

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

გრიგოლ ფრანგიშვილი

წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების ნახევარგამტარულ  
გარდამქმნელ სისტემებში პროცესების მოდელირება

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად წარდგენილი  
დისერტაციის

ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

სადოქტორო პროგრამა: "ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია"

შიფრი: 0405

თბილისი

2018 წელი

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

ხელმძღვანელი: პროფესორი გივი კოხრეიძე

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2018 წლის «-----» ----- «-----» საათზე  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და  
ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის  
სხდომაზე

კორპუსი VIII, აუდიტორია №

მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,

ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე.

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი,  
ასოცირებული პროფესორი

გ. გიგინეიშვილი

## სამუშაოს ზოგადი დახასიათება

### თემის აქტუალობა

მუდმივი დენის წევის ქვესადგურებში ვენტილური გარდამქმნელი აგრეგატების სქემების სირთულე და მრავალსახეობა არსებითად ართულებს ენერჯის წყაროდან წევის ძრავებიან დატვირთვამდე სტაციონალურ და გარდამავალი ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური ერთიანი პროცესების ანალიზის ამოცანას. ასეთი რთული გარდამქმნელი ერთიანი სისტემის გამოკვლევა დაკავშირებულია საკმაოდ რთულ ამოცანასთან.

წევის ქვესადგურების სამფაზა ნახევარგამტარულ გარდამქმნელებში ძალურ ტრანსფორმატორებში მიმდინარე პროცესების განსაკუთრებულობა ჩვეულებრივ სამფაზა ტრანსფორმატორებთან შედარებით მდგომარეობს იმაში, რომ ნახევარგამტარ ტირისტორულ გადამრთველებზე მართვადი იმპულსის მიწოდების მომენტიდან წარმოებს ტრანსფორამტორის გრაგნილთა ფაზების პერიოდული გადართვები. ეს დროის ინტერვალიდან ინტერვალამდე, თავის მხრივ იწვევს მაგნიტომამომრავებელი ძალების (მმძ) სივრცით განაწილებას, აგრეთვე ტრანსფორამტორის პარამეტრების და მოქმედი ელექტრომამომრავებელი ძალების (ემძ) ცვლილებას. დროში სტაციონალური და გარდამავალი პროცესების განხილვისათვის მყისა მნიშვნელობების გაანგარიშების მეთოდის თანახმად, აუცილებელია გაანგარიშებული იქნას სიდიდეების მყისა მნიშვნელობები დროის ინტერვალების მიხედვით. თითოეულ ამ ცალკეულ ინტერვალებში ძალური ტრანსფორმატორი იმყოფება გარდამავალ არასიმეტრიულ რეჟიმში მმძ-ის და ემძ-ის განაწილების კანონის შეუცვლელად ტრანსფორმატორის ერთი და იგივე პარამეტრებისას. საწყისი პირობების დროში შეცვლისას გარდამავალი პროცესი იცვლება დროის ინტერვალიდან ინტერვალამდე. განსაზღვრული დროის შემდეგ, საწყისი პირობები პერიოდულად მეორდებიან. გარდამავალი პროცესი მყარდება და ამ

რეჟიმში საკმარისია განხილული იქნას მხოლოდ პროცესის განმეორებადობის ინტერვალი.

სტატიკურ გარდამქმნელებში გარდამავალი პროცესების აღმწერ განტოლებებს ჩვეულებრივ ადგენენ უშუალოდ ფაზური ცვლადების მყისა მნიშვნელობების მიმართ. ეს განტოლებები დაიყვანებიან მუდმივ კოეფიციენტებიან დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემაზე. იმ შემთხვევაში, თუ წევის ქვესადგურში ერთიან გარდამქმნელ სისტემას განვიხილავთ, როგორც ნახევარგამტარულ აგრეგატებს, ასევე საკონტაქტო ქსელისა, ლიანდაგებისა და ელმავლის წევის ძრავის ერთიან სისტემას იმპულსური მოდულაციით, მაშინ ელექტრული მანქანების (მბრუნავი ნაწილის) არსებობის გამო სისტემა ხასიათდება დროში პერიოდულად ცვალებადი პარამეტრებით. ამიტომ ფაზური ცვლადების მიმართ დაწერილი განტოლებები, როგორც ცნობილია, დაიყვანება ამოსახსნელად მეტად რთულ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემაზე. ამ გარემოებამ გამოიწვია მყისა ფაზური ცვლადების გამოყენებაზე უარის თქმა და განტოლებების გასამარტივებლად ახალი კომპლექსური რეზულტირებული საგრაგნილო ცვლადების (დენები, ძაბვები და ნაკადუმბები) შემოყვანა. ეს ცვლადები ჩაიწერება სხვადასხვა კოორდინატთა სისტემაში, ჩვენს შემთხვევაში  $d, q, 0$  სისტემაში. ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის გამოყენება იწვევს ისეთ მუდმივ კოეფიციენტებიანი მარტივი დიფერენციალური განტოლებების მიღებას, რომელთა ამოხსნა შესაძლებელია ანალიზურად. ვენტილურ ელექტრულ წრედებში გამოყენებულია ცვლადების, როგორც კომპლექსური, ასევე სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნის მეთოდი.

ჩვენს მიერ ჩატარებული სამუშაოების შედეგებიდან გამომდინარე ამ ორი მეთოდის შერწყმის საფუძველზე მიღებულია გარდამქმნელი სისტემის სტაციონალური და გარდამავალი პროცესების გაანგარიშებისა და ანალიზის ახალი მოდერნიზებული მეთოდი, რომელშიც გამოიყენება ცვლადთა კომპლექსური და სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნა. ეს

მეთოდი საშუალებას იძლევა ერთდროულად გათვალისწინებული იქნას ტრანსფორმატორის ძირითადი პარამეტრები და ნახევარგამტარულ გარდამქმნელებში კომუტაციური და არასაკომუტაციო განზოგადებული ინტერვალები კომუტაციური ფუნქციების მწკრივებად დაშლის გათვალისწინებით.

მუდმივი დენის წევის ქსელისათვის ელექტრომაგნიტურ და ელექტრომექანიკურ გარდამავალ ავარიულ პროცესებში მაღალი ძაბვის ელემენტების იზოლაციის დარღვევისას ერთიანი ელექტრული წრედის ექვივალენტური წინაღობა ეცემა, დენი აჭარბებს დასაშვებ მნიშვნელობას, უარყოფითად მოქმედებს ელექტროაპარატურის თერმულ და დინამიურ მწყობრიდან გამოყვანაზე, საკონტაქტო სადენების დაწვაზე და მატარებლის მოძრაობის უსაფრთხოებაზე.

მუდმივი დენის წევის ქსელისათვის გარდამავალი პროცესების დენების მაქსიმალური მნიშვნელობისაგან დაცვის უზრუნველყოფა წარმოადგენს ერთ-ერთ უმთავრეს აქტუალურ და მასთან ერთად ურთულეს პრობლემას: აღნიშნული ქსელი კვებავს მოძრავი წევის ძრავიან დატვირთვას. მასთან მუდმივი ურთიერთქმედება განაპირობებს მათი დაზიანების სახეების მრავალფეროვნებას და ზრდის მათ ალბათობას. წევის ქსელს არ გააჩნია მარაგი, ამიტომ მისი დაცვა უნდა იყოს უტყუარი და სწრაფმოქმედი.

ამ პრობლემის გადაწყვეტა შეუძლებელია მუდმივი დენის წევის ქვესადგურებში შემოყვანილი ცვლადი დენის ქსელის, ძალური სამფაზა წევის ტრანსფორმატორის, საკონტაქტო ქსელის, სალიანდაგო წრედის და მუდმივი დენის წევის ძრავების, როგორც ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის შესაბამისი ექვივალენტური პარამეტრების გათვალისწინებლად მართვადი გამმართველი და მიმღები ცვლადი დენის ქსელის მიმყოლი ინვერტორული რეკუპერაციული აგრეგატების ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების ღრმა გამოკვლევების

გარეშე. ასეთი პროცესების თანამედროვე მეთოდებით შესწავლა წარმოადგენს მეტად აქტუალურ პრობლემას.

მუდმივი დენის წევის ქვესადგურების ნახევარგამტარულ ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში მდგრადი და საიმედო ელექტრომომარაგების უზრუნველყოფის და რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმის პირობებში ჭარბი ელექტრული ენერჯის მიმღებ ქსელში ეფექტურად შეშვების მიზნით ელექტრომაგნიტური და ელექტომექანიკური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება წარმოადგენს სადისერტაციო თემის მეტად აქტუალურ საკითხთა ერთობლიობას, რომლებიც დასრულებული, დამუშავებული სახით წარმოდგენილია, ავტორის მიერ, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ელექტროტექნიკისა და ელექტრონიკის დეპარტამენტში ბოლო სამი წლის განმავლობაში შესრულებული გამოკვლევების საფუძველზე.

### **სამუშაოს მიზანი და კვლევის ამოცანები**

სადისერტაციო სამუშაოს მიზანია მუდმივი დენის წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების მართვად გამმართველ აგრეგატებში ელექტრომომრავი შემადგენლობის (ე.მ.შ) დაძვრისა და წევის პირობებში, აგრეთვე ე.მ.შ-ის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში მკვებავი ქსელის მიმყოლი სამფაზა ძაბვის ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური და ელექტომექანიკური არასიმეტრიული გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება მკვებავი ცვლადი დენის ქსელის და სამფაზა ძალური ტრანსფორმატორის პარამეტრებიდან დაწყებული მატარებლის წევის ძრავის პარამეტრებამდე ჩათვლით, საკონტაქტო და სალიანდაგო წრედის პარამეტრების გათვალისწინებით;

რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის, სიმძლავრის კოეფიციენტის, საექსპლუატაციო სამუშაო რეჟიმების მდგრადობისა და იმედიანობის

ამაღლების მიზნით უკუ მართვადი გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატების შემხვედრ-პარალელური მუშაობის პროცესების საანგარიშო პრინციპული ელექტრული სქემის დამუშავება რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში; შესაბამისი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების თეორიის საფუძვლების დამუშავება, რომლებიც ყოველთვის იძლევიან არსებული ე.მ.შ-ის წევის, დამუხრუჭების და ტექნიკურ-ეკონომიკური მახასიათებლების გაუმჯობესებას და შესაბამისი ტექნოლოგიების დანერგვას ენერგეტიკასა და ელექტროინჟინერიაში.

**კვლევის ამოცანებია შემდეგი ძირითადი მნიშვნელოვანი საკითხების გადაწყვეტა:**

1. მუდმივი დენის წევის ქვესადგურების მართვად გამმართველ აგრეგატებიან გაერთიანებულ გარდამქმნელ შეკრულ სისტემაში ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური არასიმეტრიული გარდამავალი და კვაზი სტაციონალური ერთიანი პროცესების მიმდინარეობის ხასიათის დადგენა.
2. მართვად გამმართველ აგრეგატებში ზემო აღნიშნული ერთიანი პროცესების გაანგარიშების მათემატიკური, კომპიუტერული მოდელირება და ანალიზი ყველა პარამეტრის გათვალისწინებით შესაბამისი დამუშავებული მეთოდის საფუძველზე;
3. მუდმივი დენის წევის ქვესადგურების მკვებავი სამფაზა ქსელის ერთიანი კომპლექსური დატვირთვის (ძალური სამფაზა წევის ტრანსფორმატორი, მართვადი გამმართველი ბოგირი, საკონტაქტო ქსელი, სალიანდაგო წრედი, მუდმივი დენის მიმდევრობით აღგზნებიანი წევის ძრავი) ძირითადი პარამეტრების გათვალისწინებით მართვად გამმართველ აგრეგატებში კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის აუცილებელი და საკმარისი ალტერნატიული პირობების დადგენა;

4. მართვად გამმართველ აგრეგატებთან გაერთიანებულ გარდამქმნელ სისტემაში გარდამავალი და კვაზი სტაციონალური ერთიანი პროცესების მოდელირების სტრუქტურული სქემების აგება და მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნის შედეგად საძიებელი ცვლადების რეკურენტული სხვაობითი განტოლებების მიღება;
5. ე.მ.შ-ის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში მუდმივი დენის წევის ქვესადგურებში სამფაზა მიმღები ქსელის მიმყოლ ინვერტორიან გაერთიანებულ გარდამქმნელ სისტემაში ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი და კვაზი სტაციონალური ერთიანი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება დამუშავებული მეთოდის საფუძველზე;
6. მიმღები ქსელის მიმყოლ ინვერტორიან გაერთიანებულ გარდამქმნელ სისტემაში გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემების აგება, კომუტაციური გადაძვების ოპტიმიზაციის აუცილებელი და საკმარისი პირობების დადგენა და მდგომარეობათა ცვლადების რეკურენტული სხვაობითი განტოლებების მიღება ე.მ.შ-ის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში;
7. მუდმივი დენის წევის ქვესადგურების შემხვედრ-პარალელურად ჩართული უკუმართვადი გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატების გაერთიანებული საანგარიშო პრინციპული ელექტრული სქემების დამუშავება ე.მ.შ.-ის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში;
8. შემხვედრ-პარალელურად ჩართული უკუმართვადი გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატების მუშაობის ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება ე.მ.შ-ის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში;
9. მუდმივი დენის წევის ქვესადგურების შემხვედრ-პარალელურად ჩართულ უკუმართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია, აქტიური სიმძლავრის



კოეფიციენტის ამაღლება, კომპუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის აუცილებელი და საკმარისი პირობების და მდგრადობის ახალი კრიტერიუმების დადგენა;

10. უკუმართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებიან გაერთიანებულ გარდამქმნელ სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნა და რეკურენტული სხვაობითი განტოლებების მიღება დატვირთვის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში.

**კვლევის მეთოდები:** წარმოდგენილი კვლევის ამოცანების თეორიული საფუძვლების შესაქმნელად დოქტორანტ გრიგოლ ფრანგიშვილის მიერ დასრულებულ დისერტაციაში გამოყენებულია წრფივი და არაწრფივი ელექტრული წრედების, დისკრეტული და ცვლად პარამეტრებიანი დინამიკური სისტემების, განზოგადებული ფუნქციების თეორიები, ელექტრიფიცირებული რკინიგზის ტრანსპორტში ელექტრული წევის თეორია, მართვად ნახევარგამტარულ კომპუტატორიანი ელექტრული მანქანების თეორიის საფუძვლები, ცვლადთა პირდაპირი და უკუ კომპლექსური და სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნების მეთოდები, გაანგარიშების რიცხვითი მეთოდი, სპეციალური ფუნქციების ტეილორის მწკრივებად დაშლა და ნახევარგამტარულ ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების კომპიუტერული მოდელირების თეორიული საფუძვლები.

#### **ნაშრომის ძირითადი შედეგები და მეცნიერული სიახლე:**

დასრულებულ, გრიგოლ ფრანგიშვილის სადისერტაციო ნაშრომში მოყვანილია ენერგეტიკისა და ელექტროინჟინერიის დარგის მნიშვნელოვანი პრობლემის ძირითადი საკითხების-„წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების ნახევარგამტარულ გარდამქმნელ სისტემებში პროცესების მოდელირება“-დამუშავების თეორიული განზოგადება და

გადაწყვეტა. ახალი მეცნიერული შედეგებიდან შეიძლება აღინიშნოს შემდეგი:

1. სრულად არის აღწერილი მუდმივი დენის წვევის ქვესადგურების მართვად გამმართველ აგრეგატებიან გაერთიანებულ გარდამქმნელ შეკრულ სისტემაში ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური არასიმეტრიული გარდამავალი და კვაზი სტაციონალური ერთიანი პროცესების მიმდინარეობის ხასიათი;

2. დამუშავებული მოდერნიზებული მეთოდის საფუძველზე წვევის ქვესადგურების მართვად გამმართველ აგრეგატებში ჩატარებულია ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება და ანალიზი ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის ყველა პარამეტრის გათვალისწინებით;

3. დადგენილია მუდმივი დენის წვევის ქვესადგურების მკვებავი სამფაზა ქსელის ერთიანი ექვივალენტური კომპლექსური დატვირთვის პარამეტრების გათვალისწინებით მართვად გამმართველ აგრეგატებში კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის აუცილებელი და საკმარისი პირობები და შესაბამისად, ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის მუშაობის სტატიური და დინამიური მდგრადობის ალტერნატიული კრიტერიუმები.

4. აგებულია მართვად გამმართველ აგრეგატიან გაერთიანებულ გარდამქმნელ სისტემაში გარდამავალი და კვაზი სტაციონალური ერთიანი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა და მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნის შედეგად მიღებულია საძიებელი ცვლადების რეკურენტული სხვაობითი განტოლებები, რომლებიც იოლად ემორჩილებიან კომპიუტერული პროგრამებით ამოცანის ამოხსნას;

5. დისერტაციაში დამუშავებული მეთოდის საფუძველზე ჩატარებულია ე.მ.შ-ის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში მუდმივი დენის წვევის ქვესადგურებში სამფაზა მიმღები ქსელის მიმყოლ ინვერტორიან გაერთიანებულ გარდამქმნელ სისტემაში ელექტრომაგნიტური და

ელექტრომექანიკური გარდამავალი და კვაზი სტაციონალური ერთიანი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება;

6. აგებულია მიმღები ქსელის მიმყოფ ინვერტორიან გაერთიანებულ გარდამქმნელ სისტემაში გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები; დადგენილია კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის აუცილებელი და საკმარისი პირობები და მუშაობის სტატიკური და დინამიური მდგრადობის ალტერნატიული კრიტერიუმები; მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნის შედეგად მიღებულია რეკურენტული სხვაობითი განტოლებები ე.მ.შ-ის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში.

7. დამუშავებულია ე.მ.შ-ის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში მუდმივი დენის წევის ქვესადგურების შემხვედრ-პარალელურად ჩართულ უკუმართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების საანგარიშო პრინციპული ელექტრული სქემები;

8. ჩატარებულია ე.მ.შ-ის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში შემხვედრ-პარალელურად ჩართულ უკუმართვად გამმართველ ინვერტორული აგრეგატების მუშაობის ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება;

9. მუდმივი დენის წევის ქვესადგურების შემხვედრ-პარალელურად ჩართულ უკუმართვად გამმართველ ინვერტორულ აგრეგატებიან წარმოდგენილ სქემაში განხორციელებულია რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია, აქტიური სიმძლავრის კოეფიციენტის ამაღლება, კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის აუცილებელი და საკმარისი პირობების და მუშაობის მდგრადობის ალტერნატიული კრიტერიუმების დადგენა;

10. განხორციელებულია უკუმართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებთან გაერთიანებულ გარდამქმნელ სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნა და რეკურენტული სხვაობითი განტოლებების მიღება დატვირთვის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში.

### **შედეგების გამოყენების სფერო**

1. მიღებული შედეგები რეკომენდირებულია ფართოდ იქნას გამოყენებული მრავალფაზა ნახევარგამტარულ მართვად გარდამქმნელ ერთიან სისტემაში კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის აუცილებელი და საკმარისი პირობების, მდგრადობის ალტერნატიული კრიტერიუმების დადგენის, რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის და აქტიური სიმძლავრის კოეფიციენტის გაზრდის სფეროში ე.მ.შ-ის დამკრის, წევის და რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში;
2. წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების ნახევარგამტარულ გაერთიანებულ გარდამქმნელ სისტემებში პროცესების მოდელირების შედეგების დანერგვა ელექტროფიცირებული რკინიგზის ტრანსპორტში საშუალებას იძლევა შესაბამისი დანაყენების ზუსტი შერჩევის გზით ოპტიმალურად დაცული იქნას სარელეო ციფრული დაცვების წინაშე წაყენებული მოთხოვნები; სელექციურობა, სწრაფმოქმედება, მგრძობელობა, რეჟიმების მდგრადობა და იმედიანობა;
3. მუდმივი დენის წევის ქვესადგურების შემხვედრ-პარალელურად ჩართული უკუმართვადი გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატების დამუშავებულ საანგარიშო პრინციპულ ელექტრულ სქემებში ე.მ.შ-ის დამკრის, წევის და რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში მიმდინარე პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების შედეგების ექსპლუატაციაში დანერგვა უზრუნველყოფს გაერთიანებული გარდამქმნელი სისტემის ტექნიკურ-ეკონომიური მაჩვენებლების

ამაღლებას, რაც საქართველოს რკინიგზას საშუალებას მისცემს განახორციელოს მძიმე წონიანი სატვირთო შემადგენლობების ექსპლუატაცია და ამ გზით უზრუნველყოს პერსპექტივაში მნიშვნელოვნად გაზრდილი ტვირთნაკადების გადაზიდვები.

### **პუბლიკაციები და სამუშაოს აპრობაცია**

დისერტაციის ძირითადი შინაარსი გამოქვეყნებულია 16 ნაბეჭდი და 3 ხელნაწერის უფლებით არსებულ შრომაში. აქედან 6 უცხოეთის სამეცნიერო ტექნიკურ ჟურნალებში: მოსკოვი 2015 წ; ნოვოსიბირსკი 2015 წ; ეკატერინბურგი 2015 წ; უნგრეთი, ბუდაპეშტი 2016 წ; ბულგარეთი 2016 წ; 10 ადგილობრივ სამეცნიერო ტექნიკურ ჟურნალებში: ქუთაისი-2015 წ; ბათუმი-2015 წ. სამეცნიერო ტექნიკური ჟურნალი „ენერჯია: თბილისი-2016 წ; ქუთაისი-2016 წ; ქუთაისი-2017 წ;

სამუშაოს შედეგები მოხსენებული იყო მოსკოვის XIV საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკულ კონფერენციაზე-სამეცნიერო კვლევების თანამედროვე კონცეფციები, მოსკოვი, ნაწილი 3, №5, 2015 წ. XII საერთაშორისო სამეცნიერო პრაქტიკულ კონფერენციაზე; ნოვოსიბირსკი, №5(12) 2015წ; XIV საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკულ კონფერენციაზე-ეკატერინბურგი, 2015 წ; IV-საერთაშორისო სამეცნიერო ტექნიკური კონფერენცია-ქუთაისი, 2016 წ; მესამე ქართულ-პოლონური საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია „სატრანსპორტო ხიდი ევროპა-აზია“ , ქუთაისი-2017წ; სამ საგანმანათლებლო პროგრამის თეორიული (ექსპერიმენტული კვლევის) კომპონენტის „კოლოქვიუმის-1, 2016 წ; კოლოქვიუმი-2, 2017 წ; კოლოქვიუმი-3, 2017 სამეცნიერო სხდომაზე.

**დისერტაციის სტრუქტურა:** დისერტაცია შედგება შესავლის, 61 დასახელების ლიტერატურის მიმოხილვის, შედეგების და მათი განსჯისაგან, დასკვნის და გამოყენებული ლიტერატურისაგან. მთელი მოცულობა შეადგენს 141 გვერდს, მათ შორის 108 ძირითადი ტექსტია 18 ნახაზით. გამოყენებული ლიტერატურის სია შეიცავს 58 დასახელებას.

## დისერტაციის შინაარსი

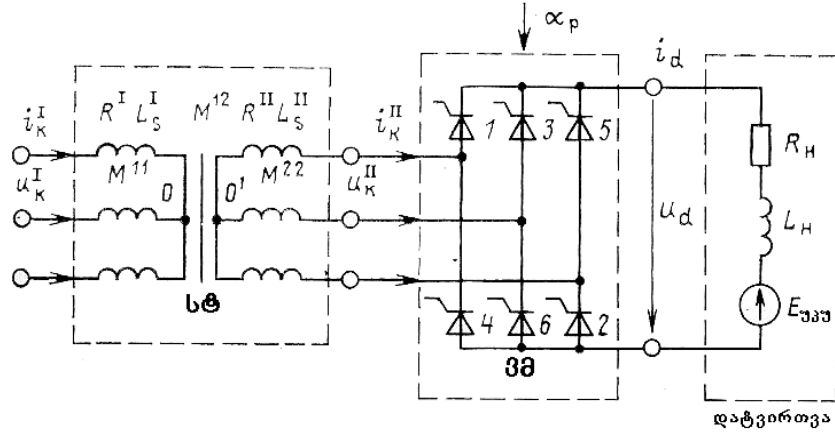
შესავალში დასაბუთებულია პრობლემების აქტუალობა, ჩამოყალიბებულია კვლევის მიზანი და ამოცანები. ნაჩვენებია სამუშაოს მეცნიერული სიახლის და პრაქტიკული მნიშვნელობის ძირითადი ასპექტები.

პირველი თავი ეძღვნება წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების მართვად გამმართველ აგრეგატებში პროცესების მოდელირებას. დადგენილია წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების მართვად გამმართველ გარდამქმნელ სისტემაში (ნახ.1) არასიმეტრიული გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მიმდინარეობის ხასიათი. ნაჩვენებია, რომ ერთიანი ნახევარგამტარული გარდამქმნელი სისტემა ხასიათდება დროში პერიოდულად ცვალებადი პარამეტრებით. მოდელირების ეფექტურად ჩატარების მიზნით საჭირო ხდება ცვლადთა პირდაპირი და უკუ კომპლექსური გარდაქმნის მატრიცების შემოყვანა და საბოლოო ჯამში „ცვლადთა კომპლექსური და სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნების მოდერნიზებული მეთოდის“ დამუშავება.

სამფაზა მართვადი გამმართველიანი გარდამქმნელი სქემა (ნახ. 1) შედგება შემდეგი ძირითადი ელემენტებისაგან: სამფაზა ძალური ტრანსფორმატორისაგან (სტ), რომლის პირველადი გრაგნილები მიერთებულია მკვებავ ქსელთან, ვენტილურ მოწყობილობისაგან (ვმ) და საწინააღმდეგო მიმართულების ემმ-იანი აქტიურ-ინდუქციური დატვირთვისაგან.

კავშირი გამმართველი აგრეგატის შესავალსა და გამოსავალ სიდიდეებს შორის მოცემულია დენის და ძაბვის მიხედვით კომპუტაციური ფუნქციებით:

$$\left. \begin{aligned} i_k'' &= \rho_{ik}(t) i_d \\ u_d &= \sum_{k=1}^3 \rho_{uk}(t) u_k'', k = 1, 2, 3. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$



ნახ.1. სამფაზა მართვადი გამმართველიანი გარდამქმნელის სქემა.

დენისა ძაბვის მიხედვით კომუტაციური ფუნქციები წარმოვადგინოთ ფურიეს მწკრივების სახეში, შესაბამისად მივიღებთ (ნახ. 2):

$$\left. \begin{aligned} \rho_{ik}(t) &= \frac{8}{\pi\gamma} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos \frac{n\pi}{6} \sin \frac{n\gamma}{2} \sin n(\omega t - \varphi_k); \\ \rho_{uk}(t) &= \frac{4}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \cos m \frac{\pi}{6} \sin \frac{m\gamma}{2} \sin m(\omega t - \varphi_k); \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

სადაც  $k = 1, 2, 3$ ;  $n, m$  – ყველა კენტი რიცხვებია;

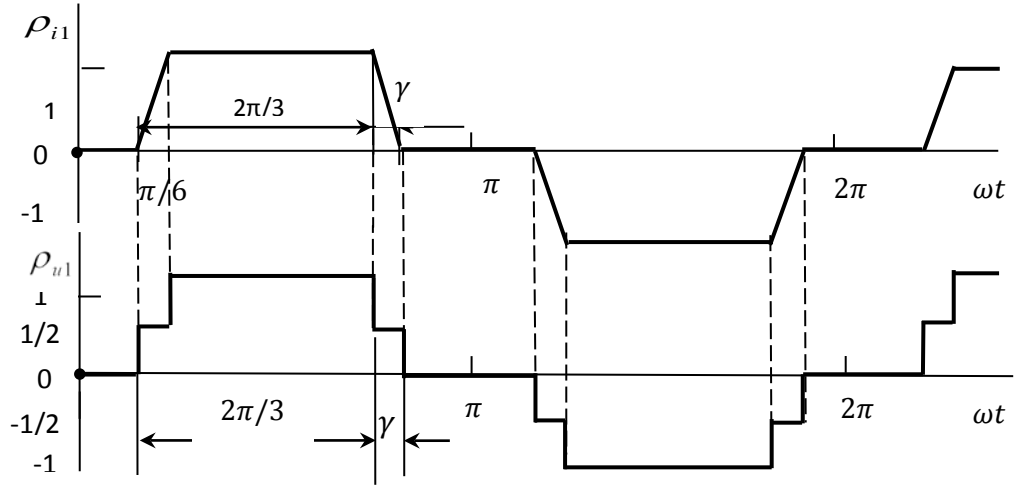
$$\varphi_1 = \alpha_p + \frac{\gamma}{2}; \quad \varphi_2 = \alpha_1 + \frac{2\pi}{3}; \quad \varphi_3 = \varphi_2 + \frac{2\pi}{3}; \quad (3)$$

ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის საფუძველზე სამფაზა მართვადი გამმართველიანი გარდამქმნელი სქემისათვის ვღებულობთ სრულ მათემატიკურ მოდელს:

$$u_d = i_d R_{\square} + L_{\square} \frac{di_d}{dt} + E_{\square\square\square}; \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{3}{2} U_m e^{j(\omega t + \psi_u)} &= R^I i^I + \left( L_S^I + \frac{3}{2} M^{11} \right) \frac{di^I}{dt} + \frac{3}{2} M^{12} \frac{di^{II}}{dt}; \\ -\dot{U}^{II} &= R^{II} i^{II} + \left( L_S^{II} + \frac{3}{2} M^{22} \right) \frac{di^{II}}{dt} + \frac{3}{2} M^{12} \frac{di^I}{dt}; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} i^I &= \sum_{k=1}^3 i_k^I e^{j\alpha_k^I}; \quad i^{II} = \sum_{k=1}^3 i_k^{II} e^{j\alpha_k^{II}}; \\ \dot{U}^I &= \sum_{k=1}^3 u_k^I e^{j\alpha_k^I} = \frac{3}{2} U_m e^{j(\omega t + \psi_u)}; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$



ნახ. 2. კომუტაციური ფუნქციების გრაფიკი

(2)-(6) განტოლებათა სისტემაში თუ გამოვიყენებთ სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნის მეთოდს, საბოლოოდ ვღებულობთ:

$$\left. \begin{aligned} U_d(P) &= \frac{\sum_{k=0}^3 P^k (U_m a_k + E_{\text{კვთ}} b_k)}{P \sum_{k=0}^3 A_k P^k} \\ I_d(P) &= \frac{\sum_{k=0}^3 P^k (U_m c_k + E_{\text{კვთ}} d_k)}{P \sum_{k=0}^3 A_k P^k} \end{aligned} \right\}; \quad (7)$$

სადაც (7)-ში ექვივალენტური პარამეტრებისათვის გვაქვს:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} \omega M^{12} R_{\varnothing} Z^l \cos \frac{\gamma}{2} \cos \left( \varphi^l - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} - \psi_u \right); \\ a_1 &= \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} \cos \frac{\gamma}{2} [R^l R_{\varnothing} \sin \left( \alpha_p + \frac{\gamma}{2} + \psi_u \right) + \omega L_{\varnothing} Z^l \cos \left( \varphi^l - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} - \psi_u \right)]; \\ a_2 &= \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} (L^l R_{\varnothing} + L_{\varnothing} R^l) \cos \frac{\gamma}{2} \sin \left( \alpha_p + \frac{\gamma}{2} + \psi_u \right); \\ a_3 &= \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} L^l L_{\varnothing} \cos \frac{\gamma}{2} \sin \left( \alpha_p + \frac{\gamma}{2} + \psi_u \right); \quad d_0 = (Z^l)^2; \quad d_1 = 2R^l L^l; \quad d_2 = (L^l)^2; \\ c_0 &= \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} Z^l \cos \frac{\gamma}{2} \sin \left( \varphi^l - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} - \psi_u \right); \quad L^l = L_s^l + \frac{3}{2} M^{11}; \quad L^{ll} = L_s^{ll} + \frac{3}{2} M^{22}; \\ c_1 &= \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} L^l \cos \frac{\gamma}{2} \sin \left( \alpha_p + \frac{\gamma}{2} + \psi_u \right); \quad \varphi_1 = \arctg \frac{\omega L^l}{R^l}; \quad Z^l = \sqrt{(R^l)^2 + (\omega L^l)^2}; \\ \Delta(t) &= \left\| \begin{array}{ccc} L^l & 0 & M_y^{12} \sin \left( \omega t - \frac{\gamma}{2} - \alpha_p \right) \\ 0 & L^l & -M_y^{12} \cos \left( \omega t - \frac{\gamma}{2} - \alpha_p \right) \\ -M_{yd}^{12} \cos \left( \omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} \right) & -M_{yd}^{12} \sin \left( \omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} \right) & -L_{\varnothing}^y \end{array} \right\| = \\ &= -(L^l)^2 L_{\varnothing}^y; \end{aligned} \quad (12)$$



სადაც (12)-ში  $M_y^{12} = \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} \cdot \frac{\sin\gamma/2}{\gamma/2} M^{12}$ ,  $M_{yd}^{12} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} \cdot M^{12}$ ;

(12)-დან ჩანს, რომ  $\Delta(t)$  არ არის დროზე დამოკიდებული, არასოდეს იგი ნულის ტოლი არ შეიძლება გახდეს და შესაბამისად ექსპლუატაციის პირობებში დენის წარმოებულები უსასრულო დიდი სიდიდეები არ ხდებიან. ეს იმას ნიშნავს, რომ მართვად სამფაზა გამმართველებში ვენტის კომუტაციისას კომუტაციურ გადაძაბვებს ადგილი არ აქვს.

(9)-(11) დენების ინტეგრალური გამოსახულებების საფუძველზე შესაძლებელია საძიებელი სიდიდეების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემების აგება. დამუშავებული მეთოდის საფუძველზე ზოგიერთი გარდაქმნების შედეგად მიღებულია მართვადი გამმართველი აგრეგატის რეკურენტული სხვაობითი განტოლება, რომელიც იოლად ექვემდებარება კომპიუტერული პროგრამებით ამოცანის ამოხსნას:

$$\begin{aligned} \|I^B[(k+1)T]\| &= e^{\|A^B(T)\| \cdot T} \cdot \|I^B(kT)\| + e^{\|A^B(k+1)\tau\|(k+1)T} (\|f_0^B\| \cdot \tau + \\ &+ \frac{1}{2} \|f_1^B\| \cdot \tau^2 + \frac{1}{6} \|f_2^B\| \cdot \tau^3); \end{aligned} \quad (13)$$

ჩატარებული სამუშაოების შედეგად ვღებულობთ აქტიური სიმძლავრის  $k_{\Sigma}$  კოეფიციენტის  $\alpha$ -რეგულირების და  $\gamma$ -კომუტაციის კუთხეზე დამოკიდებულების გამოსახულებას:

$$k_{\Sigma} = \frac{3}{\pi} \left( 1 + \frac{\gamma}{4\pi} - \frac{\gamma^2}{24} \right) \cos \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} \right); \quad (14)$$

აგრეთვე ვღებულობთ  $\alpha$ –სა და  $\gamma$ -ს შორის კავშირს სიმძლავრის კოეფიციენტის მაქსიმალური მნიშვნელობის მისაღწევად:

$$\alpha = -\frac{\gamma}{2} + \arctg \frac{3-\pi\gamma}{6\pi+\frac{3}{2}\gamma-\frac{\pi}{4}\gamma^2}; \quad (15)$$

**მეორე თავი** ეძღვნება წევრის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების ცვლადი დენის ქსელის მიმყოფ ინვერტორულ აგრეგატებში პროცესების მოდელირებას. ჩატარებულია როგორც მათემატიკური, ასევე კომპიუტერული მოდელირება.

ნახ. 3-ზე ნაჩვენებია ინვერტორის საანგარიშო ელექტრული სქემა და შესაბამისი ტალღური დიაგრამები.

თუ ვისარგებლებთ ცვლადთა კომპლექსური და სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნების მეთოდით, მივიღებთ პერიოდულ კოეფიციენტებიან სრულ დიფერენციალურ კომპლექსურ განტოლებათა სისტემას რეზულტირებული კომპლექსური დენების მიმართ:

$$\begin{aligned}
 E_d = 3R_{\text{დრ}} i_d + 3L_{\text{დრ}} \frac{di_d}{dt} + u_d; \quad \dot{U}^o = R^o \dot{I}^o + (L_S^o + \frac{3}{2} M^{22}) \frac{d\dot{I}^o}{dt} + \frac{3}{2} M^{12} \frac{d\dot{I}^c}{dt}; \\
 -\dot{U}^c = R^c \dot{I}^c + (L_S^c + \frac{3}{2} M^{11}) \frac{d\dot{I}^c}{dt} + \frac{3}{2} M^{12} \frac{d\dot{I}^o}{dt}; \\
 \dot{U}^c = \frac{1}{3} (\sum_{k=1}^3 R_k^c) \dot{I}^c + \frac{1}{3} (\sum_{k=1}^3 R_k^c e^{j2\alpha_k^c}) \dot{I}^c + \frac{1}{3} (\sum_{k=1}^3 L_k^c) \frac{d\dot{I}^c}{dt} + \\
 + \frac{1}{3} (\sum_{k=1}^3 L_k^c e^{j2\alpha_k^c}) \frac{d\dot{I}^c}{dt}; \tag{16}
 \end{aligned}$$

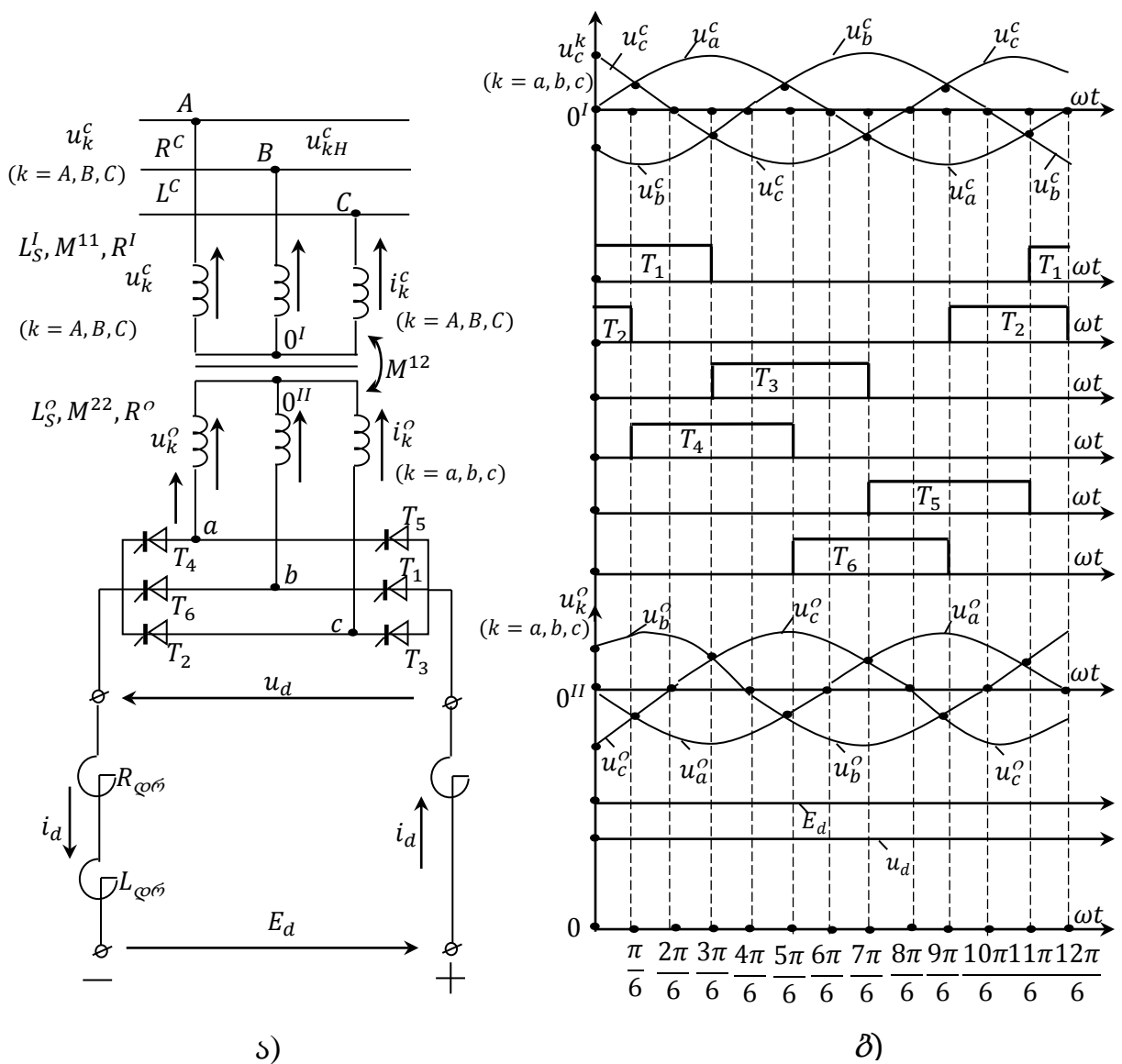
$$\dot{U}^c = u_0 (\sum_{k=1}^3 e^{j\alpha_k^c}) + \dot{U}_H^c = \dot{U}_H^c; \quad u_d = \frac{\sqrt{3}}{\pi} [\dot{U}^o e^{-j(\omega^o t - \frac{\pi}{2})} + U^{*o} e^{j(\omega^o t - \frac{\pi}{2})}];$$

$$\left. \begin{aligned}
 i_d = -\frac{\sqrt{3}\pi}{9} \dot{I}^o e^{-j(\omega^o t - \frac{\pi}{2})} \\
 \dot{U}_H^c = \sum_{k=1}^3 u_{kH}^c e^{j\alpha_k^c}, \sum_{k=1}^3 e^{j\alpha_k^c} = 0
 \end{aligned} \right\}$$

პროცესების კომპიუტერული მოდელირებისათვის (16) განტოლებათა სისტემიდან მატრიცულ ფორმაში ვპოულობთ საძიებელი დენების წარმოებულების მნიშვნელობებს:

$$\begin{aligned}
 \left\| \frac{di_d}{dt} \right\| &= \frac{1}{\Delta(t)} \left\| \begin{matrix} a_1(t) & a_2(t) & -a_3(t) \\ b_1(t) & -b_2(t) & 0 \\ c_1(t) & c_2(t) & -c_3(t) \end{matrix} \right\| \times \left\| \begin{matrix} i_d \\ I_d^c \\ I_q^c \end{matrix} \right\| + \frac{1}{\Delta(t)} \left\| \begin{matrix} a_0 & a_4(t) \\ 0 & -b_3(t) \\ c_0(t) & c_4(t) \end{matrix} \right\| \times \left\| \begin{matrix} E_d \\ U_m^c \end{matrix} \right\|, \Delta(t) \neq 0; \tag{17}
 \end{aligned}$$

სადაც (17)-ში შემავალი ცვლადი კოეფიციენტები განისაზღვრებიან გაერთიანებული გარდამქმნელი სისტემის მოცემული პარამეტრების მიხედვით კომპუტაციური ფუნქციების ფურიეს მწკრივებად დაშლისას ძირითადი ჰარმონიკის გათვალისწინებით.



ნახ. 3. სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის მიმყოლი ინვერტორის ბოგური სქემა შესაბამისი მოცემული პარამეტრებით (ა), ძაბვებისა და  $T_1 \div T_6$  ტირისტორებში დენების ერთდროულად გატარების თანმიმდევრობის გრაფიკები (ბ).

(17)-დან ინტეგრირების შედეგად ვღებულობთ შესაბამისი დენების ინტეგრალურ გამოსახულებებს:

$$i_d(t) = \int_0^t \left[ \frac{a_1(t)}{\Delta(t)} i_d(t) + \frac{a_2(t)}{\Delta(t)} I_d^c(t) - \frac{a_3(t)}{\Delta(t)} I_q^c(t) + \frac{a_0(t)}{\Delta(t)} E_d + \frac{a_4(t)}{\Delta(t)} U_m^c \right] dt + i_d(0);$$

$$I_d^c(t) = \int_0^{t_k} \left[ \frac{b_1(t)}{\Delta(t)} i_d(t) - \frac{b_2(t)}{\Delta(t)} I_d^c(t) - \frac{b_3(t)}{\Delta(t)} U_m^c \right] dt + I_d^c(0); \quad (18)$$

$$I_q^c(t) = \int_0^{t_k} \left[ \frac{c_1(t)}{\Delta(t)} i_d(t) + \frac{c_2(t)}{\Delta(t)} I_d^c(t) - \frac{c_3(t)}{\Delta(t)} I_q^c(t) + \frac{c_0(t)}{\Delta(t)} E_d + \frac{c_4(t)}{\Delta(t)} U_m^c \right] dt + I_q^c(0);$$

(18)-ის საფუძველზე ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების კომპიუტერული მოდელირების შედეგად ვღებულობთ შესაბამისი პროცესების მოდელის სტრუქტურულ სქემებს:

(17) გამოსახულებაში  $\Delta(t)$  – განმსაზღვრელისათვის გვაქვს:

$$\Delta(t) = \begin{vmatrix} L_1 & 2M_1 \sin \omega^o t & -2M_1 \cos \omega^o t \\ -3M_1 \cos \omega^o t & 0 & L_2 \\ 0 & -L_{\text{აბგ}} & 0 \end{vmatrix} = L_{\text{აბგ}}^c (L_{\text{აბგ}}^c L_1 - 6M_1^2 \cos^2 \omega^o t). \quad (19)$$

(19) გამოსახულება არ უნდა იყოს ნულის ტოლი. აქედან გამოდის აღნიშნულ ინვერტორებში კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის პირობა:

$$L_{\text{გრ.}} \neq \frac{6}{\pi^2} (L_s^o + \frac{3}{2} M^2) + \frac{27}{2\pi^2} \cdot \frac{(M^{12})^2}{L^c + L_s^l + \frac{3}{2} M^{11}}; \quad (20)$$

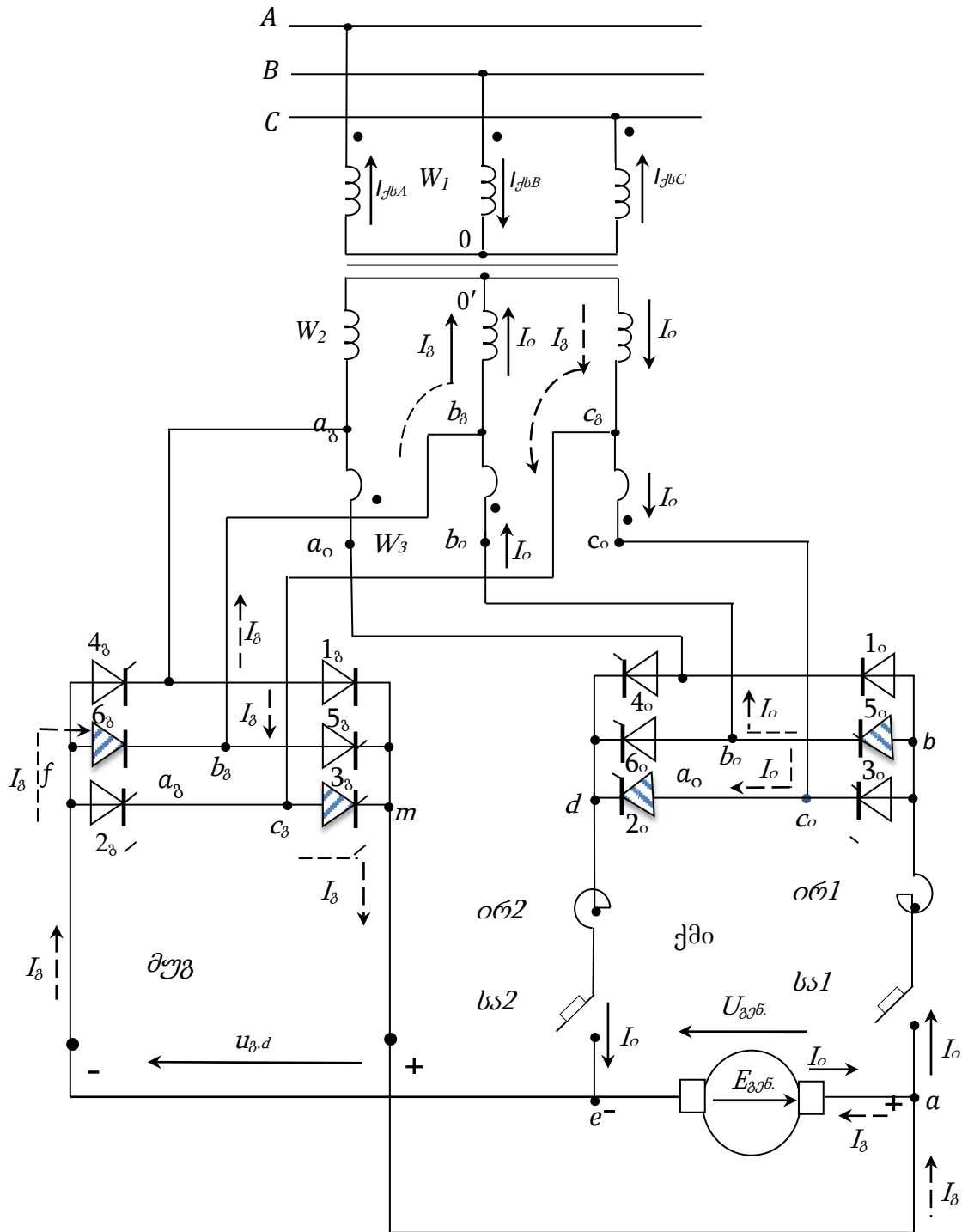
ჩატარებული სამუშაოების შედეგად ვღებულობთ ინვერტორებში რეკურენტულ სხვაობით განტოლებას, რომელიც შეთავსებადია კომპიუტერული პროგრამებით ამოცანის ამოხსნასთან.

**მესამე თავი** ეძღვნება წვევის ქვესადგურების მართვადი გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატების შემხვედრ-პარალელური მუშაობის ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების მოდელირებას რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში.

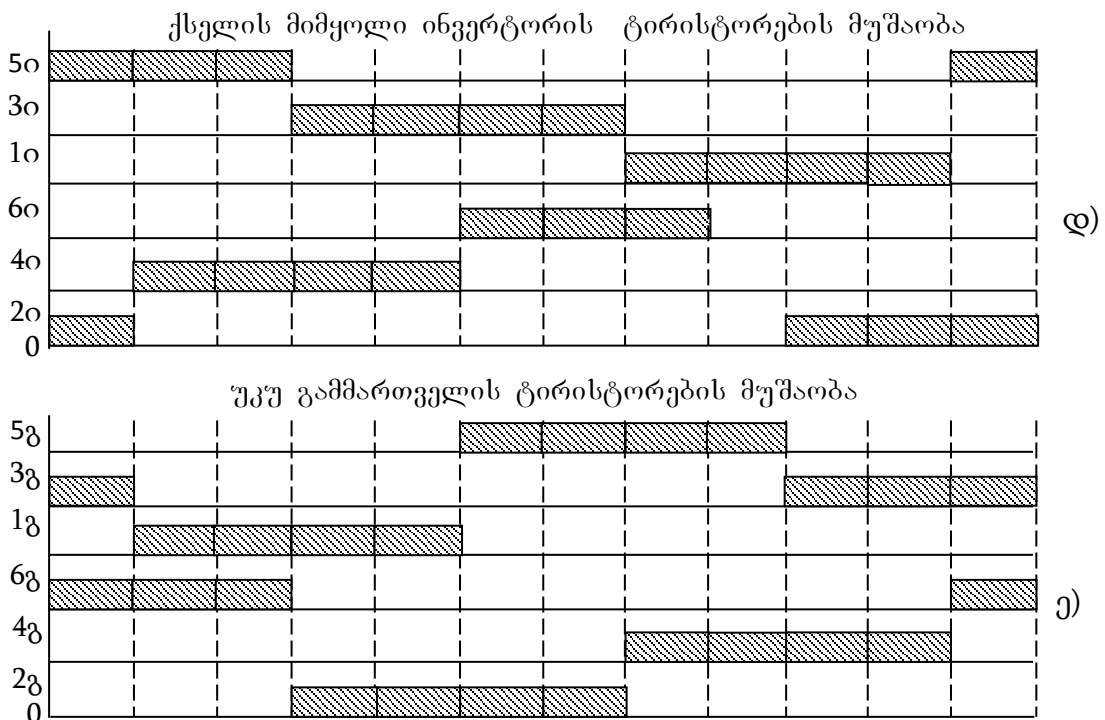
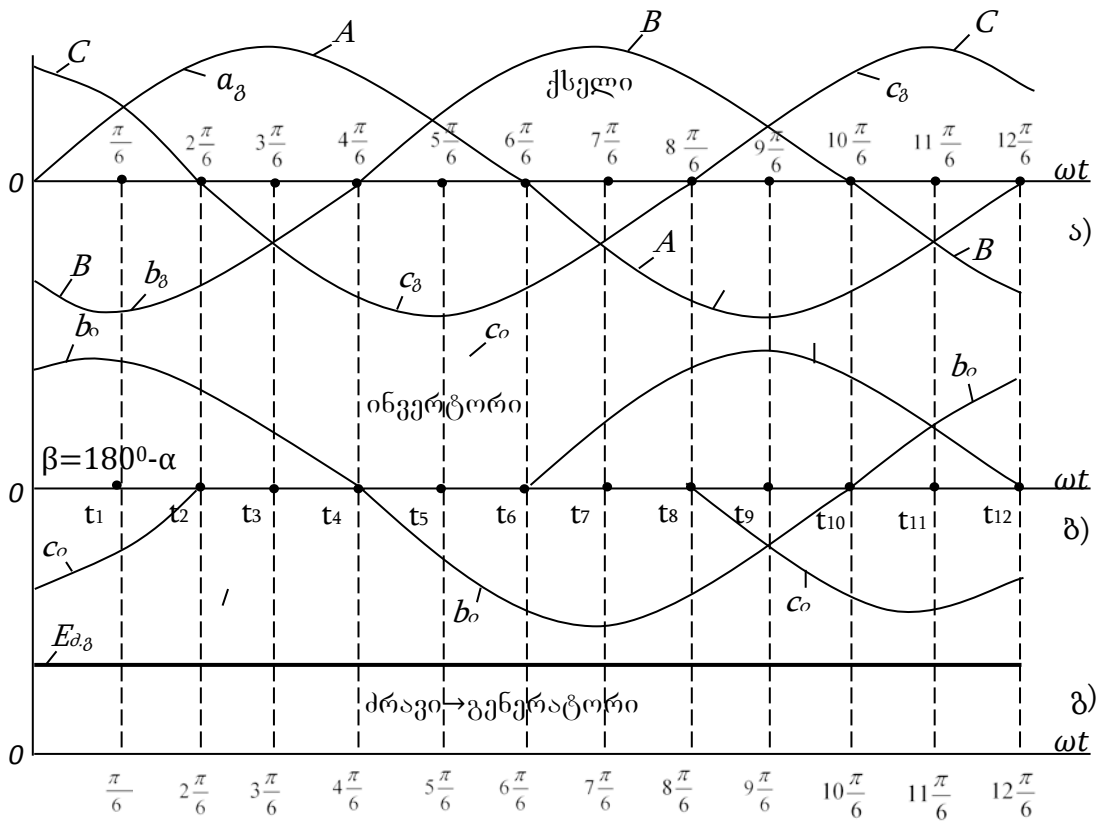
დამუშავებულია შემხვედრ-პარალელურად ჩართული უკუმართვადი გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატების პრინციპული ელექტრული სქემა წვევის ძრავების რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში (ნახ.4).

მართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში რეკუპერაციული დამუხრუჭების პროცესების სრულყოფა, ქსელის მიმყოლი ძაბვის ინვერტორის გარე მახასიათებლის გაუმჯობესება, რეაქტიული სიმძლავრის

კომპენსაცია და აქტიური სიმძლავრის კოეფიციენტის გაზრდა შესაძლებელია მართვადი უკუგამმართველის გამოყენებით.



ნახ. 4 უკუ გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატის პრინციპული ელექტრული სქემა წვეის ძრავის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში.



ნახ. 5. სამფაზა წვეის ტრანსფორმატორის გრაგნილების ფაზური დაბეგბი -ა,ბ; გენერატორულ რეჟიმში წვეის ძრავის ე.მ.ძალა -გ; ინვერტორის და უკუ გამმართველის ტირისტორების მუშაობის თანმიმდევრობა - დ, ე.

ნახ. 5-ზე წარმოდგენილია ძაბვის ტალღური დიაგრამები და ტირისტორების მუშაობის თანმიმდევრობა.

ნახ. 4-ზე ნაჩვენებია სქემისათვის ჩატარებულია პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება დროის არასაკომუტაციო  $t_{n-1} = \frac{1}{\omega} (n-1) \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right)$ -დან  $t_n = \frac{1}{\omega} n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right)$ -მდე და დროის საკომუტაციო  $t_n = \frac{1}{\omega} n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right)$ -დან  $t_{n+1} = \frac{1}{\omega} [n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) + \gamma]$ -მდე ინტერვალებში.

აღნიშნულ სქემისათვის დამტკიცდა რეზულტირებული კომპლექსური დენების მიმართ თეორემა კირხჰოფის პირველი კანონის მოდიფიკაციის შესახებ:

$$j^{\text{II}} = j_{\text{გ}}^{\text{II}} + j_{\text{of.}}^{\text{III}} \cdot e^{j(\alpha_p - \beta)}, \quad (21)$$

სადაც  $j^{\text{II}}$  – არის წევის ტრანსფორმატორის მეორად გრაგნილში კომპლექსური რეზულტირებული დენი;  $j_{\text{გ}}^{\text{II}}$  – მართვად უკუ გამმართველში კომპლექსური რეზულტირებული დენი;  $j_{\text{of.}}^{\text{III}}$  – ინვერტორულ გრაგნილში რეზულტირებული კომპლექსური დენი.  $\alpha_p$  და  $\beta$  – გამმართველში რეგულირებისა და ინვერტორში წინსწრების კუთხეებია.

აგებული იქნა უკუ მართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები.

დადგენილი იქნა წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების მართვადი გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატების შემხვედრ-პარალელური მუშაობის პირობებში კომუტაციური გადამაბვების ოპტიმიზაციის პირობები, რომლიდანაც მიმდინარეობს ერთიანი სისტემის სტატიკური და დინამიური მდგრადობის ალტერნატიული კრიტერიუმები.

ჩატარებულია მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნა და მიღებულია რეკურენტული სხვაობითი განტოლებები დატვირთვის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში.

ზემოთ აღნიშნული გამოსახულებების მიღების მეთოდის სრულად გადმოცემულია სადისერტაციო ნაშრომის შესაბამის პარაგრაფებში.

## დასკვნა

1. პირველად, ენერგეტიკასა და ელექტროინჟინერიაში, აგრეთვე ელექტროფიცირებულ სარკინიგზო ტრანსპორტში შესრულდა სამუშაოები მუდმივი დენის წევის ქვესადგურების ბაზაზე ელექტრული წევის ელექტრომომარაგების მართვად გამმართველ აგრეგატებიან სისტემებში ელექტრომაგნიტური არასიმეტრიული გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მდელირების მნიშვნელოვან საკითხებში სამფაზა მკვებავი ქსელის, ძალური სამფაზა წევის ტრანსფორმატორების, რეაქტორების, საკონტაქტო და სალიანდაგო წრედების, მუდმივი დენის მიმდევრობით აღზუნებიანი წევის ძრავის პარამეტრების და ნახევარგამტარული მართვადი ტირისტორების რეგულირების, წინსწრების და კომუტაციის კუთხეების გათვალისწინებით.

2. მიღებული შედეგებიდან გამომდინარე დადგინდა:

2.1. სამფაზა მართვად გამმართველ სისტემებში კომუტაციური

გადაძაბვების ოპტიმიზაციის პირობების გამომსახველი

განზოგადებული ფორმულა ერთიან სისტემაში შემავალი ძირითადი

პარამეტრების გათვალისწინებით, რაც დადებითად აისახება

გამმართველ სისტემაში საექსპლუატაციო მუშაობის პროცესების

მდგრადობასა და იმედიანობაზე.



- 2.2. წვევის სამფაზა მართვად გამმართველ სისტემებში არასიმეტრიული გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები;
- 2.3. რეკურენტული სხვაობითი განტოლება, რომელიც იოლად ექვემდებარება კომპიუტერული პროგრამებით სხვადასხვა ამოცანის ამოხსნას;
- 2.4. მკვებავი წყაროს დენის მრუდის დამახინჯების კოეფიციენტის და სიმძლავრის კოეფიციენტის ზოგადი გამოსახულება მიიღება ტირისტორების რეგულირებისა და კომუტაციის კუთხეების დამოკიდებულებით;
- 2.5. მტკიცებულება იმისა, რომ მართვად გამმართველ აგრეგატებში სიმძლავრის კოეფიციენტის მაქსიმალური მნიშვნელობა, ყველაზე საუკეთესო სასურველ პირობებში (რეგულირების და კომუტაციის კუთხეების მინიმალური მნიშვნელობისას), აღწევს 0,9554-ს.

დასრულებულ სადისერტაციო ნაშრომში საკვლევი და საანგარიშო სამუშაოები შესრულებულია საძიებელ ელექტრულ ცვლადთა პირდაპირი და უკუ კომპლექსური და სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნების ახალი, მოდერნიზებული, უნივერსალური მეთოდით.

3. ჩატარებული სამუშაოების შედეგად შექმნილია დენის წვევის ქვესადგურების მკვებავი ცვლადი დენის ქსელის მიმყოლ ინვერტორულ გარდამქმნელ სისტემაში რეკუპერაციული დამუხრუჭებისას ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების გაანგარიშებისა და ანალიზისათვის მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების თეორიის საფუძვლები.

4. შექმნილი თეორიის საფუძველზე მოცემულია საძიებელ ცვლადთა პირდაპირი და უკუ გარდაქმნის ახალი კომპლექსური მატრიცა, დაფუძნებული ინვერტორული აგრეგატის შესავალსა და გამოსავალ ცვლადების მყისა მნიშვნელობებს შორის დამაკავშირებელი დენებისა და

ძაბვების მიმართ სამფაზა კომუტაციური ფუნქციების სპექტრალურ-ოპერატორულ გარდაქმნაზე.

5. აგებულია ნახევარგამტარულ ინვერტორულ გარდამქმნელ სისტემაში არასიმეტრიული ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები, დაფუძნებული მათემატიკური ოპერაციების სტრუქტურული მოდელების ელემენტებსა და მათ თვისებებზე. მიღებულია კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის პირობების ამსახველი განზოგადებული გამოსახულებები; მოცემულია მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნა და მიღებულია რეკურენტული სხვაობითი განტოლებები, რომლებიც იოლად ექვემდებარებიან კომპიუტერული პროგრამებით ამოცანების ამოხსნას.

6. მიღებული შედეგების საფუძველზე გაკეთებულია დასკვნა იმისა, რომ მართვად სამფაზა გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში მუდმივი დენის წევის ძრავების რეკუპერაციული დამუხრუჭების პროცესების სრულყოფა, ცვლადი დენის მიმღები ქსელის მიმყოლი ძაბვის ინვერტორის გარე მახასიათებლის გაუმჯობესება, ინვერტორის გამოსავალში რეაქტიული მახასიათებლის გაუმჯობესება, ინვერტორის გამოსავალში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია, სიმძლავრის კოეფიციენტის გაზრდა ელექტრული ენერჯის ხარისხის გაუმჯობესება შესაძლებელია მართვადი უკუ გამმართველი აგრეგატის ინვერტორულ აგრეგატთან შემხვედრ-პარალელურად ჩართვის განხორციელებით.

7. დამუშავებულია მუდმივი დენის წევის ძრავების რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში შემხვედრ-პარალელურად ჩართული უკუმართვადი გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატების საანგარიშო პრინციპული ელექტრული სქემა, როგორც არასაკომუტაციო, ასევე საკომუტაციო დროის განზოგადებულ ინტერვალებისათვის.

8. სადისერტაციო ნაშრომში დამუშავებული მეთოდის საფუძველზე ჩატარებულია შემხვედრ-პარალელურად ჩართულ უკუ მართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური და

ელექტრომექანიკური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება არასაკომუტაციო და საკომუტაციო დროის ინტერვალებისათვის.

9. საძიებელ ცვლადთა კომპლექსური პირდაპირი გარდაქმნის ახალი მატრიცის საფუძველზე, როგორც არასაკომუტაციო, ასევე საკომუტაციო დროის განზოგადებულ ინტერვალებისათვის დამტკიცებულია წევის ძალური სამფაზა ტრანსფორმატორის მეორადი გამმართველი, ინვერტორული და მართვადი უკუ გამმართველი გრაგნილთა თავმოყრის კვანძებისათვის რეზულტირებული კომპლექსური დენების მიმართ თეორემა კირხჰოფის პირველი კანონის მოდიფიკაციის შესახებ.

10. დაგენილია გაერთიანებული გარდამქმნელი ერთიანი სისტემის ნებისმიერი რეჟიმის, ნებისმიერი განზოგადებული დროის ინტერვალებისათვის საინჟინრო გაანგარიშებისა და ანალიზისათვის ხელსაყრელი ცვლადი ექვივალენტური პარამეტრები და მათ საფუძველზე კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის აუცილებელი და საკმარისი პირობების ამსახველი განზოგადებული გამოსახულება, რომელიც თავისთავად გამოხატავს დისერტაციის ნაშრომში შემოთავაზებული ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის იმედიანობისა და სტატიკურ-დინამიკური მდგრადობის შენარჩუნების აუცილებელ და საკმარის ადეკვატურ კრიტერიუმებს; ჩატარებულია რეკუპერაციული რეჟიმის პირობებში ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელირება და მიღებულია გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების სრული მათემატიკური მოდელი, რის საფუძველზე აგებულია პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები; შედგენილია ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მდგომარეობათა კომპლექსური ცვლადების მატრიცული განტოლებები, ჩატარებულია მათი ამოხსნა და მიღებულია რეკურენტული სხვაობითი განტოლებები დატვირთვის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში.

## დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული ძირითადი ნაშრომები:

1. Кохреидзе Г.К.,Гурамишвили Г.Г.,Прангишвили Г.В.,Тетунашвили Е.Р. Математическое и компьютерное моделирование электромагнитных переходных процессов в трехфазной инверторной преобразовательной системе электроснабжения тяговой подстанции. Евразийский Союз Ученых(EUS). XIV международная научно-практическая конференция."Современные концепции научных исследований". 2015 г. №5. Часть 3. стр.88-96.
2. Кохреидзе Г.К.,Гурамишвили Г.Г.,Прангишвили Г.В.,Тетунашвили Е.Р. Математическое и компьютерное моделирование электромагнитных переходных процессов в трехфазных управляемых выпрямителях электроснабжения тяговой подстанции. Евразийский Союз Ученых(EUS). XIV международная научно-практическая конференция."Современные концепции научных исследований." 2015 г. №5. Часть 3. стр.96-104.
3. Кохреидзе Г.К.,Прангишвили Г.В.,Курашвили И.А.,Тетунашвили Е.Р. Математическое и компьютерное моделирование процессов в полупроводниковых преобразовательных системах электроснабжения тяговой подстанции. Международный научный институт "EDUCATIO".Ежемесячный научный журнал. XII Международная научно-практическая конференция:" Научные перспективы XXI века.Достижения и перспективы нового столетия". 2015 г. №5(12). стр.62-69.
4. კობრეიძე გ.კ.,ნემსაძე ს.გ.,ფრანგიშვილი გ.ვ.,გაბრაშვილი მ.ა.,შუკაკიძე თ.დ. ნახევარგამტარულ გარდამქმნელ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური ტექნოლოგიური პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია - მდგრადი ენერჯეტიკა: გამოწვევები და განვითარების პერსპექტივები. ქუთაისი. 2015წ. გვ.13-16.
5. კობრეიძე გ.კ., ბახტაძე მ.გ., ფრანგიშვილი გ.ვ., ტეტუნაშვილი ე.რ. გემის მუდმივი დენის ნახევარგამტარულ გარდამქმნელებში პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება დატვირთვის გაშვებისა და წევის რეჟიმებში. საერთაშორისო კონფერენცია „საზღვაო ინდუსტრიის ინოვაციური გამოწვევები" შრომის კრებული. ბათუმი. 2015წ. გვ-127-134.
6. კობრეიძე გ.კ., ბახტაძე მ.გ. ,ფრანგიშვილი გ.ვ. ,ფხაკაძე შ.ა. ტეტუნაშვილი ე.რ. წევის ქვესადგურებში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია

რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში. III სართაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია - ენერგეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები. ქუთაისი. 2015წ. გვ. 42-47.

7. Кохреидзе Г.К., Бахтадзе М.Г., Прангишвили Г.В., Тетунашвили Э.Р. Повышение коэффициента мощности в тяговых подстанциях в условиях рекуперативного торможения. XIV международная научно-практическая конференция. „Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени“. 2015 г. №9(14). Часть 1. стр. 131-132.

8. კობრეიძე გ.კ., ხორავა ვ.ჯ., ფრანგიშვილი გ.ვ., ტეტუნაშვილი ე.რ. უკუ გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელირება დროის საკომპუტაციო ინტერვალებში წევის ძრავის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში. „ენერგია“, 2016 წ. №3(79). გვ 24-29.

9. კობრეიძე გ.კ., ბახტაძე მ.გ., ფრანგიშვილი გ.ვ., ტეტუნაშვილი ე.რ. თეორემა კირხჰოფის პირველი კანონის მოდიფიკაციის შესახებ, წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების მართვადი უკუ გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატების შემხვედრ-პარალელური მუშაობის პირობებში. „ენერგია“, 2016 წ. №3(79). გვ. 30-35.

10. კობრეიძე გ.კ., ხორავა ვ.ჯ., ფრანგიშვილი გ.ვ., ტეტუნაშვილი ე.რ. წევის ქვესადგურებში ქსელის მიმყოლი სამფაზა ინვერტორების მუშაობის რეჟიმები შემხვედრ-პარალელურად მიერთებული უკუ მართვადი გამმართველის პირობებში. IV სართაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია - ენერგეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები. ქუთაისი. 2016წ. გვ. 12-16.

11. კობრეიძე გ.კ., ბახტაძე მ.გ., ფრანგიშვილი გ.ვ., ტეტუნაშვილი ე.რ. შემხვედრ-პარალელურად ჩართულ უკუ მართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელირება. IV სართაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია - ენერგეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები. ქუთაისი. 2016წ. გვ17-19.

12. Кохреидзе Г.К., Прангишвили Гр.В., Тетунашвили Э.Р. Математическое моделирование электромеханических переходных процессов в встречно-

параллельно соединенных выпрямительно-инверторных агрегатах. The scientific heritage, (Budapest, Hungary) 2016 г. No 4(4). стр. 87-90.

13. Кохреидзе Г.К., Прангишвили Гр.В., Тетунашвили Э.Р Компьютерное моделирование электромагнитных переходных процессов в встречно-параллельно соединенных выпрямительно-инверторных агрегатах. Болгария. „Научный потенциал мира “ The scientific heritage, (Budapest, Hungary), 2016 г. No 4 (4). стр. 87-89.

14. კობრეიძე გ., ფრანგიშვილი გრ., მთვარელიშვილი გ., ტეტუნაშვილი ე., წევის ქვესადგურების ნახევარგამტარულ ერთიან გარდამქმნელ სისტემებში პროცესების მოდელირების ანალიზური და რიცხვითი მეთოდების მათემატიკური თეორია. „ენერჯია“. 2016 წ. №4(80). გვ. 22-27.

15. Кохреидзе Г., Прангишвили Гр., Кекелия Н., Мтварелишვილი Г., Тетунашвили Э., Решение матричных уравнений состояния переменных в выпрямительно-инверторных агрегатах в условиях рекуперативного торможения. „ენერჯია“. 2016 წ. №4(80). გვ. 28-33.

16. კობრეიძე გ.კ., ბახტაძე მ.გ., ხორავა ვ., ფრანგიშვილი გრ.ვ., კეკელია ნ.ა., კერელიშვილი ბ.რ. ინვერტორული სიხშირული რეგულირების ასინქრონულ წევის ძრავიან გაერთიანებულ მართვად გარდამქმნელ სისტემაში პროცესების მათემატიკური მოდელირება და ანალიზი. III ქართულ-პოლონური საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციის „სატრანსპორტო ხიდი ევროპა-აზია“ შრომები. ქუთაისი. 2017 წ. გვ. 267-274.

## Resume

In the doctoral dissertation thesis one presents the actuality of the topic; aim of the work and tasks of the research; methods of research; main results and scientific news of the work; scope of result usage, publication, work approbation and dissertation structure; one covers the dissertation content and shows the questions discussed into the introduction.

In the first chapter there are following questions: modeling the processes in the managing aggregations of electric supply in the traction sub-stations; character of non-symmetric transmission and ongoing of stationary processes in the managing transmitting system of the traction sub-stations; mathematical modeling of calculating electric-magnetic transmitting processes in the traction threefold managing aggregations; computer modeling of electric-magnetic transmitting processes in the traction threefold managing aggregations; establishing the optimization terms of computer over tension in the threefold managing tuners; setting up the structural schedule of the transmitting process model in the traction threefold managing tuners; higher harmonics in nourishing power curve in the traction threefold managing tuners; power coefficient;

Following from the results of the works, on the basis of joining these two methods, there exists a new modernized method of calculating and analyzing the stationary and transmitting processes, in which one uses complex and spectral-operator transmission of the variables. This method gives the opportunity to foresee simultaneously general parameters of transformer and commutation and non-commutation generalized intervals in semiconductor converters. One has done mathematical and computer modeling of calculating the electric-magnetic transmission and joined processes in threefold managing tuner aggregations.

One has established optimization terms of commutation over tension in managing tuners, following from protecting the difference from determinant zero suitable for explaining the matrix equation system, done towards the lookup electricity.

One has done the structural schedules of the transmission process model in the traction threefold structural tuners. One has foreseen the elements of structural model of mathematical operations and their characters.

There exists the reversal difference equation, which easily becomes the subject of making the task by the computer programs.

One has got the expression of distortion coefficient of power curve on the basis of commutation function and on its basis – general expression of power coefficient of managing threefold tuner, depending on the regulation and commutation corners.

In the most desirable case, when the regulation and commutation corners are equal to zero, then meaning of the power coefficient reaches the maximum: 0,9554.

Following from the maximal meaning of power coefficient one has got the attitude between the regulation and commutation corners.

In the second chapter one has done mathematical and computer modeling of the processes in the inverter aggregations of receive network the variable power of electric supply of the traction sub-stations;

One has got the mathematical model of calculating the united processes of electric-magnetic transmission and united processes towards the permanent power in the inverter preface and d,q compilers of resulted power of variable power web in the inverter aggregations.

As a result of done works one has set up the structural schedules in the inverters following to the united processes in the traction threefold.

One has established the optimization terms of commutation over tension in the inverters following to the traction threefold web.

One has made the matrix equation of condition variables in the inverters following to the traction threefold web in the regime of load recuperation braking.

In the third chapter one has done mathematical as well computer modeling of electric-magnetic and electric-mechanical united processes of counter-parallel working of managing tuner-inverter aggregations of the traction sub-station electric supply in the terms of recuperative braking of electrical rolling train; one has fully decided the following main questions in the electrified railway traction transformative sub-stations of the permanent power, in the sequence of the permanent power in the contact, railway circles and locomotive: elaborating the principal electric schedule of counter tuner-inverter aggregations, being turned on counter-parallel way in the terms of recuperation braking of traction motors; compensation of reactive power in the permanent power traction sub-stations in the terms of recuperation braking; mathematical modeling of electric-magnetic and electric-mechanical transitional processes in the counter managing tuner-inverter aggregations, being turned on counter-parallel way;

If we add the rotor movement equation of traction motor being in the generator regime to this mathematical model, we would get the total equation system necessary for analyzing the electric-mechanical transmitting processes (mathematical model).

One has elaborated the principal electric schedule of counter tuner-inverter aggregations in the terms of traction motor recuperative braking in non-communication as well communication interval; computer modeling of electric-magnetic transitional processes in the counter tuner-inverter aggregations; to set up the structural schedules of electric-magnetic transitional process model in the counter managing tuner-inverter aggregations; to establish the optimization terms of commutation over tension in the terms of counter-parallel working of tuner-inverter aggregations managing the electric supply of the traction sub-stations.