

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

**ՄՆՈՅԱՆ ՏԻԳՐԱՆ ՆՈՐԻԿԻ**

**ՀԱՆՔԱՔԱՐԻ ԱՂԱՑԻ ԷԼԵԿՏՐԱԲԱՆԵՑՄԱՆ ՍԻՆԽՐՈՆ ՇԱՐԺԻՉԻ  
ԱՆԿԱՆՈՆ ԱՇԽԱՏԱՆՔԱՅԻՆ ՌԵԺԻՄՆԵՐԻՑ ՊԱՇՏՊԱՆՈՒԹՅԱՆ  
ՄԵԹՈԴՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

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

Ս Ե Ղ Մ Ա Գ Ի Ր

ԵՐԵՎԱՆ 2018

---

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

**МНОЯН ТИГРАН НОРИКОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ПРИВОДНОГО СИНХРОННОГО  
ДВИГАТЕЛЯ РУДОРАЗМОЛЬНОЙ МЕЛЬНИЦЫ ОТ АНОРМАЛЬНЫХ  
РЕЖИМОВ РАБОТЫ**

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 2018

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում (ՀԱՊՀ)

Գիտական ղեկավար՝ տ.գ.դ. Մ.Ք.  
Բաղդասարյան  
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տ.գ.դ. Մ.Ա. Արամյան  
տ.գ.թ. Վ.Ն.  
Սարգսյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ «Էներգետիկայի գիտահետազոտական  
ինստիտուտ» ՓԲԸ

Պաշտպանությունը կայանալու է 2018թ. հունիսի 20-ին, ժամը 15<sup>00</sup> -ին Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում գործող 038 մասնագիտական խորհրդի նիստում (0009, Երևան, Տերյան փող., 105):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ գրադարանում:  
Սեղմագիրն առաքված է 2018թ. մայիսի 19-ին:

Մասնագիտական խորհրդի  
Գիտական քարտուղար, տ.գ.դ.՝ Գ.Վ.  
Բարեղամյան

---

Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом университете  
Армении

Научный руководитель: д.т.н. М.К.  
Багдасарян  
Официальные оппоненты: д.т.н. М.А. Арамян  
к.т.н. В.Н.  
Саргсян  
Ведущая организация: ЗАО “Научно-исследовательский институт  
энергетики”

Защита диссертации состоится 20-го июня 2018г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании Специализированного совета 038, действующего при Национальном политехническом университете Армении, по адресу: 0009, Ереван, ул. Теряна, 105.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.

Автореферат разослан 19-го мая 2018г.

Ученый секретарь

Специализированного совета, д.т.н.

Г.В.

Барегамян

## ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ՆԿԱՐԱԳԻՐԸ

**Թեմայի արդիականությունը:** Տեխնոլոգիական գործընթացն ապահովող էլեկտրաբանեցման շարժիչների անաշխատունակությունը կարող է խաթարել ողջ տեխնոլոգիական գործընթացը՝ առաջացնելով տնտեսական լուրջ կորուստներ: Այս խնդիրն առավել կարևորվում է հզոր էլեկտրաբանեցման շարժիչներ օգտագործող էներգատար տեխնոլոգիական գործընթացների դեպքում, ինչպիսին է հանքաքարի մանրացման տեխնոլոգիական գործընթացը: Մետաղական և ոչ մետաղական հանքաքարերի մանրացման տեխնոլոգիական գործընթացում օգտագործվող սինխրոն շարժիչներն էլեկտրաէներգիայի հիմնական սպառողներն են: Շահագործվող բանեցման սինխրոն շարժիչի անկանոն աշխատանքը կարող է խախտել տեխնոլոգիական գործընթացի բնականոն ընթացքը, դրանով իսկ նպաստելով տեխնիկատնտեսական ցուցանիշների փոփոխմանը, ինչպես նաև շարժիչի վնասմանը:

Սինխրոն շարժիչի անկանոն աշխատանքային ռեժիմների առաջացման պատճառներն ու դրանց դրսևորումները բազմաթիվ են, և առանձին դեպքերում անկանոն աշխատանքային ռեժիմների առաջացումը պայմանավորված է էլեկտրաբանեցման շարժիչի շահագործմանը ներկայացվող պահանջներով և առանձնահատկություններով: Այդ իսկ պատճառով էլ առավել մեծ գիտատեխնիկական հետաքրքրություն են ներկայացնում այն դեպքերը, որոնք առավել մեծ ազդեցություն ունեն արտադրական պրոցեսի վրա:

Ելնելով վերոնշյալից և հաշվի առնելով, որ հանքաքարի աղացի աշխատանքն ապահովող էլեկտրաբանեցման շարժիչի աշխատանքային ռեժիմի փոփոխությունը պայմանավորված է դրա վրա ազդող ներքին և արտաքին գործոններով և որոնք կարող են հանգեցնել էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի կանոնավոր աշխատանքի խաթարմանը, անհրաժեշտություն է առաջանում անդրադառնալ հանքաքարի աղացի էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի անկանոն աշխատանքային ռեժիմների բացահայտմանը և դրա վթարային դրսևորումների կանխմանը վերաբերող խնդիրներին:

Սինխրոն շարժիչի անկանոն աշխատանքային ռեժիմներին և դրանցից պաշտպանության հնարավորություններին նվիրված հայտնի աշխատությունների վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ զգալի փորձ է կուտակվել սինխրոն շարժիչների աշխատանքային ռեժիմների հետազոտման ու վթարների կանխարգելմանը վերաբերող տեսական և փորձնական հետազոտությունների, և պաշտպանության մեթոդների ստեղծման ուղղությամբ: Հայտնի աշխատություններում հաշվի չեն առնվում տեխնոլոգիական գործոնների ազդեցությունները, դրանցով պայմանավորված ընթացիկ կարգավորման հնարավորությունները: Ստացված արդյունքները հիմնականում կիրառելի են էներգահամակարգում, և հաշվի առնելով, որ դրանցում չեն հաշվառվում դիտարկվող համակարգի շահագործման առանձնահատկությունները՝ հանքաքարի աղացի էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչների հուսալի և արդյունավետ աշխատանքի ապահովման նպատակով դրանց կիրառումն անարդյունավետ է: Նկատի ունենալով, որ առկա են հանքաքարի աղացի էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի անկանոն աշխատանքային ռեժիմների առաջացման պատճառների բացահայտման, գնահատման և դրանց բացասական դրսևորումների կանխման զգալի հիմնախնդիրներ, որոնց լուծմանը նպատակառոդված մեթոդների մշակումը և դրա հիման վրա անկանոն աշխատանքային ռեժիմների անթույլատրելի դրսևորումների կանխման միջոցի առաջադրումն արդիական խնդիր է:

**Աշխատանքի նպատակը:** Ատենախոսության նպատակը հանքաքարի աղացի էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի կանոնավոր աշխատանքի ապահովմանը միտված շարժիչի աշխատանքային ռեժիմների հետազոտման և գնահատման մեթոդների և ալգորիթմների մշակումն է տեխնոլոգիական գործոնների հաշվառումով և դրանց արդյունքների հիման վրա շարժիչի անկանոն աշխատանքային ռեժիմների կանխման միջոցի առաջադրումը:

Աշխատանքում առաջադրված նպատակն իրագործելու համար լուծվել են հետևյալ խնդիրները.

- բանեցման սինխրոն շարժիչի տեխնիկական վիճակի վրա ազդող տեխնոլոգիական առանձնահատկություններով և էներգետիկական ցուցանիշներով պայմանավորված հիմնական գործոնների վերլուծություն,

- էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի անկանոն աշխատանքային ռեժիմների հետազոտման և դրանց կանխման հայտնի աշխատությունների վերլուծություն,

- հանքաքարի աղացի էլեկտրաբանեցման շարժիչի անկանոն աշխատանքային ռեժիմներում հայտնվելու նախադրյալների գնահատում և դրա

բացասական հետևանքների կանխման հիմնական ուղղությունների առաջադրում,

- հանքաքարի աղացի բանեցման սինխրոն շարժիչի աշխատանքի ասինխրոն ռեժիմի հետազոտում ցանցի լարման շեղման դեպքում,

- սինխրոն շարժիչի ասինխրոն ռեժիմում աշխատելու հետևանքով դրա փաթույթի տաքացման հետևանքների հետազոտում՝ հանքաքարի աղացի ստեղծած դիմադրող մոմենտի փոփոխման դեպքում,

- սինխրոն շարժիչի ներքին անկյան և ստատորի հոսանքի վրա հանքաքարի աղացի բեռի փոփոխման ազդեցության հետազոտման մեթոդի և գնահատման ալգորիթմի մշակում,

- աղացի բանեցման սինխրոն շարժիչի հաճախային բնութագրերի ուսումնասիրություն և դրա աշխատանքային ռեժիմների բարելավման կարգավորիչների մշակում,

- հանքաքարի աղացի էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի անկանոն աշխատանքային ռեժիմներից պաշտպանության միջոցի ալգորիթմի առաջադրում:

### **Գիտական նորույթ**

1. Ստացվել են շարժիչի փաթույթներում ջերմաստիճանի փոփոխման գնահատման կախվածություններ, որոնք հնարավորություն են տալիս բացահայտել շարժիչի ասինխրոն ռեժիմում աշխատելու թույլատրելի տևողությունը՝ փաթույթների գերտաքացման կանխման համար:

2. Մշակվել է ասինխրոն ռեժիմում աշխատող սինխրոն շարժիչի հետազոտման մեթոդ, որը թույլ է տալիս տարբեր բանեցման շարժիչների և դիմադրող մոմենտների դեպքում հետազոտել շարժիչի լարման փոփոխությունը և դրանով իսկ որոշել շարժիչի վթարային ռեժիմի համար անթույլատրելի լարման փոփոխման սահմանը:

3. Մշակվել է բանեցման շարժիչի ներքին անկյան և ստատորի հոսանքի վրա հանքաքարի աղացի բեռի փոփոխման ազդեցության գնահատման մոդել և ստացվել են ասինխրոն և սինխրոն ռեժիմներում աշխատող փոփոխվող բեռով էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչների հաճախային բնութագրերի ուսումնասիրման համար անհրաժեշտ փոխանցման ֆունկցիաները, որոնց հիմքով Նայքվիստի չափանիշի օգտագործմամբ MATLAB ծրագրային փաթեթի Simulink միջավայրում մշակել է շարժիչի աշխատանքային ռեժիմների բարելավման կարգավորիչ:

4. Առաջադրվել է հանքաքարի աղացի էլեկտրաբանեցման շարժիչի անկանոն աշխատանքային ռեժիմներից պաշտպանության միջոցի մշակման ալգորիթմ:

### **Պաշտպանությանը ներկայացվող հիմնական դրույթները**

1. Հանքաքարի աղացի էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի անկանոն աշխատանքային ռեժիմների բացահայտման մոտեցումները:

2. Էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի ասինխրոն թողարկման կամ սինխրոնիզմից դուրս գալու դեպքում շարժիչի սնման լարման անթույլատրելի փոփոխման սահմանների գնահատման մեթոդը:

3. Մշակվել է էլեկտրաշարժիչի ներքին անկյան և ստատորի հոսանքի վրա հանքաքարի աղացի բեռի փոփոխման ազդեցության հետազոտման մեթոդը:

### **Աշխատանքի կիրառական նշանակությունը**

Փոփոխվող բեռով, ասինխրոն և սինխրոն ռեժիմներում աշխատող էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչների համար ստացված փոխանցման ֆունկցիաները և հաճախային բնութագրերը հնարավորություն են տալիս գնահատել աղաց-շարժիչ համակարգի անցումային պրոցեսները և ժամանակին կանխել անկանոն ռեժիմների հետևանքները:

Մշակված մաթեմատիկական մոդելներն ու ալգորիթմները, կատարված հետազոտություններն ու վերլուծությունները հնարավորություն են տալիս մշակել հանքաքարի աղացի էլեկտրաբանեցման շարժիչի կանոնավոր աշխատանքի ապահովման ավտոմատացված համակարգ, որը կարող է ապահովել սինխրոն շարժիչի արդյունավետ շահագործում:

Սինխրոն շարժիչի ասինխրոն ռեժիմում աշխատելու հետևանքով դրա փաթույթի գերտաքացման հետևանքների հետազոտման և շարժիչի ասինխրոն ռեժիմում աշխատելու թույլատրելի տևողության գնահատման ալգորիթմը փորձաքննության է ենթարկվել «Հրազդան-ցեմենտ քորփորեյշն» ՍՊԸ-ում:

**Հրապարակումները:** Կատարված հետազոտությունների հիմնական դրույթներն ու արդյունքները զեկուցվել և քննարկվել են «Էլեկտրական մեքենաներ և ապարատներ» ամբիոնի գիտական սեմինարներում և ՀԱՊՀ-ի տարեկան գիտաժողովում (2016թ.), Համաշխարհային գիտությունների սկադեմիայի կազմակերպած «ICECE 2016. 18th International Conference on Electrical and Communication Engineering» ժողովում (2016թ.):

Ատենախոսության դրույթներն ու արդյունքներն արտացոլված են 7 հրատարակված աշխատություններում:

**Ատենախոսության կառուցվածքը և ծավալը:** Ատենախոսությունը կազմված է ներածությունից, չորս գլուխներից, եզրակացություններից և հավելվածից: Աշխատանքը շարադրված է 124 էջի վրա, պարունակում է 54 նկար, 6 աղյուսակ և 92 անուն ընդգրկող գրականության ցանկ:

## ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՀԻՄՆԱԿԱՆ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

**Ներածությունում** հիմնավորված է խնդրի արդիականությունը, ձևավորված են հետազոտման նպատակը և խնդիրները, ներկայացված են գիտական նորույթը և աշխատանքի կիրառական նշանակությունը, ինչպես նաև պաշտպանության ներկայացված հիմնական դրույթները:

**Առաջին գլխում** հանքաքարի աղացի էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի անկանոն աշխատանքային ռեժիմների առաջացման և դրանց անցանկալի հետևանքների կանխման ուղղության ընտրության համար կատարվել է դրանց վերաբերող հայտնի մեթոդների և սկզբունքների համակողմանի վերլուծություն: Անդրադարձ է կատարվել հանքաքարի մանրացման տեխնոլոգիական գործընթացի անընդհատությամբ խաթարող էներգետիկական և տեխնոլոգիական գործոնների բազմազանությամբ: Էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի վթարային ռեժիմում հայտնվելու հնարավորությունների կանխման համար բացահայտվել և վերլուծվել են դրա աշխատանքային ռեժիմների վրա ազդող հիմնական գործոնները:

Շարժիչի սնման լարման և աղացի դիմադրող մոմենտի ազդեցությունների օրինաչափությունները դիտարկվել են բացահայտ բևեռներով սինխրոն շարժիչի համար: Մասնավորապես դիտարկվել են սնման լարման և բեռի մոմենտի ազդեցությունները շարժիչի գրգռման փաթայթի էլշու-ի վրա: Հաշվի առնելով, որ աղացի ստեղծած դիմադրող մոմենտն ուղիղ համեմատական է շարժիչի սպառման ակտիվ հզորությանը և հակադարձ համեմատական շարժիչի պտտման սինխրոն անկյունային արագությանը՝  $\omega_c$ , իսկ մյուս կողմից  $\omega_c = const$ , ուստի դիմադրող մոմենտի փոփոխությունն արտահայտվել է շարժիչի P հզորությամբ: Գնահատվել են աղացի ստեղծած դիմադրող մոմենտի և սինխրոն շարժիչի ներքին անկյան փոփոխությունների դեպքում շարժիչի սինխրոնիզմից դուրս գալու և առանց գրգռման աշխատելու հնարավորությունները:

Հանքաքարի աղացի էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի անկանոն աշխատանքային ռեժիմներից պաշտպանության մեթոդներին նվիրված աշխատությունների, ինչպես նաև շարժիչի վթարային ռեժիմում հայտնվելու դեպքում դրա կանխման հնարավորությունների համար ընդունված միջոցառումների վերլուծությունը փաստում է, որ հայտնի աշխատություններում հաշվի չեն առնված մանրացման գործընթացի աշխատանքային ռեժիմները բնութագրող տեխնոլոգիական և էներգետիկական գործոնների փոխկապվածությունը, օգտագործվող էլեկտրամեխանիկական համակարգերի

բազմազանությունը, ինչպես նաև անցումային պրոցեսների կարգավորման միջոցով անկանոն աշխատանքային ռեժիմների կանխման հնարավորությունները: Անկանոն աշխատանքային ռեժիմներից պաշտպանության հայտնի մեթոդները միտված են տեղային խնդիրների լուծմանը, մասնավորապես, բանեցման էլեկտրաշարժիչի պաշտպանությանը, առանց տեխնոլոգիական գործոնների հաշվառման: Այդ պատճառով էլ հանքաքարի աղացի էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի անկանոն աշխատանքային ռեժիմներից պաշտպանության խնդրի լուծումը դիտարկվել է հայտնի հետազոտությունների կիրառման և մանրացման տեխնոլոգիական գործընթացի առանձնահատկությունները հաշվի առնող նոր մեթոդների մշակման ճանապարհով:

Խնդրի լուծման համար ընտրվել են հետևյալ ուղղությունները. ցանցում լարման շեղման դեպքում հանքաքարի աղացի բանեցման սինխրոն շարժիչի աշխատանքային բնութագրերի, շարժիչի փաթույթի տաքացման հետևանքների ուսումնասիրություն, աղաց-շարժիչի համակարգի բանեցման շարժիչի սինխրոն և ասինխրոն աշխատանքային ռեժիմներում անցումային պրոցեսների ուսումնասիրություն և կարգավորիչի մշակում, ականոն աշխատանքային ռեժիմներից պաշտպանության քարտեզի ձևավորում և դրանց բացասական հետևանքների կանխման համակարգի առաջադրում:

**Երկրորդ գլխում** գնահատվել է հանքաքարի աղացի էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի սնման լարման փոփոխման ազդեցությունը ռեակտիվ հզորության վրա՝ գրգռման հոսանքի, լայնական  $x_d$  և երկայնական  $x_q$  առանցքներով ստատորի փաթույթի ինդուկտիվ դիմադրությունների տարբեր արժեքների համար:

Մշակվել է հանքաքարի աղացի էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի սինխրոն ռեժիմից դուրս գալու կամ ասինխրոն թողարկման հետևանքով առաջացող ասինխրոն ռեժիմների հետազոտման մոդել, որը թույլ է տալիս բացահայտել շարժիչի կանոնավոր աշխատանքի ապահովման համար անհրաժեշտ սնման լարման փոփոխման հնարավոր միաջակալքը և կանխել շարժիչի անթույլատրելի վթարային ռեժիմներում հայտնվելու հնարավորությունը: Մշակված մոդելի հիմքում ընկած է աղացի բեռի դիմադրող մոմենտի և ասինխրոն ռեժիմում աշխատող բանեցման սինխրոն շարժիչի պարամետրերի միջև առկա կապի հաստատումը և շարժիչի վթարային ռեժիմի համար անթույլատրելի լարման փոփոխման սահմանների գնահատումը:

Ստացվել է լարման փոփոխության դեպքում և աղաց-շարժիչ համակարգի բնութագրիչ պարամետրերի միջև կախվածություն, որով դիտարկվել են



տարբեր հզորությամբ շարժիչների բնութագրերը սնման լարման փոփոխման դեպքում՝

$$U/U_H = \sqrt{\frac{m_c \omega_A (s_k^2 + m_c^2 (s_H - 1)^2 + 2m_c (s_H - 1) + 1)}{(m_c (1 - s_H)) \eta \gamma s_k (m_c (s_H - 1) + 1)}} :$$

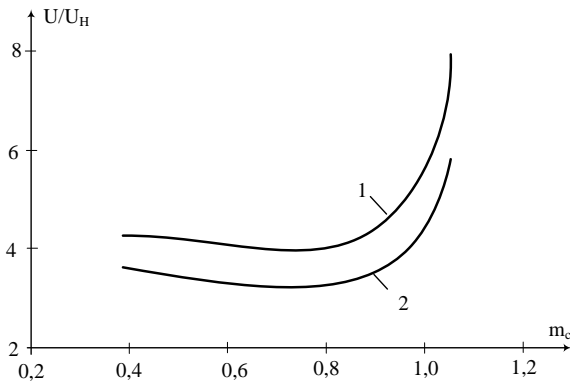
(1)

Օգտագործվել են հետևյալ նշանակումները.

$$m_c = \frac{M_A}{M_H} = \frac{1-s}{1-s_H} , \quad s_H = \frac{s_k}{\left(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}\right)} , \quad s_k = \frac{\sqrt{\frac{M_{II}}{M_{Bx}} - 0,05}}{\sqrt{20 - \frac{M_{II}}{M_{Bx}}}} ,$$

որտեղ  $s_k$  - ն կրիտիկական սահքն է,  $s$  - ը սահքի ընթացիկ արժեքն է,  $\gamma$  - ն շարժիչի առավելագույն մոմենտի պատիկությունն է,  $M_{II}$  - ն,  $M_{Bx}$  - ը համապատասխանաբար սինխրոն շարժիչի թողարկման և մուտքային մոմենտներն են,  $\omega_A$  - ը՝ աղացի թմբուկի պտտման անկյունային արագությունը,  $\eta$  - ն՝ շարժիչի լիսեռից աղացի թմբուկին փոխանցման ՕԳԳ - ն:

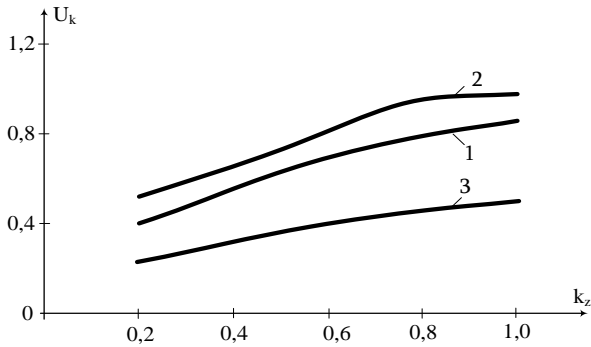
Դիտարկվել են ասինխրոն ռեժիմում տարբեր հզորությամբ շարժիչների բնութագրերը սնման լարման փոփոխման դեպքում: Հետազոտությունները կատարվել են դանդաղընթաց ДС260/44-36 (հզորությունը՝ 1100 կՎտ), ДС213/44-24 (հզորությունը՝ 900 կՎտ), ДС213/34-32 (հզորությունը՝ 380 կՎտ) և ДС213/24-32 (հզորությունը՝ 300 կՎտ) տեսակի շարժիչների համար (տես նկ. 1,2):



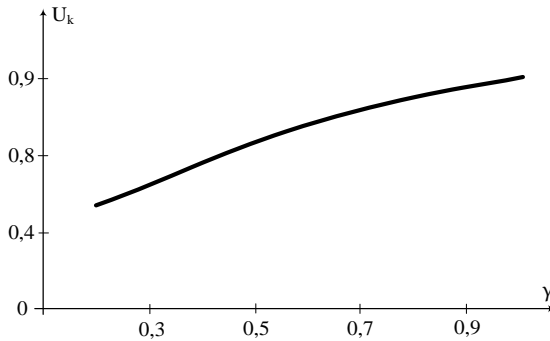
Նկ. 1. Բարձր հզորության շարժիչի սնման լարման կախվածությունը դիմադրող մոմենտից: 1- 900 կՎտ շարժիչի համար, 2 - 1100 կՎտ շարժիչի համար

Դիմադրող մոմենտի մեծ արժեքի դեպքում շարժիչի սնման լարման փոքրացումն անթույլատրելի է անկախ շարժիչի անվանական հզորությունից, իսկ դա նշանակում է, որ, եթե շարժիչը հայտնվել է ասինխրոն ռեժիմում հանքաքարով բեռնավորված աղացի աշխատանքի ընթացքում, ապա լարման անկումը կարող է շարժիչի կանգառի պատճառ հանդիսանալ (նկ. 1):

Շարժիչի կանոնավոր աշխատանքի ապահովման և վթարային ռեժիմներից խուսափելու նպատակով գնահատվել է չբեռնավորված հանքաքարի աղացի դեպքում դրա էլեկտրաբանեցման շարժիչի սնման լարման կրիտիկական արժեքի կախվածությունը դրա բեռնավորման  $k_z$  գործակցից (նկ.2) և առավելագույն մոմենտի պատիկությունից (նկ.3):



Նկ. 2. Շարժիչի սնման լարման կրիտիկական արժեքի կախվածությունը դրա բեռնավորման գործակցից. 1- ДС260/44-36 (հզորությունը՝ 1100 կՎտ), 2- ДС213/44-24 (հզորությունը՝ 900 կՎտ), 3 - ДС213/34-32 (հզորությունը՝ 380 կՎտ) շարժիչի համար



Նկ. 3. Շարժիչի սնման լարման կրիտիկական արժեքի կախվածությունն առավելագույն մոմենտի պարիկությունից

Շահագործման ընթացքում սինխրոն շարժիչի ասինխրոն աշխատանքային ռեժիմները կարող են առաջացնել նաև այլ անկանոն երևույթներ, մասնավորապես, նպաստել շարժիչի փաթույթի մեկուսացման անժամանակ ծերացմանը և ծակմանը: Այդ պատճառով էլ դիտարկվել են փաթույթի մեկուսիչի վնասման առավել բնութագրական պայմանները և հետազոտվել ասինխրոն ռեժիմում աշխատելու հետևանքով սինխրոն շարժիչի փաթույթի տաքացման թույլատրելի սահմանները: Ստացվել են կախվածություններ, որոնք հնարավորություն են տալիս բեռի մոմենտի փոփոխման դեպքում բացահայտել աղացի բանեցման սինխրոն շարժիչի ասինխրոն ռեժիմում աշխատելու թույլատրելի տևողությունը, շարժիչի փաթույթների թույլատրելի տաքացման չափը, գնահատել թողարկման փաթույթի միջուկի տաքացման ջերմաստիճանը, ինչպես նաև հիմնավորել սահուն թողարկման սարքավորման տեղակայանքի կիրառման անհրաժեշտությունը:

**Երրորդ գլխում** մշակվել է աղացի բանեցման սինխրոն շարժիչի աշխատանքային ռեժիմների բարելավման մեթոդ: Առաջարկվել է էլեկտրաշարժիչի ներքին անկյան և ստատորի հոսանքի վրա հանքաքարի աղացի բեռի փոփոխման ազդեցության հետազոտման մոդել և գնահատման ալգորիթմ: Ստացվել են ասինխրոն և սինխրոն ռեժիմներում աշխատող փոփոխվող բեռով էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչների փոխանցման ֆունկցիաները: Matlab ծրագրային փաթեթի Simulink միջավայրում Նայքվիստի չափանիշի օգտագործմամբ դիտարկվել են հաճախային բնութագրերը և դրանց միջոցով գնահատվել է համակարգի կայունությանն առնչվող հարցերը:

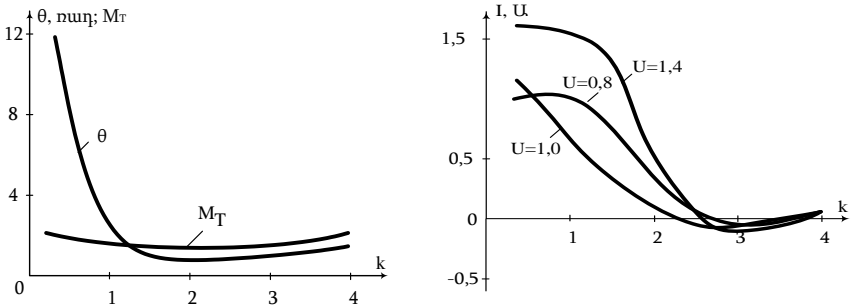
Բացահայտ բևեռներով սինխրոն շարժիչի վեկտորական դիագրամից որոշելով շարժիչի  $\theta$  ներքին անկյունը և կատարելով որոշակի ձևափոխություններ ստացվել է ստատորի հոսանքի փոփոխությունը ( $\Delta I$ ) քննության արտահայտությունը  $k$  հարմոնիկի համար.

$$\Delta I = \frac{U_c t g \left( \sum_k \Delta \theta_{mk} \cos(\omega_k t + \beta_k) \right)}{\left( x_q \cos \varphi - x_q \sin \varphi g \left( \sum_k \Delta \theta_{mk} \cos(\omega_k t + \beta_k) \right) \right)},$$

(2)

որտեղ  $x_q$  - ն ստատորի փաթայթի ինդուկտիվ դիմադրությունն է լայնական առանցքով,  $U_c$  - ն ստատորի փաթայթին մատուցվող լարման է,  $\cos \varphi$  - ն՝ հզորության գործակիցը,  $\Delta \theta_{mk}$  - ն՝  $\theta$  ներքին անկյունը  $k$  - րդ հարմոնիկի ամպլիտուդան,  $\omega_k$  - ն՝  $k$  - րդ հարմոնիկի անկյունային հաճախությունը:

Ստացված մոդելի միջոցով ուսումնասիրվել են հանքամանրիչ աղացի կողմից ստեղծած դիմադրող մոմենտի և սինխրոն շարժիչի  $\theta$  ներքին անկյան և ստատորի հոսանքի փոփոխությունները (հարաբերական միավորներով) 4 հարմոնիկների համար (նկ.4):



Նկ. 4. Չորս հարմոնիկների դեպքում ա) սինխրոն շարժիչի  $\theta$  ներքին անկյան և աղացի դիմադրող մոմենտի փոփոխությունը, բ) սրբարորի հոսանքի փոփոխությունը սնման լարման տարբեր արժեքների դեպքում

Ստացված կախվածությունների վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ բեռի մոմենտի բարձր հարմոնիկներում  $\theta$  անկյունը և ստատորի հոսանքը ենթարկվում են աննշան տատանումների: Ցանցի լարման բաճարացում

անվանականից բերում է ստատորի հոսանքի նշանակալի տատանումների ի հաշիվ առաջին հարմոնիկի (նկ. 4):

Ցույց է տրված, որ շարժիչի  $\theta$  անկյունը և շարժիչի տատանումների ուժեղացման գործակիցը զգալի փոփոխություն են կրում առաջին հարմոնիկի ժամանակ, մինչդեռ սկսած երկրորդ հարմոնիկից դրանց փոփոխությունն աննշան է, և համակարգի կանոնավոր աշխատանքի վրա զգալի ազդեցություն չի թողնում:

Ռոտորի շարժման դիֆերենցիալ հավասարման մեջ ներառելով բեռի փոփոխությունը բնութագրող  $\frac{dM_T}{dt}$  բաղադրիչը, և կատարելով որոշակի ձևափոխություններ ասինխրոն և սինխրոն ռեժիմներում աշխատող էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի համար համապատասխանաբար ստացվել են՝

$$T_j \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{2M_k}{s_k} \frac{d\theta}{dt} = M_T + \frac{dM_T}{dt}, \quad (3)$$

$$T_j \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{3U_c E_f}{\omega x_d} \frac{d\theta}{dt} = M_T + \frac{dM_T}{dt}, \quad (4)$$

որտեղ  $T_j$  - ն ռոտորի իներցիայի հաստատունն է,  $E_f$  - ը՝ գրգռման էլեկտրաշարժ ուժը:

(3) և (4) դիֆերենցիալ հավասարումները ներկայացնելով Լապլասի ձևափոխությունների տեսքով ստացվել են սինխրոն շարժիչի բեռնավորման մոմենտի և  $\theta$  ներքին անկյան կապը բնութագրող փոխանցման ֆունկցիաները համապատասխանաբար ասինխրոն և սինխրոն ռեժիմների համար.

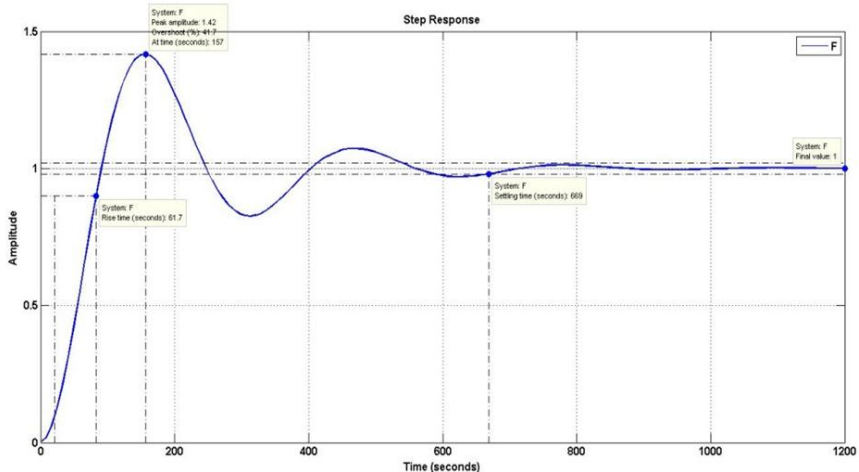
$$W_a(p) = \frac{1+p}{T_1 p^2 + T_2 p}, \quad W_c(p) = \frac{1+p}{T_1 p^2 + T_3 p},$$

որտեղ  $T_1 = -T_j$ ,  $T_2 = \frac{2M_k}{s_k}$ ,  $T_3 = \frac{3U_c E_f}{\omega x_d}$ :

MATLAB ծրագրային փաթեթի Simulink միջավայրում Նայքվիստի չափանիշի օգտագործմամբ դիտարկվել են փոփոխվող բեռով, ասինխրոն և սինխրոն ռեժիմներում աշխատող էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչների

հաճախային բնութագրերը և դրանց միջոցով գնահատվել համակարգի կայունությանն առնչվող հարցերը:

Դիտարկումները կատարվել են  $DC213/29-24$  մակնիշի սինխրոն շարժիչի օրինակի վրա:



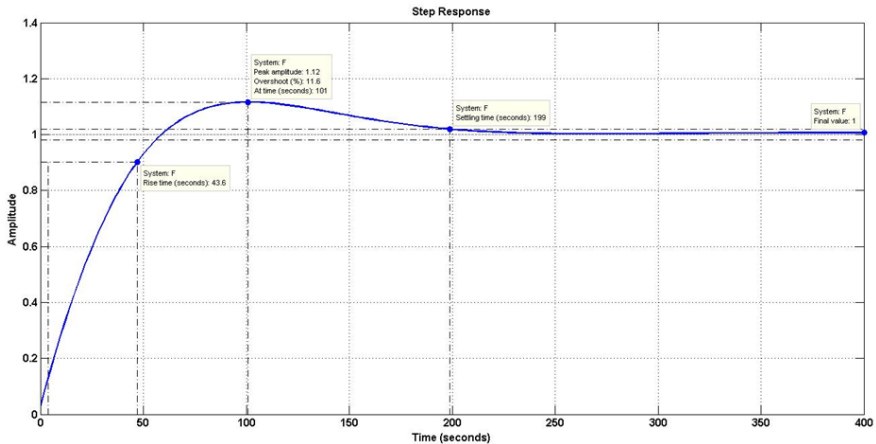
Նկ. 5. Անցումային պրոցեսի կորը, միավոր թռիչքաձև ազդանշանի դեպքում, երբ էլեկտրաբանեցման շարժիչն աշխատում է ասինխրոն ռեժիմում

Էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի ասինխրոն աշխատանքային ռեժիմում ներկայացված անցումային պրոցեսի կորից (Նկ. 5) հետևում է, որ աճման ժամանակը՝  $t_{w6}=61,7$ վ, գերկարգավորումը՝  $\chi = 41,7\%$ , կայունացման ժամանակը՝  $t_s=669$ վ: Ելնելով ստացված տվյալներից անհրաժեշտություն է առաջանում նախագծել կարգավորիչ: Տվյալ դեպքում նախագծվել է համեմատական-ինտեգրող-դիֆերենցող (<math>ՀԻԴ</math>) կարգավորիչ:

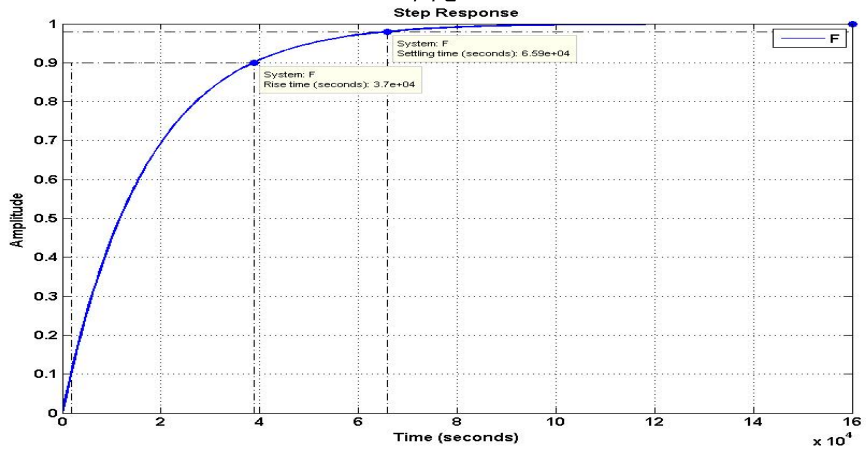
<math>ՀԻԴ</math> կարգավորիչի ներմուծման արդյունքում համակարգը բարելավվում է: Անցումային պրոցեսի գրաֆիկից երևում է, որ նվազում են աճման ժամանակը  $t_{w6}=43,6$ վ, գերկարգավորումը՝  $\chi=11,6\%$  և կայունացման ժամանակը՝  $t_s=199$ վ (Նկ. 6):

Կատարվել է նաև հաճախային բնութագրերի և դրանցով պայմանավորված համակարգի կայունության գնահատումը, երբ էլեկտրաբանեցման շարժիչն աշխատում է սինխրոն ռեժիմում: Գնահատումն իրականացվել է շարժիչի ցանցից սնման լարման 3 տարբեր արժեքների

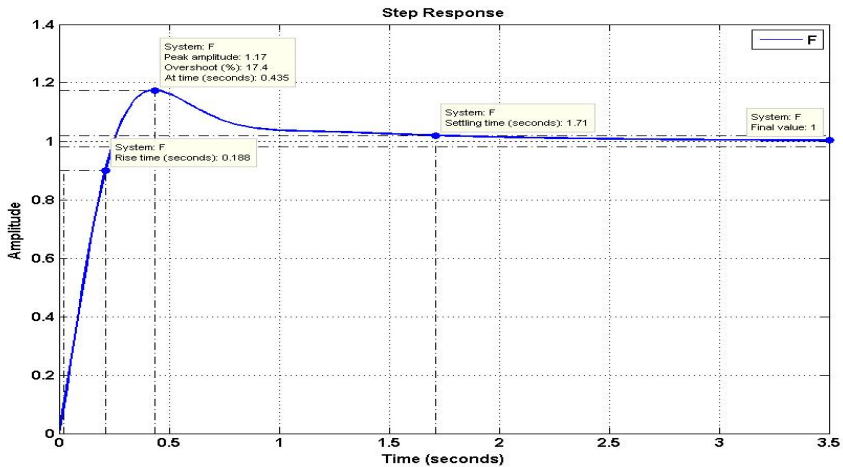
համար՝ անվանական, անվանականից բարձր և անվանականից ցածր սնման լարումների դեպքում: Սնման լարման անվանական արժեքի համար ստացված անցումային պրոցեսների ուսումնասիրության արդյունքում ստացվել են. աճման ժամանակը՝  $t_{աճ}=37000\mu$ , գերկարգավորումը՝  $\chi = 0\%$ , կայունացման ժամանակը՝  $t_{կ}=65900\mu$  (նկ. 7):



Նկ. 6. ՀԻԴ կարգավորիչի ներմուծման դեպքում համակարգի անցումային պրոցեսի կորը



Նկ. 7. Անցումային պրոցեսի կորը, սնման լարման անվանական արժեքի դեպքում, երբ էլեկտրաբանեցման շարժիչն աշխատում է սինխրոն ռեժիմում



Նկ. 8. ՀԻ կարգավորիչների ներմուծման դեպքում անցումային պրոցեսի կորը, սնման լարման անվանական արժեքի դեպքում, երբ էլեկտրաբանեցման շարժիչն աշխատում է սինխրոն ռեժիմում

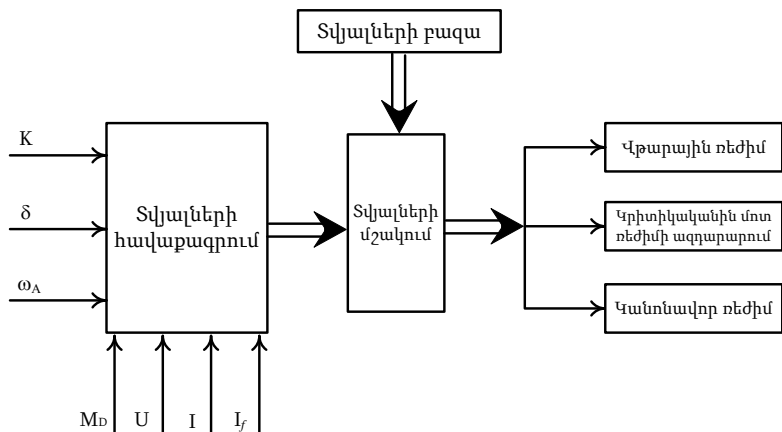
Ելնելով ստացված տվյալներից նախագծվել և ներմուծվել է համեմատական-ինտեգրող (ՀԻ) կարգավորիչ: Վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ սնման լարման անվանական արժեքի դեպքում ՀԻ կարգավորիչների ներմուծման արդյունքում համակարգի աշխատանքային ռեժիմը բարելավվում է. աճման ժամանակը՝  $t_{\omega 6} = 0,188$ վ, գերկարգավորումը՝  $\chi = 17,4\%$ , կայունացման ժամանակը՝  $t_{\psi} = 1,71$ վ (Նկ. 8):

**Չորրորդ գլխում** ներկայացվել է հանքաքարի աղացի բանեցման սինխրոն շարժիչի անկանոն աշխատանքային ռեժիմներից պաշտպանության միջոցի մշակման ալգորիթմը:

Ներկայացվել է հանքաքարի աղացի բանեցման սինխրոն շարժիչի աշխատանքային ռեժիմների հսկման ենթահամակարգի կառուցվածքային սխեման և դրա իրականացման ալգորիթմը:

Էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի հսկման ենթահամակարգը բաղկացած է տվյալների հավաքագրման հանգույցից, տվյալների բազայից, տվյալների մշակման և իրավիճակի ազդարարման հանգույցներից (Նկ. 9):





Նկ. 9. Էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի հսկման ենթահամակարգի կառուցվածքային սխեմա

Տվյալների հավաքագրման հանգույցում գրանցվում են հանքաքարի աղացի և էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի աշխատանքային ռեժիմները բնութագրող տեխնոլոգիական և էներգետիկ պարամետրերը, որոնք են՝ աղացի լցման աստիճանը ( $K$ ), խյուսի ծավալային խտությունը ( $\delta$ ), աղացի պտտման անկյունային արագությունը ( $\omega_A$ ), ստատորի հոսանքը ( $I$ ), շարժիչի մոմենտը ( $M_D$ ), շարժիչի պտտման սինխրոն արագությունը ( $\omega_D$ ), շարժիչի սնման լարումը ( $U$ ), գրգռման փաթույթի հոսանքը ( $I_f$ ):

Տվյալների մշակման հանգույցում կատարվում է տվյալների հավաքագրական հանգույցից և տվյալների բազայից ստացված թվային ազդանշանների մշակում, համեմատում և արդյունքների փոխանցում համապատասխան ազդարարման հանգույցին:

Մշակվել է հանքաքարի աղացի ստեղծած դիմադրող մոմենտի որոշման էմպիրիկ կախվածություն, որը հնարավորություն է տալիս գնահատել և ազդարարել բանեցման շարժիչի աշխատանքային վիճակի մասին տեղեկատվություն՝ պայմանավորված ներաղացային բեռի փոփոխությամբ: Մոդելավորման համար օգտագործվել է գիտափորձի տվյալների բազա, որը ստացվել է փորձնական ճանապարհով թմբուկի պտտման արագության տարբեր արժեքների դեպքում աղացի ստեղծած դիմադրող մոմենտի չափման միջոցով:

Ներկայացվել է հանքաքարի աղացի էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի վթարային իրավիճակի կանխման ենթահամակարգի կառուցվածքային սխեման և դրա իրականացման ալգորիթմը:

## ԵՂՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆ

1. Սինխրոն շարժիչի անկանոն աշխատանքային ռեժիմներին և դրանցից պաշտպանության հնարավորություններին նվիրված հայտնի աշխատությունների վերլուծության արդյունքում հիմնավորվել է հանքաքարի աղացի էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի անկանոն աշխատանքային ռեժիմների հետազոտման և դրանց կանխման հիմնական ուղղությունները:

2. Հանքաքարի աղացի էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի շահագործման արդյունավետության բարձրացման սկզբունքների վերլուծության միջոցով և անկանոն աշխատանքային ռեժիմներից պաշտպանության անհրաժեշտությունից ելնելով բացահայտվել են սինխրոն շարժիչների տեխնիկական վիճակի վրա ազդող տեխնոլոգիական և էներգետիկ գործոնները:

3. Ստացվել են շարժիչի փաթույթներում ջերմաստիճանի փոփոխման գնահատման կախվածություններ, որոնք հնարավորություն են տալիս բեռի մոմենտի տարբեր արժեքների դեպքում բացահայտել շարժիչի ասինխրոն աշխատանքային ռեժիմների թույլատրելի տևողությունը փաթույթների գերտաքացման կանխման նպատակով:

4. Մշակվել է հանքաքարի աղացի էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի սինխրոն ռեժիմից դուրս գալու կամ ասինխրոն թողարկման հետևանքով առաջացող ասինխրոն ռեժիմների հետազոտման մոդել, որոնք թույլ են տալիս բացահայտել շարժիչի կանոնավոր աշխատանքի ապահովման համար անհրաժեշտ սնման լարման փոփոխման հնարավոր միաջակայքը և կանխել շարժիչի անթույլատրելի վթարային ռեժիմներում հայտնվելու հնարավորությունը:

5. Մշակվել է էլեկտրաբանեցման շարժիչի ներքին անկյան և ստատորի հոսանքի վրա հանքաքարի աղացի բեռի փոփոխման ազդեցության գնահատման մոդել՝ չորս հարմոնիկների և ռոտորի իներցիայի հաստատունի տարբեր արժեքների համար: Յուրյց է տրված, որ բեռի մոմենտի բարձր հարմոնիկներում  $\theta$  անկյունը և ստատորի հոսանքն ենթարկվում են աննշան փոփոխությունների:  $\theta$  անկյան անթույլատրելի տատանումները նկատելի են դիմադրող մոմենտի առաջին հարմոնիկում:

6. Ստացվել են սինխրոն և ասինխրոն ռեժիմներում աշխատող աղաց-  
չարժիչ էլեկտրամեխանիկական համակարգի անցումային պրոցեսների  
գնահատման հաճախականային բնութագրեր և դրանց հիման վրա  
առաջարկվել է շարժիչի աշխատանքային ռեժիմների բարելավման  
կարգավորիչ:

7. Մշակված մեթոդների, մոդելների և ալգորիթմների կիրառմամբ  
առաջարկվել է հանքաքարի աղացի էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի  
հսկման ենթահամակարգ և անկանոն աշխատանքային ռեժիմներից  
պաշտպանության միջոց, որը հնարավորություն է տալիս շարժիչի  
աշխատանքային ռեժիմների բացահայտման արդյունքում կանխել վթարների  
առաջացման հնարավորությունները:

### **Ատենախոսության թեմայով հրատարակվել են հետևյալ աշխատությունները**

1. Baghdasaryan M., **Мноян Т.** Modeling the Moment of Resistance  
Generated by an Ore-Grinding Mill // World Academy of Science, Engineering and  
Technology Conference Proceeding, august 11-12, 2016.- Barcelona Spain, 2016.-  
P.1843-1846.

2. Բաղդասարյան Մ.Ք., **Մնոյան Տ.Ն.** Հանքաքարի աղացի  
էլեկտրաբանեցման սինխրոն շարժիչի անկանոն աշխատանքային ռեժիմների  
մասին // ՀԱՊՀ Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու. - 2017. - Մաս 2. -  
էջ 525-528:

3. Багдасарян М.К., **Мноян Т.Н.**, Алавердян С.С. Исследование  
асинхронного режима работы приводного синхронного двигателя  
рудоразмельной мельницы при отклонениях напряжения в сети // Вестник  
НПУА: Электротехника, энергетика. - 2016. - №2. - С.28-34.

4. **Мноян Т.Н.** К исследованию нагрева обмотки синхронного двигателя  
рудоразмельной мельницы, возникающего в асинхронном режиме // Вестник  
НПУА: Электротехника, энергетика. - 2017. - №1. - С.49-55.

5. Багдасарян М.К., **Мноян Т.Н.** Оценка влияния внутримельничной  
нагрузки на рабочие характеристики приводного двигателя // Вестник НПУА:  
Электротехника, энергетика. - 2017. - №2. - С. 22-33.

6. **Մնոյան Տ.Ն.** Հանքաքարի մանրացման տեխնոլոգիական գործընթացն  
ապահովող սինխրոն շարժիչի անկանոն աշխատանքային ռեժիմների և  
դրանցից պաշտպանության հնարավորությունների մասին // ՀՃԱ Լրաբեր.-  
2017. - Հատ. 14, №4. - էջ 547 - 551:

7. Багдасарян М.К. **Мноян Т.Н.**, Саргсян С.В. Способ контроля аномальных режимов синхронного приводного двигателя рудоразмельной мельницы // Евразийский союз ученых. - 2018. - №4 (49). - С. 6-8.

**МНОЯН ТИГРАН НОРИКОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ПРИВОДНОГО СИНХРОННОГО  
ДВИГАТЕЛЯ РУДОРАЗМОЛЬНОЙ МЕЛЬНИЦЫ ОТ АНОМАЛЬНЫХ  
РЕЖИМОВ РАБОТЫ**

**РЕЗЮМЕ**

Разрушающая способность электроприводного двигателя, обеспечивающего технологический процесс, может полностью подорвать весь процесс, вызывая серьезные экономические потери. Эта проблема является наиболее важной в случае энергоемких технологических процессов, таких как измельчение руды. Учитывая, что производства, использующие процесс измельчения руды, выделяются значительной энергоемкостью, что, в основном, обусловлено применением мощных синхронных двигателей, а также имея в виду, что данный процесс является основополагающим в деле повышения эффективности производства металлических концентратов, возникает необходимость выявления и предотвращения аномальных режимов работы используемых синхронных двигателей.

Учитывая, что существуют значительные проблемы в вопросах выявления, оценки причин возникновения аномальных режимов работы приводного синхронного двигателя рудоразмельной мельницы, а также предотвращения их негативных проявлений, разработка методов, направленных на предотвращение неприемлемых проявлений аномальных режимов работы, является актуальной проблемой.

**Цель работы.** Целью диссертации является разработка методов и алгоритмов для изучения и оценки режимов работы двигателя с учетом технологических признаков, направленных на обеспечение нормальной эксплуатации приводного синхронного двигателя рудоразмельной мельницы, а также разработка мер по предотвращению аномальных режимов работы двигателей.

### **Научная новизна**

1. Получена зависимость для оценки изменения температуры в обмотках двигателя, позволяющая выявить допустимую продолжительность работы в асинхронном режиме при разных значениях момента нагрузки.

2. Разработан метод исследования синхронного двигателя в асинхронном режиме, который позволяет при разных приводных двигателях и моментах сопротивления исследовать изменение напряжения двигателя и, тем самым, определить допустимый предел его изменения, не допускающий аварийного режима работы двигателя.

3. Разработана модель для оценки зависимости колебания угла  $\theta$  и тока статора приводного синхронного двигателя от нагрузки рудоразмельной мельницы и получены передаточные функции для изучения частотных характеристик синхронных двигателей, работающих в асинхронном и синхронном режимах при изменяющихся нагрузках, которые позволяют с

применением критерия Найквиста в среде Simulink пакета программы MATLAB разработать регулятор для улучшения рабочих режимов двигателя.

4. Предложен алгоритм для разработки способа защиты от аномальных режимов работы приводного синхронного двигателя рудоразмельной мельницы.

#### **Основные выводы**

1. В результате анализа известных работ, посвященных аномальным режимам работы синхронных двигателей и возможностям их защиты, обоснованы основные направления исследования и меры по предотвращению аномальных режимов работы приводного синхронного двигателя рудоразмельной мельницы.

2. На основе анализа принципов повышения эффективности эксплуатации приводного синхронного двигателя рудоразмельной мельницы и исходя из необходимости защиты от аномальных режимов работы, выявлены технологические и энергетические показатели, влияющие на техническое состояние синхронного двигателя.

3. Получены аналитические зависимости для оценки изменения температуры обмотки двигателя, позволяющие при разных значениях момента нагрузки выявить допустимую продолжительность работы двигателя в асинхронном режиме с целью предотвращения перегрева обмоток.

4. Разработана модель для исследования асинхронного режима работы приводного синхронного двигателя рудоразмельной мельницы в случае его выпадения из синхронизма или при асинхронном пуске, что позволяет выявить допустимый предел изменения напряжения на зажимах двигателя, необходимый для поддержания нормальной работы двигателя и предотвращения аварийного режима работы двигателя.

5. Разработана модель для оценки зависимости колебания угла  $\theta$  и тока статора приводного синхронного двигателя от нагрузочного сопротивления для четырех гармоник при разных значениях инерционной постоянной ротора. Показано, что при высших гармониках момента сопротивления ток статора и угол  $\theta$  подвержены небольшим изменениям. Неприемлемые изменения угла  $\theta$  заметны в первой гармонике момента сопротивления.

6. Получены частотные характеристики для оценки переходных процессов системы мельница-двигатель в синхронном и асинхронном режимах работы приводного двигателя и на их основе предложен регулятор для улучшения рабочих режимов.

7. На основе разработанных методов, моделей и алгоритмов предложен способ защиты от аномальных режимов работы приводного двигателя рудоразмельной мельницы, который позволяет предотвратить возможности возникновения аварийных случаев посредством выявления режимов работы двигателя.

**MNOYAN TIGRAN**

**DEVELOPING METHODS FOR PROTECTING THE DRIVE SYNCHRONOUS MOTORS OF THE ORE-GRINDING MILL FROM ABNORMAL OPERATION MODES**

**RESUME**

The destructive power of the electric drive motor which provides the technological process, may completely undermine the whole process, causing serious economic losses. This problem is considered to be most significant in case of power intensive technological processes, such as ore grinding. Taking into account the fact, that the productions, using the ore grinding process are significantly power intensive, mainly due to the usage of powerful synchronous electric motors, as well as, bearing in mind that this process is fundamental for increasing the metal concentrate production efficiency, it becomes necessary to detect and prevent the abnormal operating modes of the synchronous motors used.

A comprehensive analysis of published researches devoted to the study of the synchronous motor operation modes and the possibilities of their protection shows that none of the practical methods allows to detect and prevent the abnormal states of the drive synchronous motor of the ore-grinding mill in absolute precision.

Considering that there are numerous problems in the sphere of identifying, assessing the causes of arising abnormal operating modes of the drive synchronous motor of the ore-grinding mill, as well as also preventing their negative manifestations, the development of methods aimed at preventing the unacceptable occurrences of irregular operating modes is an urgent problem.

**Objective.** The goal of the dissertation is to develop methods and algorithms for investigating and evaluating the operation modes of the motor, taking into

account the technological features aimed at ensuring the normal operation of the drive synchronous motor of the ore-grinding mill, as well as to develop measures to prevent the abnormal modes of the motor operation.

### **Scientific novelty**

1. A dependence is obtained for estimating the change in temperature in the motor windings, allowing to reveal the permissible duration of operation in the induction mode at different values of the load moment.

2. A model is developed for evaluating the dependence of the oscillation of angle  $\theta$  and the stator current of the drive synchronous motor on the load of the ore-grinding mill, allowing to detect the possibility of preventing the abnormal operation modes of the motor caused by the change in the moment of resistance created by the mill.

3. A model is developed for estimating the dependence of the oscillation of the angle  $\theta$  and the stator current of the drive synchronous motor on the load of the ore-grinding mill, and transfer functions are obtained for investigating the frequency characteristics of synchronous motors, operating in induction and synchronous modes at changing loads, allowing to develop a regulator for improving the operation modes of the motor in the environment of the MATLAB program Simulink package by using the Nyquist criterion.

4. An algorithm is proposed to develop a method for preventing the irregular operation modes of the drive synchronous motor of the ore-grinding mill.

### **Main conclusions**

1. As a result of investigating the known works devoted to the abnormal operating modes of synchronous motors and their protection possibilities, the main directions of the research and the measures to prevent the abnormal operation modes of the drive synchronous motor of the ore-grinding mill are substantiated.

2. Based on the analysis of the principles of increasing the maintenance efficiency of the drive synchronous motor of the ore-grinding mill and also based on the need to prevent from abnormal operation modes, the technological and power indicators, affecting the technical state of the synchronous motor are revealed.

3. Analytical dependencies are obtained for estimating the change in the temperature of the motor winding, allowing to reveal the permissible duration of the motor operation in the induction mode at different values of the load moment to prevent the overheating of the windings.

4. A model is developed to study the induction operation mode of the drive synchronous motor of the ore-grinding mill in case of its falling out of synchronism or at the induction start, which enables to identify the permissible limit of the



voltage variation at the motor terminals necessary to maintain the normal operation of the motor and prevent its emergency operation.

5. A model is developed to estimate the dependence of the oscillation angle ( $\theta$ ) and the stator current of a drive synchronous motor on the load resistance for four harmonics at different values of the inertial rotor constant. It is shown that, at higher harmonics of the moment of resistance, the stator current and the angle  $\theta$  are subject to small changes. Unacceptable changes in the angle  $\theta$  are noticeable in the first harmonic of the moment of resistance.

6. Frequency characteristics are obtained for estimating the transient processes of the mill-motor system in synchronous and induction operation modes of the drive motor, and a regulator is proposed to improve the operation modes based on those frequency characteristics.

7. Based on the developed methods, models and algorithms, a method for protection from abnormal operation modes of the ore-grinding mill is proposed, which makes it possible to prevent the occurrence of emergency situations by detecting the motor operation modes.