

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ომარ ხელაძე

საქართველოს ენერგეტიკულ სისტემაში აქტიური სიმბლავრის  
სწრაფი რეგულირების მოწყობილობის მუშაობის რეჟიმები

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად წარდგენილი  
დისერტაციის

ავტორეფერატი

სადოქტორო პროგრამა: „ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“

შიფრი: 0405

თბილისი

2019 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში  
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი  
ელექტროტექნიკის და ელექტრონიკის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: პროფესორი თ. კობრეიძე

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2019 წლის "-----" "-----" "-----" საათზე  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და  
ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო კოლეგიის სხდომაზე,  
კორპუსი VIII, აუდიტორია  
მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში,  
ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი,  
ასოცირებული პროფესორი

გ. გიგინეიშვილი

## ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

**სამუშაოს აქტუალობა.** მსოფლიოში სხვადასხვა სახის ენერჯის წარმოება და მოხმარება იზრდება სწრაფი ტემპით, განსაზღვრული ადამიანის მოქმედებით ყველა დარგში. ერთდროულად რთულდება ენერჯის გარდაქმნის პროცესები, ფართოვდება ენერგეტიკული დანადგარების და აგრეგატების მრავალსახეობა, რომლებმაც უნდა უზრუნველყონ რაციონალური რეჟიმები სხვადასხვა სახის მომხმარებლების ელექტროკვებისათვის. მნიშვნელოვანი ადგილი აღნიშნული პრობლემის გადაწყვეტაში უკავია ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლებს, რომლებიც წარმოადგენენ მნიშვნელოვან შუალედურ რგოლს ენერჯის გენერაციის, გადაცემის და მოხმარების სისტემებში. ენერჯის დაგროვების პრობლემის აქტუალობა იმდენად სწრაფად იზრდება, რომ მათი მნიშვნელობა თანამედროვე სამეცნიერო-ტექნიკურ ლიტერატურაში ასახულია არა ადეკვატურად. აქედან გამომდინარე, სადისერტაციო ნაშრომში ჩატარებული საქართველოს ენერგეტიკულ სისტემაში აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულირების მოწყობილობის - ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის მუშაობის რეჟიმების შესწავლა მეტად აქტუალურია.

**სამუშაოს მიზანი:** გამოკვლეული იქნეს საქართველოს ენერგეტიკულ სისტემაში აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულირების მოწყობილობის მუშაობის რეჟიმები.

**ძირითადი ამოცანები.** დასახული მიზნის შესაბამისად ფორმულირებული იქნა შემდეგი ამოცანები:

1. დამუშავებული იქნეს ენერგეტიკულ სისტემაში აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულირების მოწყობილობის - ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის პრინციპული ელექტრული სქემა.

2. მიღებული იქნეს ძირითადი თანაფარდობები ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის პარამეტრების ანგარიშისათვის.

3. დამუშავებული იქნეს ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის ერთძარღვიანი და მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენების დენგამტარუნარიანობის და დანაკარგების ანგარიშის მეთოდი ცვლად მაგნიტურ ველში.

4. შესწავლილი იქნეს ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის სისტემის მაგნიტურ წრედში ამორფული შენადნობების გამოყენების პერსპექტივა.

5. დამუშავებული იქნეს ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის ენერგოსისტემაში მუშაობის საანგარიშო მათემატიკური მოდელი და მიღებული იქნეს მისი მუშაობის რეჟიმები, რომლებიც უზრუნველყოფს გენერატორების მდგრად მუშაობას ელექტროსისტემაში ავარიის დროს.

6. დამუშავებული იქნეს თხევადი კრიოგენული პროდუქტებთან მიმოქცევის უსაფრთხოების სპეციალური საკითხები.

**კვლევის მეთოდები.** სადისერტაციო სამუშაოს შესრულებისას გამოყენებული იქნა მათემატიკური მოდელირების მეთოდები.

#### **სამეცნიერო სიახლე:**

1. დადგენილია, რომ ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის ზეგამტარული სადენების გამტარუნარიანობის გაზრდისათვის და მასში დანაკარგების შემცირებისათვის ზგ სადენი სრულდება მრავალძარღვიანი. იმასთან დაკავშირებით, რომ სადენის ზგ ძარღვი მგრძობიარეა გარე მაგნიტური ველის მიმართ, მათი დენგამტარუნარიანობა მრავალძარღვიანი ზგ სადენში მნიშვნელოვნად მცირდება ძარღვების რიცხვის გაზრდით და მათ შორის მანძილის შემცირების დროს. ზგ სადენის და ზგ ძარღვის მოცემული დიამეტრის დროს სადენში ძარღვების შემცირებით, მანძილი მათ შორის იზრდება, მაგნიტური ურთიერთქმედება ძარღვებს შორის სუსტდება და

დენგამტარუნარიანობა ზგ ძარღვის იზრდება. 2. გამოვლენილია, რომ ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის სისტემის მაგნიტურ წრედში ამორფული შენადნობების გამოყენება, კერძოდ ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის კვების წყაროსათვის შექცევადი ტირისტორული გარდამქმნელი ტრანსფორმატორის მაგნიტურ წრედში ამორფული შენადნობების გამოყენება საგრძნობლად ამცირებს დანაკარგებს. გარდა დანაკარგების შემცირებისა, მცირდება აგრეთვე დამაგნიტების დენის სიდიდე, რის შედეგად მცირდება ტრანსფორმატორის ტემპერატურა და იზრდება მისი მომსახურების ვადა.

3. დამუშავებულია ეზგიმ-ის ფუნქციონირების მათემატიკური მოდელი, აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულატორის რეჟიმში, რომელიც რეალიზებული იქნა მისი ენერგეტიკული მახასიათებლების აგებისათვის და შეფასებისათვის, მიღებული მახასიათებლები უზრუნველყოფს გენერატორების მდგრად მუშაობას ელექტროსისტემაში ავარიის დროს.

**შედეგების გამოყენების სფერო.** სადისერტაციო სამუშაოში მიღებული შედეგები შეიძლება გამოყენებული იქნეს ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის დაგეგმარების და დამზადების დროს.

**აპრობაცია.** სადისერტაციო სამუშაოს ძირითადი შედეგები მოხსენებული იქნა: სტუ-ს სტუდენტთა 85-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე, (2017წ.). ასევე ელექტროტექნიკისა და ელექტრონიკის დეპარტამენტში I, II, III კოლოქვიუმზე და წინასწარ დაცვაზე სტუ-ის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის ელექტროტექნიკისა და ელექტრონიკის დეპარტამენტის გაფართოვებულ სხდომაზე.

სადისერტაციო სამუშაოს შედეგები გამოქვეყნებული იქნა ოთხ სამეცნიერო სტატიაში.

**დისერტაციის სტრუქტურა და მოცულობა.** დისერტაცია შედგება შესავლისა და 4 თავისაგან, რომლებიც გადმოცემულია 123 გვერდზე. შეიცავს 26 ნახაზს, 3 ცხრილს და 41 დასახელების ლიტერატურას.

## სამუშაოს ძირითადი შინაარსი

**შესავალში** დასაბუთებულია პრობლემის აქტუალობა, ჩამოყალიბებული და განსაზღვრულია გამოსაკვლევ საკითხთა წრე, ასევე კვლევის მიზანი და ამოცანები. ფორმულირებულია ნაშრომის მეცნიერულ სიახლეთა და პრაქტიკული მნიშვნელობის ძირითადი ასპექტები.

**პირველ თავში** წარმოდგენილია ენერგეტიკულ სისტემაში აქტიური სიმძლავრის რეგულირების ლიტერატურული მიმოხილვა. უპირატესობა ეძლევა ენერგიის ზეგამტარულ ინდუქციურ მაგროვებელს. განსაკუთრებულობა მდგომარეობს იმაში, რომ ენერგია მასში ინახება ისეთი სახით, როგორი სახითაც გამოიყენება - ელექტრომაგნიტური. არ არის აუცილებელი ენერგიის ერთი სახიდან მისი მეორე სახეში გარდაქმნა, ასევე არ არის დიდი დროის ხარჯი თვითონ ამ პროცესზე, როგორც სხვა სახის მაგროვებელზე. აქედან გამომდინარე ენერგიის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის კიდევ განსაკუთრებული თვისებაა ენერგიის დაგროვების რეჟიმიდან მისი გადაცემის რეჟიმში სწრაფი გადასვლა.

**ნაშრომის მეორე თავში** განხილულია ენერგოსისტემაში აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულირების მოწყობილობის კლასიფიკაცია. ინდუქციური მაგროვებლები (იმ) კონსტრუქციული შესრულების მიხედვით არსებობს ორი ძირითადი კლასის: წრფივი მაგროვებლები, რომელშიც კოჭა (ხვიები) განლაგებულია სწორხაზოვანი ღერძის ირგვლივ, და ტორიდული მაგროვებელი ( $\theta$ -ტიპის), რომელშიც კოჭა (ხვიები) მოიცავს რგოლისებრ ცენტრალურ ხაზს.

წრფივი იმ კონსტრუქციულად მარტივია და ტექნოლოგიურია, უზრუნველყოფს აქტიური მასალის კარგ გამოყენებას, მხოლოდ წარმოშობს მნიშვნელოვან მაგნიტურ ველს გარე სივრცეში.

ტორიდული იმ ( $\theta$ -ტიპის) არ ჩამოუვარდება წრფივ იმ-ს წონა-გაბარიტული მაჩვენებლებით, გააჩნია გართულებული კონსტრუქცია, მეორე მხრივ საშუალებას იძლევა პრაქტიკულად სრულად გამორიცხული

იქნეს გარე მაგნიტური ველები, რაც ხშირ შემთხვევაში თამაშობს განსაკუთრებულ როლს ზეგამტარული ელექტრომოწყობილობების დამუშავების დროს.

სამუშაოში განხილულია წრფივი იმ-ის პარამეტრები და მაჩვენებლები ცილინდრული, რგოლისებური, სოლენოიდური და სფერული ფორმის კოჭებით, შემდეგ ჩატარებულია ანალოგიური ანალიზი ტოროიდული იმ-სათვის სხვადასხვა გეომეტრიით.

ნაშრომის მესამე თავში დამუშავებულია ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის სისტემაში სადენების დენგამტარუნარიანობის და დანაკარგების ანგარიშის მეთოდები ცვლად მაგნიტურ ველში.

ზეგამტარული (ზგ) ძარღვის ჯამური მაგნიტური ველი  $\vec{B}_o$  ხასიათდება ზგ ძარღვის ზედაპირზე მაგნიტური ინდუქციის ორი მდგენელით: მაგნიტური ინდუქციის განივი მდგენელი  $\vec{B}_{o\perp}$  და პარალელური მდგენელი -  $\vec{B}_{o\parallel}$

$$\vec{B}_o = \vec{B}_{o\perp} + \vec{B}_{o\parallel} \quad (1)$$

მაგნიტური ველი ზგ ძარღვებში აღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას

$$B_{o\perp} = \mu_o \frac{I}{\pi D}, \quad (2)$$

სადაც  $I$  ზგ სადენის დენი;  $D$  - ზგ სადენის დიამეტრი. თუ ზგ სადენში მოთავსებულია ძარღვები  $d$  დიამეტრით, შევსების კოეფიციენტი  $K_{შვს.} = 1$ , ძარღვების რიცხვი  $N$  ტოლია,

$$N \cong \left(\frac{D}{d}\right)^2 \quad (3)$$

ზგ ძარღვში, როცა  $i_d = i_j$ , ზგ სადენში  $I = I_j$  და ინდუქცია  $B_{o\perp} = B_j$ ,

(2) განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$B_j = \mu_o \left(\frac{D}{d}\right)^2 \frac{i_{dj}^{კრ.}}{\pi D} K_{შვს.}, \quad (4)$$

სადაც  $i_{dj}^{კრ.}$  -კრიტიკული დენი ზგ პერიფერიული ძარღვის ზგ სადენში.

(4) განტოლებიდან ძარღვის კრიტიკული დენისთვის მივიღებთ:

$$i_{d_j}^{\text{პერ.}} = \frac{\pi D B_j}{\mu_o K_{\text{შეგს.}} \left(\frac{D}{d}\right)^2} = i_{d_j}^{\text{განზ.}} \left(\frac{d}{DK_{\text{შეგს.}}}\right), \quad (5)$$

სადაც  $i_{d_j}^{\text{განზ.}}$  – ზგ სადენში განმხოლოებული ძარღვის კრიტიკული დენი.

$$i_{d_j}^{\text{განზ.}} = \frac{\pi}{\mu_o} d_j B_j$$

როგორც (5) განტოლებიდან ჩანს, გარე ზგ ძარღვის კრიტიკული დენი  $\frac{d}{DK_{\text{შეგს.}}}$  ჯერ ნაკლებია განმხოლოებული ძარღვის კრიტიკული დენის მნიშვნელობაზე.

$$I_j - \left(\frac{1}{K_{\text{შეგს.}}} i_{d_j}^{\text{განზ.}} \frac{d}{D}\right) \left(\frac{D}{d}\right)^2 K_{\text{შეგს.}} = \frac{D}{d} i_{d_j}^{\text{განზ.}} \quad (6)$$

(6) განტოლება გვიჩვენებს, რომ კრიტიკული დენი  $I_j$  იზრდება  $\left(\frac{D}{d}\right)$ -ის პროპორციულად. დენგამტარუნარიანობა ზგ სადენის იზრდება  $\frac{D}{d}$ -ჯერ ან  $\sqrt{N}$ .

ზგ სადენის დენის საშუალო სიმკვრივის შემცირება და ზეგამტარის მოცულობის გაზრდა იწვევს ზეგამტარულ გრაგნილში დანაკარგების გაზრდას. ზეგამტარულ ენერჯის მაგროვებლებში გრაგნილების დანაკარგების შემცირებისთვის და დენგამტარუნარიანობის გაზრდისთვის გამოიყენება დაგრეხილი მრავალძარღვა ზეგამტარული სადენები.

გარე მაგნიტური ველი დააინდუქცირებს დენებს ზეგამტარულ ძარღვებში, ქმნის ცვლად მაგნიტურ ველს და დანაკარგებს, როგორც სადენის თვით ზგ ძარღვებში, ისე მის მატრიცაში. დაინდუქცირებული ე.მ.ძ. მრავალძარღვა ზგ სადენში დაგრეხილი ძარღვებით განისაზღვრება ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონის თანახმად წარმოქმნილი კონტურში არაერთგვაროვანი სტრუქტურით, შემდგარი ნორმალური მეტალის მატრიცისაგან და ზგ ძაფებისაგან.

დაგრეხილი სადენებში, ძაბვა ორი ზგ ძარღვებს შორის პერიოდულად იცვლის ნიშანს, რაც ძლიერი ხარისხით ზღუდავს დენებს ზეგამტარული სადენის მატრიცაში.



დენგამტარუნარიანობის და დანაკარგების დამოკიდებულება დაგრეხვის ბიჯისგან გრძივი და განივი მაგნიტურ ველებში გამოკვლეულია შრომებში.

ლოკალიზებული მაგნიტური ველით, მრავალპარადვიანი ზეგამტარული სადენებში მაღალი დენგამტარუნარიანობა შერწყმულია დანაკარგების დაბალ დონესთან. ისინი ხასიათდება დაბალი ინდუქციურობით და მაღალი ეფექტურობით.

იმასთან დაკავშირებით, რომ ზეგამტარული ენერჯის მაგროვებლების სისტემაში გრაგნილების წინაშე დგას ამოცანა დანაკარგების შემცირებისა და დენგამტარუნარიანობის გაზრდისა, აგრეთვე ინდუქციურობისა და გარე მაგნიტური ველების შემცირებისა, მძზგლ-ის საშუალებით შესაძლებელი ხდება გრაგნილის სადენების თითოეული ზგ მარჯვის კრიტიკული დენის მიყვანა მაქსიმალურ სიდიდემდე. ზეგამტარული სადენის შევსების კოეფიციენტის შერჩევით და

$$K_{შვს.} = \frac{d}{D}; N = \frac{D}{d} \quad (7)$$

(7) პირობის გათვალისწინებით (5) განტოლების შესაბამისად მივიღებთ

$$i_{d3}^{პერ.} = i_{d3}^{განშ.} \quad (8)$$

ე.ი. კრიტიკული დენი პერიფერიული მარჯვის იზრდება განმხოლოებული მარჯვის კრიტიკული დენამდე. (6) განტოლების თანახმად კრიტიკული დენისთვის, (7) პირობის გათვალისწინებით, მივიღებთ

$$I_{3} = i_{d3}^{განშ.} \left( \frac{D}{d} \right) \quad (9)$$

იმასთან დაკავშირებით, რომ ზეგამტარული მარჯვები იმყოფებიან საკუთარ ლოკალიზებულ მაგნიტურ ველებში, ლოკალიზებული მრავალპარადვიანი ზეგამტარული სადენი არ საჭიროებს დაგრეხვას და ტრანსპორმაციას. დანაკარგები ლოკალიზებული მრავალპარადვიანი

ზეგამტარული სადენებში განისაზღვრება ცალკეული ზეგამტარული მარღვების ჯამური დანაკარგებით.

$$\Delta P_N = N \Delta P_{\sigma}, \text{ სადაც } N = \frac{D}{d}$$

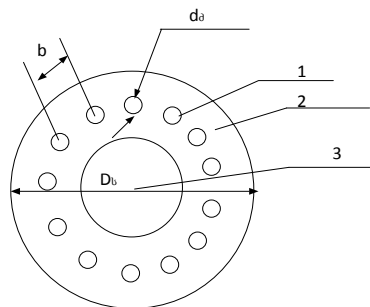
ნახ.1 ნაჩვენებია წრიული კვეთის ზეგამტარული სადენი განივი კვეთის ჭრილში, ცვლადი დენისთვის, ერთფენიანი კონსტრუქციის ლოკალიზებული მაგნიტური ველით.

ზეგამტარული მარღვები-1 განლაგებულია ერთ ფენად საშუალო დიამეტრის მიხედვით, ცილინდრული მილის განივი კვეთში -2 სტაბილიზირებული მასალისაგან დამზადებული. ზეგამტარული სადენის ცენტრალური არხი 3-ის დანიშნულებაა გაატაროს გამაცივებელი აგენტი (თხევადი აზოტი).

მანძილი მეზობელი ზეგამტარული მარღვების გრძივი ღერძებს შორის  $b$  განისაზღვრება თანაფარდობით:

$$b = \pi d_{\sigma}$$

სადაც  $d_{\sigma}$  - ზეგამტარული მარღვების დიამეტრი.



ნახ. 1. ერთფენიანი ლოკალიზებული მრავალმარღვიანი ზეგამტარული სადენი

ზეგამტარული მარღვების რიცხვი  $N_{\sigma}$  სადენში:

$$N_{\sigma} = \frac{\pi D_b}{b} = \frac{D_b}{d_{\sigma}}, \quad (10)$$

სადაც  $D_b$  - ზეგამტარული სადენის დიამეტრი.

ზეგამტარული სადენის ზედაპირზე მაგნიტური ინდუქცია

$$B_b = \mu_0 \frac{N_{\sigma} i_{\sigma}}{\pi D_b}, \quad (11)$$

სადაც:  $i_c$ - ზეგამტარული ძარღვების დენი.

ჩავსვათ  $N_c$ -ის მნიშვნელობა (10) და (11) ფორმულებიდან, მივიღებთ

$$B_b = \mu_o \frac{i_c}{\pi d_c}$$

ზეგამტარულ სადენში მაგნიტური ინდუქციის  $B_b$  და ზეგამტარულ ძაფებში მაგნიტური ინდუქციის  $B_d$  ტოლობის პირობებში, კრიტიკული ინდუქციისთვის  $B_j$  მივიღებთ

$$B_b = B_d = B_j$$

$$i_c = \frac{B_j}{\mu_o} \pi d_c$$

ე.ი. კრიტიკული დენი ზეგამტარულ ძარღვების სადენში ტოლია გაერთიანებული ძარღვების კრიტიკული დენის.

ყველა ზეგამტარული ძარღვები მრავალძარღვიან ზეგამტარულ სადენში იმყოფება ლოკალიზებულ საკუთარ მაგნიტურ ველში, რომელიც ტოლია გაერთიანებული ზეგამტარული ძარღვების მაგნიტური ველის.

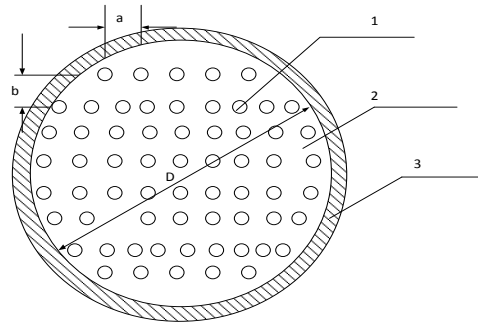
აღნიშნულ შემთხვევაში კრიტიკული დენი  $I_j$  ლმძზგ სადენისთვის ტოლია კრიტიკული დენის მძზგ სადენისთვის მისი კვეთის ზეგამტარული ძარღვებით მჭიდრო შევსების შემთხვევაში

$$I_j = N_c i_{c_j} = \frac{D_b B_j}{d_c \mu_o} \pi d_c = \frac{\pi D_b B_j}{\mu_o}$$

ლმძზგ სადენში ზეგამტარული ძარღვების რაოდენობა  $\pi$ -ჯერ ნაკლებია ჩვეულებრივ მრავალძარღვა ზეგამტარული სადენში ძარღვების რიცხვის, მისი კვეთის მჭიდრო შევსების შემთხვევაში. აღნიშნულ შემთხვევაში ზეგამტარული სადენის დენგამტარუნარიანობა შენარჩუნებულია. ზეგამტარული მასალების რაოდენობა მცირდება სამჯერ მეტად, რაც არსებით გავლენას ახდენს მოწყობილობის ტექნიკურ-ეკონომიკურ მაჩვენებელზე.

ცვლადი დენების წრიული კვეთის ზეგამტარული მრავალძარღვიანი სადენი შეიცავს ზეგამტარულ ძარღვებს-1, მოთავსებული მატრიცაში-2,

სადენის მთლიან კვეთში, დაშორებული ერთმანეთის მიმართ  $b$  მანძილით.  
 3-სადენის გარე იზოლირებული გარსი (ნახ.2)



ნახ.2. მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენი ლოკალიზებული მაგნიტური ველით

$$b = \sqrt{d_{\sigma} D} = t d_{\sigma}, \quad t = \frac{b}{d_{\sigma}}$$

სადაც:  $d_{\sigma}$ -ზეგამტარული ძარღვების დიამეტრი

$D$  - ზეგამტარული სადენის დიამეტრი

$t$  - ზეგამტარული ძარღვების განლაგების ბიჯი

სადენში ზეგამტარული ძარღვების რიცხვი განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$N \cong \left(\frac{D}{b}\right)^2 = \left(\frac{D}{\sqrt{d_{\sigma} D}}\right)^2 = \frac{D}{d_{\sigma}}$$

ლმძზგ სადენი ზედაპირზე მაგნიტური ინდუქციის სიდიდე:

$$B_{\sigma} \frac{N i_{\sigma}}{\pi D} = \frac{D i_{\sigma}}{d_{\sigma} \pi D}$$

რადგანაც  $i_{\sigma} = B_{\sigma} \pi d_{\sigma}$  მაშინ მისი ჩასმით  $B_{\sigma}$  გამოსახულებაში,

მივიღებთ:  $B_{\sigma} = B_{\sigma} = B_{\sigma}$

ე.ი. მაგნიტური ინდუქციის სიდიდე ლოკალიზებული მრავალძარღვა ზეგამტარული სადენის ზედაპირზე ტოლია გაერთიანებული ზეგამტარული ძარღვების მაგნიტური ინდუქციის.

ასეთ ზეგამტარულ სადენში თითოეული ცალკე აღებული ზეგამტარული ძარღვი იმყოფება საკუთარ მაგნიტურ ველში, შექმნილი

ძარღვების დენებით. კრიტიკული დენი ასეთი ზეგამტარული ძაფების ტოლია გაერთიანებული ძაფების კრიტიკული დენის.

კრიტიკული დენი  $I_c$  ლმმზგ სადენის, როცა შევსების კოეფიციენტი

$$K_{\text{ფ}} = \frac{d_{\text{ფ}}}{D}$$

ტოლია :

$$I_c = Ni_{\text{ფ}} = \frac{D}{\mu_o d_{\text{ფ}}} B_c \pi d_{\text{ფ}} = \frac{\pi D B_c}{\mu_o}$$

მიღებული კრიტიკული დენის, მნიშვნელობა ტოლია ჩვეულებრივი მრავალძარღვა ზეგამტარული სადენის კრიტიკული დენის მნიშვნელობისა მისი კვეთის მჭიდროდ შევსებით ზეგამტარული ძარღვებით ე.ი. როცა  $K_{\text{ფ}} = 1$ .

ძარღვების რიცხვი ლოკალიზებულ მრავალძარღვა ზეგამტარულ სადენში მცირდება შედარებით ჩვეულებრივი მრავალძარღვა ზეგამტარულ სადენთან  $\frac{D}{d_{\text{ფ}}}$  -ჯერ, რაც შესაბამისად ამცირებს ზეგამტარული მასალის ხარჯს და აუმჯობესებს მოწყობილობის ტექნიკურ ეკონომიკურ მაჩვენებლებს.

ჩატარებული სამუშაოს შედეგად შეიძლება ასეთი დასკვნა გავაკეთოდ:

ზგ სადენების გამტარუნარიანობის გაზრდისათვის და მასში დანაკარგების შემცირებისათვის ზგ სადენი სრულდება მრავალძარღვიანი.იმასთან დაკავშირებით, რომ სადენის ზგ ძარღვი მგრძნობიარეა გარე მაგნიტური ველის მიმართ, მათი დენგამტარუნარიანობა მრავალძარღვიანი ზგ სადენში მნიშვნელოვნად მცირდება ძარღვების რიცხვის გაზრდით და მათ შორის მანძილის შემცირების დროს. ზგ სადენის და ზგ ძარღვის მოცემული დიამეტრის დროს სადენში ძარღვების შემცირებით , მანძილი მათ შორის იზრდება, მაგნიტური ურთიერთქმედება ძარღვებს შორის სუსტდება და დენგამტარუნარიანობა ზგ ძარღვის იზრდება. ზგ ძარღვის რაოდენობის ოპტიმალური მნიშვნელობა წრიული კვეთის ზგ მრავალძარღვა

სადენში:  $N_{\sigma} = \frac{D_b}{d_{\sigma}}$ , აღნიშნული რაოდენობა ზგ ძარღვების შეესაბამება ზგ

სადენის შევსების კოეფიციენტს:  $K_{შვს} = \frac{d_{\sigma}}{D_b}$ .

ასეთი გეომეტრიული თანაფარდობის დროს, თითოეული ზგ ძარღვი, ზგ სადენში პრაქტიკულად იმყოფება საკუთარ მაგნიტურ ველში, რომელიც ლოკალიზებულია მის ირგვლივ. ასეთი ლოკალიზებული მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენები, შეიძლება გამოყენებული იქნეს ენერგეტიკული დანიშნულების მოწყობილობების ძალოვან გრაგნილებში.

მრავალძარღვა ზეგამტარული სადენის, ლოკალიზებული მაგნიტური ველის გამოყენების დროს, მცირდება სადენის ინდუქციურობა, ინდუქციური წინაღობა და ინდუქციური ძაბვის ვარდნა. გრაგნილებში ზეგამტარული მასალის ხარჯი მცირდება  $\frac{D_b}{d_{\sigma}}$ -ჯერ.

სამუშაოში განხილულია ენერგიის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის სისტემის მაგნიტურ წრედში ამორფული შენადნობების გამოყენება, კერძოდ ენერგიის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის კვების წყაროსათვის შექცევადი ტირისტორული გარდამქმნელი ტრანსფორმატორის მაგნიტურ წრედში ამორფული შენადნობების გამოყენება საგრძნობლად ამცირებს დანაკარგებს. გარდა დანაკარგების შემცირებისა, მცირდება აგრეთვე დამაგნიტების დენის სიდიდე, რის შედეგად მცირდება ტრანსფორმატორის ტემპერატურა და იზრდება მისი მომსახურების ვადა.

დამუშავებულია ელექტროენერგიის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის (ეზგიმ)-ის ენერგოსისტემაში მუშაობის საანგარიშო მათემატიკური მოდელი, დაფუძნებული ეზგიმ-ის წარმოდგენაზე დენის წყაროს სახით ან მისი ეკვივალენტური მიმდევრობით შეერთებული არახაზოვანი აქტიური და ინდუქციური წინააღობებით.

დამუშავებული მათემატიკური მოდელი ეზგიმ-ის ფუნქციონირების, აქტიური სიმძლავრის რეგულატორის რეჟიმში რეალიზებული იქნა მისი

ენერგეტიკული მახასიათებლების აგებისათვის და შეფასებისათვის, მიღებული მახასიათებლები უზრუნველყოფს გენერატორების მდგრად მუშაობას ელექტროსისტემაში ავარიის დროს.

სიმძლავრეების გადანაწილების ანგარიშის პროგრამაში ეზგიმ განიხილება ენერგოსისტემის კვანძში როგორც აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების სწრაფმოქმედი რეგულატორი, რომელიც უზრუნველყოფს:

ძაბვის შენარჩუნებას ელექტროსისტემის კვანძში საჭირო დონეზე;

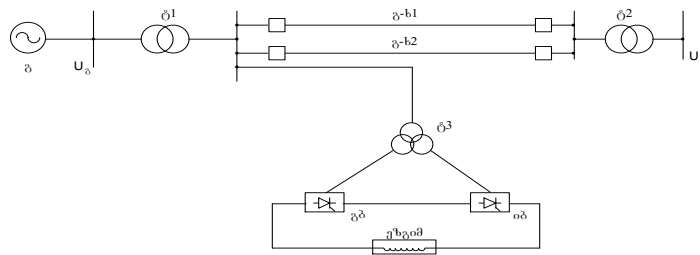
ელექტროგადაცემის გამტარუნარიანობის გაზრდას;

ელექტროგადაცემაში სიმძლავრეების რყევების აღძვრის დროს, ელექტროსისტემის მიმღებში შემფოთების გავრცელების ლოკალიზაციას.

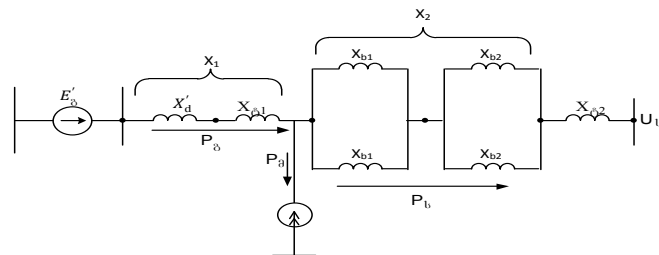
დინამიკური მდგრადობის ანგარიშის პროგრამაში ეზგიმ განიხილება, როგორც სწრაფმოქმედი რეგულატორი, უპირატესად აქტიური სიმძლავრისა, დადგმული ელექტროსადგურში და უზრუნველყოფს გენერატორების როტორის შემობრუნების კუთხის აჩქარების შეზღუდვას ავარიის შემდგომ რეჟიმებში ელექტროგადაცემი ხაზის წარმატებითი თუ არაწარმატებითი ავტომატური განმეორებითი ჩართვის მოქმედების გათვალისწინებით. ეზგიმ, შესაბამისად დადგმული ელექტროსისტემის კვანძში, არეგულირებს ძაბვის მოდულსა  $\underline{U} = \text{const}$  და არგუმენტს, ხოლო ეზგიმ, დადგმული ელექტროსადგურზე, არეგულირებს გენერატორების მიერ გაცემული აქტიური სიმძლავრის მნიშვნელობას ელექტროსისტემაში  $P_g = \text{const}$  პირობის დაცვით. ეზგიმ-ის ენერგეტიკული პარამეტრები დამოკიდებულია მისი ჩართვის ადგილზე. თუ ეზგიმ ჩაირთვება ელექტროსადგურში, მაშინ მიზანშეწონილია მისი ზემოქმედება აქტიური სიმძლავრის მართვაზე, ხოლო თუ ეზგიმ ჩაირთვება ელექტროენერგეტიკული სისტემის კვანძში, მაშინ პრიორიტეტულია მისი ზემოქმედება რეაქტიული სიმძლავრის მართვაზე, რათა ეფექტურად განხორციელდეს ძაბვის რეგულირება ელექტროსისტემის კვანძში.

განვიხილოთ ელექტროსისტემის ელექტრული სქემა, რომელიც ნაჩვენებია ნახ.3. ელექტროსისტემა ენერგიას ღებულობს

ელექტროსადგურებიდან (გ-ეკვივალენტური სინქრონული გენერატორი) ტ1, გ-ბ1, გ-ბ2 და ტ2-ის საშუალებით. ეზგიმ-ი ჩართულია ტ1 ტრანსფორმატორის ქვესადგურის სალტესთან სამგრანგნილა ტ3 ტრანსფორმატორით და შექცევადი ტირისტორული გარდამქმნელებით, რომელიც ასრულებს ცვლადი დენის ქსელთან ეზგიმ-ის კავშირისა და მართვის ფუნქციას.



**ნახ.3. ელექტროსისტემის ელექტრული სქემა: იბ-ინვერტორის ბლოკი; გბ-გამმართველის ბლოკი; ტ1, ტ2-ძალოვანი ტრანსფორმატორები; ტ3-შექცევადი ტირისტორული გარდამქმნელის ტრანსფორმატორი; გ-ბ1, გ-ბ2 – გადამცემი ხაზები; გ-ეკვივალენტური სინქრონული გენერატორი; ეზგიმ-ელექტროენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი.**



**ნახ.4. ელექტროგადამცემის საანგარიშო სქემა**

შექცევადი ტირისტორული გარდამქმნელი შედგება ორი გარდამქმნელი ბლოკისაგან (იბ, გბ), შეერთებული ტ3-ის ცალკეულ გრანგნილებთან და შეერთებულია მიმდევრობით ეზგიმ-თან. ეზგიმ მუშაობს სამ რეჟიმში:

1. ხანგრძლივ დამყარებულ რეჟიმში მუდმივი დენის მნიშვნელობისას, რომელიც შეესაბამება ეზგიმ-ის დენის ნომინალურ მნიშვნელობას. აღნიშნულ რეჟიმში პირველი ბლოკი ჩართულია როგორც გამმართველი,



ხოლო მეორე ბლოკი კი როგორც ინვერტორი. ამ შემთხვევაში ტ3-ის მეორად გრაგნილებში დენებს გააჩნიათ საწინააღმდეგო მიმართულება და ენერგეტიკული კავშირი ეზგიმ-სა და ელექტრულ სისტემას შორის მინიმალურია.

2. ავარიის მომენტში მოკლე დროით გარდამავალი რეჟიმის დროს პირველი ბლოკი გადადის გამმართველის რეჟიმიდან ინვერტორულ რეჟიმში, იცვლება ტ3-ში დენის მიმართულება და ენერგია, დაგროვილი ეზგიმ-ში, მიეწოდება მომხმარებლებს.

3. მოკლე დროით გამმართველ-ინვერტორულ რეჟიმში დენის ზრდით 0-დან  $I_{\text{ნომ.}}$  -მდე და ეზგიმ-ში ენერგიის დაგროვებით მოცემულ რეჟიმში, როგორც ხანგრძლივ რეჟიმში, არ უნდა იმოქმედოს გავლენა მომხმარებლის მუშაობაზე. მოცემული რეჟიმის უზრუნველყოფა ხორციელდება გამმართველის და ინვერტორის ბლოკების რეგულირების კუთხეების ( $\alpha_1, \alpha_2$ ) ავტომატური მართვის გზით. გამმართველები და ინვერტორები აწყობილია GTO ჩამკეტი ტირისტორების ბაზაზე. ტირისტორული გარდამქმნელები უზრუნველყოფილია მართვის სისტემით, რომელმაც უნდა ჩართოს ეზგიმ-ი აუცილებელი სწრაფქმედებით, შეიყვანოს ენერგია და უზრუნველყოს ხანგრძლივი მუშაობა გამმართველისა და ინვერტორის ბლოკების.

ტირისტორული გარდამქმნელი უზრუნველყოფს ეზგიმ-ის აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების მართვას

$$\left. \begin{aligned} p &= \cos\alpha_1 + \cos\alpha_2; \\ q &= \sin\alpha_1 + \sin\alpha_2; \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

სადაც  $p, q$  ეზგიმ-ის აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების ფარდობითი მნიშვნელობებია;  $\alpha_1, \alpha_2$  – ტირისტორების მართვის კუთხეები.

ელექტროსისტემის კვანძთან მიმართებაში ეზგიმ შეიძლება წარმოვიდგინოთ სინუსოიდური დენის წყაროდ ან აღნიშნული კვების წყაროს ეკვივალენტური მიმდევრობით შეერთებული  $R$  და  $X$  წინაღობებით. დენის პირველი რიგის ჰარმონიკის ამპლიტუდა და ფაზა, ან შესაბამისად ეკვივალენტური წინაღობების მნიშვნელობები, ფუნქციონალურად დაკავშირებულია ტირისტორული გარდამქმნელის მართვის კუთხეებზე და

ეზგიმ-ში შემავალი გამართული მუდმივი დენის  $I_d$  სიდიდეზე. ეკვივალენტური წინაღობის  $R$  დადებითი მნიშვნელობა შეესაბამება ეზგიმ-ის მიერ მოთხოვნილ აქტიურ სიმძლავრეს, უარყოფითი მნიშვნელობა კი – ეზგიმ-ის მიერ გაცემულ აქტიურ სიმძლავრეს. ეკვივალენტური რეაქტიული წინაღობის  $X$  მნიშვნელობა შეესაბამება მოთხოვნილ რეაქტიულ სიმძლავრეს. ეზგიმ-ის ბაზისურ მოდელად განიხილება ინდუქციური კოჭა  $L$  უნდუქციურობით, გრაგნილებში აქტიური დანაკარგების გათვალისწინების გარეშე. ეზგიმ-ის საანგარიშო მოდელის შედგენისათვის ძირითად პარამეტრებს წარმოადგენს: მაქსიმალური დაგროვილი ენერგია  $W_0$ ; მაქსიმალური გამართული დენი  $I_{d0}$ , რომელიც შეესაბამება აღნიშნულ დაგროვილ ენერგიას; გამართული დენის ცვლილების მაქსიმალური სიჩქარე  $dI_{d0}/dt$ , რომლის მნიშვნელობა შეზღუდულია ძაბვის დასაშვები მნიშვნელობით მის გამომყვანებზე; დასაშვები მინიმალური ენერგია  $W_{min}$ , რომლის დროსაც ხორციელდება მართვის საჭირო კანონი იმის და მიხედვით, თუ რა რეჟიმში მუშაობს ეზგიმ (დამუხტვის, განმუხტვის ან ენერგიის შენახვის).

ეხლა განვიხილოთ ეზგიმ-ის ფუნქციონირების საანგარიშო მოდელი აქტიური სიმძლავრის რეგულატორის რეჟიმში.

ეზგიმ-ის მუშაობა აქტიური სიმძლავრის რეგულატორის რეჟიმში უზრუნველყოფს ელექტროსადგურში გენერატორების სინქრონიზმის შენარჩუნებას, ელექტროსისტემაში შემფოთების შემთხვევაში. შემფოთების გამომწვევ მიზეზად შეიძლება განვიხილოთ მოკლე შერთვა ელექტროგადამცემ ხაზზე ავტომატური განმეორებითი ჩართვის მოქმედების გათვალისწინებით, ელექტროგადამცემის კუთხის  $\delta$ -ს უეცარი ცვლილების დროს. ამავე დროს ეზგიმ ელექტროსადგურზე უზრუნველყოფს სიხშირის შენარჩუნებას ნომინალური პარამეტრების ფარგლებში. ნახ. 4-ზე ნაჩვენებია უმარტივესი ელექტროგადამცემის საანგარიშო სქემა, რომელიც გამოსაკვლევ რეჟიმის ანალიზის საშუალებას იძლევა. საანგარიშო სქემაში გენერატორები ჩანაცვლებულია გარდამავალი

ელექტრომაგნიტური ძალით  $E'_\delta$  და გარდამავალი ინდუქციური წინაღობის გრძივი მდგენელით  $X'_d, U_b$  არის მიმღები სისტემის ძაბვა; ეზგიმ წარმოდგენილია დენის წყაროს  $I_\delta e^{j\alpha_\delta}$  სახით, რომელიც ორიენტირებულია სისტემის ძაბვის მიმართ.  $I_\delta$  ეზგიმ-ის ხაზური დენის პირველი რიგის ჰარმონიკის მოქმედი მნიშვნელობაა.

ელექტროსისტემაში შემფოთების დროს გამოწვეული ელექტროგადაცემის პარამეტრების უეცარი ცვლილებით, ეზგიმ ასრულებს პირობას,  $P_\delta = \text{const}$  და, ფუნქციონალურად კვალდაკვალ დაკავშირებულია ელექტროგადაცემის  $\delta$  კუთხის ცვლილებასთან.

$$\left. \begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= (P_\delta - P_\delta S - P_\delta) \frac{100\pi}{T_j}; \\ \frac{d\delta}{dt} &= S, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

სადაც  $s$  გენერატორის როტორის სრიალია სინქრონული დერძის მიმართ;  $P_\delta$ ,  $P_\delta$ -ტურბინის და გენერატორის ელექტრომაგნიტური სიმძლავრე;  $P_\delta$  -დემფირების კოეფიციენტი;  $T_j$  - გენერატორის ინერციის მუდმივა, მიყვანილი ბაზისურ სიმძლავრესთან.

ელექტროგადაცემის სიმძლავრეებისათვის ეზგიმ-ის მოქმედების გათვალისწინებით შეიძლება შევადგინოთ შემდეგი განტოლებები:

$$\left. \begin{aligned} P_\delta &= E'_\delta U_b Y_{12} \sin\delta + E'_\delta I_\delta X_2 Y_{12} \cos(\delta - \alpha_\delta); \\ P_b &= U_b E'_\delta Y_{12} \sin\delta - U_b I_\delta X_1 Y_{12} \cos\alpha_\delta; \\ Q_b &= -U_b^2 Y_{12} + U_b E'_\delta Y_{12} \cos\delta + U_b I_\delta X_1 Y_{12} \sin\alpha_\delta; \\ P_\delta &= I_\delta Y_{12} [E'_\delta X_2 \cos(\delta - \alpha_\delta) - U_b X_1 \cos\alpha_\delta]; \\ Q_\delta &= I_\delta Y_{12} [E'_\delta X_2 \sin(\delta - \alpha_\delta) - U_b X_1 \sin\alpha_\delta + I_\delta X_1 X_2]; \\ Y_{12} &= 1/(X_1 + X_2), \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

სადაც  $P_\delta$  გენერატორის აქტიური სიმძლავრეა;  $P_b, Q_b$ -სისტემის მიერ მოთხოვნილი აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრე;  $P_\delta, Q_\delta$  -ეზგიმ-ის აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრე. ეზგიმ-ის ელექტროსისტემის კვანძში ჩართვის დროს ძაბვის კომპლექსური მნიშვნელობა

$$U e^{j\beta} = \frac{U_b^2 + Q_b X_2}{U_b} + j \frac{P_b X_2}{U_b} \quad (15)$$

ეზგიმ-ის ხაზური დენის პირველი რიგის ჰარმონიკის მოქმედი მნიშვნელობა  $I_\delta$ , როდესაც ეზგიმ წარმოდგენილია, როგორც

დამაკავშირებელი მოწყობილობა ელექტროსისტემასთან ტირისტორული გარდამქმნელით, გვექნება

$$I_{\beta} = \frac{2\sqrt{6}I_d}{\pi k_{\beta}} \cos\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) \quad (16)$$

ტირისტორული გარდამქმნელის მართვისა და კომუტაციის კუთხეებს ექნება შემდეგი სახე.

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \arccos\left(\cos\varphi_1 + \frac{X_s I_d}{6\sqrt{2}U_{\beta}}\right); \\ \alpha_2 &= \arccos\left(\cos\varphi_2 + \frac{X_s I_d}{6\sqrt{2}U_{\beta}}\right); \\ \gamma &= \arccos\left(\cos\alpha + \frac{X_s I_d}{3\sqrt{2}U_{\beta}}\right) - \alpha, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

სადაც  $U_{\beta}$  ტირისტორული გარდამქმნელი ტრანსფორმატორის გრანგნილის ფაზური ძაბვაა.

ეზგიმ-ის ხაზური დენის პირველი რიგის მოქმედი მნიშვნელობა (16) დამოკიდებულია, როგორც მართვის კუთხეებზე, ისე გამართული დენის  $I_d$  ცვლილებაზე ეზგიმ-ის ენერჯის შენახვის, განმუხტვის და დამუხტვის რეჟიმებში:

$$\frac{dW_{\beta}}{dt} = P_{\beta}; \quad I_d = \sqrt{2W_{\beta}/L}, \quad (18)$$

სადაც  $W_{\beta} L$  ეზგიმ-ის ენერჯია და ინდუქციურობაა.  $\varphi_1, \varphi_2$  და  $\varphi$  კუთხეებს შორის კავშირი შეირჩევა ეზგიმ-ის და ტირისტორული გარდამქმნელის მუშაობის საჭირო რეჟიმების შესაბამისად, კერძოდ, როდესაც

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi \text{ და } \cos\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) = 1, \quad (19)$$

ხორციელდება გარდამქმნელის სიმეტრიული მართვა  $\alpha_1 = \alpha_2$  პირობის შესრულებით. კუთხეების აღნიშნული თანაფარდობების დროს ეზგიმ ახდენს ელექტროსისტემასთან მაქსიმალური აქტიური სიმძლავრის გაცვლას, ითხოვს ელექტროსისტემიდან მაქსიმალურ რეაქტიულ სიმძლავრეს და ადაბლებს ძაბვას ჩართვის კვანძში. ევექტური რეჟიმი მიიღება მინიმალური მოთხოვნილი რეაქტიული სიმძლავრისას

$$\varphi_2 = 0, \varphi_1 = 2\varphi, \cos\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) = \cos\varphi \quad (20)$$

ეზგიმ-ის მუშაობის ანალიზი ელექტროსისტემაში დინამიურ რეჟიმში, გამოწვეული ელექტროგადაცემის პარამეტრების უეცარი ცვლილებებით, ხორციელდება განტოლება (13)-ისა და ეზგიმ-ის დენის რეგულატორის დანაყენის ცვლილების განტოლების ერთობლივი ამოხსნით

$$\left. \begin{aligned} \frac{dI_{\text{გ.რ.}}}{dt} &= \frac{U_{\text{L}}(\sin\delta - \sin\delta_0)}{T_{\text{გ}}X_{\text{გ}}} - \frac{I_{\text{გ.რ.}}}{T_{\text{გ}}} \\ I_{\text{გ.რ.}} &= T_{\text{გ}} \cos(\delta - \alpha_{\text{გ}}) = T_{\text{გ}} \cos(\delta - \beta + \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

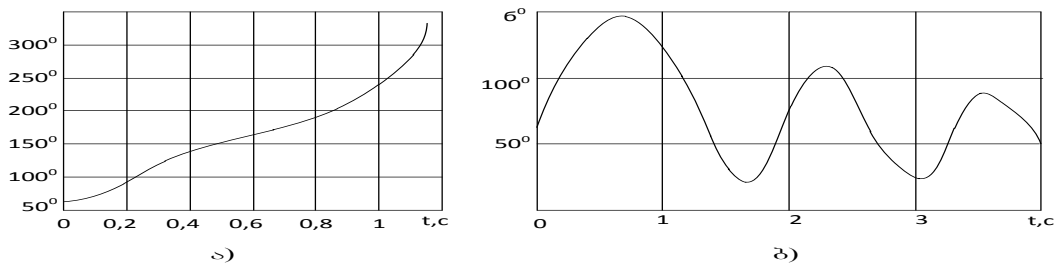
სადაც  $\delta_0$  გადაცემის კუთხეა დამყარებულ რეჟიმში;  $T_{\text{გ}}$  - ეზგიმ-ის დენის რეგულატორის დროის მუდმივა;  $\beta$  - ძაბვის ვექტორის არგუმენტი ეზგიმ-ის ელექტროსისტემაში ჩართვის კვანძში, მიმღები ელექტროსისტემის ძაბვის მიმართ;  $\varphi$  - ეზგიმ-ის დენის არგუმენტი ელექტროსისტემის კვანძში ჩართვის ძაბვის ვექტორის მიმართ.

დამუშავებული საანგარიშო მოდელის შესაბამისად ელექტროსისტემაში ავარიული პროცესების ანალიზი იყოფა ორ ეტაპად; პირველ ეტაპზე (13) და (21) განტოლებების ამოხსნით (14) განტოლების გათვალისწინებით, განისაზღვრება ეზგიმ-ის მართვადი მოცულობის ზემოქმედება, რომელიც აუცილებელია გენერატორების დინამიური მდგრადობის შენარჩუნებისათვის. მეორე ეტაპზე (14)-(20) განტოლებების შესაბამისად იანგარიშება ეზგიმ-ის ენერგეტიკული პარამეტრები და ტექნიკური მახასიათებლები, რომლებიც უზრუნველყოფენ მართვადი ზემოქმედების საჭირო ცვლილებას.

ეზგიმ-ის ფუნქციონირების დამუშავებული მათემატიკური მოდელი აქტიური სიმძლავრის რეგულატორის რეჟიმში, გამოყენებული იქნა მისი ენერგეტიკული მახასიათებლების აგებისათვის და შეფასებისთვის, რომელიც უზრუნველყოფს გენერატორების მდგრად მუშაობას ელექტროსისტემაში ავარიის დროს (ნახ.4).

განხილულ იქნა სამფაზა მოკლე შერთვის რეჟიმი  $t_{\text{ა.გ}}=0.14$  წმ ხანგრძლივობით ხაზის ერთ ჯაჭვზე  $\ell_1$  წრედის გამორთვით და შესაბამისად წარმატებული ავტომატური განმეორებითი ჩართვით (აგჩ)-ით შუალედით  $t_{\text{აგჩ}}=1$  წმ.

ელექტროგადაცემის პარამეტრებია: გენერატორი  $\rho_{\sigma}=1200$  მგვტ;  $\cos\varphi_{\sigma} = 0.85$ ;  $T_j=8$  წმ; ტრანსფორმასტორები:  $S_{\sigma}=1500$  მგვ.ა;  $U_{\text{მ.გ.}}=10\%$ ; ელექტროგადამცემი ხაზები: ორჯაჭვა,  $\ell_1=200$  კმ;  $\ell_2=400$  კმ;  $X_{\text{ბ3}}=0,34$  ომი/კმ; პარამეტრების ფარდობითი მნიშვნელობები;  $U_{\text{ს}}=1$ ;  $P_{\delta}=1$ ;  $P_{\text{დ}}=0,15$ ;  $X'_{\text{დ}}=0,3$ ;  $X_{\text{ბ1}}=X_{\text{ბ2}}=0,1$ ;  $X_{\text{ბ1}}=0,384$ ;  $X_{\text{ბ2}}=0,768$ ; გენერატორის ნომინალური სიმძლავრის გაცემის რეჟიმში, ნომინალური ძაბვის დროს ( $U=1$ ) ელექტროსადგურის მაღალი ძაბვის სალტეზე (ეზგიმ-ის ჩართვის კვანძში)  $E'_g=1,26$ ; გადაცემის ნომინალური კუთხე  $\delta_0=58,7^{\circ}$ ; ეზგიმ-ის ინდუქციურობა  $L=2,2$  ჰნ. ნახ. 5-ზე ნაჩვენებია გადაცემის კუთხის ცვლილება  $\delta=f(t)$  განსახილველ ავარიულ რეჟიმისთვის.

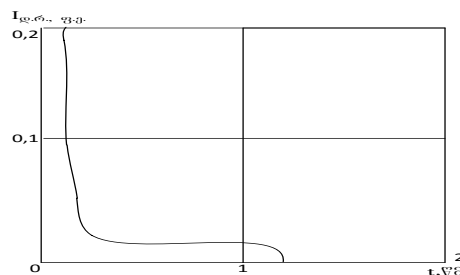


ნახ.5. გადაცემის კუთხის ცვლილება ავარიულ რეჟიმში;  
ა) ეზგიმ-ის გარეშე; ბ) ეზგიმ-ის მუშაობის დროს

დენის რეგულატორის  $I_{\text{დ.რ.}}$  დანაყენის ცვლილება მდგრადობის შენარჩუნების საჭიროებისათვის ნაჩვენებია ნახ.6-ზე.

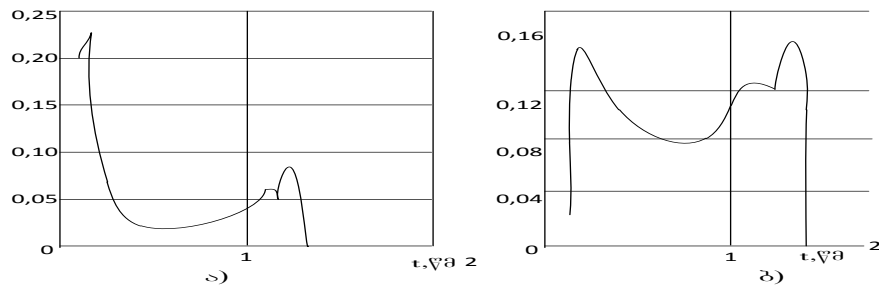
რეგულატორი მუშაობს  $T_g=0,1$  წმ. დროის მუდმივით და ეზგიმ-ს გამორთავს ელექტროსისტემიდან  $\delta=\delta_0$  მომენტში.

დენის რეგულატორის ცვლილებამ უზრუნველყო სისტემის დინამიკური მდგრადობის შენარჩუნება.



ნახ.6. ეზგიმ-ის დენის რეგულატორის დანაყენის ცვლილება

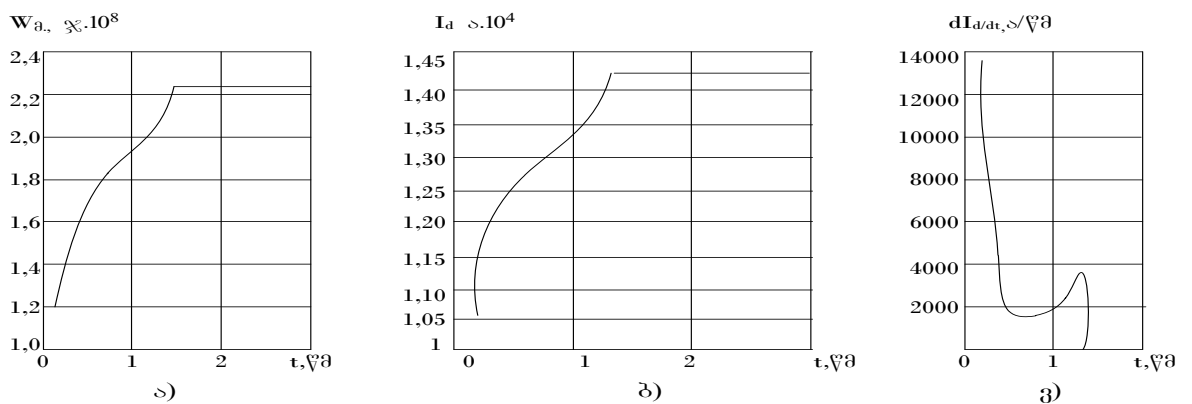
ეზგიმ-ის აქტიური (ნახ.7ა) და რეაქტიული (ნახ.7ბ) სიმძლავრეების ცვალებადობის ხასიათის გათვალისწინებით გენერატორის როტორის გაქცევის პროცესის შეზღუდვით ხორციელდება ტირისტორული გარდამქმნელი ტრანსფორმატორის ტიპიური სიმძლავრის შეფასება.



ნახ.5. ეზგიმ-ის სიმძლავრის ცვლილება გენერატორის როტორის გაქცევის დემფირების რეჟიმში: ა) აქტიური სიმძლავრე; ბ) რეაქტიული სიმძლავრე

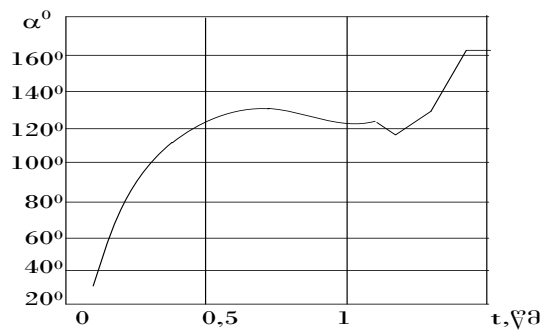
განხილულ მაგალითში გამოყენებულია ტრანსფორმატორი ჯამური სიმძლავრით  $S_{ტრ}=600$  მგვ.ა, ტრანსფორმაციის კოეფიციენტით  $k_{ტრ}=38,5$ , ხაზური ძაბვა ტირისტორული ტრანსფორმატორის გრაგნილების  $U_{ბ}=13$  კვ. მოკლე შერთვის ძაბვა მიყვანილი სასისტემო გრაგნილის ნომინალურ სიმძლავრესთან  $U_{ბ,შ.} = 12,5\%$ .

ნახ. 8, ა,ბ,გ ნაჩვენებია მაგნიტური ენერჯის  $W_{მ}$ , გამართული დენის  $I_d$  და მისი წარმოებულის (ცვლილების სიჩქარის) მახასიათებლები.



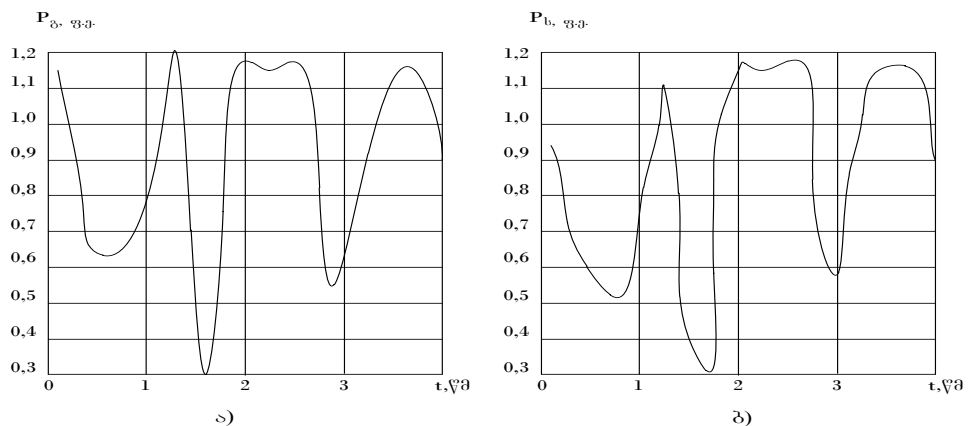
ნახ.8. ეზგიმ-ის ენერგეტიკული მახასიათებლები დინამიურ რეჟიმში: ა) დაგროვილი ენერჯია; ბ) გამართული დენი; ვ) გამართული დენის ცვლილების სიჩქარე

ნახ.9-ზე ნაჩვენებია ტირისტორების რეგულირების კუთხის  $\alpha$  ცვლილების მახასიათებელი ერთი ბოგირის მუშაობის პროცესში. ვინაიდან ერთი ბოგირი მუდმივად მუშაობს გამმართველის რეჟიმში მინიმალური მართვის კუთხით, მაშინ ეზგიმ-ის გამორთვა ქსელიდან ხორციელდება მეორე ბოგირის გადართვით ინვერტორულ რეჟიმში მაქსიმალური მართვის კუთხით. ჩატარებული შეფასების მიხედვით ვენტილების კომუტაციის კუთხეები არ აჭარბებს  $20^\circ$ .



ნახ.9. ბოგირული გარდამქმნელის ვენტილების მართვის კუთხის ცვლილების მახასიათებელი

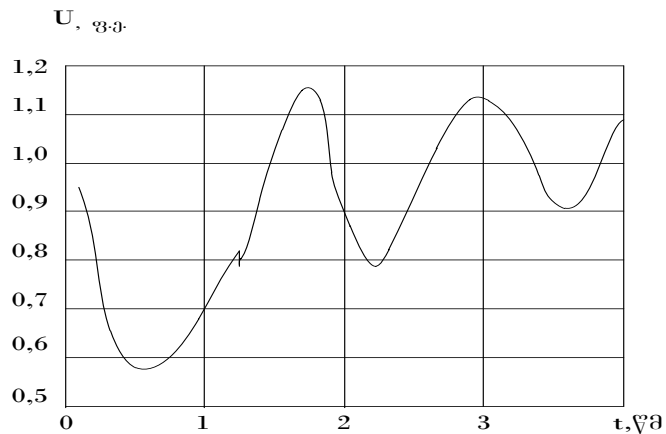
ნახ.10-ზე ნაჩვენებია გენერატორის მიერ გაცემული აქტიური სიმძლავრის  $P_g$  ცვლილების მახასიათებელი და სისტემაში მიწოდებული აქტიური სიმძლავრის  $P_s$  ცვლილების მახასიათებელი აღნიშნული სიმძლავრეების სხვაობა შეესაბამება ეზგიმ-ის მიერ მოთხოვნილ აქტიურ სიმძლავრეს.



ნახ.10. ეზგიმ-ის მუშაობის დროს გადაცემის აქტიური სიმძლავრე დინამიურ რეჟიმში: ა) გენერატორის სიმძლავრე; ბ) სისტემის სიმძლავრე



ელექტროსისტემის კვანძში ძაბვის დადაბლება (ნახ.1) დაკავშირებულია ეზგიმ-ის მიერ მოთხოვნილი რეაქტიული სიმძლავრის მნიშვნელობასთან, და რიგ შემთხვევებში შეიძლება გამოიწვიოს ვენტელების კომუტაციის მოშლა.



ნახ.11. ეზგიმ-ის ჩართვის კვანძში ძაბვის ცვლილების მახასიათებელი

მეორე მხრივ ეზგიმ-ის მუშაობას მართვადი რეაქტორის რეჟიმში შეუძლია დაწიოს გადაძაბვის დონე, რომელიც აღიძვრება ელექტროსისტემის კვანძში გენერატორის თვითდემფირების პროცესში. მიღებული შედეგები შეესაბამება ეზგიმ-ის ჩართვად სადგურის მაღალი ძაბვის სალტეზე თანაფარდობით  $X_1/X_{12} \approx 0,315$  აგჩ-ს რეჟიმში, რომელიც შეიძლება განვიხილოთ, როგორც კავშირის კოეფიციენტი ეზგიმ-სა და გენერატორს შორის.

სამუშაოში განხილულია უსაფრთხოების სპეციალური საკითხები: თხევადი კრიოგენული პროდუქტებთან მიმოქცევის საერთო წესები; თხევადი აზოტთან და ჰელიუმთან მიმართვის განსაკუთრებულობა; ფეთქებადსაშიში მინარევების შემადგენლობის კონტროლი; უსაფრთხოების უზრუნველყოფის ორგანიზაციული საფუძვლები.

## დასკვნები

1. სამუშაოში განხილულია აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულირების მოწყობილობები, ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის სახით, ორი ძირითადი კლასის შესრულებით: წრფივი მაგროვებლები, რომელშიც კოჭა (ხვიები) განლაგებულია სწორხაზოვანი ღერძის ირგვლივ, და ტოროიდული მაგროვებელი ( $\theta$ -ტიპის), რომელშიც კოჭა (ხვიები) მოიცავს რგოლისებრ ცენტრალურ ხაზს.

2. ნაჩვენებია, რომ წრფივი ინდუქციური მაგროვებლები კონსტრუქციულად მარტივია და ტექნოლოგიურია, უზრუნველყოფს აქტიური მასალის კარგ გამოყენებას, მხოლოდ წარმოშობს მნიშვნელოვან მაგნიტურ ველს გარე სივრცეში.

ტოროიდული ინდუქციური მაგროვებელი ( $\theta$ -ტიპის) არ ჩამოუვარდება წრფივ ინდუქციურ მაგროვებელს წონა-ზომების მაჩვენებლებით, გააჩნია გართულებული კონსტრუქცია, მეორე მხრივ საშუალებას იძლევა პრაქტიკულად სრულად გამორიცხული იქნეს გარე მაგნიტური ველები, რაც ხშირ შემთხვევაში განსაკუთრებულ როლს თამაშობს ზეგამტარული ელექტრომოწყობილობების დამუშავებისას.

3. მიღებულია ძირითადი თანაფარდობები ორივე კლასის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლების პარამეტრების ანგარიშისთვის.

4. ზეგამტარული სადენების გამტარუნარიანობის გაზრდისათვის და მასში დანაკარგების შემცირებისათვის ზგ სადენი სრულდება მრავალძარღვიანი. იმასთან დაკავშირებით, რომ სადენის ზგ ძარღვი მგრძნობიარეა გარე მაგნიტური ველის მიმართ, მათი დენგამტარუნარიანობა მრავალძარღვიანი ზგ სადენში მნიშვნელოვნად მცირდება ძარღვების რიცხვის გაზრდით და მათ შორის მანძილის შემცირების დროს. ზგ სადენის და ზგ ძარღვის მოცემული დიამეტრის დროს სადენში ძარღვების შემცირებით, მანძილი მათ შორის იზრდება,

მაგნიტური ურთიერთქმედება ძარღვებს შორის სუსტდება და დენგამტარუნარიანობა ზგ ძარღვის იზრდება. ზგ ძარღვის რაოდენობის ოპტიმალური მნიშვნელობა წრიული კვეთის ზგ მრავალძარღვა სადენში:  $N_{\sigma} = \frac{D_b}{d_{\sigma}}$ , აღნიშნული რაოდენობა ზგ ძარღვების შეესაბამება ზგ სადენის შვესების კოეფიციენტს:  $K_{შვეს.} = \frac{d_{\sigma}}{D_b}$ .

5. ასეთი გეომეტრიული თანაფარდობის დროს, თითოეული ზგ ძარღვი, ზგ სადენში პრაქტიკულად იმყოფება საკუთარ მაგნიტურ ველში, რომელიც ლოკალიზებულია მის ირგვლივ. ასეთი ლოკალიზებული მრავალძარღვიანი ზგამტარული სადენები, შეიძლება გამოყენებული იქნეს ენერგეტიკული დანიშნულების მოწყობილობების ძალოვან გრაგნილებში.

მრავალძარღვა ზგამტარული სადენის, ლოკალიზებული მაგნიტური ველის გამოყენების დროს, მცირდება სადენის ინდუქციურობა, ინდუქციური წინაღობა და ინდუქციური ძაბვის ვარდნა. გრაგნილებში ზგამტარული მასალის ხარჯი მცირდება  $\frac{D_b}{d_{\sigma}}$ -ჯერ.

6. ენერგიის ზგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის სისტემის მაგნიტურ წრედში ამორფული შენადნობების გამოყენება, კერძოდ ენერგიის ზგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის კვების წყაროსათვის შექცევადი ტირისტორული გარდამქნელი ტრანსფორმატორის მაგნიტურ წრედში ამორფული შენადნობების გამოყენება საგრძნობლად ამცირებს დანაკარგებს. გარდა დანაკარგების შემცირებისა, მცირდება აგრეთვე დამაგნიტების დენის სიდიდე, რის შედეგად მცირდება ტრანსფორმატორის ტემპერატურა და იზრდება მისი მომსახურების ვადა.

7. დამუშავებულია ელექტროენერგიის ზგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის (ეზგიმ)-ის ენერგოსისტემაში მუშაობის საანგარიშო მათემატიკური მოდელი, დაფუძნებული ეზგიმ-ის წარმოდგენაზე დენის წყაროს სახით ან მისი ეკვივალენტური მიმდევრობით შეერთებული არახაზოვანი აქტიური და ინდუქციური წინაღობებით.

8. დამუშავებული მათემატიკური მოდელი ეზგიმ-ის ფუნქციონირების, აქტიური სიმპლავრის სწრაფი რეგულატორის რეჟიმში რეალიზებული იქნა მისი ენეგეტიკული მახასიათებლების აგებისათვის და შეფასებისათვის, მიღებული მახასიათებლები უზრუნველყოფს გენერატორების მდგრად მუშაობას ელექტროსისტემაში ავარიის დროს.

9. განხილულია უსაფრთხოების სპეციალური საკითხები: თხევადი კრიოგენული პროდუქტებთან მიმოქცევის საერთო წესები; თხევადი აზოტთან და ჰელიუმთან მიმართვის განსაკუთრებულობა; ფეთქებადსაშიში მინარევების შემადგენლობის კონტროლი; უსაფრთხოების უზრუნველყოფის ორგანიზაციული საფუძვლები.

## დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული შრომები

1. კობრეიძე თ., ხელაძე ო. ენერგოსისტემაში აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულირების მოწყობილობის მათემატიკური მოდელი. „ენერჯია“, 2017, №4 (84), გვ. 30-36.

2. კობრეიძე თ., ხელაძე ო. ელექტროენერჯიის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის ფუნქციონირების საანგარიშო მათემატიკური მოდელი აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულატორის რეჟიმში. „ენერჯია“, 2018, №3(87), გვ.15-25.

3. კობრეიძე თ., ხელაძე ო. ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში აქტიური სიმძლავრის მართვა ნორმალურ და ავარიულ რეჟიმებში. სტუ, სტუდენტთა 85-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. თეზისების კრებული. 2017.

4. კობრეიძე თ., ხელაძე ო. ენერჯიის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის სისტემაში სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში, „ენერჯია“, 2019, №1(89), გვ. 27-33.

## Summary

Production and consumption of different kinds of energy expand at a high rate, that is determined by human activity in all fields. At the same time, the energy conversion processes are getting complicated, variety of energy power plants and power generating units that have to provide rational modes for electric supply of different consumers is getting wider. The superconducting induction energy storage, which is a significant intermediate link in the energy generation, transmission and consumption systems is of key importance in the mentioned problem solving. The topicality of energy storage problem increases so fast that its importance is not adequately reflected in the modern scientific and technical literature.

In the first chapter of the work a literature review of active power adjustment in the energy system is presented. It is shown that the task of active power adjustment is to implement the economically profitable and organizationally proper distribution of electric system load between power generating units of stations in the electric system. From here it is seen that automatic frequency control tasks are closely linked to each other.

Active power and automatic frequency controllers are attached to speed control unit of primary engines. All these controllers directly act on one and the same supplying mechanism of the driving factor. Despite the above mentioned, there is a definite difference between them, as well; in particular, speed control units directly react on the change in turbine rotation number, while frequency controllers response on the change in alternating current frequency regardless of generator's active power value. Active power controllers act during generator power change regardless of generator frequency value, therefore, irrespective of rotation number value of power generating units.

There are many types of active power storage devices in the energy system. Among them we can consider: hydroelectric pumped storage power plants, air storage systems, hydrogen devices, accumulator battery, supercondensers, pendulum devices and superconducting inductive storages.

Electric energy storages make it possible to mitigate requirements for electric power plant control that operate in basic mode, improve the efficiency of electric power transmission lines, load of which is within 50-60% limits of nominal one and increases its transmission capacity.

An essential advantage of inductive storages is that the energy is stored in such a form, in which form it is used – i.e. electromagnetic. There is no necessity to transform the energy from one form to another, also there is no large time consumption directly for this process unlike the other types of storages. Based on this fact, superconducting inductive storage has a unique feature of rapid transition from electric energy storage mode to its output mode.

In the second part of the work the inductive storages (IS) are considered according to their embodiment (design). Two main classes are singled out: linear

storages, in which a coil (loops) are located along the rectilinear axis, and toroidal ( $\theta$ -type) storages, in which a coil (loops) contains the central ring-shaped line.

Linear IS is structurally simple and processable, provides proper use of active material but generates significant magnetic field in the external space.

Toroidal ( $\theta$ -type) IS are as good as linear IS according their weight and size parameters, they have complicated design, but on the other hand make it possible to almost completely eliminate the external magnetic field that frequently plays essential role during designing of superconducting electric devices.

The linear IS' parameters and indicators with cylindrical, ring-shaped, solenoidal and spherical coils are considered, at the same time the analogous analysis for toroidal IS of different geometry is conducted.

In the third chapter of the work a current conductivity of wires of superconducting inductive energy storage and losses in the alternating magnetic field are given. It is shown that development and creation of superconducting inductive energy storage for energy purposes requires the use of superconducting wires (SW) with high current conductivity and low losses. The mentioned goal can be achieved by means of magnetic field localized by multicore superconducting wires (MSSCWL), in which the mutual effect of magnetic fields of separate cores is reduced to the minimum. For such execution of winding the current conductivity of each superconducting core is determined by its own magnetic field and own parameters.

The modern trends of amorphous alloys use in the magnetic circuit of the superconducting inductive energy storage system are studied.

The calculation mathematical model of superconducting inductive electric energy storage functioning in the active power rapid control mode is developed, which was implemented for plotting and assessment of its energy characteristics. The obtained characteristics secure stable operation of generators in case of emergency taking place in the electric system.

There are considered special security issues: general rules of handling with liquid cryogenes; feature of address to liquid nitrogen and helium, control over explosion hazardous admixture composition; organization bases of security assurance.