные подходы к управлению возбуждением синхронных машин. Однако большинство из них решают лишь отдельные частные задачи и не обеспечивают достаточной эффективности в условиях изменяющихся режимов работы и неопределенности. Исходя из вышесказанного, обоснована актуальность применения искусственных нейронных сетей, нейро-нечётких моделей и прогнозирующих интеллектуальных регуляторов для совершенствования систем электропривода с переменной нагрузкой.

Цель работы. Целью диссертации является совершенствование системы управления электроприводом, работающим при переменной нагрузке, путем разработки и исследования моделей на основе искусственных нейронных сетей, предназначенных для подавления колебаний механической части, выявления неустойчивых режимов работы и совершенствования управления возбуждением синхронных машин.

Научная новизна. Разработана эталонная модель на основе нейро-нечёткой логики для управления механической частью двухмассовых и трехмассовых систем электропривода, работающих в условиях неопределенности. Модель позволяет системе адаптироваться к внешним изменениям и обеспечивает высокое быстродействие, точность, адаптивность и малое перерегулирование.

Предложена математическая модель оценки условий устойчивости системы электропривода с динамической нагрузкой, учитывающая возможность перехода синхронного двигателя в асинхронные режимы работы.

Создана модель выявления неустойчивого состояния системы электропривода с использованием искусственной нейронной сети, обеспечивающая высокую производительность и возможность согласованной работы в системе управления.

Разработан нейросетевой прогнозирующий регулятор системы возбуждения синхронных машин. Благодаря высокому быстродействию и малому перерегулированию он может применяться для синхронных двигателей и генераторов различной мощности и в различных условиях эксплуатации.

Основные выводы

1. В результате комплексного изучения проблем, стоящих перед системами управления электроприводами, а также анализа известных работ по рассматриваемой тематике обоснована актуальность совершенствования управления электроприводами с переменной нагрузкой на основе интеллектуальных подходов.
2. Разработан новый подход к адаптивному управлению механической частью систем электропривода механизмов, работающих в условиях неопределенности. По сравнению с классическим управлением, модель обеспечивает уменьшение времени нарастания на 33%, времени регулирования - на 40% и перерегулирования - на 8,8%.
3. Эффективность предложенной нейро-нечеткой адаптивной системы подтверждена как для двухмассовых, так и для трехмассовых систем электропривода. В отличие от известных адаптивных систем, применимых в основном к конкретным механизмам, предложенная в диссертации модель обеспечивает более эффективное подавление механических колебаний при управлении механизмами, работающими в условиях неопределенности и изменяющихся законов нагрузки.
4. Получена математическая модель выявления и оценки условий устойчивости системы «электродвигатель – механизм». Модель успешно использована для формирования базы данных, необходимой для обучения искусственной нейронной сети, предназначенной для выявления неустойчивых состояний.
5. С применением методов машинного обучения разработаны модели оценки состояния устойчивости механической части системы электропривода с учетом возможности нахождения системы в неустойчивом состоянии, устойчивом состоянии без запаса и устойчивом состоянии с запасом. Сравнительный анализ экспериментальных результатов показал, что для разработки высокопроизводительной нейросетевой модели оценки устойчивости необходимы согласованный выбор архитектуры, а также функции активации и алгоритма обучения, а модели, построенные на основе искусственных нейронных сетей и деревьев решений, особенно выделяются возможностью согласованной работы в различных системах. Также установлено, что вероятность работы системы без запаса устойчивости не превышает 9,2%.
6. Разработана гибридная модель регулирования возбуждения синхронной машины «Искусственная нейронная сеть + ПИД». Благодаря согласованной работе прогнозирующей замещающей нейронной сети и традиционного ПИД-регулятора, предложенная модель повышает точность и надежность системы, сокращает время установления примерно на 39%, уменьшает перерегулирование на 15% и время нарастания на 36% по сравнению с традиционным ПИД-регулированием.
7. Разработана экспериментальная модель системы электропривода с переменной нагрузкой на основе искусственной нейронной сети. Результаты экспериментов подтвердили эффективность практического применения интеллектуальных моделей управления.

**IMPROVEMENT OF ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEMS WITH
VARIABLE LOAD USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS**

SUMMARY

Industrial processes operating under variable loads require efficient and reliable electric drive control. Elastic oscillations, disturbances, voltage deviations, and load variations may reduce stability, worsen dynamic performance, and decrease the system efficiency. Therefore, the development of intelligent and adaptive control methods for such systems is of significant scientific and practical importance.

Studies in this field have proposed adaptive and optimal control methods, algorithms for regulating the mechanical part of electromechanical systems, and improved excitation control approaches for synchronous machines. However, most of them address only specific tasks and do not ensure sufficient performance under varying operating conditions and uncertainty. This highlights the relevance of applying artificial neural networks, neuro-fuzzy models, and predictive intelligent controllers to improve variable-load electric drive systems.

The goal of the work. The goal of the dissertation is to improve the control system of an electric drive operating under variable load by developing and testing artificial-neural-network-based models intended to suppress oscillations in the mechanical part, detect unstable operating states, and improve the excitation control of synchronous machines.

Scientific novelty. A reference neuro-fuzzy logic model for controlling the mechanical part of two-mass and three-mass electric drive systems operating under uncertain conditions has been developed. The model enables the system to adapt to external changes and ensures high speed, accuracy, adaptability and low overshoot.

A mathematical model for evaluating the stability conditions of an electric drive system under dynamic load has been developed, considering the possibility of a synchronous motor entering asynchronous operating modes.

A model for detecting the unstable state of an electric drive system using an artificial neural network has been developed, ensuring high performance and the possibility of coordinated operation within the control system.

A neural-network predictive controller for the excitation system of synchronous machines has been developed. Due to its high speed and low overshoot, it can be applied to synchronous motors and generators of different power ratings and operating conditions.

Main conclusions. Based on a comprehensive study of the challenges posed to electric drive control systems and an analysis of the relevant literature, the urgency of improving variable-load electric drive control by means of intelligent approaches has been substantiated.

1. A new approach to adaptive control of the mechanical part of electric drive systems for mechanisms operating under uncertain conditions has been developed. In comparison with classical control, it provides a 33% reduction in rise time, a 40% reduction in settling time and an 8.8% reduction in overshoot.

2. The effectiveness of the proposed neuro-fuzzy adaptive system has been confirmed for both two-mass and three-mass electric drive systems. In contrast to the known adaptive

systems intended mainly for specific mechanisms, the proposed model provides more effective damping of mechanical oscillations for mechanisms operating under uncertainty and variable load laws.

3. A mathematical model for identifying and evaluating the stability conditions of the “electric drive motor – mechanism” system has been obtained. It has been successfully used to generate the database required for training an artificial neural network intended to detect unstable states.

4. By applying machine-learning methods, models for evaluating the stability state of the mechanical part of the electric drive system have been developed, considering unstable, stable without margin and stable with margin conditions. The comparative analysis has shown that the development of a high-performance neural-network model requires coordinated selection of architecture, activation function and training algorithm, while models based on artificial neural networks and decision trees are especially suitable for coordinated operation in different systems. It has also been established that the probability of operation without stability margin does not exceed 9.2%.

5. A hybrid “Artificial Neural Network + PID” model for controlling the excitation of a synchronous machine has been developed. Owing to the coordinated operation of the predictive surrogate neural network and the conventional PID controller, the proposed model improves the accuracy and reliability, reduces the settling time by about 39%, overshoot by 15%, and rise time by 36% compared with traditional PID control.

6. An experimental model of a variable-load electric drive system based on an artificial neural network has been developed. The experimental results have confirmed the effectiveness of applying intelligent control models in practice.

