

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
ემზარი ჩაჩხიანი

საქართველოს ენერგეტიკულ სისტემაში  
ელექტროენერჯის ხარისხის ამაღლების  
რეკომენდაციების შემუშავება

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის  
მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა „ენერგეტიკა და  
ელექტროინჟინერია“  
შიფრი 0405

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
თბილისი, 0175, საქართველო  
ივლისი, 2016 - წელი

საავტორო უფლება © 2016 - წელი ემზარი ჩაჩხიანი  
თბილისი  
2016 წელი

# საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

## ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ჩაჩხიანი ემზარის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: საქართველოს ენერგეტიკულ სისტემაში ელექტროენერჯის ხარისხის ამადლების რეკომენდაციების შემუშავება და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი:

ხელმძღვანელი: ტექნ.მეცნ.დოქტორი, პროფესორი თამაზ კოხრეიძე

რეცენზენტი: ტექნ.მეცნ.დოქტორი, პროფესორი შოთა ნემსაძე

რეცენზენტი: ტექ.მეცნ.დოქტორი, პროფესორი მედგარ გელენიძე

# საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2016

ავტორი: ჩანჩიანი ემზარი

დასახელება: საქართველოს ენერგეტიკულ სისტემაში ელექტროენერჯის ხაროსხის ამალღების რეკომენდაციების შემუშავება.

ფაკულტეტი: ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: თარიღი

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ შემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

---

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით დაცული მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა ის მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

## რეზიუმე

მსოფლიოში სხვადასხვა სახის ენერჯის წარმოება და მოხმარება იზრდება სწრაფი ტემპით, ერთდროულად რთულდება ენერჯის გარდაქმნის პროცესები, ფართოვდება ენერჯეტიკული დანადგარების და აგრეგატების მრავალსახეობა, რომლებმაც უნდა უზრუნველყონ რაციონალური რეჟიმები სხვადასხვა სახის მომხმარებლების ელექტროკვებისათვის. მრეწველობის, ტრანსპორტის, სოფლის მეურნეობის და საყოფაცხოვრებო დარგების ენერჯოუზრუნველყოფის რიცხოვრივი მაჩვენებლების ზრდასთან ერთად დიდ როლს თამაშობს ენერჯის ხარისხის მაჩვენებელი, რაც დაკავშირებულია ენერჯის პარამეტრების რაციონალურ შეთანხმებასთან მისი გარდაქმნის სხვადასხვა სტადიაზე.

არასახოვანი ვოლტ-ამპერული მახასიათებლებით ელექტრული ენერჯის მომხმარებლების ფართო დანერგვამ წარმოებაში, მეცნიერების წინაშე დააყენა ახალი ამოცანები. ერთ-ერთი მათგანი განპირობებულია მნიშვნელოვანი უარყოფითი გავლენით აღნიშნული მომხმარებლებით, ქსელის რეჟიმის ელექტრულ პარამეტრებზე. ეს გავლენას ახდენს ელექტრული ენერჯის ხარისხის გაუარესებაზე, რასაც მიყვავართ ზარალთან, საკითხების სიმრავლე, რომლებიც განსაზღვრავს მოცემული ამოცანის შინაარსს, მიყვავართ ძირითადად რიცხოვრივ შეფასებასთან, ელექტრულ ქსელებში მაღალი რიგის ჰარმონიკების, ელექტრომომარაგების სისტემის ელემენტების მუშაობაზე მათი გავლენის განსაზღვრაზე, მაღალი რიგის ჰარმონიკების დონეების პროგნოზი და მათი მინიმიზაცია.

ნაშრომის პირველ თავში განხილულია ელექტრული ენერჯის ხარისხი ელექტრომომარაგების სისტემაში. ელექტრული ენერჯის

ხარისხის მაჩვენებლების ოპტიმიზაციის კრიტერიუმები და მათი პრაქტიკული რეალიზაციის გზები. დაბვის და დენის მრუდის ფორმის არასინუსოიდურობა, მაღალი რიგის ჰარმონიკების ძირითადი წყაროები, მათი გავლენა ელექტრომოწყობილობის მუშაობაზე, ელექტრომომარაგების სისტემაში მაღალი რიგის ჰარმონიკების ანგარიში და დაბვის არასინუსოიდურობის შემცირების მეთოდები და საშუალებები.

ნაშრომის მეორე თავში განხილულია ელექტრული ენერჯის ხარისხის მაცვენებლების ანგარიში. როგორცაა დაბვის გადახრის ანგარიში, დაბვის რხევების ანგარიში, დაბვის არასიმეტრიულობის ანგარიში და ელექტროენერჯის ხარისხის გაუმჯობესების მეთოდები და საშუალებები.

ნაშრომის მესამე თავი ეძღვნება ელექტრული ენერჯის ხარისხის ელექტრულ სისტემაში. განხილულია ელექტროენერჯის ხარისხის ამადლების აქტუალური საკითხები. ელექტროენერჯის ხარისხის მაჩვენებლად განხილულია სისშირე და დაბვა. ნაჩვენებია, რომ ელექტროსისტემის დატვირთვის საკვანძო წერტილებში დაბვისა და სისშირის მნიშვნელობის უზრუნველყოფა, შეიძლება მხოლოდ აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების ბალანსის შენარჩუნების გზით. პროცესების ავტომატური მართვის სისტემები საგრძნობლად აუმჯობესებს ელექტროენერჯის ხარისხის მაჩვენებლებს.

განხილულია ელექტროსისტემაში დაბვისა და რეაქტიული სიმძლავრის ავტომატური რეგულირების საკითხები, სინქრონული მანქანების ნახევრადგამტარული და ციფრული აგზნების ავტომატური რეგულატორების (აარ) საშუალებით. მოცემულია აარ-ების რეგულირების კანონები და მათი რეალიზაციის ბლოკ-სქემები. ნაჩვენებია, რომ დაბვის რეგულირების ეფექტიანობა დამოკიდებულია არა მარტო აარ-ების, არამედ სინქრონული მანქანების აგზნების სისტემის თვისებებზედაც, რომლებიც უნდა უზრუნველყოფდეს მაღალ

ხარისხობრივ მაჩვენებლებს, როგორცაა ძაბვის ამპლდების სიჩქარე და აგზნების მაქსიმალური ძაბვის ჯერადობა ნომინალურთან შედარებით. უპირატესობა ეძლევა ტირისტორული აგზნების სისტემებს, რომლებიც წარმატებით ასრულებენ ძირითად ხარისხობრივ მაჩვენებლებს.

განხილულია ელექტროსისტემის სისშირის შენარჩუნება მუდმივ დონეზე და მისი რეგულირების აქტუალური საკითხები. ნაჩვენებია, რომ სისშირის მუდმივად შენარჩუნება, უპირველეს ყოვლისა, განსაზღვრავს თვით ელექტროსისტემის მდგრად მუშაობასა და მის მიერ გაცემული ენერჯის ხარისხს. შესწავლილია, პარალელურად მომუშავე აგრეგატებს შორის აქტიური სიმძლავრის განაწილება, სისშირის რეგულირება წამყვანი სადგურით. მაგალითისათვის განხილულია წარმოსახვითი სტატიზმის მეთოდი, რომელიც იძლევა სისშირის რეგულირებას ელექტროსისტემის მუშაობის სხვადასხვა რეჟიმებში.

სამუშაოში მოკლედ ნათქვამია ელექტროენერჯის ზეგამტარული ინდუქციურ მაგროვებელზე, როგორც სისშირის რეგულირების ალტერნატიული მოწყობილობა.

ნაშრომის მეოთხე თავში განხილულია ელექტრული ენერჯის ხარისხი მუდმივი დენის ელექტრულ სისტემაში, როგორცაა მუდმივი დენის საჰაერო ხაზებში დენის ჰარმონიკები და მისი შეზღუდვის საშუალებები, მუდმივი დენის ელექტროგადაცემის გარდამქმნელების ქვესადგურებში მაღალი რივის ჰარმონიკების და რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია და გარდამქმელი ქვესადგურისთვის რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის საშუალებების შერჩევა.

## **Resume**

Production and consumption of different types of energy has been increasing rapidly all over the world. Simultaneously processes of energy conversion become difficult, variety of energetic adjustments and aggregations is expanding, which must secure rational regimens for energy supplying of different types. Along with increasing the number indexes of securing industry, transport, agriculture and household fields, energy quality index pays an important part, related to rational agreement of energy parameters on different stages of its conversion.

Wide introduction of electric energy messengers with non-lining volt-ampere characters in the production made the scientists face to new tasks. One of them is conditioned by significant negative influence of the mentioned messengers over the electric parameters of the web regimen. It has its influence on worsening of electric energy quality, what leads us to the loss. Abundance of the questions, determining the content of given task, leads us to main numeric evaluation of high level harmonics in electric webs, to determine their influence over working of elements of power supply systems, as well to make prognosis of high level harmonics and their minimization.

In the first chapter of the work one has discussed quality of electric energy in power supply system, criteria of optimizing indexes of electric energy quality and ways of their perspective realization, non-sinusoids of voltage and power with the curve shape, main sources of high level harmonics, their influence on working of electric

adjustments, account of high level harmonics in power supply system and methods and means for decreasing the voltage non-sinusoids.

In the second chapter of the work one has discussed account of indexes of electric energy quality, as there is voltage deviation account and methods and means of improving the power quality.

The third chapter of the works is devoted to the electric energy quality in electric system. One has discussed active questions of raising the power quality. As an index of power quality one has discussed frequency and voltage. It is shown that securing importance of voltage and frequency in key points of electric system load is possible only by the way of maintaining balance of active and reactive powers. Automatic management systems of the processes significantly improve indexes of electric energy quality.

One has discussed questions of automate regulation of voltage and reactive power in electric system by means of digital excitation automate regulators (EAR) and semi-transitive synchronic machines. There are laws of EAR regulation and block-schemes of their realization. It is shown that effectiveness of voltage regulation depends not only on EAR, but on characteristics of excitation system of synchronic machines, which must secure high quality indexes, as there are speed of voltage rising and sequence of maximal voltage of excitation in comparison with the nominal one. Thyristor excitation systems have some advantage, which successfully do the main quality indexes.



One has discussed actual questions of maintaining the electric system frequency on permanent level and its regulation. It is shown that maintaining the frequency permanently, first of all, determines firm working of the electric system and quality of its energy. One has studied: sharing the active frequency among the aggregations working simultaneously, frequency regulation by leading station. For example one discusses method of imaginable statism, giving frequency regulation in different regimens of electric system working.

In the Work one briefly says about high-conductive inductive collector of electricity as an alternative adjustment of frequency regulation.

In the forth chapter of the work one discusses quality of electric energy in electric system of stable electricity, as are electricity harmonics in air lines of stable electricity and means of limiting it, compensation of reactive frequency and high level harmonics in the sub-station of regenerators of stable electricity power transmissions and selecting the compensation means of reactive frequency for the regenerator sub-stations.

## შინაარსი

სატიტულო გვერდი .....	i
ხელმოწერების გვერდი .....	ii
საავტორო უფლებების გვერდი .....	iii
რეზიუმე.....	iv
ცხრილების ნუსხა .....	xii
ნახაზების ნუსხა .....	xiii
სამეცნიერო სიახლე.....	xv
შესავალი .....	xvii
ლიტერატურული მიმოხილვა.....	xx
თავი I. ელექტრული ენერჯის ხარისხი ელექტრომომარაგების სისტემაში.....	22
1.1. ელექტრული ენერჯის ხარისხის მაჩვენებლების ოპტიმიზაციის კრიტერიუმები [18].....	22
1.2. ძაბვის და დენის მრუდის ფორმის არასინუსოიდურობა.....	26
1.3. მაღალი რივის ჰარმონიკების ძირითადი წყაროები.....	29
1.4. ძაბვის მრუდის ფორმის არასინუსოიდურობის გავლენა ელექტრომწიფობილობის მუშაობაზე.....	38
1.5. ელექტრომომარაგების სისტემაში მაღალი რივის ჰარმონიკების ანგარიში .....	40
1.6. ელექტრომომარაგების სისტემაში ძაბვის არასინუსოიდურობის შემცირების მეთოდები და საშუალებები.....	42
1.7. ძაბვის არასინუსოიდურობის კონტროლი.....	47
თავი II. ელექტრული ენერჯის ხარისხის მაჩვენებლების ანგარიში.....	49
2.1. ძაბვის გადახრის ანგარიში.....	50
2.2. ძაბვის რხევების ანგარიში.....	52
2.3. ძაბვის არასიმეტრიულობის ანგარიში.....	54
2.4. ელექტროენერჯის ხარისხის გაუმჯობესების მეთოდები და საშუალებები .....	57
თავი III. ელექტრული ენერჯის ხარისხი ელექტრულ სისტემაში.....	60

3.1. ელექტროენერჯის ხარისხის ამადლების აქტუალური საკითხები [12]...	60
3.2. ელექტროსისტემაში ძაბვისა და რეაქტიული სიმძლავრის ავტომატური რეგულირების აქტუალური საკითხები [16].....	72
3.3. ელექტრული სისტემის სისშირის შენარჩუნება მუდმივ დონეზე და მისი რეგულირების აქტუალური საკითხები [12,17].....	80
3.4. ელექტროენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი როგორც სისშირის რეგულირების ალტერნატიული მოწყობილობა [10].....	96
თავი IV. ელექტრული ენერჯის ხარისხი მუდმივი დენის ელექტრულ სისტემაში.....	99
4.1. მუდმივი დენის საჰაერო ხაზებში დენის ჰამონიკები და მისი შეზღუდვის საშუალებები.....	99
4.2. მუდმივი დენის ელექტროგადაცემის გარდამქნელების ქვესადგურებში მარალი რივის ჰარმონიკების და რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია ...	108
4.3. გარდამქნელი ქვესადგურისთვის რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის საშუალებების შერჩევა .....	121
დასკვნები.....	128
ლიტერატურა.....	130

## ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 3.1 გვ. 93

## ნახაზების ნუსხა

ნახ.1.1. გვ.27 $\ell_\alpha$  - კვების წყაროს ე.მ.ძ-ის მრუდი,  $U_\alpha$  და  $i_\alpha$  - სამფაზა ვენტილური გარდამქნელის მომჭერებზე  $\alpha$  ფაზის ძაბვა და დენი.

ნახ. 1.2. გვ.31 ვენტილური გარდამქნელის ცვლადი დენის მრუდები.

ა - კომუტაციის გათვალისწინების გარეშე;

ბ - კომუტაცია სწორი ხაზის მიხედვით;

ვ - კომუტაცია კოსინუსოიდის მიხედვით.

ნახ.1.3. გვ.34 დამოკიდებულება  $K_d = f(K_d, X_K/r_K)$ .

ნახ. 1.4. გვ.36 ბ-რეჟიმისათვის შესადუღებელი გამმართველი დენის მაღალი რიგის ჰარმონიკების სიდიდეების ფარდობითი მნიშვნელობების მრუდები.

ნახ. 1.5. გვ.37 შესადუღებელი მანქანის ეკვივალენტური სქემა  $TV_1$  და  $TV_2$  - მართვადი ვენტილები;  $R$  და  $X_L$  - მანქანის აქტიური და ინდუქციური წინაღობები

ნახ.1.6. გვ.44 ორბოგირიანი გარდამქმნელების ტრანსფორმატორების დენებში მე-5 ჰარმონიკა.

ნახ. 1.7. გვ.46 მაღალი რიგის ჰარმონიკების ფილტრის ჩართვის სქემა.

ნახ. 2.1. გვ.52 ძაბვის გადახრასა და  $Z_b/Z_{\Sigma}$  ფარდობას შორის დამოკიდებულების მრუდები

ნახ. 2.2. გვ.54 ხაზური ძაბვების ვექტორული დიაგრამა ერთფაზა დატვირთვის გამორთვის დროს

ნახ. 2.3. გვ.56 ქსელის ჩანაცვლების სქემა უკუ მიმდევრობის ძაბვის განსაზღვრისათვის.

ნახ.2.4. გვ.58 სტატიკური მაკომპენსირებელი მოწყობილობა ინდუქციურობის რეგულირებით

ნახ. 3.1. გვ.63 დატვირთვის აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის დამოკიდებულება ძაბვაზე.

ნახ. 3.2. გვ.64 მახასიათებლები  $P_{\text{ღ}} = \phi_1(U), P_{\text{გ}} = \psi_1(U, \delta)$ .

ნახ. 3.3. გვ.64  $Q_{\text{ღ}} = \phi_2(U), Q_{\text{გ}} = \psi_2(U, \delta)$ .

ნახ. 3.4. გვ.68 დამოკიდებულება  $P_{\text{გ}} = k(f)$

ნახ. 3.5. გვ.68 დამოკიდებულება  $P_{\text{ღ}} = k(f)$

ნახ. 3.6. გვ.68 დამოკიდებულება  $P_{\text{გ}}, P_{\text{ღ}} = k(f)$

ნახ. 3.7. გვ.69 დამოკიდებულება  $Q_{\text{გ}}, Q_{\text{ღ}} = k(U)$

ნახ. 3.8. გვ.76 ციფრული ტიპის აარ-ის ბლოკ-სქემა.

ნახ. 3.9.89 გვ. კევივალენტური აგრეგატის სტატიკური მახასიათებელი

ნახ. 3.10. გვ.91 უმარტივესი გაერთიანებული “ა” და “ს” სისტემა

ნახ. 3.11. გვ.92 გაერთიანებული “ა”, “თ” და “ს” სისტემა.

ნახ. 4.1. გვ.110 ცვლადი დენის ქსელიდან გარდამქმნელი ქვესადგურის მიერ მოთხოვნილი სრული სიმძლავრის მდგენელები.

ნახ. 4.2. გვ.110 მდგ-ის ერთი პოლუსის პრინციპული სქემა

ნახ. 4.3. გვ.116 გარდამქმნელის სრული სიმძლავრის დამოკიდებულება გამართული დენსა და  $\alpha$  კუთხესთან.

ნახ. 4.4. გვ.117 გარდამქმნელის რეაქტიული სიმძლავრის პირველი ჰარმონიკის დამოკიდებულება გამართული დენსა და  $\alpha$  კუთხესთან.

ნახ. 4.5. გვ.117 გარდამქმნელის დამახინჯების სიმძლავრის დამოკიდებულება გამართველის დენსა და  $\alpha$  კუთხესთან.

ნახ. 4.6. გვ.118 გარდამქმნელის პირველი რიგის სიმძლავრის წრიული დიაგრამა: გ-გამმართველის რეჟიმი; ი-ინვერტორის რეჟიმი; ღრ-ღრმა რეგულირების რეჟიმი.

ნახ. 4.7. გვ.120 გარდამქმნელის მუშაობაზე მომიჯნავე სისტემის გავლენა.

ნახ. 4.8. გვ.122 მდგ-სათვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების ფილტრების სქემები: ა - 1-ლი რიგის ვიწროხოლიანი ფილტრები; ბ-მე-2 რიგის ფართოხოლიანი ფილტრი; ვ-მე-3 რიგის ფართოხოლიანი ფილტრი; გ-მდგ-ის ქვესადგურზე ფილტრების ტიპური კრებული.

## სამეცნიერო სიახლე

1. განხილულია ელექტროენერჯის ხარისხის ამაღლების აქტუალური საკითხები. ელექტროენერჯის ხარისხის მაჩვენებლად განხილულია სიხშირე და ძაბვა. ნაჩვენებია, რომ ელექტროსისტემის დატვირთვის საკვანძო წერტილებში ძაბვისა და სიხშირის მნიშვნელობის უზრუნველყოფა, შეიძლება მხოლოდ აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების ბალანსის შენარჩუნების გზით. პროცესების ავტომატური მართვის სისტემები საგრძნობლად აუმჯობესებს ელექტროენერჯის ხარისხის მაჩვენებლებს.

2. განხილულია ელექტროსისტემაში ძაბვისა და რეაქტიული სიმძლავრის ავტომატური რეგულირების საკითხები, სინქრონული მანქანების ნახევრადგამტარული და ციფრული აგზნების ავტომატური რეგულატორების (აარ) საშუალებით. მოცემულია აარ-ების რეგულირების კანონები და მათი რეალიზაციის ბლოკ-სქემები. ნაჩვენებია, რომ ძაბვის რეგულირების ეფექტიანობა დამოკიდებულია არა მარტო აარ-ების, არამედ სინქრონული მანქანების აგზნების სისტემის თვისებებზედაც, რომლებიც უნდა უზრუნველყოფდეს მაღალ ხარისხობრივ მაჩვენებლებს, როგორცაა ძაბვის ამაღლების სისწრაფე და აგზნების მაქსიმალური ძაბვის ჯერადობა ნომინალურთან შედარებით. უპირატესობა ეძლევა ტირისტორული აგზნების სისტემებს, რომლებიც წარმატებით ასრულებენ ძირითად ხარისხობრივ მაჩვენებლებს.

3. განხილულია ელექტროსისტემის სისშირის შენარჩუნება მუდმივ დონეზე და მისი რეგულირების აქტუალური საკითხები. ნაჩვენებია, რომ სისშირის მუდმივად შენარჩუნება, უპირველეს ყოვლისა, განსაზღვრავს თვით ელექტროსისტემის მდგრად მუშაობას და მის მიერ გაცემული ენერჯის ხარისხს. შესწავლილია: პარალელურად მომუშავე აგრეგატებს შორის აქტიური სიმძლავრის განაწილება, სისშირის რეგულირება წამყვანი სადგურით.

4. განხილულია ელექტრული ენერჯის ხარისხი მუდმივი დენის ელექტრულ სისტემაში, როგორცაა მუდმივი დენის საჰაერო ხაზებში დენის ჰარმონიკები და მისი შეზღუდვის საშუალებები, მუდმივი დენის ელექტროგადაცემის გარდამქმნელების ქვესადგურებში მაღალი რივის ჰარმონიკების და რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია და მისი საშუალებების შერჩევა.

პრაქტიკული ღირებულება: სადისერტაციო სამუშაოში მიღებული შედეგები შეიძლება გამოყენებული იქნეს ელექტროენერჯის ხარისხის გაუმჯობესების სახელმწიფო სტანდარტის ნორმატივების დამუშავების დროს.



## შესავალი

სამუშაოს აქტუალობა. არახაზოვანი ვოლტ-ამპერული მახასიათებლებით ელექტრული ენერჯის მომხმარებლების ფართო დანერგვამ, წარმოებაში მეცნიერების წინაშე დააყენა ახალი ამოცანები. ერთ-ერთი მათგანი განპირობებულია მნიშვნელოვანი უარყოფითი გავლენით აღნიშნული მომხმარებლებით, ქსელის რეჟიმის ელექტრულ პარამეტრებზე. ეს გავლენას ახდენს ელექტრული ენერჯის ხარისხის გაუარესებაზე, რასაც მიყვავართ ზარალთან, საკითხების სიმრავლე, რომლებიც განსაზღვრავს მოცემული ამოცანის შინაარსს, მიყვავართ ძირითადად რიცხობრივ შეფასებასთან ელექტრულ ქსელებში მაღალი რივის ჰარმონიკების, ელექტრომომარაგების სისტემის ელემენტების მუშაობაზე მათი გავლენის განსაზღვრაზე, მაღალი რივის ჰარმონიკების დონეების პროგნოზი და მათი მინიმიზაცია. აქედან გამომდინარე ელექტროენერჯის ხარისხის ამაღლების რეკომენდაციების შემუშავება არ კარგავს აქტუალობას.

სამუშაოს მიზანი: შემუშავებული იქნეს ელექტროენერჯის ხარისხის ამაღლების რეკომენდაციები: ელექტრომომარაგების სისტემაში, ელექტრულ სისტემაში და მუდმივი დენის ელექტრულ სისტემაში.

ძირითადი ამოცანები: დასახული მიზნის შესაბამისად ფორმულირებული იქნა შემდეგი ამოცანები:

1. გაანალიზებული იქნეს ელექტრული ენერჯის ხარისხის მაჩვენებლების ოპტიმიზაციის კრიტერიუმები, ძაბვის და დენის მრუდის ფორმის არასინუსოიდურობა, მაღალი რიგის ჰარმონიკების ძირითადი წყაროები, ძაბვის მრუდის ფორმის არასინუსოიდურობის გავლენა ელექტრომოწობილობის მუშაობაზე, ელექტრომომარაგების სისტემაში მაღალი რიგის ჰარმონიკების ანგარიში, ძაბვის არასინუსოიდურობის შემცირების მეთოდები, საშუალებები და კონტროლი.

2. დამუშავებულ იქნეს ელექტრული ენერჯის ხარისხის მაჩვენებლების ანგარიში, როგორცაა: ძაბვის გადახრის, ძაბვის რხევების, ძაბვის არასიმეტრიულობის და ამავე დროს ელექტროენერჯის ხარისხის გაუმჯობესების მეთოდები და საშუალებები.

3. შესწავლილი იქნეს ელექტრული ენერჯის ხარისხი ელექტრულ სისტემაში, მისი ამადლების აქტუალური საკითხები, როგორცაა ძაბვისა და რეაქტიული სიმძლავრის ავტომატური რეგულირება, სისშირის შენარჩუნება მუდმივ დონეზე და მისი რეგულირება, სისშირის რეგულირების ალტერნატიული მოწყობილობა-ელექტროენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი.

4. შესწავლილი იქნეს ელექტრული ენერჯის ხარისხი მუდმივი დენის ელექტრულ სისტემაში, მისი ამადლების საკითხები, როგორცაა მუდმივი დენის საჰაერო ხაზებში დენის ჰარმონიკები და მისი შეზღუდვის საშუალებები, მუდმივი დენის ელექტროგადაცემის გარდამქმნელების ქვესადგურებში მაღალი რიგის ჰარმონიკების და რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია და მისი საშუალებების შერჩევა.

კვლევის მეთოდები. სადისერტაციო სამუშაოს შესრულებისას გამოყენებული იქნა თეორიული და ემპირიული შემეცნებითი მეთოდები. თეორიულ დონეზე ეს მეთოდია ელექტრული წრედების თეორია. ემპირიულ დონეზე გამოყენებული იქნა მათემატიკური მოდელირების მეთოდები.

## ლიტერატურული მიმოხილვა

ელექტროენერჯის წარმოება და მოხმარება იზრდება სწრაფი ტემპით. ერთდროულად რთულდება ენერჯის გარდაქმნის პროცესები, ფართოვდება ენერჯეტიკული დანადგარების და აგრეგატების მრავალსახეობა, რომლებმაც უნდა უზრუნველყონ რაციონალური რეჟიმები სხვადასხვა სახის მომხმარებლების ელექტრომომარაგებისათვის. სხვადასხვა დარგების ენერგოუზრუნველყოფის რიცხოვრივი მაჩვენებლების ზრდასთან ერთად დიდ როლს თამაშობს ენერჯის ხარისხის მაჩვენებელი, რაც დაკავშირებულია ენერჯის პარამეტრების რაციონალურ შეთანხმებასთან მისი გარდაქმნის სხვადასხვა სტადიაზე [1,2,3,4,6,12].

განხილულია ელექტრული ენერჯის ხარისხი ელექტრომომარაგების სისტემაში. ელექტრული ენერჯის ხარისხის მაჩვენებლების ოპტიმიზაციის კრიტერიუმები და მათი პრაქტიკული რეალიზაციის გზები, ძაბვის და დენის მრუდის ფორმის არასინუსოიდურობა, მაღალი რიგის ჰარმონიკების ძირითადი წყაროები, მათი გავლენა ელექტრომოწყობილობის მუშაობაზე, ელექტრომომარაგების სისტემაში მაღალი რიგის ჰარმონიკების ანგარიში და ძაბვის არასინუსოიდურობის შემცირების მეთოდები და საშუალებები.

მოცემულია ელექტრული ენერჯის ხარისხის მაჩვენებლების ანგარიში. როგორცაა ძაბვის გადახრის ანგარიში და

ელექტროენერჯის ხარისხის გაუმჯობესების მეთოდები და საშუალებები.

შესწავლილია ელექტრული ენერჯის ხარისხი ელექტრულ სისტემაში. ელექტროენერჯის ხარისხის მაჩვენებლად განხილულია სისშირე და ძაბვა. ნაჩვენებია, რომ ელექტროსისტემის დატვირთვის საკვანძო წერტილებში ძაბვისა და სისშირის მნიშვნელობის უზრუნველყოფა, შეიძლება მხოლოდ აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების ბალანსის შენარჩუნების გზით. განხილულია ელექტროსისტემაში ძაბვისა და რეაქტიული სიმძლავრის ავტომატური რეგულირების საკითხები, სინქრონული მანქანების ნახევრადგამტარული და ციფრული აგზნების ავტომატური რეგულატორების საშუალებით.

ნაჩვენებია, რომ სისშირის მუდმივად შენარჩუნება, უპირველეს ყოვლისა, განსაზღვრავს თვით ელექტროსისტემის მდგრად მუშაობას და მის მიერ გაცემული ენერჯის ხარისხს. შესწავლილია პარალელურად მომუშავე აგრეგატებს შორის აქტიური სიმძლავრის განაწილება, სისშირის რეგულირება წამყვანი სადგურით.

განხილულია ელექტრული ენერჯის ხარისხი მუდმივი დენის ელექტრულ სისტემაში, როგორცაა მუდმივი დენის საჰაერო ხაზებში დენის ჰარმონიკები და მისი შეზღუდვის საშუალებები [16,20,21].

# თავი I. ელექტრული ენერჯის ხარისხი ელექტრომომარაგების სისტემაში

## 1.1. ელექტრული ენერჯის ხარისხის მაჩვენებლების ოპტიმიზაციის კრიტერიუმები [18]

ელექტროენერჯის ხარისხის მაჩვენებლების ცვლილების ნორმატული ზღვრები დადგენილია გამომდინარე ტექნიკური მოსაზრებებიდან. მათი კონტროლი ექსპლუატაციაში უნდა უზრუნველყოფდეს ელექტრომომწოდებლობების საიმედო მუშაობას.

განვიხილოთ არასინუსოიდულობის კოეფიციენტის სიდიდე, რომლითაც ხასიათდება ძაბვის ხარისხი და დაკავშირებულია ეკონომიური ზარალის სიდიდესთან. შემოვიტანოთ ზარალის ჰარმონიკის კოეფიციენტი

$$\Lambda = \sum_{\gamma=2}^n \frac{U_{\gamma^*}^2}{\gamma \sqrt{\gamma}}, \quad (1.1)$$

სადაც  $U_{\gamma^*}$  - ძაბვის  $\gamma$  ჰარმონიკის ფარდობითი სიდიდე (ძაბვის პირველი რიგის ჰარმონიკის მიმართ).

ეკონომიური ზარალი

$$y_3 = \Lambda \sum_{s=1}^P b_s \quad (1.2)$$

სადაც  $b_s$  - კოეფიციენტი, რომლითაც ხასიათდება ზარალი  $S$  სახეობის ელექტრომომწოდებლობების, განსახილველ დროის შუალედში, როცა  $\Lambda = 1$ .

მკაცრი შეფასებით, ზარალის ფუნქცია  $Y_3$  წარმოადგენს ალბათობით;

შემდგომში სიმარტივისთვის ზარალის ფუნქციის ყველა მდგენელი, განპირობებული ელექტროენერჯის ხარისხის პარამეტრების გადახრებით, ჩაითვლება დეტერმინირებული.

ეკონომიური ზარალი, განპირობებული ძაბვის არასიმეტრიულობით, პროპორტიულია არასიმეტრიულობის კოეფიციენტის  $\varepsilon_{sb}$  ფუნქციის  $F(\varepsilon_{sb})$

$$Y_{sb} = \sum_{\ell=1}^{\ell} C_{i\ell} f_{i\ell}(\varepsilon_{sb}) + \sum_{q=1}^m d_q F_q(\varepsilon_{sb}^2) \quad (1.3)$$

ძაბვის არასიმეტრიულობა ხასიათდება პროცენტული თანაფარდობით ქსელის უკუმიმდევრობის  $U_2$  ძაბვის, ნომინალურ ძაბვასთან  $U_6$ .

არასიმეტრიულობის კოეფიციენტი

$$\varepsilon_{sb} = \frac{U_2}{U_6} \cdot 100 \quad (1.4)$$

არასიმეტრიულობა, რომლის დროსაც კოეფიციენტი  $\varepsilon_{sb} \leq 2\%$ , ნებისმიერი სამფაზა სიმეტრიული ელექტრომომხმარებლებისთვის ჩაითვლება დასაშვებად.  $C_i$  და  $d_q$  ელექტრომოწყობილობების ელემენტებია, რომლებშიც ძაბვის არასიმეტრიულობის დროს განისაზღვრება ზარალი არასიმეტრიულობის კოეფიციენტის პირველი ან მეორე ხარისხის ფუნქციით. (1.3) გამოსახულების მარჯვენა ნაწილის მდგენელების სტრუქტურა სპეციფიკურია, ვინაიდან ძაბვის არასიმეტრიულობა გავლენას ახდენს მაგალითად ელექტრულ ძრავებში არა მხოლოდ დანაკარგების სიდიდეზე, არამედ მატრუნი მომენტის

სიდიდეზე და საბოლოოდ შემსრულებელი მექანიზმის წარმადობაზე, პროდუქციის ხარისხზე და თვითღირებულებაზე წარმოების მოცულობით. კონკრეტულ შემთხვევაში შესაბამისი რიცხობრივი კავშირებს შეიძლება ჰქონდეს როგორც დეტერმინირებული, ისე ალბათობითი ხასიათი. ისინი შეიძლება დადგენილი იქნეს საწარმოში.

უშუალოდ დაკვირვებისა და ანალიზის შედეგად, ან ექსპერიმენტის საფუძველზე, რომელიც საშუალებას მოგვცემს მივიღოთ დატვირთვის კვანძში ეკონომიური მახასიათებლები.

ზარალი, განპირობებული ძაბვის გადახრით დასაშვები დონის ათვლიდან, გამოისახება მაღალი რიგის ხარისხოვანი პოლინომით. თუ საწყის ანათვლად მიღებულია ნომინალური ძაბვა, მაშინ ზარალის ფუნქცია  $Y_0$  ძაბვის გადახრის  $\Delta U$  გათვალისწინებით ტოლია:

$$Y_0 = \sum_{p=1}^s \ell_p \Delta U + \sum_{r=1}^t q_r \Delta U^2, \quad (1.5)$$

სადაც  $\ell_p$  და  $q_r$  - მუდმივი კოეფიციენტები.

$Y_0$  სიდიდის განსაზღვრის დროს განსაკუთრებული ყურადღება უნდა მიექცეს რიცხობრივი შეფასებას წარმოების ღირებულობის მაჩვენებლებზე.

ზარალი, განსაზღვრული ძაბვის მოდულის რხევებით, დამოკიდებულია რხევის ამპლიტუდაზე და სიხშირეზე. [1]-ში განხილულია გამოსახულება ზარალის ფუნქციისათვის:

$$Y_k = \sum_{i=1}^n t_i \int_0^{f_c} H_z(f) S_{ri}(f)^{kz(f)} df, \quad (1.6)$$



სადაც  $H_z(f)$  და  $k_z(f)$  - წონითი ფუნქციები, რომლებიც გამოსახავს დამოკიდებულებას ხვედრით ზარალსა, რხევების ამპლიტუდასა და სიხშირისაგან.  $S_{ri}$  - ძაბვის მოდულის გაზომვის პროცესის სპექტრული სიმკვრივე,  $t_i$  დროის ხანგრძლივობის ინტერვალში;  $f_c$ -სპექტრული სიმკვრივის ზღვრული სიხშირე.

ელექტროენერგიის ხარისხის მაჩვენებლების ოპტიმიზაციის მათემატიკური ამოცანა დადის მიზნობრივი ფუნქციის მინიმუმის განსაზღვრაში;

$$Z = PK(\Lambda; \epsilon_{\text{ახ}}; \Delta U; \delta U, f) + H(\Lambda; \epsilon_{\text{ახ}}; \Delta U; \delta U, f) + Y_{\text{ა}} + Y_{\text{ახ}} + Y_{\text{ო}} + Y_{\text{კ}}, \quad (1.7)$$

სადაც  $K(\Lambda; \epsilon_{\text{ახ}}; \Delta U; \delta U, n)$ -დამატებითი კაპიტალური ხარჯები ელექტროენერგიის ხარისხის ამაღლებისათვის, განპირობებული ტექნიკური საშუალებების და ღონისძიებების დანერგვით;

$H(\Lambda; \epsilon_{\text{ახ}}; \Delta U; \delta U, n)$  - შესაბამისი დამატებითი ყოველწლიური ხარჯები;  $P$ -კაპიტალური დაბანდების ეფექტურობის ნორმატიული კოეფიციენტი.

მიზნობრივი ფუნქციის მინიმუმის განსაზღვრის დროს მხედველობაში მიიღება ელექტროენერგიის ხარისხის მაჩვენებლების სიდიდეების შეზღუდვა, განსაზღვრული ტექნიკური მოსაზრებებით. (1.7) გამოსახულების არახაზოვანი ფუნქციის მინიმუმის განსაზღვრისათვის, შეიძლება გამოყენებული იქნეს სხვადასხვა მათემატიკური მეთოდები, მაგალითად არახაზოვანო დინამიკური პროგრამირება, საჯარიმო ფუნქცია და სხვა, რომელთა გამოყენება შესაძლებელია კომპიუტერული ტექნიკის გამოყენებით.

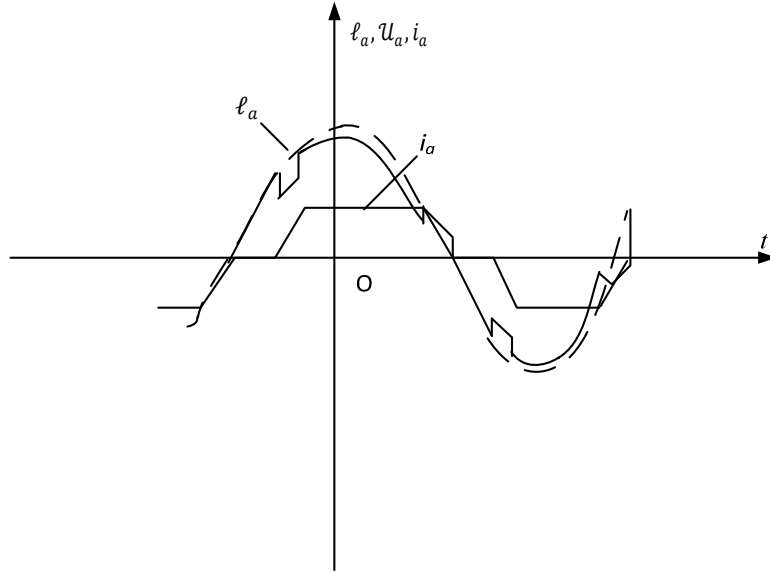
მოელ რიგ შემთხვევებში ელექტროენერჯის ხარისხის მაჩვენებლების ცვლილება ურთიერთდაკავშირებულია სხვადასხვა ფაქტორებთან. მაგალითად, ქსელში ძაბვის ამაღლება დაკავშირებულია ჰარმონიკების დონის ცვლილებასთან, გენერირებული ვენტილური გარდამქმნელებით და ძალოვანი ტრანსფორმატორებით.

ძაბვის არასიმეტრიულობის ამაღლება დაკავშირებულია ხაზური ძაბვის გადახრის სიდიდის ცვლილებასთან და ა.შ.

## 12. ძაბვის და დენის მრუდის ფორმის არასინუსოიდურობა

ელექტრომომარაგების სისტემის ელემენტებს არახაზოვანი ვოლტ-ამპერული მახასიათებლებით მიეკუთვნება ვენტილური გარდამქმნელები, ელექტროშედულების დანადგარი, ელექტრორკალური ღუმელი, აირგანმუხტვადი სინათლის წყარო, აგრეთვე ძალოვანი ტრანსფორმატორები და ძრავები. აღნიშნული მოწყობილობების განსაკუთრებულობას წარმოადგენს მათ მიერ მოთხოვნილი ქსელიდან არასინუსოიდური დენების, როცა მათ მომჭერებზე მოდებულია სინუსოიდური ძაბვა.

მაგალითისათვის ნახ. 1.1 მოცემულია დენის მრუდი სამფაზა ვენტილური გარდამქმნელის ერთი ფაზის.



ნახ.1.1.  $l_\alpha$  - კვების წყაროს ე.მ.ძ-ის მრუდი,  $U_\alpha$  და  $i_\alpha$  - სამფაზა ვენტილური გარდამქმნელის მომჭერებზე  $\alpha$  ფაზის ძაბვა და დენი

დენების არასინუსოიდური მრუდები შეიძლება განვიხილოთ როგორც რთული ჰარმონიკული რხევა, შემდგარი მარტივი ჰარმონიკული რხევებით სხვადასხვა სისწირით.

ცნობილია, რომ ნებისმიერი პერიოდული დროის ფუნქცია  $f(\omega t)$ , რომელიც აკმაყოფილებს დირიხლეს პირობას, შეიძლება წარმოვიდგინოთ ტრიგონომეტრიული ფურიეს მწკრივებად.

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{\gamma=1}^{\infty} (\alpha_\gamma \cos \gamma \omega t + b_\gamma \sin \gamma \omega t), \quad (1.8)$$

სადაც  $A_0$  - მუდმივი მდგენელი;  $\gamma$  - ჰარმონიკის ნომერი;  $\alpha_\gamma, b_\gamma$  - ფურიეს მწკრივის კოეფიციენტები.

როცა  $\gamma = 1$  (1.8) გამოსახულებიდან განისაზღვრება ჰარმონიკა, რომელსაც ეწოდება პირველი ან ძირითადი. მწკრივის დანარჩენ წევრს

( $\gamma > 1$ ) ეწოდება მაღალი რიგის ჰარმონიკები. ფურიეს მწკრივის კოეფიციენტები განისაზღვრება შემდეგი ფორმულებით

$$\left. \begin{aligned} \alpha_\gamma &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \cos \gamma \omega t d(\omega t); \\ b_\gamma &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \sin \gamma \omega t d(\omega t); \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

$\gamma$  ჰარმონიკის ამპლიტუდა

$$A_\gamma = \sqrt{\alpha_\gamma^2 + b_\gamma^2}, \quad (1.10)$$

ხოლო მისი საწყისი ფაზა

$$\varphi_\gamma = \arctg \frac{\alpha_\gamma}{b_\gamma} \quad (1.11)$$

მაღალი რიგის ჰარმონიკების დენები, ქსელის ელემენტებში, იწვევენ აღნიშნულ ელემენტების წინააღობებში ძაბვის ვარდნას, რომლის ზედდებით ძაბვის ძირითად სინუსოიდაზე, იწვევს ძაბვის მრუდის ფორმის დამახინჯებას (მრუდი  $U_\alpha$  ნახ.1.1). ქსელის არასინუსოიდური ძაბვის ხარისხი მიღებულია დახასიათდეს ძაბვის არასინუსოიდურობის კოეფიციენტით, რომელიც წარმოადგენს ფარდობას ძაბვის მაღალი რიგის ჰარმონიკის ეკვივალენტური მომქმედი მნიშვნელობის პირველი რიგის ჰარმონიკის ძაბვასთან, გამოსახული პროცენტებში ძირითადი ჰარმონიკის ძაბვისგან:

$$K_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{\gamma=2}^{\infty} U_\gamma^2}}{U_1} 100, \quad (1.12)$$

სადაც  $U_\gamma, U_1$ -მომქმედი მნიშვნელობები შესაბამისად ძაბვის  $\gamma$  და 1 რიგის ჰარმონიკები.

მაღალი რიგის ჰარმონიკის ძირითად წყაროს ელექტრომომარაგების სისტემაში წარმოადგენს ვენტილური გარდამქმნელები.

### 1.3. მაღალი რიგის ჰარმონიკების ძირითადი წყაროები

ნახევრადგამტარული გარდამქმნელების მოწყობილობები ფართო გამოყენებას პოულობენ შავი და ფერადი მეტალურგიის ქარხნებში და ქიმიური მრეწველობის საწარმოებში. საწარმოებში მუდმივი დენის მომხმარებლებს წარმოადგენს რეგულირებადი ელექტროამრაგები, ელექტროლიზური დანადგარები, გალვანური აბაზანები, ელექტროფიცირებული სარკინიგზო ტრანსპორტი, მაგნიტური სეპარატორები და სხვა ტექნოლოგიური დანადგარები. ცნობილია დიდი რაოდენობა სამფაზა დენის გამმართველი სქემების. დიდი და საშუალო სიმძლავრის დანადგარისთვის ფართო გამოყენება ნახეს ლარიონოვის სამფაზა ბოგირული სქემებმა და ექვსფაზა ნულოვანი სქემამ გამათანაბრებელი რეაქტორით. პირველადი დენის მრუდის დაშლით (მოთხოვნილი ქსელიდან) მოცემული გამმართველების სქემების ჰარმონიკული მდგენელებად გვიჩვენებს, რომ გარდა დენის ძირითადი მდგენელისა შეიცავს რიგ ჰარმონიკებს უფრო მაღალი რიგებით, რომლის ნომერი განისაზღვრება გამოსახულებით

$$\gamma = PK \pm 1, \quad (1.13).$$

სადაც  $P$  - გამმართველის ფაზათა რიცხვი.

$K - 1, 2, 3, 4 \dots$  - რიცხვების მიმდევრობით რიგი.

ნახ. 1.2. ვ ნაჩვენებია სამფაზა ვენტილური გარდამქმნელის დენის მრუდი ექვსფაზა გამმართველის ფაზათა რიცხვით. პირველადი დენების მრუდეების დაშლა ფურიეს მწკრივებად გვიჩვენებს, რომ დენების მაღალი რიგის ჰარმონიკების ამპლიტუდები და ფაზები დამოკიდებულია კომუტაციის კუთხეზე  $\chi$  და გარდამქმნელის რეგულირების კუთხეზე  $\alpha$ . მიღებული გამოსახულება ფურიეს მწკრივის კოეფიციენტების განსაზღვრისათვის მოუხერხებელია საინჟინრო ანგარიშებისათვის და ამიტომ პრაქტიკული ანგარიშებისათვის იყენებენ დენის ჰარმონიკების მრუდეების ფარდობით მნიშვნელობებს  $I_{\gamma,*} = I_{\gamma}/I_1$ , გამოთვლილი გამოსახულებებით [2]. მიახლოებითი ანგარიშების დროს გარდამქმნელების პირველადი დენების სპექტრული მდგენელების, შეიძლება გამოვიყენოთ უფრო მარტივი გამოსახულებით. თუ დაუშვებთ, რომ კომუტაცია მიმდინარეობს სწორი ხაზით და ცვლადი დენის მრუდს გააჩნია ფორმა სიმეტრიული ტრაპეციული ბლოკების (ნახ. 1.2, ბ), მაშინ [2]-ის თანახმად

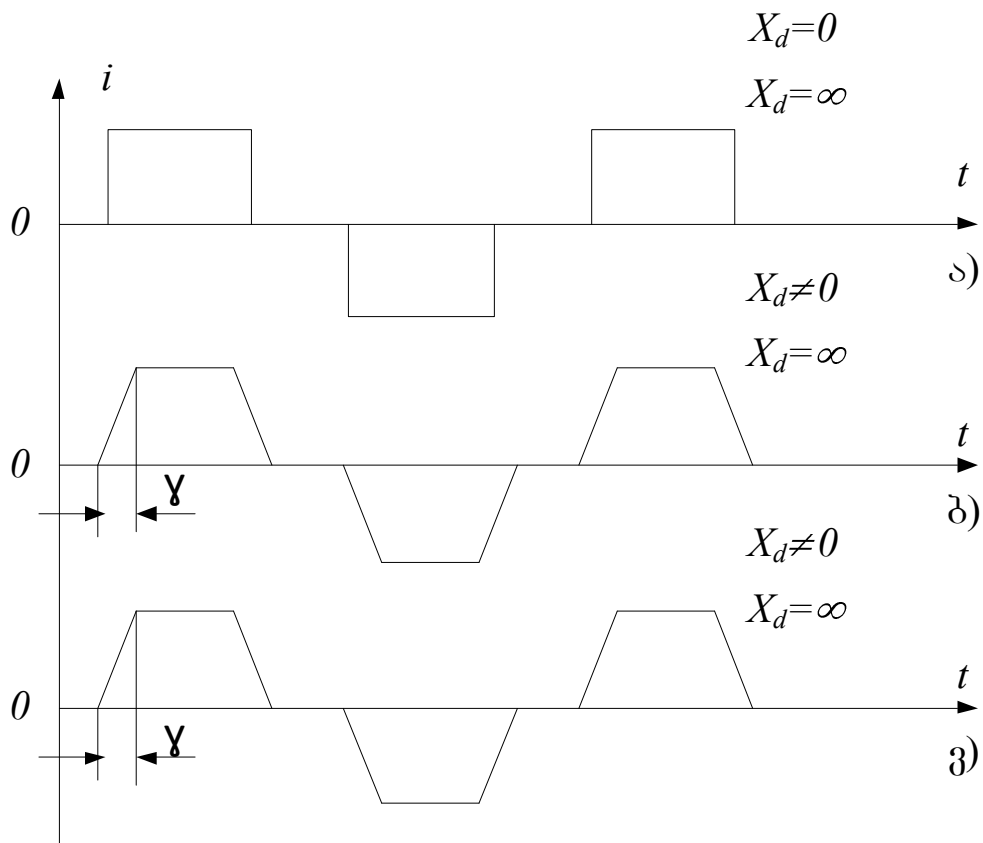
$$I_{\gamma} = \frac{I_1}{\gamma} \cdot \left| \frac{\sin \frac{\gamma\chi}{2}}{\frac{\gamma\chi}{2}} \right|, \quad (1.14)$$

სადაც  $I_1$ -დენის პირველი რიგის ჰარმონიკის მომქმედი მნიშვნელობა. რეკომენდირებულია (1.14) ფორმულით ვისარგებლოდ  $\gamma \leq 19$  ჰარმონიკის ამპლიტუდის მიახლოებითი განსაზღვრისათვის, მართვადი ვენტილური გარდამქმნელებისათვის როცა  $\chi \leq 15^\circ$ . საორიენტაციო ანგარიშების დროს შეიძლება მხედველობაში არ მივიღოთ კომუტაციის კუთხე. ცვლადი დენის ასეთი მრუდისთვის,

რომელსაც გააჩნია მართკუთხა-საფეხუროვანი ფორმა (ნახ. 1.2, ა),  
 ჰარმონიკების შემადგენლობა გამოითვლება მარტივი ფორმულით [3]:

$$I_\gamma = \frac{I_1}{\gamma} (1.15)$$

ანგარიშის სიზუსტე (1.15) ფორმულით საგრძნობლად მცირდება  
 კომუტაციის კუთხის და ჰარმონიკის ნომრის გაზრდით: როცა  $\gamma \leq 15^\circ$   
 ანგარიშის ცდომილება (1.15)-ის მიხედვით მე-5 და მე-7 რიგის  
 ჰარმონიკებისათვის აღწევს 15%, ხოლო მე-11 და მე-13 რიგის  
 ჰარმონიკის ამპლიტუდისთვის - 25%.



ნახ. 1.2. ვენტილური გარდამქმნელის ცვლადი დენის მრუდები.

ა - კომუტაციის გათვალისწინების გარეშე;

ბ - კომუტაცია სწორი ხაზის მიხედვით;

ვ - კომუტაცია კოსინუსოიდის მიხედვით.

ჰარმონიკების ფაზები მიახლოებით შეიძლება განისაზღვროს გამოსახულებიდან [3]

$$\varphi_\gamma = (\alpha + \gamma/2)\gamma \quad (1.16)$$

(1.16) ფორმულა იძლევა საშუალებას განისაზღვროს, როცა  $10^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$  ჰარმონიკების ფაზები  $\gamma \leq 19$  ცდომილებით, რომელიც არ აღარბებს  $15^\circ$ , როცა  $\gamma \leq 15^\circ$ .

კვლევებმა აჩვენა, რომ გარდამქმნელების პირველადი დენების ამპლიტიდური სპექტრი შეიცავს, როგორც კანონიკურ ჰარმონიკებს ( $\gamma = 5,7,11,13,17,19 \dots$ ), რომელთა ნომერი განისაზღვრება (1.13) ფორმულის მიხედვით, ისე არაკანონიკური ან ანორმალური ჰარმონიკები ( $\gamma = 2,3,4,6,8,9,10 \dots$ ), ანორმალური ჰარმონიკების გამოვლენის ძირითად მიზეზს წარმოადგენს მართვის იმპულსების ასიმეტრია; ანორმალური ჰარმონიკების ამპლიტუდები შედარებით კანონიკური ჰარმონიკების ამპლიტუდებთან, როგორც წესი, მცირეა. მათი გავლენა ქსელის ძაბვის არასინუსოიდურობაზე გაითვალისწინება არასინუსოიდურობის კოეფიციენტის გამოთვლით  $K_{as}$ .

რეალური ელექტროლუმენები, რომლებიც ფართოდ გამოიყენება თანამედროვე მეტალურგიული და მანქანათმშენებლობის საწარმოებში, მათი არაწრფივი ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები, იწვევს დენების მაღალი რიგის ჰარმონიკების გენერაციას, ღუმელების დენის მრუდის ფორმა დამოკიდებულია მისი მუშაობის რეჟიმებზე. თხევადი ლითონის



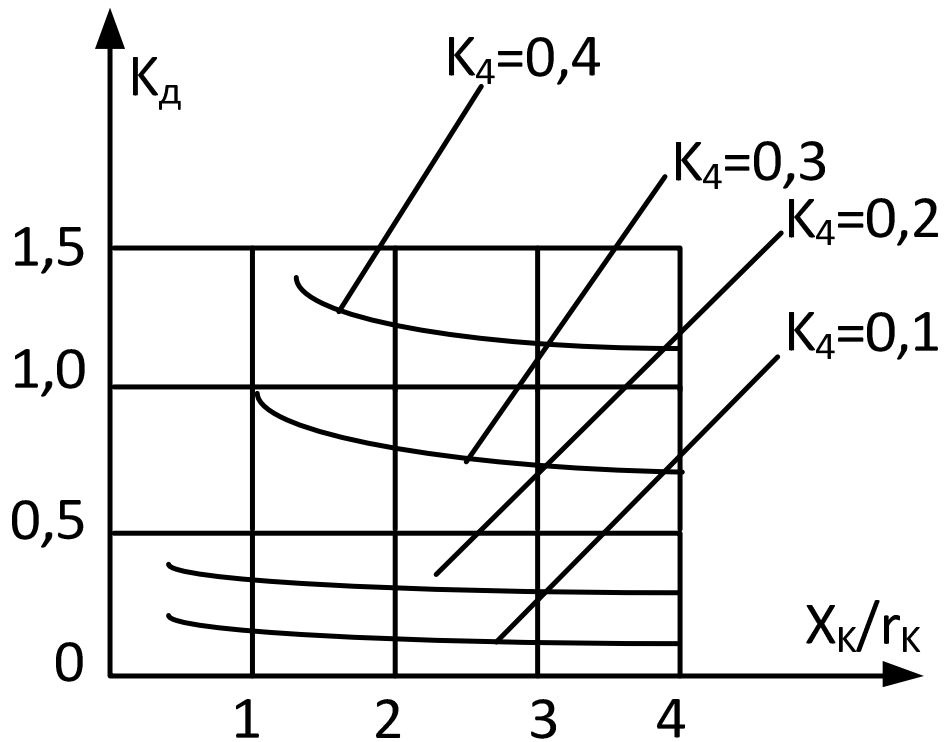
წარმოქმნის პერიოდში დენის რყევები მცირდება. დენის მრუდის ფორმა უმჯობესდება და უახლოვდება სინუსოიდს.

მაღალი რიგის ჰარმონიკების ამპლიტუდის ფარდობითი მნიშვნელობა რიგით  $\gamma = 6k \pm 1 (\gamma = 1, 2, 3, 4 \dots)$  შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით [3]

$$I_{\gamma,*} = \frac{I_{\gamma}}{I_1} = \frac{k_{\gamma}}{\gamma^2} \quad (1.17)$$

$k_{\gamma}$  კოეფიციენტი დამოკიდებულია რკალის უკუ ემძის ამპლიტუდის  $E_{\gamma}$  და მკვებავი ქსელის ე.მ.ძ  $E_m$  თანაფარდობაზე და რკალის წრედში ინდუქციურ  $X_K$  და აქტიურ  $r_K$  წინაღობების თანაფარდობაზე, რომლის მნიშვნელობა განისაზღვრება ღუმელის ტრანსფორმატორის და ქსელის წინააღობით.

ნახ. 13 ნაჩვენებია დამოკიდებულება  $K_{\gamma} = f(K_4, X_K/r_K)$ , სადაც  $K_4 = E_{\gamma}/E_m$ ; ლითონის დნობის საწყის პერიოდში  $K_4 = 0,3 \div 0,4$ . დნობის დამთავრების მომენტში  $K_4 = 0,05 \div 0,15, 7, 11$  და 13 დენის ჰარმონიკების დონეები, გენერირებული ელექტრორკალური ღუმელებით, შედარებით მცირეა. მათი ეკვივალენტური მომქმედი მნიშვნელობა არ აჭარბებს 10%-ს დენის პირველი რიგის ჰარმონიკის. ელექტრორკალური ღუმელების დენები შეიცავს აგრეთვე 2,3,4,6 რიგის ჰარმონიკებს. ანორმალური ჰარმონიკების წარმოშობის ძირითად მიზეზებს წარმოადგენს ღუმელის რკალის წვის პირობების უწყვეტი ცვლილება. ღუმელის დენში ეკვივალენტური მომქმედი მნიშვნელობა მაღალი რიგის ჰარმონიკების დენების, ანორმალური ჰარმონიკების ხარჯზე იზრდება 1,8-2 ჯერ.



ნახ. 13. დამოკიდებულება  $K_d = f(K_4, X_K/r_K)$ .

შესადუღებელი მოწყობილობაში კვების წყაროდ გამოიყენება ნახევრადგამტარული გამმართველი. ფართო გამოყენება შესადუღებელი გამმართველში მიიღო სამფაზა გამმართველმა ბოგირული სქემით აწყობილი არამართვადი ვენტილების ბაზაზე.

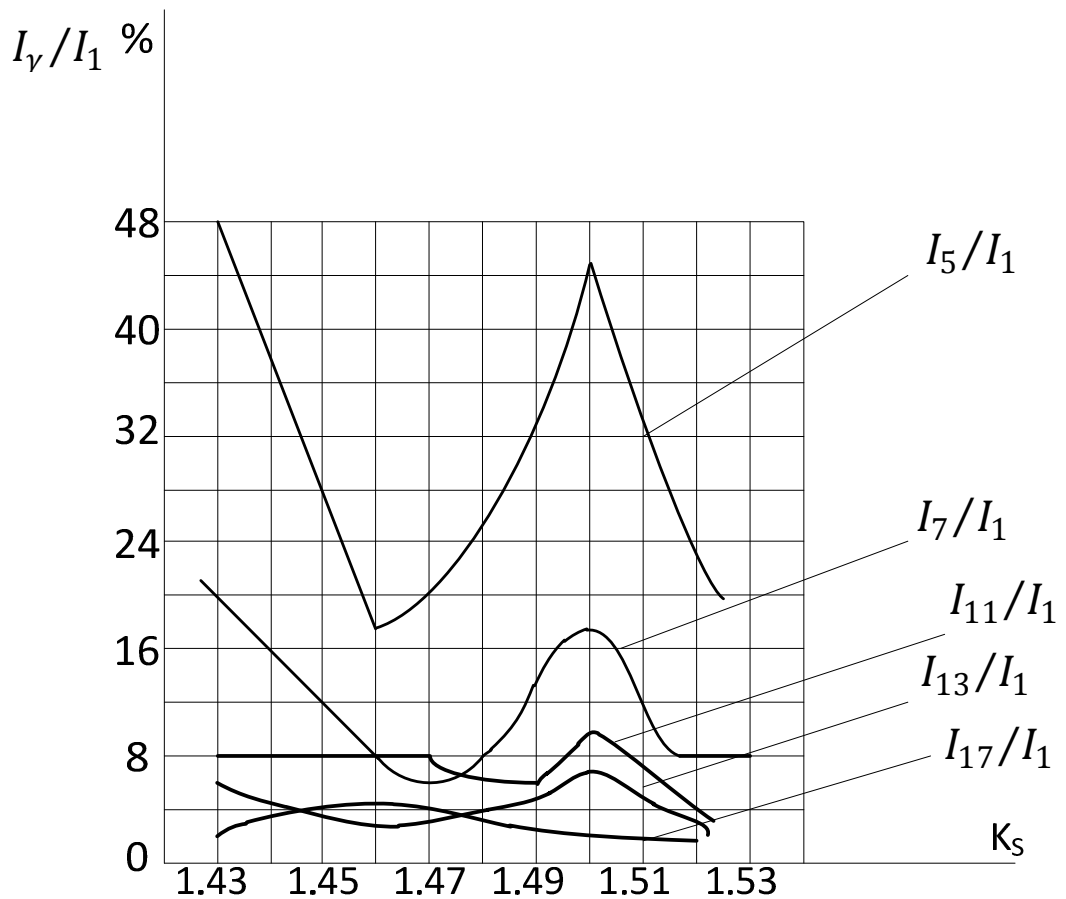
მაღალი რიგის ჰარმონიკების დენები, გენერირებული შესადუღებელი გამმართველებით, დამოკიდებულია შესადუღებელი მოწყობილობის მუშაობის რეჟიმზე. დატვირთვის შესაბამისად გამმართველმა შეიძლება იმუშაოს სამი რეჟიმიდან ერთ-ერთში: წყვეტილი დენების რეჟიმში მცირე დატვირთვის დროს, რომელსაც შეესაბამება ორ ვენტილიანი კომუტაცია (ა); ორო და სამვენტილიანი შერეული კომუტაცია.

საშუალო დატვირთვის დროს (ბ); სამეცნიერო კომუტაციის რეჟიმში დიდი დატვირთვის დროს (ც).

ა - რეჟიმს პრაქტიკული მნიშვნელობა არა აქვს. ბ- რეჟიმს ადგილი აქვს, როცა  $1,43 \leq K_S \leq 1,52$  აქ  $K_S = E_S/U_m$ -ით აღნიშნულია ფარდობა რკალის უკუ ე.მ.დ.  $E_d$ -ის გამმართველის  $U_m$  ძაბვასთან. ბ - რეჟიმში შესადრულებელი გამმართველის მაღალი რიგის ჰარმონიკების სიდიდეების მრუდეები ფარდობით ერთეულებში მიღებული [3] ნაჩვენებია ნახ. 14. მრუდეებიდან ჩანს, რომ დენის მე-5 და მე-7 ჰარმონიკების დონეები გამოირჩევიან არასტაბილურობით. უმნიშვნელო ცვლილებამ რკალის წვის პირობის, შეიძლება მიგვიყვანოს გაზრდასთან ან შემცირებასთან დენების მე-5 და მე-7 რიგის ჰარმონიკების რამოდენიმეჯერ.

ც - რეჟიმს ადგილი აქვს, როცა  $I_d \geq (0,6 \div 0,65)I_{dK}$ , სადაც  $I_d, I_{dK}$  - რკალის დენი (გამართული დენი) შესაბამისად მუშა რეჟიმში და მოკლე შერთვის რეჟიმში.  $\gamma = 6k + 1$  რიგის ჰარმონიკების ამპლიტუდის საინჟინრო ანგარიშების დროს ც-რეჟიმისათვის შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით [3].

$$I_\gamma = \frac{I_1}{\gamma^2} \quad (1.18)$$



ნახ. 14. ბ-რეჟიმისათვის შესაღებელი გამმართველი დენის მაღალი რიგის ჰარმონიკების სიდიდეების ფარდობითი მნიშვნელობების მრუდები.

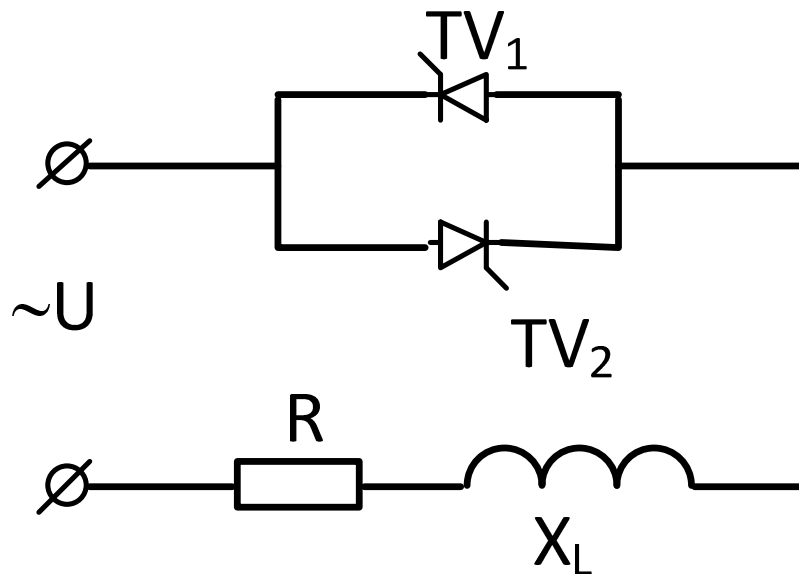
ც-რეჟიმში დენის მაღალი რიგის ჰარმონიკების დონე მნიშვნელოვნად დაბალია, ვიდრე ბ რეჟიმში.

შესაღებელი გამმართველის დენების რეალურ მრუდებს გააჩნია, კიდევ ლუწი რიგის ჰარმონიკები და სამის ჯერადი ჰარმონიკები. ძირითადი მიზეზი მათი გამოვლენისა წარმოადგენს ვენტელთა ჯგუფების გაღების კუთხეების გაფანტვა, რომელიც გამოწვეულია ცალკეული ვენტელების მახასიათებლების არასტაბილურობით.

ამჟამად დიდი პრაქტიკული გამოყენება აქვს ელექტროშესადულებელი საკონტაქტო მანქანას, რომლის ჩართვა ხორციელდება ტირისტორული გასაღებების საშუალებით. შესადულებელი დენის მდოვრე რეგულირებისათვის ვენტილური მოწყობილობა აღჭურვილია ფაზური რეგულირების სისტემით. ფაზური რეგულირების გამოყენება იწვევს დენის ფორმის დამახინჯებას. შესადულებელი მანქანის ეკვივალენტური სქემისათვის წარმოდგენილი ნახ. 1.5 კენტი რიგის დენების ჰარმონიკების საშუალო მომქმედი მნიშვნელობები შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით [4]

$$I_{\gamma,P} = \frac{S_{საპ} K_{\omega} K_{მ,\gamma}}{\gamma^2 U_{\zeta}}, \quad (1.19)$$

სადაც  $S_{საპ}$  - მანქანის საპასპორტო სიმძლავრე;  $K_{\omega}$  - შესადულებელი მანქანის დატვირთვის კოეფიციენტი;  $K_{მ,\gamma}$  - მარაგის კოეფიციენტი, რომელიც პირველი რიგის ჰარმონიკისთვის ტოლია 0,97, მე-3 რიგის ჰარმონიკისათვის - 2,0; მე-5 რიგის ჰარმონიკისათვის - 2,3; მე-7 რიგის ჰარმონიკისათვის - 1,4;  $U_{\zeta}$  - მანქანის ნომინალური ძაბვა.



ნახ. 1.5. შესადულებელი მანქანის ეკვივალენტური სქემა

$TV_1$  და  $TV_2$  - მართვადი ვენტილები;  $R$  და  $X_L$  - მანქანის აქტიური და ინდუქციური წინააღობები

განმსახურელი დენის დაშლის დროს წარმოადგენენ 1,3 და 5 რიგის ჰარმონიკები. ექსპერიმენტული კვლევებმა ჩატარებული [4] აჩვენეს, რომ ელექტროშემდუღებელი კონტაქტური მანქანის დენების სპექტრში, გარდა კენტი ჰარმონიკებისა მონაწილეობენ აგრეთვე ლუწი ჰარმონიკები. ლუწი ჰარმონიკების გამოვლენა აიხსნება ვენტილების რეგულირების კუთხის გაფანტვით, რომლის მნიშვნელობა აღწევს  $10^0$ . ლუწი მაღალი რიგის ჰარმონიკების გავლენა შესადუღებელი მანქანის დენების სინუსოიდურობაზე უმნიშვნელოა.

#### **14. ძაბვის მრუდის ფორმის არასინუსოიდურობის გავლენა ელექტრომოწეობილობის მუშაობაზე**

როგორც აღნიშნული იყო, ძაბვის მრუდის ფორმის დამახინჯება უარყოფითად მოქმედებს ელექტრომომარაგების სისტემის მრავალი ელემენტების მუშაობაზე. ელექტრომომარაგების სისტემის ელემენტებში დენების მაღალი რიგის ჰარმონიკების გავლის დროს აღიძვრება აქტიური სიმძლავრის დამატებითი დანაკარგები, რომლებიც შეიძლება ვიანგარიშოთ ფორმულით

$$\Delta P_{\text{ახ}} = 3 \sum_{\gamma=3}^n I_{\gamma}^2 R_{\gamma}, \quad (1.20)$$

სადაც  $R_{\gamma}$ -ელემენტის აქტიური წინაღობა დენის ჰარმონიკის.  $I_{\gamma} - \gamma$  ჰარმონიკის დენი. მაქსიმალური დამატებითი აქტიური სიმძლავრის დანაკარგებს ადგილი აქვს ტრანსფორმატორებში, ძრავებში და გენერატორებში, რომლებშიც გრავნილების აქტიური წინაღობის

გაზრდა მიმდინარეობს დაახლოებით  $\sqrt{V}$ -ის პროპორციულად. ხშირ შემთხვევაში აღნიშნული დანაკარგებმა, შეიძლება მიგვიყვანოს ელექტრული მანქანების გრაგნილების დაუშვებელ გადახურებასთან [5,6] და ყოველ შემთხვევაში მიყვავართ ელექტრული ენერჯის დამატებით დანაკარგებთან, რომლებიც შეიძლება იყოს მნიშვნელოვანი. ძაბვის მრუდში ჰარმონიკების არსებობის დროს იზოლაციის მოძველების პროცესი მიმდინარეობს ინტენსიურდ, ვიდრე იმ შემთხვევაში, როცა ელექტრომწიფობილობები მუშაობენ სინუსოიდურ ძაბვაზე. ეს აიხსნება დიელექტრიკებში ფიზიკო-ქიმიური პროცესების აჩქარებით მაღალი სიხშირის ელექტრული ველის დროს, განპირობებული მათი მოძველებით. მაგალითად [7]-ის თანახმად როცა ეკვივალენტური მოქმედი მნიშვნელობა მაღალი რიგის ჰარმონიკების ტოლია 5% ძირითადი სიხშირის ძაბვის, რაც სახელმწიფო სტანდარტით დასაშვებია; ექსპლუატაციის 2 წლის შემდეგ  $tg\delta$  კონდენსატორების იზრდება 2-ჯერ. დენისა და ძაბვის მაღალი რიგის ჰარმონიკები უარყოფით გავლენას ახდენენ ელექტროგამზომი ხელსაწყოების ცდომილებაზე, ვენტილური გარდამქმნელის მუშაობაზე, აუარესებს გამართული დენის ხარისხს. მაღალი რიგის ჰარმონიკები უარყოფითად მოქმედებს კონდენსატორთა ბატარეებზე. ხშირ შემთხვევაში ადგილი აქვს მის დაზიანებას, აფეთქებას. კონდენსატორების დაზიანების მიზეზს წარმოადგენს მათი გადატვირთვა მაღალი რიგის ჰარმონიკების დენებით, რომელიც აღიძვრება, როგორც წესი ქსელში რეზონანსული რეჟიმის აღძვრით.

ჩატარებული ექსპერიმენტალური კვლევებმა აჩვენა, რომ ელექტრომომარაგების სისტემაში, სადაც ადგილი აქვს მძლავრი ვენტილური გარდამქმნელების ფუნქციონირებას, ძაბვის არასინუსოიდურობა, როგორც წესი, აჭარბებს ნორმირებულ ზღვარს, ხშირ შემთხვევაში აღწევს 20% ( $K_{\text{ახ}} = 20\%$ ).

## 1.5. ელექტრომომარაგების სისტემაში მაღალი რიგის

### ჰარმონიკების ანგარიში

მაღალი რიგის ჰარმონიკების ანგარიშის მეთოდები პირობითად შეიძლება დაიყოს სამ ჯგუფად: 1) ანალიზური, 2) ალბათობითი, 3) მიახლოებითი.

ანგარიში პირველი მეთოდით ხორციელდება, როგორც წესი კომპიუტერული ტექნიკის გამოყენებით და შეიძლება შესრულებული იქნეს ნებისმიერი რთული სქემისათვის. მეორე მხრივ ზუსტი ანალიზური მეთოდი საჭიროებს დიდი რაოდენობის საწყის მონაცემებს და არ ითვალისწინებს შესაძლო ცვლილებებს პარამეტრებისა და რეჟიმების გარდამქმნელების მუშაობისას, რომლებიც ატარებენ შემთხვევით ხასიათს. ამიტომ ხშირად აღმოჩნდება მიზანშეწონილი ალბათობითი ანგარიშის მეთოდების გამოყენება. ეს მეთოდები გამოიყენება არასინუსოიდური ძაბვის ანგარიშის დროს, ერთფაზა წვეის დატვირთვისგან, საგლინი დანადგარი, ელექტროთერმული დანადგარი. ამ შემთხვევაში საჭიროა დიდი მოცულობის



ექსპერიმენტული მონაცემები, მიღებული ჩვეულებრივ მომქმედობიექტზე ან ფიზიკურ მოდელზე.

არსებობს მიახლოებითი დამოკიდებულება მაღალი რიგის ჰარმონიკის ანგარიშისათვის, გამოწვეული ვენტილური დატვირთვით, მიღებული ინჟინრულ პრაქტიკაში. მაღალი რიგის ჰარმონიკების მომქმედის მნიშვნელობა გარდამქმნელის მომჭერებზე გამოითვლება ფორმულით

$$U_{a3} = \frac{S_{a3} I_a}{S_K I_{a5}} \sqrt{\frac{2\pi}{PU_K} - 1} \quad (1.21)$$

აქედან განისაზღვრება თანაფარდობა გარდამქმნელის სიმძლავრესა  $S_{a3}$  და სისტემის მ.შ.-ის სიმძლავრეს შორის, რათა ძაბვის დამახინჯებამ არ გადააჭარბოს დასაშვებ მნიშვნელობას:

$$\frac{S_K}{S_{a3}} \geq \frac{1}{U_{a3}} \sqrt{\frac{2\pi}{PU_K} - 1} \quad (1.22)$$

არსებობს მეთოდისა ძაბვის არასინუსოიდურობის ანგარიშის მკვებავი ქსელის ნებისმიერ წერტილში, როცა მუშაობს მარტო ვენტილური გარდამქმნელი:

$$K_{a,b} = X_{c,*} \sqrt{\frac{\frac{3}{\pi} \frac{\sin \varphi_1}{X_{c,*} + X_{T,*}} - \frac{9}{\pi^2}}{1 - \frac{6}{\pi} X_{c,*} \sin \varphi_1 - \frac{9}{\pi^2} X_{c,*}}}, \quad (1.23)$$

სადაც  $X_{c,*} = S_{a3}/S_K$ -დაყვანილი წინაღობა გარდამქმნელი ტრანსფორმატორის;  $X_{T,*} = \frac{U_k \% \cdot S_{a3}}{100 S_{BT}}$  - გარდამქმნელი ტრანსფორმატორის დაყვანილი წინაღობა;  $U_k \%, S_{BT}$  - გარდამქმნელი ტრანსფორმატორის მ.შ. ძაბვა და ნომინალური სიმძლავრე.

როცა  $S_K/S_{\partial\beta} > 10$  შეიძლება მივიღოთ

$$K_{\Delta,b} = X_{b,*} \sqrt{\frac{3 \sin\varphi_1}{\pi X_{c,*} + X_{T,*}} - \frac{9}{\pi^2}}$$

$N$  ვენტილური გარდამქმნელების მუშაობის დროს  $K_{\Delta,b}$ -ის მნიშვნელობა დატვირთვის კვანძში შეიძლება ვიანგარიშოთ მიახლოებითი ფორმულით

$$K_{\Delta,b} \approx \sqrt{\sum_{i=1}^N K_{\Delta,b,i}^2} \quad (1.24)$$

## 1.6. ელექტრომომარაგების სისტემაში ძაბვის არასინუსოიდურობის შემცირების მეთოდები და საშუალებები

როგორც აღნიშნული იყო, ელექტრული ქსელში ძაბვისა და დენის მაღალი რიგის ჰარმონიკების არსებობა უარყოფითად მოქმედებს როგორც ელექტრული ენერჯის მომხმარებლებზე, ისე ელექტრომომარაგების სისტემების მუშაობაზე მთლიანად და იწვევს ზარალს. ზარალის არსებობა მაღალი რიგის ჰარმონიკებიდან განაპირობებს აუცილებლობას მაღალი რიგის ჰარმონიკების დონეების შემცირებისა ელექტრულ ქსელებში.

ცნობილია რამოდენიმე მეთოდი ძაბვის მრუდის ფორმის არასინუსოიდურობის შემცირების.

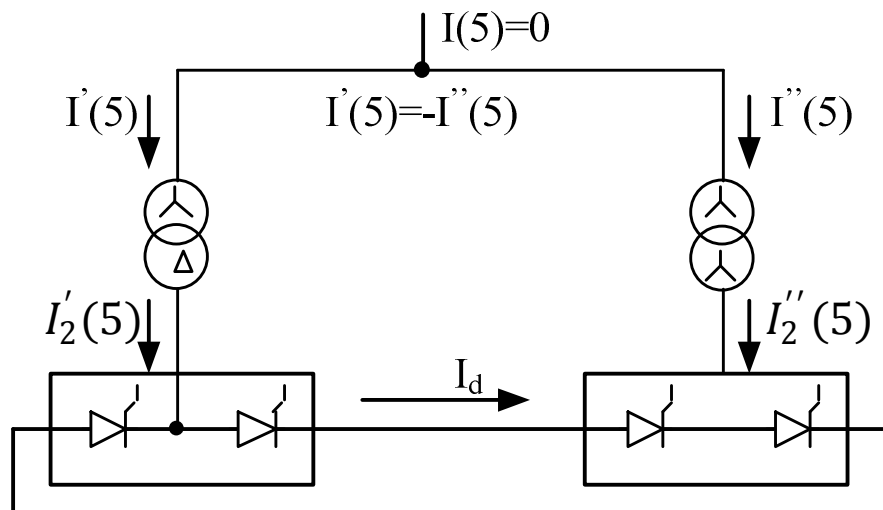
მათ შორის განვიხილოთ

1. გამმართველების ფაზათა რიცხვის გაზრდა. ფორმულა (1.13)-ის თანახმად ვენტილური გარდამქმნელის დენების სპექტრული შემადგენლობა განისაზღვრება გამმართველის ფაზათა რიცხვით  $P$ .  $P$ -ს გაზრდით გარდამქმნელის პირველადი დენის ფორმა უახლოვდება სინუსოიდს, ხოლო ჰარმონიკების რიცხვი, რომელსაც შეიცავს გამართველის დენი, შესაბამისად ქსელის ძაბვაში მცირდება. ასე, მაგალითად, როცა 6 ფაზა გამმართველის სქემა გვაქვს ( $P = 6$ ) ვენტილური გამმართველის დენი შეიცავს 5,7,11,13,17,19,23,25- ... ჰარმონიკებს, ხოლო 12-ფაზიანი სქემა ( $P = 12$ ) შეიცავს 11,13,23,25... ჰარმონიკებს, ე.ი. 6-ფაზიანი სქემიდან გადასვლა 12 ფაზიან სქემაში დაკავშირებულია ქსელის ძაბვაში მაღალი რიგის ჰარმონიკების გაქრობასთან ნომრებით  $\gamma = 6(2k - 1) \pm 1$ . ანგარიში გვიჩვენებს, რომ ამ შემთხვევაში ძაბვის არასინუსოიდურობა მცირდება 1,4-ჯერ. გამმართველის ფაზათა რიცხვის გაზრდა წარმოადგენს ეფექტურ ღონისძიებას ქსელის ძაბვაში და გარდამქმნელის პირველადი დენის მრუდში მაღალი რიგის ჰარმონიკების შემცირება. მეორე მხრივ გამმართველი ტრანსფორმატორი დიდი ფაზათა რიცხვით გამართვით მიიღება რთული, ძვირი და არასაიმედო. ამიტომ მძლავრი ნახევრადგამტრული გამმართველებისათვის გამოიყენება, როგორც წესი არა უმეტეს 12-ფაზიანი გამართვის სქემა.

2. გარდამქმნელების მუშაობის მრავალფაზა ეკვივალენტური რეჟიმი.

გამმართველის ფაზათა რიცხვის გაზრდა შესაძლებელია აგრეთვე ეკვივალენტური მრავალფაზა რეჟიმის შექმნის გზით ვენტილური

გარდამქმნელის ჯგუფისათვის, როცა შენარჩუნებულია თითოეული მათგანისთვის 6 ფაზა რეჟიმი [8]. მაგალითად, 12-ფაზა ეკვივალენტური რეჟიმი ორბოგირიანი გარდამქმნელისთვის, შეიძლება რეალიზებული იქნეს შემდეგი გზით, ანოდური ტრანსფორმატორის ერთ-ერთი გრაგნილი შეერთებულია სამკუთხედად, ხოლო მეორე ვარსკვლავად (ნახ.1.6). ორივე გარდამქმნელის ტრანსფორმატორების პირველად გრაგნილებში მონაწილეობს ჰარმონიკები რიგით  $\gamma = 6k \pm 1$ , ხოლო მკვებავი ქსელში გამოდის მხოლოდ ჰარმონიკები რიგით  $\gamma = 12k \pm 1$ , დანარჩენი დენის ჰარმონიკები ცირკულირებს ტრანსფორმატორების პირველადი გრაგნილებს შორის.



ნახ.1.6. ორბოგირიანი გარდამქმნელის ტრანსფორმატორების დენებში მე-5 ჰარმონიკა.

გარდამქმნელის მუშაობის მრავალფაზა ეკვივალენტური რეჟიმი შეიძლება წარმოიშვას გარდამქმნელის წყვილი ვენტილებისთვის, რომლებიც მუშაობენ დამოუკიდებლად ერთმანეთის მიმართ. მეორე მხრივ თუ ამ შემთხვევაში გარდამქმნელის დატვირთვის გრაფიკი არაიდენტურია და ისინი მუშაობენ სხვადასხვა კომუტაციისა და

მართვის კუთხეებით, მაშინ დენების ჰარმონიკების  $\gamma = 6(2K - 1)$  რიგის სრული ურთიერთკომპენსაცია არ შეინიშნება და ისინი ნაწილობრივ აღწევენ მკვებავი ქსელში, ე.ი. ეფექტურობა მრავალფაზა გარდამქმნელების ეკვივალენტური მუშაობის რეჟიმის მცირდება.

განხილული მეთოდი ელექტრულ ქსელში დენების ჰარმონიკების შემცირების მარტივია და არ მოითხოვს დამატებითი კაპიტალური ხარჯის ჩადებას. ამასთან დაკავშირებით აღნიშნულმა მეთოდმა ნახა ფართო გავრცელება.

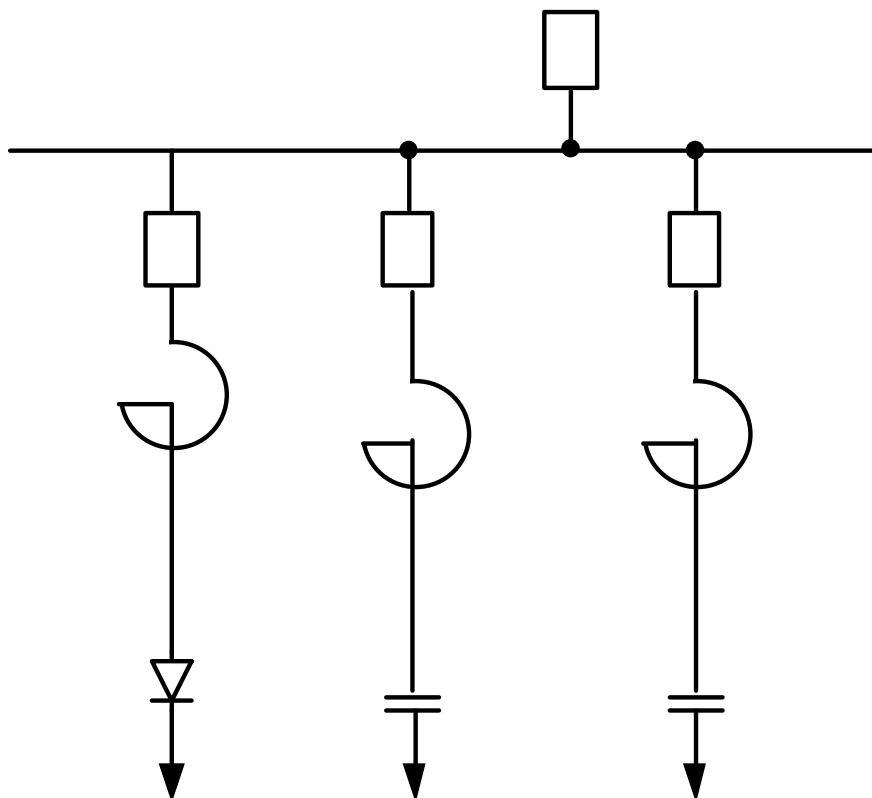
3. მაღალი რიგის ჰარმონიკების ფილტრები. ნახ.1.7 წარმოდგენილია ელექტრულ ქსელში ფილტრის ჩართვის სქემა. ფილტრის რგოლი წარმოადგენს კონტურს მიმდევრობით შეერთებულ ინდუქციურობას და ტევადობას, აწყობილი ჰარმონიკის გარკვეულ სიხშირეზე. განვიხილოდ ფილტრის ერთ-ერთი რგოლის მუშაობა. დენების მაღალი რიგის ჰარმონიკების ფილტრის რგოლი წინაღობა

$$X_{\phi,\gamma} = X_{L,\gamma} - X_{c,\gamma}, \quad (1.25)$$

$$\text{ან } X_{\phi,\gamma} = X_{L,\gamma} - \frac{X_c}{\gamma}, \quad (1.26)$$

სადაც  $X_L, X_c$  - ინდუქციურობის (რეაქტორის) და ტევადობის (კონდენსატორთა ბატარეების) წინაღობა სამრეწველო სიხშირის დენის. სიხშირის გაზრდით რეაქტორის ინდუქციური წინაღობა იზრდება ჰარმონიკების ნომრის პროპორციულად, ხოლო წინაღობა კონდენსატორთა ბატარეების მცირდება ჰარმონიკების ნომრის უკუ პროპორციულად. ერთ-ერთ მათგანი ჰარმონიკის სიხშირეზე რეაქტორის ინდუქციური წინაღობა ფილტრის რგოლის გახდება ტოლი კონდენსატორთა ბატარეების ტევადური წინაღობის და ფილტრის

რგოლის წრედში აღიქვრება ძაბვის რეზონანსი. ამ შემთხვევაში რგოლის წინაღობა  $X_{\phi, \gamma}$  აღნიშნული ჰარმონიკის დენის ხდება ნულის ტოლი და ის აშუნტებს ელექტრულ სისტემას მოცემული ჰარმონიკის სისშირეზე.



ნახ. 1.7. მაღალი რიგის ჰარმონიკების ფილტრის ჩართვის სქემა

რეზონანსური ჰარმონიკის ნომერი  $\gamma_P$  შეიძლება გამოითვალოს გამოსახულებით

$$\gamma_P = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

იდეალური ფილტრი სრულად მოიხმარს ჰარმონიკის დენს  $I_\gamma$ , გენერირებული არაწრფივი ელემენტებით. მეორე მხრივ რეაქტორში და კონდენსატორში აქტიური წინააღობის არსებობის გამო და მათი

არაზუსტი გაწეობა, სრული გაფილტვრა მაღალი რიგის ჰარმონიკების პრაქტიკულად შეუძლებელია. ფილტრი წარმოადგენს რიგ რგოლებს, რომელთა მათგანი აწეობილია რეზონანსზე ჰარმონიკების განსაზღვრისათვის. რგოლების რიცხვი ფილტრში შეიძლება იყოს ნებისმიერი. მაგრამ პრაქტიკაში, როგორც წესი, იყენებენ ფილტრებს, შემდგარი ორი ან ოთხი რგოლებისაგან, აწეობილი 5,7,11,13,23 და 25 ჰარმონიკებზე. ფილტრები მიერთებულია, როგორც მაღალი რიგის ჰარმონიკების წარმოშობის ადგილში, ისე მათი გაძლიერების პუნქტებში (დენების რეზონანსი).

ამავდროულად ფილტრი წარმოადგენს რეაქტიული სიმძლავრის წყაროს და შეიძლება ემსახუროს რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციას. ფილტრების პარამეტრები შეირჩევა ისე, რომ მათი რგოლები იყოს აწეობილი რეზონანსში, ჰარმონიკების სიხშირეზე, დაუშვებელი ელექტრულ სისტემაში, ხოლო მისი ტევადობამ მოახდინოს კომპენსაცია აუცილებელი რეაქტიული სიმძლავრის, ძირითად სიხშირეზე.

## 1.7. ძაბვის არასინუსოიდურობის კონტროლი

ელექტრომომარაგების სისტემაში დენებისა და ძაბვის არასინუსოიდურობის ანალიზისათვის გამოიყენება ორი მეთოდი: ოსცილოგრამების ჰარმონიკული ანალიზი, დაფუძნებული სპეციალური ხელსაწყოების გამოყენებაზე. ოსცილოგრამირება იძლევა სრულ ინფორმაციას სიგნალის სპექტრული შემადგენლობაზე, მეორე

მხრივოსცილოგრამების დამუშავება შრომატევადია და შესაძლებელია კომპიუტერული ტექნიკით. ძაბვისა და დენების არასინუსოიდურობის გამოკვლევა ხელსაწყოებით სარგებლობს უპირატესობით. გამოიყენება ხელსაწყოები მიმდევრობითი და პარალელური ანალიზის, პირველს მიეკუთვნება ჰარმონიკების მზომი, ხოლო მეორეს სპექტრის ანალიზატორი. მაღალი რიგის ჰარმონიკების ეკვივალენტური მომქმედი მნიშვნელობის განსაზღვრისათვის გამოიყენება დამახინჯების არაწრფივი კოეფიციენტის საზომი. ეს ხელსაწყოები მიეკუთვნება რადიოსაზომი ხელსაწყოებს და არ პასუხობს მოთხოვნებს, წამოყენებული საზომი ხელსაწყოებთან ელექტრულ ქსელების.

ელექტრულ ქსელებში გამოიყენება ანალიზატორი ძაბვის მრუდის ფორმის არასინუსოიდურობის განსაზღვრისათვის. ხელსაწყო რეაგირებს და ყველა მაღალი რიგის ჰარმონიკების მომქმედ მნიშვნელობაზე და გააჩნდა ორი ზღვარი ძაბვის მრუდის ფორმის არასინუსოიდურობის განსაზღვრისათვის; 0-10 და 0-50%.

ამჟამად არსებობს ანალიზატორები, რომლებიც განსაზღვრავენ არა მხოლოდ ძაბვის არასინუსოიდურობის კოეფიციენტს, არამედ ძაბვის 2,3,5,7,9,11 და 13 რიგის ჰარმონიკების ამპლიტუდებს. ქვესადგურების დაბალი ძაბვის სალტეებზე, რომლებსაც გააჩნია მაღალი რიგის ჰარმონიკების წყაროები, რეკომენდირებულია ვაწარმოთ პერიოდული და ეპიზოდური კონტროლი მაღალი რიგის ჰარმონიკების. პერიოდული კონტროლი უნდა წარმოებდეს წელიწადში არა ნაკლები ორჯერ. ეპიზოდური კონტროლი ძაბვის არასინუსოიდურობის და ცალკეული ჰარმონიკების დონეების უნდა



გაწარმოთ ახალი ელექტროენერჯის მომხმარებლების ჩართვის დროს,  
რომლებიც წარმოადგენენ მაღალი რიგის ჰარმონიკების წყაროს.

## თავი II. ელექტრული ენერჯის ხარისხის მაჩვენებლების ანგარიში

## 2.1. ძაბვის გადახრის ანგარიში

ძაბვის გადახრის ანგარიშის მეთოდი, ძაბვის რეგულირების საშუალების და ხერხის არჩევა, აგრეთვე მათი პარამეტრების დეტალურად განხილულია ლიტერატურაში. ამიტომ აქ შევიზღუდებით მოკლე გადმოცემით ანგარიშის მეთოდით რადიალური ქსელისთვის, ვინაიდან ხშირ შემთხვევაში ელექტრომომარაგების სისტემა სრულდება რადიალური. ქსელის ნებისმიერ წერტილში ძაბვის გარდა  $\Delta U_2$ , ათვლილი კვების წყაროს სალტიდან,  $t$  დროის ფიქსირებული მომენტისთვის განისაზღვრება ფორმულით

$$\Delta U_2 = \sum_{K=1}^m (\Delta U_{\alpha})k - \sum_{K=1}^n (\Delta U_{\beta})k \quad (2.1)$$

(2.1) გამოსახულების პირველი წევრი მარჯვენა ნაწილის წარმოადგენს ალგებრულ ჯამს ძაბვის „დანამატის“, რომლებიც წარმოიშობა კვების ცენტრში, დამადაბლებელი ტრანსფორმატორით, აგრეთვე სხვადასხვა საშუალებებით ძაბვის რეგულირების, რომლებსაც ადგილი აქვს ქსელში. მეორე წევრი განსაზღვრავს განსახილველ უბანზე ძაბვის დანაკარგების ჯამს. ქსელის უბანზე ძაბვის დანაკარგი წინააღობებით  $r_6$ , ომი;  $X_6$ , ომი, რომლის მიხედვით გადაიცემა აქტიური  $P$ , კვტ, და რეაქტიული  $Q$ , კვარ, სიმძლავრე, განისაზღვრება ცნობილი ფორმულით, %:

$$\Delta U = \frac{Pr+Qx}{10U_6^2} \quad (2.2)$$

თუ მოცემულია ხაზის სიგრძე  $l$ , კმ, მაშინ წინააღობის დროს ერთეულ სიგრძეზე  $r_0$  და  $X_0$  მიიღება გამოსახულება, %:

$$\Delta U = \frac{1}{10U_6^2} (r_0 + X_0 \operatorname{tg} \varphi) P \ell,$$

სადაც  $U_6$  - ქსელის ნომინალური ძაბვა;

$$\operatorname{tg} \ell = \frac{Q}{P}$$

ანგარიშის შესრულება მოხერხებულია, გამოვიყენოთ ძაბვის გადახრის მრუდეები  $\Delta U, \% = f(Z_6/Z_6; k_{r6}; \cos \varphi_6)$ , რომლებიც აიგება განტოლების მიხედვით

$$\Delta U = \frac{Z_b}{Z_{\text{ფ}}} \cos x \left( \sin \varphi + \frac{r_b}{X_b} \cos \varphi \right), \quad (2.3)$$

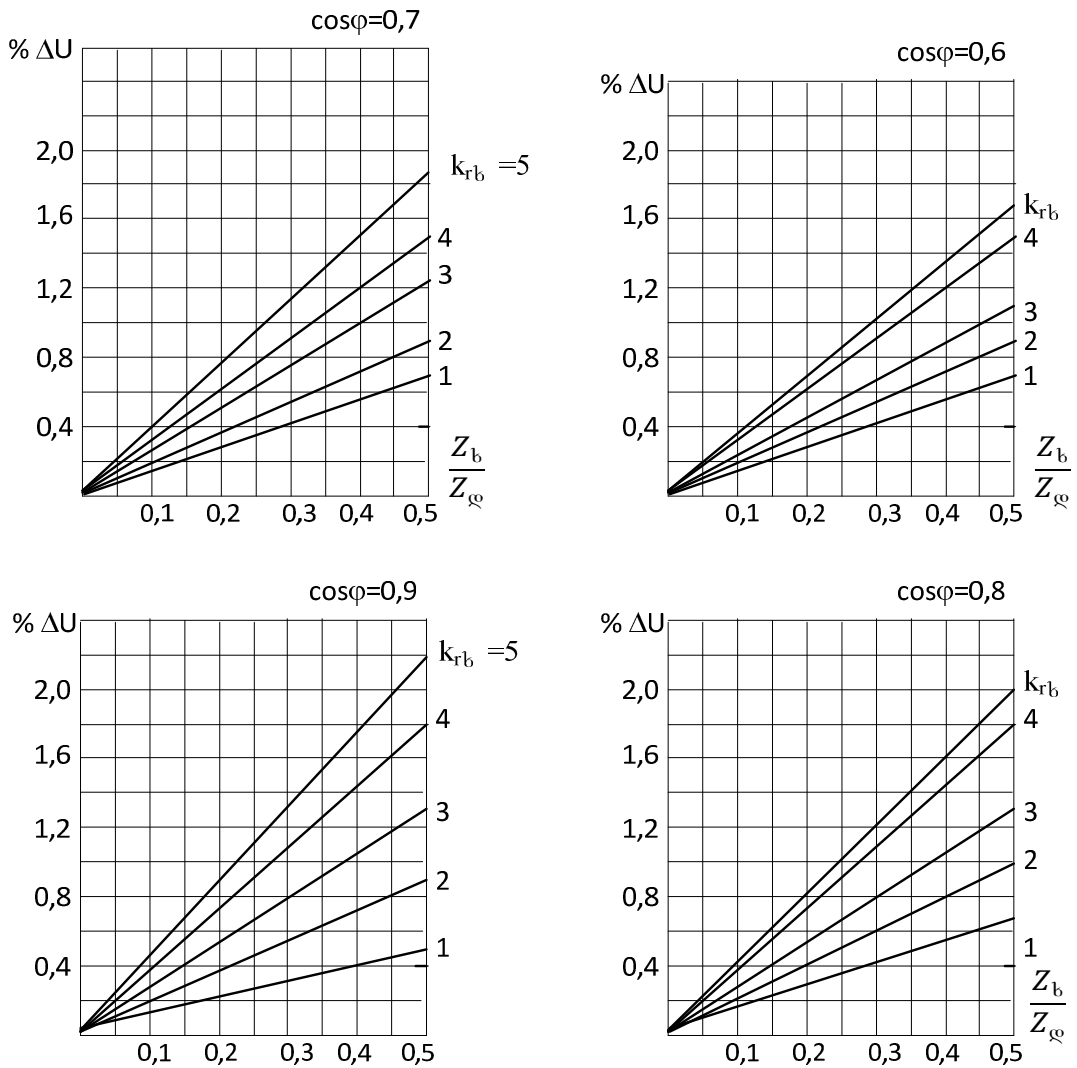
მიიღება (2.2)-დან.

(2.3) გამოსახულებაში აღნიშნულია:  $Z_b$  და  $Z_{\text{ფ}}$  - სრული წინაღობა ხაზის და დატვირთვის, განსაზღვრული როგორც

$$Z_{\text{ფ}} = \frac{U_{\text{ფ}}^2}{S_{\text{ფ}}}; \quad Z_b = \sqrt{r_b^2 + X_b^2}; \quad x = \operatorname{arctg} \frac{r_b}{X_b};$$

$$k_{r_b} = \frac{r_b}{X_b}$$

როცა  $r_b/X_b \leq 0,4$  შეიძლება მივიღოთ  $\cos x \approx 1$ . შესაბამისი მრუდეები წარმოდგენილია ნახ. 2.1 თუ ქსელში გვაქვს ძაბვის რეგულირების საშუალება და  $U \neq U_{\text{ფ}}$ , მაშინ ძაბვის დანაკარგები გამოითვლება  $(U/U_{\text{ფ}})^2$ -ის პროპორციულად.



ნახ. 2.1. ძაბვის გადახრასა და  $Z_b/Z_\Sigma$  ფარდობას შორის დამოკიდებულების მრუდეები

## 2.2. ძაბვის რხევების ანგარიში

ძაბვის რხევის ანგარიში, როცა იხილება დარტყმის დატვირთვა მიმდინარეობს დაშვებით, რომ დენის ზრდა, აგრეთვე აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის მიმდინარეობს მუდმივი სიხარით, ე.ი. წრფივი კანონით. მოყვანილი დაშვება იძლევა საშუალებას ძაბვის რხევის

ანგარიშისთვის გამოვიყენოთ გამოსახულებები, მიღებული ქსელში დამყარებული ძაბვის დანაკარგების მნიშვნელობების შეფასებისთვის:

$$\delta U = \frac{r\Delta I \cos\varphi + X\Delta I \sin\varphi}{U}; \quad (2.4)$$

$$\delta U = \frac{\Delta P r + \Delta Q X}{U}; \quad (2.5)$$

სადაც  $\Delta I, \Delta P, \Delta Q$  - დენის, აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის რხევა, განსაზღვრული როგორც სხვაობა მაქსიმალური მნიშვნელობებსა დატვირთვის ალების დროს და წინა რეჟიმის მნიშვნელობებს შორის;  $r$  და  $x$  - ქსელის აქტიური და რეაქტიული წინაღობა;  $U$  - დარტყმის დატვირთვის დროს სალტეზე, ხვეულებრივ მიიღება ტოლი ნომინალური მნიშვნელობის.

ვინაიდან 6 კვ და მეტი ძაბვის ქსელებისათვის (2.4) და (2.5) გამოსახულებების მრიცხველების პირველი მდგენელები ნაკლებია, მეორე მდგენელზე, ძაბვის რხევების ანგარიშებში გამოიყენება გამოსახულება

$$\delta U, \% = 100 \frac{\Delta Q_x}{U^2}$$

ან უფრო მოხერხებულია

$$\delta U, \% = 100 \frac{\Delta Q}{S_k}, \quad (2.6)$$

სადაც  $S_k$  - დარტყმის დატვირთვის მოდების წერტილში მოკლე შერთვის სიმძლავრე.

თუ მოკლე შერთვის სიმძლავრე მოცემულია ტრანსფორმატორის მაღალი ძაბვის მხარეზე  $S_{k.B}$ , რომელიც კვებავს ქვესადგურს უეცრადცვალებადი დატვირთვით, მაშინ ძაბვის რხევების მნიშვნელობა

მაღალი ძაბვის მხარეზე  $\Delta U_B, \%$ , და დაბალი ძაბვის მხარეზე  $\Delta U_H, \%$ , ტრანსფორმატორის ძაბვები განისაზღვრება გამოსახულებებით:

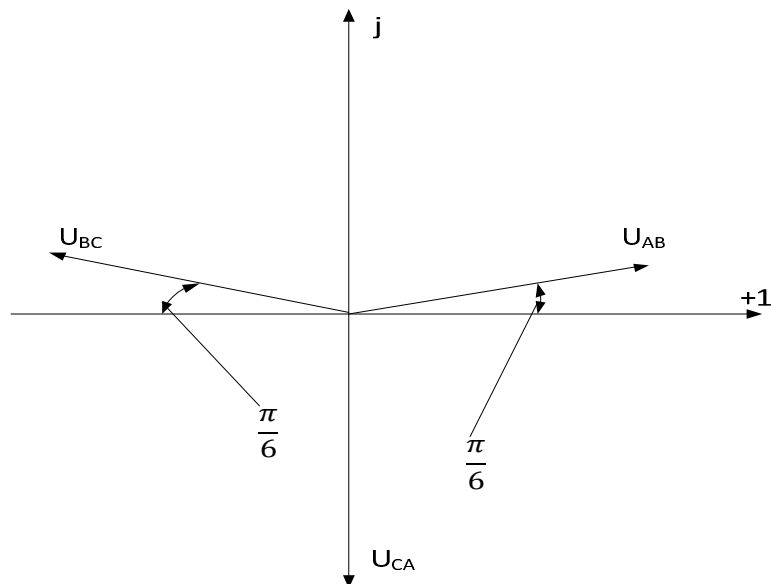
$$\delta U_B, \% = 100 \frac{\Delta Q}{S_{k.B}}, \quad (2.7)$$

$$\delta U_H, \% = 100 \frac{\Delta Q}{S_{k.B}} \left( 1 + \frac{S_{k.B.}}{S_{T.H}} \ell_{k*} \right), \quad (2.8)$$

სადაც  $S_{T.H}$  - ტრანსფორმატორის ნომინალური სიმძლავრე;  $\ell_{k*}$  - ტრანსფორმატორის მოკლე შერთვის ემძ-ის ფარდობითი მნიშვნელობა.

### 2.3. ძაბვის არასიმეტრიულობის ანგარიში

არასიმეტრიულობის კოეფიციენტის და უკუმიმდევრობის ძაბვის ანგარიშის დროს ერთფაზა დატვირთვები გათვალისწინებულია, ჩანაცვლების სქემაში უკუ მიმდევრობის დენების შეყვანით. აღნიშნული დენების განსაზღვრისათვის უშვებთ, რომ გამორთული არასრულფაზურ დატვირთვაზე ხაზური ძაბვების ვექტორები განლაგებულია კომპლექსურ სიბრტყეზე ისე, როგორც ნაჩვენებია ნახ. 2.2.



ნახ. 2.2. ხაზური ძაბვების ვექტორული დიაგრამა ერთფაზა დატვირთვის გამორთვის დროს

$$\bar{U}_{ab} = U_{ab} e^{j\frac{\pi}{6}}, \quad \bar{U}_{bc} = -jU_{bc}; \quad \bar{U}_{ca} = U_{ca} e^{j\frac{5\pi}{6}}$$

მივიღებთ აგრეთვე, რომ არასრულფაზურ დატვირთვის ჩართვის შემდეგ ვექტორების სისტემა ნახ. 2.2 არ განიცდის ცვლილებას. დატვირთვის ჩართვის დროს ხაზურ ძაბვებზე  $\bar{U}_{ab}$  და  $\bar{U}_{bc}$

$$\bar{I}_{ab} = I_{ab} e^{j(\frac{\pi}{6} - \varphi)}; \bar{I}_{bc} = -j I_{bc} e^{-j\varphi}$$

სადაც  $\varphi$  - დატვირთვის ფაზური კუთხე.

აღნიშნული დატვირთვის მიერ მოთხოვნილი უკუ მიმდევრობის დენი

$$\bar{I}_2 = \frac{\sqrt{3}}{6} \sqrt{(\sqrt{3}I_{ab})^2 + (I_{ab} - 2I_{bc})^2} e^{j(\arctg \frac{\sqrt{3}I_{ab}}{I_{ab} - 2I_{bc}} - \varphi)} \quad (2.9)$$

დატვირთვის სიმძლავრის მიხედვით, შეიძლება ჩავწეროთ:

$$\bar{I}_2 = \frac{\sqrt{3}}{6U_H} \sqrt{3S_{ab}^2 + (S_{ab} - 2S_{bc})^2} e^{j(\arctg \frac{\sqrt{3}S_{ab}}{S_{ab} - 2S_{bc}} - \varphi)} \quad (2.10)$$

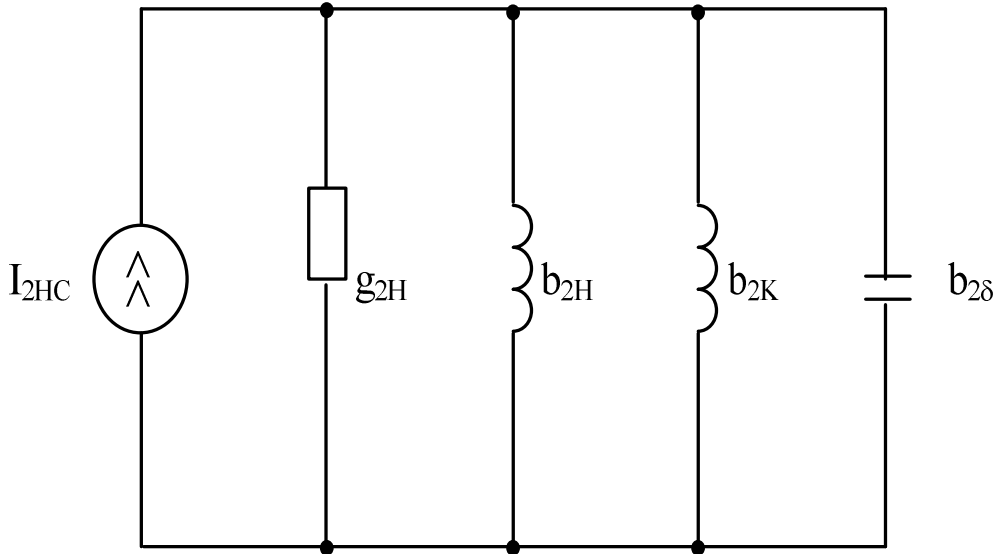
ერთფაზა დატვირთვისათვის გვექნება

$$\bar{I}_2 = \frac{\sqrt{3}}{3} I_{ab} e^{j\frac{\pi}{3}} = \frac{\sqrt{3} S_{ab}}{3 U_H} e^{j(\frac{\pi}{3} - \varphi)} \quad (2.11)$$

ვენტილური გარდამქმნელების კვების დროს ქსელიდან არასიმეტრიული ძაბვებით, გარდამქმნელების ქსელის დენებში გამოვლინდება სამრეწველო სიხშირის უკუ მიმდევრობის მდგენელები, აგრეთვე ჰარმონიკები არაკანონიკური რიგით, მათ შორის - სამის ჯერადი. აღნიშნულ რეჟიმში დენები ყველა მაღალი რიგის ჰარმონიკებით წარმოქმნიან სისტემებს პირდაპირი და უკუ მიმდევრობის. არასიმეტრიულობის კოეფიციენტის დროს, როცა არ აჭარბებს 5%, კანონიკური ჰარმონიკების ცვლილება შეიძლება მხედველობაში არ მივიღოთ, ჰარმონიკები, სამის ჯერადი, აგრეთვე არაა დიდი (არა უმეტეს 2% სამრეწველო სიხშირის დენის). ამიტომ

პრაქტიკულად მიღებულია მივიღოთ მხოლოდ სამრეწველო სისწირის უკუმიმდევრობის დენებით.

ეხლა განვიხილოთ არასიმეტრიულობის კოეფიციენტის და უკუ მიმდევრობის ძაბვის განსაზღვრა. ქსელის ჩანაცვლების სქემა უკუ მიმდევრობის ძაბვის  $\bar{U}_2$  განსაზღვრისათვის მოცემულია ნახ. 2.3.



ნახ. 2.3. ქსელის ჩანაცვლების სქემა უკუ მიმდევრობის ძაბვის განსაზღვრისათვის.

სქემაზე აღნიშნულია:  $I_{2HC}$ -არასიმეტრიული დატვირთვის უკუმიმდევრობის დენი;  $b_{2K}$  და  $b_{2\delta}$  - ქსელის  $S_K$  სიმძლავრის მოკლე შერთვის და სამფაზა კონდენსატორთა ბატარეების  $Q_\delta$  გამტარობა. (თუ ქსელში გვაქვს კონდენსატორთა ბატარეა);  $b_{2H}$  და  $g_{2H}$  - ქვესადგურის დანარჩენი დატვირთვის გამტარობა, განხილული, როგორც განზოგადოებული;

გამოსახულებას აქტიური და რეაქტიული გამტარობებისათვის აქვს შემდეგი სახე:

$$b_{2K} = \frac{S_K}{U_H^2}; \quad b_{2\delta} = \frac{Q_\delta}{U_H^2}; \quad b_{2H} = \frac{2,67S_H}{U_H^2}; \quad g_{2H} = \frac{2S_H}{U_H^2}$$

ქსელის უკუ მიმდევრობის სრული წინაღობის  $H$  კომპლექსი წარმოგვიდგება შემდეგი გამოსახულებით:

$$Z_{2\Sigma} = \frac{U_H^2}{\sqrt{4S_H^2 + (S_K + 2,67S_H - Q_\delta)^2}} e^{j\psi_{2\Sigma}}; \quad (2.12)$$



$$\psi_{2\Sigma} = \arctg \frac{1+2,67K_H-K_\delta}{2K_H} \quad (2.13)$$

სადაც

$$K_H = \frac{S_H}{S_K}; \quad k_\delta = \frac{Q_\delta}{S_K} \quad (2.14)$$

იმასთან დაკავშირებით, რომ ვენტილური გარდამქმნელი ხასიათდება არახაზოვნებით უკუ მიმდევრობის დაბვა განისაზღვრება მიმდევრობითი მიახლოების მეთოდით. პირველსაწყისში ვარაუდობთ, რომ გარდამქმნელის უკუ მიმდევრობის დენი განისაზღვრება მხოლოდ უკუ მიმდევრობის დაბვით, განპირობებული არასიმეტრიული დატვირთვით. შემდეგ ვპოულობთ უკუ მიმდევრობის დაბვას გარდამქმნელის დენის გათვალისწინებით. შესაბამის ფორმულებს გააჩნია შემდეგი სახე:

მართვადი გარდამქმნელისთვის

$$U_2 = Z_{2\Sigma} I_{2H} \sqrt{1 + \beta_o^2 + 2\beta_o \sin(\alpha - \gamma_o)} e^{j\psi_{2\Sigma}}, \quad (2.15)$$

სადაც  $\beta_o = \frac{I_2}{I_{2H}}; \quad \gamma_o = \arcsin \frac{\beta_o \cos \alpha}{\sqrt{1 + \beta_o^2 - 2\beta_o \sin \alpha}}$

არამართვადი გარდამქმნელისთვის

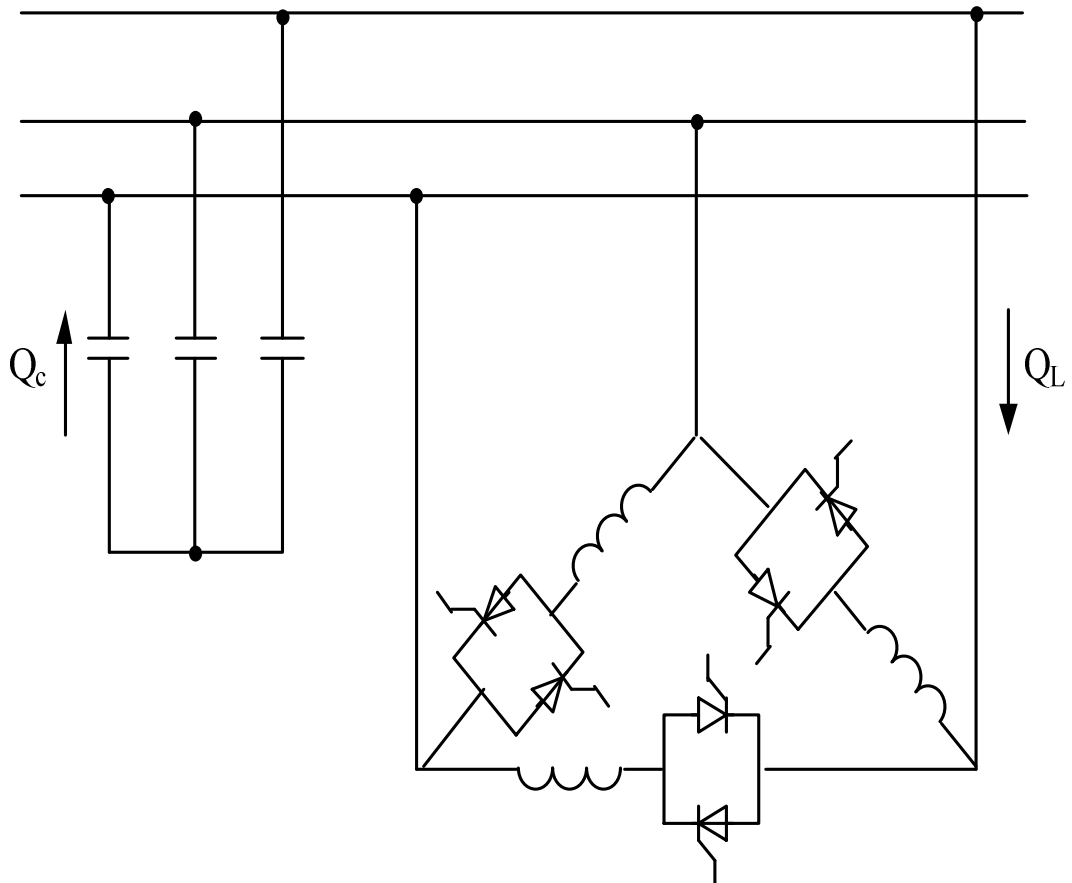
$$U_2 = Z_{2\Sigma} I_{2H} \sqrt{1 - \beta_o^2} \quad (2.16)$$

$\beta_o \leq 0,4$ ; ამ შემთხვევაში არამართვადი გარდამქმნელი განაპირობებს დაბვის არასიმეტრიის უმნიშვნელო დადაბლებას. პირველი მიახლოებით არამართვადი გარდამქმნელის უკუ მიმდევრობის დენები შეიძლება მხედველობაში არ მივიდეთ. მართვადი გარდამქმნელი ზრდის არასიმეტრიას (8-10)% -მდე.

## 2.4. ელექტროენერჯის ხარისხის გაუმჯობესების მეთოდები და საშუალებები

ელექტროენერჯის მაღალი ხარისხის უზრუნველყოფა წარმოადგენს მნიშვნელოვან ამოცანას, რომლის გადაწყვეტა საშუალებას მოგვცემს შევქმნად ელექტრომომარაგების ოპტიმალური სისტემა. ძირითადი ღონისძიება, დაბვის გადახრის შემცირებისა, წარმოადგენს რაციონალური კომპენსაცია რეაქტიული სიმძლავრის

ქსელის ძაბვის და გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრის მდოვრე რეგულირებისათვის ბოლო წლებში ფართოდ გამოიყენება სტატიკური მაკომპენსირებელი მოწყობილობა, რომელიც შეიცავს კონდენსატორთა ბატარეებს ინდუქციურ ვენტილური მარეგულირებელი რგოლით ნახ. 2.4.



ნახ.2.4. სტატიკური მაკომპენსირებელი მოწყობილობა ინდუქციურობის რეგულირებით

რეაქტიული სიმძლავრე  $Q$ , გაცემული ასეთი მოწყობილობით ქსელში, რეგულირდება ინდუქციურობის რეაქტიული სიმძლავრით  $Q_L$  [9].

$$Q = Q_c - Q_L$$

რეაქტიული სიმძლავრე, მოთხოვნილი ინდუქციურობით, იცვლება ვენტილების რეგულირების კუთხის სიდიდის ცვლილებით. მისი მაქსიმალური სიმძლავრე იქნება ვენტილების სრული გაღების დროს, ხოლო მინიმალური კი ვენტილების სრული დაკეცვის დროს.

კონდენსატორთა ბატარეების და ინდუქციურობების სიმძლავრეების  
თანაფარდობა შეირჩევა თითოეულ კონკრეტულ შემთხვევაში.

## თავი III. ელექტრული ენერჯის ხარისხი ელექტრულ სისტემაში

### 3.1. ელექტროენერჯის ხარისხის ამაღლების აქტუალური საკითხები[12]

ელექტროსისტემის რეჟიმების და მისი ცალკეული ელემენტების საიმედოობა, ჯერ კიდევ არ ნიშნავს, რომ ეს რეჟიმი მისაღებია ელექტროენერჯის ყველა მომხმარებლისათვის. მნიშვნელოვან ფაქტორს წარმოადგენს ელექტროენერჯის ხარისხი. ის განისაზღვრება რეჟიმის პარამეტრების მნიშვნელობით, რომლითაც ხასიათდება სისტემის საკვანძო წერტილების მდგომარეობა. ამ პარამეტრების რიცხვში, რომლებიც წარმოადგენენ რეჟიმის ხარისხის მაჩვენებლებს, ძირითადად შედის სიხშირე და ძაბვა.

ელექტროენერჯის ხარისხის უზრუნველყოფა დაკავშირებულია შემდეგი საკითხებთან:

- რეჟიმის ხარისხის მაჩვენებლების დასაშვები მნიშვნელობების დადგენა;

- ხარისხის მაჩვენებლების რეგულირების სისტემის არჩევა, დასაშვები მნიშვნელობის არეში, მათი შენარჩუნების მიზნით;

- ხარისხის მაჩვენებლების ავტომატური რეგულირება.

პირველი საკითხი წყდება ტექნიკურ-ეკონომიკური გამოკვლევებით.

მარეგულირებელი პარამეტრის ოპტიმალური მნიშვნელობა, ამა თუ იმ კონკრეტულ პირობებში, შეიძლება შეიცვალოს. მეორე მხრივ, უმრავლეს შემთხვევაში ამას არ ითვალისწინებენ და ოპტიმალურ მნიშვნელობად დებულობენ მოცემული პარამეტრის ნომინალურ მნიშვნელობას. სიხშირის ოპტიმალური და ნომინალური მნიშვნელობა შეიძლება ჩაითვალოს იდენტურად. ელექტრული ქსელის ოპტიმალური ძაბვა, შეიძლება განსხვავდებოდეს მის ნომინალური მნიშვნელობიდან. მეორე მხრივ ძაბვის ოპტიმალური მნიშვნელობის დადგენა გართულებულია და პრაქტიკულად გვიხდება ჩავთვალოდ, რომ ძაბვის ოპტიმალური მნიშვნელობა დგინდება დასაშვები ტექნიკური

მოსაზრების მიხედვით. პარამეტრის ნომინალური ან ოპტიმალური მნიშვნელობიდან, დასაშვები გადახრის ზონის დიაპაზონის დადგენის დროს, გამოდიან უპირველეს ყოვლისა ტექნიკური მოსაზრებიდან, რომ ელექტროენერგიის ყველა მომხმარებელმა მარეგულირებელი პარამეტრების კრიტიკული მნიშვნელობის დროს, უნდა შეასრულოს თავისი ტექნიკური ფუნქციები. გარდა ამისა, პარამეტრების გადახრამ არ უნდა გამოიწვიოს არსებითად დანაკარგების გაზრდა. ელექტროენერგიის ხარისხის მაჩვენებლები რეგულირდება სახელმწიფო სტანდარტის ГОСТ13109-67 შესაბამისად.

რეგულირების სისტემის არჩევა, ძირითადად დამოკიდებულია ელექტროსადგურის ან მარეგულირებელი აგრეგატების სიმძლავრის და რიცხვის არჩევასთან, სხვადასხვა პირობებში მათი კონკრეტული დანიშნულების პრინციპების დადგენასთან და მარეგულირებელ აგრეგატებს შორის დატვირთვის განაწილების მეთოდების დადგენასთან, რეგულირებისათვის აუცილებელი რეზერვის შექმნის მიზნით

სარეზერვო სიმძლავრედ შეიძლება მომავალში განხილული იქნეს ახალი თაობის ელექტროენერგიის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის (ეზგიმ) გამოყენების პერსპექტივა [10]. ეზგიმ-ს გააჩნია უნარი შეასრულოს შემდეგი ფუნქციები: სტატიკური და დინამიკური მდგრადობის გაუმჯობესება, პიკური დატვირთვების დაფარვა, სისტემის გარკვეულ წერტილებში დაბვის შენარჩუნება, სისტემაში აქტიური სიმძლავრის ბალანსის დარღვევის დროს სისშირის აღდგენის უზრუნველყოფა. ეზგიმ-ს შეუძლია გენერაცია, როგორც აქტიური სიმძლავრისა, მდგრადი მუშაობის უზრუნველყოფისათვის, ისე რეაქტიული სიმძლავრის, სისტემის დაბვის სტაბილიზაციისათვის.

მარეგულირებელი აგრეგატების რიცხვის და რეზერვის სიმძლავრის არჩევის დროს, უნდა იქნეს გათვალისწინებული მომხმარებლების დატვირთვის ცვლილების სიჩქარე, რომელიც განსაზღვრავს მარეგულირებელი პარამეტრის ცვლილების სიჩქარეს [11], თუ სისტემის ჯამური აქტიური დატვირთვის ცვლილების სიჩქარე განსაზღვრავს სისშირის ცვლილების სიჩქარეს, სისტემის რეაქტიული

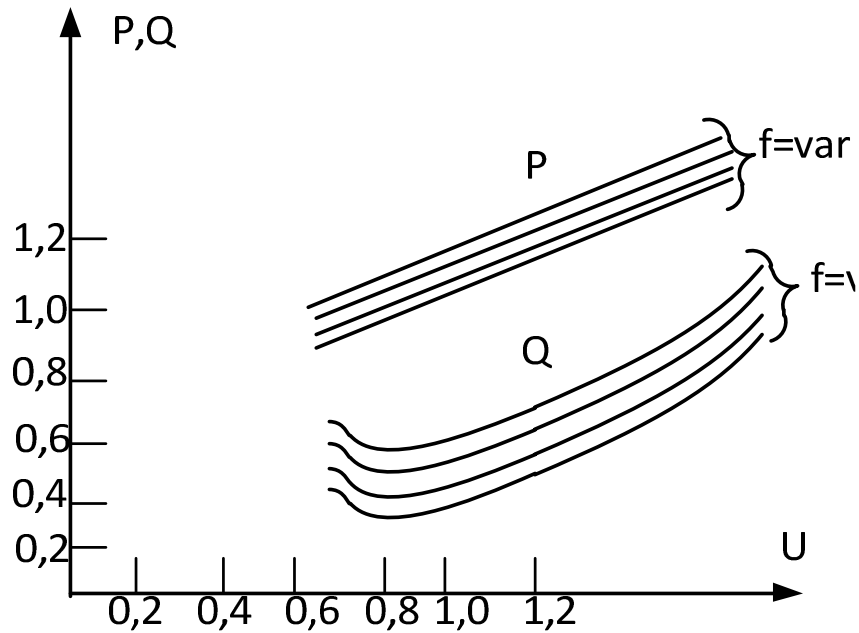
დატვირთვის ცვლილების სიჩქარე განსაზღვრავს სისტემაში ძაბვის საერთო დონის ცვლილების სიჩქარეს. აღნიშნული ამოცანის გადაწყვეტა მჭიდროდ არის დაკავშირებული ელექტროსისტემის მაქსიმალური ეკონომიურ რეჟიმებთან. ელექტროსისტემის ხარისხის მაჩვენებლების რეგულირების ავტომატიზაცია იძენს აქტუალურ მნიშვნელობას. ენერგობიექტებში ავტომატიზირებული მართვის პროცესების დანერგვა, როგორც ცნობილია ამცირებს მომსახურე პერსონალის რაოდენობას და აუმჯობესებს აგრეგატების რეჟიმების რეგულირების ხარისხს. სისტემის საკვანძო წერტილებში რეჟიმების პარამეტრების მაღალი ხარისხის შენარჩუნება შეიძლება გადაწყდეს მხოლოდ ავტომატური მოწყობილობის გამოყენებით. ენერჯის მომხმარებლებისათვის დიდი მნიშვნელობა აქვს ელექტრულ სისტემაში სიხშირისა და ძაბვის რეგულირებას.

ელექტროენერჯის თითოეული მომხმარებელი მოიხმარს აქტიურ და რეაქტიულ სიმძლავრეს, რომლის სიდიდე განისაზღვრება ძაბვისა და სიხშირის სიდიდით.

დატვირთვის სტატიკური მახასიათებლები საკვანძო წერტილში წარმოადგენს დატვირთვის აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის დამოკიდებულებას ძაბვისაგან მოცემულ სიხშირეზე. სიხშირის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის შეიძლება აიგოს მახასიათებლების ოჯახი ფარდობით ერთეულებში (ნახ.3.1).

$$P_{\text{ღ}} = \phi(U, f); Q_{\text{ღ}} = \varphi(U, f)$$

დატვირთვის მოცემულ საკვანძო წერტილში ძაბვისა და სიხშირის მნიშვნელობის უზრუნველყოფა, შეიძლება მხოლოდ ელექტროსისტემიდან, სავსებით განსაზღვრული აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების სიდიდის მიწოდებით.



ნახ.3.1. დატვირთვის აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის დამოკიდებულება ძაბვაზე.

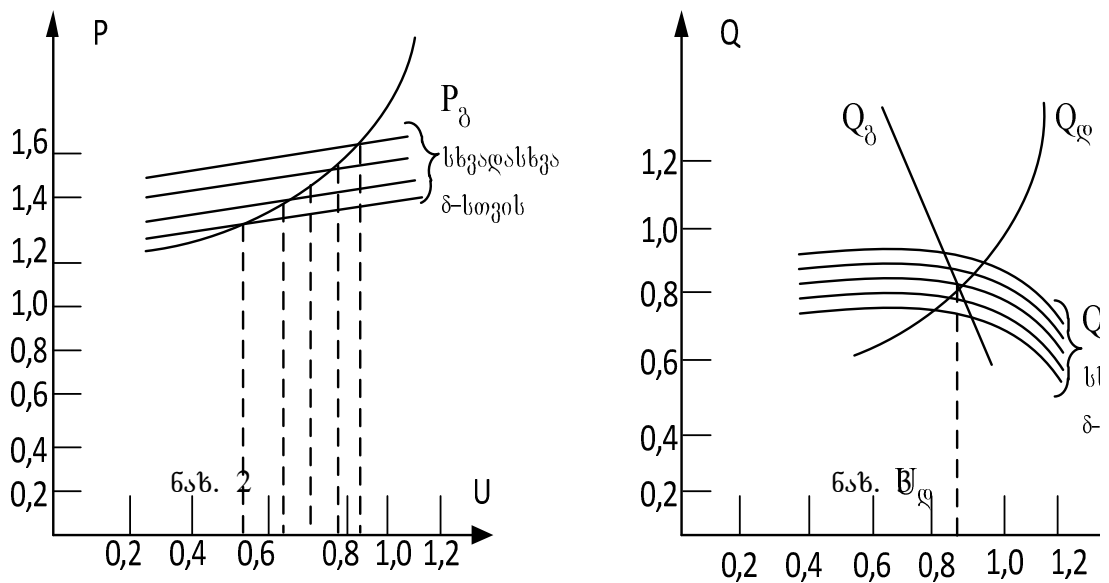
აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების ნაკადების სიდიდე, მიწოდებული საკვანძო წერტილში, დამოკიდებულია, როგორც საკვანძო წერტილში ძაბვის ვექტორის სიდიდესა და ფაზაზე, ისე შერეული საკვანძო წერტილებში ძაბვების ვექტორების სიდიდეზე და ფაზაზე და ქსელის შერეული უბნების წინააღმდეგობაზე.

დაუშვათ, რომ ძაბვა უახლოეს საკვანძო წერტილებში უცვლელია სიდიდით, ფაზით და გააჩნია ერთნაირი სისშირე  $f$ . ჯამური აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების ( $P_{\delta}, Q_{\delta}$ ) ნაკადები მოცემულ საკვანძო წერტილში, წარმოადგენენ ფუნქციას ძაბვის სიდიდისა და ფაზის და ტოლია დატვირთვის აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების ( $P_{\omega}, Q_{\omega}$ ).

$$P_{\delta}(U, \delta) = P_{\omega}(U); Q_{\delta}(U, \delta) = Q_{\omega}(U);$$

მოცემული ორი განტოლება ორი უცნობით საშუალებას იძლევა განვსაზღვროთ  $U$  და  $\delta$ . ვაჩვენოთ გრაფიკულად, როგორ ამოიხსნება ამოცანა. მოვათავსოთ ერთ დიაგრამაზე ფარდობით ერთეულებში (ნახ.3.2) მახასიათებლები  $P_{\omega} = \phi_1(U)$  (მოცემულ  $f$  მნიშვნელობაზე) და მახასიათებლების ოჯახი  $P_{\delta} = \psi_1(U, \delta)$  (მოცემულ  $f$  მნიშვნელობაზე)  $\delta$ -ს სხვადასხვა მნიშვნელობისთვის.

რადგან  $P_g = P_{\text{ლ}}$ , მაშინ მოცემული დიაგრამიდან წერტილების გადაკვეთის მიხედვით შეიძლება განისაზღვროს  $\delta$  კუთხის დამოკიდებულება ძაბვისაგან  $\delta = \phi(U)$ , რომელიც შეესაბამება აქტიური სიმძლავრის ბალანსს საკვანძო წერტილში. მოვათავსოთ ერთ დიაგრამაზე  $Q_{\text{ლ}} = \phi_2(U)$  და  $Q_g = \psi_2(U, \delta)$  მახასიათებლები  $\delta$ -ს სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის (ნახ.3.3), ვიპოვიოთ  $U$ -ს და  $\delta$  კუთხის თითოეული მნიშვნელობისათვის



ნახ. 3.2. მახასიათებლები  $P_{\text{ლ}} = \phi_1(U)$ ,  $P_g = \psi_1(U, \delta)$ . ნახ. 3.3. მახასიათებლები

$$Q_{\text{ლ}} = \phi_2(U), Q_g = \psi_2(U, \delta).$$

დამოკიდებულებას  $Q_g$  სიდიდეზე. აღნიშნული წერტილების შეერთებით მივიღებთ მახასიათებელს  $Q_g = \phi(U)$ , რომელიც შეესაბამება აქტიური სიმძლავრის ბალანსს.  $Q_{\text{ლ}} = \phi_2(U)$  და  $Q_g = \phi(U)$  მახასიათებლების გადაკვეთის წერტილი განსაზღვრავს ფაქტიურ  $U_{\text{ლ}}$  ძაბვას (ნახ.3.3).

განხილული საკითხები ეხება შემთხვევას, როცა საკვანძო წერტილებში ძაბვის სიდიდე, ფაზა და სიხშირე უცვლელია. რეალურ შემთხვევაში ძაბვის ასეთი უცვლელობა არ არსებობს და ძაბვა საკვანძო წერტილებში შეიძლება შეიცვალოს თავისი სიდიდით, ფაზით და სიხშირით. გენერატორის ტურბინა ანვითარებს სიმძლავრეს, რომელიც დამოკიდებულია ქსელის სიხშირეზე და შესაბამისად



გენერატორის ლილვზე აქტიური ელექტრომაგნიტური სიმძლავრეც დამოკიდებულია სიხშირეზე.

$$P_g = \phi(f)$$

გენერატორის აგზნების დენის მუდმივობის დროს უცვლელი რჩება გენერატორის  $E$  ემძ-ის სიდიდე, ხოლო ძაბვის რეგულატორების არსებობის შემთხვევაში, თითქმის უცვლელი იქნება ძაბვის მნიშვნელობა გენერატორის სალტებზე. ყველა გენერატორების აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების ჯამი უნდა იყოს ტოლი ყველა საკვანძო წერტილებში დატვირთვის აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების და ქსელის ყველა ელემენტებში აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების დანაკარგების ჯამის. შესაბამისად, სიხშირე მთლიან სისტემაში და ძაბვის სიდიდე და ფაზა ყველა საკვანძო წერტილებში უნდა იყოს ისეთი, რომ ბალანსი იქნეს განხორციელებული. დაუშვათ სისტემაში დამყარდა გარკვეული რეჟიმი, შეიცვალა ერთი გენერატორის ტურბინის სიმძლავრე, აღნიშნულ შემთხვევაში როტორის ძვრის  $\delta$  კუთხე შეიცვლება. მთელ სისტემაში განხორციელდება სიხშირის ცვლილება, აგრეთვე შეიცვლება ძაბვის სიდიდე და ფაზა ყველა საკვანძო წერტილებში. გენერატორის სიმძლავრის ცვლილება იქნება განხორციელებული ბალანსის აღდგენამდე. ერთი გენერატორის აქტიური სიმძლავრის შემცირების დროს სიხშირე და ძაბვა ქსელში არ შეიძლება დარჩეს წინა რეჟიმის, რადგან ამ შემთხვევაში არ იყო ბალანსი აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების.

ტურბინაში ენერგიაშემცველის შეშვების შემცირება, გამოიწვევს მოცემული გენერატორის როტორის კუთხის ძვრას სხვასთან შეფარდებით, სხვა გენერატორების აქტიური დატვირთვა გაიზრდება. გაჩნდება უბალანსობა აღნიშნული გენერატორების და დაიწყება მათი დამუხრუჭება. ამასთან დაკავშირებით გენერატორი, რომლის ტურბინას შეუმცირდა ენერგიაშემცველის შეშვება, აგრეთვე უნდა დაიწყოს დამუხრუჭება, რადგან დანარჩენი გენერატორების კუთხეების შემცირების დროს მან უნდა მიიღოს დამატებითი ელექტრომაგნიტური დატვირთვა. ყველა გენერატორების დამუხრუჭება გამოიწვევს

სისტემაში საერთო სიხშირის შემცირებას. მის შემცირებასთან ერთად შემცირდება საკვანძო წერტილში დატვირთვის აქტიური სიმძლავრე მათი სტატიკური მახასიათებლების შესაბამისად და გაიზრდება სიმძლავრე ყველა გენერატორების ტურბინის სიჩქარის რეგულატორების სტატიკური მახასიათებლების შესაბამისად. ორივე ეს ფაქტორი მიგვიყვანს იქამდე, რომ სიხშირის დიდი შემცირების დროს თავიდან აღსდგება ბალანსი გენერატორის ლილვზე. ტურბინის სიმძლავრე იქნება ბალანსირებული გენერატორის სიმძლავრით. სიხშირის შემდგომი შემცირება შეწყდება. აუცილებელია გავითვალისწინოთ, რომ სიხშირის შემცირება იწვევს ყველა გენერატორების ე.მ.ძ-ის ცვლილებას, რეაქტიული წინაღობების და შესაბამისად ქსელის ყველა ძაბვების ცვლილებას, რაც თავის მხრივ, მიგვიყვანს ყველა საკვანძო წერტილებში აქტიური და რეაქტიული დატვირთვების ცვლილებასთან. განვიხილოთ შემთხვევა, როცა ელექტროსისტემის ერთ-ერთ მძლავრ გენერატორზე შემცირდა აგზნების დენის სიდიდე. მაშინ შემცირდება გენერატორიდან რეაქტიული სიმძლავრის გაცემა, რაც გამოიწვევს უკიდურეს შემთხვევაში ქსელის ახლო რაიონში ძაბვის შემცირებას. თავის მხრივ ძაბვის შემცირება გამოიწვევს ყველა საკვანძო წერტილებში აქტიური და რეაქტიული დატვირთვების შემცირებას შესაბამისად მათი სტატიკური მახასიათებლებისა ძაბვების მიხედვით. ეს გამოიწვევს სიხშირის გაზრდას, რადგან გენერატორები, განსაკუთრებით ახლომდებარე განიტვირთებიან. გაჩნდება გენერატორის ლილვზე უბალანსობა და შესაბამისად მათი სიჩქარე გაიზრდება, რაც მიგვიყვანს სხვა გენერატორების სიჩქარის გაზრდასთან.

სისტემაში სიხშირე, გაიზრდება მანამდე, სანამ არ დადგება ახალი ბალანსი, განპირობებული აქტიური დატვირთვის გაზრდით საკვანძო წერტილებში. სიხშირის გაზრდა, თავის მხრივ გავლენას მოახდენს ძაბვის გაზრდაზე და ა.შ. ასე რთულია ელექტროსისტემაში ურთიერთდამოკიდებულება სიხშირის, ძაბვის, აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეებისა.

მომხმარებლების აქტიური დატვირთვის გაზრდა ან გენერატორების აქტიური სიმძლავრის შემცირება პირველ რიგში იწვევს მოცემული რეჟიმისათვის ელექტროსისტემაში სიხშირის შემცირებას. სიხშირის შემცირება განპირობებულია აქტიური სიმძლავრის უბალანსობის გამოვლენასთან, რომელიც აუცილებლად მიგვიყვანს ბალანსის აღდგენასთან, რადგან ამ შემთხვევაში სიხშირის და ძაბვის შემცირებასთან დაკავშირებით მცირდება დატვირთვა. ამავე დროს ტურბინის სიჩქარის რეგულატორი ზრდის ენერგიაშემცველის შეშვებას და გენერატორის აქტიური სიმძლავრე იზრდება. რიცხობრივი თანაფარდობა, ე.ი. დამოკიდებულება სიხშირის ფარდობითი ცვლილებასა, უბალანსობის აქტიური სიმძლავრის ფარდობითი ცვლილებისაგან, არ წარმოადგენს მუდმივს და სისტემის რეჟიმისაგან დამოკიდებულებებით, შეიძლება იცვლებოდეს საკმაოდ ფართო ზღვრებში. განვიხილოთ უმარტივესი ელექტროსისტემა ერთი გენერატორით. სიხშირის ფარდობითი ცვლილება ჯამური დატვირთვის  $P_{\Sigma}$  ცვლილების დროს  $\Delta P$  სიდიდით, შეიძლება განისაზღვროს შემდეგი ფორმულით:

$$\frac{\Delta f}{f_{\text{ნომ}}} = -\frac{\Delta P}{P_{\Sigma}} \left( \frac{1}{\rho K_g + K_{\Sigma}} \right), \quad (3.1)$$

სადაც  $K_g$ -გენერატორის სიხშირული მახასიათებლების დახრილობის კოეფიციენტი;

$K_{\Sigma}$ - დატვირთვის სიხშირული მახასიათებლის დახრილობის კოეფიციენტი;

$\rho$ - რეზერვის კოეფიციენტი, რომელიც ტოლია გენერატორის ნომინალური სიმძლავრის ფარდობისა დატვირთვის ჯამური სიმძლავრესთან.

სიდიდე  $K_g$  განსაზღვრავს ტურბინის სიმძლავრესა და სიხშირეს შორის დამოკიდებულების მახასიათებლის დახრას. აღნიშნულ მახასიათებელს გააჩნია შემდეგი სახე (ნახ.3.4).

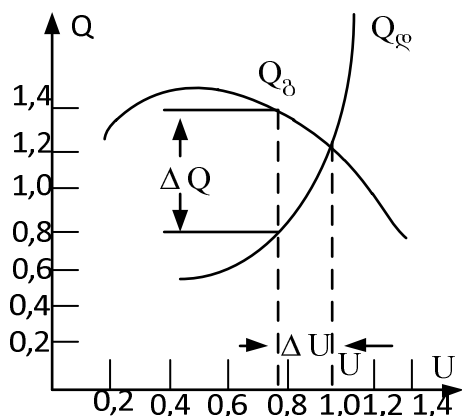
სიდიდე  $K_{\Sigma}$  განსაზღვრავს ანალოგიურად დატვირთვის სიხშირული მახასიათებლის დახრას ქსელში აქტიური დანაკარგების გათვალისწინებით (ნახ.3.5).



ელექტროსისტემაში ძაბვის საშუალო დონის ცვლილება, გამოწვეული რეაქტიული სიმძლავრის უბალანსობით, შეიძლება გამოისახოს შემდეგი ფორმულით,

$$\frac{\Delta U}{U} = -\frac{\Delta Q}{Q} \left( \frac{1}{R_g + R_b} \right), \quad (3.2)$$

სადაც  $R_g$  და  $R_b$  რეაქტიული გენერაციის ( $Q_g$ ) და რეაქტიული დატვირთვის ( $Q_b$ ) მახასიათებლების დახრილობის კოეფიციენტია ძაბვის მიხედვით. აღნიშნულ მახასიათებლებს აქვს შემდეგი სახე (ნახ.3.7).



ნახ.3.7. დამოკიდებულება  $Q_g, Q_b = k(U)$ .

მახასიათებლების გადაკვეთის წერტილი განსაზღვრავს ძაბვის ნამდვილ  $U$  მნიშვნელობას. ძაბვის შემცირების დროს  $\Delta U$ -თი  $Q_g$  იზრდება, ხოლო  $Q_b$  მცირდება. მონაკვეთი  $\Delta Q$ , შესაბამისად ახასიათებს რეაქტიული სიმძლავრის უბალანსობას (მაგალითად დამატებითი რეაქტიული დატვირთვა), რომელიც იწვევს ძაბვის შემცირებას  $\Delta U$  სიდიდით. ამგვარად, ნორმალური ძაბვის შენარჩუნებისათვის პირველ რიგში უნდა იქნეს უზრუნველყოფილი რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსი. ელექტრულ სისტემაში ძაბვისა და სისშირის ნორმალური მნიშვნელობების უზრუნველყოფის პირობები შემდეგია.

- ელექტროსადგურების ჯამური აქტიური სიმძლავრის სიდიდე უნდა იყოს საკმარისი იმისათვის, რომ დაფარული იქნეს სისტემის ყველა საკვანძო წერტილების აქტიური დატვირთვა

და აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები ქსელში ნორმალური დაბვისა და სიხშირის დროს.

- გენერატორების და რეაქტიული სიმძლავრის წყაროების ჯამური რეაქტიული სიმძლავრის სიდიდე უნდა იყოს საკმარისი იმისათვის, რომ დაფარული იქნეს სისტემის ყველა საკვანძო წერტილების რეაქტიული დატვირთვა და რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები ქსელში ნორმალური დაბვისა და სიხშირის დროს.
- გენერატორების და რეაქტიული სიმძლავრის წყაროების რეაქტიული სიმძლავრე, განაწილებული უნდა იქნეს იმგვარად, რომ თითოეულ რაიონში რეაქტიული დატვირთვა რაიონის ყველა საკვანძო წერტილებში, რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგების გათვალისწინებით, ძირითადად დაიფაროს ადგილობრივი გენერატორებით და რეაქტიული სიმძლავრის წყაროების საშუალებით და რეაქტიული სიმძლავრის გამათანაბრებელი ნაკადები რაიონებს შორის იყოს იმდენად უმნიშვნელო, რომ არ გამოიწვიოს ქსელებში მნიშვნელოვანი დაბვის დანაკარგები.
- პირველი პირობის შეუსრულებლობა და აქტიური სიმძლავრის დეფიციტის გაჩენა შეუძლებელს გახდის ნორმალური სიხშირის შენარჩუნებას.

მეორე პირობის შეუსრულებლობა შეუძლებელს გახდის ქსელში დაბვის საშუალო ნორმალური დონის შენარჩუნებას.

მესამე პირობის შეუსრულებლობა და რეაქტიული სიმძლავრის ადგილობრივი დეფიციტის გამოვლენა ცალკეულ რაიონებში შეუძლებელს გახდის ნორმალური დონის დაბვის უზრუნველყოფას.

აქტიური სიმძლავრის დეფიციტი იწვევს არა მხოლოდ სიხშირის შემცირებას, არამედ რეაქტიული სიმძლავრის რეზერვის უქონლობის შემთხვევაში, დაბვის შემცირებას, რაც ნაწილობრივ ამცირებს აქტიური სიმძლავრის დეფიციტს.

რეაქტიული სიმძლავრის დეფიციტი იწვევს არა მხოლოდ დაბვის შემცირებას, არამედ ზრდის სისტემაში აქტიური სიმძლავრის რეზერვს,

მომხმარებლების აქტიური სიმძლავრის შემცირების ხარჯზე, რაც ნაწილობრივ ამცირებს რეაქტიული სიმძლავრის დეფიციტს.

ელექტროსისტემაში აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების ბალანსის დამყარებისათვის უნდა დადგინდეს:

- შემდგომი დღე-ღამის თითოეულ საათზე (დატვირთვის დისპეტჩერული გრაფიკი) და კერძოდ მაქსიმალური დატვირთვის საათზე (სადღეღამისო ბალანსი);
- შემდგომი თვის თითოეულ დღეზე (ძირითადი მოწყობილობების რემონტების ყოველთვიური ბალანსი);
- შემდგომი კვარტლის თითოეულ თვეზე საშუალოდ (კვარტალური ბალანსი და რემონტების კვარტალური გეგმის ბალანსი);
- შემდგომი წლის თითოეულ თვეზე საშუალოდ (წლიური ბალანსი და რემონტების წლიური გეგმის ბალანსი).

სისტემის აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრე იცვლება შემდგომი გარემოებთან დაკავშირებით:

- ახალი სიმძლავრეების შეყვანით;
- სადგურის ცალკეული აგრეგატების რემონტში შეყვანით (კაპიტალური, პროფილაქტიკური და ავარიული);
- ჰეს-ის, თეც-ის, კეს-ის აქტიური სიმძლავრის სეზონური ცვლილებით.

სადისპეტჩერო გრაფიკის შედგენა შემდგომი დღე-ღამეზე მიმდინარეობს გარკვეული მასალების საფუძველზე:

- სისტემის ჯამური დატვირთვის გრაფიკი შემდგომ დღე-ღამეზე;
- ელექტროსადგურის და საქსელო ორგანიზაციის განაცხადი ელექტრომოწყობილობების გამორთვაზე შემდგომ დღე-ღამეზე.
- ელექტროსადგურების სიმძლავრეებზე მონაცემები და მათი შემცირება ელექტრომოწყობილობების რემონტების დროს;

- მონაცემები ცალკეული სადგურების ენერგორესურსების მდგომარეობის შესახებ;

ელექტროსისტემის ჯამური აქტიური დატვირთვის გრაფიკი ჩვეულებრივ დგება სტატიკური მასალების საფუძველზე.

ელექტროენერჯის ხარისხის უზრუნველყოფისათვის მეტად მნიშვნელოვანია სწორად გავთვალთ ელექტროსისტემის მაქსიმალური დატვირთვა.

### **3.2. ელექტროსისტემაში ძაბვისა და რეაქტიული სიმძლავრის ავტომატური რეგულირების აქტუალური საკითხები [16]**

მიღწევები მიკროელექტრონიკის დარგში იძლევა ფართო შესაძლებლობას შეიქმნას ენერგეტიკული მანქანათმშენებლობისათვის ახალი თაობის აპარატურა მართვის, რეგულირების, კონტროლის, დაცვის, სიგნალიზაციის და დიაგნოსტიკის. მიკროპროცესორული ტექნიკის გამოყენება საშუალებას იძლევა გაფართოვდეს დიაგნოსტიკისა და რეგულირების სისტემების ფუნქციები, ამალდეს აპარატურის სიზუსტე, რადიკალურად გამარტივდეს კონტროლის მოწყობილობა, დაცვების და სიგნალიზაციის, განხორციელდეს ენერგეტიკული აგრეგატების მართვა ქვესისტემურად საერთოსასადგური ავტომატიზაციით.

ბოლო წლებში სინქრონული მანქანების ნახევრადგამტარული აგზნების ავტომატური რეგულატორების (აარ) მიმართულებამ მიიღო შემდგომი განვითარება. მიმდინარეობს აარ ფუნქციების გაზრდა და იცვლება მისი ელემენტების ბაზა. აარ-ის დახმარებით ხორციელდება რეალიზაცია სამი ძირითადი ჯგუფის: სისტემური, ტექნოლოგიური და დაცვის [13].

სისტემური ფუნქციებში შედის ძაბვების შენარჩუნება მაღალი სიზუსტით, სინქრონული გენერატორების სტატიკური და დიმანიკური მდგრადობის უზრუნველყოფა ყველა სასქემო - სარეჟიმო სიტუაციაში, ელექტროსისტემაში ავარიის შემდგომი რხევების დემფირება.



ტექნოლოგიურ ფუნქციებში შედის სინქრონული გენერატორების აგზნების დენის ავტომატური მართვის უზრუნველყოფა ბრძანების შესრულების დროს, გენერატორის ერთი რეჟიმიდან მეორე რეჟიმში გადასვლის დროს, რომლებიც სრულდება მოცემული პროგრამების მიხედვით. მათში შედის: აგრეგატის გაშვების დროს საწყისი აგზნების რეჟიმის უზრუნველყოფა, ზუსტი ავტომატური სინქრონიზაცია ან თვითსინქრონიზაცია, პროგრამული გაშვება სინქრონული გენერატორის, გენერატორის განტვირთვა რეაქტიული სიმძლავრის მიხედვით მისი გამორთვის წინ ქსელიდან ნორმალური გაჩერების დროს, რეაქტიული დატვირთვის განაწილება პარალელურად მომუშავე მანქანებს შორის, გენერატორის ძაბვის შეზღუდვა სისშირის შემცირების დროს და ა.შ.

დაცვის ფუნქციები აარ-ის მდგომარეობს შემდეგში: სინქრონული გენერატორის მუშაობის დროს რეჟიმების გამოვლენა, როტორის ან სტატორის გრაგნილების დაუშვებელი გახურება მდგრადობის პირობის მიხედვით, აგზნების სისტემის გარდამქმნელის ტირისტორების გადატვირთვა და ა.შ., უზრუნველყოს, დაბრუნება დასაშვები მუშაობის რეჟიმში ინერციის გარეშე ან მცირე დროის დაყოვნებით, განსაზღვრული ძირითადი მოწყობილობის მახასიათებლებით. ასეთი ფუნქციებს მიეკუთვნება: მინიმალური აგზნების შეზღუდვა გამომდინარე მდგრადობის პირობიდან ან გადახურება სტატორის შუბლური ზონის, რეაქტიული სიმძლავრის მოთხოვნის რეჟიმში, როტორის ან სტატორის გადატვირთვა დენის მიხედვით, მანქანის თბური მდგომარეობის გათვალისწინებით.

ბოლო წლებში წარმატებით ინერგება აარ-ები СДП1 ტიპის. კონსტრუქციულად ის შესრულებულია ორი სტანდარტული კასეტის სახით, რომელიც მოთავსებულია კარადაში აგზნების ავტომატური მართვის აპარატურასთან ერთად. ზედა კასეტა ძირითადად ასრულებს აარ-ის ფუნქციას, ხოლო ქვედა კასეტა კი სინქრონული მანქანის მუშაობის რეჟიმების სტაბილიზაციას. აარ-ის გაბარიტული ზომები - 483×400×532 მმ, წონა 40 კგ. მის მიერ მოთხოვნილი სიმძლავრე ყველა რეჟიმში შეადგენს არა უმეტეს 50 ვ.ა.; ნათლადაა გამოხატული

მეცნიერულ - ტექნიკური პროგრესი ძლიერი მოქმედების აარ-ის დამუშავების საკითხებში, რომელიც მდგომარეობს მასის საგრძნობი შემცირებით 1100 კგ-დან (მაგნიტური მაძლიერებლების ბაზაზე) 40 კგ-მდე (ინტეგრალური მიკროსქემების ბაზაზე).

აარ-ის შემავალი სიგნალებს წარმოადგენს გენერატორის დენი -  $I_g$ , გენერატორის ძაბვა -  $U_g$ , აგზნების დენი -  $I_{აგზ}$ ; გენერატორების ჯამური დენი -  $I_{გჯ}$  და სისტემის ძაბვა -  $U_s$ . აარ-ის გამოსავალი სიგნალი განისაზღვრება გამოსახულებით

$$U_{აარ} = k_{U_o} \Delta U + k_{U_1} U' + k_{f_o} \Delta f + k_{f_1} f' + k_{I_{აგზ_1}} I'_{აგზ} \quad (3.3)$$

სადაც  $k_{U_o}$ ,  $k_{U_1}$ ,  $k_{f_o}$ ,  $k_{f_1}$ ,  $k_{I_{აგზ_1}}$  - რეგულირების კოეფიციენტები ძაბვის გადახრის მიხედვით და ძაბვის პირველი წარმოებულის მიხედვით, სიხშირის გადახრის მიხედვით და სიხშირის პირველი წარმოებულის მიხედვით და შესაბამისად როტორის დენის პირველი წარმოებულის მიხედვით.

აარ-ში მიკროპროცესორების გამოყენება შესაძლებლობას ხდის რეჟიმების შენარჩუნების სიზუსტის ამაღლებას, შესასრულებელი ფუნქციების მოცულობის გაზრდას, კერძოდ ავტომატური ადაპტირება რეგულატორის ენერგოსისტემის მუშაობაში შეცვლილი პირობასთან; შესაძლებლობა გვეძლევა მივიღოთ მეტი სწრაფქმედება, მივიღოთ უნიფიცირებული გადაწყვეტილება და მათ საფუძველზე მცირე დანახარჯები [14].

ციფრული აარ  $СДЦ$ -ის [15] ახალი სტრუქტურული და ფუნქციონალური ელემენტებით განსხვავდება ნახევრადგამტარული აარ-საგან  $СДП1$ , პროპორციული - ინტეგრალური - დიფერენციალური ძაბვის რეგულირების კანონით, აგზნების დენის მიხედვით ღრმა უკუკავშირით, უზრუნველყოფს სწრაფქმედების გაზრდას, მაღალი სიზუსტით და რეჟიმების სტატიკურად მდგრადი არეს გაფართოებას. ეს არსებითი გარემოება საშუალებას გვაძლევს შევიყვანოთ რეგულირების კანონში ინტეგრალური მდგენელი, რის შედეგად იზრდება

რეგულირების სიზუსტე. აგზნების სისტემაში როტორის დენის უკუკავშირის შეყვანა ზრდის რეგულატორის სწრაფქმედებას.

აგზნების რეგულირება ხორციელდება:

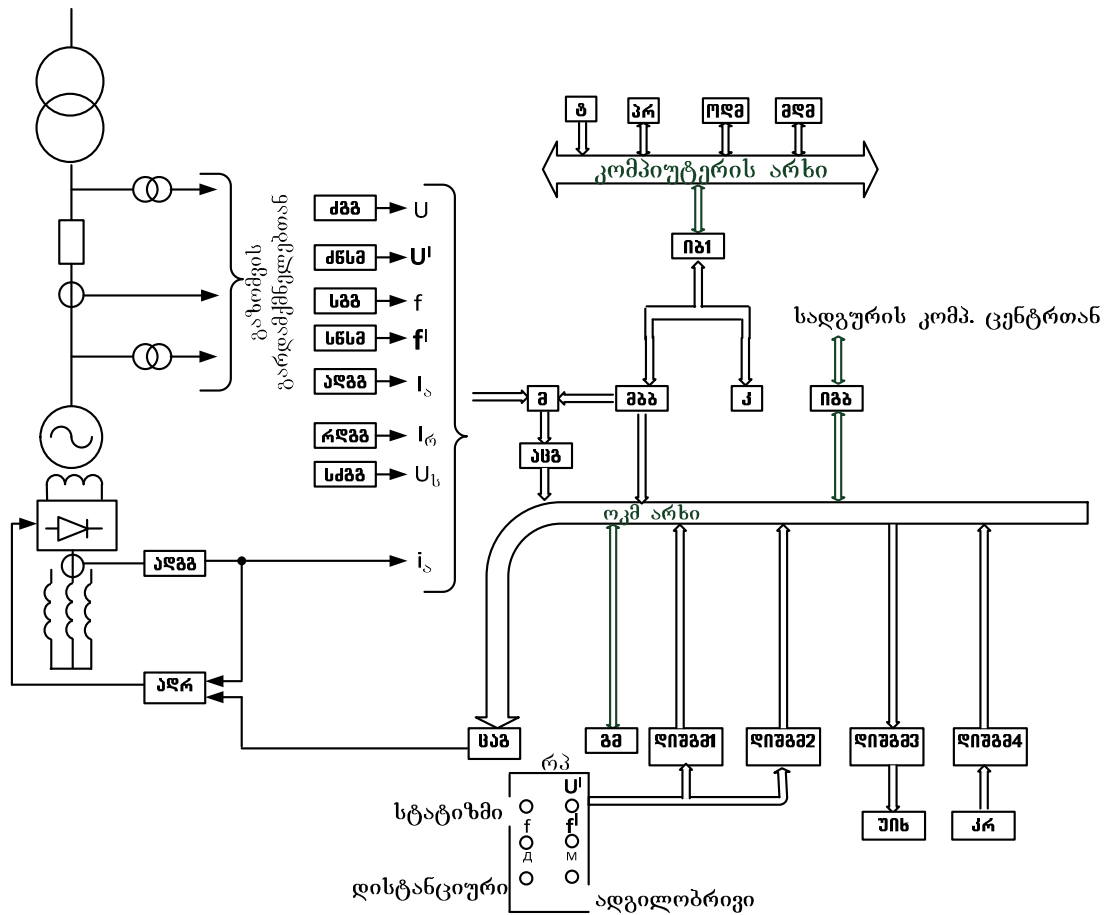
- დაბვის გადახრის და წარმოებულის მიხედვით, სისშირის ცვლილების და წარმოებულის მიხედვით;

- დაბვის გადახრის და რეაქტიული დენის ცვლილების ინტეგრალის მიხედვით, სტატორის დენის აქტიური მდგენელის წარმოებულის და როტორის დენის წარმოებულის ფუნქციის მიხედვით. დაბვის რეგულირების კანონი შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი სახით:

$$U_{\text{არ}} = k_{U_0} \Delta U + k_{U_1} U' + k_{f_0} \Delta f + k_{f_1} f' + k_2 \int (\Delta U + \beta I_r) dt + k_g I_a I'_{\text{აგზ}} \quad (3.4)$$

ანალიზმა აჩვენა, რომ ციფრული აარ უზრუნველყოფს იგივე ზღვარს გენერატორების სტატიკური და დინამიკური მდგრადობის, როგორც ნახევრადგამტარული ძლიერი მოქმედების აარ. მთელი რიგი სხვა მანვენებლებით ციფრული აარ-ს გააჩნია უპირატესობა ნახევრადგამტარულ აარ-თან შედარებით.

ციფრული ტიპის აარ-ის ბლოკ-სქემა ნაჩვენებია ნახ. 3.8 [12,14].



ნახ. 3.8. ციფრული ტიპის აარ-ის ბლოკ-სქემა

ძგგ - გაზომვის გარდამქმნელი; ძწსმ - ძაბვის წარმოებულის სიგნალის მაფორმირებელი; სგგ - სიხშირის გაზომვის გარდამქმნელი; სწსმ - სიხშირის წარმოებულის სიგნალის მაფორმირებელი; ადგგ - აქტიური დენის გაზომვის გარდამქმნელი; რდგგ - რეაქტიული დენის გაზომვის გარდამქმნელი; სძგგ - სისტემის ძაბვის გაზომვის გარდამქმნელი; ადგგ - აგზნების დენის გაზომვის გარდამქმნელი; ადრ - აგზნების დენის რეგულატორი; მ- მულტიპლექსორი; აცგ - ანალოგიურ-ციფრული გარდამქმნელი; ცაგ - ციფრულ-ანალოგიური გარდამქმნელი; გმ - გამრავლების მოდული; დიშგმ - დისკრეტული ინფორმაციის შეყვანის და გამოყვანის მოდული; უის -

უნივერსალური ინდიკაციის ხელსაწყო; კრ - კლავიშიანი რეგისტრი; ოკმ - ობიექტის კავშირის მოწყობილობა; მ - მულტიპლექსორი; მმბ - მისამართის და მართვის ბლოკი; კ - კომუტატორი; იგბ - ინფორმაციის გაცვლის ბლოკი; იბ - ინტერფეისის ბლოკი; ტ-ტაიმერი; პრ - პროცესორი; ოდმ - ოპერატული დამამახსოვრებელი მოწყობილობა; მდმ - მუდმივი დამამახსოვრებელი მოწყობილობა;  $U$ -ძაბვა;  $U'$ -ძაბვის წარმოებული;  $f, f'$ -სიხშირე და მისი წარმოებული;  $I_a, I_b$  - გენერატორის აქტიური და რეაქტიული დენი;  $i_{აზ}$ -აგზნების დენი,  $U_c$ -სისტემის ძაბვა.

გამზომი სისტემები წარმოდგენილია ინფორმაციის გარდამქმნელი ჯგუფით, რომლის გამოსასვლელში ფორმულირდება უნიფიცირებული სიგნალები, რომლებიც თავსებადია აცვ-ის შესასვლელში. აარ-ის გამზომი ნაწილი უზრუნველყოფს გენერატორის ძაბვის, გენერატორის აქტიური და რეაქტიული დენების, როტორის დენისა და სიხშირის ორობითი კოდის ფორმირებას. გვაქვს რა საწყისი მონაცემები დენისა და ძაბვის მყისა მნიშვნელობების, პრინციპულად შეიძლება მივიღოთ შესაბამისი მომქმედი მნიშვნელობები. ეს ყველაფერი ცნობილია, როგორც პირდაპირი გაზომვის ვარიანტი. მისი უპირატესობა მდგომარეობს იმაში, რომ არ საჭიროებს დამატებით სპეციალურ აპარატურას. მეორე ვარიანტი - გამზომი სისტემა დაკავშირებულია, შუალედური გამზომი გარდამქმნელების არსებობასთან.

გამზომი სისტემების ორივე ვარიანტის ანალიზმა აჩვენა, რომ თუ პირველი ვარიანტისათვის გამოიყენება 16 თანრიგიანი მიკროპროცესორი სწრაფქმედებით 1 მილიონი ოპერაციით წამში, პირდაპირი ციფრული გაზომვით, შეიძლება უზრუნველყოფილი იქნეს ისეთივე სიზუსტის მაჩვენებელი, სწრაფქმედებით და დაბრკოლებამდგრადობით, როგორცაა გამზომი გარდამქმნელის არსებობის ვარიანტში.

კავშირის მოწყობილობის ბლოკი ობიექტით წარმოდგენილია მოდულების ჯგუფით, გაერთიანებული საერთო სალტეებით და დაკავშირებული ინტერფეისის ბლოკით კომპიუტერის არხთან, მულტიპლექსორით ანალოგიური გამზომი სისტემასთან. ობიექტის კავშირის ბლოკში შედის აგრეთვე რეგულატორის პულტი და

ინფორმაციის გაცვლის მოდული სადგურის ავტომატიზირებული მართვის სისტემის ზედა დონით. რეგულატორის პულტზე არსებობს დილაკები მომატებაზე და შემცირებაზე, აგრეთვე გადამრთველი ადგილობრივ და დისტანციურ მართვაზე.

აარ-ს გააჩნია სახელური რეგულირების კოეფიციენტის დანაყენის რეგულირებისათვის შემდეგი პარამეტრებისათვის  $\Delta U, U', \Delta f, f'$  დისტანციური გადაწყობა რეგულირების კოეფიციენტების, ხორციელდება სადგურის კომპიუტერული არხის მეშვეობით. კომპიუტერის ბლოკი შეიცავს საერთო არხს, რომელზეც შეერთებულია პროცესორი, ტაიმერი, აგრეთვე ოპერატიული და მუდმივი დამამახსოვრებელი მოწყობილობა.

გათვალისწინებულია შემდეგი ძირითადი რეჟიმები; გაშვება, სინქრონიზაცია, დაბვის რეგულირება, აგზნების დენის რეგულირება. სინქრონიზაციის პროცესს ციფრული აარ-ის დახმარებით გააჩნია გარკვეული უპირატესობა. ჩვეულებრივად, სინქრონიზაციის პროცესში ხორციელდება დანაყენის ავტომატური რეგულირება, გენერატორის დაბვისა და სისტემის დაბვის სხვაობის დაყვანა 0,5%-მდე. ციფრული აარ-ს შეუძლია არა მარტო დანაყენის შეთანხმება, არამედ განახორციელოს თვალთვალი სისტემის დაბვის ცვალებადობის დროს. ინტეგრალური მდგენელი დაბვის რეგულირების კანონში ამადლებს რეგულირების წერტილში დაბვის დაჭერის სიზუსტეს და უზრუნველყოფს მკაცრი შესატყვისობას გენერატორის რეაქტიული სიმძლავრისა მოცემულ სიდიდესთან.

მეორე დამატებითი პარამეტრი სტაბილიზაციის - ნამრავლი გენერატორის აქტიური დენისა, აგზნების დენის პირველ წარმოებულზე - გამორიცხავს ზოგიერთ ნაკლს, დამახასიათებელი სიხშირის სიგნალისათვის და აფართოებს მდგრადობის არეს რეგულირების კოეფიციენტების სიბრტყეში, სიხშირის და მისი წარმოებულის ცვალებადობის მიხედვით უკმარავზნების რეჟიმში.

აარ-ების დანიშნულებას წარმოადგენს ნორმალურ რეჟიმის პირობებში დაბვის მუდმივი დონის შენარჩუნება სადგურის სალტებზე ან ელექტროსისტემის რომელიმე საკვანძო წერტილებში. თანამედროვე

ელექტროსისტემების პირობებში აარ-ებს ეკისრება შემდეგი ფუნქციების შესრულება:

- ნორმალური მუშაობის პირობებში ელექტროსისტემის რომელიმე წერტილში ძაბვის მუდმივ დონეზე შენარჩუნება;

- ელექტროსისტემის გენერატორების პარალელური მუშაობისა და ელექტრული ძრავების მუშაობის მდგრადობის აწევა ელექტროსისტემაში მოკლედ შერთვის შემთხვევაში და რეაქტიული სიმძლავრის წყაროს ავარიული გამორთვის დროს.

- ელექტროსისტემაში ძლიერ დატვირთული გადამცემი ხაზით გადასაცემი ზღვრული სიმძლავრის გაზრდა;

- ელექტროსისტემაში მოკლედ შერთვის დროს, რელეური დაცვის მოქმედების საიმედოობის გაზრდა.

- აარ-ის უკანასკნელი სამი ფუნქციის განხორციელება ხდება გენერატორის აგზნების ძაბვის გაზრდით მაქსიმუმამდე ყოველგვარი ავარიული რეჟიმების შემთხვევაში, რომლებსაც თან სდევს ძაბვის დაცემა ელექტროსისტემაში. აგზნების ფორსირება ადიდებს მაგნიტურ ნაკადს და, მაშასადამე, გენერატორის ე.მ. ძალასაც.

- უნდა აღინიშნოს, რომ სინქრონული გენერატორების ძაბვის რეგულირების ეფექტიანობა დამოკიდებულია არა მარტო აარ-ების, არამედ აგზნების სისტემის თვისებებზედაც. ელექტროსისტემის დინამიკური მდგრადობის აწევის თვალსაზრისით აგზნების სისტემის ძირითად ხარისხობრივ მაჩვენებელს წარმოადგენს ორი სიდიდე: ძაბვის აწევის სიჩქარე  $\frac{dU_{აგზ.}}{dt}$  და აგზნების მაქსიმალური ძაბვის ჯერადობა ნომინალურთან  $U_{*აგზ.მაქს.} = \frac{U_{აგზ.მაქს.}}{U_{აგზ.ნომ.}}$ . ტირისტორული აგზნების სისტემები წარმატებით ასრულებენ აღნიშნული აგზნების სისტემის ძირითად ხარისხობრივ მაჩვენებლებს.

### 3.3. ელექტრული სისტემის სიხშირის შენარჩუნება მუდმივ დონეზე და მისი რეგულირების აქტუალური საკითხები [12,17]

ელექტრული სისტემის სიხშირის შენარჩუნება მუდმივ დონეზე და მისი სათანადო რეგულირება ერთდროულად ტექნიკური და ეკონომიკური ხასიათის საკითხს წარმოადგენს. სიხშირის მუდმივად შენარჩუნება, უპირველეს ყოვლისა, განსაზღვრავს თვით ელექტროსისტემის მდგრად მუშაობასა და მის მიერ გაცემული ენერჯის ხარისხს.

სიხშირის მუდმივობაზე წაყენებულია უფრო მაკრო მოთხოვნილება, ვიდრე ქსელის რომელიმე წერტილში ძაბვის მუდმივ დონეზე შენარჩუნებაზე. თუკი ძაბვისათვის დასაშვებია რხევა 5%-ის ფარგლებში, სიხშირის რხევა მისი ნომინალური მნიშვნელობიდან, არ უნდა აღემატებოდეს  $\pm 0,4\%$ -ს (0,2 ჰერცს).

ელექტროსისტემის დატვირთვა პარალელურად მომუშავე სადგურებს შორის ნაწილდება სადგურების ყველაზე უფრო ხელსაყრელი ეკონომიური გამოყენების და ელექტროსისტემის მიერ გამომუშავებული ელექტროენერჯის უმცირესი თვითღირებულების მიხედვით; ამასთანავე თითოეულ აგრეგატზე დატვირთვების აღნიშნული განაწილება დადგენილი უნდა იქნეს ნორმალური სიხშირის დროს. სიხშირის შეცვლისას, იმის გამო, რომ პირველადი ძრავების სიჩქარის რეგულატორებს აქვთ სტატიკური მახასიათებლები, წარმოებს სადგურებს შორის დატვირთვათა ისეთი გადანაწილება, რომელიც სრულებით არ ემორჩილება იმ ეკონომიკურ კანონებს, რომელთა ბაზაზეც ხდება ელექტროსისტემის ექსპლოატაცია. ამგვარად, ზემოაღნიშნულ შემთხვევაში ელექტროსისტემა გამოდის ყველაზე ხელსაყრელი რეჟიმიდან. გარდა ამისა, ელექტროსადგურების ორთქლის ტურბინების მუშაობა, ნორმალურისაგან განსხვავებული სიხშირით, იწვევს მათი სიმძლავრის შემცირებას, დაბალი სიხშირით მუშაობა კი დაკავშირებულია ტურბინის ფრთების გაცვეთის დაჩქარებასთან.



სიხშირის რხევა არსებით გავლენას ახდენს მიმღებთა მუშაობაზე; სიხშირის შემცირებასთან ერთად მცირდება ძრავების ბრუნვათა რიცხვი და მათ მიერ მოქმედებაში მოყვანილი მანქანებისა და მექანიზმების წარმადობა ეცემა. კერძოდ, სიხშირის შეცვლა ღიდად მოქმედებს ცენტრიდანული ტუმბოებისა და ვენტილატორების მუშაობაზე, რადგან მათ მიერ შექმნილი წნევა იცვლება ბრუნვათა რიცხვის კვადრატის, ხოლო მოთხოვნილი სიმძლავრე კუბის პროპორციულად. ამიტომ სიხშირის შემცირება განსაკუთრებით საშიშია თბოსადგურების საკუთარი მოხმარების კვების სისტემისათვის.

რადგან სიხშირის შემცირება იწვევს ელექტროძრავების მიერ მოძრაობაში მოყვანილი მანქანებისა და მექანიზმის წარმადობის შემცირებას, ამიტომ იგი ერთდროულად იწვევს მომხმარებელთა დატვირთვების გარკვეულ შემცირებასაც. ასეთია ყველა ის მიზეზი, რომლებიც მოითხოვენ ელექტროსისტემის სიხშირის შენარჩუნებას მის ნორმალურ დონეზე. რადგანაც სიხშირის რხევისას მოითხოვება მისი სწრაფი აღდგენა, ისე რომ მისი გადახრა არ აღემატებოდეს  $\pm 0,1\%$  (0,05 ჰერცს), ამიტომ სისტემის სიხშირის რეგულირება არ შეიძლება განხორციელდეს ხელით. ამის გამო თანამედროვე ელექტრულ სისტემებში სიხშირის რეგულირება ხორციელდება ავტომატურად.

რაც შეეხება აქტიური სიმძლავრის რეგულირებას, მის ამოცანას წარმოადგენს განახორციელოს ელექტროსისტემაში სადგურების აგრეგატებს შორის ელექტროსისტემის დატვირთვის ეკონომიურად ხელსაყრელი და ორგანიზაციულად სწორი განაწილება. აქედან ჩანს, რომ სიხშირის ავტომატური რეგულირებისა და სიმძლავრის ავტომატური რეგულირების ამოცანები მჭიდროდ არიან ერთმანეთთან დაკავშირებული.

როგორც სიხშირის ავტომატური რეგულირება, ისე აქტიური სიმძლავრის ავტომატური რეგულირებაც ხორციელდება პირველადი ძრავების (ჰიდრაულიკური და თბოტურბინების) ბრუნვის სიჩქარეთა რეგულატორების დახმარებით. პირველადი ძრავების სიჩქარის რეგულატორების დანიშნულებაა მათი კუთხური სიჩქარის რეგულირება. ისინი რეაგირებენ ნომინალური მნიშვნელობიდან კუთხური სიჩქარის

ყოველგვარ გადახრაზე, კუთხურ სიჩქარეს დაიყვანენ ნომინალურ მნიშვნელობამდე და მამოძრავებელი ფაქტორის (წყალი, ორთქლი) ტურბინაში შეშვების შეცვლის გზით ამყარებენ შესაბამისობას პირველადი ძრავის მიერ განვითარებულ სიმძლავრესა და გენერატორის მიერ გადაცემულ სიმძლავრეთა შორის.

სიხშირისა და აქტიური სიმძლავრის ავტომატური რეგულატორები დაერთვიან პირველადი ძრავების სიჩქარის რეგულატორებს. ყველა ეს რეგულატორი უშუალოდ ან არაპირდაპირ მოქმედებენ მამოძრავებელი ფაქტორის მიმწოდებელ ერთსა და იმავე მექანიზმებზე. მაგრამ, მიუხედავად ზემოაღნიშნულისა, მათ შორის არის ერთგვარი განსხვავებაც: სიჩქარის რეგულატორები რეაგირებენ უშუალოდ ტურბინების ბრუნვათა რიცხვის შეცვლაზე; სიხშირის რეგულატორები რეაგირებენ ცვლადი დენის სიხშირის შეცვლაზე (და, მაშასადამე, არაპირდაპირ ბრუნვათა რიცხვის შეცვლაზე) გენერატორის აქტიური სიმძლავრის სიდიდის მიუხედავად. აქტიური სიმძლავრის რეგულატორები მოქმედებენ გენერატორის სიმძლავრის შეცვლისას გენერატორის სიხშირის მნიშვნელობის მიუხედავად, და მაშასადამე, აგრეგატის ბრუნვათა რიცხვის მნიშვნელობის მიუხედავად. როგორც ცნობილია ტურბინების სიჩქარეთა რეგულატორები არსებობენ სტატიკური და ასტატიკური.

ასტატიკური რეგულატორების მახასიათებლები წარმოადგენს აბსცისთა ღერძის პარალელურ წრფეს. ე.ი.  $x$ -ის ნებისმიერ მნიშვნელობას შეესაბამება  $y$ -ის ერთი და იგივე მნიშვნელობა. მაგალითად, შეიძლება მოვიყვანოთ ელექტროსადგურების ტურბინების ბრუნვის კუთხური სიჩქარის ასტატიკური რეგულატორი, რომელიც დატვირთვის  $P$  სიმძლავრის ნებისმიერი სიდიდით შეცვლისას ინარჩუნებს ტურბინის  $n$  ბრუნთა რიცხვს უცვლელად და ნომინალური მნიშვნელობის ტოლად. ამ შემთხვევაში  $y = n$ , ხოლო  $x = P$ .

სტატიკურს უწოდებენ ისეთ რეგულირებას, რომლის დროსაც ტურბინის ბრუნთა რიცხვი  $n$  დებულობს სხვადასხვა მნიშვნელობებს გენერატორის  $P$  სიმძლავრის ცვლილების შესაბამისად.

ეხლა განვიხილოთ პარალელურად მომუშავე გენერატორებს შორის სისტემის აქტიური დატვირთვის განაწილება ორი შემთხვევისათვის:

- როდესაც ყველა აგრეგატს აქვს პირველადი სტატიკური რეგულატორები.
- როდესაც ყველა აგრეგატებს აქვს პირველადი ასტატიკური რეგულატორები.

მივიღოთ აღნიშვნები:

$\Delta f = \Delta f_s / f_s$  -სისშირის ფარდობითი გადახრა (სადაც  $\Delta f_s$  სისშირის აბსოლუტური გადახრაა);

$P = P_s / P_s$  -მოცემული აგრეგატის ფარდობითი დატვირთვა (სადაც  $P_s$  არის აგრეგატზე მოსული აბსოლუტური დატვირთვა).

$P_k = P_{ks} / \sum_1^n P_{ks}$  -მთელი სისტემის ფარდობითი დატვირთვა (სადაც  $P_{ks}$  არის სისტემის აბსოლუტური დატვირთვა, ხოლო  $\sum_1^n P_{ks}$  - სისტემის ყველა  $n$  მომუშავე აგრეგატის ნომინალურ სიმძლავრეთა ჯამი). მაშინ პირველ განსახილავ შემთხვევაში, თუ სისტემას აქვს  $P_k$  დატვირთვა და  $n$  მომუშავე აგრეგატი, თითოეული მათგანისათვის შეიძლება ჩაიწეროს სისშირესა და სიმძლავრეს შორის სტატიკური დამოკიდებულების განტოლება, რომელშიც განსაზღვრავს მოცემული აგრეგატის მიერ აღებულ საერთო დატვირთვის ნაწილს.

მაშასადამე, აგრეგატებს შორის სისტემის  $P_k$  დატვირთვის განაწილება განისაზღვრება განტოლებათა შემდეგი სისტემით:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta f = S_1 \cdot P_1 \\ \dots \\ \dots \\ \Delta f = S_n \cdot P_n \end{array} \right\} \quad (3.5)$$

სადაც  $S_1 \dots S_n$  არის ცალკეული აგრეგატების სტატიზმის კოეფიციენტები,

$P_1 \dots P_n$  თითოეული აგრეგატის მიერ აღებული ფარდობითი დატვირთვა;

$$\text{ამასთანავე } P_k = \sum_1^n P = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad (3.6)$$

(3.5) და (3.6) განტოლებებიდან, მივიღებთ:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \frac{P_b}{s_1 \left( \frac{1}{s_1} + \dots + \frac{1}{s_n} \right)} = \frac{K}{s_1} \\ \dots & \\ P_n &= \frac{P_b}{s_n \left( \frac{1}{s_1} + \dots + \frac{1}{s_n} \right)} = \frac{K}{s_n} \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

სადაც  $K = \frac{P_b}{\frac{1}{s_1} + \dots + \frac{1}{s_n}} = \text{const}$

(3.7) განტოლებათა სისტემიდან გამომდინარეობს, რომ დატვირთვების განაწილება პარალელურად მომუშავე აგრეგატებს შორის წარმოებს მათი სტატიზმის კოეფიციენტთა უკუპროპორციულად.

ამგვარად მიიღება, რომ სტატიკური რეგულატორების შემთხვევაში აგრეგატებს შორის დატვირთვების განაწილება ხდება სავსებით გარკვეულად; თუ აგრეგატების რეგულატორებს წინასწარ მივცემთ სათანადო სტატიზმებს, შესაძლებელია მათ შორის გავანაწილოთ დატვირთვები ეკონომიკური და ტექნიკური მოსაზრებებით ნაკარნახევ წინასწარ დადგენილ ზღვრებში. დატვირთვის ასეთი განაწილების შესაძლებლობა წარმოადგენს სინქარის სტატიკური რეგულატორების ფრიად მნიშვნელოვან თვისებას. მაგრამ სტატიკური რეგულატორის გამოყენებისას, დატვირთვის შეცვლის შემთხვევაში, სისტემის სისშირე დეზულობს ნარჩ გადახრას, ე.ი. შესაძლებელია სისშირის რხევა გარკვეულ ზღვრებში. აღვნიშნოთ, რომ (3.7) განტოლებათა სისტემა ძალაში რჩება აგრეთვე მაშინ, როდესაც ვიხილავთ სისტემის დატვირთვის ნაზრდის განაწილებას აგრეგატებთა შორის; ამ შემთხვევაში განტოლებებში  $P_1 \dots P_n$  და  $P_b$  სიდიდეების მაგივრად შესაბამისად შევლენ დატვირთვის ნაზრდის სიდიდეები -  $\Delta P_1 \dots \Delta P_n$  და  $\Delta P_b$ .

განვსაზღვროთ სისშირის გადახრის აბსოლუტური მნიშვნელობა, როდესაც სისტემამ მიიღო დატვირთვის ნაზრდი  $\Delta P_b$ . თითოეული აგრეგატის სტატიზმის კოეფიციენტი.

$$S = \frac{\Delta f / f_6}{\Delta P_i / P_{6i}}$$

სადაც  $i = 1 \dots n$ ;

აქედან განისაზღვრება აგრეგატის დატვირთვის ნაზრდი

$$\Delta P_i = \frac{\Delta f}{f_6} \cdot \frac{P_{6i}}{S_i} \quad (3.8)$$

თუ შევაჯამებთ სისტემაში მომუშავე აგრეგატების დატვირთვის ნაზრდებს, რომლებიც გამოსახული არიან (3.8) ფორმულით, და მხედველობაში მივიღებთ, რომ სისტემის დატვირთვის ნაზრდი  $\Delta P_6$  უდრის ცალკეული აგრეგატების დატვირთვის ნაზრდების ჯამს, მივიღებთ:

$$\Delta P_6 = \sum_1^n \Delta P_i = \frac{\Delta f}{f_6} \sum_1^n \frac{P_{6i}}{S_i} \quad (3.9)$$

ჯამი  $\sum_1^n \frac{P_{6i}}{S_i}$  შეიძლება წარმოვიდგინოთ შემდეგნაირად:

$$\sum_1^n \frac{P_{6i}}{S_i} = \left( \sum_1^n P_{6i} \right) \cdot \frac{1}{S_6} \quad (3.10)$$

სადაც  $\sum_1^n \frac{P_{6i}}{S_i}$  მომუშავე აგრეგატების ნომინალური სიმძლავრეების ჯამი, ანუ სისტემის ნომინალური სიმძლავრეა (სარეზერვო აგრეგატების სიმძლავრის ჩაუთვლელად).

შევცვალოთ (3.9) ფორმულა  $\sum_1^n \frac{P_{6i}}{S_i}$  მისი გამოსახულებით (3.10)

ტოლობიდან, მივიღებთ:

$$\Delta P_6 = \frac{\Delta f}{f_6} \cdot \frac{\sum_1^n P_{6i}}{S_6} \quad (3.11)$$

ამ უკანასკნელ ფორმულას აქვს იგივე სახე, რაც (3.8) ფორმულას, მაგრამ იგი გამოხატავს სტატიკურ დამოკიდებულებას სიხშირისა და მთელი ელექტროსისტემის დატვირთვას შორის;

$$S_6 = \frac{\sum_1^n P_{6i}}{\sum_1^n \frac{P_{6i}}{S_i}} \quad (3.12)$$

წარმოადგენს სისტემის სტატიზმის კოეფიციენტს.

რამდენიმე პარალელურად მომუშავე აგრეგატისაგან შემდგარი ნებისმიერი სისტემა შეიძლება წარმოვიდგინოთ ერთი ეკვივალენტური აგრეგატის სახით, რომლის ნომინალური სიმძლავრე ყველა აგრეგატის

ნომინალური სიმძლავრეთა ჯამის ტოლია, და რომელიც მუშაობს ეკვივალენტური სტატიკური მახასიათებლებით; ამ მახასიათებლის სტატიზმის კოეფიციენტი განისაზღვრება (3.12) გამოსახულებით.

მეორე შემთხვევაში, როცა პარალელურად მუშაობენ ისეთი გენერატორები, რომელთა პირველად ძრავებს აქვთ სიჩქარის ასტატიკური რეგულატორები, მაშინ თეორიულად დატვირთვის ნებისმიერი რხევების დროს სიხშირე სისტემაში შენარჩუნდება მუდმივად. მაგრამ, რამდენადაც ასეთი რეგულატორების სტატიზმის კოეფიციენტები ნულის ტოლია ( $S_1 = S_2 = \dots = S_n = 0$ ), დატვირთვა აგრეგატებს შორის არ შეიძლება განაწილებულ იქნეს წინასწარ დადგენილი გარკვეული თანაფარდობით, როგორც ეს იყო სტატიკური რეგულატორების შემთხვევაში, მართლაც, თუ (3.7) განტოლებათა სისტემაში ჩავსვამთ სტატიზმის კოეფიციენტთა ნულის ტოლ მნიშვნელობებს, მივიღებთ:

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = \frac{P_1}{0 \cdot \infty} \\ \dots \dots \dots \\ P_n = \frac{P_n}{0 \cdot \infty} \end{array} \right\} \quad (3.13)$$

ამგვარად მივდივართ იმ დასკვნამდე, რომ ამ შემთხვევაში დატვირთვების განაწილება სრულიად განუსაზღვრელია, რის გამოც ზოგიერთი აგრეგატი შეიძლება მთლიანად დაიტვირთოს და ზოგიერთები კი განიტვირთოს; რეგულირების მთელი პროცესი ამ შემთხვევაში მიიღება რხევითი ხასიათის.

ზემოთქმულიდან გამომდინარეობს, რომ ასტატიკური რეგულატორების მქონე აგრეგატების პარალელური მუშაობა შეუძლებელია. ამიტომ ელექტროსისტემაში აგრეგატების პარალელური მუშაობის შესაძლებლობისათვის გამოიყენებიან მხოლოდ სიჩქარის პირველადი სტატიკური რეგულატორები, რომლებსაც აყენებენ ყველა აგრეგატზე, მაგრამ ისინი არ გვაძლევენ საშუალებას დატვირთვის რხევების შემთხვევაში შევინარჩუნოთ სიხშირე ნომინალურ დონეზე. ამის გამო, აუცილებელია დამატებითი ზომების მიღება, რომლებიც სისტემის სიხშირეს დაიყვანენ ნომინალურ მნიშვნელობამდე. ამ დონისძიებას წარმოადგენს სიხშირის კორექტირება (სიხშირის

გადახრის მოსპობა) მეორადი ელექტრული რეგულატორების გამოყენებით, რომლებსაც აყენებენ გარკვეულ სადგურებზე. ამ სადგურებს უწოდებენ “წამყვანებს”. თავდაპირველად განვიხილოთ ისეთი შემთხვევა, როდესაც ელექტროსისტემაში სისშირის რეგულირება დაკისრებული აქვს ერთ წამყვან სადგურს. სისტემის ყველა დანარჩენი სადგური ღებულობს დატვირთვის რეგულირების “ხისტ” გრაფიკს, ე.ი. ისინი ცვლიან თავიანთ დატვირთვებს მკაცრად დადგენილი გრაფიკის მიხედვით; ხისტი გრაფიკით მომუშავე სადგურებს, როგორც ცნობილია, უწოდებენ “საგემო” სადგურებს. საგემო სადგურების ყველა აგრეგატზე ჩვეულებრივ აყენებენ სიჩქარის პირველად სტატიკურ რეგულატორებს.

რადგანაც წამყვან სადგურზე სიჩქარის პირველად სტატიკურ რეგულატორებს გარდა დაყენებულია სისშირის მეორადი ელექტრული რეგულატორიც, ამიტომ იგი, იღებს რა სისტემის დატვირთვის მთელ ცვლილებას, ახორციელებს რეგულირებას ასტატიკური მახასიათებლის მიხედვით.

განვიხილოთ ეს პროცესი სადგურების მახასიათებლებზე. წარმოვიდგინოთ ყველა საგემო სადგური ერთი ეკვივალენტური საგემო აგრეგატის სახით, ხოლო წამყვანი სადგური კი ეკვივალენტური სისშირის მარეგულირებელი აგრეგატის სახით. დავუშვათ, რომ ეკვივალენტურ საგემო აგრეგატს აქვს ეკვივალენტური სტატიკური მახასიათებელია “ა”, ხოლო სისშირის აგრეგატსაც აგრეთვე ისეთივე სტატიკური მახასიათებელი “ბ”. ეს მახასიათებლები ნაჩვენებია ნახ. 3.9. დატვირთვის შეცვლამდე ორივე აგრეგატს აქვს დატვირთვა  $P = P_1 + P_2$ . დატვირთვის  $\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2$  სიდიდით შეცვლის შემთხვევაში, პირველ მომენტში, სანამ სისშირის ავტომატური რეგულატორი მოგვცემს თავისი ზემოქმედების სათანადო ეფექტს, აგრეგატები იმუშავენ ისე, თითქოს მათ ქონდეთ მხოლოდ სიჩქარის ავტომატური რეგულატორები; დატვირთვის ნაზრდი  $\Delta P$  განაწილდება მათ შორის მათი სტატიზმის კოეფიციენტების შესაბამისად, ხოლო სისტემაში სისშირე შემცირდება. წამყვანი აგრეგატი აიღებს  $\Delta P_1$  დატვირთვას, ხოლო საგემო კი  $\Delta P_2$ -ს.

სისშირის რეგულატორი, მას შემდეგ რაც იგი შევა მოქმედებაში, გადაადგილებს რა წამყვანი აგრეგატის მახასიათებელს ზემოთ, გაადიდებს სისშირეს. სისშირის გადიდებისა და მისი ნორმალური მნიშვნელობისადმი მოახლოების შემთხვევაში საგემო აგრეგატის დატვირთვა იწყებს შემცირებას მისი “ა” მახასიათებლის შესაბამისად, სანამ, ბოლოს, ნორმალური სისშირის დროს, იგი ხელახლა არ მიაღწევს  $P_2$  მნიშვნელობას. ამავე დროს წამყვანი აგრეგატის მახასიათებელი გადაადგილდება “ბ” მდგომარეობაში და საგემო აგრეგატის დატვირთვის  $\Delta P_2$  ნაზრდი გადაეცემა წამყვან აგრეგატს; ამის შედეგად დატვირთვის მთელი ნაზრდი  $\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2$  ათვისებული იქნება წამყვანი აგრეგატის მიერ, საგემო აგრეგატის დატვირთვა რჩება უცვლელი, ხოლო სისშირე აღდგება ნორმალური მნიშვნელობით.

მოყვანილ მეთოდს, როდესაც სისტემაში რეგულირების მიზნებისათვის გამოიყოფა ერთი სისშირის სადგური, ეწოდება “წამყვანი სადგურის” მეთოდი, რომლიდანაც ჩანს, რომ სისტემაში სისშირის შენარჩუნების უმნიშვნელოვანეს ელემენტს წარმოადგენს სისშირის მეორადი რეგულატორი.

სისშირის რეგულირება შეიძლება განხორციელდეს იქნეს ორი პრინციპით:

- რეგულირება სისშირის მყისა გადახრით, ე.ი. როდესაც რეგულატორის გამზომი ელემენტი რეაგირებს

$$\Delta f = f_{\text{გ}} - f_{\text{ნ}}$$

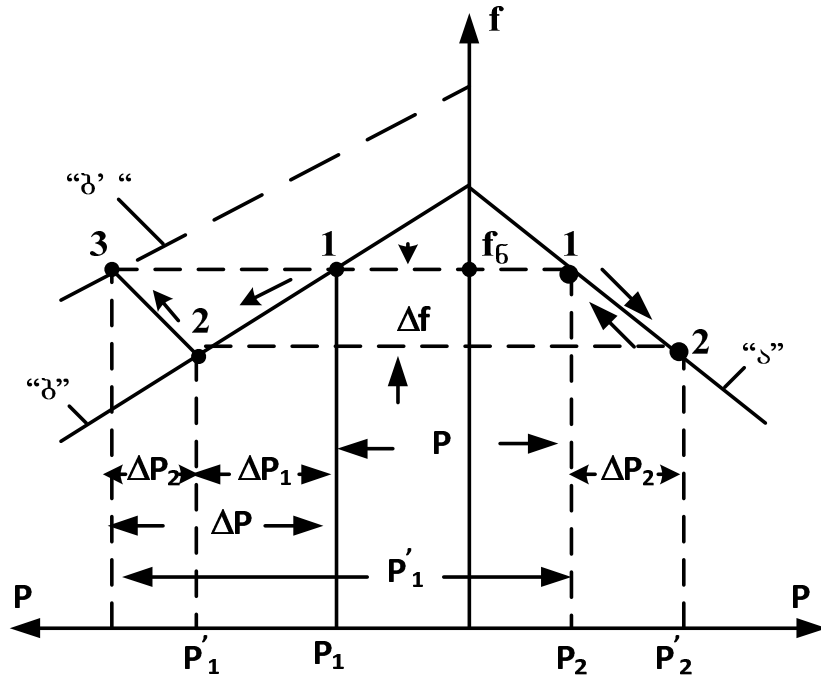
სიდიდეზე, სადაც  $f_{\text{გ}}$  არის მოცემულ მომენტში სისშირის ფაქტიური სიდიდე და  $f_{\text{ნ}}$  - ნომინალური სისშირე.

- რეგულირება სისშირის ინტეგრალური გადახრით, ე.ი. როდესაც რეგულატორის გამზომი ელემენტი რეაგირებს

$$\delta = \int_{t_1}^{t_2} \Delta f dt$$

სიდიდეზე; სადაც  $t_1$  და  $t_2$  განსაზღვრავენ დროის შუალედს, რომლის განმავლობაში წარმოებს სისშირის გადახრის დაგროვება.





ნახ.3.9. ეკვივალენტური აგრეგატის სტატიკური მახასიათებელი

ზემოაღნიშნულ ორ პრინციპზე მოქმედებს სიხშირის მთელი რიგი რეგულატორები, რომლებიც ხორციელებიან როგორც იმპულსური, აგრეთვე განუწყვეტელი რეგულირებისათვის.

ელექტროსისტემის სიმძლავრისა და დატვირთვის რხევების სიდიდის მიხედვით, სიხშირის რეგულირებისათვის შეიძლება გამოყენებულ იქნეს სხვადასხვა მეთოდები. მცირე სიმძლავრის ელექტროსისტემებში შეიძლება სიხშირის რეგულირებისათვის საკმარისი აღმოჩნდეს ერთი აგრეგატის გამოყოფა. უფრო მძლავრ სისტემაში, რომელშიაც დატვირთვას აქვს დიდი რხევები, საჭიროა რეგულირების დიდი დიაპაზონი; ამიტომ სიხშირის რეგულირების ფუნქციას აკისრებენ მთელ სადგურს, ხოლო რიგ შემთხვევაში რამდენიმე სადგურს. სიხშირის რეგულირების მეთოდი შეიძლება ჩაითვალოს სრულყოფილად, თუ იგი აკმაყოფილებს შემდეგ ძირითად მოთხოვნებს:

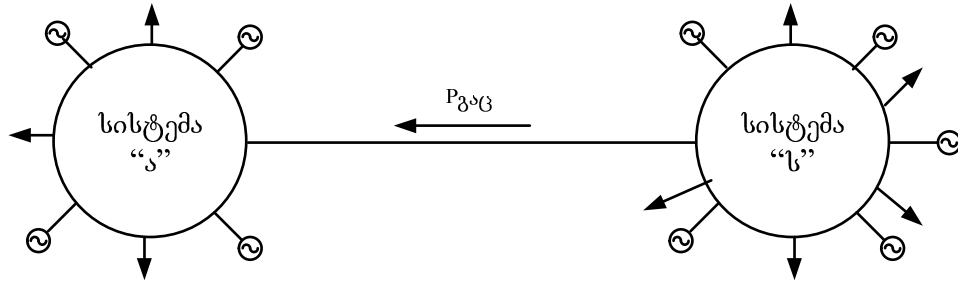
- სისშირის რეგულირება უნდა წარმოებდეს ასტატიკური რეგულირების შესაბამისი სიზუსტით, ე.ი. სისტემის სისშირე უნდა იყოს შენარჩუნებული ნორმალურ დონეზე.

- უნდა იყოს დაცული აგრეგატებსა და სადგურებს შორის დატვირთვის მოცემული განაწილების პირობა.

სისშირის რეგულირების თვალსაზრისით, ჰიდროენერგეტიკული და თბური რესურსების ყველაზე უფრო სრული და ეკონომიკური გამოყენებისათვის და აგრეთვე ელექტრული სადგურების რაციონალური ექსპლუატაციის მიზნით, ცალკეულ ელექტრულ სისტემებს ერთმანეთთან პარალელური მუშაობისათვის აკავშირებენ ელექტროგადამცემი ხაზებით. ყველა პარალელურად მომუშავე ელექტროსისტემა მთლიანად წარმოადგენს ეგრეთ წოდებულ ენერგეტიკულ გაერთიანებას, ხოლო ცალკეული სისტემების ერთმანეთთან დამაკავშირებელ ხაზებს უწოდებენ სისტემათაშორისო შემაერთებელ ხაზებს. ამ ხაზებით ერთი სისტემიდან მეორეში გადაიცემა ეგრეთ წოდებული გაცვლითი სიმძლავრეები, მათში სიმძლავრეთა შეცვლა წარმოებს მნიშვნელოვნად დიდი სიჩქარით. ამიტომ გაერთიანებულ სისტემებში აუცილებელი ხდება არა მარტო სისშირის რეგულირება, არამედ შემაერთებელი ხაზების გაცვლის სიმძლავრეთა რეგულირებაც.

განვიხილოთ ორი “ა” და “ს” სისტემისაგან შემდგარი უმარტივესი გაერთიანების გამარტივებული სქემა (ნახ. 3.10), რომელშიც გაცვლის სიმძლავრე  $P_{გაც} = const$  და მიმართულია “ს” სისტემიდან “ა” სისტემისკენ.

თუ დატვირთვა გაიზარდა “ა” სისტემაში, მაშინ მოხდება არა მარტო გაერთიანების სისშირის შემცირება, არამედ გაცვლის სიმძლავრის გადიდებაც რაღაც  $\Delta P_{გაც}$  სიდიდით. ეს აიხსნება იმით, რომ ორივე სისტემის ყველა აგრეგატს აქვთ სიჩქარის პირველადი რეგულატორები სტატიკური მახასიათებლებით და, მაშასადამე, “ს” სისტემის აგრეგატები აიღებენ “ა” სისტემის დატვირთვის ნაზრდის გარკვეულ ნაწილს, ე.ი. გაადიდებენ გაცვლის სიმძლავრეს;



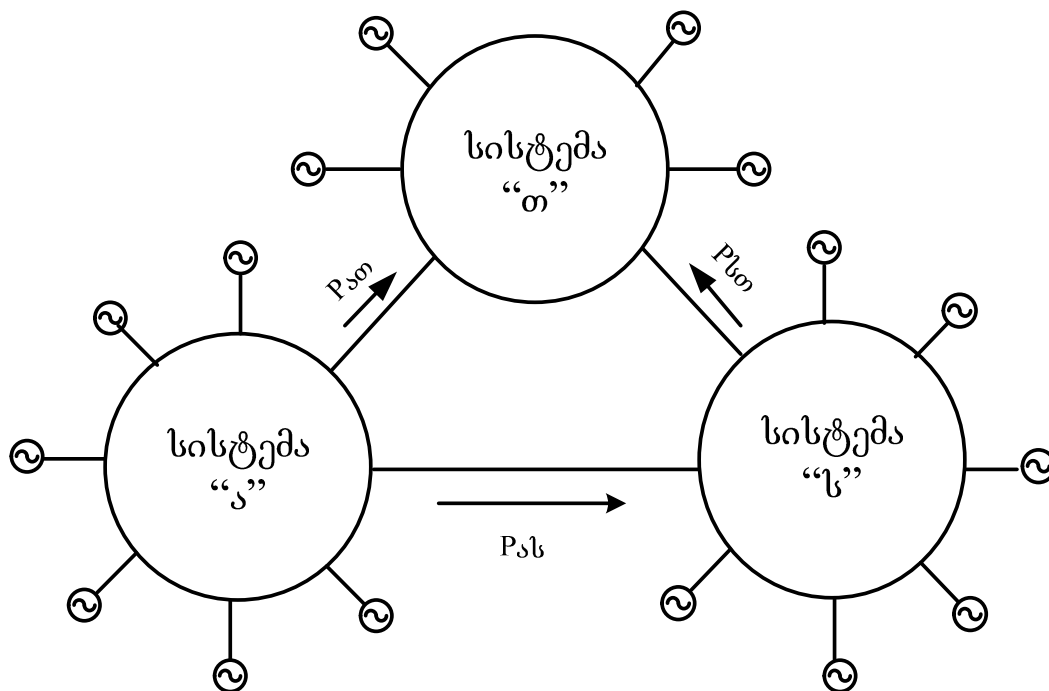
ნახ. 3.10. უმარტივესი გაერთიანებული “ა” და “ს” სისტემა.

ამ შემთხვევაში გაცვლის სიმძლავრე იქნება  $P_{ა,ს} + \Delta P_{ა,ს}$ . ამ მაგალითიდან ჩანს, რომ გაერთიანებულ სისტემაში სიხშირისა და გაცვლის სიმძლავრეთა რეგულირება მჭიდროდაა ერთმანეთთან დაკავშირებული. გაცვლის სიმძლავრე ჩვეულებრივ რეგულირდება ან მუდმივ სიდიდეზე  $P_{ა,ს} = const$ , ან გარკვეული წინასწარმოცემული გრაფიკით  $P_{ა,ს} = f(t)$ . ჩვეულებრივ სიხშირის მარეგულირებელი სადგურები არეგულირებენ აგრეთვე გაცვლის სიმძლავრესაც. გაერთიანებული ენერგოსისტემების სიხშირისა და გაცვლის სიმძლავრეთა რეგულირებაზე წაყენებული მოთხოვნები ისეთივეა, რაც ზემოთ იყო მოყვანილი იზოლირებული ელექტროსისტემებისათვის, მაგრამ მათ ემატებათ კიდევ გაცვლის სიმძლავრის მოცემულ ზღვრებში შენარჩუნების მოთხოვნილება. ეს მოთხოვნილება შეიძლება შესრულებულ იქნეს იმ შემთხვევაში, თუ რეგულირებას ექნება ისეთი ხასიათი, რომ გაერთიანებაში შემავალი თითოეული სისტემა დამოუკიდებლად დაფარავს თავისი დატვირთვის ცვლილებებს დანარჩენი სისტემების მონაწილეობის გარეშე.

ნახ.3.11-ზე ნაჩვენებია სამი “ა”, “ს” და “თ” ელექტროსისტემისაგან შემდგარი უფრო რთული გაერთიანების სქემა; გაცვლის  $P_{ა,ს}$ ,  $P_{ა,თ}$  და  $P_{ს,თ}$  სიმძლავრეების მიმართულებები ნაჩვენებია ისრებით.

თუ რომელიმე სისტემაში, მაგალითად, “ს” სისტემაში, გაიზარდა დატვირთვა, მაშინ მასში სიხშირის შემცირება დაკავშირებულია მის მიერ გაცემული  $P_{ს,თ}$  გაცვლის სიმძლავრის შემცირებასთან, მაშინ როდესაც დანარჩენ “ა” და “თ” სისტემებში ამ სიხშირის შემცირებას თან სდევს მათ მიერ გადაცემული გაცვლის  $P_{ა,ს}$  და  $P_{ა,თ}$  სიმძლავრეთა

გადიდება. ეს გარემოება აიხსნება იმით, რომ პირველად რეგულატორებს აქვთ სტატიკური მახასიათებლები და ამის შედეგად ყველა აგრეგატი აღიღებს თავის დატვირთვას.



ნახ.3.11. გაერთიანებული “ა”, “ბ” და “ს” სისტემა.

ანალოგიურად შეიძლება ვაჩვენოთ, რომ დატვირთვის შემცირებისას “ს” სისტემაში, სიხშირის გადიდებას შეესაბამება გაცვლის  $P_{სბ}$  სიმძლავრის გადიდება, ხოლო დანარჩენ “ა” და “ბ” სისტემაში ამ სიხშირის გადიდებას მოყვება გაცვლის  $P_{ას}$  და  $P_{აბ}$  სიმძლავრეთა შემცირება.

მაშასადამე. ზემომოყვანილიდან შეიძლება დავასკვნათ, რომ სისტემაში, რომელშიც წარმოიშვა დატვირთვის შეცვლა, სიხშირისა და გაცვლის სიმძლავრეთა გადახრების ნიშნები ერთმანეთს ემთხვევიან, ხოლო დანარჩენ სისტემებში ეს ნიშნები საწინააღმდეგოა. გაერთიანებული სისტემის ამ თვისების განმარტება მოცემულია ცხრილი 3.1-ში.

ცხრილი 3.1.

დატვირთვის შეცვლის აღგილი	დატვირთვის შეცვლის ხასიათი	$\Delta P_{\text{გაც}}$ ნიშანი	$\Delta f$ -ის ნიშანი
მოცემული სისტემის შიგნით	დატვირთვის გადიდება დატვირთვის შემცირება	- +	- +
მოცემული სისტემის გარეთ	დატვირთვის გადიდება დატვირთვის შემცირება	+ -	- +

ეხლა განვიხილოთ სიხშირისა და გაცვლის სიმძლავრეთა ავტომატური რეგულირების წარმოსახვითი სტატიზმის მეთოდი. გაერთიანებული სისტემის რეგულირების შემთხვევაში, როდესაც თითოეულ სისტემას აქვს რამდენიმე სიხშირის მარეგულირებელი სადგური, დასარეგულირებელია სამი სიდიდე:

- გაერთიანების სიხშირე, რომელიც შენარჩუნებული უნდა იქნეს ნორმალურ დონეზე;
- სიხშირის მარეგულირებელი სადგურების დატვირთვები, რომელთა განაწილება შენარჩუნებული უნდა იქნეს მოცემული ფარდობით;
- გაცვლის სიმძლავრეები, რომელთა სიდიდე შენარჩუნებული უნდა იქნეს მოცემულ ფარგლებში.

ამ შემთხვევაში ერთი სიდიდე - სიხშირე, რომელიც საერთოა მთელი გაერთიანებისათვის, ფუნქციონალურად დაკავშირებულია ორ დანარჩენ სიდიდეზე. როგორც ცნობილია, რამდენიმე სიხშირის მარეგულირებელ სადგურებზე რეგულირების მდგრადობისა და განსაზღვრულობისათვის აუცილებელია ყოველი სადგურის სიმძლავრესა და სიხშირეს შორის სტატიკური დამოკიდებულების არსებობა.

ამავე მიზნებისათვის, მეორე სიდიდის - გაცვლის სიმძლავრის - არსებობის შემთხვევაში გამოყენებული უნდა იქნეს სტატიზმი გაცვლის სიმძლავრის მიხედვით. მაშინ წარმოსახვითი სტატიზმის მეთოდით სიხშირისა და გაცვლის სიმძლავრის რეგულირების დამახასიათებელი



სიდიდე გადაეცემა ოპტიკური არხებით შემაერთებული ხაზიდან სადისპერსიულ პუნქტს და იქიდან მარეგულირებელ სადგურებს იმავე არხებით, რომლებითაც ისაზღვრება სისტემის ჯამური დატვირთვის დაფარვაში სადგურების ხვედრითი მონაწილეობა.

რეგულირების ეს მეთოდი შეიძლება გამოყენებულ იქნეს გაერთიანებისათვის ელექტროსისტემებისა და შემაერთებული ხაზების ნებისმიერი რიცხვით და მათი ნებისმიერი კონფიგურაციით.

(3.14) და (3.15) განტოლებათა სისტემების გარდაქმნის შემდეგ გვექნება:

$$\left. \begin{aligned} \Delta f \cdot \sum_1^n \frac{1}{S_s} + \Delta P_{\text{გაც.ა}} \sum_1^n K_s &= 0 \\ \Delta f \cdot \sum_1^m \frac{1}{S_b} + \Delta P_{\text{გაც.ბ}} \sum_1^n K_b &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ ენერგოგაერთიანებაში საერთოდ გაცვლის სიმძლავრეთა გადახრების ჯამი ელექტროსისტემების ნებისმიერი რაოდენობისათვის ნულის ტოლია, ე.ი.

$$\Delta P_{\text{გაც.ა}} + \Delta P_{\text{გაც.ბ}} + \dots + \Delta P_{\text{გაც.ლ}} = 0,$$

და თუ შევკრებთ ჩვენი შემთხვევისათვის (3.16) განტოლებებს, მივიღებთ:

$$\Delta f \left( \sum_1^n \frac{1}{S_s} + \sum_1^m \frac{1}{S_b} \right) + (\Delta P_{\text{გაც.ა}} + \Delta P_{\text{გაც.ბ}}) \left( \sum_1^n K_s + \sum_1^m K_b \right) = 0 \quad (3.17)$$

(3.17) განტოლება შეიძლება დაკმაყოფილებულ იქნეს მხოლოდ მაშინ, როცა  $\Delta f = 0$ . ამგვარად, წარმოსახვითი სტატიზმის მეთოდი იძლევა სისწორის ასტატიკურ რეგულირებას, თითოეულ სისტემაში მარეგულირებელ სადგურებზე დატვირთვის მოცემულ განაწილებას და გაცვლის სიმძლავრეთა შენარჩუნებას მოცემულ ზღვრებში.

### 3.4. ელექტროენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი როგორც სიხშირის რეგულირების ალტერნატიული მოწყობილობა[10]

ელექტროენერგეტიკული სისტემების (ეეს) განვითარების პროცესში მკაცრად დგას ელექტროენერგეტიკული რეჟიმების მართვის საკითხები და მომხმარებლების შეუფერხებელი ელექტრომომარაგების უზრუნველყოფა ეეს-ის მართვის ეფექტურობის ამაღლებისათვის მოწოდებულია ელექტროენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი (ეზემ).

როგორც ცნობილია ეეს-ში ელექტროენერჯის გადაცემა გენერატორებიდან მომხმარებლებზე მიმდინარეობს უწყვეტად და მყისიერად, მისი დაგროვების შესაძლებლობის გარეშე.

დღე-ღამის განმავლობაში ელექტროენერჯის მოხმარება მიმდინარეობს არათანაბრად (დატვირთვის დღე-ღამური გრაფიკის შესაბამისად), ამიტომ აუცილებლობას წარმოადგენს მუდმივად რეგულირდებოდეს ქსელში ელექტროენერჯის გადაცემა, რომ შენარჩუნებული იქნეს დროის ნებისმიერ მომენტში ბალანსი გამომუშავებულ და მოხმარებულ აქტიურ სიმძლავრეს შორის. ბალანსის მდგომარეობაზე არის დამოკიდებული ელექტრული დენის სიხშირე - ერთ-ერთი მაჩვენებელი ელექტროენერჯის ხარისხის და ენერგოსისტემის რეჟიმის მნიშვნელოვანი პარამეტრი.

სახელმწიფო სტანდარტის თანახმად, სიხშირე უნდა იმყოფებოდეს  $50 \pm 0,2$  ჰც ზღვრებში, არა ნაკლები 95% დღე-ღამის განმავლობაში, არ გამოვიდეს ზღვრული დასაშვებიდან  $50 \pm 0,4$  ჰც.

ჩვეულებრივ, სიმძლავრის ბალანსი სისტემაში შენარჩუნებულია სიმძლავრის გაცემით ქსელში ელექტროსადგურების გენერატორებით. ასეთი მართვის რეჟიმი ეეს-ის, არა მხოლოდ შესამჩნევად ზრდის საგენერატორო მოწყობილობის ცვეთის სიჩქარეს, არამედ ზრდის დამატებით სათბობის ხარჯს. განსაკუთრებით შესამჩნევია სათბობის



გადახარჯვა, როცა დატვირთვის გრაფიკის ცვალებადი ნაწილის რეგულირება ხორციელდება ელექტროსადგურის მძლავრი ბლოკებით.

გარდა ამისა, ყოველთვის არ არსებობს ტექნოლოგიური შესაძლებლობა გენერატორების სწრაფი გაშვებისა და გაჩერების. ამავე დროს, ავარიულ სიტუაციაში, როცა ელექტროსადგურში სიმძლავრის რეზერვი არასაკმარისია, სისშირის დასაშვები დონის აღდგენისათვის გამოიყენებენ მომხმარებლების დატვირთვის შეზღუდვას. ყოველივე ამან, თავის მხრივ შეიძლება გამოიწვიოს მნიშვნელოვანი ზარალი, რომელიც დაკავშირებულია მომხმარებლების ენერგომომარაგების შეწყვეტასთან.

ეეს-ის მართვის პრობლემის ტექნიკური გადაწყვეტა წარმატებით შეიძლება ეზგიმ-ის საშუალებით, რომლის დანიშნულებაა ეეს-ის დღეღამური დატვირთვის გრაფიკის პიკური და ნახევრადპიკური უბნების დაფარვა. ეს საშუალებას იძლევა ეეს-ის რეჟიმების ოპტიმიზაციის, შეამციროს საწვავის ხარჯი, მნიშვნელოვნად ამაღლდეს ელექტროენერჯის გამომუშავების და გადაცემის პროცესების ენერგოეფექტურობა და საბოლოოდ, ამაღლდეს ეეს-ის მართვის ეკონომიკური ეფექტურობა.

ზეგამტარების ფართო კლასის სამრეწველო წარმოება იძლევა საშუალებას წარიმართოს სამუშაოები სამრეწველო ძალოვანი მოწყობილობების ნიმუშების შექმნისა ეეს-ისათვის, როგორც მაღალტემპერატურული ზეგამტარებისა (თხევადი აზოტის დონე), ისე ტრადიციული დაბალტემპერატურული (თხევადი ჰელიუმის დონე) ზეგამტარული მასალებისა.

დამუშავებული ზეგამტარული მოწყობილობებიდან ეეს-სათვის, მეტად პერსპექტიულს წარმოადგენს ეზგიმ. ისინი შეიძლება გამოყენებული იქნან ერთ-ერთ ეფექტურ საშუალებად ეეს-ის მდგრადობისა და სარეჟიმო საიმედოობის ამაღლების საშუალებად. ამ შემთხვევაში გამოვლინდება ისეთი თვისებები ეზგიმ-ის, როგორცაა სწრაფქმედება, მაღალი მ.კ.კ., ენერჯის შეყვანისა და გამოყვანის ავტომატიზაციის სრული შესაძლებლობა, დიდი ხვედრითი ენერგოტევადობა, აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის რეგულირება.

ძირითადი განმასხვავებელი განსაკუთრებულობა ეზგიმ-ის მდგომარეობს მაღალი ხვედრითი სიმძლავრეში ენერჯის საკმარისი დაბალი სიმკვრივის დროს. ძალიან სწრაფ დროში რეაგირება (დამუხტვა-განმუხტვა). დამუხტვა-განმუხტვის შეუზღუდავი ციკლის რიცხვით, მოძრავი ნაწილების გამორიცხვა, მცირე სამუშაოს მოცულობა ტექნიკური მომსახურების სამუშაოებზე, შესაძლებლობა სწრაფი გადამუხტვისა, ენერჯის გადაცემის მაღალი ეფექტურობა (მ.ქ.კ.>95%).

## თავი IV. ელექტრული ენერჯის ხარისხი მუდმივი დენის ელექტრულ სისტემაში

### 4.1. მუდმივი დენის საჰაერო ხაზებში დენის ჰარმონიკები და მისი შეზღუდვის საშუალებები

მუდმივი დენის მაღალი ძაბვის (მძ) გადამცემი ხაზის დენი დაძაბვა მისი დამყარებული რეჟიმის მუშაობის დროს, გარდა მუდმივი მდგენელისა, შეიცავს ცვლად მდგენელებსაც. ცვლადი მდგენელების (მაღალი რიგის ჰარმონიკები) დენის და ძაბვის არსებობა ხაზში მრავალი მოსაზრების გამო არასასურველია. ძაბვის ჰარმონიკები დამატებით ართულებს ზემოქმედებას იზოლაციაზე, განსაკუთრებით საჰაერო შუალედში სადენი -საყრდენი, სადენი - მიწა, შეიძლება შესამჩნევად იმოქმედოს ამგვარად ხაზის ზომებზე. ძირითადი ზარალი ჰარმონიკებიდან დამოკიდებულია, უარყოფით გავლენით მძ მუდმივი დენის ხაზთან ახლოს მდებარე ტრასაზე კავშირის ხაზზე. ეს გავლენა მოითხოვს გადაიარაღებას კავშირის ხაზის - მათი მიკუთვნება, დამატებითი მაძლიერებელი პუნქტებთან და ა.შ. ღირებულება აღნიშნული ღონისძიების საკმაოდ მაღალია - მან შეიძლება მიაღწიოს 10%-მდე თვით მუდმივი დენის მძ ხაზის ღირებულების. საწყისი მონაცემებს აღნიშნული დანახარჯების განსაზღვრისათვის, წარმოადგენს დენის ჰარმონიკების ამპლიტუდების მნიშვნელობა ელექტროგადამცემი ხაზის გასწვრივ და შესაბამისი მნიშვნელობა ხაზზე ძაბვის ჰარმონიკების ამპლიტუდას.

ჰარმონიკების ამპლიტუდების მნიშვნელობა დამოკიდებულია ქვესადგურის გარდამქმნელების სქემებზე, რეჟიმების პარამეტრებზე, მოწყობილობების ელექტრულ მახასიათებლებზე, როგორცაა საჰაერო ხაზი და გარე მოწყობილობა. ძირითადი მეთოდები, ხაზში ჰარმონიკების შეზღუდვის, მდგომარეობს შემდეგში:

გარდამქმნელის ფაზათა რიცხვის გაზრდა. ამჟამად პრაქტიკულად ყველა გარდამქმნელი მოწყობილობა ქვესადგურის აიწყობა 12-ფაზა გარდამქმნელი ბლოკებით, რის შედეგად მკვეთრად მცირდება ჰარმონიკების რიგი  $12k + 6 (k = 0, 1, 2 \dots)$ , ან სიხშირეები 300, 900 ჰც და ა.შ. შემდეგი გაზრდა გარდამქმნელის ფაზათა რიცხვის, მაგალითად 24-ფაზა გარდამქმნელი ბლოკებით ეკონომიკური თვალსაზრისით მიუღებელია.

გამმართველი ვენტილების დაყოვნების კუთხეების და ინვერტორის მარაგის კუთხეების შეზღუდვა ნორმალურ დამყარებულ რეჟიმებში. მისწრაფება მაქსიმალურად შევამციროდ ძაბვის ზემოქმედება ქვესადგურის მოწყობილობის მთავარ იზოლაციაზე მუშა რეჟიმებში და მდ მუდმივი დენის ხაზებში დენის ჰარმონიკებს მიყვავართ იქეთ, რომ ჩვეულებრივ დაყოვნების კუთხეები გამმართველ ქვესადგურზე შეზღუდულია სიდიდით  $15^0$ , ხოლო მარაგის კუთხეები ინვერტორის ქვესადგურზე -  $20^0$ ;

მაგლუვებელი რეაქტორის ინდუქციურობის გაზრდა, ჩართული მუდმივი დენის ხაზის და ქვესადგურის პოლუსებს შორის.

ხაზზე ან გარდამქმნელ ქვესადგურზე მუდმივი დენის მაღალი რიგის ჰარმონიკების ფილტრების გამოყენება;

ჭექა-ქუხილის დამცავი გვარლის მაეკრანირებელი მოქმედების გამოყენება და ხაზის მიღევის ამაღლება, გვარლზე მიერთებით სპეციალური მოწყობილობის, რომელსაც უწოდებენ მაგლუვებელს;

ხაზის მიღევის ამაღლება, სადენის გამოყენებით, რომელიც მოიცავს ფოლადის გარე ფენას.

ჩამოთვლილი მეთოდებიდან ცალკე აღებული ვერ უზრუნველყოფს დენის ჰარმონიკების ისეთ შემცირებას, რომ გამოირიცხოს აუცილებლობა კავშირის ხაზზე დამცავი ღონისძიების. ამიტომ ელექტროსაზის დაგეგმარების დროს აღნიშნული მეთოდები ამა თუ იმ მოცულობით გამოიყენება ერთობლივად, რის შედეგად მიიღწევა საგრძნობი შეზღუდვა ხაზში ჰარმონიკების. მნიშვნელოვანია, ის რომ თითოეული ღონისძიების რეალიზაცია, გარდა ხაზში დენის ჰარმონიკის

შეზღუდვისა, დადებით გავლენას ახდენს ელექტროგადაცემის სხვა ზოგიერთი მახასიათებლებზე.

დენის ჰარმონიკები მძ ხაზებში პირველ რიგში განისაზღვრება ძაბვის ჰარმონიკებით, რომელიც გენერირდება ელექტროგადაცემის ქვესადგურების გარდამქმნელებით. მაღალი ძაბვის გარდამქმნელები გარდა მაგლუვებელი რეაქტორისა შეიცავს ტევადურ ელემენტებს. ტევადური ელემენტების გათვალისწინებას მივყავართ ორ გარემოსთან; ერთი მხარე დაკავშირებულია ჰარმონიკების გაზრდასთან; მეორე მხარე დაკავშირებულია დამატებითი ჰარმონიკების წარმოქმნასთან. მაგალითად 12-ფაზა გარდამქმნელის გამართული ძაბვის მრუდი გარდა  $12k(k = 1,2 \dots)$  რიგის ჰარმონიკის მახასიათებლისა, მონაწილეობს  $3k$  რიგის ჰარმონიკები. ორივე ეს გარემოება აუცილებელია გავითვალისწინოთ დენის ჰარმონიკების განსაზღვრის დროს მუდმივი დენის საჰაერო გადამცემი ხაზებში.

მრავალბოგიერული გარდამქმნელის ძაბვის ჰარმონიკული მდგენელების მკაცრი განსაზღვრისათვის საჭიროა ამოიხსნას არაწრფივი დიფერენციალური განტოლებათა სისტემები. ამოცანის გამარტივების მიზნით გარდამქმნელი შეიძლება შეიცვალოს ძაბვის წყაროთი გარე წრედისათვის, რის შემდეგ ელექტრომაგნიტური პროცესების ანგარიში ხორციელდება წრფივი სქემებით. ასეთი მიდგომა ცნობილია, როგორც ჰარმონიკული მეთოდი. აღნიშნული მეთოდი გამოირჩევა საგრძნობი სიმარტივით.

მუდმივი დენის ელექტროგადამცემი საჰაერო ხაზი, როგორც წესი, შესრულებულია ბიპოლარული, სადენების სიმეტრიული განლაგებით ერთ საყრდენზე. გადამცემი ხაზი აღჭურვილია ერთი ან ორი ჭეჭა-ქუხილის დამცავი გვარლით, რომლებიც შეიძლება ჩამიწებული იქნეს ხშირად (თითოეული საყრდენზე - ასეთი ჩამიწება გვარლის ცნობილია, როგორც იდეალური) ან იშვიათად 100 კმ და მეტი დაშორებით. ბოლო შემთხვევას აქვს ადგილი, მაშინ, როცა გვარლი გადამცემ ხაზზე გამოიყენება კავშირის მაღალსიხშირული არხებისათვის გარდამქმნელი ქვესადგურებს შორის და ჩამიწება გვარლების ხორციელდება მათთან მაღალსიხშირული კავშირის მაძლიერებელი პუნქტების, რომლის

წინააღმდეგობა ბგერითი სიხშირის დიაპაზონის ჰარმონიკისათვის შეიძლება მიღებული იქნეს ნულის ტოლად.

განვიხილოთ ზოგადი შემთხვევა მძის ხაზის, რომელიც შეიცავს ორ სადენს (ჩვეულებრივ გახლეჩილი) და ორი ჰორიზონტალური გვარლი, განლაგებული საყრდენზე.

ასეთი ხაზის პირველადი პარამეტრების სისტემა შედგენა ხვედრითი გრძივი საკუთარი და ურთიერთ კომპლექსური წინააღმდეგობით სადენის ყველა კონტურებით (გვარლი) - მიწა და განივი საკუთარი და ურთიერთ კერძო ტევადობები.

$i$  კონტურის საკუთარი წინააღმდეგობა სადენი - მიწა განისაზღვრება შემდეგი თანაფარდობებით.

$$Z_i = R_i + j\omega L_i = R_{ni} + R_3 + j\omega(L_{n1} + L_3),$$

სადაც  $R_{ni}, L_{n1}$  - აქტიური წინააღმდეგობა და შიდა ინდუქციურობა  $i$  - სადენის;  $R_3$  - მიწის აქტიური წინააღმდეგობა;  $L_3$  - ინდუქციურობა, ითვალისწინებს ჰაერში და მიწაში მაგნიტური ნაკადს.

$Z_i$  მდგენელები გამოითვლება ფორმულებით:

$$R_3 = R_e \left[ -\frac{j\omega\mu_o}{2\pi} 2j \right];$$

$$L_3 = J_m \left[ -\frac{j\mu_o}{2\pi} 2j \right] + \frac{\mu_o}{2\pi} \ell_n \frac{2h}{r};$$

$$R_{ni} + j\omega L_{ni} = \frac{1}{\gamma^2 \pi r} \sqrt{-j\omega\mu\gamma} \frac{J_0(r\sqrt{-j\omega\mu\gamma})}{J_1(r\sqrt{-j\omega\mu\gamma})}, \quad (*)$$

სადაც  $\omega$ -კუთხური სიხშირე;  $J$ -კარსონის ინტეგრალი განსაზღვრული ცხრილების მიხედვით;  $h$  - სადენის ჩამოკიდების სიმაღლე;  $r$  - რადიუსი (ეკვივალენტური გახლეჩის შემთხვევაში) სადენის;  $J_0, J_1$ -ბესელეას ფუნქცია ნულოვანი პირველი რიგის და პირველი რიგის;  $\gamma$ -სადენის ხვედრითი გამტარობა.

გვარლისათვის, განსაკუთრებით იმ შემთხვევაში, როცა ისინი შესრულებულია ფოლადალუმინის სადენისაგან ან ბიმეტალური სადენისაგან, ფორმულა ნიშნით (\*) იძლევა მნიშვნელოვან ცდომილებას. ამიტომ შიდა აქტიური და ინდუქციური წინააღმდეგობა სადენების (გვარლის) განისაზღვრება შემდეგი თანაფარდობებით.

ურთიერთ წინაღობა ნებისმიერი  $k$  და  $i$  კონტურებს და სადენს (გვარლი) - მიწას შორის განისაზღვრება ფორმულით

$$Z_{ik} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[ \ell_n \frac{D_{ik}}{d_{ik}} - 2jJ \right],$$

სადაც  $D_{ik}$ -მანძილი ერთ-ერთი სადენსა (გვარლი) მიწის ზედაპირამდე;  $d_{ik}$ -მანძილი სადენებს შორის (სადენი-სადენი, სადენი-გვარლი, გვარლი-გვარლი).

კერძო ტევადობები განისაზღვრება განტოლებათა სისტემის ამოხსნის გზით საკუთარი და ურთიერთ პოტენციალური კოეფიციენტებით, გამოთვლილი ფორმულებით:

$$\alpha_{ik} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ell_n \frac{D_{ik}}{d_{ik}}; \quad \alpha_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ell_n \frac{2h}{Z}$$

ხაზებს გააჩნია სიმეტრიის ვერტიკალური სიბრტყე, ამიტომ ხაზის ტელეგრაფის განტოლებათა სისტემის ამოხსნა მკვეთრად ამარტივებს სიმეტრიული დგენელების მეთოდის გამოყენებას. ხაზის პარამეტრები ამ შემთხვევაში წარმოქმნიან ორ გაერთიანებას, რომელიც აღიწერება სიმეტრიული არხებით: ორი სადენი (ორი გვარლი), შეერთებული პარალელურად - მიწა ( $2\Pi$ -3 და  $2T$ -3) და სადენი - სადენი (გვარლი-გვარლი) -  $\Pi$ - $\Pi$ ,  $T$ - $T$ .

რეალური დენები და ძაბვები სადენებში და გვარლებში დაკავშირებულია ტალღური არხების დენებთან და ძაბვებთან თანაფარდობებით:

$$\begin{aligned} I''_{\Pi} &= I_1 + I_2, \quad I'_{T} = I_a + I_b; \\ I''_{\Pi} &= \frac{1}{2}(I_1 - I_2), \quad I''_{T} = \frac{1}{2}(I_a - I_b); \\ U'_{\Pi} &= \frac{1}{2}(U_1 + U_2), \quad U'_{T} = \frac{1}{2}(U_a + U_b); \\ U''_{\Pi} &= U_1 - U_2, \quad U''_{T} = U_a - U_b; \end{aligned}$$

სადაც  $I_1, I_2, U_1, U_2$ - ფაზური სადენების დენები და ძაბვები;

$I_a, I_b, U_a, U_b$ -გვარლების დენები და ძაბვა;  $I''_{\Pi}, I''_{T}, U'_{\Pi}, U'_{T}$ - $2\Pi$ -3 და  $\Pi$ - $\Pi$  არხების დენები და ძაბვა;  $I'_{T}, I''_{T}, U'_{T}, U''_{T}$ - $2T$ -3 და  $T$ - $T$  არხების დენები და ძაბვა;

თუ გვარლები ჩამიწებულია იდეალურად, სამართლიანია პირობა  $U_a = U_b = 0$ , მაშინ ტელეგრაფული განტოლებათა სისტემას გააჩნია სახე:

$$\begin{aligned} -\frac{dU_{II}'}{dX} &= Z' I_{II}', & -\frac{dU_{II}''}{dX} &= Z'' I_{II}''; \\ -\frac{dI_{II}'}{dX} &= \gamma' U_{II}', & -\frac{dI_{II}''}{dX} &= \gamma'' U_{II}''; \end{aligned}$$

$$\text{სადაც } Z' = \frac{1}{2} \left[ Z_{II} + Z_{III} - \frac{(Z_a + Z_b)^2}{Z_T + Z_{TT}} \right]; \quad (4.1)$$

$$Z'' = 2 \left[ Z_{II} - Z_{III} - \frac{(Z_a - Z_b)^2}{Z_T - Z_{TT}} \right]; \quad (4.2)$$

$$\gamma' = 2(\gamma_{II} + \gamma_a + \gamma_b), \quad (4.3)$$

$$\gamma'' = \gamma_{III} + \frac{1}{2}(\gamma_{II} + \gamma_a + \gamma_b), \quad (4.4)$$

$$\gamma_{II} = \omega C_{\pi}; \quad \gamma_{III} = \omega C_{III}; \quad \gamma_a = \omega C_a; \quad \gamma_b = \omega C_b$$

აქ  $Z_{II}, Z_T$ -საკუთარი წინაღობა კონტურების სადენი - მიწა და გვარლი - მიწა;  $Z_{III}, Z_{TT}$ -ურთიერთ წინაღობა კონტურებს შორის სადენი - სადენი და გვარლი-გვარლი;  $Z_a, Z_b$ -ურთიერთ წინაღობა კონტურებს შორის სადენი - მიწა და უახლოესი გვარლი - მიწა და სადენი - მიწა და შორეული გვარლი - მიწა;  $C_{\pi}$ -მიწაზე სადენის ტევადობა;  $C_a, C_b, C_{III}$ -სადენებს შორის ტევადობა და უახლოესი და შორეული გვარლებს, აგრეთვე სადენებს შორის. შევნიშნავთ, რომ პირველი წევრები  $Z', Z'', \gamma', \gamma''$  გამოსახულებების, აღნიშნული II და III ინდექსებით, პასუხობენ ბიპოლიარული ორსადენიანი ხაზებს, რომლებსაც არ გააჩნიათ გვარლი. ეს აღნიშნავს, რომ იდეალურად ჩამიწებული გვარლის შემთხვევაში 2π-3 და π-π კონტურების პარამეტრებში ითვალისწინებენ შესწორებებს, გამოთვლილი შემდეგი სახით:

$$\left. \begin{aligned} \Delta Z' &= -\frac{1}{2} \frac{(Z_a + Z_b)^2}{Z_T + Z_{TT}} \\ \Delta Z'' &= -2 \frac{(Z_a - Z_b)^2}{Z_T - Z_{TT}} \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

$$\Delta \gamma' = 2(\gamma_a + \gamma_b); \quad \Delta \gamma'' = \frac{1}{2}(\gamma_a + \gamma_b) \quad (4.6)$$

ამგვარად, მ.ძ-ის გადამცემ ხაზებში დენის ჰარმონიკების ანგარიშის ამოცანა, როცა გააჩნია ორი ფაზური სადენი და ჩამიწებული ჭეკა-ქუხილის დამცავი გვარლი, მიღის ტელეგრაფული



განტოლებების ამოხსნასთან ორი ერთსადენიანი კონტურებით. ასეთი ამოცანის ამოხსნა კარგადაა ცნობილი, ის შეიძლება მიღებული იქნეს ანალიზური ფორმით.

აუცილებელია ავნიშნოთ, რომ ტელეგრაფული განტოლებების ამოხსნის დროს  $2\pi$ -3 კონტურებში (არსებში) დენი მასში  $I'_n$  არ უდრის მიწაში დენს  $I_3$ , რადგანაც ხაზში გვარლის გარეშე, განისაზღვრება როგორც დენების სხვაობით მიწაში და გვარლებში ( $I_3 - I'_n$ ). მარტივად შეიძლება ვაჩვენოთ, რომ დენები გვარლში მიიღება გამოსახულებებიდან

$$I'_T = -\frac{Z_a + Z_b}{Z_T + Z_{TT}} I''_n;$$

$$I''_T = -\frac{Z_a - Z_b}{Z_T + Z_{TT}} I''_n;$$

მ.ძ-ის გადამცემ ხაზში ჰარმონიკების ანგარიში ჭექა-ქუხილის იდეალური ჩამამიწებელი გვარლის არსებობის დროს არ წარმოადგენს განსაკუთრებულ სირთულეს. ამოცანა მკვეთრად რთულდება, თუ არა გვაქვს გვარლის იდეალური ჩამიწება, ე.ი. პირველი, თუ გვარლის ჩამიწების ბიჯი არაერთნაირია ხაზის გასწვრივ და მეორე, გვარლის ნებისმიერ წერტილში ძაბვა არ შეიძლება მივიღოთ ნულის ტოლად. ამ შემთხვევაში გვიხდება მივმართოდ ელექტრომაგნიტური პროცესების ანგარიშის მეთოდებს, რომლებიც გამოიყენება არაერთგვაროვანი მ.ძ-ის გადამცემი ხაზისთვის. აღნიშნული მეთოდების რეალიზაცია მოითხოვს მივმართოდ კომპიუტერულ ტექნიკას.

არაერთგვაროვანი მრავალსადენიანი ხაზისთვის ტელეგრაფული განტოლებების ამოხსნისათვის მეტად მოხერხებულია გამოყენებული იქნეს „ტალღური არსების“ მეთოდი, სადაც გამოიყენება ტელეგრაფული განტოლებების სისტემის ჩაწერა მატრიცულ ფორმაში:

$$\frac{d^2 U_s}{dX^2} = \gamma_s^2 U_s (s = 1, 2, \dots, n),$$

რომლის ამოხსნას გააჩნია შემდეგი სახე:

$$U_s = e^{-\gamma_s X} B_1(s) + e^{\gamma_s X} B_2(s), \quad (4.7)$$

სადაც  $B_1(s), B_2(s)$ -ინტეგრირების მუდმივები, განსაზღვრული სასაზღვრო პირობებიდან ხაზის ბოლოებში.

მატრიცულ ფორმაში (4.7)-ის ამოხსნა ჩაიწერება შემდეგი სახეში:

$$U_s = e^{-\gamma s X} B_1(s) + e^{\gamma s X} B_2(s), \quad (4.8)$$

სადაც  $e^{\gamma x}$ -ექსპონენციალური ფუნქცია  $\gamma x$  დიაგონალური მატრიციდან.

კავშირი სადენების დენებსა და ძაბვებს შორის  $(U, I)$ , ტალღური არხების დენებსა და ძაბვებს  $(U_s, I_s)$  გააჩნია შემდეგი სახე:

$$\begin{aligned} U &= \lambda U_s; \quad I = \delta I_s; \\ U_s &= \lambda^{-1} U; \quad I_s = \delta I, \end{aligned} \quad (4.9)$$

სადაც  $\lambda, \delta$  -კვადრატული მატრიცები  $P$  და  $P'$  მატრიცების საკუთარი ვექტორების, როცა  $P = ZY$ ;  $P' = YZ$ ,

სადაც  $Z, Y$  - გრძივი წინაღობების და განივი გამტარობების კვადრატული სიმეტრიული მატრიცები. მუდმივი გავრცელება  $\gamma_s$  ტალღური არხების, წარმოადგენს  $\gamma$  დიაგონალური მატრიცის წევრებს განსაზღვრული როგორც

$$\gamma^2 = \lambda^{-1} P \lambda$$

(4.8) და (4.9) თანაფარდობის გამოყენებით, შეიძლება ჩავწეროთ მრავალპოლუსის მატრიცული განტოლება, რომელიც ეკვივალენტურია ერთგვაროვანი მრავალსადენიანი ხაზის მონაკვეთის.

ასეთი განტოლება შეიძლება იყოს, მაგალითად,  $A$  ტიპის მატრიცული დამოკიდებულება:

$$\left. \begin{aligned} U_H &= A_{11} U_K + A_{12} I_K; \\ I_H &= A_{21} U_K + A_{22} I_K \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

სადაც " $H$ " ინდექსი მიეკუთვნება ხაზის საწყისს, ხოლო " $K$ " ინდექსი ხაზის ბოლოს;

$$\begin{aligned} A_{11} &= \lambda c h \gamma \ell \lambda^{-1}; \quad A_{12} = \lambda s h \gamma \ell z_c \delta^{-1}; \\ A_{21} &= \delta z_c s h \gamma \ell \lambda^{-1}; \quad A_{22} = \delta c h \gamma \ell \delta^{-1} \end{aligned} \quad (4.11)$$

ეხლა განვიხილოდ გადამცემ ხაზში დენის ჰარმონიკების შეზღუდვის ღონისძიებები. ჯერ განვიხილოდ ტრადიციული ღონისძიებები, როგორცაა: მაგლუვებელი წრფივი რეაქტორების ინდუქციურობების გაზრდა და ხაზებზე ფოლტრების დაყენება. მაგლუვებელი რეაქტორი ასრულებს მუდმივი დენის ელექტროგადაცემაში მრავალ ფუნქციას, მათ შორის როგორცაა პასუხსაგები, როგორც ქვესადგურის დაცვა ჭექა-ქუხილისაგან,

შემცირება წრედების ურტიერთგავლენისაგან, ინვერტორის ვენტილებში დენის ზრდის სიჩქარის შეზღუდვა მისი გადაყირავების დროს და ა.შ.

მუდმივი დენის ელექტროგადაცემაში რეაქტორის ინდუქციურობის სიდიდე შეადგენს 0,5-1,0 კნ.

უნდა აღინიშნოს რეაქტორი, რომელიც უნდა იყოს გათვლილი გარდამქმნელის მუშა დენზე და ნომინალურ ძაბვაზე, წარმოადგენს მეტად ძვირად ღირებულ აპარატურას. ამიტომ მისი ინდუქციურობის გაზრდა ჰარმონიკების პოზიციიდან 1,0 კნ-ზე მეტად არამიზანშეწონილია. ეს გამომდინარეობს აგრეთვე იქედან, რომ დენის ჰარმონიკების სიდიდე უკუპროპორციულია რეაქტორის ინდუქციურობის, და ამიტომ რეალური მნიშვნელობის დროს ხაზის შემავალი წინაღობის აბსოლიტური ნაზრდით რეაქტორის ინდუქციურობით 1,0 კნ-ზე ზევით ვლდებულობთ ხაზში დენის ჰარმონიკების უმნიშვნელო შემცირებას.

ჰარმონიკების შეზღუდვის უფრო ეფექტურ საშუალებას წარმოადგენს ხაზის ბოლოებში  $L - C$  ფილტრების ჩართვა. მრავალრგოლიანი ფილტრების დაყენებით შეიძლება მიღწეული იქნეს სრული გამორიცხვა ხაზში დენის ჰარმონიკების. მეორე მხრივ პრაქტიკულად ფილტრების ჩართვის დროს ვაწყდებით რიგ სიძნელეებს.

ელექტროგადაცემის მუშაობის დროს ფილტრების გავლით გადის დენის ჰარმონიკები არსებიდან სადენი - სადენი. ეს წინაღობა რეზონანსის პირობებში შეიძლება გახდეს ტოლი  $Z_{min} = \pm Z_c'' a'' l$ , ე.ი. შეადგენს არა უმეტეს 20 ომი. ასეთი წრედის დაშუქება შეიძლება ან ძალიან ძლიერი ფილტრით, რომელსაც გააჩნია დაბალი ტალღური წინაღობა და შესაბამისად დიდი ტევადობა, ან ფილტრი პრაქტიკულად იდეალური ავტომატური აწყობით. პირველ შემთხვევაში ფილტრი აღმოჩნდება მეტისმეტად ძვირად ღირებული, ხოლო მეორე შემთხვევაში ვერ უპასუხებს საიმედოობის მაღალ მოთხოვნებს, წაყენებული რეგულირებადი ფილტრების მიმართ. გარდა ამისა, გააჩნია კიდევ ერთი უარყოფითი მხარე  $L - C$  ფილტრებს, რომელიც დაკავშირებულია მის, შემადგენლობაში კონდენსატორთა ბატარეების არსებობა. ასეთი ბატარეები გათვლილია ელექტროგადაცემის წრედის სრულ მუშა ძაბვაზე და კომპლექტდება ერთეულოვანი კონდენსატორების

მიმდევრობით - პარალელური დიდი რიცხვით. ამიტომ აღნიშნული მიზეზის გამო  $L - C$  მაღალი ძაბვის განივი ფილტრები ვერ პოულობენ ფართო გამოყენებას მუდმივი დენის ელექტროგადაცემაში.

გარდა ზემოთ თქმულისა არსებობს აგრეთვე ჰარმონიკების შეზღუდვის არატრადიციული მეთოდი, რომლის არსი მდგომარეობს შემდეგში. სპეციალური კონსტრუქციის სადენი, რომელიც შეიძლება გამოყენებული იქნეს დენის ჰარმონიკების შემცირებით ხაზში, განსხვავდება ჩვეულებრივი ფოლად ალუმინის სადენისაგან იმით, რომ მასში ფოლადის სადენები გამოაქვთ გარე ნახვევით, რაც მკვეთრად აამაღლებს მის აქტიურ წინაღობას ჰარმონიკების მაღალ სიხშირეზე.

ამგვარად, სადენების სპეციალური კონსტრუქციის გამოყენება, როგორცაა გარედ გამოტანილი ფოლადის ნახვევი წარმოადგენს ეფექტურ ღონისძიებას მ.ძ-ის ხაზებში ჰარმონიკების შემცირებისა, თანაც მნიშვნელოვანია, რომ ეს ღონისძიება არ მოითხოვს დამატებით დანახარჯებს და გავლენას არ ახდენს ელექტროგადაცემის ენერგეტიკულ მახასიათებლებზე.

## **4.2. მუდმივი დენის ელექტროგადაცემის გარდამქმნელების ქვესადგურებში მაღალი რიგის ჰარმონიკების და რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია**

მუდმივი დენის ელექტროგადაცემის გარდამქმნელების ქვესადგური მუშაობის დროს წარმოქმნის არასინუსოიდურ დატვირთვას მომიჯნავე ენერგოსისტემისთვის. ასეთი დატვირთვისათვის სიმძლავრის გამოსახულება  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$  აღმოჩნდება არა მართებული და შემოდის დამახინჯების სიმძლავრის ცნება, რომელიც ხასიათდება დენის მრუდის დამახინჯებით, რომელსაც მოითხოვს ქვესადგური ქსელიდან. ამ შემთხვევაში ცნება აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის შენარჩუნებულია მხოლოდ დენისა და ძაბვის პირველი რიგის ჰარმონიკისათვის მომიჯნავე ენერგოსისტემის მხარეს. სრული

სიმძლავრე არასინუსოიდური დატვირთვის, რომელსაც წარმოადგენს გარდამქმნელი, განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + T^2}, \quad (4.12)$$

სადაც  $P_1$ -პირველი ჰარმონიკის აქტიური სიმძლავრე;  $Q_1$ -პირველი ჰარმონიკის რეაქტიული სიმძლავრე;  $T$ -დამახინჯების სიმძლავრე.

პირველი ჰარმონიკის სრული სიმძლავრე

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (4.13)$$

(4.12) და (4.13) გამოსახულებების გეომეტრიული ახსნა-განმარტება წარმოდგენილია ნახ.4.1. სრული სიმძლავრე  $S$  მიიღება გეომეტრიული ჯამით პირველი რიგის ჰარმონიკის  $S_1$  სრული სიმძლავრის და სივრცეში დამახინჯების  $T$  სიმძლავრის. როგორც ცნობილია, შეიძლება მივიღოთ სიმძლავრის კოეფიციენტის გამოსახულება: სიმძლავრის კოეფიციენტი პირველი რიგის ჰარმონიკის მიხედვით

$$\cos\varphi_1 = P_1/S_1 \quad (4.14)$$

რეაქტიული სიმძლავრის კოეფიციენტი პირველი რიგის ჰარმონიკის მიხედვით

$$\operatorname{tg}\varphi_1 = Q_1/P_1 \quad (4.15)$$

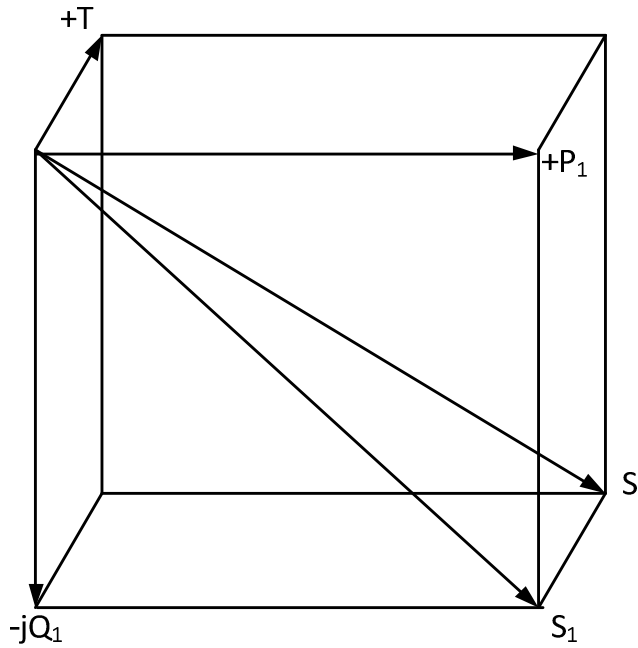
დამახინჯების კოეფიციენტი

$$k_H = \frac{S_1}{S} = \sqrt{1 - \left(\frac{T}{S}\right)^2} \quad (4.16)$$

სიმძლავრის სრული კოეფიციენტი

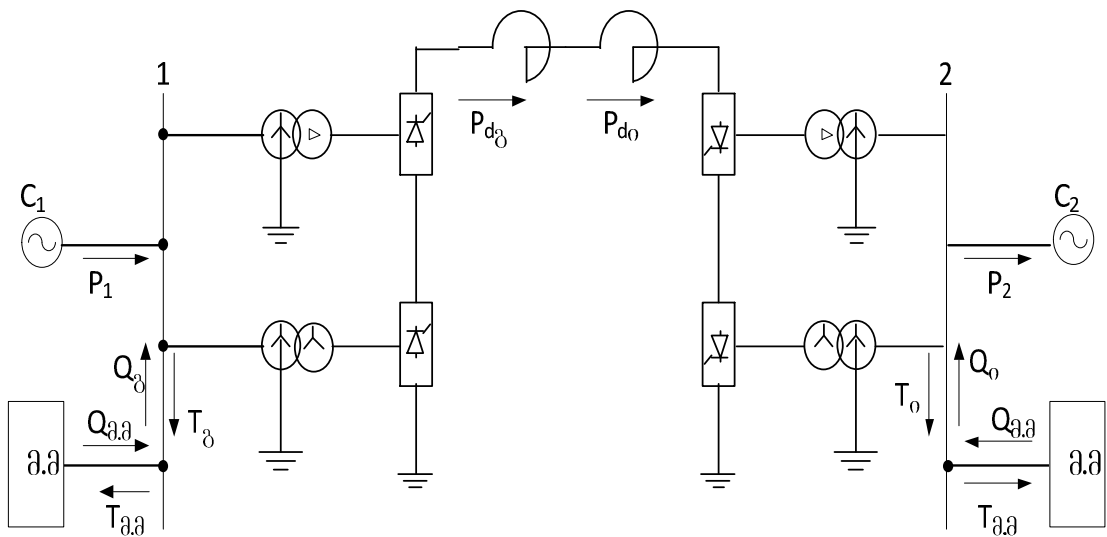
$$\chi = P_1/S = \cos\varphi_1 k_H \cos\varphi'_1 \quad (4.17)$$

შემდგომში ინდექს “1”-ს პირველი რიგის ჰარმონიკის სიმძლავრის მდგენელს არ უჩვენებთ.



ნახ. 4.1. ცვლადი დენის ქსელიდან გარდამქნელი ქვესადგურის მიერ მოთხოვნილი სრული სიმძლავრის მდგენელები

ესლა განვიხილოთ სიმძლავრის ბალანსი ქსელის სალტეზე, მომიჯნავე მუდმივი დენის ელექტროგადაცემის გარდამქნელების ქვესადგურთან (მდგვ). დაუშვათ მდგვ მუშაობს სქემის მიხედვით პლიუსი - მიწა და აკავშირებს  $C_1$  და  $C_2$  ენერგოსისტემებს (ნახ. 4.2).



ნახ.4.2. მდგვ-ის ერთი პოლუსის პრინციპული სქემა

მდგ-ის მუშაობის დროს აღიძვრება აუცილებლობა რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის, რომელსაც მოითხოვს გარდამქნელი ქვესადგური ნებისმიერი ტიპის. ვინაიდან მომიჯნავე ენერგოსისტემას ჩვეულებრივ არ გააჩნია რეაქტიული სიმძლავრის რეზერვი, ქვესადგურზე აუცილებელია დაიდგას მაკომპენსირებელი მოწყობილობა, რომელიც უზრუნველყოფს სიმძლავრის კოეფიციენტის  $\cos\varphi$ -ის შენარჩინების მომიჯნავე  $C_1$  სისტემის და  $C_2$  სისტემის სალტეზე, რომელიც ერთის ტოლია. თითოეული გარდამქნელი წარმოადგენს რეაქტიული სიმძლავრის მომხმარებელს და დამახინჯების სიმძლავრის გენერატორს. ამიტომ მაკომპენსირებელი მოწყობილობა (მმ), დადგმული ჩვეულებრივ მომიჯნავე ენერგოსისტემის სალტეზე, უნდა უზრუნველყოს რეაქტიული სიმძლავრის გენერაცია, აუცილებელი გარდამქმნელის მუშაობისათვის, და დამახინჯების მოთხოვნილი სიმძლავრისათვის, გენერირებული გარდამქმნელის მიერ.  $C_1$  სისტემის 1 სალტეზე სიმძლავრის ბალანსი, მომიჯნავე გამმართველი ქვესადგურთან, შემდეგია:

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{d_0} + \Delta P_{\delta}; \\ Q_{a.a} &= Q_{\delta}; \\ T_{a.a} &= T_{\delta}, \end{aligned} \quad (4.17)$$

სადაც  $P_1$ -აქტიური სიმძლავრე, გაცემული  $C_1$  სისტემის მიერ;  $P_{d_0}$ -აქტიური სიმძლავრე გადამცემი ხაზის დასაწყისში (ქვესადგურის გამმართველის გამოსასვლელში);  $\Delta P_{\delta}$ -აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები გამმართველი ქვესადგურის მოწყობილობაში;  $Q_{a.a}$ -რეაქტიული სიმძლავრე, გამომუშავებული მაკომპენსირებელი მოწყობილობით;  $Q_{\delta}$ -რეაქტიული სიმძლავრე, მოთხოვნილი გამმართველი ქვესადგურით;  $T_{a.a}$ -დამახინჯების სიმძლავრე, გამომუშავებული გამმართველი ქვესადგურით.

$C_2$  სისტემის 2 სალტეზე სიმძლავრის ბალანსი მომიჯნავე ინვერტორთან, შემდეგია:

$$P_2 = P_{d_0} - \Delta P_{\sigma}; \quad (4.18)$$

$$P_{d_0} = P_{d_{\delta}} - \Delta P_{\delta} \quad (4.19)$$

$$Q_{a.a} = Q_{\sigma};$$

$$T_{a,a} = T_o$$

სადაც  $\Delta P_b$  - აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები მუდმივი დენის ხაზში და წრფივ რეაქტორში. დანარჩენი აღნიშვნები ანალოგიურია წინა აღნიშვნების. მდევ მუშაობის დროს, როგორც ჩანს წინა გამოსახულებებიდან,  $C_1$  სისტემიდან  $C_2$  სისტემაში გადაეცემა მხოლოდ აქტიური სიმძლავრე. დანარჩენი სიმძლავრის მდგენელები ცირკულირებს გარდამქნელსა და მაკომპენსირებელ მოწყობილობას შორის.

მდევ-სათვის შემოგვყავს ცნება მოკლე შერთვის ფარდობა (მ.შ.ფ), განსაზღვრული გამოსახულებით

$$\text{მ.შ.ფ} = S_{a,a} / P_d, \quad (4.20)$$

სადაც  $S_{a,a}$  - სისტემის მ.შ-ის სიმძლავრე, მომიჯნავე მდევ-თან 1 ან 2 სალტეზე;  $P_d$ -მდევ სიმძლავრე ხაზის თავში ან ბოლოში.

ნახ. 4.2-ის შესაბამისად გვაქვს

$$\text{მ.შ.ფ}_1 = S_{a,a1} / P_{d1}; \quad \text{მ.შ.ფ}_2 = S_{a,a} / P_{d2} \quad (4.21)$$

როცა  $\text{მ.შ.ფ} > 3$  მომიჯნავე სისტემა ითვლება ძლიერი, როცა  $\text{მ.შ.ფ} < 3$  - სუსტი.

ძლიერი სისტემისათვის ძაბვის დამახინჯება მომიჯნავე სალტეზე შეიძლება მხედველობაში არ მივიღოთ და ჩავთვალოდ, რომ ძაბვა აღნიშნულ სალტეზე სინუსოიდურია.

სუსტი სისტემისათვის მიღებულია შევასრულოთ სქემების გარდაქმნა მომიჯნავე სისტემის და ვიპოვოთ მისი ეკვივალენტური ემპ, რათა განვსაზღვროთ რეაქტიული სიმძლავრე პირველი ჰარმონიკის, რომელიც სისტემამ შეიძლება გასცეს სალტეზე მომიჯნავე ან მივიღოთ აღნიშნული სალტიდან, თუ მ.შ ვერ უზრუნველყოფს სიმძლავრის ბალანსს ნახ.4.2-ის შესაბამისად. როგორც ნაჩვენებია [19], რეაქტიული სიმძლავრის მოთხოვნა მიმდინარეობს ვენტილის მყისი წინაღობის შემცირების დროს, მართვად ელექტროდზე იმპულსის მიწოდების დროს ( $dr/dt < 0$ ). ამ შემთხვევაში რეაქტიული სიმძლავრის მოთხოვნა მიმდინარეობს წრედში მართვადი ვენტილებით, უფრო მეტიც თუ აღნიშნულ ვენტილთან მიმდევრობით ჩართულია აქტიური წინაღობა.



მართვის დახმარებით შეიძლება დავაყოვნოთ ვენტილის გაღება  $\alpha$  კუთხით მკვებავი ძაბვის მიმართ. შესაბამისად  $\alpha$  კუთხით დაძრულია ვენტილის დენი ძაბვის მიმართ, ე.ი. გამოვლინდება ფაზათა ძვრა დენის პირველი ჰარმონიკასა შედარებით ძაბვის პირველი ჰარმონიკასთან ჩამორჩენის მხარეს. ფაზური დენის პირველი რიგის ჰარმონიკის ძვრის კუთხე ფაზური ემძ-ის მიმართ განისაზღვრება გამოსახულებებით:

გამმართველისათვის როცა  $\alpha < 10^0$

$$\varphi \cong \alpha + \frac{2}{3}\gamma; \quad (4.22)$$

გამმართველისათვის როცა  $\alpha \geq 10^0$

$$\varphi \cong \alpha + \frac{\gamma}{2}; \quad (4.23)$$

ინვერტორისათვის

$$\varphi \cong \delta + \frac{\gamma}{2} \quad (4.24)$$

რეაქტიული სიმძლავრე, მოთხოვნილი გარდამქნელისგან ქსელიდან, განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით:

$$Q = UI \sin \alpha \quad (4.25)$$

გამოსახულება (4.22)-(4.24) წარმოგიდგება საკმაოდ უხეში მიახლოებით და იძლევა ცდომილების 10%-მდე რეაქტიული სიმძლავრის მნიშვნელობის პრაქტიკულ დიაპაზონში. ზუსტი გამოსახულება  $tg\varphi$  განსაზღვრისათვის ცნობილი კუთხის დაყოვნების და კომუტაციის მოცემულია ქვემოთ:

$$Q/P = tg\varphi = \frac{2\gamma + \sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + \gamma)}{\cos 2\alpha - \cos 2(\alpha + \gamma)} \quad (4.26)$$

ინვერტორული რეჟიმისათვის (4.26)-ში უნდა შევცვალოთ  $\alpha, \delta$  – თი.

გამმართველი რეჟიმისათვის

$$\frac{Q_1}{P_1} \cong tg 22,5^0 = 0,41;$$

ღრმა რეგულირების რეჟიმისათვის

$$\frac{Q_1}{P_1} \cong tg 90^0 = \infty (P_1 = 0);$$

ინვერტორის რეჟიმისათვის

$$\frac{Q_1}{P_1} \cong tg 27,5^0 = 0,52;$$

დამახინჯების სიმძლავრე სინუსოიდური ძაბვის დროს სისტემის მომიჯნავე სალტეზე განისაზღვრება როგორც

$$T = U_1 \sqrt{\sum_{\gamma=2}^{\infty} I_{\gamma}^2},$$

სადაც  $I_{\gamma} - \gamma$  დენის ჰარმონიკის მომქმედი მნიშვნელობა.

რადგანაც დამახინჯების სიმძლავრე გამოწვეულია სხვადასხვა სიხშირის დენების გავლით, რთულ სისტემაში, რომელიც შეიცავს ინდუქციური და ტევადური წინაღობას, არ შეიძლება განისაზღვროს დამახინჯების სიმძლავრე მთელი სისტემის ცალკეული ელემენტების დამახინჯების სიმძლავრეების ალგებრული ჯამით. იმავე დროს დასაშვებია გავანაწილოთ დამახინჯების სიმძლავრე გარდამქმნელი ტრანსფორმატორის გრაგნილების მიხედვით, შესაბამისად აღნიშნული გრაგნილების რეაქტიული წინააღობების, რადგან დამახინჯების სიმძლავრე თამაშობს არსებით როლს სიმძლავრის ბალანსის განსაზღვრაში გარდამქმნელის სალტეზე და გარდამქმნელი ტრანსფორმატორის სრული სიმძლავრის განსაზღვრაში.

ეხლა განვიხილოდ ენერგეტიკული მახასიათებლები გარდამქმნელი ქვესადგურის ე.ი. დავამყაროდ დამოკიდებულება მომიჯნავე ქსელის მხარეზე სიმძლავრის მდგენელების გარდამქმნელის დატვირთვისაგან.

მიზანშეწონილია ენერგეტიკული მახასიათებლები განვიხილოთ ფარდობით ერთეულებში. უნივერსალური ენერგეტიკული მახასიათებლების მიღებისათვის, დამოუკიდებელი მომიჯნავე სისტემის რეაქტიული წინააღობისაგან, შემოგვაქვს შემდეგი ბაზისური სიდიდეები:

$$U_b = U_{do} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} \sqrt{3} E_{\phi}; \quad (4.27)$$

$$I_b = \frac{\sqrt{2} \sqrt{3} E_{\phi}}{2X_{\gamma}}; \quad (4.28)$$

$$P_b = U_b I_b = \frac{9}{\pi X_{\gamma}} E_{\phi}^2, \quad (4.29)$$

სადაც  $E_{\phi}$ -

ცვლადი დენის მომიჯნავე სისტემის ფაზური ემძიმედი მნიშვნელობა;  $X_{\gamma}$ - მომიჯნავე სისტემის გათვალისწინებით გარდამქმნელის კომუტაციის რეაქტიული წინააღობა.

გარდამქნელის დატვირთვა შეიძლება განისაზღვროს გარემო სასიათებლებიდან.  
 ან. კერძოდ, სამფაზა ბოგირულის ქემისათვის, სამართლიანია გარემო სასიათებლები ფარდობით ერთეულებში, როცა შემოდებულ იადაბაზის ურისი დიდებები.

გამმართველისათვის

$$U_{d*} = \cos\alpha - \frac{1}{2}I_{d*}; \quad (4.30)$$

ინვერტორისათვის

$$U_{d*} = \cos\delta - \frac{1}{2}I_{d*}; \quad (4.31)$$

მოცემული ბაზისური პირობებისათვის გვაქვს:

$$I_{d*} = \frac{I_d}{I_\delta} = \frac{I_d 2X_\gamma}{\sqrt{2}\sqrt{3}E_\phi} = \frac{I_\phi X_\gamma}{E_\phi} = X_{\gamma*},$$

ე.ი. გარდამქნელის დატვირთვის დენი ფარდობით ერთეულებში ტოლია კომუტაციის რეაქტიული წინააღობის ფარდობით ერთეულებში. კავშირი დაყოვნების კუთხესა და კომუტაციის კუთხეს შორის განისაზღვრება თანაფარდობებიდან:

გამმართველისათვის

$$I_{d*} = \cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma); \quad (4.32)$$

ინვერტორისათვის

$$I_{d*} = \cos\delta - \cos\beta \quad (4.33)$$

თანაფარდობა (4.30)-(4.33) იძლევა საშუალებას განისაზღვროს გარდამქნელის სიმძლავრე მოცემულ მუშაობის რეჟიმში:

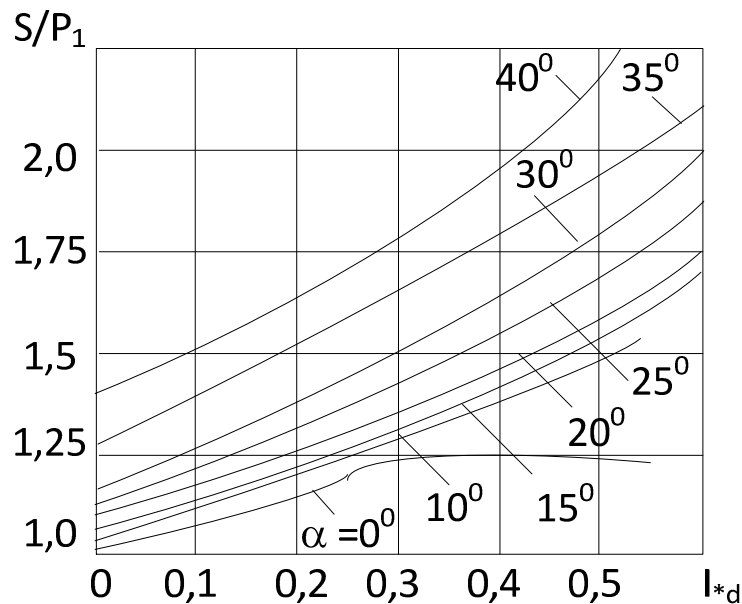
$$P_{d*} = U_{d*}I_{d*}$$

გარდამქნელის ნორმალური მუშაობის რეჟიმში პრაქტიკული დიაპაზონისთვის  $I_{d*}$  ცვალებადობის დროს 0-დან 0,6-მდე და რეგულირების  $\alpha$  კუთხის ცვლილება 0-დან 40°-მდე ნახ. 4.3-4.4 აგებულია გარდამქნელის ენერგეტიკული მახასიათებლები, ჩართული სამფაზა ბოგირული სქემით და მუშაობს რეჟიმში ( $\gamma < 60^\circ$ ): სრული სიმძლავრე  $S$ , რეაქტიული სიმძლავრე  $Q$ , დამახინჯების სიმძლავრე  $T$ . ეს დამოკიდებულებები სამართლიანია 12-ფაზა გარდამქნელებისთვის, მომუშავე ( $\gamma \leq 30^\circ$ ). ენერგეტიკული მახასიათებლის მრუდები აგებულია გამმართველი რეჟიმისთვის. ისინი სამართლიანია

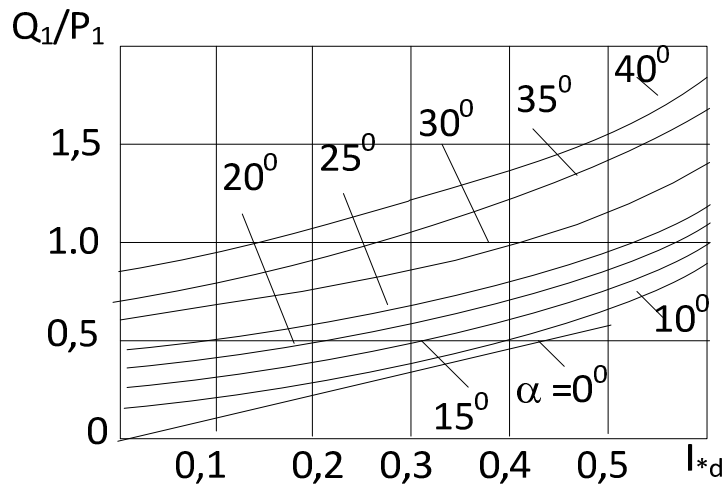
ინვერტორული რეჟიმისთვის, თუ ჩავთვლით რომ  $\alpha = \delta$ . აღნიშნული მახასიათებლები უშუალოდ შეიძლება განისაზღვროს გარდამქმნელის სრული სიმძლავრის მდგენელები მოცემული მისი დატვირთვისათვის ან მოცემული კომუტაციის რეაქტიული წინააღობისთვის.

პრაქტიკულ დიაპაზონში მნიშვნელობა  $I_{d*} = 0,15 \div 0,20$ ,

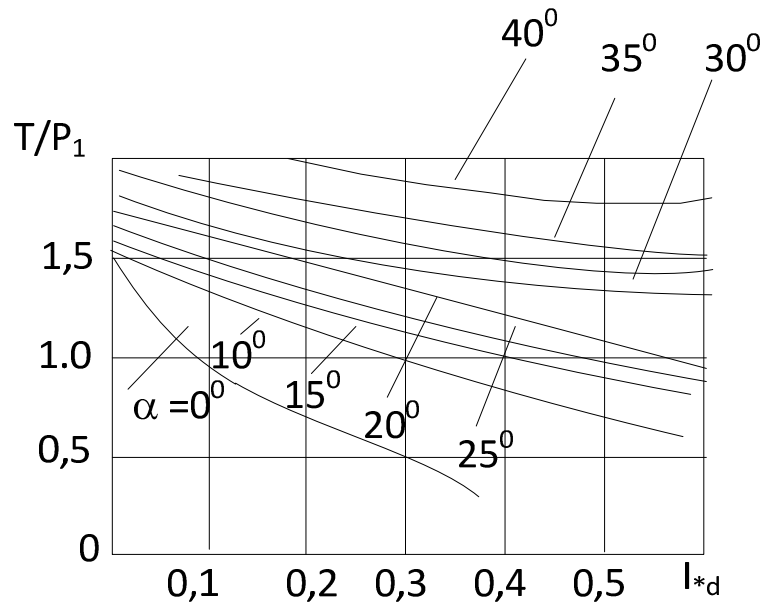
დაყოვნების კუთხე  $\alpha \leq 10^\circ$  და მარაგის კუთხე  $\delta \leq 20^\circ$ , როგორც ჩანს ნახ.4.4, გარდამქმნელი მოითხოვს ქსელიდან 0,5-0,65 კვარ რეაქტიულ სიმძლავრეს 1 კვტ გარდამქმნელის აქტიურ სიმძლავრეზე. ერთდროულად ის გასცემს დამახინჯების სიმძლავრეს ზღვრებში 0,22-0,25 კვ.ა, 1 კვტ გარდამქმნელის აქტიურ სიმძლავრეზე, როგორც ნაჩვენებია ნახ.4.5.



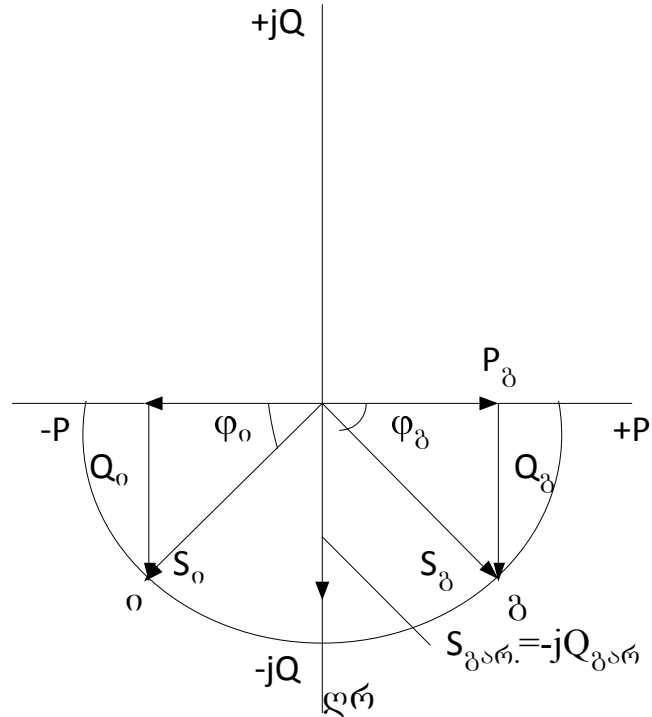
ნახ.4.3. გარდამქმნელის სრული სიმძლავრის დამოკიდებულება გამართული დენსა და  $\alpha$  კუთხესთან



ნახ.4.4. გარდამქმნელის რეაქტიული სიმძლავრის პირველი ჰარმონიკის დამოკიდებულება გამართული დენსა და  $\alpha$  კუთხესთან.



ნახ.4.5. გარდამქმნელის დამახინჯების სიმძლავრის დამოკიდებულება გამართულის დენსა და  $\alpha$  კუთხესთან.



ნახ.4.6. გარდამქმნელის პირველი რიგის სიმძლავრის წრიული დიაგრამა: გ- გამმართველის რეჟიმი; ი-ინვერტორის რეჟიმი; ღრ-ღრმა რეგულირების რეჟიმი.

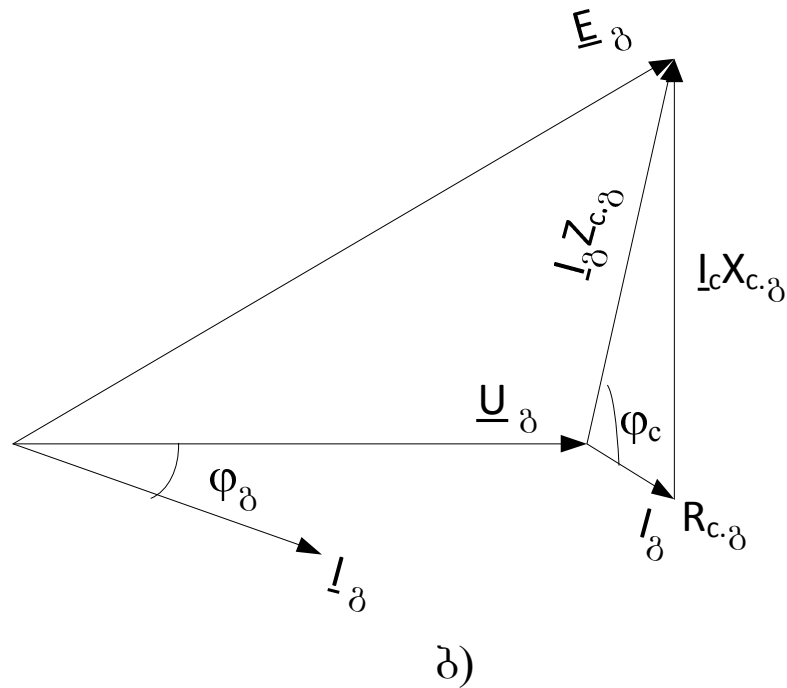
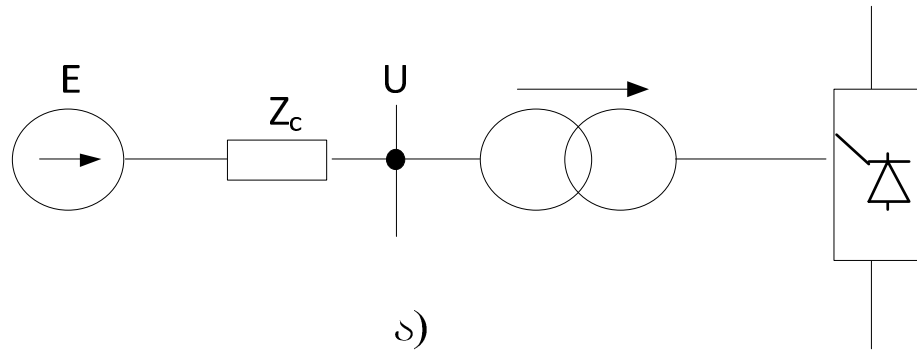
როგორც ჩანს ნახ. 4.3-4.5, გარდამქმნელის  $S, Q$  და  $T$  მკვეთრად იზრდება მოცემული დატვირთვის დროს რეგულირების  $\alpha$  კუთხის ზრდით. დატვირთვის გაზრდით იზრდება  $Q$  და მცირდება  $T$ . აქედან ჩანს, რომ მაკომპენსირებელი მოწყობილობა უნდა იყოს რეგულირებადი, რათა გარდამქმნელის დატვირთვის ცვლილების დროს მათ შეეძლოთ დაბვის შენარჩუნება მომიჯნავე სისტემის საღტეზე უცვლელად.

გარდამქმნელის პირველი ჰარმონიკის სიმძლავრის ვექტორული დიაგრამა მოცემულია ნახ.4.6, როცა  $S = const$ , რასაც ადგილი აქვს გარდამქმნელის კვებას ძლიერი სისტემიდან. ინდექსი „1“ სიმძლავრის მდგენელების აქ და შემდგომში არ იქნება ნაჩვენები. გარდამქმნელის  $\alpha$  კუთხის ცვლილების დროს იცვლება გარდამქმნელის დაბვა მუდმივი დენის მხარეზე, მეორე მხრივ თუ შევინარჩინებთ ამ შემთხვევაში  $I_d$  მუდმივ დენს, მაშინ დენი, მოთხოვნილი გარდამქმნელის მიერ ქსელიდან,

იქნება პრაქტიკულად მუდმივი ამპლიტუდას მიხედვით, მაგრამ შეიცვლება მისი ფაზა. შესაბამისად მცირედ შეიცვლება სრული სიმძლავრის პირველი ჰარმონიკა  $S$ , ხოლო შეიცვლება მისი  $P$  და  $Q$  მდგენელები. ამგვარად გარდამქმნელი წარმოგვიდგება, როგორც ფაზამბრუნნი, თანაც გამმართველის სიმძლავრე განლაგებულია მე-4 კვანდრატში, ხოლო ინვერტორის სიმძლავრე მე-3 კვანდრატში.. ღრმა რეგულირების რეჟიმში  $S_{გარ.} = -jQ_{ღარ.}$

მომიჯნავე სისტემის სიმძლავრის გავლენის შეფასებისათვის გარდამქმნელის მუშაობაზე განვიხილოთ ჩანაცვლების სქემა სისტემის საბოლოო სიმძლავრით, რომელიც მუშაობს გარდამქმნელზე (ნახ.4.7, ა). სისტემის  $E$  ე.მ.ძ. მოდებულია სრული წინაღობის იქეთ მარცხნივ  $Z_c = Z_c e^{j\phi_c} = R_c + jX_c$ . გარდამქმნელის დენებისა და ძაბვების ვექტორული დიაგრამები, მოცემულია ნახ. 4.7, ბ გამმართველ რეჟიმში. დიაგრამიდან ჩანს, რომ რაც მეტია აქტიური წინაღობა  $Z_c$ , მით მეტია ფარდობა  $E_g/U_g$  გამმართველისათვის და პირიქით, მით ნაკლებია ფარდობა  $E_o/U_o$  ინვერტორისათვის.

რაც მეტია რეაქტიული მდგენელი  $Z_c$ , მით მეტია ფარდობა  $E_o/U_o$  ინვერტორისათვის. თუ გარდამქმნელის სიმძლავრე დავარდება ნულამდე, ე.მ.ძ. სისტემის დარჩება უცვლელი, მაშინ მომიჯნავე სისტემის სალტეზე ძაბვა გაიზრდება სისტემის ე.მ.ძ-ის მნიშვნელობამდე. შესაბამისად, გადამეტძაბვა მომიჯნავე სისტემის სალტეზე გამმართველთან იქნება მით მეტი, რაც მეტია აქტიური მდგენელი  $Z_c$ , და მომიჯნავე სისტემის სალტეზე ინვერტორთან გადამეტძაბვა ინვერტორთან იქნება მით მეტი, რაც მეტია რეაქტიული მდგენელი  $Z_c$ .



ნახ.4.7. გარდამქმნელის მუშაობაზე მომიჯნავე სისტემის გაგეგნა

ნახ.4.7. სქემიდან შეიძლება მივიღოთ მარტივი თანაფარდობა გარდამქმნელის სიმძლავრის მდგენელებისათვის  $U$  სალტეზე. თუ მხედველობაში არ მივიღებთ აქტიურ დანაკარგებს გარდამქმნელში და მის ტრანსფორმატორში და ამავე დროს მხედველობაში არ მივიღებთ დენის პირველი რივის ჰარმონიკისათვის კომუტაციის კუთხეს, მივიღებთ გარდამქმნელის ნორმალური მუშაობის განტოლებიდან:

$$U_d = U_{d0} \frac{\cos\alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2} = \frac{3\sqrt{2}\sqrt{3}}{\pi} U_3 \frac{\cos\alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2}; \quad (4.34)$$

$$P = 3U_\phi I_1 \cos\varphi = U_d I_d; \quad (4.35)$$

$$I = \frac{\sqrt{2}\sqrt{3}}{\pi} I_d, \quad (4.36)$$



სადაც  $U_{\varphi}$  - მომიჯნავე სისტემის სალტეზე ფაზური ძაბვის მომქმედი მნიშვნელობა;  $I$  - გარდამქმნელის მიერ ქსელიდან მოთხოვნილი დენის პირველი რიგის ჰარმონიკის მომქმედი მნიშვნელობა.

(4.34) -(4.36) განტოლებების ერთობლივი ამოხსნით, მივიღებთ

$$\cos\varphi \cong \frac{\cos\alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2}; \quad (4.37)$$

$$\cos\varphi \cong U_d / U_{do} \quad (4.38)$$

აქედან, ქსელიდან გარდამქმნელის მიერ მოთხოვნილი დენის პირველი რიგის ჰარმონიკის აქტიური და რეაქტიული მდგენელები, შეიძლება ვიპოვოთ

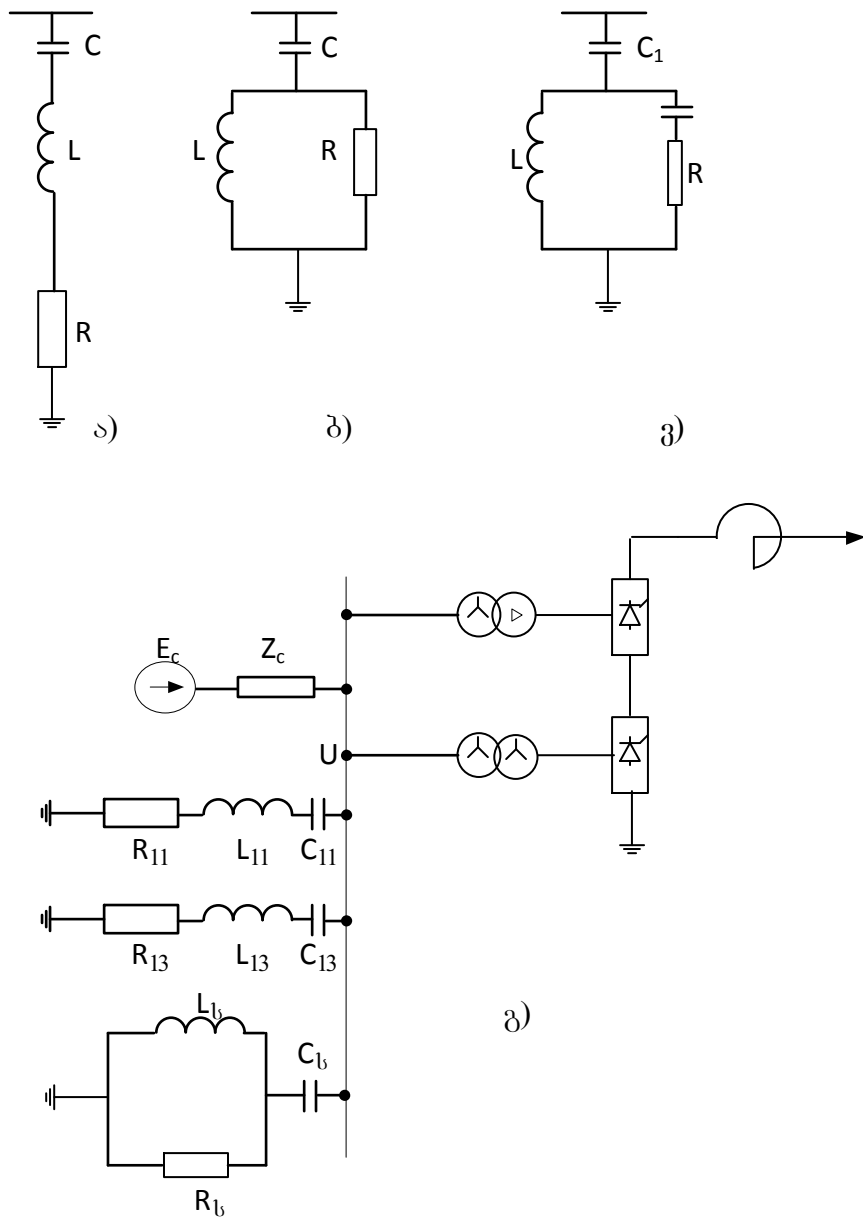
$$I_s = \frac{\sqrt{2}\sqrt{3}}{\pi} I_d \frac{\cos\alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2}; \quad (4.39)$$

$$I_r = \frac{\sqrt{2}\sqrt{3}}{\pi} I_d \frac{2\gamma + \sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + \gamma)}{4[\cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma)]} \quad (4.40)$$

### 4.3. გარდამქმელი ქვესადგურისთვის რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის საშუალებების შერჩევა

რადგან დამახინჯების სიმძლავრე წარმოიქმნება გარდამქმნელის დენის მაღალი რიგის ჰარმონიკებიდან რიგით  $\gamma = 6k \pm 1$ , სადაც  $k = 0, 1, 2, \dots$ , როცა გვაქვს 6-ფაზა გარდამქმნელის სქემა და  $\gamma = 12k \pm 1$ , როცა გვაქვს 12-ფაზა სქემა, მაშინ უპირველეს ყოვლისა აუცილებელია ავირჩიოდ მაღალი რიგის ჰარმონიკების ფილტრები, რომლებმაც უნდა გააკომპენსირონ დამახინჯების სიმძლავრე, რომელიც გენერირებულია გარდამქმნელის მიერ.

ფილტრებს ირჩევენ დენის ჰარმონიკების კომპენსაციის პირობიდან, თანაც გარდამქმნელი წარმოადგენს დენის მაღალი რიგის ჰარმონიკების წყაროს. მაღალი რიგის ჰარმონიკების ფილტრები წყვეტენ ორ ძირითად ამოცანას: აკომპენსირებს მაღალი რიგის ჰარმონიკებს და ახდენს გენერირებას პირველი რიგის ჰარმონიკის რეაქტიული სიმძლავრეს. პრინციპიალური სქემები მაღალი რიგის ფილტრების, გამოყენებული თანამედროვე მდეგ-ში ნაჩვენებია ნახ.4.8.



ნახ.4.8. მდეგ-სათვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების ფილტრების სქემები: ა- 1-ლი რიგის ვიწროზოლიანი ფილტრი; ბ-მე-2 რიგის ფართოზოლიანი ფილტრი; ვ-მე-3 რიგის ფართოზოლიანი ფილტრი; გ-მდეგ-ის ქვესადგურზე ფილტრების ტიპური კრებული.

ამჟამად გამოიყენება დემფირებული ფილტრები, ე.ი. ფილტრები დამატებითი აქტიური წინაღობით, აუარესებს ფილტრის ვარგისობას და ზრდის ზოლის გამტარობას. ეს კეთდება იმიტომ, რომ შემცირდეს სისტემის წინაღობის ცვლილების გავლენა ფილტრის მუშაობაზე.

მომიჯნავე სისტემის სალტეზე ფილტრების ტიპური კრებული 12-ფაზა გარდამქმნელის ქვესადგურზე ნაჩვენებია ნახ.4.8, გ, სადაც ჩართულია სამი დემფირებული ფილტრი: ფართოზოლიანი მე-11 და მე-13 რიგის ჰარმონიკებით.

ფილტრების შერჩევა განისაზღვრება უპირველეს ყოვლისა სახელმწიფო სტანდარტით ელექტროენერჯის ხარისხის მიმართ, არასინუსოიდურობის კოეფიციენტის შეზღუდვისათვის მომიჯნავე სისტემის სალტეზე მნიშვნელობამდე.

$$k_{\text{ა.ს}} = \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{\gamma=2}^m U_{\gamma}^2} \leq 5\%, \quad (4.41)$$

სადაც  $U_{\gamma} - \gamma$  ჰარმონიკის ძაბვა;  $U_1 - 1$ -ლი რიგის ჰარმონიკის ძაბვა. პრაქტიკული ანგარიშებისათვის შემოიფარგლებიან ჰარმონიკების ჯერადობით  $\gamma = 40$ .

არასინუსოიდურობის კოეფიციენტი წარმოადგენს ძირითად ფაქტორს, განისაზღვროს შერჩევა ვიწროზოლიანი ფილტრების.

ფილტრების შერჩევა მიმდინარეობს შემდეგი სახით:

1. ცხრილების მიხედვით [20] ან მრუდეების მიხედვით [21] განსაზღვრავენ  $I_{\gamma}$  დენის მაღალი რიგის ჰარმონიკების მაქსიმალურ მნიშვნელობას გენერირებული გარდამქმნელით სისტემაში მისი მუშაობის შესაძლო რეჟიმებისათვის, განსაზღვრული  $\delta$  და  $\gamma$  კუთხეებით.

2. გარდამქმნელის მოცემული რეჟიმისათვის  $P$  დატვირთვის მიხედვით განსაზღვრავენ მაქსიმალურ  $Q$  რეაქტიულ სიმძლავრეს, რომელსაც გარდამქმნელი მოიხმარს ქსელიდან.

3. აწოდებენ გარდამქმნელის რეაქტიული სიმძლავრის ნაწილს, რომელიც უნდა გააკომპენსიროს ყველა ფილტრები პირველ ჰარმონიკაზე

$$Q_{\text{ფ}} = (0,40 \div 0,65) Q.$$

4. გარდამქმნელს წარმოადგენენ  $\gamma$  ჰარმონიკის დენის წყაროდ და თითოეული ჰარმონიკისათვის  $\gamma = 2 \div 40$  ითვლიან სისტემის ეკვივალენტურ წინაღობას, დაყვანილი მომიჯნავე სალტესთან

$$Z_{cy} = R_{cy} + jX_{cy}$$

5. კოორდინატებში  $R_c, \pm jX_c$  აგებენ სისშირულ მახასიათებლებს - აღწერილი  $Z_{cy}$  ვექტორით  $\gamma$  ჰარმონიკის სისშირეზე, რომელიც წარმოადგენს პარამეტრს.

იმ შემთხვევაში, თუ სისშირული მახასიათებელი  $Z_c$  უცნობია მიეწოდება  $\varphi_{1max}$  და  $\varphi_{2max}$  მაქსიმალური კუთხეების მნიშვნელობები პირველ და მეოთხე კვანდრანტში  $R_c, jX$  ნახევარსიბრტყეში და თვლიან, რომ სისშირის ცვლილების დროს  $Z_c$  ვექტორის ბოლოს გეომეტრიულ ადგილას იქნება წრის ნაწილი  $R_{cmax}$  დიამეტრით, შეხლუდული  $Z_{c1}, Z_{c2}$  მნიშვნელობებით.

6. თითოეული  $\gamma$  ჰარმონიკისათვის პოულობენ ძაბვის ვარდნას ქსელის წინააღობაზე  $I_\gamma$  დენის გავლით:

$$U_\gamma = I_\gamma Z_{cy}$$

7. ირჩევენ ვიწროხოლიან ფილტრებს (ნახ.4.8, ა) ისეთ  $\gamma$  ჰარმონიკაზე, რომელსაც გააჩნია დიდი  $U_\gamma$  მნიშვნელობა. ჩვეულებრივ ესენია 3,5,7,11,13 რიგის ჰარმონიკები. ზოგოერთი სისტემისთვის შეიძლება სხვა ნაკრები ფილტრების: 3,11,13 რიგის ჰარმონიკები ან 11,13 და ა.შ.  $\gamma = 17 \div \infty$  ჰარმონიკებისათვის გათვალისწინებულია ფართოხოლიანი ფილტრები (ნახ.4.8, ბ).

8. ანაწილებენ რეაქტიულ სიმძლავრეს 1 რიგის ჰარმონიკის  $Q_{\Sigma} = U^2 \omega C_{\Sigma}$  არჩეული მაღალი რიგის ფილტრებს შორის იმგვარად, რომ შესრულდეს თანაფარდობა

$$Q_{\Sigma\gamma} = \frac{U_\gamma}{\sum_{\gamma=2}^n U_\gamma} Q_{\Sigma}, \quad (4.42)$$

სადაც  $N$ -ქვესადგურზე ფილტრების საერთო რიცხვი;  $\gamma$ -ფილტრის ნომერი, რომელიც ტოლია რიგითი ნომრით აწეობის მაღალი ჰარმონიკით. ფართოხოლიანი ფილტრებისათვის მიიღებენ  $\gamma = 17$ .

ვარგისობის არჩევა ვიწროხოლიანი ფილტრების წარმოადგენს ოპტიმიზაციის ამოცანას, რადგანაც ვარგისობის გაზრდის დროს იზრდება ალბათობა ფილტრების გადატვირთვის პარალელური რეზონანსის დროს ქსელის და ფილტრის, ხოლო დაბალი ვარგისობის დროს იზრდება ფილტრში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები.

ფილტრების განრიდებისთვის რეზონანსებისგან ქსელში აფასებენ ვარგისობის მინიმალური მნიშვნელობებით.

$$q_{min} = 1/2 Q_{max},$$

სადაც  $Q_{max}$ -ფილტრის მაქსიმალური მოშლა, ქსელის სიხშირის გადახრის გამო ნომინალურიდან და ფილტრის პარამეტრების გადახრა მოცემულიდან ანგარიშის მიხედვით.

9. ირჩევენ პარამეტრებს ვიწროზოლიანი დემფირებული ფილტრების შემდეგ თანაფარდობებით, მიეწოდება ვარგისობა  $q = 40 \div 100$ , რომელიც ჩვეულებრივ რამოდენიმეჯერ მაღალია  $q_{min}$ :

ტევადობა

$$C_{\gamma} = \frac{Q_{\gamma}}{U^2 \omega} \left[ \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2} \right]; \quad (4.43)$$

ინდუქციურობა

$$L_{\gamma} = \frac{1}{\omega_{\gamma}^2 C_{\gamma}}; \quad (4.44)$$

რეაქტიული წინაღობა

$$x_o = \sqrt{\frac{L_{\gamma}}{C_{\gamma}}} \quad (4.45)$$

ვარგისობა

$$q = x_o / R \quad (4.46)$$

აქტიური წინაღობა

$$R = x_o / q \quad (4.47)$$

ზოლის გამტარობა

$$\Delta\omega = \omega_{\gamma} / q; \quad (4.48)$$

ფილტრის სრული წინაღობა

$$Z_{\gamma} = R + j \left( \omega L_{\gamma} - \frac{1}{\omega C_{\gamma}} \right) \quad (4.49)$$

ფილტრის წინაღობის მოდული რეზონანსული სიხშირეზე

$\omega_{\gamma}: |Z_{\gamma}| = R$ , ხოლო ზოლის გამტარობის ზღვარზე

$$\Delta\omega: |Z_{\gamma}| = \sqrt{2}R$$

10. ვირჩევთ ფართოზოლიანი ფილტრის პარამეტრებს, ვაძლევთ მას  $\omega_{\gamma}$  გაწყობის სიხშირეს თანაფარდობების (4.43)-(4.45) მიხედვით.

ფართოხოლიანი ფილტრის ვარგისობას მიიღებენ 2,0-4-ის განისაზღვრება თანაფარდობით, (4.46)-ის შებრუნებით, ვიწროხოლიანი ფილტრისთვის;

$$q_{\text{ფ.ზ.}} = R/x_o, \quad (4.50)$$

აქედან აქტიური წინაღობა  $R = q_{\text{ფ.ზ.}}x_o$

სრული წინაღობა ფართოხოლიანი ფილტრის

$$Z_{\text{ფ}} = \frac{1}{j\omega c} + \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} \right)^{-1} \quad (4.51)$$

შემოგვაქვს უგანზომილებო სიდიდე ფარდობითი აწყობის სიხშირე

$$f' = \omega/\omega_{\gamma} = f/f_{\gamma} \quad (4.52)$$

და უგანზომილებო სიდიდე ფარდობითი სრული წინაღობა ფართოხოლიანი ფილტრის

$$Z'_{\text{ფ}} = \frac{Z_{\text{ფ}}}{x_o} = \frac{1}{jf'} + \left( \frac{1}{q_{\text{ფ.ზ.}}} + \frac{1}{jf'} \right)^{-1} \quad (4.53)$$

(4.53)-დან ჩანს, რომ სიხშირის გაზრდით ფილტრის ფარდობითი წინაღობა მოისწრაფის ვარგისობის მნიშვნელობისკენ:

$$\lim_{f \rightarrow \infty} Z'_{\text{ფ}} = q_{\text{ფ.ზ.}}$$

11. ვარგისობის სიდიდის აზრი მდგომარეობს შემდეგში.

ვიწროხოლიანი ფილტრებისათვის ვარგისობა განსაზღვრავს ფილტრის ზოლის გატარებას. რაც უფრო დიდია ფილტრის აქტიური წინაღობა, მით დაბალია მისი ვარგისობა და დიდია აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები, მით დიდია ზოლის გატარება და ნაკლებად დამოკიდებულია ფილტრის აწყობაზე ქსელის სიხშირის ცვლილებისგან.

ფართოხოლიანი ფილტრისათვის აქტიური წინაღობის გაზრდა, პირიქით, იწვევს ფილტრის ვარგისობის გაზრდას, ხოლო აქტიური წინაღობის შემცირებით და ვარგისობის შემცირება ერთზე ნაკლებით სიხშირული მახასიათებელი ფართოხოლიანი ფილტრის უახლოვდება სიხშირულ მახასიათებელს მისი ტევადური წინაღობით.

12. განსაზღვრავენ ვიწროხოლიანი ფილტრის მოშლას გამოსახულებით

$$Q = \frac{\Delta f}{f_\gamma} + \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta L}{L_\gamma} + \frac{\Delta C}{C_\gamma} \right); \quad (4.54)$$

სადაც  $\Delta f, \Delta L, \Delta C$ -სიხშირის გადახრა ნომინალურისაგან და ინდუქციურობის და ტევადობის პარამეტრების გადახრა შესაბამისად ნომინალურისაგან. როცა გვაქვს მოშლის მცირე მნიშვნელობა  $\theta \ll 1$  მცირეხოლიანი ფილტრის წინაღობის მოდული

$$|Z_{ფ}| \cong x_o \sqrt{q^{-2} + 4\theta^2} \quad (4.55)$$

13. ვიცით ფილტრების პარამეტრები, განვსაზღვრავთ მათ ეკვივალენტურ წინაღობას  $\omega_\gamma$  სიხშირეზე;

$$Z_{ფ.ე.γ} = \frac{1}{\sum_{\gamma=1}^N Y_{ფ\gamma}}, \quad (4.56)$$

სადაც  $Y_{ფ\gamma}$ -გამტარობა  $\gamma$  ჰარმონიკის ფილტრის.

14. ქსელის სიხშირული მახასიათებლებიდან  $\omega_\gamma$  სიხშირისათვის პოულობენ სისტემის სრულ წინაღობას  $Z_{cy}$ .

მომიჯნავე ქსელის საღტეზე ძაბვის სტაბილიზაციისათვის ფილტრებს ემატება გარდამქნელის რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის წყაროები. თანაფარდობა ფილტრის სიმძლავრესა  $Q_{ფ}$  და დამატებითი მაკომპენსირებელი მოწყობილობის სიმძლავრეს  $Q_{აა}$  შორის შეიძლება იცვლებოდეს 0,6-3 ფარგლებში.

ფილტრებთან დამატებით, მაკომპენსირებელი მოწყობილობის რიცხვში შეიძლება გამოყენებული იქნეს შემდეგი მოწყობილობები: სინქრონული კომპენსატორი; კონდენსატორთა ბატარეები, ამომრთველებით საფეხურიანი გადართვებით; გაჯერებული რეაქტორი; სტატიკური ტირისტორული კომპენსატორი;

ყველა მაკომპენსირებელი მოწყობილობებს, გარდა კონდენსატორთა ბატარეებისა, გააჩნიათ უნარი მდოვრედ არეგულირონ გაცემული და მოთხოვნილი რეაქტიული სიმძლავრე, ე.ი. მისაღებია მაკომპენსირებელ მოწყობილობად გარდამქმნელებში.

## დასკვნები

1. განსაზღვრულია ელექტრული ენერჯის ხარისხის მაჩვენებლების ოპტიმიზაციის კრიტერიუმები: ძაბვისა და დენის მრუდის ფორმის არასინუსოიდურობა, მაღალი რივის ჰარმონიკების ძირითადი წყაროები, ძაბვის მრუდის ფორმის არასინუსოიდურობის გააღვანა ელექტრომოწყობილობის მუშაობაზე.

2. დამუშავებულია ელექტრომომარაგების სისტემაში მაღალი რივის ჰარმონიკების ანგარიშის მეთოდი და მათი შემცირების ღონისძიებები.

3. შესრულებულია ელექტრული ენერჯის ხარისხის მაჩვენებლების ანგარიში, როგორცაა ძაბვის გადახრა და შესაბამისად მისი გაუმჯობესების მეთოდი და საშუალება.

4. ნაჩვენებია, რომ ელექტროსისტემის დატვირთვის საკვანძო წერტილებში ძაბვისა და სიხშირის მნიშვნელობის უზრუნველყოფა, შეიძლება მხოლოდ აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების ბალანსის შენარჩუნების გზით.

5. განხილულია ელექტროსისტემაში ძაბვისა და რეაქტიული სიმძლავრის ავტომატური რეგულირების საკითხები, სინქრონული მანქანების ნახევრადგამტარული და ციფრული აგზნების ავტომატური რეგულატორების საშუალებით. უპირატესობა ეძლევა ტიროსტორული აგზნების სისტემებს, რომლებიც წარმატებით ასრულებენ ძირითად ხარისხობრივ მაჩვენებლებს.

6. დადგენილია, რომ სიხშირის მუდმივად შენარჩუნება, უპირველეს ყოვლისა, განსაზღვრავს თვით ელექტროსისტემის მდგრად მუშაობას და მის მიერ გაცემული ენერჯის ხარისხს.

7. გამოვლენილია სიხშირის რეგულირების ალტერნატიული მოწყობილობა-ელექტროენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი, რომელიც ხასიათდება ისეთი თვისებებით, როგორცაა სწრაფქმედება, მაღალი მ.ქ.კ., >95%, ენერჯის შეყვანისა და გამოყვანის



ავტომატიზაციის სრული შესაძლებლობა, დიდი ხვედრითი ენერგოტევადობა, აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის რეგულირება.

8. განხილულია ელექტრული ენერჯის ხარისხი მუდმივი დენის ელექტრულ სისტემაში, როგორცაა მუდმივი დენის საპაერო ხაზებში დენის ჰარმონიკები და მისი შეზღუდვის საშუალებები.

9. განხილულია მუდმივი დენის ელექტროგადაცემის გარდამქმნელების დენის მაღალი რიგის ჰარმონიკები და მისი შეზღუდვის საშუალებები.

10. განხილულია მუდმივი დენის ელექტროგადაცემის გარდამქმნელების ქვესადგურებში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის საშუალებები.

## გამოყენებული ლიტერატურა

1. Железко Ю.С. Колебания напряжения в сетях с ударными нагрузками большой мощности и возможности экономической оценки ущерба от колебания. В кн.: Тезисы докладов на третьем Всесоюзном совещании по качеству электрической энергии. М., ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, 1973, с. 67-70.
2. Глинтерник С.Р. Электромагнитные процессы и режимы мощных статических преобразователей. Л.: Наука, 1970.
3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергия, 1974.
4. Вагин Г.Я. Режимы электросварочных машин. М.: Энергия, 1975.
5. Трейвас М.Д. Влияние выпрямительных установок на работу энергосистем. - Промышленная энергетика, 1956, №8, с. 1-5.
6. Церазов А.Л., Якименко Н.И. Исследование влияния несимметрии и несинусоидальности напряжения на работу асинхронных двигателей. - В сб.: Информационные материалы ВНИИЭ, 1973, вып. 702, с. 121.
7. Трейвас М.Д.; Лапин В.Б. Влияние тяговых подстанций на работу энергосистем. - Электричество, 1955, №2, с. 37-41.
8. Яндоло В.Д. Влияние двухмостового вентильного преобразователя с поочередным управлением на искажение напряжения питающей сети. - Электромеханика, 1973, №11. с.37-40
9. Либкинд М.С.; Черновец А.К. Управляемый реактор с вращающимся магнитным полем. М.; «Энергия», 1971, 79 с.
10. თ. კობრეიძე, ელექტროენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის სისტემის შექმნის სპერსპექტივა საქართველოში. ენერჯია, №2 (14), 2000 გვ.94-96.
2. Баринов В.А., Совалов С.А. Режимы энергосистем: методы анализа и управления. М.: энергоатомиздат, 1990.

12. თ.კობხრიძე, ე.ჩახხიანი.  
ელექტროენერჯის ხარისხის მაღლების აქტუალური საკითხები. “ენერჯია”, №1(69), 2014, გვ.15-21.
13. Башнин О.И., Бувич В.В., Каштелян В.Е. и др. микропроцессоры в энергетике. Л.: Наука Ленингр. отд-ние, 1982.
14. Автоматическое регулирование и управление в энергосистемах. Под ред. В.Д. Ковалева. М.: ЭнергATOMИЗДАТ, 1983.
15. Горский Ю.М., Ушаков В.А., Смирнов С.С. и др. Цифровой регулятор возбуждения и скорости синхронных машин. Электричество, 1981, №1
16. თ.კობხრიძე, ე.ჩახხიანი.  
ელექტროსისტემების დარეაქტივების იმპლავრის ავტომატური რეგულირების აქტუალური საკითხები. “ინტელექტუალი”, №26, 2014, გვ.198-204.
17. თ.კობხრიძე, ე. ჩახხიანი.  
ელექტროსისტემის სისერიის შენარჩუნება მუდმივ დონეზე დამისირეგულირების აქტუალური საკითხები “ენერჯია”, №2(70), 2014, გვ.18-27.
18. ე.ჩახხიანი.  
ელექტროენერჯის ხარისხის მაჩვენებლების ოპტიმიზაციის კრიტერიუმები. მე-III საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, ენერჯეტიკა: რეგონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები, მოსხენებების კრებული, ქუთაისი, საქართველო, 2015, გვ.71-75.
19. Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. - М.: Энергия, 1978.-320 с.
20. Поссе А.В. Схемы и режимы электропередач постоянного тока. - Л.: Энергия, 1973.
21. Kimbark E.W. Direct Current Transmission, New York, 1971.