

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

İDARƏ OLUNAN ELEKTRİK GENERATORLARININ TƏTBİQİ İLƏ KİÇİK SU ELEKTRİK STANSİYALARININ İŞ REJİMLƏRİNİN SƏMƏRƏLİLİYİNİN ARTIRILMASI

İxtisas: **3340.01 - Elektrotexniki sistemlər və komplekslər**

Elm sahəsi: **Texnika elmləri**

İddiaçı: **Musayev Müsahil Müsavər oğlu**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün
təqdim edilmiş dissertasiyasının

AVTOREFERATI

Bakı – 2024

Dissertasiya işi Azərbaycan Elmi-Tədqiqat və Layihə-Axtarış Energetika İnstitutunda yerinə yetirilmişdir

Elmi rəhbər: texnika elmləri doktoru, professor
Mustafayev Rauf İsmayıl oğlu

Rəsmi opponentlər: Texnika elmləri doktoru, dosent
Fuad Faiq oğlu Məmmədov

Texnika elmləri namizədi, dosent
Ramiz Ağəli oğlu Hüseynov

Texnika elmləri namizədi, dosent
Elbrus Nasi oğlu Əhmədov

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının Azərbaycan Texniki Universitetinin nəzdində
Gəncəvi qəstgahı ED 2.04 Dissertasiya şurası

Dissertasiya şurasının sədri: Texnika elmləri doktoru, professor
Nurəli Adil oğlu Yusifbəyli

Dissertasiya şurasının elmi katibi: Texnika elmləri namizədi, dosent
Vahid Qara oğlu Fərhadov

Elmi seminarın sədri: Texnika elmləri doktoru, professor
Rasim Əzim oğlu Səidov

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi.

Son zamanlar dünyanın bir çox ölkələrində alternativ enerji mənbələrindən istifadə sahəsində böyük işlər görülür. Kiçik su elektrik stansiyaları (gücü <10 MVt) böyük faydalı iş əmsalına malik olmaqla yanaşı nisbətən az sərmayə qoyuluşu tələb edir. Effektiv su sütunun azalması, tezliklə idarə olunan generatorlardan istifadə, köməkçi avadanlıqların quraşdırılma xərclərinin azalması və ətraf mühitə daha az ziyan vuran texnologiyaların tətbiqi kiçik hidroenergetikanı sərmayədarlar üçün daha cəlbedici etmişdir.

Kiçik hidroenergetika ekoloji cəhətdən təmiz elektrik enerjisi istehsal etmək üçün ən rentabelli və etibarlı enerji texnologiyalarından biridir. Kiçik hidroenergetika adətən “çay yatağında quraşdırılan” tipli olur, başqa sözlə bu cür kiçik sistemlər üçün lazım olan bəndlər və sədlər çox kiçik olur ki, bu da digər su elektrik stansiyaları ilə müqayisədə su tutumu çox az olan hövzələrin yaranmasına gətirib çıxarır.

İşin məqsədi. Bu dissertasiya işinin məqsədi enerjisistemi ilə paralel işləyən kiçik su elektrik stansiyalarında (SES) müxtəlif növ su turbinlərindən, sinxron, iki tərəfdən qidalanan asinxron generatorlardan, generatorların stator və rotor dövrəsinə qoşulmuş tezlik çeviricilərindən ibarət olan elektromexaniki çeviricilərin riyazi modelləri əsasında qərarlaşmış rejimlərin, eləcə də keçid proseslərinin tədqiq edilməsi, kiçik su elektrik stansiyalarının texnoloji komponentlərinin sadələşdirilməsi və effektivliyinin artırılmasıdır.

Tədqiqat metodları. Dissertasiya işində qarşıya qoyulan məsələlərin həllində elektrik sistemlərinin ümumi nəzəriyyəsindən və riyazi statistika metodlarından istifadə edilmişdir.

İşin elmi yeniliyi. Bu dissertasiya işində enerjisistemi ilə paralel işləyən kiçik su elektrik stansiyalarında istifadə olunan su turbinləri və tezlik çeviriciləri ilə idarə olunan elektrik generatorlarından ibarət müxtəlif hidroaqreqatların riyazi modelləri işlənilib hazırlanmışdır. Tərtib edilmiş riyazi modellər əsasında kiçik SES-lərin bir sıra iş rejimləri tədqiq edilmişdir.

Dissertasiya işində alınmış əsas elmi **nəticələr** aşağıdakılardır:

- kiçik SES-də generatorun iş rejimlərindən asılı olaraq valın dəyişən fırlanma momentinin riyazi modeli işlənib hazırlanmışdır;
- stator dövrəsinə qoşulmuş tezlik çeviricisi ilə idarə olunan asinxron maşının məlum riyazi modelinin köməkliyi ilə kiçik su elektrik stansiyalarının iş rejimləri tədqiq olunmuşdur;
- kiçik SES-in tərkibindəki rotor dövrəsinə qoşulmuş tezlik çeviricisi ilə idarə olunan iki tərəfdən qidalanan asinxron maşının riyazi modeli əsasında kiçik su elektrik stansiyalarının iş rejimləri tədqiq olunmuşdur;
- tezlik çeviricisi ilə idarəetmə rejimində elektromexaniki çeviricilər üçün gərginliyin tənzimlənməsinin optimal alqoritmi işlənmişdir.

Alınmış nəticələrin **dürüstlüyü və əsaslandırılması**. Alınmış elmi nəticələrin, tövsiyyələrin dürüstlüyü və əsaslandırılması qarşıya qoyulan tapşırıqların tədqiqində müasir nəzəri və eksperimental metodların tətbiqinə əsaslanır. İşlənib hazırlanmış metodlar, qurulmuş riyazi modellər təcrübi və analitik metodlarla əldə olunmuş verilənlərlə müqaisə olunur.

Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar:

1. Kiçik SES-lərdə istifadə olunan su turbinlərinin – Frensis, Pelton və tərpənməz pərli Kaplan turbinlərinin fırlanma momentlərinin və güc xarakteristikalarının analitik riyazi təsvir metodlarının işlənib hazırlanması;
2. Frensis turbinindən və tezlik çeviricisi ilə idarə olunan iki tərəfdən qidalanan asinxron maşından ibarət olan kiçik SES-lərin iş rejimlərinin riyazi modelinin işlənib hazırlanması və tədqiq olunması;
3. Pelton su turbinindən və tezlik çeviricisi ilə idarə olunan sabit maqnitli asinxron maşından ibarət olan kiçik SES-lərin iş rejimlərinin riyazi modelinin işlənib hazırlanması və belə SES-lərin iş rejimlərinin tədqiqi;
4. Elektromexaniki çeviricilərin köməyi ilə fırlanma tezliyi tənzimlənən tərpənməz pərli Kaplan su turbini ilə təchiz olunmuş kiçik SES-lərin effektivliyinin artırılması.

Dissertasiya işinin praktiki əhəmiyyəti. İşlənib hazırlanmış riyazi modellərin tətbiqi kiçik su elektrik stansiyalarında kvazi-qərarlaşmış və dinamik rejimləri tədqiq etmək imkanı yaradır. Optimallaşdırmanın nəticəsi olaraq əldə olunan alqoritmi tətbiq etməklə verilmiş konfigurasiyalı kiçik SES-lərdə gərginliyin tənzimlənməsini həyata keçirmək mümkündür. Digər tərəfdən idarəetmə dövrəsində təklif olunan elektik tezlik çeviricilərinin üstünlüklərindən yararlanmaq kiçik SES-lərin mürəkkəb mexaniki konstruktiv elementlərini sadələşdirməyə imkan verir. İşlənib hazırlanmış riyazi modellər belə kiçik SES-lərdə giriş su xəttinin üzərindəki siyirtmənin mövsümü olaraq ən optimal açılma bucağını təyin etməyə imkan yaradır.

İşin aprobasiyası. Dissertasiya işinin nəticələri Azərbaycan Elmi-Tədqiqat və Layihə-Axtarış Energetika İnstitutunun elmi seminarlarında, Polşanın Vroslav şəhərində keçirilən "MEPS-2015 Modern Electrical Power Systems"(6–9 İyul, 2015, Vroslav, Polşa) və İspaniyanın Bilbao şəhərində keçirilən "Technical and Physical Problems of Electrical Engineering" (ICTPE-2016, Bilbao, İspaniya) adlı beynəlxalq konfranslarda məruzə edilmiş və müzakirə olunmuşdur.

Dərc olunmuş elmi işlər. Dissertasiyanın materialları üzrə 15 elmi iş (onlardan 1-i "Web of Science" bazasında, 5-i Scopus bazalarında indekslənen yüksək impakt faktorlu dövrü nəşrləridir) nəşr edilmişdir. 2 Beynəlxalq konfrans materialı dərc edilmişdir. 2 məqalə həmmüəllifsizdir.

Dissertasiya işi Azərbaycan Elmi-Tədqiqat və Layihə-Axtarış Energetika İnstitutunda yerinə yetirilmişdir

Dissertasiyanın struktur bölmələrinin ayrıca həcmi qeyd olunmaqla dissertasiyanın işarə ilə ümumi həcmi. Dissertasiya işi bütövlükdə **173** səhifəni əhatə edir. İşin ümumi həcmi **49** şəkil, giriş, **3** fəsil, nəticələr və istifadə edilmiş **108** adda ədəbiyyat siyahısından ibarətdir. Dissertasiyanın həcmi (mətnəki boşluqlar və şəkillər, qrafiklər, əlavələr və ədəbiyyat siyahısı istisna edilməklə) – **193940** işarədir. Titul vərəqi – **423** (1 s.), mündəricat – **1293** (1 s.), Giriş – 9975 (6 s.), I fəsil – 86464 (49 s.), II fəsil – 18935 (19 s.), III fəsil – 55790 (45 s.), Nəticə – **5675** (5s.), istinadlar –**15385** (**11 s.**)

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Girişdə dissertasiya işinin mövzusunun aktuallığı, tədqiqatın məqsədi və qarşıya qoyulan məsələlərin əsaslandırılmış qoyuluşu verilmişdir. İşin praktiki əhəmiyyəti və elmi yeniliyi təsvir olunmuş, elmi araşdırmanın aprobasiyası haqqında məlumat verilmişdir. Həmçinin giriş bölməsində statistik məlumatlar, kiçik su elektrik stansiyaların dünyanın müxtəlif regionlarında paylanması və onların inkişaf perspektivləri ətraflı şərh olunmuşdur.

Birinci fəsildə kiçik hidroenergetikanın dünya miqyasında hal-hazırkı vəziyyəti və onun inkişaf perspektivləri haqqında məlumat verilmişdir. Hazırda dünyanın 148 ölkəsində gücü 10 MVt-a qədər olan kiçik Su Elektrik Stansiyaları mövcuddur. 2016-cı ilin hesablamalarına əsasən dünya üzrə kiçik hidroenergetikanın ümumi potensialı təxminən 217 QVt miqdarında qiymətləndirilir.

Kiçik SES-lərin aşağıdakı üstünlüklərini sadalamaq lazımdır: global iqlim dəyişməsinə təsir edən CO₂ qazının emissiyasının azalması, səmərəli texnologiyalardan istifadə, çox az tikinti və su basma sahəsi, yerli və regional inkişafa müsbət təsiri, çayların və kanalların yatağının təmiz saxlanması, kənd yerlərinin elektrifikasişdırılmasındakı əhəmiyyətli rolu, qoyulan investisiyanın qısa müddət ərzində ödənilməsi və s.

Hazırda dünya üzrə ümumi qəbul olunmuş vahid “kiçik SES” anlayışı olmasa da əksər ölkələrdə bu cür stansiyaların əsas göstəricisi kimi onun qoyuluş gücü götürülür. Bir qayda olaraq kiçik SES-lərə qoyuluş gücü 10 MVt-a dək (bəzi ölkələrdə 50 MVt-a dək) olan Su Elektrik Stansiyalarını aid edirlər.

Kiçik SES-lərin qoyuluş gücünə görə təsnifləşdirilməsinin Birləşmiş Millətlər Təşkilatı (BMT) variantı daha geniş yayılmışdır:

- Mikro SES – gücü 100 KVt-a qədər
- Mini SES – gücü 0,1 MVt-dan 1 MVt-a qədər
- Kiçik SES – gücü 1 MVt- dan 10 MVt-a qədər

Birinci fəsildə ayrıca olaraq Azərbaycanın da kiçik hidroenergetikasının qısa xülasəsi verilmişdir.

Bu fəsildə həmçinin kiçik SES-lərdə quraşdırılan su turbinləri haqqında məlumat verilir. Eləcə də ayrı-ayrılıqda Pelton, Frensis və

Kaplan su turbinlərinin konstruktiv elementləri, hesabatı, texniki parametrləri haqqında ümumi məlumat şərh edilir.

İkinci fəsil kiçik SES-lərdə istifadə olunan müxtəlif su turbinlərinin fırlanma momentinin analitik ifadəsinin təhlilinə həsr olunmuşdur.

Məlumdur ki, su turbininin aktiv gücü aşağıdakı ifadə ilə təyin olunur:

$$P = g \cdot \eta \cdot Q \cdot H \quad (1)$$

burada,

P – güc, [kVt];

η – F.İ.Ə., şərti vahidlərdə;

Q – suyun sərfiyyatı, [m³/san];

H – su basqısı, [m];

$g = 9,81$ – sərbəstdüşmə təcildir, [m/san²].

Aydınır ki, bu halda su turbininin nominal gücü aşağıdakı kimi olacaqdır.

$$P_n = 9,81 \cdot \eta_n \cdot Q_n \cdot H_n \quad (2)$$

Bazis olaraq nominal qiymətləri qəbul edərək cari gücü nisbi vahidlərlə aşağıdakı kimi ifadə edə bilərik

$$p^* = \eta^* \cdot q^* \cdot h^* \quad (3)$$

burada,

$$p^* = \frac{P}{P_n}; \quad \eta^* = \frac{\eta}{\eta_n}; \quad q^* = \frac{Q}{Q_n}; \quad h^* = \frac{H}{H_n}$$

Hidrotrubinin faydalı iş əmsalı

$$\eta^* = a \cdot q^{*2} + b \cdot q^* + c \quad (4)$$

ifadəsi ilə təyin olunur.

(4) tənliyindəki a , b və c əmsalları su turbininin növündən asılıdır.

Ümumi halda nominal basqı aşağıdakı kimi ifadə olunur

$$H_n = H_0 \cdot (1 - \lambda) \quad (5)$$

burada H_0 – suyun aşağı və yuxarı səviyyələri arasındakı fərqə müvafiq nəzəri basqı (sürtünməyə sərf olunan itki nəzərə alınmır),

λ – suyun yuxarı byefdən hidroturbinə ötürülməsi zamanı itkilərini nəzərə alan əmsaldır;

Təbii ki, λ əmsalının qiyməti su sərfiyyatının miqdarından asılıdır və bu asılılıq basqının cari qiymətinin ifadəsində öz əksini tapmışdır

$$H = H_0(1 - \lambda \cdot q^{*2}) \quad (6)$$

Beləliklə (5) və (6) ifadələrindən basqının cari qiyməti üçün nisbi vahidlərlə ifadə olunan aşağıdakı ifadəni alırıq:

$$h^* = \frac{H}{H_n} = \frac{1 - \lambda \cdot q^{*2}}{1 - \lambda} \quad (7)$$

(4) və (6) ifadələrini (3)-də nəzərə alıb, sadə çevirmələr edərək kiçik SES-lərin su turbinlərinin nisbi gücü üçün aşağıdakı yekun ifadəni alırıq:

$$p^* = -A \cdot q^{*5} - B \cdot q^{*4} + C \cdot q^{*3} + D \cdot q^{*2} + E \cdot q^* \quad (8)$$

Burada

$$A = \frac{\lambda \cdot a}{1 - \lambda} \quad B = \frac{\lambda \cdot b}{1 - \lambda} \quad C = \frac{a - c \cdot \lambda}{1 - \lambda} \quad D = \frac{b}{1 - \lambda} \quad E = \frac{c}{1 - \lambda}$$

Beləliklə, (8) ifadəsi hər üç tip – Frensis, Pelton və Kaplan turbinləri üçün turbinin çıxış gücünü suyun sərfi ilə əlaqələndirən universal ifadədir. Burada turbinin növündən asılı olaraq yalnız a , b , c əmsalları və λ sürtünmə əmsalı dəyişir. Sürtünmə əmsalının $\lambda=0,1$ olduğu hal üçün $p^* = f(q^*)$ hesablamalarının nəticələri Frensis turbinini üçün Cədvəl 1-də, Pelton turbinini üçün

Cədvəl 2-də, Kaplan turbinini üçün isə Cədvəl 3-də verilmişdir.

Cədvəl 1. Frensis turbinini üçün $\lambda=0,1$ olduqda $p^* = f(q^*)$ –nin hesablanmış asılılığı

q^*	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,4
p^*	0,33	0,47	0,59	0,7	0,816	0,915	1	1,11	1,12

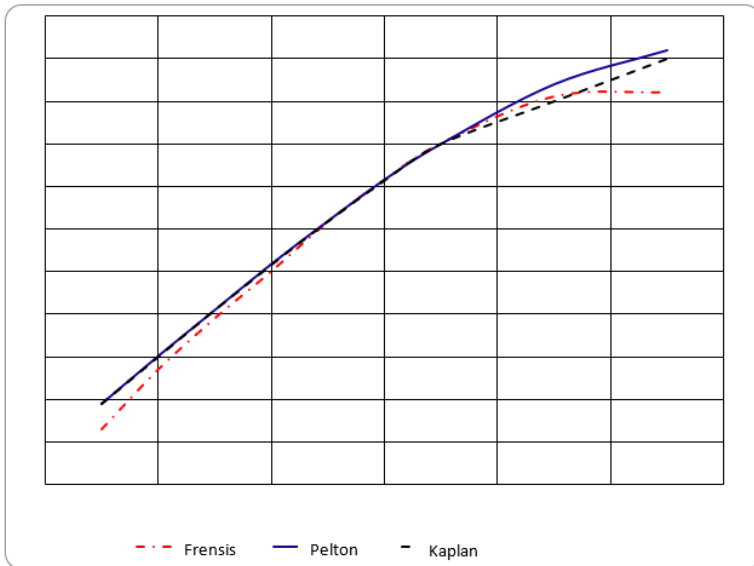
Cədvəl 2. Pelton turbinini üçün $\lambda=0,1$ olduqda $p^* = f(q^*)$ –nin hesablanmış asılılığı

q^*	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,4
p^*	0,39	0,502	0,61	0,718	0,819	0,916	1	1,14	1,22

Cədvəl 3. Kaplan turbinini üçün $\lambda=0,1$ olduqda $p^* = f(q^*)$ –nin hesablanmış asılılığı

q^*	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,4
p^*	0,39	0,5	0,61	0,716	0,818	0,914	1	1,1	1,2

Cədvəl 1 ÷ 3 verilənləri təhlil edərək birmənalı olaraq o nəticəyə gəlmək olar ki, q^* su sərfiyyatının 0,4 ÷ 1,4 intervalında dəyişməsi zamanı Pelton turbininin və Kaplan turbininin güc göstəriciləri tamamilə üst-üstə düşür. Su sərfiyyatı q^* -nün 0,4÷0,7 intervalında dəyişməsi zamanı Frensis hidroturbininin gücü p^* digər turbinlərin gücündən bir qədər azdır. Bu isə onu göstərir ki, su sərfiyyatının kiçik qiymətlərində bu turbinin faydalı iş əmsalı Pelton və Kaplan turbinlərinin faydalı iş əmsalından kiçikdir. Şəkil-1 -də kiçik SES-lərin su turbinləri üçün $p^* = f(q^*)$ asılılıq ayrılıqları verilmişdir



Şəkil 1. Turbinlərin çıxış gücünün su sərfiyyatından asılılıq qrafiki

Yük qrafikindən asılı olaraq su turbinlərinin istiqamətləndirici aparatlarının açılma bucaqları vasitəsilə su sərfiyyatını tənzimləmək lazım gəldikdə əks əlaqəni ifadə edən $q_{qt} = f(p_{qt})$ asılılığını bilmək

lazımdır. Qeyd edək ki, yuxarıda verilən bütün münasibətlər su turbininin fırlanma tezliyinin sabit nominal qiyməti üçün alınmışdır. Əgər su turbinlərinə fırlanma tezliyi qərarlaşmış rejimdə sabit olan tənzimlənməyən elektrik generatorları – sinxron və ya asinxron generatorlar qoşulmuşdursa, onda (8) tənliyini avtomatik olaraq su turbininin hərəkətverici momentinin ifadəsi kimi aşağıdakı şəkildə yazmaq olar:

$$m_{qt} = \frac{p^*}{n^*} = p_{qt} \quad (9)$$

burada $n^*=1$.

İkinci fəsildə həmçinin kiçik SES-lərdə sabit fırlanma tezliyində elektromexaniki çevirici ilə birgə işləyən hidroaqreqatın statik rejimlərinin tədqiqinin nəticələri öz əksini tapmışdır. Bu bölmədə elektrik şəbəkəsi ilə parallel işləyən Frensis turbinindən və klassik elektromaqnit təsirlənməyə malik sinxron generatordan ibarət hidroaqreqatın hal tənliyinə baxılmışdır və bu tənlikdən çıxış edərək hidroaqreqatın statik rejimləri kompüter modelləşməsinin köməyi ilə tədqiq olunmuşdur.

Elektromaqnit təsirlənməyə malik sinxron generatorun tənliyi hidroturbinin tənliyi də nəzərə alınmaqla ümumi şəkildə aşağıdakı kimi yazıla bilər:

$$\left. \begin{aligned}
p\Psi_{ds} &= U_{ds} - \omega_r \cdot \Psi_{qs} - r_s \cdot i_{ds} \\
p\Psi_{qs} &= U_{qs} + \omega_r \cdot \Psi_{ds} - r_s \cdot i_{qs} \\
p\Psi_{dr} &= -\frac{r_{dr}}{X_{dr}} \cdot \Psi_{dr} + \frac{r_{dr} \cdot X_{ad}}{X_{dr}} \cdot i_{ds} + \frac{r_{dr} \cdot X_{ad}}{X_{dr}} \cdot i_{df} \\
p\Psi_{qr} &= \frac{r_{qr}}{X_{qr}} \cdot \Psi_{qr} + \frac{r_{qr} \cdot X_{aq}}{X_{qr}} \cdot i_{qs} \\
p\Psi_{df} &= \frac{r_{df}}{X_{ad}} \cdot U_{df}^* - r_{df} \cdot i_{df} \\
p\omega_r &= \frac{1}{T_j} \cdot m_{hv} - \frac{1}{T_j} \cdot m_{em} \\
i_{ds} &= \frac{X_{dr}}{\Delta d} \cdot \Psi_{ds} - \frac{\Delta d_1}{\Delta d} \cdot i_{df} - \frac{X_{ad}}{\Delta d} \cdot \Psi_{dr} \\
i_{qs} &= \frac{X_{qr}}{\Delta q} \cdot \Psi_{qs} - \frac{X_{aq}}{\Delta q} \cdot \Psi_{qr} \\
i_{df} &= \frac{X_{dr}}{\Delta d_2} \cdot \Psi_{df} - \frac{\Delta d_1}{\Delta d_2} \cdot i_{ds} - \frac{X_{ad}}{\Delta d_2} \cdot \Psi_{dr} \\
m_{em} &= \Psi_{ds} \cdot i_{qs} - \Psi_{qs} \cdot i_{ds} \\
\omega_r &= p\theta - 1 \\
m_{hv} &= k_{nep} \cdot (-A \cdot q^5 - B \cdot q^4 + C \cdot q^3 + D \cdot q^2 + E \cdot q)
\end{aligned} \right\} \quad (10)$$

burada

$$U_{ds} = -U \cdot \sin \theta; \quad U_{qs} = U \cdot \cos \theta;$$

U_{df}^* – təsirlənmə gərginliyinin yüksüz işləmə halındakı təsirlənmə gərginliyinə olan nisbəti;

m_{hv} – su turbininin hərəkətverici momenti;

$k_{\zeta ev}$ – su turbininin baza vahidlərini sinxron generatorun baza vahidlərinə çevirən əmsal;

q – nisbi vahidlərlə ifadə olunan su sərfiyyatıdır.

Generatorun tənliyi ilə yanaşı həm də tənzimləyici qurğunun tənliyi də nəzərə alınmalıdır. Servo mühərrikli tənzimləyicilərin traktının tənzimlənmə müddətinin sabiti 1–2 san təşkil edir. Ətalətli tənzimləyicininin tənliyi aşağıdakı kimi ifadə olunur:

$$U_{\text{çix}} = \frac{K}{T_p + 1} U_{\text{gir}} \quad (11)$$

Yuxarıda qeyd edildiyi kimi, tənzimləyicidə $U_{\text{çix}}$ çıxış qiyməti olaraq istiqamətverici aparatların açılma bucağı istifadə olunur və bu kəmiyyət turbindən axan suyun sərfiyyatını q təyin edir. Giriş qiyməti olaraq təyin edilmiş aktiv güc götürülür. Generatorun və su turbininin (10) tənliklərinə tənzimləyicininin tənliyi və generatorun çıxış terminallarındakı cari aktiv gücün ifadəsi əlavə olunur.

$$\left. \begin{aligned} pq &= \frac{k_{12}}{T_p} (p_{g_{\text{ver}}}) - \frac{q}{T_p} \\ p_{\text{gen}} &= U_{ds} \cdot i_{ds} + U_{qs} \cdot i_{qs} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

burada,

p – sinxron zamana görə $\tau=314 \cdot t$ diferensiallama simvolu;

T_p – tənzimləyicinin zaman sabiti [rad];

k_{12} – tənzimləyicinin güclənmə əmsalı;

$p_{g_{\text{ver}}}$ – generatorun tələb olunan çıxış gücüdür.

k_{12} əmsalı $q = f(p)$ əyrisinin aproksimasiyası əsasında təyin edilə bilər.

$$k_{12} = \begin{cases} k_1 & q \leq 1 \\ k_2 & q \geq 1 \end{cases} \quad (13)$$

Daha sonra aşağıdakı parametrlərə malik Frensis turbini istifadə olunan kiçik su elektrik stansiyaları üçün təqribi hesabat aparılmış və aşağıdakı aralıq nəticələr əldə edilmişdir: nominal su basqısı $H_n=50$ m, su turbininin diametrinin $D=2,45$ m qiymətində su sərfiyyatı $Q=56 \text{ m}^3/\text{san}$ olarsa kiçik SES-in nominal gücü

$$P_n=9,81 \cdot 0,9 \cdot 56 \cdot 50=24,72 \text{ MVt}$$

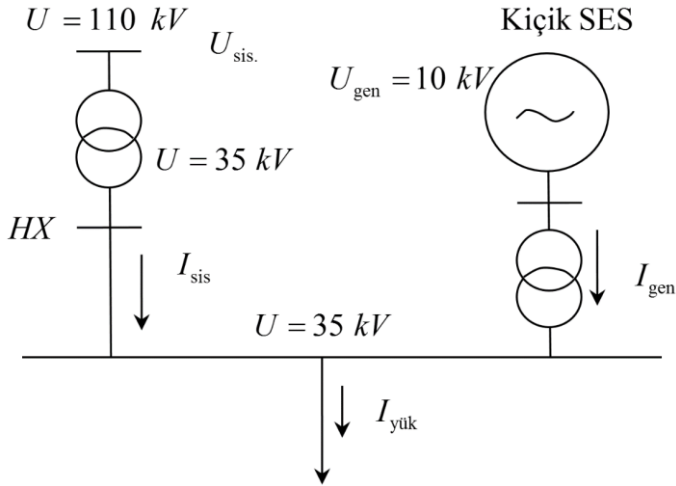
kimi ifadə oluna bilər.

Sistemin qərarlaşmış rejiminin, generatorun, turbinin və tənzimləyicinin parametrlərini və alınmış aralıq nəticələri tənliklər sistemində yerinə qoyduqdan sonra tədqiqat aparmaq üçün lazım olan riyazi model əldə olunmuşdur.

Bu riyazi model alqoritmə uyğunlaşdırılmış və kiçik SES-in generatorunun rejim parametrlərinin dəyişməsi fluktoqrammları şəklində təqdim olunmuşdur. Generatorun cari gücünün qiymətləri ilə tələb olunan gücün qiymətləri ilə müqayisə edilmişdir. Bu kəmiyyətlər arasındakı fərğin 3%-i aşmadığı müəyyən olunmuşdur. Aparılan tədqiqatlarda sistemin işləmə prinsipini daha əyani nümayiş etdirmək üçün tənzimləyicini birinci tərtib ətalətli həlqə hesab edərək sistem sadələşdirilmişdir. Daha mürəkkəb tənzimləyicinin seçilməsi modelləşmənin ümumi sisteminin ideya və alqoritminə təsir etmir.

İkinci fəsildə həmçinin generatorun iş rejimindən və yüklənmə əyrisindən asılı olaraq aktiv güc itkilərinin minimuma endirilməsi məsələsinə baxılmışdır. Kiçik SES-lərdə sinxron generatorun təsirlənməsinin elə optimal idarəetmə qanunu müəyyən olunmuşdur ki, bu halda reaktiv gücün optimal axını hesabına elektrik enerjinin itkiləri minimuma endirilmiş olur.

Məlum olduğu kimi Azərbaycanda kiçik SES-lərin şəbəkəyə qoşulmasının daha tez-tez rast gəlinən topoloji elektrik təchizatı sxemi Şəkil 2-dəki kimidir. Bu sadə elektrik təchizatı sxemində bütövlükdə aktiv gücün ötürülməsi ilə əlaqədar əlavə cərəyan axını ilə bağlı olan elektrik enerjisinin itkiləri istehlakçının və kiçik SES-in aktiv güc qrafikindən asılıdır. Reaktiv gücə gəldikdə isə, sistemdə kiçik SES-in sinxron generatoru qismində idarəolunan reaktiv güc mənbəyi olduğundan, kiçik SES-in sinxron generatorunun təsirlənməsinin tənzimlənməsinin optimal qanuna uyğunluğunu təyin etmək imkanı yaranır. Təsirlənmənin bu cür optimal tənzimlənməsi göstərilən sxemdə elektrik enerjisi itkilərini reaktiv gücün optimal əlavə cərəyanla ötürülməsi hesabına minimuma endirməyə imkan verir.



Şəkil 2. Elektrik təchizatı sxemi

Ümumi itkilər aşağıdakı kimi təyin olunur:

$$\Delta p_g = \frac{(\beta^2 \cdot P_n^2 + \alpha^2 \cdot Q_n^2) \cdot R}{U^2} +$$

$$+ \frac{R_f}{x_{ad}^2} \left[\frac{x_d \cdot x_q}{U^2} (\beta^2 \cdot P_n^2 + \alpha^2 \cdot Q_n^2) + \alpha (x_d + x_q) \cdot Q_n + U^2 \right] \cdot [1 + R(Q)]$$

Generatordakı itkilər xətti ifadə formasına salınaraq 10% xəta ilə aşağıdakı kimi göstərilə bilər:

$$\Delta p_g = a \cdot Q^3 + b \cdot Q^2 + c \cdot Q + d$$

Burada,

$$a = \frac{(R_i - R_0) \cdot R_f \cdot x_d \cdot x_q}{S_{baz} \cdot x_{ad}^2 \cdot U^2};$$

$$b = \frac{R}{U^2} + (1 + R_0) \frac{x_d \cdot x_q \cdot R_f}{x_{ad}^2 \cdot U^2} + \frac{R_f \cdot (R_i - R_0)}{S_{baz} \cdot x_{ad}^2} \cdot (x_d + x_q);$$

$$c = \frac{R_f}{x_{ad}^2} \cdot (x_d + x_q) \cdot (1 + R_0) + \frac{(R_i - R_0) \cdot R_f}{S_{baz} \cdot x_{ad}^2} \left(\frac{x_d \cdot x_q}{U^2} \cdot \beta^2 \cdot P_n^2 + U^2 \right);$$

$$d = \frac{R}{U^2} \cdot \beta^2 \cdot P_n^2 + \frac{R_f}{x_{ad}^2} \left(\frac{x_d + x_q}{U^2} \cdot \beta^2 \cdot P_n^2 + U^2 \right) \cdot (1 + R_0).$$

Dissertasiya işində daha ətraflı göstərilən sadələşdirmələrdən sonra kiçik SES-in generatorunda itkilərin Δp generatorun reaktiv gücündən asılılığı aşağıdakı kimi ifadə oluna bilər:

$$\Delta p_g = b \cdot Q_{gen}^2 + c \cdot Q_{gen} + d \quad (14)$$

Ümumi halda reaktiv güc aşağıdakı kimi təyin olunur:

$$Q_{üm} = Q_{gen} + Q_x \quad (15)$$

Generatordakı və hava xəttindəki ümumi itkilər aşağıdakı ifadədən tapılır:

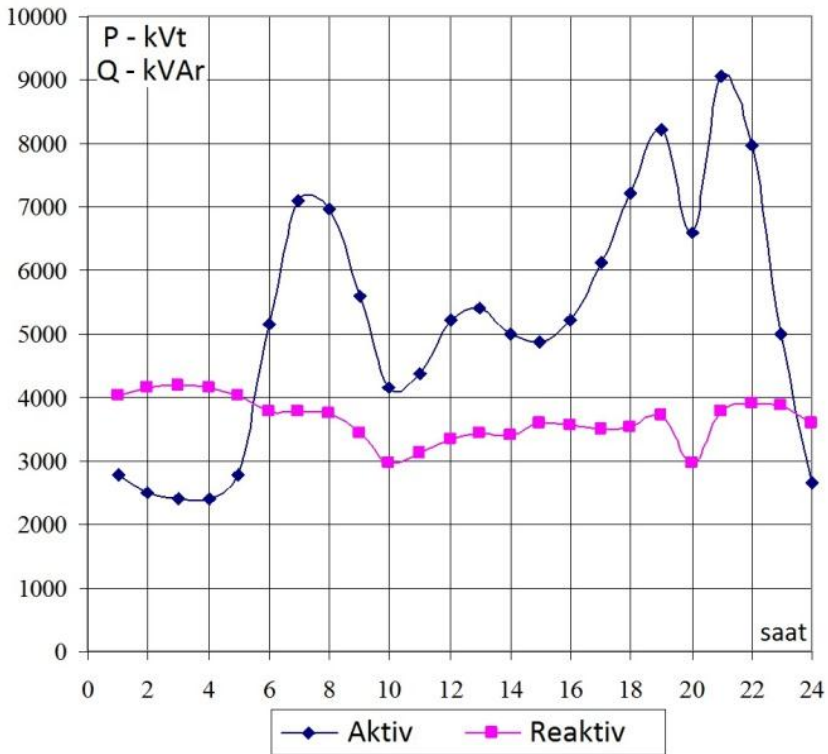
$$\Sigma \Delta p = \Delta p_x + \Delta p_{gen} = m + n \cdot Q_x^2 + b \cdot Q_{gen}^2 + c \cdot Q_{gen} + d \quad (16)$$

Əgər itkiləri yalnız generatorda minimallaşırsaq (16) ifadəsi aşağıdakı şəkə düşər:

$$Q_{gen} = -\frac{c}{2b} \quad (17)$$

Qeyd etmək lazımdır ki, qeyri-aydın qütblü sinxron maşınlar üçün b və c əmsalları aktiv gücdən asılı olmurlar, yəni generatorun valının fırlanma momentini dəyişdikdə minimum itkilər sabit reaktiv güc qədər olur. Beləliklə, buradan belə bir nəticə çıxır ki, generatorun reaktiv gücünü (deməli həm də təsirlənmə cərəyanını), generatorun və hava xətlərinin parametrlərini nəzərə almaqla, işlədicinin reaktiv yükünün qiymətinə mütənasib olaraq tənzimləmək lazımdır. İşlədicinin reaktiv gücü bu cür nisbətən kiçik intervalda dəyişdikdə generatorun reaktiv gücünü reaktiv yükədən asılı olaraq tənzimləmək məqsəduyğun deyil. Bu halda generator üçün reaktiv gücün elə qiyməti tapılmalıdır ki, bu qiymət dəyişməz qaldığı halda, reaktiv yükün maksimum və minimum qiymətlərində 5%-dən artıq ümumi güc itkilərinə gətirib çıxarmasın. Təbii ki, bu cür rejim kvazioptimal sayılır. Beləliklə, reaktiv yükün orta qiymətə nəzərən nisbətən kiçik yırğalanmaları halında (Şəkil 3) kvazioptimal

rejimlə də keçinmək olar. Bu halda generatorun reaktiv gücü dəyişməz qalar, bu rejimdə xətlər minimum olaraq qalar və 5% həddini keçməz.



Şəkil 3. İndiqo sayğacının göstəricilərinə görə yük qrafiki

Ümumilikdə ikinci fəslin nəticələrini aşağıdakı kimi ifadə etmək olar:

1. Frensis, Pelton və Kaplan (sabit pərli) turbinlərinə malik kiçik SES-lərin iş rejimlərini tədqiq etmək üçün riyazi model işlənilib hazırlanmışdır. Bu turbinlərin gücünün enerji daşıyıcısının – suyun sərfindən asılılığını ifadə edən çoxhədli şəkildə analitik riyazi ifadəsi alınmışdır.

2. Sinxron mühərrikin, su turbininin və eləcə də tənzimləyicinin tam tənzimləmə üzrə birgə tədqiqi işlənilib hazırlanmışdır. Riyazi modelin dəqiqliyi, effektivliyi və səmərəliliyi nümayiş etdirilmişdir.

Bu səbəbdən də, model kiçik SES-lərin iş rejiminin həm layihələndirilmə, həm də istismar mərhələlərindəki ilkin hesabatlarda istifadə edilə bilər.

3. Reaktiv yükün orta qiymətə nəzərən nisbətən kiçik yığılanmaları halında kvazioptimal rejimlə də keçinmək olar. Bu halda generatorun reaktiv gücü dəyişməz qalar. Belə iş rejimində xətlər minimum olaraq qalar və 5% həddini keçməz.

Dissertasiya işinin **üçüncü fəslində** ilk olaraq kiçik SES-lərdə elektrik maşınlarından istifadə və onların tənzimlənməsinə baxılmışdır. Kiçik hidroenergetikanın əsas üstünlüyü kimi onların ətraf mühitə çox az təsir etmələri göstərilə bilər və onlar praktiki olaraq ekoloji cəhətdən təmiz enerji mənbələri hesab olunurlar. Kiçik hidroenergetikanın əsas çatışmayan cəhəti kimi kiçik SES-lərin böyük SES-lərin texnologiyası əsasında quraşdırılmasının kapital qoyuluşunu əhəmiyyətli dərəcədə artmasına gətirib çıxarmasını göstərmək olar. Kiçik SES-lərin texnoloji komponentlərinin müasir idarəolunan elektrik maşınlarını tətbiq etməklə sadələşdirilməsi qarşıya qoyulan əsas texniki tapşırıqlardan biri kimi qeyd edilmişdir. Kiçik SES-lərdə bir qayda olaraq istiqamətləndirici aparatın kürəklərinin çevirən intiqal mexanizmi servo-mühərriklərin əsasında yığılır. Bu da kiçik su elektrik stansiyalarında yağ təsərrüfatının olmasını tələb edir. Əsas məqsəd kimi kiçik SES-lərdə generator kimi rotor dövrəsi yarımkeçirici əsaslı tezlik çeviricilərinə qoşulmuş iki tərəfdən qidalanan asinxron maşınlardan istifadə edilməsini nəzərdən keçirmək və onların su turbinləri ilə birləşən iş rejimlərinin tədqiq olunması göstərilir. Bu müəyyən diapazonda generatorun rotorunun və ona qoşulmuş turbinin işçi çarxının fırlanma tezliyinin idarə olunmasına, bu da öz növbəsində su turbininin çıxış gücünün tənzimlənməsinə imkan verir.

Məlum olduğu kimi, su turbininin gücü aşağıdakı ifadə ilə təyin olunur:

$$P_t = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta \quad (18)$$

burada,

P_t – çıxış gücü [kVt];

Q – suyun sərfiyyatı [m³/san];

H – su basqısı [m];

η – F.İ.Ə. [ş.v.].

Su turbinlərinin hesabı zamanı onların əsas universal xarakteristika ayrılərindən geniş istifadə olunur. Universal xarakteristikalardan əldə olunmuş aralıq qiymətləri çevirmə düsturlarında yerinə qoymaqla faktiki istismar olunacaq turbinin D və H göstəricilərini hesablamaq mümkündür.

$$n = \frac{n'_m \sqrt{H}}{D} \sqrt{\frac{\eta_{gm}}{\eta_{gm}}}; \quad Q = Q'_m \cdot D^2 \cdot \sqrt{H} \cdot \sqrt{\frac{\eta_{gm}}{\eta_{gm}}} \quad (19)$$

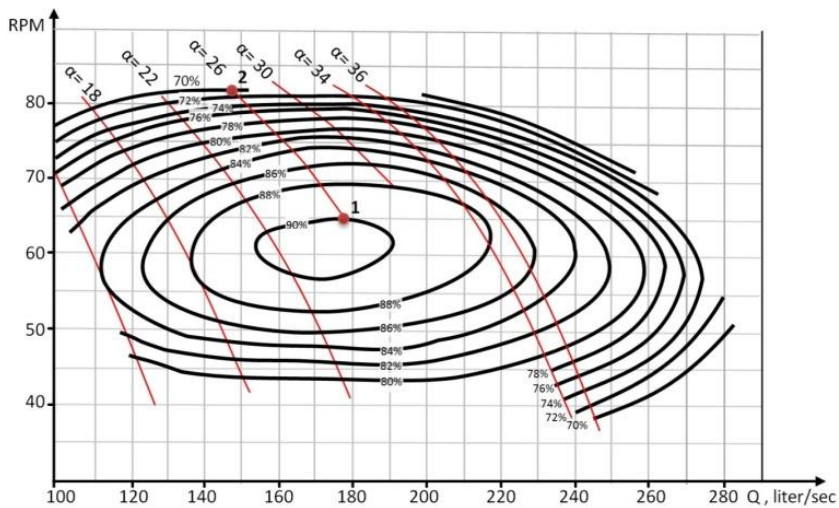
Düstur (19)–də η_{gt} və η_{gm} uyğun olaraq model və həqiqi su turbininin hidravlik faydalı iş əmsalıdır. Turbinin çıxış gücünü təyin edən iki mühüm parametirin - su sərfiyyatı Q' və faydalı iş əmsalı η -nin valın fırlanma sürətindən asılılığına baxılmışdır. Bu kəmiyyətlər PO 400/683 tipli turbin üçün istiqamətləndirici aparatın açılma bucağı $\alpha_0=26^\circ$ olan vəziyyətinə uyğun gələn nominal parametrlər aşağıdakı kimidir: $n_n=65$ dövr/dəq; $Q'_n=178$ litr/san və F.İ.Ə.; $\eta_n=0,9$ (Şəkil 4 -də nöqtə 1)

İstiqamətləndirici aparatın açılma bucağının elə bu qiymətində $\alpha_0=26^\circ$ turbinin fırlanma sürətini $n'_1=82$ dövr/dəq qədər artırısaq (nöqtə 2), su sərfiyyatı $Q'_1=148$ litr/san qədər, faydalı iş əmsalı isə 70%-dək ($\eta_1=0,7$) azalar. Uyğun olaraq su sərfiyyatının, faydalı iş əmsalının, çıxış gücünün və fırlanma sürətinin nisbi qiymətləri aşağıdakı kimi ifadə oluna bilər:

$$p_t^* = \frac{P}{P_{t_n}}; \quad q_t^* = \frac{Q'_1}{Q'_n} = \frac{148}{178} = 0,83; \quad \eta_t^* = \frac{0,7}{0,9} = 0,778$$

$$p_t^* = q^* \cdot \eta^* = 0,83 \cdot 0,777 = 0,65; \quad \eta_t^* = \frac{n'_1}{n'_n} = \frac{82}{62} = 1,26$$

Bələliklə, PO 400/683 tipli turbinin fırlanma tezliyinin 26% artırılması turbinin çıxış gücünün 35% azalmasına gətirib çıxarır.



Şəkil 4. PO400/683 (yüksəktəzyiqli turbin) turbininin işçi çarxının əsas universal xarakteristikası

Tədqiqatın məqsədi aqreqatın çıxış gücünü istiqamətləndirici kürəyin meyl bucağını dəyişməklə deyil, su turbinin özünün (generator və ona qoşulmuş su turbinini) fırlanma tezliyini dəyişməklə tənzimləməkdir.

$$S_{baz} = S_n = \frac{P_n}{\eta_g \cdot \cos \varphi_g} \quad (20)$$

burada,

P_n – generatorun valının aktiv gücünün nominal qiyməti;

$\eta_g=0,95$ – generatorun F.İ.Ə.-si;

$\cos \varphi_g=0,9$ – işə güc əmsalıdır.

Tənzimləyicinin tənliyi aşağıdakı kimi təklif olunmuşdur.

$$\Delta k_{fr} = \frac{k_a}{T_p \rho + 1} \Delta p_{em} \quad (21)$$

burada,

$\rho = \frac{d}{d\tau}$ – sinxron zamana $\tau=314 \cdot t$ görə diferensiallama simvolu,

t-zaman [san], τ -rotorun dönmə bucağı [rad];

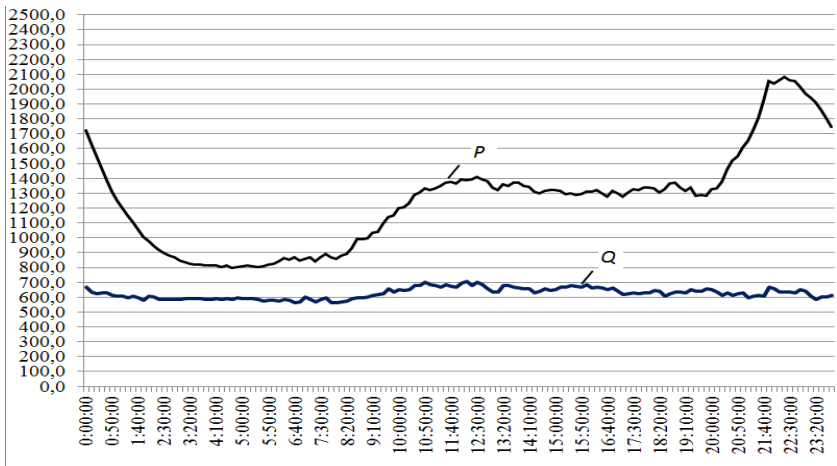
T_p – idarəedicinin (requlyatorun) zaman sabiti ;

k_a – idarəedicinin (requlyatorun) artım əmsalı;

Δk_{fr} – iki tərəfdən qidalanan asinxron maşının rotor dolağına verilən cərəyanın tezliyinin artım qiymətidir.

Daha sonra əldə olunmuş riyazi model su turbininə qoşulmuş və parametrləri əvvəlcədən məlum olan iki tərəfdən qidalanan asinxron maşının keçid və qərarlaşmış iş rejimlərinin hesabat nümunəsi üzərində nümayiş etdirilmişdir.

Üçüncü fəsildə baxılan digər məsələ isə kiçik SES-lərdə istifadə olunan sabit maqnitli sinxron maşınların iş rejimlərinin tədqiqi və modelləşdirilməsidir. Bu tapşırığı yerinə yetirmək üçün təcrübi yolla əldə olunmuş yük qrafikindən istifadə edilmişdir.



Şəkil 5. Azərbaycanın kənd yerlərində istehlakçıların tipik yük qrafiki (aktiv P və reaktiv Q)

Kiçik SES-də isə güc aqreqatı kimi 21-çalovlu Pelton turbinini nəzərə tutulmuşdur. Məlum olduğu kimi, Pelton su turbininin çıxış gücü su sərfiyyatının hesabına idarə olunur. Su sərfiyyatı isə öz növbəsində su şırnağının diametrindən asılıdır ki, bu da injektorda iynənin vəziyyəti ilə tənzimlənir. İnjektordan çıxan su şırnağının sürəti çox böyükdür və onun qiyməti aşağıdakı ifadə ilə təyin olunur:

$$v_c = \varphi \sqrt{2 g \cdot H} \quad (22)$$

burada:

φ – sürət əmsalı $\varphi=0,98-0,99$;

H – su sütunu, [metr];

$g = 9,81 \text{ m/san}^2$ – sərbəstdüşmə təcildir;

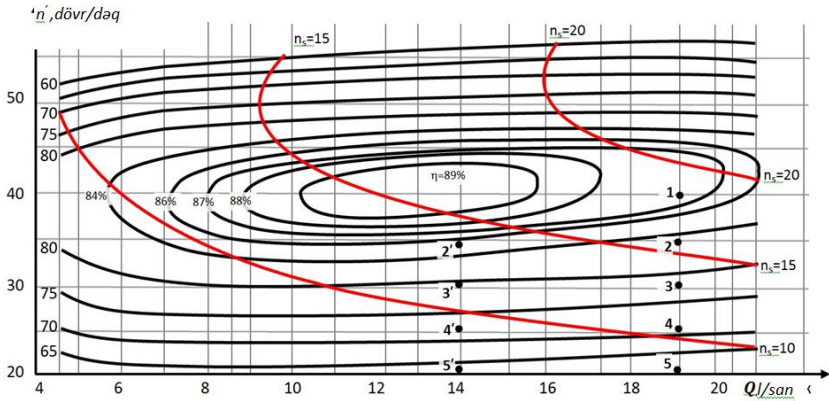
Modeldə istifadə olunan su turbininin hesablanmış parametrləri verilmişdir. Hesablama düsturlarından istifadə etməklə, turbinin nominal çıxış gücünün bazis qiymətlərinin Q_n , H_n , η_n və P_n olduğunu qəbul edərək, onda nisbi vahidlərlə aşağıdakı ifadə alınmışdır:

$$p_t^* = q^* \cdot h^* \cdot \eta^* \quad (23)$$

burada,

$$p_t^* = \frac{P_t}{P_n}; \quad q^* = \frac{Q}{Q_n}; \quad h^* = \frac{H}{H_n} \quad \text{və} \quad \eta^* = \frac{\eta}{\eta_n}.$$

Digər tərəfdən Pelton turbininin əsas universal xarakteristikasına uyğun olaraq qeyd olunur ki, su sütunu (suyun təzyiqi) h^* və suyun sərfiyyatı q^* hidroaqrəqatın valının fırlanma tezliyindən asılı deyil, yalnız F.İ.Ə-nin η^* qiyməti valının fırlanma tezliyindən asılıdır.



Şəkil 6. Çalovlu turbinin əsas universal xarakteristikası

Daha sonra (23) ifadəsinə və su turbininin fırlanma momentinin aşağıdakı ifadəsinə əsasən

$$m_t^* = \frac{p_t^*}{n^*} \quad (24)$$

turbinin çıxış gücünün və fırlanma momentinin fırlanma tezliyindən asılı olaraq qiymətləri təyin edilmişdir. Hesablamaların nəticələrindən belə aydın olur ki, hidroaqreqatın valının fırlanma tezliyini nominaldan 50% azaltdıqda turbinin gücü yalnız F.İ.Ə-nin hesabına 32% azalır, bununla belə xüsusi sərfiyyat sabit qalaraq $Q'=19$ l/san bərabər olur.

Baxılan su turbininin sərfiyyatının 26% azaldılması üçün su şırnağının diametrini sadəcə 5 mm və ya 14% azaltmaq kifayətdir. Nəzərə alsaq ki, injektorun tam bağlanmasına tələb olunan vaxt 20–40 saniyədir, onda su şırnağının diametrinin yuxarıda qeyd olunan qədər azaldılmasına sərf olunan vaxt 3–6 saniyədən çox olmayacaqdır. Bu üsulla təklif olunan idarəetmə algoritmi hidroaqreqatın fırlanma tezliyini və çıxış gücünü $(1 \pm 0,5) \cdot n_n$ intervalında tənzimləməyə imkan verir. Bununla belə yalnız birçə dəfə su sərfiyyatını 26% azaltmaq tələb olunur. Bu üsul təklif olunan çıxış gücünün dəyişmə diapazonunda deflektor və injektor iynəsinin növbəli iştirakı ilə həyata keçirilən mürəkkəb mexaniki tənzimləmə sistemindən imtina etməyə imkan verir.

Çalovlu turbinlə işləyən kiçik SES-lərdə hidroaqreqatların generatoru kimi tezliklə tənzimlənən sabit maqnitli sinxron elektrik maşınlarının tətbiq olunmasının daha bir neçə üstünlükləri sadalanmışdır. Çalovlu turbinlər impuls rejimində işlədiyindən bu cür turbinə malik hidroaqreqatların valına aqreqatın fırlanma tezliyində baş verən rəqsləri söndürmək üçün əlavə olaraq nazimçarx da bərkidilir. Bu da öz növbəsində təbii olaraq hidroaqreqatın fırlanan hissələrinin ətalətliliyini və çəkisini əhəmiyyətli dərəcədə artmasına gətirib çıxarır. Nəticədə su sərfiyyatının əhəmiyyətli dərəcədə azalması hallarında, elə bir vəziyyət yarana bilər ki, su şırnağının enerjisi aqreqatın sükunət momentinə üstün gələ bilməsin. Bu halda sinxron generatorun stator dövrəsinə qoşulmuş tezlik çeviricisinin olması hətta su sərfiyyatının çox az olduğu hallarda belə aqreqatın tezlik çeviricisi ilə işə buraxılmasına imkan verəcək.

Nəhayət, su sərfiyyatının ümumiyyətlə olmadığı vaxtlarda tezlik çeviricisi ilə işəburaxma kiçik SES-in generatorundan sinxron kompensator kimi istifadə etməyə imkan verəcək. Fəslin sonrakı bölmələrində yuxarıda sadalanan rejimlərə uyğun riyazi model

işlənib hazırlanmış və nəticələr cədvəl və qrafik formada illustrasiya olunmuşdur.

Tezlik çeviricisi ilə idarə olunan sabit maqnitli sinxron generatorun modeli verilmişdir. Sinxron generatorun tənlikləri aşağıdakı kimi ifadə olunur:

$$\left. \begin{aligned}
 p\Psi_{ds} &= U_{ds} - \omega_r \cdot \Psi_{qs} - r_s \cdot i_{ds} \\
 p\Psi_{qs} &= U_{qs} + \omega_r \cdot \Psi_{ds} - r_s \cdot i_{qs} \\
 p\Psi_{dr} &= -\frac{r_{dr}}{x_{dr}} \cdot \Psi_{qr} + \frac{r_{dr} \cdot x_{ad}}{x_{dr}} \cdot i_{ds} + \frac{r_{dr}}{x_{dr}} \cdot M_f \\
 p\Psi_{qr} &= -\frac{r_{qr}}{x_{qr}} \cdot \Psi_{dr} + \frac{r_{qr} \cdot x_{aq}}{x_{qr}} \cdot i_{qs} \\
 p\omega_r &= \frac{1}{T_j} \cdot m_t - \frac{1}{T_j} \cdot m_{em} \\
 p\alpha &= \omega_r \\
 U_{ds} &= 0,707 \cdot k_{us} [\cos(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos\alpha - \sin\alpha) - \sin(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos\alpha + \sin\alpha)] \\
 U_{qs} &= 0,707 \cdot k_{us} [\cos(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos\alpha + \sin\alpha) + \sin(k_{fs} \cdot \tau) \cdot (\cos\alpha - \sin\alpha)] \\
 i_{ds} &= \frac{x_{dr}}{x_{ds} \cdot x_{dr} - x_{ad}^2} \cdot \Psi_{ds} - \frac{x_{dr} \cdot x_{ad}}{x_{ds} \cdot x_{dr} - x_{ad}^2} \cdot M_f - \frac{x_{ad}}{x_{ds} \cdot x_{dr} - x_{ad}^2} \cdot \Psi_{dr} \\
 i_{qs} &= \frac{x_{qr}}{x_{qs} \cdot x_{qr} - x_{aq}^2} \cdot \Psi_{qs} - \frac{x_{ad}}{x_{qs} \cdot x_{qr} - x_{aq}^2} \cdot \Psi_{qr} \\
 m_{em} &= \Psi_{ds} \cdot i_{qs} - \Psi_{qs} \cdot i_{ds} \\
 p_s &= U_{ds} \cdot i_{ds} + U_{qs} \cdot i_{qs} \\
 q_s &= U_{qs} \cdot i_{ds} - U_{ds} \cdot i_{qs}
 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Sinxron generatorun tənliklər sistemi (25) gücün bazis qiyməti elektrik maşınının tam gücü kimi nəzərə alınaraq nisbi vahidlərlə yazılmışdır:

Baxılan sinxron generatorun parametrləri aşağıdakı kimidir:

Güçü	$P = 1500$	kVt
Gərginliyi	$U_n = 400$	V
Cərəyan şiddəti	$I_n = 2165$	A

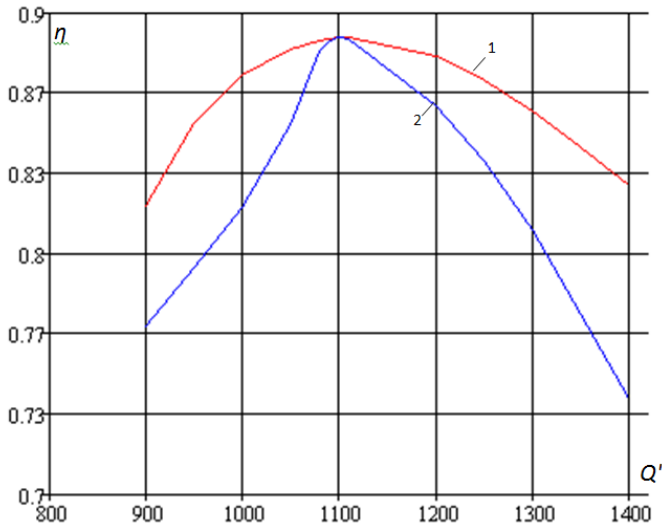
Tezlik	$f_n = 50$	Hs
Fırlanma tezliyi	$\omega = 500$	dövr/dəq
Cüt qütblər sayı	$p = 6$	

Daha sonra nisbi vahidlərlə hesablanmış parametrlərin ədədi qiymətləri tapılmış və uyğun həll alqoritmi təklif olunmuşdur. Tənlilər sistemi hidroaqreqatın müxtəlif iş rejimlərinə uyğun verilənlərə əsasən həll edilərək fluktoqrammlar əldə olunmuşdur.

Alınmış fluktoqramlardan görünür ki, çalovlu turbinindən və tezliklə tənzimlənən sabit maqnitli sinxron generatorndan ibarət hidroaqreqatın çıxış gücünün təklif olunan elektrik tənzimlənməsi alqoritmi tamamilə reallaşdırıla biləndir və belə alqoritmlər bu cür kiçik SES-lərdə çıxış gücünün təyin olunmuş idarəetmə intervalında deflektorların köməyi ilə mexaniki üsullarla tənzimlənmədən imtina etməyə imkan verir. Bundan əlavə, idarəolunan elektrik maşınının istifadə su turbininin vala çox az güc ötürdüyü (su sərfiyyatının mövsümi azalması halında) və su sərfiyyatının ümumiyyətlə olmadığı hallarda belə tezlik çeviricisi ilə generatoru işə buraxmağa imkan verir.

Üçüncü fəsilə baxılan digər məsələ tərpənməz kürəkli Kaplan turbini ilə təchiz olunmuş kiçik SES-lərin iş rejimlərinin tədqiqi və modelləşdirilməsidir. Fəslin bu bölümündə əsas məqsəd kiçik SES-lərdə idarəolunan elektrik maşınlarının bu hidroaqreqatlarda istifadə olunan su turbinlərinin istismarının iqtisadi səmərəliliyinin artırılması nöqteyi-nəzərindən tətbiqinin məqsədəuyğunluğunun öyrənilməsidir. Bu məqsədlə kiçik su elektrik stansiyalarında tətbiq olunan üç növ su turbinini - Frensis turbini, Pelton turbini və işçi pərləri tərpənməz olan natamam Kaplan turbininə baxılmışdır. Tezlik çeviricisi ilə idarəolunan elektromexaniki çeviricilərin tətbiq olunduğu müasir külək elektrik qurğularındakı iş təcrübəsi nəzərdən keçirilmişdir. Frensis və Pelton turbinlərinin əsas universal xarakteristikaları təqdim olunmuşdur. Müqayisəli cədvəllər tərtib olunmuş və turbinin fırlanma tezliyi, suyun sərfiyyatı və faydalı iş əmsalı arasındakı asılılıqlar təhlil edilmişdir. Daha sonra tərpənməz pərli Kaplan turbininin iş rejimləri nəzərdən keçirilmişdir. Kaplan turbininin propeller xarakteristikasından istifadə edərək su sərfiyyatının müxtəlif qiymətlərində fırlanma tezliyi və F.İ.Ə.-nın

aldığı qiymətlər cədvəl şəklində təhlil edilmişdir və nəticə olaraq enerji daşıyıcısının sərfiyyatının dəyişməsi zamanı fırlanma tezliyini su sərfiyyatına mütənəsb olaraq tənzimləməyin zəruri olduğu göstərilmişdir. Qrafik şəkildə yuxarıda qeyd olunan fikrin illustrasiyası aşağıdakı şəkildən daha aydın görünür.



Şəkil 7. Turbinin tezliyinin tənzimləndiyi (1) və tənzimlənmədiyi hallarda (2) F.İ.Ə.-nin su sərfiyyatından asılılıq qrafiki

Nisbi F.İ.Ə.-nin fırlanma tezliyindən asılılığının müəyyən olunması üçün asılılıq parabolik ifadə şəklində axtarılmışdır:

$$\eta^* = a \cdot n^{*2} + b \cdot n^* + c \quad (26)$$

Turbinin çıxış gücü və momenti üçün ifadələr alınmışdır. Alınmış bu ifadələrdən aralıq nəticə kimi külək energetikasına analogi olaraq, hasil olunan güc fırlanma tezliyinin kubu (müvafiq olaraq su sərfiyyatının kubu ilə), fırladıcı moment isə fırlanma tezliyinin kvadratı ilə mütənəsb olması qeyd olunmuşdur. İşin davamı olaraq oxlu-pərli su turbinindən və sabit maqnitli tənzimlənən sinxron maşından ibarət hidroaqreqat misalında sistemin riyazi modeli

işlənilmiş, obyektin statik və dinamik xarakteristikaları tədqiq edilmişdir.

Ümumi halda tezliyi tənzimlənən sabit maqnitli sinxron maşınlar üçün tənliklər verilmişdir. Sabit maqnitli tezlik çeviricisi ilə tənzimlənən sinxron generatorun parametrləri və ona aid məlumatlar verilmiş, müxtəlif tezliklər üçün güc və momentlərin adlı vahidlərdə hesabı aparılmışdır. Eləcə də onların bəziləri üçün generatorun baza verilənləri əsasında hesabat aparılmışdır. Su turbininin çevrilmiş fırlanma momenti m_{cf} aşağıdakı kimi yazıla bilər.

$$m_{cf} = -K_p[-0,887(\omega_r \cdot n_{max}^*)^3 + 1,657(\omega_r \cdot n_{max}^*)^2 + 0,263 \cdot (\omega_r \cdot n_{max}^*) - 0,032] \quad (27)$$

Sabit maqnitli tezlik çeviricisi ilə tənzimlənən sinxron generatorun parametrləri və ona aid məlumatlar verilmiş, müxtəlif tezliklər üçün güc və momentlərin adlı vahidlərdə hesabı aparılmış və bu növ kiçik su elektrik stansiyasının rejim parametrlərinin dəyişməsinin fluktoqramı təsvir edilmişdir. Fluktoqramın təhlili göstərir ki, generatorun çıxışındakı reaktiv güc q_s generatorun aktiv yükü p_s azalanda 12%-dək azalır. Zəruri olduqda bu azalmanı aşağı tezliklərdə generatorun gərginliyinin amplitudunu k_{us} artırmaqla kompensasiya etmək mümkündür.

Maraq doğuran digər bir komponovka isə rotor dövrəsində tezlik çeviricisi olan iki tərəfdən qidalanan asinxron generatordur. Bu cür elektromexaniki çeviricilər adətən külək elektrik stansiyalarında istifadə olunur, lakin son illərdə onlardan kiçik SES-lərdə istifadə etmək təklif olunur. Rotor dövrəsində tezlik çeviricisi olan iki tərəfdən qidalanan asinxron maşından istifadə rotorun fırlanma tezliyini sinxron fırlanma tezliyinin $\pm(25\div 30)\%$ -i tərtibində tənzimləməyə imkan verir. Buna rotor dövrəsinə sürüşmə tezliyində əlavə E.H.Q. verməklə nail olunur. Tezlik çeviricisinin nominal gücü generatorun qoyuluş gücünün 30%-i tərtibində olur. Tezlik çeviricisi ilə işəburaxma zamanı rotor gərginliyi və tezliyi (28) ifadəsində göstərilən qanunauyğunluqla dəyişir.

$$k_{ur} = k_{fr} = 0,1 + 0,00038 \cdot \tau \quad (28)$$

Cədvəl 4-də tezlik çeviricisi ilə işəsalmada tezliyi və gərginliyi minimal işçi rejimədək artırıqdan sonra əldə olunan qərarlaşmış rejimin parametrləri göstərilmişdir.

Cədvəl 4. Qərarlaşmış rejimin parametrləri

$k_u=k_f$	ω_r	m_{em}	s_{em}	p_{em}	q
0,4	0,401	-0,1	0,041	-0,04	0,01
0,5	0,502	-0,15	0,062	-0,06	0,014
0,6	0,602	-0,2	0,124	-0,12	0,03
0,7	0,703	-0,25	0,181	-0,176	0,043
0,78	0,784	-0,3	0,217	-0,235	0,09

Bildiyimiz kimi, iki tərəfdən qidalanan asinxron generatorlu kiçik SES-lər valın fırlanma tezliyini su sərfiyyatına mütənəsib olaraq (25÷30)% diapazonda tənzimləməyə imkan verir, bu halda onun güc əmsalı 0,9 (induktiv)- dan 0,9 (tutum)-dək dəyişə bilər. İnduktiv güc əmsalı $\cos\varphi=0,9$, yəni reaktiv güc şəbəkədən alındıqda, kiçik SES-in generatorunun valının aşağı tezlikdə fırlanmasına uyğun olaraq az yüklənmə ilə müşaiət olunur. Belə rejimdə tələb olunan reaktiv gücün orta qiyməti $q_{tal} \approx 0,5$ bərabərdir.

İŞİN ƏSAS NƏTİCƏLƏRİ

1. Frensis, Pelton və Kaplan (sabit pərli) turbinlərinə malik kiçik SES-lərin iş rejimlərini tədqiq etmək üçün riyazi model işlənib hazırlanmışdır. Bu turbinlərin gücünün enerji daşıyıcısının – suyun sərfindən asılılığını əks etdirən çoxhədli şəkildə analitik riyazi ifadə alınmışdır.

2. Sinxron mühərrikin, su turbininin və eləcə də tənzimləyicinin tam tənliklər üzrə birgə riyazi modeli işlənib hazırlanmışdır. Bu riyazi model əsasında aparılan tədqiqatların nəticələri onun dəqiqliyini, effektivliyini və səmərəliliyini nümayiş etdirmişdir. Bu səbəbdən də, model kiçik SES-lərin iş rejiminin həm layihələndirilmə, həm də istismar mərhələlərindəki ilkin hesabatlarda istifadə edilə bilər.

3. Su turbininin çıxış gücünün onun fırlanma tezliyindən asılı olaraq idarə olunması rejiminə uyğun turbinin əsas universal xarakteristikalarından istifadə edərək fırlanma momentinin təyin olunmasının sadələşdirilmiş metodikası təklif olunmuşdur.

4. Su turbinin, iki tərəfdən qidalanan asinxron maşın əsasında icra edilmiş generatorun və iki tərəfdən qidalanan asinxron maşının rotor dövrəsindəki cərəyan tezliyinin avtomatik idarəetmə qurğusunun modellərindən ibarət aqreqatının ümümləşdirilmiş riyazi modeli tərtib olunmuşdur.

5. İşlənib hazırlanmış riyazi model əsasında aparılan tədqiqatlar aqreqatın aktiv gücünün tezlik çeviricisi vasitəsilə iki tərəfdən qidalanan asinxron maşının rotor dolağındakı cərəyanın dəyişdirilməsi ilə idarə olunmasının əsas konsepsiyasının doğruluğunu təsdiq etmişdir.

6. Kiçik SES-lərdə çalovlu turbinli (Pelton turbini) hidroaqreqatlarda generator kimi tezliklə idarə olunan sabit maqnitli sinxron generatorın tətbiqi şəbəkənin tez-tez dəyişən gücə olan tələbatına yüksək dərəcədə uyğunlaşmanı təmin etməyə və çıxış gücünün təyin olunmuş idarəetmə intervalında deflektorların köməyi ilə mexaniki üsullarla tənzimlənmədən imtina etməyə imkan verir.

7. Sabit maqnitli idarəolunan sinxron maşınla təchiz olunmuş hidroaqreqatın işlənib hazırlanmış riyazi model əsasında hidroaqreqatın işləmə alqoritmi fırlanma tezliyinin müasir İGBT – tranzistorlu yarımkeçirici əsaslı tezlik çeviricisinin köməyi ilə rotorun fırlanma tezliyi intervalında (bu çıxış gücünün elə həmin nisbətdə dəyişməsinə imkan verir) tənzimlənməsi halında simulyasiya edilmişdir.

8. Nazımçarx kütləsi əhəmiyyətli dərəcədə çox olan çalovlu su turbini ilə birgə işləyən tezliklə idarə olunan sinxron maşından ibarət sistemi tezlik çeviricisi ilə işəburaxma çox az su – enerji daşıyıcısı sərfiyyatı olan hallarda belə faydalı iş yerinə yetirməyə imkan verir. Bundan əlavə tezliklə işəburaxma suyun olmadığı hallarda belə sistemin iş qabiliyyətini saxlamağa imkan verir: bu halda generator, riyazi modeldə göstərilədiyi kimi, sinxron kompensator kimi işləyəcəkdir.

DİSSERTASIYANIN ƏSAS MÜDDƏALARI AŞAĞIDAKI İŞLƏRDƏ ÖZ ƏKSİNİ TAPMIŞDIR

1. Mustafayev R.I., Hasanova L.H., Musayev M.M. Some subjects of compensation of the induction generators reactive power in wind-power and small hydroelectric power plants // e-Journal “Reliability: Theory & Applications” USA-San Diego, v.8, No.4 (31), December, 2013, pp. 2–13.
2. Mustafayev R.I., Hasanova L.H., Musayev M.M. Modelling starting regime work of the induction generators of wind turbine and small hydroplaning // International Journal of Recent Development in Engineering, v.1, Issue 3, December 2013, pp.16–23.
3. Mustafayev R.I., Hasanova L.H., Aliyev Q.M., Musayev M.M. The excitation control and stability of small hydroelectric power stations synchronous generators when operation in power system // e-Journal “Reliability: Theory & Applications” USA, San Diego, v.9, No.4 (35), December, 2014, pp. 29–36.
4. Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г., Мусаев М.М., Набиев Х.И. Некоторые вопросы регулирования возбуждения синхронных генераторов малых ГЭС // Проблемы энергетики. 2014, №2, с. 3–7.
5. Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г., Мусаев М.М., Мамедов Э.М., Набиев Х.И. Некоторые аспекты применения асинхронных машин двойного питания в качестве генератора малых ГЭС // Изв. ВУЗов Электромеханика, 2015, №6, с. 59–66.
6. Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г., Мусаев М.М., Мамедов Э.М., Набиев Х.И. Моделирование и исследование режимов работы гидроагрегатов малых ГЭС с машинами двойного питания // Электромеханика, Москва, 2015, №6, с. 59–66.
7. R.I. Mustafayev, L.H. Hasanova , M.M. Musayev, E.M. Mamadov , Kh.I. Nabiyeu Modeling and Study of Operating Modes of Small Hydro Power Plants with Double Fed Induction Generator. Modern Electric Power Systems 2015 - MEPS’15, Wroclaw, Poland - July 6-9, 2015.

8. Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г., Мусаев М.М. Моделирование и исследование гидроагрегатов малых ГЭС с частотноуправляемыми синхронными генераторами с постоянными магнитами // Изв. ВУЗов СНГ Энергетика, 2016, № 2, с. 102–117.
9. Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г., Мусаев М.М. Исследование статических и динамических характеристик гидроагрегатов малых ГЭС // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электро-техническая промышленность. 2016, №4, с. 17–21.
10. Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г., Мусаев М.М. Применение регулируемых электрических машин в гидроагрегатах малых ГЭС, работающих на энергосистему // Электротехника, Москва, 2018, №5, с. 38–44.
11. Mustafayev, R.I., Hasanova, L.H., Musaev, M.M. Using Regulated Electrical Machines in Small Hydropower Plants Operating in a Power Network. *Russian Electrical Engineering.*, 2018, 89(5), 322–327 SCOPUS.
12. Musayev, M.M. Study of operating modes of small hydroelectric units equipped with synchronous generator // International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE). – March 2020, v.12, No 1, – p.44-48.
13. Musayev M.M. Azərbaycanca kiçik su elektrik stansiyalarının xülasəsi // Energetikanın Problemləri, 2020, №3 s.38 - 43
14. Hasanova L.H., Aliyev H.S., Musayev M.M.. Study of operating modes of small HPSS' hydroelectric units equipped with synchronous generator.// e-Journal “Reliability: Theory & Applications” - USA, San-Diego:- June 2023, Vol.18 No.2 (73), p. 79-86.
15. Гасанова Л.Г., Мусаев М.М. Моделирование и исследование электрических машин в гидроагрегатах малых гидроэлектростанций. Монография // Под общ. ред. Л.Г. Гасановой, М.М. Мусаева – Изд. «ЭЛМ», 2024. – 171 с.

Müəllifin şəxsi iştirakı

Fəlsəfə doktorluğu dissertasiyası üzrə elmi məqalələr siyahısında verilmiş [13] iş şəxsən müəllifin özü tərəfindən yazılmışdır. Həmmüəlliflər ilə yazılmış [1-12,14,15] işlərində elmi problemin qoyuluşu, onun həlli üsullu və yolları müəllifə aiddir.



Dissertasiyanın müdafiəsi 11 Oktyabr 2024-cü il saat 11:00-da Azərbaycan Texniki Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən ED2.04 - Dissertasiya Şurasının iclasında keçiriləcək
Ünvan: AZ1073, Bakı şəhəri, Hüseyn Cavid prospekti, 25.

Dissertasiya ilə Azərbaycan Texniki Universitetinin kitabxanasında tanış olmaq mümkündür

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Azərbaycan Texniki Universitetinin rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat 27 avqust 2024-ci il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 20.08.2024

Kağızın formatı: A5

Həcm: 41628

Tiraj: 100