

ოთარ ნიშნიანიძე

**„ელექტრული სისტემების ნორმალური და განსაკუთრებული
რეჟიმები“**

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის
მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
თბილისი, 0175, საქართველო
2012 წელი

© საავტორო უფლება “ოთარ ნიშნიანიძე” 2012 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

„ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი“

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავაცანით ოთარ ნიშნიანიძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ელექტრული სისტემების ნორმალური და განსაკუთრებული რეჟიმები“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის „ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი“ სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

ხელმძღვანელი: /ნინა თურქია/

რეცენზენტი: /კონსტანტინე წერეთელი/

რეცენზენტი: /ომარ ზივზივამე/

რეცენზენტი:

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2012 წელი

ავტორი: ოთარ ნიშნიანიძე
დასახელება: “ელექტრული სისტემების ნორმალური და განსაკუთრებული რეჟიმები”
ფაკულტეტი : ”ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი”
აკადემიური ხარისხი: დოქტორი
სხდომა ჩატარდა:

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 იმ მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

რეზიუმე

ოთარ ნიშნიანიძის დისერტაცია „ელექტრული სისტემების ნორმალური და განსაკუთრებული რეჟიმები“ ეხება აქტუალურ პრობლემას. ნაშრომი შედგება 122 გვერდისაგან და დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად წარდგენილი დისერტაციის გაფორმების ინსტრუქციის მიხედვით მოიცავს: ტიტულის გვერდს, ხელმოწერების გვერდს, საავტორო უფლებების გვერდს, რეზიუმეს ორ ენაზე (ქართულ-ინგლისური), შინაარსს (სარჩევს). ძირითადი ტექსტი შედგება შესავლის, ლიტერატურის მიმოხილვის, ექვსი თავის, დასკვნის და გამოყენებული ლიტერატურის სიისაგან.

შესავალში განხილულია კვლევის აქტუალობა, პრობლემის შესწავლის მდგომარეობა, კვლევის მიზანი და ამოცანები, კვლევის საგანი, თეორიული და მეთოდოლოგიური საფუძვლები, კვლევის მეცნიერული სიახლე, ნაშრომის პრაქტიკული მნიშვნელობა, ნაშრომის აპრობაცია, მისი მოცულობა და სტრუქტურა.

პირველ თავში განხილულია აღნიშნულ პრობლემასთან დაკავშირებული თეორიული საფუძვლები. ელექტრული სისტემების ჩანაცვლების სქემები და მათი ელემენტები; განხილულია აღნიშნულ საკითხთან დაკავშირებული ლიტერატურა.

მეორე თავში განხილულია სისტემის მდგომარეობის ამსახველი განტოლებები, კვანძური და კონტურული განტოლებების მიღების მეთოდები. განხილულია ელექტრული ქსელების ანალიზის ტოპოლოგიური მეთოდები. წარმოდგენილია ელექტრული რეჟიმის აღმწერი უნივერსალური განტოლებები. განხილულია კვანძური განტოლებების შედგენა ტრანსფორმატორული კავშირების გათვალისწინებით.

მესამე თავში მოცემულია ელექტრული ქსელების განზოგადებული პარამეტრების, კვანძების საკუთარი და ურთიერთწინააღმდეგობებისა და შტოების საკუთარი და ურთიერთგამტარობის მატრიცების გაანგარიშების მეთოდები. დამუშავებულია გაანგარიშების მეთოდიკა, რომელიც იძლევა გარკვეულ უპირატესობას არსებულთან შედარებით და აგრეთვე

იდლევა კომპიუტერული რესურსების დაზოგვის საშუალებას. განხილულია გრძივი დაზიანებების დენისა და ძაბვის წყაროებით მოდელირების საკითხები.

მეოთხე თავში მოცემულია ნორმალური რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშების ალგორითმები (განივი და გრძივი განზოგადებული პარამეტრების საშუალებით). შეიცავს ძაბვის რეგულირების იმიტაციას. ითვალისწინებს დატვირთვის დამოკიდებულებას ძაბვაზე, ასახულს სტატიკური მახასიათებლით. პროგრამაში გათვალისწინებულია ინფორმაციის დაგროვება მონაცემთა ბაზაში ცხრილების სახით, რომელიც წარმოადგენს შემდგომში საწყის ინფორმაციას სხვადასხვა ტიპის გაანგარიშებებში.

მეხუთე თავში მოცემულია სიმეტრიულ მდგენელთა მეთოდის გამოყენება არასიმეტრიული რეჟიმების ანგარიშის დროს. რომლის არსი მდგომარეობს არასიმეტრიული რეჟიმის დაშლაში სამ სიმეტრიულ რეჟიმად. განხილულია არასიმეტრიული რეჟიმების ანალიზი განსაკუთრებული ფაზის სიმეტრიული მდგენელების საშუალებით და დამუშავებულია მისი რეალიზაციისათვის აუცილებელი საანგარიშო მეთოდები.

მექექსე თავში მოცემულია გრძივი ასიმეტრიის დროს მიღებული რეჟიმების ანალიზი დაზიანებული ფაზის სიმეტრიული მდგენელების საშუალებით. ამ შემთხვევაში ხაზის გაწყვეტის მოდელირებას ვახდენთ დაზიანების ადგილზე იდეალური ძაბვის წყაროს ჩართვით. ყველა ხაზის გრძივი დაზიანება წარმოდგენილია როგორც ერთფაზა დაზიანებების შესაბამისი რეჟიმების ზედდება (ხაზის ორი და სამი ფაზის გაწყვეტა წარმოდგენილია როგორც ფიქტიურ ხაზებში ერთფაზა გაწყვეტების დროს მიღებული ელექტრული რეჟიმების ზედდება დამატებითი პირობის გათვალისწინებით) ასეთი მიდგომა წარმოადგენს მეცნიერულ სიახლეს და რეჟიმების ანალიზის შესაძლებლობებს შეუზღუდავს ხდის.

ბოლოს მოცემულია დასკვნა და გამოყენებული ლიტერატურის ჩამონათვალი.

Abstract

Otar Nishnianidze's dissertation "Electrical Systems for normal and special modes" concerns actual problems. The work consists of 122 pages and according to the guidance for thesis drawing up, presented for receiving academic degree of Doctor, contains: pages of a title, a signature, author's rights, abstract in two languages (Georgian-English), content. Main text consists of introduction, discussion of the literature, six chapters, conclusion and the list of used literature.

Actuality of the research, conditions of problem learning, objects and goals, subject of the research, theoretical and methodological basis, scientific news of the research, approbation of the work, its size and structure are reviewed in the introduction.

Theoretical principles associated with mentioned problem are discussed in the first chapter. Equations expressing the condition of the system replacement schemes are discussed. Literature associated to this issue is reviewed.

In the second chapter there is discussed system state reflecting equations, methods of obtaining of nodal and cycle equations. Topological methods of electrical network analysis are discussed. The electrical mode is describing of the universal equations. In the chapter is described making of nodal equation considering transformer coupling.

In the third chapter is presented calculating methods of electric network generalized parameters, own and interconductivity matrixes of nodes and branches. There is elaborated and explained methods of calculation of generalized parameters, which gives specific advantages than the last one and it also gives possibility to save computer resources. linear asymmetry issues are discussed of the current and voltage sources modeling.

In the fourth chapter is presented algorithm of parameters calculation for normal mode. It consists of tension regulating imitation. In the program is considered accumulation of information in database through schedules which becomes initial information in different type of calculations. In the chapter is described line break modeling through ideal current and tension sources.

In the fifth chapter is discussed application of center limiter method. Formation of joint method for calculating asymmetric malfunction parameters gives possibility of conducting relevant accounts in case of any kind of and combination damage. Analysis of asymmetric damages is based upon center limiter methods which main point is to divide asymmetric mode into three symmetric modes in order in each conformity diagram to apply all those methods equal to symmetric systems. The analysis of asymmetric mode object moves through a Symmetric particular phase. There are developed methods for the realization of the required reporting.

In the sixth chapter is discussed mode analysis in linear asymmetry through Damaged phase center limiters. We make line breaking modeling at the place of damage through tension source which tension corresponds to tension at the place of break with size and direction. We can make imitation of the line break of any number by switching relevant ideal tension sources on. We presented breaking of two and three phases of all lines as in actual lines while single breaks which means confluence of actual lines. In case of confluence own and interconductivity of the lines are equal and this condition is maintained in all three conformity diagrams. Such an approach is scientific innovation and that makes modes of analysis any opportunities.

At the end conclusions and the list of used literature is given.

შინაარსი

შესავალი;

თავი I

1. ნაშრომში წარმოდგენილ პრობლემასთან დაკავშირებით არსებული ლიტერატურის მიმოხილვა;
2. ელექტრული სისტემების ჩანაცვლების სქემები და მათი ელემენტები ;

თავი II

სისტემის მდგომარეობის ამსახველი განტოლებები;

3. კირხჰოფის კანონებზე დაფუძნებული განტოლებები ;
4. სისტემის მდგომარეობის ამსახველი განტოლებების მიღება ტოპოლოგიური ანალიზის მეთოდების გამოყენებით ;
5. სისტემის მდგომარეობის აღმწერი უნიფიცირებული განტოლებები ;
6. კვანძური ძაბვების განტოლების შედგენა ტრანსფორმატორული კავშირების გათვალისწინებით ;

თავი III

ელექტრული ქსელების განზოგადოებული პარამეტრები. ხაზის გაწყვეტის მოდელირება იდეალური დენისა და ძაბვის წყაროებით;

7. კვანძების საკუთარი და ურთიერთწინააღმდეგობა ;
8. მატრიცის შებრუნების ოპერაციის ფიზიკური არსი ;
9. გაუსის მეთოდის შესაბამისობა სქემის გარდასახვებთან ;
10. კვანძების საკუთარი და ურთიერთწინააღმდეგობებისა და შტოების საკუთარი და ურთიერთგამტარობების მატრიცების გაანგარიშების მეთოდები;
11. ხაზის გაწყვეტის მოდელირება იდეალური დენისა და ძაბვის წყაროებით;

თავი IV

ენერგოსისტემის ნორმალური რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშების ალგორითმები;

12. ნორმალური რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება განივი განზოგადებული პარამეტრების საშუალებით;
13. რეჟიმის პარამეტრების განსაზღვრა გრძივი განზოგადებული პარამეტრების საშუალებით;

თავი V

გრძივი ასიმეტრიის დროს მიღებული რეჟიმების ანალიზი განსაკუთრებული ფაზის სიმეტრიული მდგენელების საშუალებით;

14. სიმეტრიულ მდგენელთა მეთოდის გამოყენება არასიმეტრიული რეჟიმების ანგარიშის დროს ;
15. ავარიული რეჟიმის პარამეტრების ანგარიში განსაკუთრებული ფაზის სიმეტრიული მდგენელების საშუალებით;

თავი VI

16. გრძივი ასიმეტრიული რეჟიმების გაანგარიშება დაზიანებული ფაზის პარამეტრების მიხედვით ;

17. დასკვნა;

გამოყენებული ლიტერატურა.

შესავალი

ელექტრული სისტემების და ქსელების გაანგარიშების პრაქტიკაში დამყარებული რეჟიმების ანგარიშებს კვლევის საერთო მოცულობაში მნიშვნელოვანი ნაწილი უკავია. ეს ეხება ელექტრული სისტემების და ქსელების როგორც პროექტირების, ასევე ექსპლუატაციის სტადიებს. რა ტიპის ქსელებისთვისაც არ უნდა ტარდებოდეს ეს ანგარიშები, ყველა შემთხვევაში გვიხდება ოპერირება რთული ჩანაცვლების სქემებით, რომლებიც შეიცავს ათობით და ასობით კვანძს და შტოს. ამ პირობებში ელექტრული ქსელის დამყარებული რეჟიმის საწყისი განტოლებების ხელით ამოხსნა შეუძლებელია. სწორედ, დამყარებული რეჟიმების ანგარიში გახდა ელექტროენერგეტიკის ერთ-ერთი პირველი ამოცანა, სადაც ფართო გამოყენება ჰპოვა კომპიუტერებმა. რიცხვითი ალგორითმების და კომპიუტერული პროგრამების შექმნა მოითხოვდა დამყარებული რეჟიმის განტოლებების ფორმირებას და ამოხსნის ზოგადი მეთოდების დამუშავებას, რომლებიც ერთდროულად არ იყო დამოკიდებული ელექტრული სისტემის ჩანაცვლების სქემის სირთულეზე და კონფიგურაციაზე და ამავე დროს, მაქსიმალურად ითვალისწინებდა სისტემების ზოგად თვისებებს.

ელექტრული ქსელების რეჟიმის მათემატიკური მოდელირება გულისხმობს ელექტრული ქსელის მათემატიკური მოდელის შექმნას და მოდელის რეალიზაციას კომპიუტერზე რიცხვითი ალგორითმის და კომპიუტერული პროგრამის დამუშავების გზით. როგორც წესი, ელექტრული სისტემის ელემენტების (გენერატორების, ტრანსფორმატორების, ელექტროგადამცემი ხაზების, დატვირთვების) მათემატიკური მოდელების შექმნისას იყენებენ მათი ჩანაცვლების სქემების – გამარტივებულ ფიზიკურ მოდელებს, რომლებიც შედგება იდეალიზირებული ელემენტებისაგან.

ელექტრული ენერჯის გადაცემა და განაწილება უნდა ხდებოდეს ქსელის მუშაობის ნორმალურ რეჟიმში, ანუ უზრუნვეყოფილი უნდა იყოს მუშაობის საიმედოობა და ენერჯის ხარისხი. ხშირად ნორმალური რეჟიმის დარღვევა ხდება სხვადასხვა ავარიული

სიტუაციებისას. მაგალითად მოკლე შერთვებით, ხაზის ან ფაზის გაწყვეტებით, ან მათი კომბინაციით (სხვადასხვა სახის გრძივი და განივი დაზიანებებით). ქსელის ელემენტები დაცული უნდა იყოს ავარიული დენების მიერ დაზიანებისაგან.

ენერგეტიკული სისტემის მდგრადი, უავარიო და ეკონომიური მუშაობა შეუძლებელია სარელეო დაცვისა და ავტომატიკის მოწყობილობების გარეშე. დაზიანებული უბნის სწრაფი და სელექტიური გამორთვა ხდება თანამედროვე სარელეო დაცვის მოწყობილობებით. მათი საიმედო მუშაობისათვის გათვლილი უნდა იყოს შესაძლო ავარიული პარამეტრები. ამ პარამეტრების გათვლა-გაანგარიშებას ეძღვნება მრავალი ნაშრომი და ჯერ კიდევ მიმდინარეობს ამ მიმართულებით კვლევა ძიება. ჩვენ დავამუშავეთ მეთოდოლოგია რთული ავარიული რეჟიმების გასაანგარიშებლად.

რეალური მოვლენები და ობიექტები საკმაოდ რთულია. მათი შესწავლისას მკვლევარები იძულებული არიან შექმნან მოდელები – შესასწავლი მოვლენებისა და ობიექტების გამარტივებული ასლები. მოდელის შექმნისას შენარჩუნებული უნდა იყოს რეალური მოვლენის ან ობიექტის არსებითი თვისებები, ე.ი. მოდელი უნდა იძლეოდეს სწორ ინფორმაციას პრაქტიკისთვის მოთხოვნილი სიზუსტით. მეორეს მხრივ, მოდელი უნდა იყოს მარტივი, ადვილად მისაწვდომი შესასწავლად და საჭირო ინფორმაციის მისაღებად (რისთვისაც იქმნება იგი). რაც უფრო გამართლებულია შერჩეული მოდელი, რაც უფრო კარგად ასახავს ის რეალური მოვლენის ან ობიექტის არსებით თვისებებს, მით უფრო წარმატებული იქნება მისი გამოკვლევა და სასარგებლოა ამ გამოკვლევით მიღებული შედეგები და რეკომენდაციები.

ადამიანის ცოდნის თითქმის ყველა სფეროში მათემატიკა იძლევა ანალიზის და პროგნოზის უნივერსალურ და ძალიან ეფექტურ მეთოდს – მათემატიკური მოდელირების მეთოდს, რომლის ძირითად ეტაპს წარმოადგენს მათემატიკური მოდელის შექმნა.

მათემატიკური მოდელი არის რეალური სამყაროს გარკვეული კლასის მოვლენების ან ობიექტების მიახლოებითი აღწერა მათემატიკური სიმბოლიკის საშუალებით.

მათემატიკური მოდელი, რომელიც დაფუძნებულია რაღაც გამარტივებაზე, იდეალიზაციაზე, არ არის რეალური მოვლენის ან ობიექტის გაიგივება და არის მათი მიახლოებითი აღწერა. სწორედ იმის გამო, რომ რეალური მოვლენა ან ობიექტი შეცვლილია შესაბამისი მოდელით, არის საშუალება, დავსვათ მათი შესწავლის ამოცანა, როგორც მათემატიკური და ანალიზისთვის გამოვიყენოთ უნივერსალური მათემატიკური აპარატი, რომელიც არ არის დამოკიდებული მოვლენის ან ობიექტის კონკრეტულ ბუნებაზე. მათემატიკა საშუალებას იძლევა, ერთი მიდგომით აღვწეროთ ფაქტორების და დაკვირვებების ფართო წრე, ჩავატაროთ მათი დეტალური რაოდენობრივი ანალიზი, ვიწინასწარმეტყველოთ, როგორ განვითარდება მოვლენა ან როგორ მოიქცევა ობიექტი სხვადასხვა პირობებში.

მოდელის ანალიზით მიღებულ შედეგებს რეალურ მოვლენასთან ან ობიექტთან აქვს მიახლოებითი ხასიათის კავშირები. მათი სიზუსტე განსაზღვრულია მოდელის და მოვლენის, ან ობიექტის შესაბამისობის, ადეკვატურობის ხარისხით. შედეგების სიზუსტის, შესაბამისობის საკითხი არის მათემატიკური მოდელირების ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი და რთული. ეს საკითხი არ არის წმინდა მათემატიკური და როგორც წესი, მათემატიკური მეთოდებით არ წყდება. მოდელის საფუძველზე მიღებული შედეგების ჭეშმარიტების ძირითადი კრიტერიუმი არის ექსპერიმენტი, პრაქტიკა.

კომპიუტერული ტექნოლოგიების განვითარების შემდეგ თეორიული კვლევის ძირითადი მეთოდი პრაქტიკულად გახდა მათემატიკური მოდელირება. ეს იმით აიხსნება, რომ მათემატიკური მოდელის აგებისა და გამოკვლევის სირთულე ძირითადად დამოკიდებულია შესასწავლი მოვლენის ან ობიექტის სირთულეზე.

ინჟინერს, როგორც წესი, საქმე აქვს რთულ, ხშირად ძალიან რთულ მოვლენებთან და ობიექტებთან. მათემატიკური ამოცანების რიცხვითი მეთოდები ცნობილი იყო უფრო ადრე, სანამ გამოჩნდებოდნენ კომპიუტერები, მაგრამ მათი გამოყენება ხდებოდა ძალიან იშვიათად დიდი გამოთვლების განსაკუთრებული შრომატევადობის გამო. ამის გამო რთული მათემატიკური მოდელის

გამარტივება ხდებოდა დამატებითი დაშვებების მიღებით. მოდელის გამარტივება ამცირებდა შესასწავლ მოვლენასთან ან ობიექტთან მისი ადეკვატურობის ხარისხს, კვლევის შედეგები ხდებოდა ნაკლებად ზუსტი და საინტერესო. ზოგჯერ კი ასეთი გზით მიღებული შედეგები მცდარი იყო. კომპიუტერების გამოჩენამ პრაქტიკულად გადაწყვიტა გამოთვლების პრობლემა.

კომპიუტერების ბაზაზე რიცხვითი მეთოდების გამოყენებამ საგრძნობლად გააფართოვა მათემატიკური ამოცანების კლასი, რომელთა მიმართ შესაძლებელი გახდა ამომწურავი ანალიზის ჩატარება. ახლა მათემატიკური მოდელის აღებისას არ არის საჭირო ძლიერი გამარტივება. ძირითადი ყურადღება მიმართული არის იმაზე, რომ მოდელში გათვალისწინებული იყოს შესაწავლი მოვლენის ან ობიექტის ყველა არსებითი თვისება. მოდელის აღების შემდეგ საკითხი დგება შესაბამისი მათემატიკური ამოცანის რიცხვითი ალგორითმის შემუშავებაზე და კომპიუტერზე მის რეალიზაციაზე. თანამედროვე კომპიუტერებზე რეალიზებული მათემატიკური მოდელები ავიდნენ შესასწავლი რეალური მოვლენების ან ობიექტების შესაბამისობის ისეთ დონეზე, რომ თუ ადრე საუბრობდნენ ლაბორატორიულ ექსპერიმენტებზე ფიზიკურ მოდელებზე, ახლა საუბრობენ გამოთვლით ექსპერიმენტებზე მათემატიკურ მოდელებზე.

ბოლო დროს საინჟინრო საქმის თითქმის ყველა დარგში გამოჩნდნენ კომპიუტერული პროგრამები, რომლებსაც გააჩნია დიდი შესაძლებლობები შესაბამისი საინჟინრო ამოცანების ამოხსნაში და, რაც განსაკუთრებით მიმზიდველია, კომპიუტერთან ძალიან გამარტივებული დიალოგის საშუალება, მაგრამ არ არსებობს უნივერსალური კომპიუტერული პროგრამები, რომლის საშუალებით ამოიხსნება ნებისმიერი კონკრეტული საინჟინრო დარგის ამოცანა. არ შეიძლება ბრმად ვენდოთ ყველა შედეგს, ამ შედეგებს სჭირდება შემოწმება და ანალიზი.

არსებული მეთოდები საშუალებას იძლევიან გავიანგარიშოთ ერთჯერადი ავარიის რეჟიმის პარამეტრები. დაზიანებები შეიძლება იყოს სიმეტრიული და არასიმეტრიული მოკლე შერთვები, ხაზისა და ფაზის გაწყვეტები. ეს მეთოდები ასევე იძლევიან საშუალებას

გაანგარიშებული იქნას დენები და ძაბვები ერთდროულად ორი დაზიანების შემთხვევაში, როგორცაა მაგალითად ერთ უბანში ფაზის გაწყვეტა და მეორე უბანში სიმეტრიული ან არასიმეტრიული მოკლე შერთვა და ა.შ.

წარმოდგენილი მეთოდის საფუძველზე შევქმენით მათემატიკური მოდელი. ამ მეთოდის გამოყენებით კონკრეტული ქსელისათვის ჩავატარეთ ანგარიშები ერთდროული არასიმეტრიული დაზიანებების შემთხვევაში. ანგარიშებს ვაწარმოებდით პროგრამა MATLAB-ის საშუალებით. ამ მოდელის საფუძველზე შეიძლება დამუშავდეს პროგრამა მონაცემთა ბაზის მართვის სისტემაში, თანამედროვე დიზაინითა და გრაფიკით.

ნაშრომში წარმოდგენილია არასიმეტრიული ავარიული რეჟიმების პარამეტრების გაანგარიშების ალგორითმები, დაფუძნებული სისტემის მდგომარეობის ამსახველ კვანძურ განტოლებებზე.

ხაზების გაწყვეტის შემთხვევაში, სიმეტრიული სისტემებისათვის ჩამოყალიბებული თეორია გადაიტანება ავარიული რეჟიმების სიმეტრიულ მდგენელებში.

რაკი ავარიული დენების მდგენელები ცირკულირებენ მხოლოდ შესაბამისი მიმდევრობის სქემაში, ყველა ის კანონი და დებულება, რაც სამართლიანია სიმეტრიული სისტემებისათვის, სამართლიანია თითოეული მიმდევრობის სქემაში არსებული ელექტრული რეჟიმებისათვის. ე.ი. თითოეული მიმდევრობის სქემაში დამოკიდებულება დენებსა და ძაბვებს შორის აღიწერება კვანძური განტოლებებით, წინასწარ, თითოეული მიმდევრობის სქემისათვის გათვლილი კვანძური გამტარებლობების მატრიცის საშუალებით. ამ განტოლებათა გაანგარიშება ხდება ხაზების გაწყვეტის დროს და დგენილი სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით, რასაც უცნობების რიცხვი დაჰყავს დაზიანებათა რიცხვამდე. ამგვარად ერთი ფაზის გაწყვეტის სასაზღვრო პირობები მოსახერხებელია უნიფიცირებული განტოლებების მისაღებად. ამ დამატებით პირობას შეესაბამება ერთ-ერთი დაზიანებული ფაზის ძაბვების (პირდაპირი და უკუ მიმდევრობის სქემებში) შემობრუნება 120^0 -ით. რაკი ყველა დაზიანება წარმოდგენს ერთფაზა დაზიანებების კომბინაციას, წარმოდგენილი მეთოდით

საშუალება გვძლევს გავიანგარიშოთ ნებისმიერი სიმეტრიული და არასიმეტრიული ავარიული რეჟიმები.

თავი I

1.1 ნაშრომში წარმოდგენილ პრობლემასთან დაკავშირებით არსებული ლიტერატურის მიმოხილვა

ენერგოსისტემის პროექტირება და ექსპლუატაცია მოითხოვს დიდი რაოდენობით კვლევებს და გაანგარიშების ჩატარებას ნორმალური და ავარიული რეჟიმების პარამეტრების განსაზღვრასთან დაკავშირებით. ამ კვლევებს მიეკუთვნებიან დამყარებული ნორმალური რეჟიმების გაანგარიშებები, სტატიკური და დინამიკური მდგრადობის ანალიზი, აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების განაწილების ოპტიმიზაცია, მოკლე შერთვის დენების განსაზღვრა, მარეგულირებელი მოწყობილობებისა და ავარიის საწინააღმდეგო ავტომატიკის დანაყენთა პარამეტრთა განსაზღვრა და სხვა. ენერგოსისტემის განვითარება იწვევს ამ ტიპის სამუშაოების გართულებას, რაც თავის მხრივ მოითხოვს თანამედროვე კომპიუტერული ტექნოლოგიების მაღალ დონეს.

ელექტროენერგეტიკული სისტემის რეჟიმების გაანგარიშებასთან დაკავშირებით გამოქვეყნებულია დიდი რაოდენობით ლიტერატურა. [1] ამ შრომებში განხილულია ამ პრობლემის, კერძოდ რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშების სხვადასხვა მეთოდები. მოცემულია ტოპოლოგიური ანალიზის საფუძვლები და კომპიუტერული ტექნოლოგიების გამოყენებით ამ პრობლემის გადაწყვეტის თანამედროვე მიდგომა [2] დეტალურად არის განხილული სისტემის მდგომარეობის ძირითადი განტოლებები და ამ განტოლებების კლასიფიკაცია. [3] ნაშრომი ეძღვნება ელექტრული სისტემის დამყარებული რეჟიმების გაანგარიშების სხვადასხვა მეთოდებს (კვანძურს, კონტურულს). გარდა ამისა განხილულია ამ ამოცანის ამოსხნის სხვადასხვა მეთოდები როგორც პირდაპირი ასევე იტერაციული. გამოკვეთილია ამ მეთოდების განსხვავება და უპირატესობა კონკრეტული ამოცანების გადაწყვეტის დროს. განსაკუთრებული ადგილი უკავია თანამედროვე ალგორითმებს, რომლებიც დიდი განზომილების ამოცანების გადაწყვეტის საშუალებას

იძლევა და უზრუნველყოფს კომპიუტერული რესურსების ეფექტურად გამოყენებას.

ნებისმიერი ელექტრული რეჟიმი როგორც ნორმალური ასევე ავარიული აღიწერება ერთი და იგივე განტოლებებით. ამიტომ განსაკუთრებული ყურადღება ექცევა სისტემის მდგომარეობის აღმწერ განტოლებებს. ტოპოლოგიური ანალიზის საფუძველზე ხდება სისტემის მდგომარეობის ამსახველი განტოლებების წარმოდგენა ინციდენციის მატრიცების საშუალებით. განხილულია განტოლებათა ამოხსნის როგორც პირდაპირი (მატრიცის შებრუნება, გაუსის მეთოდი და სხვა), ასევე იტერაციული მეთოდები (მარტივი იტერაცია, ზეიდელისა და ნიუტონის მეთოდი). განსაკუთრებული ყურადღება აქვს დათმობილი განზოგადებულპარამეტრებიანი მატრიცული განტოლებებით სისტემის მდგომარეობის აღწერას. ამ განტოლებების გამოყენებას როგორც ნორმალური ასევე ავარიული რეჟიმების პარამეტრების გაანგარიშების დროს.

ელ. ქსელის ელექტრული რეჟიმების პარამეტრების გაანგარიშება და ანალიზი წარმოებს ჩანაცვლების სქემების მიხედვით. ჩანაცვლების სქემა ძირითადად შეიძლება წარმოდგენილი იყოს ყველა არსებული შტოს პასიური პარამეტრებით - წინაღობებითა და გამტარობებით, ან განზოგადებული პარამეტრებით. ყველა შემთხვევაში სქემის ტოპოლოგია აისახება ინციდენციის I და II მატრიცებით, რომლებიც თავის მხრივ აისახებიან სქემის პასიური პარამეტრების ამსახველ მატრიცებში.

ავარიული რეჟიმების გაანგარიშების შედეგად მიღებული აქტიური პარამეტრები წარმოადგენენ ერთ-ერთ საფუძველს სარელეო დაცვის სამსახურის გამართული მუშაობისათვის. ამჟამად არსებული მეთოდებით [2,9] წარმოებს ერთჯერადი გრძივი და განივი დაზიანებების გაანგარიშება. არასიმეტრიული რეჟიმის ანგარიში განხილულია სიმეტრიულ მდგენელთა მეთოდის ბაზაზე [2]. ამ მეთოდის თანახმად არასიმეტრიული რეჟიმი წარმოადგენს სამი სიმეტრიული რეჟიმის ზედღებას, რომლებიც შეესაბამებიან პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის სქემებს. თითოეული ამ მიმდევრობის რეჟიმის ანგარიშისას სამართლიანია ყველა ის მეთოდიკა, რაც სამართლიანია

სიმეტრიული სისტემებისათვის. ბოლო დროს წარმოდგენილი კომპიუტერული პროგრამებით გაანგარიშებას ახდენენ ერთდროულად ორი დაზიანების, სიმეტრიული და არასიმეტრიული, შემთხვევებისთვის. ჩვენ ჩავატარეთ სამუშაოები და კვლევა-ძიება რათა მოგვეხერხებინა ყველა ტიპის გრძივი დაზიანების გაანგარიშება.

ენერგოსისტემის სხვადასხვა პირობებში ფუნქციონირებისას ჩნდება არასრულფაზოვანი რეჟიმების ელექტრული პარამეტრების გაანგარიშების საჭიროება, რის გამოც აუცილებელი ხდება არასრულფაზოვანი რეჟიმების პარამეტრების გაანგარიშების მეთოდის დამუშავება. გარდა ავარიული რეჟიმების ანალიზისა აუცილებელია ასევე დამყარებული არასრულფაზა რეჟიმების განხილვაც, ვინაიდან ენერგომომარაგების საიმედოობის უზრუნველსაყოფად დასაშვებია ხანგრძლივი დროით ასეთი რეჟიმების არსებობაც.

ნორმალური რეჟიმის გაანგარიშებას განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება იმ გარემოებების გამო, რომ ამ ანგარიშის შედეგები (ნაკადგანაწილება, კვანძური ძაბვები, ძაბვისა და სიმძლავრის დანაკარგები) აუცილებელია არა მარტო ექსპლუატაციის პროცესისათვის, არამედ აუცილებელია სხვადასხვა ამოცანის ამოხსნის დროსაც. როგორებიცაა ელექტრული რეჟიმების ოპტიმიზაცია, გარდამავალი პროცესების, სიმეტრიული და არასიმეტრიული რეჟიმების ანგარიში და სხვა.

ნორმალური რეჟიმის პარამეტრები გამოიყენებიან ავარიული რეჟიმების გასაანგარიშებლადაც. თვითონ ავარიული რეჟიმის პარამეტრების განსაზღვრა ასევე აუცილებელ ამოცანას წარმოადგენს, ვინაიდან ავარიული პარამეტრების წინასწარი განსაზღვრის გარეშე წარმოუდგენელია სისტემის უსაფრთხო მუშაობის უზრუნველყოფა.

ელექტრული რეჟიმების ანგარიშის ჩასატარებლად აუცილებელია ელექტრული სისტემის პრინციპული სქემის წარმოდგენა მისი ჩანაცვლების სქემით.

ელ. სისტემის ჩანაცვლების სქემაში გენერაცია და მომხმარებლის ტვირთები შეიძლება წარმოდგენილი იყოს როგორც კვანძური დენების (დენის წყაროების) ან სიმძლავრეების საშუალებით, ასევე ძაბვის წყაროებითა და შტოების წინააღობებით ან გამტარობებით.

1.2 ელექტრული სისტემების ჩანაცვლების სქემები და მათი ელემენტები

ელექტრული წრედი ეწოდება ერთმანეთთან შეერთებულ გამტარს, ნახევარგამტარს და დიელექტრიკული სხეულების ერთობლიობას, რომელშიც ელექტრომაგნიტური პროცესების აღწერა შესაძლებელია ელექტრული დენების და ძაბვების ცნების საშუალებით.

წრედების თეორიის აბსტრაქცია შედგება წრედის ყოველი ელემენტის დენების და ძაბვების სიმრავლეების გარკვეული შეფარდების წარმოდგენით.

წრედებში ელექტრომაგნიტური ენერჯიის გარდაქმნის პროცესების აღწერისათვის იყენებენ იდეალიზებულ ელემენტებს, ყოველ ელემენტში პროცესები დაკავშირებულია ველის ენერჯიის ერთ სახეობასთან. წრედის ელემენტები განიხილება, როგორც მათემატიკური მოდელები, სადაც ერთმანეთს უკავშირდება დენები და ძაბვები. ამის გარდა, ყოველ ელემენტს შეესაბამება სპეციალური გრაფიკული სიმბოლო. წრედის გამოსახულებას ასეთი გრაფიკული ელემენტების საშუალებით ეწოდება წრედის სქემა, რომელიც ძალიან მოხერხებულია წრედის შესწავლის დროს.

ელექტრული წრედის ანალიზი, ჩვეულებრივ წარმოებს გრაფიკული გამოსახულების მიმართ, რომელსაც ელექტრული წრედის სქემა ეწოდება.

ელექტრული სქემა შედგება წრედის ყველა ელემენტის სტანდარტული, გრაფიკული სიმბოლოებისაგან და გვიჩვენებს მათი შეერთების თანმიმდევრობას და ამასთანავე ასახავს განსახილველი ელექტრული წრედის თვისებებს. ელექტრული სქემის ელემენტები იყოფიან აქტიურ და პასიურ ელემენტებად.

აქტიური ელემენტებია – ელექტრული ენერჯიის წყაროები, სადაც არაელექტრული ენერჯიის ფორმები გარდაიქმნება ელექტრულ ფორმაში. ასხვავებენ ორ ძირითად აქტიურ ელემენტს: ძაბვის წყარო (ე.მ.ძ.) და დენის წყარო.

იდეალიზირებულ დენის წყაროს უწოდებენ წრედის ელემენტს, რომელიც ქმნის მოცემულ დენს $i(t)$ იმის დამოუკიდებლად, რა ძაბვაა მის პოლუსებზე. დენის წყაროებს შეესაბამებიან ელექტროსადგურების გენერატორები და მომხმარებელთა დატვირთვები. დენის წყაროები არიან ელექტროენერჯის წყაროები რომელთაც დატვირთვის წინააღობის ცვლილებისას დენის მნიშვნელობა არ ეცვლება. ასეთი რეჟიმი შესაძლებელია მაშინ როცა შიდა წინააღობა გაცილებით აღემატება დატვირთვის წინააღობას. მართლაც გენერატორის წინააღობა დამყარებულ რეჟიმში, 3-4-ჯერ მეტია გარე დატვირთვის წინააღობაზე. ამიტომ ნომინალური პარამეტრებით მუშაობის დროს, გარე წინააღობის მცირე ცვლილებისას, გენერატორის დენის მნიშვნელობა შეგვიძლია უცვლელად ჩავთვალოთ.

იდეალიზირებულ ძაბვის წყაროს უწოდებენ წრედის ელემენტს, რომელიც ქმნის თავის მომჭერებზე მოცემულ ძაბვას $u(t) = -e(t)$ იმის დამოუკიდებლად, რა დენი გადის წყაროში. ძაბვის წყაროები წარმოადგენენ ელექტროენერჯის წყაროებს, რომელთა გამომყვანებზე ძაბვა არ იცვლის მნიშვნელობას დატვირთვის ცვლილებისას საკმაოდ დიდ ზღვრებში. ეს ნიშნავს იმას, რომ ძაბვის წყაროს შიდა წინააღობა იმდენად მცირეა, რომ ძაბვის ვარდნა მასზე ძალზედ პატარაა. ამის გამო ძაბვის წყაროს შეუძლია შეინარჩუნოს უცვლელი სიდიდის ძაბვა მომჭერებზე გარე დენის ცვლილებისას საკმაოდ დიდ ფარგლებში.

პასიური ელემენტები – ელექტრომაგნიტური ენერჯის მიმღებებია. მათში ელექტრომაგნიტური ენერჯია გარდაიქმნება არაელექტრული ენერჯის ფორმებში – აქტიური წინააღობა (გამტარობა), ან გროვდება (აკუმულირდება) ელექტრული ველის ენერჯის ფორმით (ტევადობა) ან მაგნიტური ველის ენერჯის ფორმით (ინდუქციურობა). ტევადობა და ინდუქციურობა არის ენერჯის რეაქტიული მიმღებები ან რეაქტიული ელემენტები.

აქტიურ წინააღობაში დენი ძაბვის პროპორციულია. ეს იდეალიზაცია შეესაბამება ომის კანონს: $u_r = i_r R$ ან $i_r = \frac{u_r}{R}$. წინააღობის შებრუნებულ სიდიდეს უწოდებენ გამტარობას. გაზომვის ერთეული არის სიმენსი.

ზემოთ ჩამოთვლილი პასიური ელემენტების ძირითადი პარამეტრები არიან აქტიური წინაღობა R , ინდუქტივობა L , და ტევადობა C . წრედის პარამეტრები ამა თუ იმ ხარისხით დამოკიდებულნი არიან დენზე და ძაბვაზე. მაგალითად წინაღობა R დამოკიდებულია დენზე, რადგანაც დენის გაზრდისას იზრდება გამტარის ტემპერატურა. კონდენსატორის ტევადობა დამოკიდებულია ძაბვაზე, ხოლო კოჭას ინდუქტივობა კი დენზე. ეს დამოკიდებულება უმრავლეს შემთხვევაში ძალზედ სუსტია და ამიტომ შეგვიძლია მისი უგულებელყოფა. ე. ი. ჩვენ შეგვიძლია წრედის პასიური ელემენტების მახასიათებლები წარმოვიდგინოთ სწორი ხაზებით. წრედის ასეთ ელემენტებს ეწოდებათ წრფივი. წრფივ ელემენტებში წინაღობა – R , ტევადობა – C , ინდუქტივობა – L მუდმივი სიდიდეებია, ანუ არ არიან ელემენტში გამავალ დენზე და მოდებულ ძაბვაზე დამოკიდებულნი.

რეალურ ელექტრულ წრედებში: მოცემული წინაღობა უზრუნველყოფილია, როგორც წესი, სპეციალური ნაკეთის – რეზისტორის ჩართვით; მოცემული ტევადობა – სპეციალური ნაკეთის – კონდენსატორის ჩართვით; მოცემული ინდუქტივობა – კოჭების და გამტარების ჩართვით. იდეალიზირებული ელემენტებისგან განსხვავებით, ელექტრული წრედების რეალური ელემენტები ხასიათდება პარამეტრების სიმრავლით. მათი ნაწილის მოდელირება შესაძლებელია ასევე იდეალიზირებული ელემენტებისაგან შედგენილი ეკვივალენტური ელექტრული სქემების (ჩანაცვლების სქემების) დახმარებით.

ელექტრული წრედის დამყარებული რეჟიმი, მუდმივი დენისა და ძაბვის წყაროების არსებობისას, არის წრედის ისეთი მდგომარეობა, რომლის დროსაც დენი ნებისმიერ შტოში და ძაბვა ნებისმიერ კვანძში არის უცვლელი ხანგრძლივი დროის განმავლობაში. დამყარებულ რეჟიმში გვაქვს წრფივი პასიური ელემენტები და მოდულითა და ფაზით უცვლელი დენის წყაროები. ასეთ შემთხვევაში დამყარებული რეჟიმი აღიწერება წრფივი ალგებრული განტოლებებით. ასეთ წრედებს ეწოდებათ წრფივი ელექტრული წრედები. ეს შემთხვევა შეესაბამება ელექტრული სისტემის დამყარებული რეჟიმის ანგარიშს, როდესაც

დატვირთვებისა და გენერატორების დენებს, ელექტროსისტემის ნებისმიერ კვანძში გააჩნიათ უცვლელი სიდიდის მოდული და ფაზა.

ყველა რეალური წრედი არის არაწრფივი, მაგრამ ხშირად მოდელირების საჭირო სიზუსტე არაწრფივობის უგულვებელყოფის საშუალებას იძლევა.

თუ ელექტრული წრედის პასიური ელემენტების პარამეტრები დამოკიდებულნი არიან გამავალ დენზე და მოდებულ ძაბვაზე, მაშინ ასეთი ელემენტების მახასიათებლებიც არაწრფივია, და ასეთ ელემენტებს ეწოდებათ არაწრფივი. ვიცით, რომ ისეთ ელექტრულ წრედს რომელიც შეიცავს თუნდაც ერთ არაწრფივ ელემენტს ეწოდება არაწრფივი.

ელექტრული სისტემების დამყარებული რეჟიმების ანგარიშისას, პასიური ელემენტების არაწრფივობა, როგორც წესი არ არის გათვალისწინებული. ამ მხრივ ჩანაცვლების სქემის გრძივი ნაწილი, ყოველთვის წრფივია. ამავე დროს, როგორც წესი, დამყარებული რეჟიმების ანგარიშისას ითვალისწინებენ დენის წყაროების არაწრფივ მახასიათებლებს.

დენის წყაროების არაწრფივობა შეესაბამება კვანძებში გენერატორებისა და მომხმარებლების ტვირთების მოცემას მუდმივი სიმძლავრით, ასევე დატვირთვების მოცემას მათი სტატიკური მახასიათებლებით, რომლებიც წარმოადგენენ მომხმარებლის ტვირთის დამოკიდებულებას ძაბვაზე. ასეთი არაწრფივი დენის წყაროების არსებობისას ელექტრული სისტემის დამყარებული რეჟიმები აღიწერება არაწრფივი ალგებრული განტოლებებით ანუ დამყარებული რეჟიმის არაწრფივი განტოლებებით.

ელექტრული სისტემის რეჟიმი განისაზღვრება მასში შემავალი ელექტროსადგურების და მომხმარებლების დატვირთვებით, აგრეთვე გადამცემი ქსელების მდგომარეობით. ელექტროსადგურების, გენერატორების და მომხმარებლების დატვირთვები იცვლება დღე-ღამის, კვირის, წლის მანძილზე. დამყარებული ნორმალური რეჟიმები ელექტრულ სისტემას შეიძლება ჰქონდეს ბევრი, მაგრამ მათი პარამეტრები მოთავსებული იყოს შესაძლო მინიმალური დატვირთვების რეჟიმიდან შესაძლო მაქსიმალური დატვირთვების რეჟიმამდე. ქსელის

ელექტრული დატვირთვების ცვლილებები ხდება დროის ყოველ მომენტში. ელექტრული სისტემების და ქსელების დამყარებული რეჟიმები (ზუსტი გაგებით) პრაქტიკულად არ არსებობს. დამყარებულად ითვლება რეჟიმი, როცა დროის განსახილველ პერიოდში მისი პარამეტრების საშუალო მნიშვნელობა ან არ იცვლება, ან იცვლება უმნიშვნელოდ.

ელექტრული სისტემის დამყარებულ რეჟიმში იგულისხმება სამფაზა ცვლადი დენის სიმეტრიული სისტემის სიმეტრიული დამყარებული რეჟიმი. ამ პირობებში ელექტრული სისტემის ჩანაცვლების (საანგარიშო) სქემა იქმნება ერთი ფაზისთვის ნეიტრალით (კვანძით, რომლის ძაბვა არის ნულის ტოლი) და შედგება ელექტრული წრედის ელემენტებისაგან: ე.მ.ძ. და დენის წყაროები, აქტიური წინაღობები, ინდუქციურობები და ტევადობები.

ელექტრული სისტემის ჩანაცვლების სქემის ყველა ელემენტი შესაძლებელია დაყვით აქტიურ და პასიურ ელემენტებად.

როგორც აღვნიშნეთ, აქტიური ელემენტი ეწოდება ისეთ ელემენტს, რომელიც ახდენს ელექტროენერგიის გენერირებას და მოხმარებას (ელექტროსადგურების გენერატორები და ქვესადგურების დატვირთვები). როგორც წესი, დამყარებული რეჟიმების ანგარიშის დროს აქტიური ელემენტები წარმოგვიდგებიან დენების წყაროების ან მოცემული დენების სახით.

პასიურ ელემენტებს მიეკუთვნება ელექტრული სისტემის ელემენტები, რომლებიც ახორციელებს ელექტრული ენერგიის გადაცემას და გარდაქმნას (ელექტროგადამცემი ხაზები, ტრანსფორმატორები და ავტოტრანსფორმატორები, აგრეთვე გრძივი და განივი კომპენსაციის არარეგულირებადი სტატიკური მოწყობილობები). ამ ელემენტების ჩანაცვლების სქემები შედგება აქტიური, ინდუქციური და ტევადური წინაღობებისაგან, რომლებიც ქმნის გრძივ (ნეიტრალთან არადაკავშირებული) ან განივ (ნეიტრალთან დაკავშირებული) შტოებს. ზოგ შემთხვევაში ტრანსფორმატორის ან ავტოტრანსფორმატორის ჩანაცვლების სქემის დამაგნიტებული შტო შედის ანგარიშებში სიმძლავრის მუდმივი წართმევით, რომელიც, როგორც დატვირთვა, მოცემულია დენის წყაროს სახით. თუ ელექტრული სისტემების

ჩანაცვლების სქემა არ დაიყვანება ძაბვის ერთ საფეხურამდე, მაშინ ტრანსფორმატორული ელემენტების ჩანაცვლების სქემებში წინაღობების გარდა შეჰყავთ იდეალური (დანაკარგების გარეშე) ტრანსფორმატორები.

ცვლადი დენის ელექტრული ქსელები სამფაზიანია. დამყარებული რეჟიმების ანგარიშის დროს განიხილება სიმეტრიული და სინუსოიდალური დენების და ძაბვების სიმეტრიული ქსელი. ამ შემთხვევაში შესაძლებელია მხოლოდ ერთი ფაზის ჩანაცვლების სქემის და რეჟიმის პარამეტრების განხილვა.

ელექტრული ქსელების ნომინალური ძაბვები არის ფაზათაშორის ძაბვები. კვანძის ფაზათაშორისი ძაბვაა: $U = U' + jU''$ სადაც, U' ძაბვის აქტიური და U'' რეაქტიული მდგენელებია.

ანალოგიურად, ხაზის (ან კვანძის) დენი: $I = I' + jI''$

ერთი ფაზის სრული სიმძლავრე: $S_{\text{ფ}} = U_{\text{ფ}} I_{\text{ფ}}^*$

სადაც $I_{\text{ფ}}^*$ – არის დენის შეუღლებული კომპლექსი.

სამი ფაზის სრული სიმძლავრე $S = 3S_{\text{ფ}} = 3U_{\text{ფ}} I_{\text{ფ}}^* = \sqrt{3} U I^* = P + jQ$

სადაც $P = \sqrt{3} U I \cos \varphi$ და $Q = \sqrt{3} U I \sin \varphi$ - შესაბამისად, სამივე ფაზის აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრე (φ კუთხე დენის და ძაბვის კომპლექსებს შორის).

აქედან კვანძური დენი: $I = \frac{S^*}{\sqrt{3} U^*} = \frac{P - jQ}{\sqrt{3}(U' - jU'')}$

საბოლოოდ ჩვენ შეგვიძლია დავასკვნათ: თუ ენერგოსისტემის ჩანაცვლების სქემა, რომელიც წარმოდგენილია წრფივი პასიური ელემენტებით R, L, C და დენის წყაროები მოცემულია მუდმივი სიდიდის დენითა და ფაზით, მაშინ ასეთი რეჟიმი აღიწერება წრფივი ალგებრული განტოლებებით. ხოლო თუ ენერგოსისტემის ჩანაცვლების სქემაში დენის წყაროები მოცემულია სიმძლავრით: $I_{\text{ფ}} = \frac{S_{\text{ფ}}^*}{\sqrt{3} U_{\text{ფ}}^*}$ (13.1), მაშინ ეს რეჟიმი აღიწერება არაწრფივი ალგებრული განტოლებებით. ასეთი სახით წარმოდგენილ დენის წყაროზე ამბობენ, რომ იგი არაწრფივია, რადგანაც ის დამყარებული რეჟიმის ამსახველ განტოლებაში ჯდება არა როგორც მუდმივი სიდიდე (როგორც R, C,

L), არამედ როგორც ძაბვის ფუნქცია. ეს ჩანს (13.1) განტოლებიდანაც, სადაც $\underline{S}_{კვ}^* = \text{const}$

ელექტრული წრედის ტოპოლოგიური თვისებები არ არის დამოკიდებული წრედში შემავალი ელემენტების ტიპზე და თვისებაზე. აზრი აქვს ელექტრული წრედის სქემის ყოველი შტო გამოვსახოთ წირის მონაკვეთით შემავალი.

ელექტრული წრედი და შესაბამისად მისი სქემა შეიცავს შტოებს, კვანძებს და კონტურებს.

ელექტრული წრედის უბანი ერთი ან რამდენიმე ელემენტით, რომლებშიც გადის ერთი და იგივე დენი, წარმოადგენს შტოს. თუ შტოში ჩართულია ენერჯიის წყარო, ის არის აქტიური შტო, ხოლო წყაროს არარსებობის შემთხვევაში – პასიური შტო.

წრედის შეერთების წერტილს, სადაც თავს იყრის სამი და მეტი შტო, ეწოდება კვანძი.

წრედის ჩაკეტილ ნაწილს, რომელიც შეიცავს რამოდენიმე შტოს კონტური ეწოდება. თუ ელექტრული წრედის სქემას არ გააჩნია კონტურები, მაშინ მას ეწოდება გახსნილი. გახსნილ სქემებში თითოეული კვანძის კვება ხორციელდება მხოლოდ ერთი მხრიდან. თითოეული კვანძი იღებს კვებას არაუმეტეს ერთი შტოდან. რომელიმე შტოს გამორთვა გამოიწვევს ყველა იმ კვანძის კვების შეწყვეტას რომლებიც კვებას იღებდნენ ამ შტოს გავლით. სქემა, რომელიც შეიცავს თუნდაც ერთ კონტურს ეწოდება ჩაკეტილი სქემა. ჩაკეტილ სქემაში არსებობს ერთი კვანძი მაინც, რომელიც კვებას იღებს ორი ან მეტი შტოდან. რომელიმე შტოს გამორთვა არ გამოიწვევს კვების შეწყვეტას.

შტო, რომელიც შედის მხოლოდ ერთ კონტურში წარმოადგენს არამოსაზღვრე შტოს. სხვა შემთხვევაში არის მოსაზღვრე შტო. კონტური – რომელიც შეიცავს მხოლოდ ერთ არამოსაზღვრე შტოს არის დამოუკიდებელი კონტური.

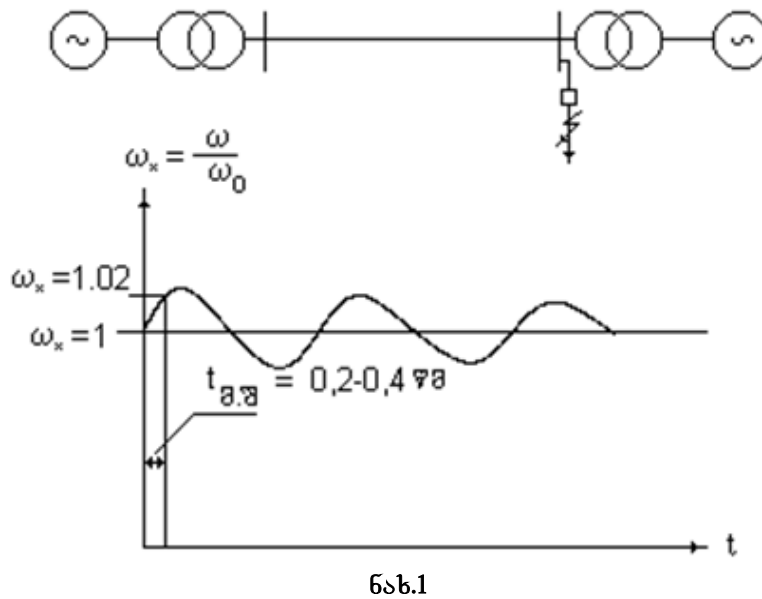
იმისათვის რომ ვიანგარიშოთ ელექტრული სისტემის მუშაობის რეჟიმი საჭიროა, რომ თავდაპირველად შევადგინოთ მისი ჩანაცვლების სქემა.

გაანგარიშება ტარდება მთელი რიგი დაშვებების გათვალისწინებით. ეს დაშვებები ამარტივებს გაანგარიშებას. ამავე დროს, დაშვებები არ უნდა ამახინჯებდეს ფიზიკურ სურათს და არ უნდა იწვევდეს რეზულტატების მნიშვნელოვან ცდომილებას. ჩამოვთვალოთ ეს დაშვებები.

1. დავუშვათ რომ, სისტემის ყველა ელემენტი სიმეტრიულია. ე.ი. ჩავთვალოთ რომ, მათი ფაზების წინააღობები ტოლია. გენერატორებსა და ტრანსფორმატორებში სიმეტრია არსებობს ბუნებრივად, მათი კონსტრუქციიდან გამომდინარე. ასიმეტრიით ხასიათდება გადამცემი ხაზები.

A და C ფაზების სადენებს შორის მანძილი ორჯერ მეტია A და B ან B და C ფაზების სადენებს შორის მანძილთან შედარებით. ამის გამო A და C ფაზების 1 კმ სიგრძის ინდუქციური წინააღობა მეტია, ვიდრე B ფაზის. ეს განსხვავება დიდი არ არის. თუ ავიღებთ სამივე ფაზის წინააღობების საშუალო არითმეტიკულ სიდიდეს, დავინახავთ რომ, განსხვავება მასსა და ფაზების წინააღობებს შორის 1,7—3,6%-ია. პრაქტიკული გაანგარიშებისათვის ეს ცდომილება მნიშვნელოვან როლს არ ასრულებს. ამიტომ გადამცემი ხაზის სიმეტრიულობის დაშვება სავსებით მისაღებია.

2. გენერატორების ბრუნთა რიცხვი მიღებულია მუდმივად და სინქრონულის ტოლად, (ნახ. 1). მოკლე შერთვის დროს გენერატორების დატვირთვები იცვლება. ეს იწვევს მათი ბრუნთა რიცხვის ცვალებადობას. მაგრამ გენერატორების დიდი მექანიკური ინერციულობის გამო, ეს ცვლილება მ.შ-ის არსებობის განმავლობაში უმნიშვნელოა და შეიძლება ჩაითვალოს რომ, სისტემის ყველა გენერატორი სინქრონული კუთხური სიჩქარით ბრუნავს.

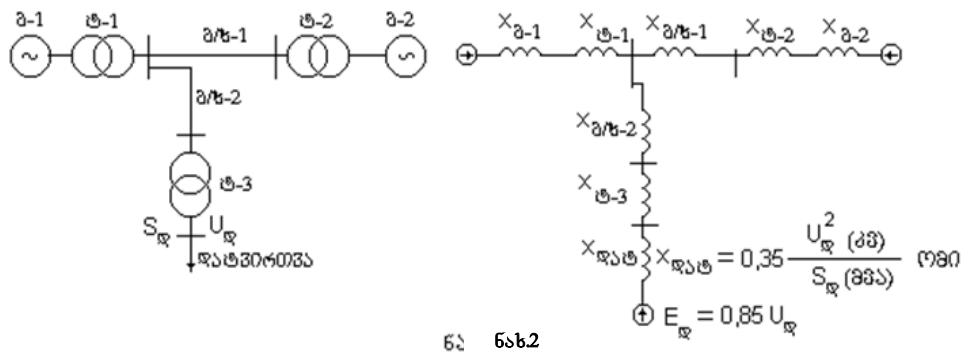


ნახ.1

ეს დაშვება საშუალებას გვაძლევს განვიხილოთ სისტემა, რომელშიც ყველა ე.მ.ძალას აქვს 50 ჰერცი სიხშირე. გენერატორების რეალური ბრუნთა რიცხვის მხედველობაში მიღება მიგვიყვანდა სიტუაციამდე, სადაც ყველა ე.მ.ძალას ექნებოდა თავისი, 50 ჰერცისაგან განსხვავებული სიხშირე.

3. დატვირთვის ჩანაცვლება წინააღობით.

ელექტრული სისტემის კვანძებში მიერთებული დატვირთვა მრავალგვარია. ის შედგება განათების ნათურებისაგან, ელექტრული გამაცხელებლებისაგან, სხვადასხვა ელექტრული ხელსაწყოებისა და, რაც მთავარია, სინქრონული და ასინქრონული ძრავებისაგან. ასეთი კომპლექსური დატვირთვის ჩანაცვლების სქემის შედგენა შეუძლებელია. ყველა კონკრეტულ შემთხვევაში მისი შემადგენლობა იქნება სხვადასხვა. გარდა ამისა, მ.შ-ის შემთხვევაში, ასინქრონული და სინქრონული ძრავები გზავნიან მ.შ-ის დენს. ეს დენი მიღვევადია, მაგრამ მ.შ-ის პირველ მომენტში საჭიროა მისი მხედველობაში მიღება. ჩატარებული კვლევებით დადგინდა, რომ კომპლექსური დატვირთვა შეიძლება შეიცვალოს ეკვივალენტური რეაქტიული წინააღობით და სათანადო ე.მ.ძალით. დატვირთვის ეკვივალენტური ინდუქციური წინააღობის სიდიდე აიღება მისი ძაბვის და სრული სიმძლავრის მიხედვით (ნახ. 2).



ნა ნახ.2

ე.მ.ძალა აიღება ნორმალური ძაბვის 0,85-ის ტოლად. ასეთი დაშვება არ არის მკაცრი, მაგრამ პრაქტიკისათვის საკმარისი სიზუსტის რეზულტატს იძლევა.

თავი II

სისტემის მდგომარეობის ამსახველი განტოლებები

2.1 კირხჰოფის კანონებზე დაფუძნებული განტოლებები

ჩანაცვლების სქემის პასიური პარამეტრებით წარმოდგენის შემთხვევაში ქსელის პასიური პარამეტრები აისახებიან კონტურული წინაღობებით – კონტურების საკუთარი და ურთიერთწინაღობების მატრიცით $Z_{კონტ}$, ან კვანძური გამტარობებით - კვანძების საკუთარი და ურთიერთგამტარობების მატრიცით $Y_{კვ}$. ხოლო, თუ ჩანაცვლების სქემა წარმოდგენილია ყველა არსებული შტოს განზოგადებული პარამეტრებით - კვანძების საკუთარი და ურთიერთწინაღობების მატრიცით $Z_{კვ}$ და შტოების საკუთარი და ურთიერთგამტარობების მატრიცით $Y_{შტ}$.

კვანძური დენების (დენის წყაროების) ან სიმძლავრეების, ასევე ძაბვის წყაროებითა და შესაბამისი წინაღობებით ან გამტარობებით წარმოდგენილი ჩანაცვლების სქემების გამოყენებას საფუძვლად უდევს გარკვეული მოსაზრება და მიზანი, რომელიც შეიძლება გამომდინარეობდეს ამოცანის სპეციფიკურობიდან და არსებული რესურსების შესაძლებლობიდან. მაგალითად, ყველაზე მარტივ შემთხვევაში, როდესაც შესაძლებელია ელექტრული რეჟიმის გაანგარიშება მხოლოდ მოცემული კვანძური დენებისა (სიმძლავრეების) და ბაზისური (ამავდროულად მახალანსირებელი) კვანძის მოცემული ძაბვის საფუძველზე.

ამ დროს სისტემის მდგომარეობა შეიძლება აღწერილი იყოს როგორც კვანძური, ისე კონტურული განტოლებებით. მეორე სახის ჩანაცვლების სქემის გამოყენების შემთხვევაში სისტემის მდგომარეობა შეიძლება აღიწეროს როგორც კონტურული, ისე განზოგადებულპარამეტრებიანი განტოლებებით, რაც წარმოადგენს ელექტრული სისტემის მდგრადობის ანალიზისა და ავარიული რეჟიმების პარამეტრების გაანგარიშების საფუძველს.

ელექტრული სისტემის დამყარებული რეჟიმები მათემატიკურად აღიწერება განტოლებების ორი ჯგუფით: 1) წრფივი ალგებრული

განტოლებებით, რომლებიც აკავშირებს წრფივი ელექტრული წრედის ჩანაცვლების სქემის პასიური ელემენტების დენებს და ძაბვებს; 2) არაწრფივი განტოლებებით, რომლებიც აკავშირებს ენერჯის წყაროების და დატვირთვების სიმძლავრეებს, დენებს და ძაბვებს.

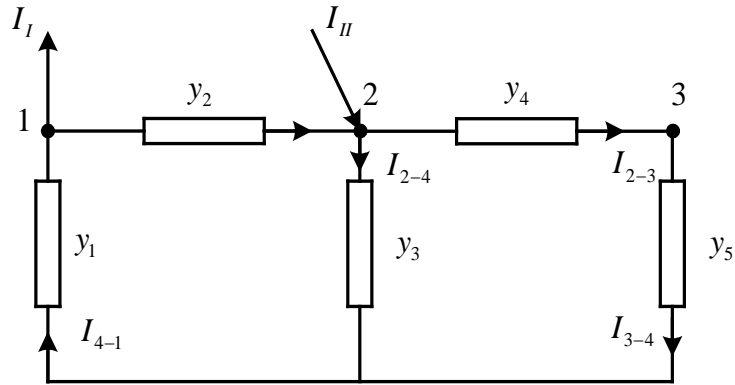
ყოველ ელექტრულ წრედში, კირხჰოფის კანონების გამოყენებით, შეიძლება განისაზღვროს დენები ყველა დანარჩენ უბნებში. ამისათვის უნდა შედგეს იმდენი ტოლობა, რამდენიც უცნობი დენია წრედში. უნდა შევნიშნოთ, რომ ტოლობების რიცხვი, რომელიც შეიძლება კირხჰოფის კანონის მიხედვით შედგეს, ყოველთვის მეტია უცნობი დენების რიცხვზე, მაგრამ ამ ტოლობების ნაწილი წარმოადგენს დანარჩენების შედეგს.

თუ წრედს აქვს n კვანძი, მაშინ კირხჰოფის პირველი კანონის გამოყენებით საჭიროა შედგენილ იქნას მხოლოდ $(n-1)$ განტოლება. დანარჩენი ტოლობები შედგენილი იქნება კირხჰოფის მეორე კანონის მიხედვით; ყურადღება უნდა მიექცეს იმას, რომ კონტური, რომლისთვისაც ტოლობა შედგება, შეიცავდეს ისეთ შტოს მაინც, რომელიც არ შედის წინათ შედგენილ ტოლობებში.

წრფივი ელექტრული სისტემის მდგომარეობა აღიწერება კირხჰოფის პირველი და მეორე კანონის და ომის კანონის საფუძველზე შედგენილი განტოლებებით. საანგარიშო პრაქტიკაში ფართოდ გამოიყენება გარდაქმნილი კონტურული და კვანძური განტოლებები. ამასთან, კვანძური განტოლებები ღებულობს ყველაზე მარტივ სახეს, ელექტრული წრედის აქტიური ელემენტები მოიცემა მხოლოდ დენის წყაროებით, კონტურული განტოლებები – ე.მ.ძ-ის წყაროებით.

დიდი რაოდენობის ელემენტების მქონე განშტოებული ელექტრული წრედებისთვის კონტურული განტოლებების ფორმირების სირთულემ, ამ განტოლებების თვისებების დამოკიდებულებამ დამოუკიდებელი კონტურების სისტემის შერჩევაზე და შენაცვლების სქემის შტოების რაოდენობის გაზრდამ აქტიური ელემენტების ე.მ.ძ-ის წყაროებით წარდგენის დროს განაპირობა კომპიუტერზე ელექტრული სისტემების დამყარებული რეჟიმების ანგარიშის დროს კონტურული განტოლებების ბევრად იშვიათი გამოყენება, ვიდრე კვანძური განტოლებებისა.

განვიხილოთ კვანძური ძაბვების განტოლების მიღების კონკრეტული მაგალითი (ნახ.3).



ნახ.3

მეოთხე კვანძი ავიღოთ მახლანსირებელ კვანძად. ამავე კვანძის ძაბვა იყოს ბაზისური ძაბვა U_4 . დენების მიმართულება შტოებში ავირჩიოთ ნებისმიერად თუ ამოხსნის შემდეგ დენის სიდიდეს მივიღებთ უარყოფითი ნიშნით, მაშინ ამ დენის რეალური მიმართულება არ ემთხვევა ჩვენს მიერ აღებულ ნაკადგანაწილებას, მაშინ დენს ნახაზზე შეეცვლება მიმართულება. ნახ.3-ზე მოცემული წრედის 1, 2, 3 კვანძებისათვის დავწეროთ კირხჰოფის I კანონის მიხედვით განტოლებები:

$$\begin{cases} I_{41} - I_{12} = -I_1 \\ -I_{24} - I_{23} + I_{12} = -I_2 \\ I_{23} - I_{34} = 0 \end{cases} \quad (2.1.1)$$

მეოთხე კვანძისთვის განტოლების დაწერას, აზრი არ აქვს, რადგანაც კირხჰოფის I კანონის თანახმად წრფივად დამოუკიდებელი კვანძური განტოლებების რიცხვი კვანძების რიცხვზე ერთით ნაკლებია. ამიტომ ბაზისური კვანძის ძაბვა აიღება ანგარიშის გარეშე.

შტოებში გამავალი დენები გამოვსახოთ ამ შტოებში ძაბვის ვარდნებით, გვექნება:

$$\begin{cases} Y_1 \Delta U_1 - Y_2 \Delta U_2 = -I_1 \\ -Y_2 \Delta U_2 + Y_4 \Delta U_4 + Y_3 \Delta U_3 = I_2 \\ Y_4 \Delta U_4 - Y_5 \Delta U_5 = 0 \end{cases} \quad (2.1.2)$$

შტოებში ძაბვის ვარდნები გამოვსახოთ კვანძური ძაბვების საშუალებით:

$$\begin{cases} \Delta U_1 = U_4 - U_1 \\ \Delta U_2 = U_1 - U_2 \\ \Delta U_3 = U_2 - U_4 \\ \Delta U_4 = U_2 - U_3 \\ \Delta U_5 = U_3 - U_4 \end{cases} \quad (2.1.3)$$

თუ (2.1.3)-ს შევიტანთ (2.1.2)-ში გვექნება:

$$\begin{cases} Y_1(U_4 - U_1) - Y_2(U_1 - U_2) = -I_1 \\ -Y_2(U_1 - U_2) - Y_4(U_2 - U_3) + Y_3(U_2 - U_4) = I_2 \\ Y_4(U_2 - U_3) - Y_5(U_3 - U_4) = 0 \end{cases}$$

გავსხნათ ფრჩხილები და ცნობილი სიდიდეები გადავიტაოთ მარჯვნივ

$$\begin{cases} (Y_1+Y_2) \cdot U_1 - Y_2 \cdot U_1 = I_1 + Y_1 \cdot U_4 \\ -Y_2 \cdot U_1 + (Y_2 + Y_3 + Y_4) \cdot U_2 - Y_4 \cdot U_3 = I_2 + Y_3 \cdot U_4 \\ -Y_4 \cdot U_2 + (Y_4 + Y_5) \cdot U_3 = 0 + Y_5 \cdot U_4 \end{cases} \quad (2.1.4)$$

$Y_{11}=Y_1+Y_2$; $Y_{22}=Y_2+Y_3+Y_4$; $Y_4+Y_5=Y_{33}$ - წარმოადგენენ კვანძების საკუთარ გამტარებლობებს. ისინი სიდიდით ტოლია კვანძთან მიერთებული შტოების გამტარებლობების ჯამის. იგულისხმება ის შტოც რომელიც აერთებს მახალანსირებელ კვანძსა და მოცემულ კვანძს. დანარჩენი სიდიდეები Y_2 ; Y_4 წარმოადგენენ კვანძების ურთიერთგამტარებლობებს კონკრეტული სქემისათვის (ნახ.3).

$Y_1 + Y_2 = Y_{11}$, $Y_2 + Y_3 + Y_4 = Y_{22}$, $Y_4 + Y_5 = Y_{33}$; და $Y_{12} = Y_{21} = Y_2$; $Y_{32} = Y_{23} = Y_{44}$ განტოლებათა სისტემა მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\begin{cases} Y_{11} \cdot U_1 - Y_{12} \cdot U_2 = -I_1 + Y_1 \cdot U_4 \\ -Y_{21} \cdot U_1 + Y_{22} \cdot U_3 = I_2 + Y_3 \cdot U_4 \\ -Y_{32} \cdot U_2 + Y_{33} \cdot U_3 = 0 + Y_5 \cdot U_4 \end{cases} \quad (2.1.5)$$

თუ ელექტრული წრედი შედგება $n+1$ რაოდენობის კვანძისაგან და ბაზისური ძაბვა უდრის ნულს, მაშინ n რაოდენობის დამოუკიდებელი

(2.1.5) განტოლება შეგვიძლია გადავწეროთ შემდეგი სახითაც:

$$\begin{cases} Y_{11} \cdot (U_1 - U_4) - Y_{12} \cdot (U_2 - U_4) = -I_1 \\ -Y_{21} \cdot (U_1 - U_4) - Y_{22} \cdot (U_2 - U_4) + Y_{23}(U_3 - U_4) = I_2 \\ -Y_{32} \cdot (U_2 - U_4) - Y_{33} \cdot (U_3 - U_4) = 0 \end{cases}$$

როგორც უკვე აღვნიშნეთ ბოლო განტოლებათა სისტემა ანალოგიურია (2.1.5) განტოლებათა სისტემის. განტოლებათა სისტემა წარმოვადგინოთ მატრიცული სახით:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & -Y_{12} & 0 \\ -Y_{21} & Y_{22} & -Y_{23} \\ 0 & -Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 - U_4 \\ U_2 - U_4 \\ U_3 - U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_1 \\ I_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

მაბალანსირებელი კვანძის არჩევა, ასევე მისი ძაბვის არჩევა ($U_b=0, U_b \neq 0$) არ ახდენს ზეგავლენას ანგარიშის რეზულტატზე.

$Y_{kv}(U-U_b)=I_{kv}$ განტოლების ამოხსნა გვაძლევს $(U-U_b)=\Delta U$ ვექტორ-სვეტს. იგი წარმოადგენს ძაბვათა ვარდნის სიდიდეებს მაბალანსირებელ კვანძსა და მოცემულ კვანძს შორის - $\Delta U_1; \Delta U_2; \Delta U_3; \dots \dots \Delta U_n$. ამის შემდეგ ჩვენ შეგვიძლია განვსაზღვროთ ძაბვათა რეალური სიდიდეები კვანძებში $U-U_b=\Delta U; U=\Delta U+U_b$. და შესაბამისად $U_1=\Delta U_1+U_b; U_2=\Delta U_2+U_b; U_3=\Delta U_3+U_b \dots \dots U_n=\Delta U_n+U_b$;

განვიხილოთ დამყარებული რეჟიმების მოდელირების დროს ელექტრული სისტემის ჩანაცვლების წრფივი ელექტრული წრედი. ჩავთვალოთ, რომ ამ წრედის აქტიური ელემენტები არის მხოლოდ დენის წყაროები. ამას გარდა, სიმარტივის და თვალსაჩინოების მიზნით, ჩავთვალოთ, რომ ელექტრული სისტემის ჩანაცვლების სქემა მიყვანილია ძაბვის ერთ საფეხურზე. ეს ნიშნავს, რომ პასიური ელემენტები არის მხოლოდ აქტიური წინაღობები (ჩანაცვლების სქემაში იდეალური ტრანსფორმატორები არ არის).

ამ პირობებისთვის n კვანძის მქონე ნებისმიერი კონფიგურაციის ელექტრული წრედის კვანძური განტოლებები მატრიცული ფორმით ჩაიწერება: $Y_{\Sigma} \dot{U}_{\Sigma} = \dot{\sqrt{3}} I_{\Sigma}$

სადაც Y_{Σ} - კვანძური წინააღობების n რიგის კვადრატული მატრიცაა; U_{Σ} - ყველა კვანძის ხაზური (ფაზებს შორის) ძაბვების ვექტორული მატრიცა; I_{Σ} - ყველა კვანძის დენის წყაროს (მოცემული დენების) ფაზური მნიშვნელობა, აღებული “პლუს” ნიშნით

გენერატორებისთვის და “მინუს” ნიშნით დატვირთვისთვის (როგორც ადრე მივიღეთ მოცემული დენისთვის დადებითი მიმართულება კვანძისკენ). კვანძური განტოლებების ფორმირება დაიყვანება Y_{Σ} მატრიცის შედგენამდე:

1) Y_{Σ} მატრიცის ყოველი დიაგონალური ელემენტი $Y_{ii} (i = 1, 2 \dots n)$ ტოლია i კვანძთან დაკავშირებული ყველა შტოების გამტარობების ჯამის;

2) მატრიცის ყოველი არადიაგონალური ელემენტი $Y_{ij} (i, j = 1, 2 \dots n; i \neq j)$ ტოლია i და j კვანძების დამაკავშირებელი შტოს გამტარობის, აღებულია შებრუნებული ნიშნით.

აქედან გამომდინარეობს Y_{Σ} მატრიცის შემდეგი თვისებები:

1) Y_{Σ} მატრიცა სიმეტრიულია: ტრანსპონირება არ ცვლის მატრიცას $Y_{\Sigma}^T = Y_{\Sigma}$;

2) რეალური ელექტრული სისტემების ჩანაცვლების სქემებისთვის Y_{Σ} მატრიცის დიაგონალური ელემენტები ნულისაგან განსხვავებულია და როგორც წესი, მოდულით აღემატება შესაბამისი სტრიქონის ან სვეტის არადიაგონალურ ელემენტებს, რაც ძალიან მნიშვნელოვანია ეფექტური რიცხვითი ალგორითმების შექმნის დროს.

Y_{Σ} მატრიცების განხილული თვისებების გათვალისწინება იძლევა რთული ელექტრული სისტემების დამყარებული რეჟიმების ალგორითმების და კომპიუტერული პროგრამების გამოთვლითი ეფექტურობის მნიშვნელოვანი გაზრდის საშუალებას და განსაზღვრავს ანგარიშის თანამედროვე მეთოდების შერჩევას.

მათემატიკური თვალსაზრისით, დამბალანსებელი კვანძის შერჩევა არის თავისუფალი ნებისმიერ შემთხვევაში, მაგრამ გამოთვლითი (ამოხსნის მიღების) თვალსაზრისით, მიზანშეწონილია ბაზისური და დამბალანსებელი კვანძების დამთხვევა, რადგან ამ შემთხვევაში ხდება კვანძური გამტარობების მატრიცის ზემოთ აღნიშნული თვისებების შენარჩუნება.

2.2 სისტემის მდგომარეობის ამსახველი განტოლებების მიღება

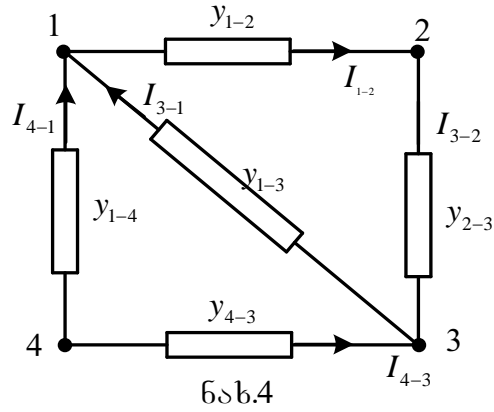
ტოპოლოგიური ანალიზის მეთოდების გამოყენებით

სისტემის მდგომარეობის ამსახველი ყველა განტოლება ემყარება კირსჰოფის კანონებს. ამ განტოლებების პირდაპირი ამოხსნა იძლევა კვანძურ ძაბვებსა და დენებს შტოებში და მათი რიცხვი უდრის დამოუკიდებელი კონტურებისა და კვანძების ჯამს. ამიტომ უფრო ხშირი გამოყენება აქვს კირსჰოფის განტოლებების გარდასახვით მიღებულ კვანძურ და კონტურულ განტოლებებს, რომელთა განზომილებაც მნიშვნელოვნად ნაკლებია უშუალოდ კირსჰოფის კანონების მიხედვით შედგენილ განტოლებებთან შედარებით.

ყველა შემთხვევაში სქემის ტოპოლოგია აისახება ინციდენციის I და II მატრიცებით, რომლებიც თავის მხრივ აისახებიან სქემის პასიური პარამეტრების ამსახველ მატრიცებში.

თავდაპირველად განვმარტოთ თუ რას ნიშნავს ინციდენციის I (M) მატრიცა. ინციდენციის I მატრიცა ასახავს კავშირებს დამოუკიდებელ კვანძებსა და შტოებს შორის, ანუ ელ. ქსელის გრაფიკულ სახეს. იგი შეიცავს იმდენ სტრიქონს რამდენი დამოუკიდებელი კვანძი არის ელ. წრედში და იმდენ სვეტს, რამდენი შტოც არის ამავე წრედში. სვეტისა და სტრიქონების გადაკვეთაზე იწერება +1, -1 ან 0 იმისდა მიხედვით სვეტის ნომრის შესაბამისი შტო უერთდება თუ არა სტრიქონის ნომრის შესაბამის კვანძს. “+” ან “-“ ითვალისწინებს დენის მიმართულებას განხილულ წრედში.

იმისათვის, რომ დავინახოთ თუ რა პრინციპზე დგება ინციდენციის I მატრიცა, ამისათვის განვიხილოთ კონკრეტული მაგალითი.



მოცემული წრედისათვის შევადგინოთ ინციდენციი I მატრიცა

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1-2 & 1-3 & 1-4 & 2-3 & 3-4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \left| \begin{array}{ccccc} -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 1 \end{array} \right| \end{matrix}$$

ე.ი თუ შტო სქემაზე შეერთებულია კვანძში, მაშინ ამ შტოს სვეტისა და სტრიქონის გადაკვეთაზე იწერება 1, -1 იმისდა მიხედვით, დენი შედის კვანძში, თუ გამოდის კვანძიდან. მაგალითად: 1-2, 1-3, 1-4 შტოები „1“ კვანძში არიან შეერთულნი. 1-3 და 1-4 შტოებიდან დენი შედის „1“ კვანძში და ამიტომ ინციდენციის მატრიცაში „1“ კვანძის შესაბამისი სტრიქონისა, და 1-3 და 1-4 შესაბამისი შტოების სვეტების გადაკვეთაზე იწერება 1, ხოლო 1-2 შტოში კი დენი გამოდის „1“ კვანძიდან, ამიტომ ინციდენციის მატრიცაში „1“ კვანძის სტრიქონისა და 1-2 შტოს შესაბამისი სვეტის გადაკვეთაზე იწერება -1. ასევე ვაკეთებთ დანარჩენი კვანძებისა და შტოებისათვის.

ე.ი. როგორც დავინახეთ ინციდენციის I მატრიცა მათემატიკურად ასახავს სქემის გრაფს.

განვიხილოთ კვანძური გამტარებლობის მატრიცის მიღება ინციდენციის I მატრიცის M -ის გამოყენებით:

$$Y_{კვ} U_{კვ} = I_{კვ} \quad (2.2.1)$$

სადაც $U_{კვ}$ და $I_{კვ}$ - კვანძური ძაბვებისა და დენების ვექტორ მატრიცებია.

$Y_{კვ}$ -ის შედგენისას გათვალისწინებულია სქემის ტოპოლოგია ინციდენციის პირველი მატრიცის M -ის საშუალებით, მატრიცას

რომელიც ასახავს კვანძებისა და შტოებს შორის კავშირს მოცემულ სქემაში.

$$M \cdot I_{\text{შტ}} = I_{\text{კვ}} \quad (2.2.2) \quad - \quad \text{კირხჰოფის პირველი კანონი.}$$

$$Y_{\text{დ}} \cdot U_{\text{შტ}} = I_{\text{შტ}} \quad (2.2.3) \quad - \quad \text{ომის კანონის მატრიცული წესი.}$$

$$M^T \cdot U_{\text{კვ}} = U_{\text{შტ}} \quad (2.2.4) \quad - \quad \text{ძაბვის ვარდნა გამოსახული კვანძური ძაბვებით.}$$

(2.2.2), (2.2.3), (2.2.4) მატრიცული ტოლობების საფუძველზე ვღებულობთ:

$$MY_{\text{დ}}M^T U_{\text{კვ}} = I_{\text{კვ}} \quad (2.2.5)$$

$$\text{სადაც } M \cdot Y_{\text{დ}} \cdot M^T = Y_{\text{კვ}}$$

გამოსახულება არის კვანძური გამტარებლობების მატრიცა წარმოდგენილი ინციდენციის I მატრიცის საშუალებით. თუ ბაზისური ძაბვა არ უდრის ნულს და მოცემულია მისი მნიშვნელობა $U_{\text{ბ}}$ მაშინ კვანძური ძაბვების განტოლება მატრიცული ფორმით იღებს სახეს:

$$MY_{\text{დ}}M^T (U_{\text{კვ}} - U_{\text{ბ}}) = I_{\text{კვ}} \quad (2.2.6)$$

$$\text{ანუ } Y_{\text{კვ}}(U_{\text{კვ}} - U_{\text{ბ}}) = I_{\text{კვ}} \quad (2.2.7)$$

მოცემული მატრიცული განტოლების შებრუნებული ფორმა იქნება:

$$U_{\text{კვ}} - U_{\text{ბ}} = Z_{\text{კვ}} I_{\text{კვ}}$$

სადაც $Z_{\text{კვ}}$ კვანძური წინააღობების მატრიცაა

$$Z_{\text{კვ}} = Y_{\text{კვ}}^{-1} \quad (2.2.8)$$

დასახული ამოცანებიდან გამომდინარე, შესაძლებელია გამოყენებული იქნეს ჩანაცვლების სქემა სადაც მოცემული იქნება როგორც კვანძური დენები (სიმძლავრეები), ასევე შტოებში ჩართული ე.მ.ძ-ები. მაგალითად, როდესაც ხდება სხვადასხვა ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის გათვალისწინება ელექტრული რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშების დროს. სხვა შემთხვევაში როდესაც ჩანაცვლების სქემაში გენერაცია და დატვირთვა მოცემულია პასიური შტოს სახით, შეიძლება მოცემული იყოს კვანძური დენებიც. როდესაც ჩანაცვლების სქემის შტოებში ჩართულია ე.მ.ძ-ები ომის კანონი წარმოდგენილი შტოების საკუთარი წინააღობებით იღებს სახეს:

$$U_{\text{შტ}} = Z_{\text{შტ}} I_{\text{შტ}} - E \quad (2.2.9)$$

აქ E არის შტოებში ჩართული ძაბვის წყაროების ვექტორ-მატრიცა,

$Z_{\mathcal{B}} = Z_{\mathcal{C}}$ შტოების წინააღობების ვექტორ-მატრიცა.

(2.2.9)-დან განსაზღვრული შტოების დენების მატრიცა იქნება:

$$I_{\mathcal{B}} = Z_{\mathcal{C}}^{-1} U_{\mathcal{B}} + Z_{\mathcal{C}}^{-1} E = Y_{\mathcal{C}} U_{\mathcal{B}} + Y_{\mathcal{C}} E \quad (2.2.10)$$

(2.2.5), (2.2.9) და (2.2.10)-ის გათვალისწინებით ვღებულობთ კვანძური ძაბვების განტოლებას შტოებში ე.მ.ძ-ის არსებობის დროს.

$$M Y_{\mathcal{C}} M^T U_{\mathcal{B}} = I_{\mathcal{B}} - M Y_{\mathcal{C}} E$$

ანუ

$$Y_{\mathcal{B}} U_{\mathcal{B}} = I_{\mathcal{B}} - M Y_{\mathcal{C}} E \quad (2.2.11)$$

ამ განტოლების შებრუნებული ფორმა იქნება:

$$U_{\mathcal{B}} = Y_{\mathcal{B}}^{-1} I_{\mathcal{B}} - Y_{\mathcal{B}}^{-1} M Y_{\mathcal{C}} E = Z_{\mathcal{B}} I_{\mathcal{B}} - Z_{\mathcal{B}} M Y_{\mathcal{C}} E \quad (2.2.12)$$

ამგვარად ჩანაცვლების სქემას ზოგადად შეიძლება შეიცავდეს როგორც კვანძურ დენებს ისე შტოებში ჩართულ ე.მ.ძ-ებს.

ნახ.4-ზე წარმოდგენილი სქემისათვის გვაქვს:

$$M = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} - \text{ინციდენციის } I \text{ მატრიცაა;}$$

$$Y_{\mathcal{C}} = \begin{bmatrix} Y_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{55} \end{bmatrix} - \text{დიაგონალური მატრიცაა;}$$

$$M^T = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \text{ტრანსპონირებული მატრიცაა}$$

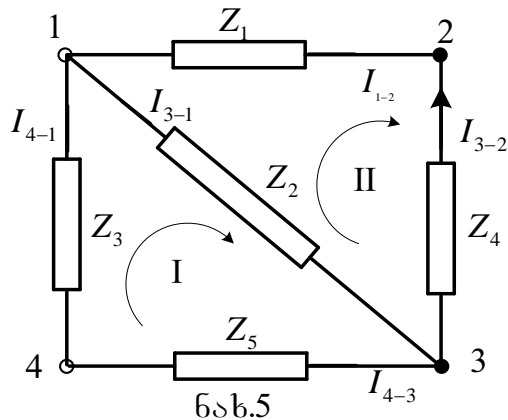
მივიღეთ კვანძური გამტარებლობის მატრიცა:

$$Y_{\mathcal{B}} = M Y_{\mathcal{C}} M^T = \begin{bmatrix} (Y_{1-2} + Y_{1-3} + Y_{1-4}) & -Y_{1-2} & -Y_{1-4} \\ -Y_{1-2} & (Y_{1-2} + Y_{2-3}) & -Y_{2-3} \\ -Y_{1-3} & -Y_{2-3} & (Y_{1-3} + Y_{2-3} + Y_{3-4}) \end{bmatrix}$$

ე.ი. როგორც ვხედავთ კვანძური გამტარებლობების მატრიცაში საკუთარი გამტარებლობების ადგილას იწერება იმ გამტარებლობების ჯამი, რომლებიც უშუალოდ უერთდებიან ამ კვანძს, ხოლო ურთიერთგამტარებლობის ადგილას იწერება ამ კვანძსა და მეზობელ კვანძს შორის არსებული გამტარობა აღებული „-“ ნიშნით.

კირხჰოფის II კანონის საფუძველზე განტოლებების მიღების დროს ვიყენებთ ინციდენციის II მატრიცას (N). ინციდენციის II მატრიცა ასახავს კავშირს ელ. ქსელის დამოუკიდებელ კონტურებსა და შტოებს შორის. შეიცავს იმდენ სტრიქონს რამდენი დამოუკიდებელი კონტური გვაქვს ელ. წრედში და იმდენ სვეტს რამდენი შტოც გვაქვს ამავე წრედში. სტრიქონისა და სვეტის გადაკვეთაზე იწერება +1, -1 იმისდა მიხედვით თუ სტრიქონის ნომრის შესაბამისი კონტურის შემოვლის მიმართულება ემთხვევა თუ არა მოცემული სვეტის ნომრის შესაბამის შტოში გამავალი დენის მიმართულებას.

იმისათვის, რომ დამოუკიდებელი კონტურები გამოვყოთ სქემიდან, ამისათვის ეს სქემა შეიძლება დაიშალოს ხედ და კავშირებად. ხე არის ის შტო, რომლებიც არ ქმნიან კონტურს, მაგრამ შეიცავენ ყველა კვანძს, ხოლო კავშირის ყოველივე ელემენტს შეესაბამება ყველა დამოუკიდებელი კონტური. ამ მოსაზრებიდან გამომდინარე აუცილებელია თითოეული სქემა დაიშალოს ხედ და კავშირებად.



მოცემული წრედისათვის შევადგინოთ ინციდენციი II მატრიცა:

$$N = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ I & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 \\ II & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 \end{array}$$

განვიხილოთ კონტურულ წინაღობათა მატრიცის მიღება ინციდენციის II მატრიცის გამოყენებით:

$$N \cdot \dot{Z}_{\mathcal{L}} \cdot N^T = \dot{Z}_{\text{კონტ}} \quad (2.2.13)$$

სადაც $N = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$ – ინციდენციის II მატრიცაა;

$$\dot{Z}_{\mathcal{L}} = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_5 \end{bmatrix} \text{ – დიაგონალური მატრიცაა;}$$

$$N^T = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \text{ – ტრანსპონირებული მატრიცაა}$$

სისტემის მდგომარეობის ამსახველი ერთ–ერთი განტოლებაა კონტურული განტოლება, რომელიც დაფუძნებულია ძირითადად კირსჰოფის II კანონზე. კირსჰოფის II კანონით იწერება იმდენი განტოლება რამდენი დამოუკიდებელი კონტური გვაქვს აღნიშნულ ქსელში.

$$\dot{Z}_{\text{კონტ}} \cdot \dot{I}_{\text{კონტ}} = \dot{E}_{\text{კონტ}} \quad (2.2.14)$$

$\dot{Z}_{\text{კონტ}}$ – დამოუკიდებელი კონტურების საკუთარი და ურთიერთწინააღმდეგობების მატრიცაა.

$$\text{ომის კანონი} - \dot{Z}_{\mathcal{L}} \cdot \dot{I}_{\mathcal{L}} = \Delta \dot{U}_{\mathcal{L}}$$

$$N \cdot \Delta \dot{U}_{\mathcal{L}} = \dot{U}_{\text{კონტ}} \quad (2.2.15)$$

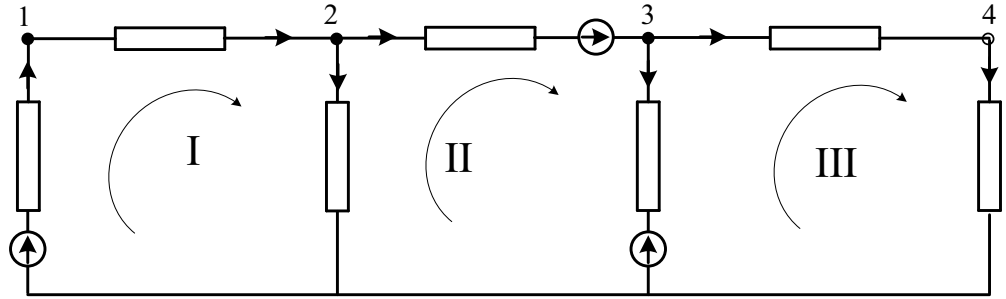
$$N \cdot \dot{Z}_{\mathcal{L}} \cdot \dot{I}_{\mathcal{L}} = \dot{U}_{\text{კონტ}} \quad (2.2.16)$$

$$N^T \cdot \dot{I}_{\text{კონტ}} = \dot{I}_{\mathcal{L}} \quad (2.2.17)$$

(2.2.16)–ის გათვალისწინებით (2.2.17)–დან ვღებულობთ:

$$N \cdot \dot{Z}_{\mathcal{L}} \cdot N^T \cdot \dot{I}_{\text{კონტ}} = \dot{U}_{\text{კონტ}} \quad (2.2.18)$$

განვიხილოთ კონტურული განტოლების მიღება პრაქტიკულ მაგალითზე (ნახ.6)



ნახ.6 რთული ქსელის ჩანაცვლების სქემა კონტურული განტოლებების მისაღებად

შეგადგინოთ კონტურულ წინააღობათა მატრიცა მოცემული სქემისათვის:

$$N \cdot Z_{\text{ფ}} \cdot N^T = \begin{bmatrix} (Z_1 + Z_2 + Z_3) & -Z_3 & 0 \\ -Z_3 & (Z_3 + Z_4 + Z_5) & -Z_5 \\ 0 & -Z_5 & (Z_5 + Z_6 + Z_7) \end{bmatrix}$$

საბოლოოდ მივიღებთ კონტურულ განტოლებას მატრიცული სახით:

$$N \cdot Z_{\text{ფ}} \cdot N^T \cdot I_{\text{კონტ}} = \begin{bmatrix} (Z_1 + Z_2 + Z_3) & -Z_3 & 0 \\ -Z_3 & (Z_3 + Z_4 + Z_5) & -Z_5 \\ 0 & -Z_5 & (Z_5 + Z_6 + Z_7) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_I \\ I_{II} \\ I_{III} \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

ე.ი როგორც ვხედავთ კონტურულ წინააღობათა მატრიცაში კონტურის საკუთარი წინააღობის ადგილას იწერება ამ კონტურში შემავალი ყველა წინააღობების ჯამი, ხოლო ურთიერთწინააღობის ადგილას იწერება აღებული კონტურების დამაკავშირებელი წინააღობა „-“ ნიშნით.

2.3 სისტემის მდგომარეობის აღმწერი უნიფიცირებული განტოლებები

ნორმალური რეჟიმის აქტიური პარამეტრებისა და დენების ავარიული მდგენელების ჯამი იძლევა ავარიული დენებისა და ძაბვების მნიშვნელობებს ქსელში. გარდა აღნიშნულისა, ნორმალური რეჟიმის პარამეტრები წარმოადგენენ საწყის ინფორმაციას ავარიული მდგენელების გასაანგარიშებლად.

ამგვარად, ავარიული მდგენელების განსაზღვრამდე საჭიროა ნორმალური რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება სისტემის მდგომარეობის აღმწერი რომელიმე განტოლებით. ოთხი ძირითადი აქტიური პარამეტრის $U_{33}, I_{33}, I_{\mathcal{B}}, E_{\mathcal{B}}$ ურთიერთდამაკავშირებელ განტოლებებს აქვს სახე:

$$\begin{aligned} MY_{\mathcal{D}}M^T U_{33} + MY_{\mathcal{D}}E_{\mathcal{B}} &= I_{33} \\ Y_{\mathcal{D}}M^T U_{33} + Y_{33}E_{\mathcal{B}} &= I_{\mathcal{B}} \end{aligned} \quad (2.3.1)$$

სადაც: U_{33}, I_{33} არის კვანძური ძაბვებისა და კვანძური დენების ვექტორ-მარტიცები;

$I_{\mathcal{B}}, E_{\mathcal{B}}$ - შტოებში გამავალი დენებისა და ძაბვების ვექტორ-მატრიცები;

$MY_{\mathcal{D}}M^T = Y_{33}$ კვანძური გამტარობის მატრიცა;

(2.3.1) განტოლებათა სისტემა წარმოადგენს უნივერსალურ მათემატიკურ მოდელს, რომლითაც აღიწერება ნებისმიერი დამყარებული რეჟიმი ელექტრულ სისტემაში. კვანძური განტოლებები წარმოადგენენ მის კერძო შემთხვევას.

(2.3.1) განტოლებებიდან ვღებულობთ ყველა კერძო შემთხვევას, საწყის ინფორმაციასთან დაკავშირებულს. შემთხვევა, როდესაც მოცემულია მხოლოდ კვანძური დენები, მიიღება (2.3.1)-დან.

$$Y_{33}U_{33} = I_{33} \quad (2.3.2)$$

თუ ბაზისური ძაბვა არ უდრის ნულს და მოცემულია მისი მნიშვნელობა $U_{\mathcal{B}}$, მაშინ კვანძური ძაბვების განტოლება მატრიცული ფორმით იღებს სახეს:

$$MY_{\mathcal{D}}M^T(U_{\mathcal{J}\mathcal{J}} - U_{\mathcal{D}}) = I_{\mathcal{J}\mathcal{J}} \quad (2.3.3)$$

ანუ $Y_{\mathcal{J}\mathcal{J}}(U_{\mathcal{J}\mathcal{J}} - U_{\mathcal{D}}) = I_{\mathcal{J}\mathcal{J}} \quad (2.3.4)$

მატრიცული განტოლების შებრუნებული ფორმა იქნება:

$$U_{\mathcal{J}\mathcal{J}} - U_{\mathcal{D}} = Z_{\mathcal{J}\mathcal{J}}I_{\mathcal{J}\mathcal{J}}$$

სადაც $Z_{\mathcal{J}\mathcal{J}}$ კვანძური წინაღობების მატრიცაა

$$Z_{\mathcal{J}\mathcal{J}} = Y_{\mathcal{J}\mathcal{J}}^{-1} \quad (2.3.5)$$

დასახული ამოცანებიდან გამომდინარე, შესაძლებელია გამოყენებული იქნეს ჩანაცვლების სქემა სადაც მოცემული იქნება როგორც კვანძური დენები (სიმძლავრეები), ასევე შტოებში ჩართული ე.მ.ძ-ები. ეს ამოცანაც არის კერძო შემთხვევა, რომელიც მიიღება (2.3.1) ზოგადი განტოლებებიდან.

ამგვარად (2.3.1)-ის გათვალისწინებით ვღებულობთ კვანძური ძაბვების განტოლებას შტოებში ე.მ.ძ-ის არსებობის დროს.

$$MY_{\mathcal{D}}M^T U_{\mathcal{J}\mathcal{J}} = I_{\mathcal{J}\mathcal{J}} - MY_{\mathcal{D}}E$$

ანუ

$$Y_{\mathcal{J}\mathcal{J}}U_{\mathcal{J}\mathcal{J}} = I_{\mathcal{J}\mathcal{J}} - MY_{\mathcal{D}}E \quad (2.3.6)$$

ამ განტოლების შებრუნებული ფორმა იქნება:

$$U_{\mathcal{J}\mathcal{J}} = Y_{\mathcal{J}\mathcal{J}}^{-1}I_{\mathcal{J}\mathcal{J}} - Y_{\mathcal{J}\mathcal{J}}^{-1}MY_{\mathcal{D}}E = Z_{\mathcal{J}\mathcal{J}}I_{\mathcal{J}\mathcal{J}} - Z_{\mathcal{J}\mathcal{J}}MY_{\mathcal{D}}E \quad (2.3.7)$$

ამგვარად, (2.3.1) განტოლებათა სისტემა წარმოადგენს უნივერსალურ მათემატიკურ მოდელს, რომლითაც აღიწერება ნებისმიერი დამყარებული რეჟიმი ელექტრულ სისტემაში.

2.4 კვანძური ძაბვების განტოლების შედგენა ტრანსფორმატორული კავშირების გათვალისწინებით

ელექტროსადგურების და მომხმარებლების დატვირთვების ერთობლიობა წარმოადგენს ელექტრული სისტემის რეჟიმის დამოუკიდებელ მახასიათებლებს. დენი, ქსელების ხაზებში და

ტრანსფორმატორებში სიმძლავრის ნაკადები, ქვესადგურების სალტებზე ძაბვის დონეები დამოკიდებულია მომხმარებლების და ელექტროსადგურების დატვირთვების სიდიდეებზე, ელექტრული ქსელის პარამეტრებზე და წარმოადგენს რეჟიმის დამოკიდებული მახასიათებლების სიმრავლეს.

დამყარებული რეჟიმების ანგარიშის დროს ელექტრული სადგურების გენერატორების შესაბამისი წყაროები შესაძლებელია იყოს წარმოდგენილი შემდეგი სახით:

მუდმივი აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრე (PQ -გენერატორი) $P_g = const$, $Q_g = const$. მუდმივი აქტიური სიმძლავრის მიცემა შეესაბამება ელექტრულ სისტემაში გენერატორების მუშაობის რეალურ პირობებს; მისი შენარჩუნება ხდება გენერატორებზე სისშირის რეგულირებით. რადგან გენერატორებზე არ არის რეაქტიული სიმძლავრის რეგულატორები, მუდმივი რეაქტიული სიმძლავრის მიცემა არ შეესაბამება რეჟიმის რეალურ მართვას. $Q_g = const$ მიცემა ხშირად არის აუცილებელი დამყარებული და ოპტიმალური რეჟიმების ანგარიშის დროს. მაგალითად, იმ შემთხვევაში, როცა Q_g აუცილებლად უნდა იყოს ტოლი ზღვრული დასაშვები მნიშვნელობის. როგორც წესი, გენერირების კვანძებისთვის ფიქსირებული P_g და Q_g დროს არ არის ცნობილი კვანძის ძაბვის მოდული U_g და ფაზა δ_g (ან, რაც იგივეა, ძაბვის აქტიური U_g' და რეაქტიულის U_g'' შემადგენლები).

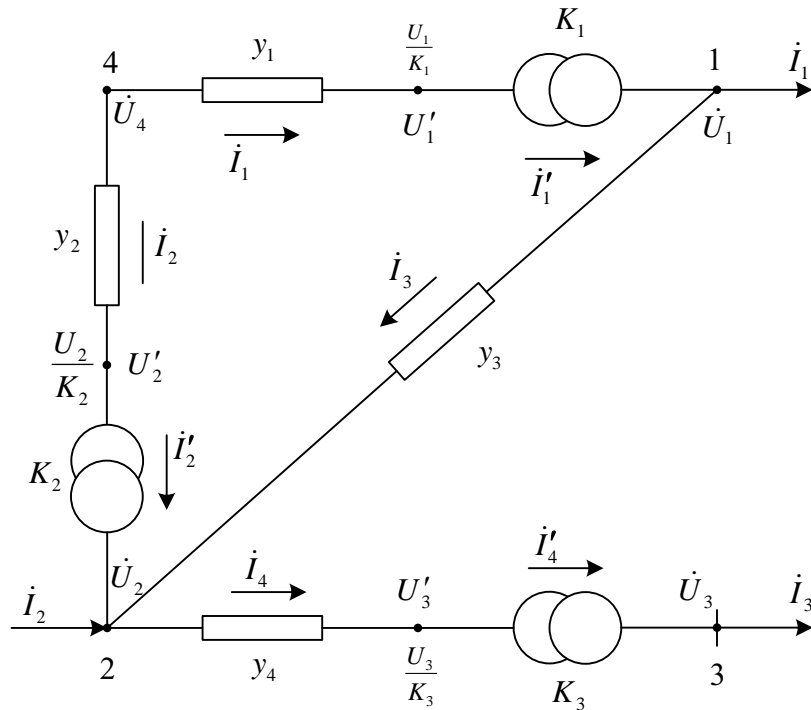
მუდმივი აქტიური სიმძლავრე და ძაბვის მოდული (PU -გენერატორი) $P_g = const$, $U_g = const$. ამ შემთხვევაში ცვლადები, როგორც წესი, არის რეაქტიული სიმძლავრე და ძაბვის ფაზა. როცა $P_g = 0$, კვანძები თავისუფალი რეაქტიული სიმძლავრით შეესაბამება სინქრონულ კომპენსატორებს, როცა $P_g \neq 0$ - გენერატორებს. ასეთ კვანძებს ეწოდება რეაქტიული სიმძლავრის დამბალანსებელი. ძაბვის მუდმივი მოდულის მიცემა $Q_g = var$ დროს შეესაბამება გენერატორების და სინქრონული კომპენსატორების მუშაობის რეალურ პირობებს, როცა ძაბვის რეგულატორები ინარჩუნებენ $U_g = const$.

ძაბვის მუდმივი მოდული და ფაზა $U_g = const$, $\delta_g = const$. ასეთ კვანძებში ცვლადებს წარმოადგენს აქტიური და რეაქტიული

სიმძლავრე, ეს ნიშნავს, რომ $P_g = var$, $Q_g = var$. საწყისი მონაცემების მიცემის ეს ხერხი შეესაბამება კვანძებს, რომლებიც არის აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის დამბალანსებელი და ძაბვის ბაზისური. ასეთ კვანძებს ეწოდება დამბალანსებელი. დამყარებული რეჟიმების ანგარიშის და მათი ოპტიმიზაციის დროს შესაძლებელია რამოდენიმე დამბალანსებელი კვანძის შერჩევა. ყოველი მათგანი შეესაბამება სისშირის რეგულირებაში მონაწილე სადგურს, რომელიც იღებს საკუთარ თავზე აქტიური სიმძლავრის დისბალანსებს და ამავე დროს, სისტემაში ინარჩუნებს მუდმივ სისშირეს. ერთი ან რამოდენიმე დამბალანსებელი კვანძის შემოტანა შეესაბამება დაშვებას, რომ ელექტრულ სისტემაში სისშირე მუდმივია.

ჩვენ აქამდე ვიხილავდით კვანძური ძაბვების განტოლებებს იმ შემთხვევისათვის როცა მთლიანი ელექტრული წრედი დაყვანილი იყო ერთი ძაბვის საფეხურზე. რეალურად ელექტრული ქსელი შეიძლება შეიცავდეს რამოდენიმე ძაბვის საფეხურს. თუ ჩვენ ასეთი ქსელის ანგარიშს ვაწარმოებთ ადრე განხილული მეთოდის საშუალებით, კვანძებში ძაბვების რეალური მნიშვნელობების გასაგებად საჭირო იქნება მიღებული ძაბვების გადაანგარიშება სხვადასხვა საფეხურებისათვის. ეს მოხდება შესაბამის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტებზე გაყოფით ან გამრავლებით, რაც საკმაოდ შრომატევად პროცესს წარმოადგენს რთული კონფიგურაციის მქონე ქსელისათვის.

ქვემოთ წარმოდგენილია მეთოდი, რომლის მიხედვითაც ანგარიში წარმოებს ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის გათვალისწინებით.



ნახ.7 ჩანაცვლების სქემა ტრანსფორმატორული კავშირების გათვალისწინებით

ნახ.7-ზე მოცემულია მარტივი ელექტრული სისტემა რომელიც, შედგება რამდენიმე ძაბვის საფეხურისაგან U_1, U_2, U_3 ჩვენი მიზანია შევადგინოთ კვანძური ძაბვების განტოლებები ისეთნაირად, რომ მათი ამოხსნით მივიღოთ, პირდაპირ, საჭირო ძაბვის სიდიდეები გადაანგარიშების გარეშე. მე-4 კვანძი მივიჩნიოთ მახალანსირებელ კვანძად და ავიღოთ ძაბვის გარეეული $U_4=U_b$ მნიშვნელობა (რომელიც რეალურ სიდიდესთან ახლოს არის). კვანძური ძაბვების განტოლებები შევადგინოთ 1, 2, 3, კვანძებისათვის. ამ კვანძებში ჩვენთვის ცნობილია ძაბვის საფეხურის შესაბამისი ფაზური დენების სიდიდეები (I_1, I_2, I_3), ასევე ცნობილია ელექტროგადაცემის ხაზების, ტრანსფორმატორების ძაბვის საფეხურების შესაბამისი გამტარებლობების სიდიდეები Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 .

თითოეული ტრანსფორმატორის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტები და შტოში გამავალი დენები გამოვსახოთ შემდეგნაირად:

$$K_1 = \frac{U_1}{U'}; \quad K_2 = \frac{U_2}{U'}; \quad K_3 = \frac{U_3}{U'}; \quad I'_1 = \frac{I_1}{K_1}; \quad I'_2 = \frac{I_2}{K_2}; \quad I'_4 = \frac{I_4}{K_3}$$

შევადგინოთ კვანძური ძაბვების განტოლებები კირხჰოფის I კანონზე დაყრდნობით. 1 კვანძისათვის კირხჰოფის I კანონს ექნება სახე:

$$-i'_1 + i_3 = -i_1 \quad (2.4.1)$$

$$\text{სადაც } -i'_1 = \frac{i_1}{K_1} = \frac{1}{K_1}(U_4 - U'_1) \cdot Y_1$$

$$\text{რადგან } U'_1 = \frac{U_1}{K_1}, \text{ ამიტომ } i'_1 = \frac{1}{K_1}(U_4 - U'_1) \cdot Y_1,$$

$i_3 = (U_1 - U_2) \cdot Y_3$ რადგან 1-4 უბანზე არ გვაქვს ტრანსფორმატორული კავშირები

საბოლოოდ გვექნება:

$$-\frac{1}{K_1}(U_4 - \frac{U_1}{K_1}) \cdot Y_1 - (U_1 - U_2) \cdot Y_3 = -i_1$$

განვიხილოთ 2 კვანძი და დავწეროთ ამ კვანძისათვის კირხჰოფის I კანონის მიხედვით განტოლება:

$$-i'_2 - i_3 + i_4 - i_2 = 0 \quad (2.4.2)$$

$$\text{სადაც } -i'_2 = \frac{i_2}{K_2} = \frac{1}{K_2}(U_4 - U'_2) \cdot Y_2$$

$$\text{რადგან } U'_2 = \frac{U_2}{K_2}, \text{ ამიტომ}$$

$$i'_2 = \frac{1}{K_2}(U_4 - \frac{U_2}{K_2}) \cdot Y_2,$$

$$i_4 = (U_2 - U'_3) \cdot Y_4$$

$$\text{რადგან } U'_3 = \frac{U_3}{K_3}, \text{ ამიტომ}$$

$$i_4 = (U_2 - \frac{U_3}{K_3}) \cdot Y_4$$

საბოლოოდ გვექნება:

$$-\frac{1}{K_2}(U_4 - \frac{U_2}{K_2}) \cdot Y_2 - (U_1 - U_2) \cdot Y_3 + (U_2 - \frac{U_3}{K_3}) \cdot Y_4 = i_2 \quad (2.4.3)$$

განვიხილოთ 3 კვანძი და დავწეროთ ამ კვანძისათვის კირხჰოფის I კანონის მიხედვით განტოლება:

$$-i'_4 = -i_3 \quad (2.4.4)$$

$$\text{სადაც } -i'_4 = \frac{i_4}{K_3} = \frac{1}{K_3}(U_2 - U'_3) \cdot Y_4$$

ამიტომ

$$i'_4 = \frac{1}{K_3}(U_2 - \frac{U_3}{K_3}) \cdot Y_4,$$

საბოლოოდ გვექნება:

$$-\frac{1}{K_3} \left(U_2 - \frac{\dot{U}_3}{K_3} \right) \cdot \dot{Y}_4 = -\dot{I}_3 \quad (2.4.5)$$

რადგანაც თითოეული კვანძისათვის შედგენილი გვაქვს კვანძური ძაბვების განტოლება, შეგვიძლია დავწეროთ კვანძური ძაბვების განტოლებათა სისტემა მთლიანი ელექტრული წრედისათვის:

$$\begin{cases} -\frac{1}{K_1} \left(U_4 - \frac{\dot{U}_1}{K_1} \right) \cdot \dot{Y}_1 - (\dot{U}_1 - \dot{U}_2) \cdot \dot{Y}_3 = -\dot{I}_1 \\ -\frac{1}{K_2} \left(U_4 - \frac{\dot{U}_2}{K_2} \right) \cdot \dot{Y}_2 - (\dot{U}_1 - \dot{U}_2) \cdot \dot{Y}_3 + \left(U_2 - \frac{\dot{U}_3}{K_3} \right) \cdot \dot{Y}_4 = -\dot{I}_2 \\ -\frac{1}{K_3} \left(U_2 - \frac{\dot{U}_3}{K_3} \right) \cdot \dot{Y}_4 = -\dot{I}_3 \end{cases} \quad (2.4.6)$$

(2.4.6) განტოლებებში შესაბამისი მოქმედებების ჩატარების შემდეგ მივიღებთ:

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{K_1^2} \cdot \dot{Y}_1 + \dot{Y}_3 \right) \cdot \dot{U}_1 - \dot{Y}_3 \cdot \dot{U}_2 = -\dot{I}_1 + \frac{1}{K_1} \cdot \dot{Y}_1 \cdot U_4 \\ -\dot{Y}_3 \cdot \dot{U}_1 + \left(\frac{1}{K_2^2} \cdot \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3 + \dot{Y}_4 \right) \cdot \dot{U}_2 - \frac{1}{K_3} \cdot \dot{Y}_4 \cdot U_3 = \dot{I}_2 + \frac{1}{K_2} \cdot \dot{Y}_2 \cdot U_4 \\ -\frac{1}{K_3} \cdot \dot{Y}_4 \cdot U_2 + \frac{1}{K_3^2} \cdot \dot{Y}_4 \cdot U_3 = -\dot{I}_3 \end{cases} \quad (2.4.7)$$

ზემოთ მოცემული კვანძური ძაბვების განტოლებათა სისტემის ამოსხნით შეგვიძლია განვსაზღვროთ კვანძებში ძაბვების საძიებელი სიდიდეების კომპლექსური მნიშვნელობები შესაბამისი საფეხურისათვის.

კვანძური ძაბვების განტოლებათა სისტემა, ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის გათვალისწინებით, შეგვიძლია გამოვსახოთ მატრიცათა ნამრავლის საშუალებით, როგორც ადრე განხილულ შემთხვევებში. განვიხილოთ ქვემოთ მოცემული მატრიცული გამოსახულება:

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{K_1^2} \cdot \dot{y}_1 + \dot{y}_3 \right) & -\dot{y}_3 & 0 \\ -\dot{y}_3 & \left(\frac{1}{K_2^2} \cdot \dot{y}_2 + \dot{y}_3 + \dot{y}_4 \right) & -\frac{1}{K_3} \cdot \dot{y}_4 \\ 0 & -\frac{1}{K_3} \cdot \dot{y}_4 & \frac{1}{K_3^2} \cdot \dot{y}_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ -\dot{I}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{K_1} \cdot \dot{y}_1 \cdot U_4 \\ \frac{1}{K_2} \cdot \dot{y}_2 \cdot U_4 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.4.8)$$

განვიხილოთ ზემოთ მოცემული მატრიცის თითოეული ნაწილი და ვნახოთ თუ რა პრინციპზე დაყრდნობით დგება კვანძური ძაბვების განტოლებათა სისტემის შესაბამისი მატრიცა, როდესაც საქმე გვაქვს სხვადასხვა საფეხურის ძაბვებთან.

თავდაპირველად უნდა აღვნიშნოთ, რომ ყველა შტოს გამტარებლობა ნაანგარიშებია შესაბამისი მაღალი ძაბვის საფეხურისათვის.

თუ ტრანსფორმატორული შტო კვანძში შერთულია დაბალი ძაბვის მხრიდან, მაშინ ამ შტოს გამტარებლობა კვანძის საკუთარი გამტარებლობის $[Y_m]$ ანგარიშისას აიღება საანგარიშო სიდიდეზე K^2 -ჯერ ნაკლები სიდიდით, სადაც K არის შესაბამისი შტოს ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი, ხოლო თუ შტო კვანძში შერთულია მაღალი ძაბვის მხრიდან, მაშინ კვანძის საკუთარი გამტარებლობის ანგარიშისას აიღება საანგარიშო სიდიდით.

მაგალითად განვიხილოთ „1“ კვანძის საკუთარი გამტარებლობა:

$$\dot{Y}_{11} = \left(\frac{1}{K_1^2} \cdot \dot{y}_1 + \dot{y}_3 \right)$$

აღნიშნული გამტარებლობის შტო 1 კვანძთან მიერთებულია დაბალი ძაბვის მხრიდან, ამიტომ \dot{Y}_{11} -ის ანგარიშისას \dot{Y}_1 ავიღეთ K_1^2 -ჯერ ნაკლები სიდიდის $\frac{\dot{Y}_1}{K_1^2}$, ხოლო რადგან 1-2 შტოში არ არის ჩართული ტრანსფორმატორი, \dot{Y}_3 აიღება ჩვეულებრივ, საანგარიშო სიდიდით.

ასევე გვექნება 2 კვანძისთვისაც:

$$\dot{Y}_{22} = \left(\frac{1}{K_1^2} \cdot \dot{y}_2 + \dot{y}_3 + \dot{y}_4 \right)$$

2-4 შტო 2 კვანძთან მიერთებულია დაბალი ძაბვის მხრიდან, ამიტომ \dot{Y}_{22} -ის ანგარიშისას \dot{Y}_2 - აიღება K_2^2 -ჯერ ნაკლები სიდიდით $\frac{\dot{Y}_2}{K_2^2}$. 2-3 შტო 2 კვანძთან მიერთებულია მაღალი ძაბვის მხრიდან, ამიტომ \dot{Y}_{22} -ის ანგარიშისას \dot{Y}_4 აიღება ჩვეულებრივ, საანგარიშო სიდიდით - \dot{Y}_4 .

აქაც 1-2 შტოში არ არის ტრანსფორმატორული შტო და \dot{Y}_3 აიღება ჩვეულებრივ, საანგარიშო სიდიდით.

$$\text{მე-3 კვანძის საკუთარი გამტარობა } \dot{Y}_{33} \text{ უდრის: } \dot{y}_{33} = \frac{1}{K_3} \cdot \dot{y}_4$$

კვანძების ურთიერთგამტარობების ანგარიშისას კი თუ ერთმანეთთან დაკავშირებულია ორი სხვადასხვა საფეხურის კვანძი, მაშინ მათი ურთიერთგამტარებლობები აიღება, საანგარიშო სიდიდეზე K -ჯერ ნაკლები სიდიდით, ხოლოთუ ერთმანეთთან დაკავშირებულია ორი ერთნაირი საფეხურის კვანძი, მაშინ მათი ურთიერთგამტარებლობები აიღება, ჩვეულებრივ საანგარიშო სიდიდით. მაგალითად 2 და 3 კვანძები წარმოადგენენ, ძაბვის სხვადასხვა საფეხურს და შესაბამისად კვანძური გამტარობების მატრიცის შედგენისას მათი ურთიერთგამტარებლობა უდრის:

$$\dot{Y}_{23} = -\frac{Y_4}{K_3}$$

(2.4.8) განტოლება გადავწეროთ მატრიცული ფორმით:

$$\dot{Y}_{33} \dot{U}_{33} = \dot{I}_{33} + \dot{Y}_{33} [U_{\beta}]$$

ანუ თუ გავითვალისწინებთ ამ გამოსახულებაში ინციდენტის I მატრიცას, გვექნება:

$$(M \dot{Y}_{\omega} M^T) \dot{U}_{33} = \begin{bmatrix} S_i^* \\ U_i^* \end{bmatrix} + (M \dot{Y}_{\omega} M^T) [U_{\beta}]$$

მოკლედ განვიხილოთ კვანძური გამტარებლობების მიღება ნახ.7-ზე მოცემული სქემისათვის.

ინციდენტის I მატრიცას ექნება სახე:

$$M = \begin{bmatrix} -\frac{1}{K_1} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{K_2} & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{K_3} \end{bmatrix}$$

ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის გათვალისწინება ხდება ისევე, როგორც ზემოთ განხილული კვანძური გამტარებლობების მატრიცის შედგენისას.

უკანასკნელი მატრიცის ტრანსპონირების შემთხვევაში გვექნება:

$$M^T = \begin{bmatrix} -\frac{1}{K_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{K_2} & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -\frac{1}{K_3} \end{bmatrix}$$

სოლო დიაგონალური მატრიცა:

$$\dot{Y}_\varphi = \begin{bmatrix} \dot{y}_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{y}_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{y}_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dot{y}_4 \end{bmatrix}$$

ყველაფერ ამის გათვალისწინებით კვანძური გამტარებლობების მატრიცას ექნება შემდეგი სახე:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{33} = M\dot{Y}_\varphi M^T &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{K_1} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{K_2} & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{K_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{y}_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{y}_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dot{y}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{1}{K_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{K_2} & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -\frac{1}{K_3} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{K_1^2}\dot{y}_1 + \dot{y}_3\right) & -\dot{y}_3 & 0 \\ -\dot{y}_3 & \left(\frac{1}{K_2^2}\dot{y}_2 + \dot{y}_3 + \dot{y}_4\right) & -\frac{1}{K_3}\dot{y}_4 \\ 0 & -\frac{1}{K_3}\dot{y}_4 & -\frac{1}{K_3^2}\dot{y}_4 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

მოცემული გამოსახულება წარმოადგენს კვანძური გამტარებლობების მატრიცას (\dot{Y}_{33}) ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის გათვალისწინებით.

ვუჩვენოთ, რომ (2.4.8) განტოლების წევრი $\begin{bmatrix} \frac{1}{K_1}\dot{y}_1\dot{U}_4 \\ \frac{1}{K_2}\dot{y}_2\dot{U}_4 \\ 0 \end{bmatrix}$ უდრის

$\dot{Y}_{33} \cdot [U_4]$ ვექტორს.

მოცემული სქემისათვის, 1 და 2 კვანძები ერთი და იგივე ნომინალური ძაბვების კვანძებია ($K_1 = K_2 = K$), ამიტომ $[U_4]$ ვექტორს

ექნება სახე: $\begin{bmatrix} K\dot{U}_4 \\ K\dot{U}_4 \\ K \cdot K_3\dot{U}_4 \end{bmatrix}$, ხოლო

$$\dot{Y}_{33} \cdot U_5 = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{K_1^2}\dot{y}_1 + \dot{y}_3\right) & -\dot{y}_3 & 0 \\ -\dot{y}_3 & \left(\frac{1}{K_2^2}\dot{y}_2 + \dot{y}_3 + \dot{y}_4\right) & -\frac{1}{K_3}\dot{y}_4 \\ 0 & -\frac{1}{K_3}\dot{y}_4 & -\frac{1}{K_3^2}\dot{y}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K\dot{U}_4 \\ K\dot{U}_4 \\ K \cdot K_3\dot{U}_4 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{K_1}\dot{y}_1\dot{U}_4 \\ \frac{1}{K_2}\dot{y}_2\dot{U}_4 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

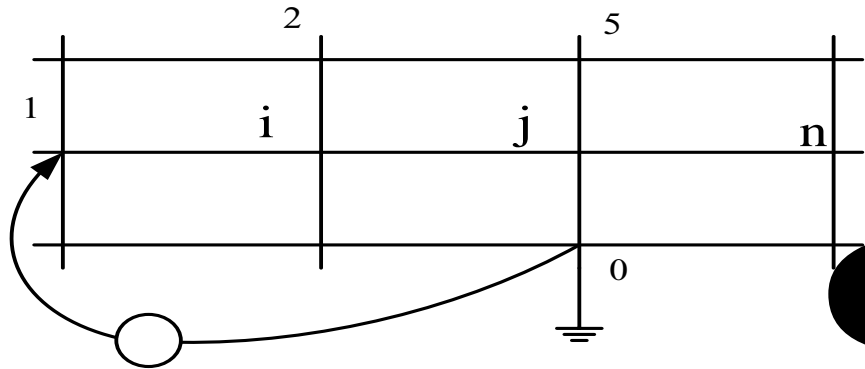
თავი III

ელექტრული ქსელების განზოგადოებული პარამეტრები. ხაზის გაწყვეტის მოდელირება იდეალური დენისა და ძაბვის წყაროებით

3.1. კვანძების საკუთარი და ურთიერთწინააღმდეგობა

კვანძების საკუთარი და ურთიერთწინააღმდეგობის მატრიცის ელემენტების განსაზღვრა შესაძლებელია როგორც გაზომვებით ასევე გარდასახვებითაც (ამ ელემენტების შინაარსის დასადგენად).

ვთქვათ მცემულია სქემა კვანძების n რაოდენობით ნახ.8



ნახ.8 ზოგადი სქემა კვანძების n რაოდენობით

$\dot{Z}_{\text{კვ}}$ მატრიცის პირველი სტრიქონის ელემენტების დასადგენად მოცემულ სქემაში 1 და 0 კვანძს შორის ჩავრთოთ ძაბვის წყარო U_1 . გავზომოთ კვანძური დენი I_1 და ძაბვები დანარჩენ კვანძებში $U_2 \dots U_i \dots U_j$. შესაბამისი კვანძური ძაბვის ფარდობა პირველი კვანძის დენთან $-I_1$ გვაძლევს $\dot{Z}_{\text{კვ}}$ მატრიცის პირველი სტრიქონის ელემენტებს:

$$\dot{Z}_{11} = \frac{U_1}{I_1}; \quad \dot{Z}_{12} = \frac{U_2}{I_1}; \quad \dot{Z}_{13} = \frac{U_3}{I_1} \dots \dot{Z}_{1i} = \frac{U_{1i}}{I_1} \dots \dot{Z}_{1j} = \frac{U_j}{I_1}$$

ანალოგიურად i -ური კვანძისათვის i -ური სტრიქონის ელემენტების დასადგენად i -ურ კვანძში ჩავრთოთ ძაბვის წყარო U_i . გავზომოთ კვანძური დენი I_i და ძაბვები დანარჩენ კვანძებში $U_1, U_2 \dots U_j$ და $\dot{Z}_{\text{კვ}}$ მატრიცის i -ური სტრიქონი იქნება:

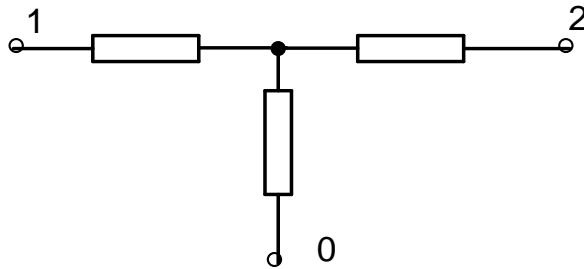
$$\dot{Z}_{i1} = \frac{U_1}{I_i}; \quad \dot{Z}_{i2} = \frac{U_2}{I_i}; \quad \dot{Z}_{i3} = \frac{U_3}{I_i} \dots \dot{Z}_{ii} = \frac{U_i}{I_i} \dots \dot{Z}_{ij} = \frac{U_j}{I_i}$$

ზემოთ განხილული მეთოდით შეგვიძლია მივიღოთ $Z_{\mathcal{A}\mathcal{B}}$ მატრიცის ნებისმიერი სტრიქონის ელემენტები:

$$Z_{\mathcal{A}\mathcal{B}} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & \cdots & Z_{2n} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & \cdots & Z_{3n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & Z_{n3} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix}$$

როგორც ვთქვით ამ ელემენტების განსაზღვრა შესაძლებელია აგრეთვე სქემის გარდასახვითაც (მარტივი სქემის შემთხვევაში). კვანძის საკუთარი წინააღმდეგობის განსაზღვრის შემთხვევაში სქემა უნდა გარდავსახოთ ისე, რომ დარჩეს აღნიშნული i -ური და ბაზისური კვანძი.

ურთიერთწინააღმდეგობის განსაზღვრისათვის, გარდასახვებით სქემა უნდა დავიყვანოთ T-ს მაგვარ ოთხპოლუსაზე, სადაც შენარჩუნებული იქნება ბაზისური კვანძი და ის წყვილი კვანძებისა, რომელთა შორისაც ვეძებთ ურთიერთწინააღმდეგობას. ვთქვათ გვინდა პირველსა და მეორე კვანძს შორის ურთიერთწინააღმდეგობის განსაზღვრა (ნახ.9).



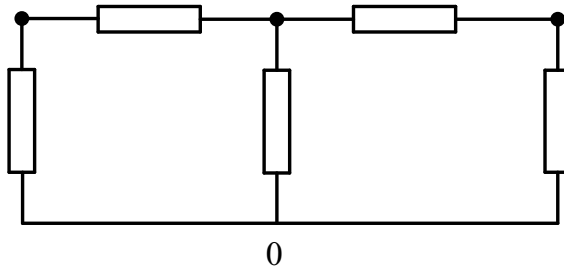
ნახ.9 „T“-სებრი სქემა

I კვანძის საკუთარი წინააღმდეგობა: $Z_1 + Z_3 = Z_{11}$

II კვანძის საკუთარი წინააღმდეგობა: $Z_2 + Z_3 = Z_{22}$

ხოლო 1-სა და 2 კვანძს შორის ურთიერთწინააღმდეგობა $Z_{12} = Z_3$

განვიხილოთ მაგალითი:



ნახ.10

საკუთარი წინაღობა მიიღება სქემის შეყურსვით განსახილველ კვანძსა და ნულოვან კვანძს შორის.

I კვანძის საკუთარი წინაღობა Z_{11} იქნება:

$$Z_4 + Z_5 = Z_6; \quad Z_2 + Z_7 = Z_8$$

$$Z_3 // Z_6 = Z_7; \quad Z_{11} = Z_1 // Z_8$$

II კვანძის საკუთარი წინაღობა Z_{22} იქნება:

$$Z_1 + Z_2 = Z_6$$

$$Z_4 + Z_5 = Z_7; \quad Z_{22} = Z_3 // Z_6 // Z_7$$

III კვანძის საკუთარი წინაღობა Z_{33} იქნება:

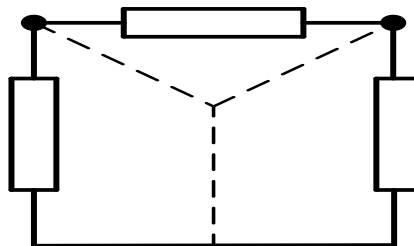
$$Z_1 + Z_2 = Z_6; \quad Z_7 + Z_4 = Z_8$$

$$Z_6 // Z_3 = Z_7; \quad Z_{33} = Z_8 // Z_5$$

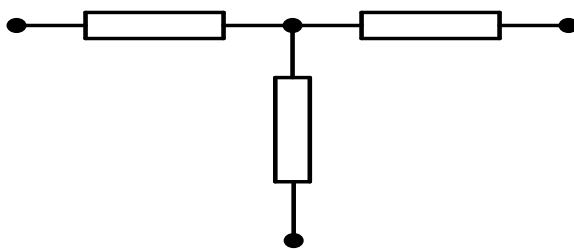
რაც შეეხება ურთიერთწინაღობას 1-სა და 2 კვანძს შორის Z_{12} განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$Z_4 + Z_5 = Z_6; \quad Z_6 // Z_3 = Z_7.$$

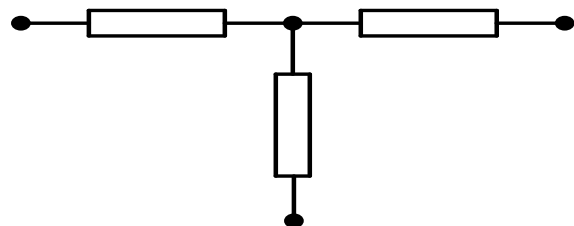
ნახ.10-ზე წარმოდგენილი სქემას გარდასახვების შედეგად ექნება სახე:



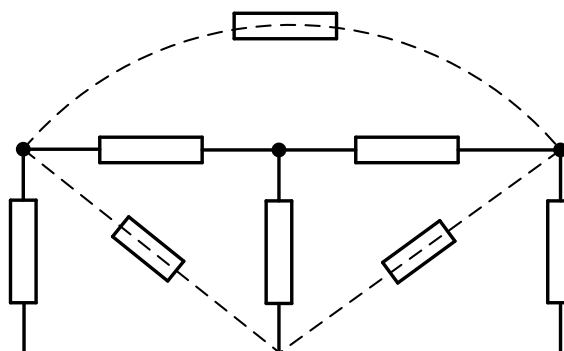
მიღებული სამკუთხედი გარდავსახოთ ვარსკვლავად, და შედეგად ვღებულობთ 1-სა და 2 კვანძს შორის ურთიერთწინაღობას – Z_{12} .



ანალოგიურად შეგვიძლია მოვიქცეთ 2-სა და 3 კვანძს შორის ურთიერთწინაღობის განსაზღვრისათვის. Z_{23} -ის განსაზღვრად სქემის გარდასახვების დროს შენარჩუნდება 2 და 3 კვანძი და მიღებული ოთხპოლუსას შესაბამისი წინაღობა იქნება ურთიერთწინაღობა 2-სა და 3 კვანძებს შორის.



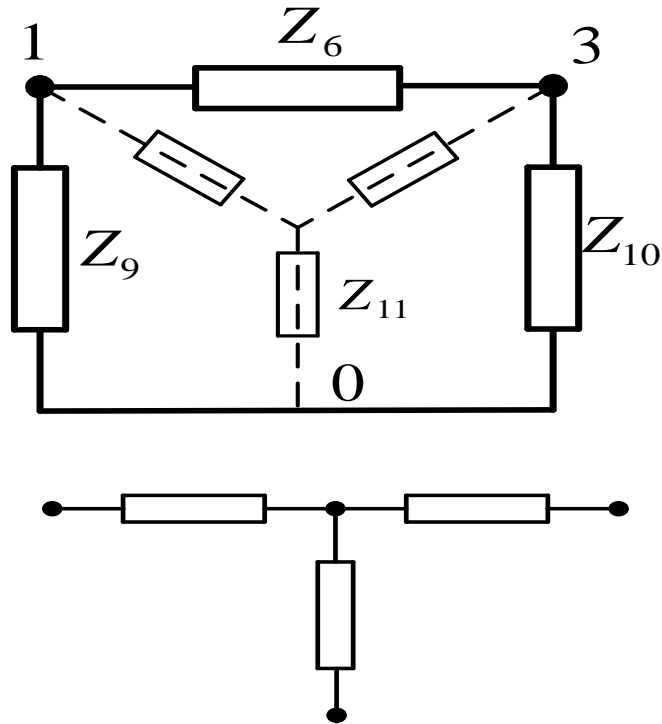
რაც შეეხება 1-სა და 3 კვანძს შორის ურთიერთწინაღობის განსაზღვრას – საჭიროა ნახ.10-ზე წარმოდგენილი ვარსკვლავი უნდა გადავიყვანოთ სამკუთხედში:



გარადაქმნების შედეგად გვექნება:

$$Z_1 // Z_7 = Z_9 ; \quad Z_8 // Z_5 = Z_{10}$$

შედეგად მივიღებთ სქემას, რომელიც გადადის ვარსკვლავში:



ვარსკვლავის ელემენტი: $Z_{11} = Z_{13}$ - არის საკუთარი წინაღობა 1 და 3 კვანძებს შორის.

ანალოგიურად შეგვიძლია განსაზღვროთ ნებისმიერი მარტივი ქსელის ელემენტების საკუთარი და ურთიერთწინააღობები.

3.2 მატრიცის შეზღუდვის ოპერაციის ფიზიკური არსი

დამყარებული რეჟიმების შემთხვევაში ელ. სისტემის მდგომარეობა ძირითადად აღიწერება კვანძური პარამეტრებისა და კონტურული პარამეტრების დამაკავშირებელი განტოლებებით, ანუ კვანძური ძაბვებისა და კონტურული დენების განტოლებებით. ეს განტოლებები წარმოადგენენ საფუძველს, როგორც ნორმალური ასევე ავარიული რეჟიმების მოდელირების შემთხვევაში. მათი მოდიფიცირებითა და შემდგომი მათემატიკური გარდასახვებით შესაძლებელია მივიღოთ განზოგადოებულპარამეტრებიანი განტოლებები, რომელთა მეშვეობითაც უფრო ეფექტურად (მათემატიკური გაანგარიშების რაოდენობის

შემცირების თვალსაზრისით) აღიწერება სხვადასხვა დამყარებული ელექტრული რეჟიმები.

პირველ რიგში დავადგინოთ მატრიცის შებრუნების ოპერაციის შესაბამისობა გარკვეული სქემის გარდასახვებთან და რეჟიმულ მოდელირებასთან.

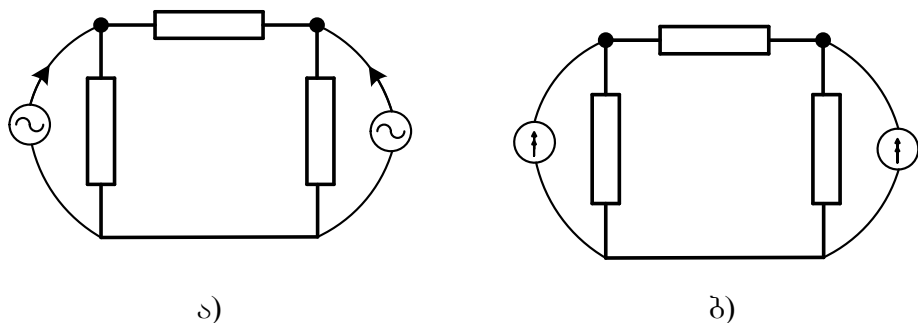
$Y_{33} \cdot U_{33} = I_{33}$ განტოლების შესაბამისი რეჟიმის მოდელირება შეიძლება ყველა კვანძსა და ბაზისურ კვანძს შორის ძაბვის წყაროების ჩართვით. ამ შემთხვევაში პასიური სქემა წარმოადგენს ბაზისურ კვანძსა და ყველა კვანძის დამოკლების შედეგად მიღებულ ქსელის სქემას (ძაბვის წყაროების წინაღობები ნულის ტოლია), ხოლო $Z_{33} \cdot I_{33} = U_{33}$ განტოლებით სისტემის მდგომარეობის ასახვის შემთხვევაში, რეჟიმის მოდელირება შეიძლება დენის წყაროების ჩართვით ყველა კვანძსა და ბაზისურ კვანძს შორის. ამ შემთხვევაში კვანძების დამოკლებას ბაზისურ კვანძზე ადგილი არ ექნება, ვინაიდან დენის წყაროს წინაღობა უსასრულოდ დიდია.

ცხადია, რომ ამ ორ განტოლებას შორის კავშირი აისახება ტოლობით:

$$Y_{33}^{-1} = Z_{33}$$

ამგვარად შეგვიძლია გავაკეთოთ დასკვნა: დამოკლებულ კვანძებიანი სქემის გამტარებლობის მატრიცის შებრუნება იძლევა გახსნილ შუნტებიანი (თუ შუნტს ვუწოდებთ ნულოვანი წინაღობის შტოს ნებისმიერ კვანძსა და ბაზისურ კვანძს შორის) სქემის კვანძური წინაღობების მატრიცას და პირიქით.

ზემოთთქმულის საილუსტრაციოდ განვიხილოთ მაგალითი (ნახ.11 ა, ბ):



ნახ. 11 (ა, ბ) შტოებში ჩართული ძაბვის წყაროების შეცვლა დენის წყაროებით

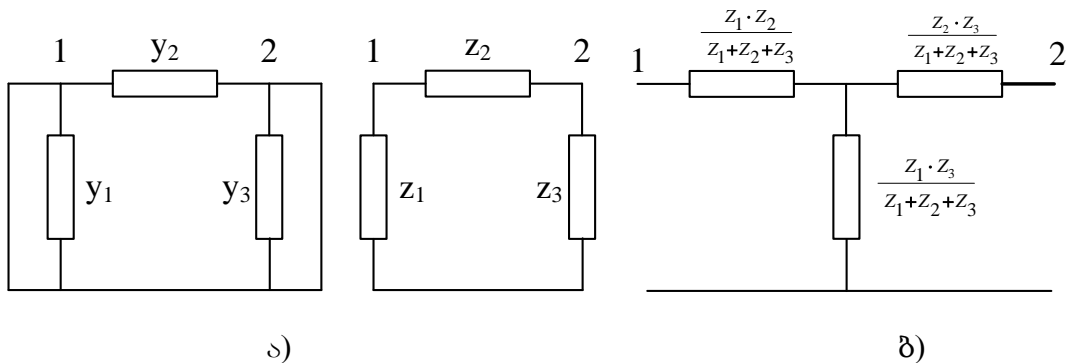
I სქემისათვის კვანძური გამტარებლობის მატრიცას ექნება სახე:

$$\begin{bmatrix} (Y_1 + Y_2) & -Y_2 \\ -Y_2 & (Y_2 + Y_3) \end{bmatrix}$$

II სქემისათვის კვანძური წინააღობის მატრიცას ექნება სახე:

$$\begin{bmatrix} \frac{Z_1 \cdot (Z_2 + Z_3)}{Z_1 + Z_2 + Z_3} & \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \\ \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} & \frac{Z_3 \cdot (Z_1 + Z_2)}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \end{bmatrix}$$

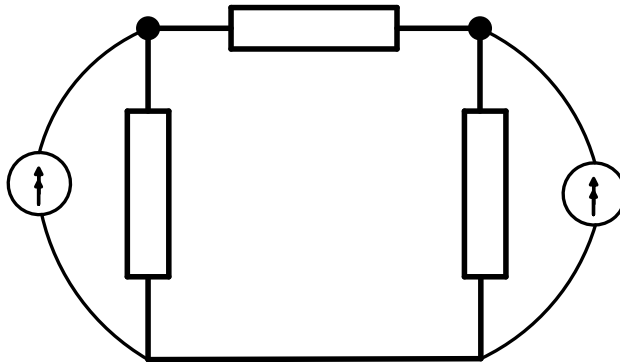
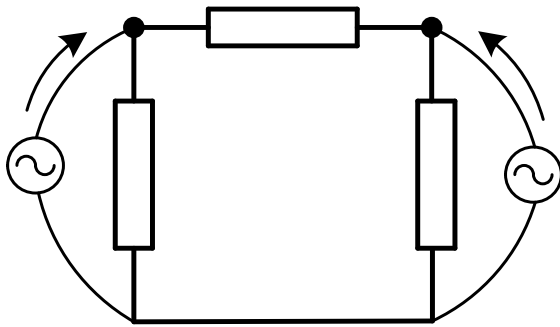
ნახ.11 ა -ზე წარმოდგენილი სქემა განეკუთვნება შეკრულ ოთხპოლუსას (ნახ.12 ა), ვინაიდან ძაბვის წყაროების წინააღობები ნულის ტოლია, ხოლო ნახ.11 ბ – გახსნილ ოთხპოლუსას – ნახ.12 ბ (დენის წყაროების წინააღობები უსასრულოდ დიდია).



ნახ.12 ძაბვისა და დენის წყაროს მოქმედებით მიღებული შეკრული და გახსნილი ოთხპოლუსები

ამ ოთხპოლუსების შემავალი (საკუთარი) და საერთო (ურთიერთ) პარამეტრები ქმნიან ერთმანეთის შებრუნებულ მატრიცებს.

თუ პარამეტრებს მივანიჭებთ კონკრეტულ მნიშვნელობებს გვექნება:



$$\begin{bmatrix} 0,5 & -0,25 \\ -0,25 & 0,75 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 4 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,5 \\ 0,5 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 2,4 & 0,8 \\ 0,8 & 1,6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1,5 \\ 0,5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \\ 2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0,5 & -0,25 \\ -0,25 & 0,75 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 2,4 & 0,8 \\ 0,8 & 1,6 \end{bmatrix}$$

ე.ი. როგორც ვხედავთ მატრიცის შებრუნება ექვივალენტურია პროცესისა, როდესაც ქსელში გარკვეულ ადგილზე ჩართული ერთი სახის ენერჯის წყაროები (ძაბვის ან დენის) იცვლება მეორე სახის (ძაბვის ან დენის) ენერჯის წყაროთი. ვინაიდან ამ დროს ხდება სქემის შესაბამისად შეცვლა– ნულოვანი წინაღობა იცვლება უსასრულოდ დიდი წინაღობით ან პირიქით.

პრაქტიკულ მაგალითზე დავამტკიცოთ, რომ დამოკლებულ კვანძებიანი სქემის გამტარებლობების მატრიცის შებრუნება იძლევა გახსნილშუნტებიანი სქემის კვანძური წინაღობების მატრიცას.

$$\begin{bmatrix} (Y_1 + Y_2) & -Y_2 \\ -Y_2 & (Y_2 + Y_3) \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{Z_1 \cdot (Z_2 + Z_3)}{Z_1 + Z_2 + Z_3} & \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \\ \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} & \frac{Z_3 \cdot (Z_1 + Z_2)}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \end{bmatrix}, \text{ ანუ } Y_{33}^{-1} = Z_{33}$$

$$\text{ვიციოთ, რომ } Y_1 = \frac{1}{Z_1}; \quad Y_2 = \frac{1}{Z_2} \cdot \dots \cdot Y_n = \frac{1}{Z_n}, \quad Y_{33} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix};$$

$$Z_{\mathcal{B}\mathcal{B}} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}$$

შემოვიღოთ აღნიშვნა:

$$\begin{bmatrix} \frac{Z_1 \cdot (Z_2 + Z_3)}{Z_1 + Z_2 + Z_3} & \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \\ \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} & \frac{Z_3 \cdot (Z_1 + Z_2)}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}$$

გვექნება:

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}\right) & -\frac{1}{Z_2} \\ -\frac{1}{Z_2} & \left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4.1)$$

პირველი და მეორე სტრიქონი გავამრავლოთ პირველ სვეტზე:

$$\begin{cases} \frac{Z_2 + Z_1}{Z_2 \cdot Z_1} \cdot Z_{11} - \frac{1}{Z_2} \cdot Z_{21} = 1 \\ -\frac{1}{Z_2} \cdot Z_{11} + \frac{Z_3 + Z_2}{Z_2 \cdot Z_3} \cdot Z_{21} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} Z_{21} = \left(\frac{Z_2 + Z_1}{Z_2 \cdot Z_1} \cdot Z_{11} - 1\right) \cdot Z_2 = 0 \\ -\frac{1}{Z_2} \cdot Z_{11} + \frac{Z_3 + Z_2}{Z_2 \cdot Z_3} \cdot Z_{11} \cdot \frac{Z_2 + Z_1}{Z_1} - \frac{Z_2 + Z_3}{Z_3} = 0 \end{cases}$$

საბოლოოდ გვექნება:

$$Z_{11} = \frac{Z_1 \cdot Z_2 (Z_2 + Z_3)}{(Z_2 + Z_3)(Z_2 + Z_1) - Z_1 \cdot Z_3} = \frac{Z_1 \cdot Z_2 [Z_2 + Z_3]}{Z_2^2 + Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_3 + Z_1 \cdot Z_3 - Z_1 \cdot Z_3}$$

$$= \left[\frac{Z_1 \cdot (Z_2 + Z_3)}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \right]$$

$$Z_{21} = \frac{(Z_2 + Z_1)}{Z_1} \cdot \frac{Z_1 \cdot (Z_2 + Z_3)}{Z_1 + Z_2 + Z_3} - Z_2 = \frac{Z_2^2 + Z_1 \cdot Z_3 + Z_3 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_3 - Z_1 \cdot Z_2 - Z_2^2 - Z_2 \cdot Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} =$$

$$= \left[\frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \right]$$

ამჯერად I განტოლების I და II სტრიქონი გავამრავლოთ II სვეტზე, გვექნება:

$$\begin{cases} \frac{Z_2 + Z_1}{Z_2 \cdot Z_1} \cdot Z_{12} - \frac{1}{Z_2} \cdot Z_{22} = 0 \\ -\frac{1}{Z_2} \cdot Z_{12} + \frac{Z_3 + Z_2}{Z_2 \cdot Z_3} \cdot Z_{22} = 1 \end{cases} \begin{cases} Z_{22} = \frac{(Z_2 + Z_1) \cdot Z_2}{Z_2 \cdot Z_1} \cdot Z_{12} \\ -\frac{1}{Z_2} \cdot Z_{12} + \frac{Z_3 + Z_2}{Z_2 \cdot Z_3} \cdot Z_{12} \cdot \frac{Z_2 + Z_1}{Z_1 \cdot Z_2} = 1 \end{cases}$$

და საბოლოოდ გვექნება:

$$Z_{12} = \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot Z_3}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_2^2 + Z_2 \cdot Z_3} = \left[\frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \right]$$

$$Z_{22} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} = \left[\frac{Z_3 \cdot (Z_1 + Z_2)}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \right]$$

ე.ი მოვახდინეთ კვანძური გამტარებლობების მატრიცის შებრუნება, რის შედეგადაც მივიღეთ კვანძური წინაღობების მატრიცა:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}$$

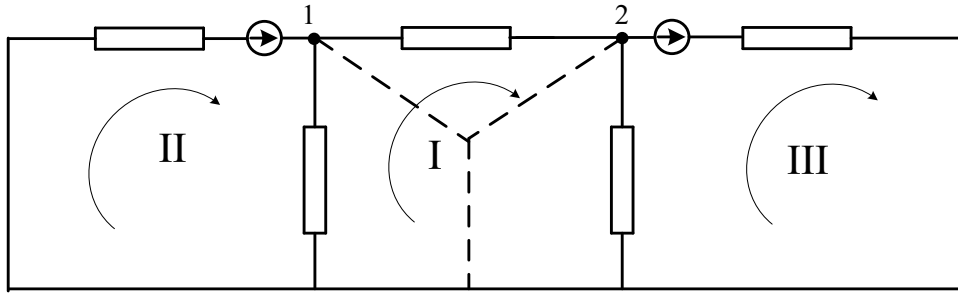
ანუ

$$\begin{bmatrix} (Y_1 + Y_2) & -Y_2 \\ -Y_2 & (Y_2 + Y_3) \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{Z_1 \cdot (Z_2 + Z_3)}{Z_1 + Z_2 + Z_3} & \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \\ \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} & \frac{Z_3 \cdot (Z_1 + Z_2)}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \end{bmatrix}$$

3.3 გაუსის მეთოდის შესაბამისობა სქემის გარდასახვებთან

მატრიცულ განტოლებაში ნებისმიერი სტრიქონის შესაბამისი უცნობების გამორიცხვა შეესაბამება თავისუფალი წევრების გაუსის ფორმულით გადაანგარიშებას. შესაბამისად მივიღებთ ერთით ნაკლებ განტოლებათა რიცხვს. აღნიშნული ოპერაცია შეესაბამება განსახილველი სქემის გარდასახვას, ანუ შესაბამისი კონტურების რიცხვის ერთით შემცირებას.

განვიხილოთ კონკრეტული მაგალითი რთული შეკრული ქსელისთვის.



ნახ.13 რთული შეკრული ქსელი

მოცემული სქემისათვის დავწეროთ კონტურული განტოლება:

$$\begin{bmatrix} (Z_2 + Z_3 + Z_4) & -Z_2 & Z_4 \\ -Z_2 & (Z_1 + Z_2) & 0 \\ Z_4 & 0 & (Z_4 + Z_5) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (3.3.1)$$

მოცემული განტოლებიდან I_{j1} - კონტურული დენის გამორიცხვა, რასაც შეესაბამება კოეფიციენტებისა და თავისუფალი წევრების გაუსის ფორმულით გადაანგარიშება, გამოიწვევს კონტურების რიცხვის ერთით შემცირებას, ანუ შესაბამისი განტოლებებისა და უცნობების რიცხვის ერთით შემცირებას.

I განტოლებიდან გამოვრიცხოთ კონტურული I_{j1} დენი, გვექნება:

$$\begin{bmatrix} (Z_1 + Z_2) - \frac{Z_2^2}{Z_2 + Z_3 + Z_4} & \frac{Z_2 Z_4}{Z_2 + Z_3 + Z_4} \\ \frac{Z_2 Z_4}{Z_2 + Z_3 + Z_4} & (Z_4 + Z_5) - \frac{Z_4^2}{Z_2 + Z_3 + Z_4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_2' \\ E_3' \end{bmatrix}$$

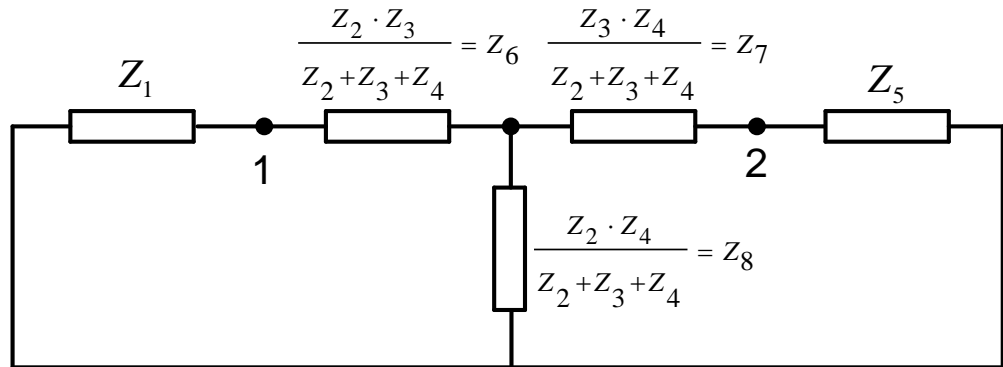
გვექნება:

$$\begin{bmatrix} \left(Z_1 + \frac{Z_2 Z_3 + Z_2 Z_4}{Z_2 + Z_3 + Z_4} \right) & \frac{Z_2 Z_4}{Z_2 + Z_3 + Z_4} \\ \frac{Z_2 Z_4}{Z_2 + Z_3 + Z_4} & \left(Z_5 + \frac{Z_2 Z_4 + Z_3 Z_4}{Z_2 + Z_3 + Z_4} \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_2' \\ E_3' \end{bmatrix}$$

ბოლო მატრიცული განტოლება გადავწეროთ შემდეგნაირად:

$$\begin{bmatrix} \left(Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3 + Z_4} + \frac{Z_2 Z_4}{Z_2 + Z_3 + Z_4} \right) & \frac{Z_2 Z_4}{Z_2 + Z_3 + Z_4} \\ \frac{Z_2 Z_4}{Z_2 + Z_3 + Z_4} & \left(Z_5 + \frac{Z_2 Z_4}{Z_2 + Z_3 + Z_4} + \frac{Z_3 Z_4}{Z_2 + Z_3 + Z_4} \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_2' \\ E_3' \end{bmatrix} \quad (3.5.2)$$

ახლა თუ მოვახდენთ ნახ.13-ზე წარმოდგენილი სამკუთხედის გარდასახვას ვარსკვლავში, გვექნება:



როგორც ვხედავთ I განტოლებაში I_{j1} - კონტურული დენი გამოვრიცხეთ გაუსის მეთოდის საშუალებით. ეს შეესაბამება I განტოლების უცნობების რიცხვის ერთით შემცირებას. გარდასახვის შემდეგ მიღებული კონტურების საკუთარი წინააღობებია:

$$Z_{11} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3 + Z_4} + \frac{Z_2 Z_4}{Z_2 + Z_3 + Z_4} = Z_1 + Z_6 + Z_8$$

$$Z_{22} = Z_5 + \frac{Z_2 Z_4}{Z_2 + Z_3 + Z_4} + \frac{Z_3 Z_4}{Z_2 + Z_3 + Z_4} = Z_5 + Z_7 + Z_8$$

$$\text{ხოლო ურთიერთწინააღობა არის } Z_{12} = Z_{21} = \frac{Z_2 Z_4}{Z_2 + Z_3 + Z_4} = Z_8$$

აღნიშნულ გამოსახულებას თუ გავითვალისწინებთ (3.3.2) გამოსახულებაში, გვექნება:

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_2' \\ E_3' \end{bmatrix}$$

ე. ი როგორც დავინახეთ მატრიცულ განტოლებაში ნებისმიერი უცნობის გაუსის ფორმულით გამორიცხვა შეესაბამება მოცემულ სქემაში კონტურების რიცხვის ერთით შემცირებას.

3.4 კვანძების საკუთარი და ურთიერთწინააღმდეგობებისა და შტოების საკუთარი და ურთიერთგამტარობების მატრიცების გაანგარიშების მეთოდები

თუ წრფივ განტოლებათა სისტემა ასახავს დენებისა და ძაბვების ურთიერთდამოკიდებულებას, მაშინ იგი ფაქტიურად არის ამ განტოლებების საძიებელი ცვლადების ანუ შესაბამისი იდეალური წყაროების მიერ შექმნილი ელექტრული რეჟიმების სუპერპოზიცია და მას შეესაბამება საწყისი ფიზიკური მოდელის ეკვივალენტური ფიზიკური მოდელი, სადაც ეს ენერჯის წყაროები არიან ჩართული.

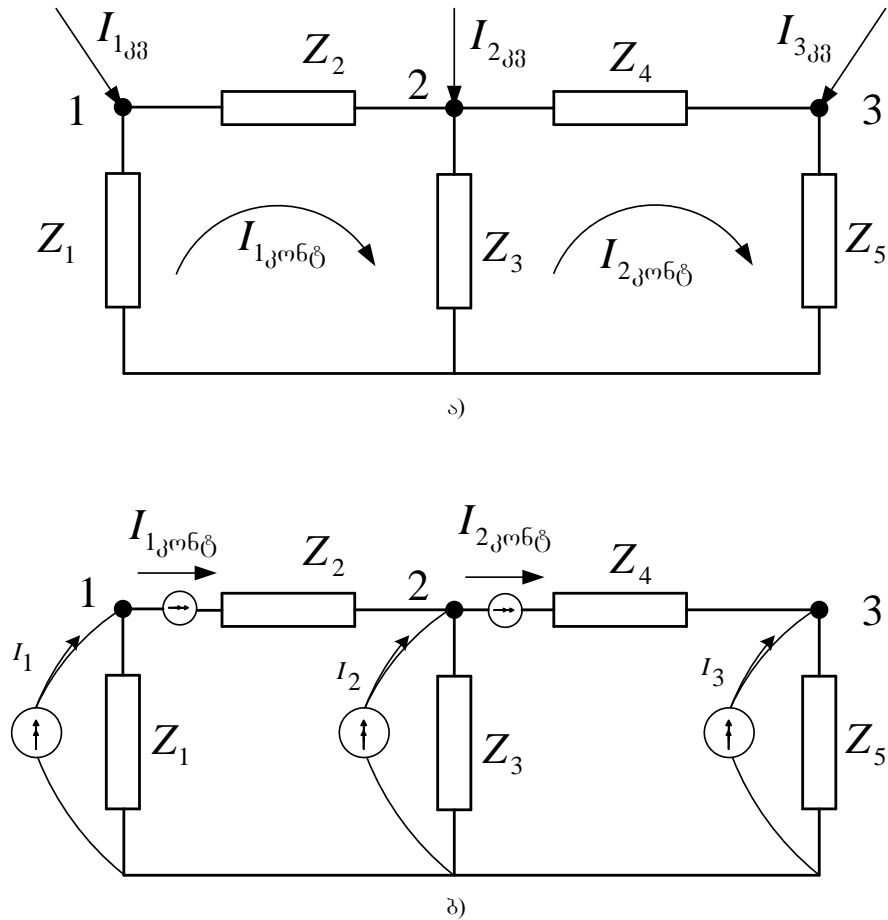
მაგალითად, კვანძური ძაბვების მატრიცული განტოლება $Y_{\alpha\alpha} \cdot U_{\alpha\alpha} = I_{\alpha\alpha}$ არის საძიებელი ძაბვების ტოლი იდეალური ძაბვის წყაროების მიერ შექმნილი რეჟიმების სუპერპოზიცია და მას შეესაბამება ფიზიკური მოდელი, სადაც კვანძებსა და ბაზისურ კვანძს შორის ჩართულია იდეალური ძაბვის წყაროები (განტოლებათა უცნობების შესაბამისი). ხოლო კონტურული მატრიცული განტოლება $Z_{\beta\beta} \cdot I_{\beta\beta} = U_{\beta\beta}$ არის საძიებელი დენების ტოლი იდეალური დენის წყაროების მიერ შექმნილი ელექტრული რეჟიმების სუპერპოზიცია და მას შეესაბამება ფიზიკური მოდელი, სადაც ეს იდეალური დენის წყაროები ჩართულია კავშირის შტოებში.

ფიზიკურ მოდელში დენის წყაროს შეცვლა ძაბვის წყაროთი და პირიქით, იწვევს შესაბამისი განტოლებების კოეფიციენტთა მატრიცის შებრუნებას.

განვიხილოთ განზოგადებულპარამეტრებიანი განტოლებების მიღება ეკვივალენტური ფიზიკური მოდელის საფუძველზე, ვინაიდან ამ განტოლებებს განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება ელექტრული ქსელების ანალიზის დროს.

განვსაზღვროთ კვანძური წინააღმდეგობების მატრიცის ელემენტები კონტურული განტოლებების საშუალებით. ელექტრულ ქსელში (ნახ.14-ა) ყველა კვანძსა და ბაზისურ კვანძს შორის ჩავრთოთ კვანძური დენის ტოლი და მიმართულებითაც თანხვედნილი იდეალური

დენის წყარო (ნახ.14-ბ), ამით ჩვენ ქსელისა და საწყის ელექტრულ რეჟიმს უცვლელს ვტოვებთ.



ნახ.14 მარტივი ქსელის ჩანაცვლების სქემები კვანძების საკუთარი და ურთიერთწინააღობების მატრიცის მისაღებად

თუ ნახ.14-ა-ზე წარმოდგენილ ქსელში ხის ელემენტებად გვქონდა არჩეული 1, 3, 5 შტოები, მაშინ კავშირის შტოებად იქნებიან 2 და 4 შტოები. მე-2 და მე-4 შტოებში ჩავრთოთ კონტურული დენების ტოლი სიდიდისა და მათი მიმართულების მქონე იდეალური დენის წყაროები. ამ დენის წყაროების ჩართვითაც არ შეიცვლება ელექტრული რეჟიმი (ნახ.14-ბ)

ნახ.14-ბ-ზე წარმოდგენილ ქსელში შტოებში არჩეული დენების მიმართულების მიხედვით შევადგინოთ კონტურული დენების განტოლებები. კონტურების რაოდენობა საწყის ქსელში იყო 2, რომელთაც შეესაბამებოდა კავშირის შტოები 2, 4. დენის წყაროების ჩართვით მივიღეთ დამატებითი კონტურები, რომელთა რიცხვი უდრის

კვანძების რიცხვს. მოლიანად, გაფართოებულ ქსელში, დამოუკიდებელი კონტურების რიცხვი იქნება $(m-n)+n=m$, სადაც n არის კვანძების რიცხვი, m –შტოების რიცხვი.

გაფართოებული ქსელისათვის (ნახ.14–ბ), იდეალური დენის წყაროს უსასრულოდ დიდი შიგა წინააღობის გათვალისწინებით, შევადგინოთ კონტურული განტოლებები:

$$\begin{cases} (Z_1 + Z_2 + Z_3) \cdot I_{1კონტ} - Z_3 \cdot I_{2კონტ} - Z_1 I_1 + Z_3 I_2 + 0 = U_{1კონტ} \\ -Z_3 \cdot I_{1კონტ} + (Z_3 + Z_4 + Z_5) \cdot I_{2კონტ} + 0 - Z_3 I_2 + Z_5 I_3 = U_{2კონტ} \\ -Z_1 \cdot I_{1კონტ} + 0 + Z_1 I_1 + 0 + 0 = U_1 \\ Z_3 \cdot I_{1კონტ} - Z_3 \cdot I_{2კონტ} + 0 + Z_3 I_2 + 0 = U_2 \\ 0 + Z_5 \cdot I_{2კონტ} + 0 + 0 + Z_5 I_3 = U_3 \end{cases} \quad (3.4.1)$$

უნდა აღინიშნოს, რომ ძირითადი დამოუკიდებელი კონტურები და კვანძებში დენის წყაროების ჩასმით წარმოქმნილი (ერთით ნაკლები კვანძების რიცხვის ტოლი) დამოუკიდებელი კონტურები გადანომრილია ცალ-ცალკე, რათა შემდგომ გარდასახვების ჩატარების შედეგად მიღებული განტოლებების და ცვლადების ნომერაცია შეესაბამებოდეს კვანძების ნომერაციას.

(3.2.1) განტოლებათა სისტემა, გადაწერილი მატრიცული სახით, იქნება:

$$\begin{bmatrix} (Z_1 + Z_2 + Z_3) & -Z_3 & -Z_1 & Z_3 & 0 \\ -Z_3 & (Z_3 + Z_4 + Z_5) & 0 & -Z_3 & Z_5 \\ -Z_1 & 0 & Z_1 & 0 & 0 \\ Z_3 & -Z_3 & 0 & Z_3 & 0 \\ 0 & Z_5 & 0 & 0 & Z_5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{1კონტ} \\ I_{2კონტ} \\ I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{1კონტ} \\ U_{2კონტ} \\ U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (3.4.2)$$

(3.4.1) განტოლებათა სისტემის პირველი განტოლებიდან $I_{1კონტ}$ -ის გამოირიცხვა, რასაც შეესაბამება განტოლებათა სისტემის კოეფიციენტებისა და თავისუფალი წევრების გაუსის ფორმულით გადაანგარიშება, გამოიწვევს პირველი ძირითადი კონტურის გარდასახვას ვარსკვლავში, ანუ კონტურების რიცხვის ერთით შემცირებას, შესაბამისი განტოლებებისა და უცნობების რიცხვის ერთით შემცირებას.

შემდეგ მიღებული ახალი (ერთით ნაკლები რიგის) განტოლებათა სისტემიდან გამოირიცხება $I_{2კონტ}$ უცნობი, რაც კიდევ ერთი რიგით შეამცირებს განტოლებათა სისტემას, და ზოგადად (K რაოდენობის ძირითადი კონტურების არსებობის შემთხვევაში) ეს პროცესი

გრძელდება მანამ, სანამ არ გამოირიცხება ყველა ძირითადი დამოუკიდებელი კონტურის შესაბამისი კონტურული დენი. შედეგად ვღებულობთ კვანძური დენებისა და ძაბვების დამაკავშირებელ განტოლებებს.

ზემოთ აღწერილი პროცესი შეიძლება განხორციელდეს მატრიცების ბლოკებად დაყოფით და იდენტური მოქმედებების ჩატარებით. (3.4.2) განტოლება დავეოთ ბლოკებად:

$$\begin{bmatrix} Z_I & Z_{II} \\ Z_{III} & Z_{IV} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_I \\ I_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_I \\ U_{II} \end{bmatrix} \quad (3.4.3)$$

$$\text{სადაც } -Z_I = \begin{bmatrix} (Z_1 + Z_2 + Z_3) & -Z_3 \\ -Z_3 & (Z_3 + Z_4 + Z_5) \end{bmatrix};$$

$$Z_{II} = \begin{bmatrix} -Z_1 & Z_3 & 0 \\ 0 & -Z_3 & -Z_5 \end{bmatrix}; \quad Z_{III} = \begin{bmatrix} -Z_1 & 0 \\ Z_3 & -Z_3 \\ 0 & Z_5 \end{bmatrix}; \quad Z_{IV} = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_3 & 0 \\ 0 & 0 & Z_5 \end{bmatrix}$$

$$I_I = \begin{bmatrix} I_{1კონტ} \\ I_{2კონტ} \end{bmatrix}; \quad U_I = \begin{bmatrix} U_{1კონტ} \\ U_{2კონტ} \end{bmatrix}; \quad I_{II} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix}; \quad U_{II} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}$$

ცხადია, რომ პირველი ბლოკი Z_I წარმოადგენს კონტურულ წინაღობათა მატრიცას $Z_I = N \cdot Z_{\mathcal{L}} \cdot N^T$ სადაც N არის ინციდენციის Π მატრიცა, ბლოკი Z_{II} არის მატრიცების ნამრავლი $N \cdot Z_{\mathcal{L}} \cdot E'^T$, სადაც E' არის მატრიცა, რომელიც ასახავს გზას კვანძიდან ბაზისურ კვანძამდე, ქსელის ხის ელემენტების მეშვეობით, ანუ კავშირების მატრიცას კვანძებსა და ბაზისურ კვანძს შორის ჩართული დენის წყაროების მიერ შექმნილი კონტურებისათვის.

(3.4.3) ტოლობის გაუსის მეთოდით გადაანგარიშებისას ვღებულობთ:

$$(Z_{IV} - Z_{III} \cdot Z_I^{-1} \cdot Z_{II}) \cdot I_{II} = U_{II} - Z_{III} \cdot Z_I^{-1} \cdot U_I \quad (3.4.4)$$

$$\text{ანუ } Z_{\mathcal{J}\mathcal{J}} \cdot I_{\mathcal{J}\mathcal{J}} = U_{\mathcal{J}\mathcal{J}} \quad (3.4.5)$$

$$\text{სადაც } -Z_{\mathcal{J}\mathcal{J}} = Z_{IV} - Z_{III} \cdot Z_I^{-1} \cdot Z_{II}$$

$$\text{და } U_{\mathcal{J}\mathcal{J}} = U_{II} - Z_{III} \cdot Z_I^{-1} \cdot U_I \quad (3.4.6)$$

ზემოთ განხილულის საფუძველზე ვასკენით, რომ კვანძური წინაღობების მატრიცის მისაღებად პირველ რიგში საჭიროა გაფართოებული სქემისათვის კონტურულ წინაღობათა მატრიცის შედგენა. ამისათვის ინციდენციის II მატრიცას (შედგენილს არაგაფართოებული ქსელისათვის) უნდა დაემატოს კვანძებში დენის წყაროების ჩართვით მიღებული დამატებითი n დამოუკიდებელი კონტურის შესაბამისი სტრიქონები (ხეში შემავალი შტოების რიცხვი და შემადგენლობა რჩება უცვლელი, კავშირების სიაში შემავალ შტოებს დაემატება დენის წყაროების ჩართვით წარმოქმნილი შტოები). თუ N -ით აღვნიშნავთ ძირითადი სქემისათვის ინციდენციის მე-2 მატრიცას, გაფართოებული ქსელისათვის ინციდენციის მე-2 მატრიცა იქნება:

$$N^I = \begin{bmatrix} N \\ E^I \end{bmatrix} \quad (3.4.7)$$

სადაც E^I -იქნება ინციდენციის მე-2 მატრიცის ის ნაწილი, რომელიც განსაზღვრავს კავშირს კვანძებში დენის წყაროების ჩართვის შედეგად მიღებულ კონტურებსა და შტოებს შორის. მასში სტრიქონების რიცხვი ტოლი იქნება კვანძების რიცხვის და მისი შემადგენლობა დამოუკიდებელი იქნება სქემის ხედ და კავშირებად დაშლის შედეგზე.

განხილული მაგალითის შემთხვევაში:

$$N = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; E^I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; N^I = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4.8)$$

გაფართოებული ქსელისათვის კონტურულ წინაღობათა მატრიცა გამოსახული ინციდენციის მე-2 მატრიცის საშუალებით იქნება:

$$\begin{aligned}
Z_{კონტ} &= N' \cdot Z_{\varphi} \cdot N'^T = \\
&= \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_5 \end{bmatrix} \cdot \\
&\cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} (Z_1 + Z_2 + Z_3) & -Z_3 & -Z_1 & Z_3 & 0 \\ Z_3 & (Z_3 + Z_4 + Z_5) & 0 & -Z_3 & Z_5 \\ -Z_1 & 0 & Z_1 & 0 & 0 \\ Z_3 & -Z_3 & 0 & Z_3 & 0 \\ 0 & Z_5 & 0 & 0 & Z_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_I & Z_{II} \\ Z_{III} & Z_{IV} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z_{კონტ} &= \begin{bmatrix} N \\ E' \end{bmatrix} \cdot [Z_{\varphi}] \cdot [N^T \cdot E'^T] = \begin{bmatrix} N & Z_{\varphi} \\ E' & Z_{\varphi} \end{bmatrix} \cdot [N^T \cdot E'^T] = \\
&= \begin{bmatrix} N \cdot Z_{\varphi} \cdot N^T & N \cdot Z_{\varphi} \cdot E'^T \\ E' \cdot Z_{\varphi} \cdot N^T & E' \cdot Z_{\varphi} \cdot E'^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_I & Z_{II} \\ Z_{III} & Z_{IV} \end{bmatrix} \quad (3.4.9)
\end{aligned}$$

(3.4.9) კონტურულ დენტა განტოლება გაფართოებული სქემისათვის, შედგენილი ინციდენტის მე-2 მატრიცის გათვალისწინებით, იქნება:

$$\begin{bmatrix} Z_I & Z_{II} \\ Z_{III} & Z_{IV} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_I \\ I_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N \cdot Z_{\varphi} \cdot N^T & N \cdot Z_{\varphi} \cdot E'^T \\ E' \cdot Z_{\varphi} \cdot N^T & E' \cdot Z_{\varphi} \cdot E'^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_I \\ I_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_I \\ U_{II} \end{bmatrix} \quad (3.4.10)$$

გაუსის მეთოდით I_I გამოსახვის შემთხვევაში მივიღებთ:

$$\begin{aligned}
& (E' \cdot Z_{\varphi} E'^T - E' \cdot Z_{\varphi} N^T (N \cdot Z_{\varphi} \cdot N^T)^{-1} \cdot N \cdot Z_{\varphi} \cdot E'^T) I_{II} = \\
& = U_{II} - E' \cdot Z_{\varphi} \cdot N^T \cdot (N \cdot Z_{\varphi} \cdot N^T)^{-1} U_I \quad (3.4.11)
\end{aligned}$$

უკანასკნელ გამოსახულებაში:

$$E' \cdot Z_{\varphi} \cdot E'^T - E' \cdot Z_{\varphi} \cdot N^T \cdot (N \cdot Z_{\varphi} \cdot N^T)^{-1} \cdot N \cdot Z_{\varphi} \cdot E'^T = Z_{\beta\beta} \quad (3.4.12)$$

წარმოადგენს კვანძური წინაღობების მატრიცას, I_{II} - კვანძური დენტების მატრიცას.

თუ (3.4.12) განტოლებიდან ძირითადი დამოუკიდებელი კონტურების შესაბამისი უცნობების გამორიცხვას გაუსის მეთოდით

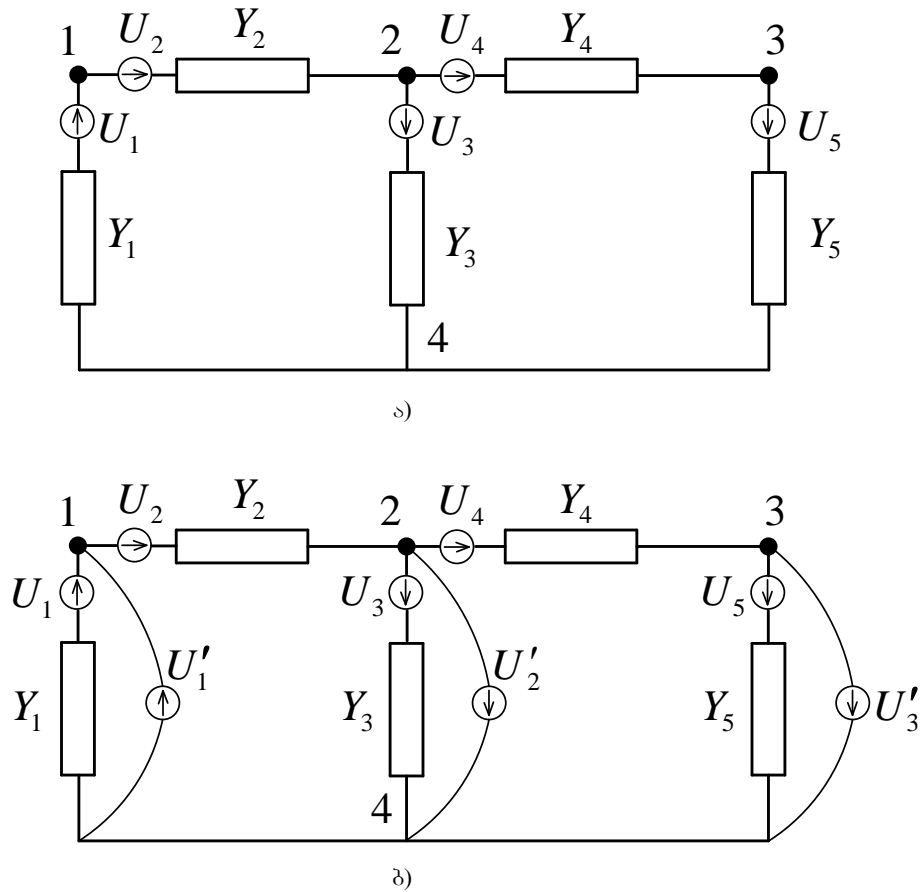
მოვახდენთ მიმდევრობით, ბიჯების რაოდენობა იქნება დამოუკიდებელი კონტურების რიხვის ტოლი, რასაც კვანძური წინააღმდეგობის მატრიცის ანგარიშის სხვა მეთოდებთან შედარებით (ვთქვათ კვანძური გამტარებლობების მატრიცის შებრუნება) გარკვეული უპირატესობა გააჩნია მანქანური დროის ეკონომიის თვალსაზრისით. რაც კიდევ უფრო მნიშვნელოვანი ხდება ამ ანგარიშების მრავალჯერადი ჩატარების შემთხვევაში, რასაც შეიძლება ჰქონდეს ადგილი სხვადასხვა ენერგეტიკული ამოცანების იტერაციული მეთოდებით გადაწყვეტის დროს.

ზემოთქმულის საფუძველზე შეიძლება დავასკვნათ, რომ კონტურულ დენთა მეთოდი არის სუპერპოზიცია რეჟიმებისა, როდესაც კავშირების შტოებში ჩართულია დენის წყაროები. თუ ყველა კავშირის შტოში ჩართულია შესაბამისი დენის წყარო, ბუნებრივია, მათი წრედის შეკერის გზა გაივლის მხოლოდ ხის იმ შტოებზე, რომლებიც ქმნიან კონტურს კონკრეტული კავშირის შტოსათვის (დენის წყაროს უსასრულოდ დიდი წინააღმდეგობის გამო).

ელექტროენერგეტიკის მათემატიკური ამოცანების ჩამოყალიბების დროს ასევე ფართო გამოყენება აქვს შტოების საკუთარი და ურთიერთგამტარობის მატრიცას. განვიხილოთ მისი მიღება ეკვივალენტური ფიზიკური მოდელის საფუძველზე.

Y' –ით აღვნიშნოთ შტოების საკუთარი და ურთიერთგამტარობის მატრიცა, რომელიც აკავშირებს შტოების დენებს შტოებში ჩართულ ძაბვის წყაროებთან. Y' მატრიცის შესადგენად უნდა მოვინახოთ ისეთი ფიზიკური მოდელი, რომლის შესაბამისი განტოლებების შედგენა მარტივად მოხდება. ამისათვის შევადგინოთ ეკვივალენტური ფიზიკური მოდელი (ნახ. 15-ბ), სადაც კვანძებსა და ბაზისურ კვანძს შორის ჩართული იქნება იდეალური ძაბვის წყაროები U'_1, U'_2, U'_3 ისე, რომ მათი ძაბვის სიდიდეები და მიმართულება ემთხვეოდეს საწყისი ქსელის კვანძური ძაბვების სიდიდეებსა და მიმართულებას. ცხადია, რომ ნახ.15 ა-ზე და ნახ.15 ბ-ზე წარმოდგენილი ქსელების ელექტრული რეჟიმები ერთნაირი იქნება. ნახ.15 ბ-ზე წარმოდგენილი ქსელისათვის შტოებში ძაბვებისა და დენების დამაკავშირებელი განტოლებების შედგენა სირთულეს არ წარმოადგენს, ვინაიდან იდეალური ძაბვის წყაროები

ნულოვანი შიგა წინაღობების გამო ამოკლებენ წრედს, და თუ ჩვენ ყველა შტოში გამავალ დენს წარმოვადგენთ, როგორც ჩართული ძაბვის წყაროების მიერ შექმნილი ელექტრული რეჟიმების სუპერპოზიციის შედეგს, რაც შესაძლებელია პირდაპირი სქემის მიხედვით, მივიღებთ:



ნახ.15 მარტივი ქსელის ჩანაცვლების სქემები შტოების საკუთარი და ურთიერთგამტარობების მატრიცის მისაღებად

$$\begin{bmatrix} (y_1 + y_2) & -y_2 & 0 & y_1 & -y_2 & 0 & 0 & 0 \\ -y_2 & (y_2 + y_3 + y_4) & -y_4 & 0 & y_2 & -y_3 & -y_4 & 0 \\ 0 & -y_4 & (y_4 + y_5) & 0 & 0 & 0 & y_4 & -y_5 \\ y_1 & 0 & 0 & y_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -y_2 & y_2 & 0 & 0 & y_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -y_3 & 0 & 0 & 0 & y_3 & 0 & 0 \\ 0 & -y_4 & y_4 & 0 & 0 & 0 & y_4 & 0 \\ 0 & 0 & -y_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & y_5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U'_1 \\ -U'_2 \\ U'_3 \\ U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I'_1 \\ I'_2 \\ I'_3 \\ I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix}$$

კოეფიციენტების მატრიცა აღვნიშნოთ Y , და დავყოთ ბლოკებად:

$$Y_I = \begin{bmatrix} (y_1 + y_2) & -y_2 & 0 \\ -y_2 & (y_2 + y_3 + y_4) & -y_4 \\ 0 & -y_4 & (y_4 + y_5) \end{bmatrix};$$

$$Y_{II} = \begin{bmatrix} y_1 & -y_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_2 & -y_3 & -y_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_4 & -y_5 \end{bmatrix};$$

$$Y_{III} = \begin{bmatrix} y_1 & 0 & 0 \\ -y_2 & y_2 & 0 \\ 0 & -y_3 & 0 \\ 0 & -y_4 & y_4 \\ 0 & 0 & -y_5 \end{bmatrix}; Y_{IV} = \begin{bmatrix} y_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & y_5 \end{bmatrix}$$

ადვილად შესაძნევეია, რომ პირველი ბლოკი წარმოადგენს კვანძური გატარებლობის მატრიცას $Y_I = M \cdot \dot{Y}_{\varphi} \cdot M^T$, მეორე ბლოკი არის მატრიცების ნამრავლი $Y_{II} = M \cdot \dot{Y}_{\varphi}$, მესამე ბლოკი $Y_{III} = \dot{Y}_{\varphi} \cdot M^T$, ხოლო მეოთხე ბლოკი $Y_{IV} = \dot{Y}_{\varphi}$ - შტოების გამტარებლობების დიაგონალური მატრიცაა.

ამგვარად, ეკვივალენტური ფიზიკური მოდელის შესაბამისი განტოლების კოეფიციენტების მატრიცას აქვს სახე:

$$Y = \begin{bmatrix} M \cdot \dot{Y}_{\varphi} \cdot M^T & M \cdot \dot{Y}_{\varphi} \\ \dot{Y}_{\varphi} \cdot M^T & \dot{Y}_{\varphi} \end{bmatrix}$$

ანუ არის კვანძური გამტარებლობის მატრიცა ნახ.15-ზე წარმოდგენილი ქსელისთვის. ამავე ქსელისათვის ინციდენტის I მატრიცას აქვს სახე:

$$M' = \begin{bmatrix} M \\ E \end{bmatrix} \quad (3.2.13)$$

სადაც E არის ერთეულოვანი მატრიცა შტოების რიცხვის ტოლი რიგის. შესაბამისად კვანძური გამტარებლობის მატრიცის მიღება შეიძლება ფორმულით:

$$Y = \begin{bmatrix} N \\ E' \end{bmatrix} \cdot [Y_{\varphi}] [M^T \cdot E^T] = \begin{bmatrix} M \cdot Y_{\varphi} \cdot M^T & M \cdot Y_{\varphi} \\ Y_{\varphi} \cdot M^T & Y_{\varphi} \end{bmatrix}$$

თუ კვანძური გამტარებლობის მატრიცული განტოლებიდან გამოვრიცხავთ უცნობებს U'_1, U'_2, U'_3 მივიღებთ საძიებელ განტოლებათა სისტემას, რომელიც ასახავს ურთიერთდამოკიდებულებებს შტოებში ჩართულ ძაბვის წყაროებსა და შოებში გამავალ დენებს შორის, რომლის კოეფიციენტთა მატრიცა იქნება საძიებელი შტოების საკუთარი და ურთიერთგამტარებლობის მატრიცა. უცნობების

გამორიცხვა ამ განტოლებიდან შეიძლება ვაწარმოოთ გაუსის მეთოდით. რის შედეგადაც საძიებელი მატრიცა მიიღებს სახეს:

$$Y' = Y_{IV} - Y_{III} \cdot Y_I^{-1} \cdot Y_{II} = Y_{\mathcal{L}} - Y_{\mathcal{L}} \cdot M^T \cdot (M \cdot Z_{\mathcal{L}} \cdot M^T)^{-1} \cdot M \cdot Y_{\mathcal{L}} \quad (3.4.14)$$

ზემოთქმულიდან გამომდინარე შეიძლება ვთქვათ, რომ განზოგადებულპარამეტრებიანი განტოლებების შესაბამისი კოეფიციენტების მატრიცების შედგენა წარმოებს ეკვივალენტური ფიზიკური მოდელის საფუძველზე შედგენილი ინციდენციის მატრიცების (3.4.7), (3.4.13) და (3.4.12), (3.4.14) გამოსახულებების მიხედვით.

ზემოთქმულის საფუძველზე შეიძლება დავასკვნათ: კვანძური ძაბვების განტოლება არის სისტემის მდგომარეობის ამსახველი განტოლება, როდესაც ყველა კვანძსა და ბაზისურ კვანძს შორის ჩართულია ძაბვის წყარო და თვითოეული ძაბვის წყაროსათვის კონტური განისაზღვრება ბაზისურ კვანძზე დამოკლებული კვანძების გათვალისწინებით (ძაბვის წყაროს ნულოვანი შიგა წინაღობის გამო).

იგივე ეხება განზოგადებულპარამეტრებიან განტოლებებსაც. თუ განვიხილავთ განტოლებას, რომელიც აკავშირებს უცნობ კვანძურ დენებს კვანძურ ძაბვებთან, უნდა წარმოვიდგინოთ უცნობი დენის წყაროები ჩართული კვანძებსა და ბაზისურ კვანძს შორის. ამ შემთხვევაში კოეფიციენტების მატრიცა იქნება კვანძების საკუთარი და ურთიერთწინაღობების მატრიცა.

ხოლო თუ განვიხილავთ განტოლებას, რომელიც აკავშირებს შტოების გაწვევტის ადგილზე ძაბვებს, გაწვევტამდე ამ შტოში არსებულ დენებთან, უნდა წარმოვიდგინოთ უცნობი ძაბვის წყაროები ჩართული გაწვევტის ადგილას. ამ შემთხვევაში განტოლების კოეფიციენტების მატრიცა იქნება შტოების საკუთარი (შემაგალი) და ურთიერთგამტარობების მატრიცა.

3.5 ხაზის გაწყვეტის მოდელირება იდეალური დენისა და ძაბვის წყაროებით

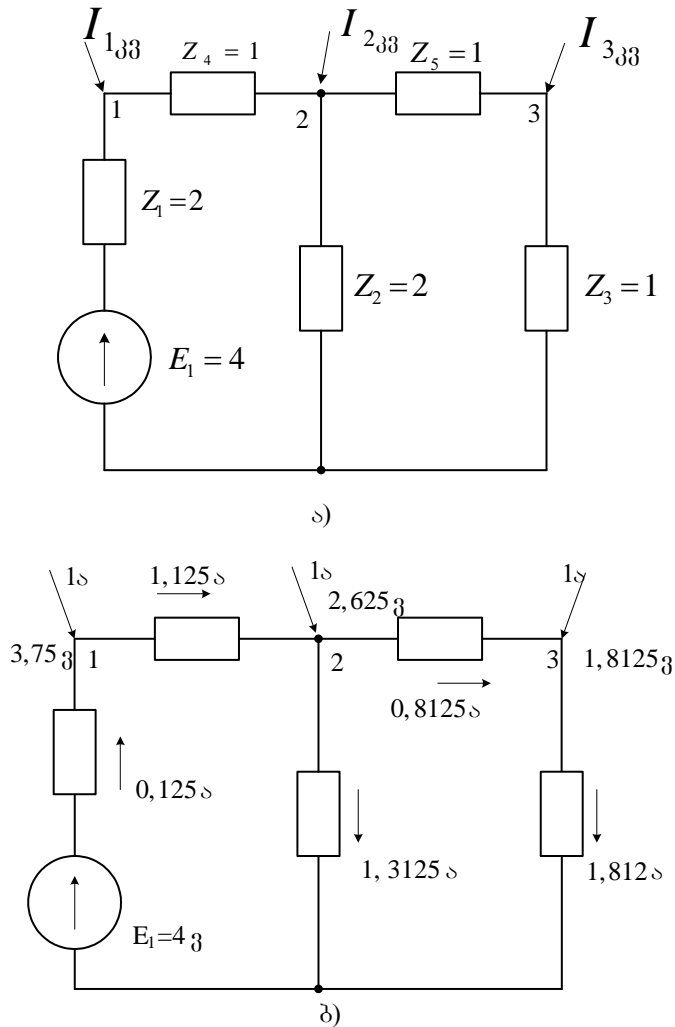
ელექტროგადამცემი ხაზი არის ელექტრული სისტემების ყველაზე გავრცელებული ელემენტი, რომელიც აკავშირებს ერთმანეთთან მისი სქემის ცალკეულ საკვანძო წერტილებს. სხვა ელემენტებისგან (სინქრონული ელექტრული მანქანები, ტრანსფორმატორები, ელექტრომიმღებები და ა.შ.) განსხვავებით, მას ახასიათებს ერთი მნიშვნელოვანი თავისებურება, კერძოდ, ის არის ელემენტი სიგრძეზე განაწილებული პარამეტრებით.

ხაზებით ელექტროენერჯის გადაცემა განპირობებულია ელექტრომაგნიტური ველის გავრცელებით მავთულებში (კაბელის ძარღვებში) და მათ გარემო სივრცეში. ცვლადი ძაბვის ქმედებით საჰაერო ხაზში მავთულების გარშემო წარმოიშობა ცვლადი მაგნიტური ველი და აგრეთვე ფაზურ მავთულებს შორის, ყოველ მავთულსა და დედამიწას შორის ცვლადი ელექტრული ველი. ცვლადი ელექტრული ველი წარმოქმნის გადანაცვლების დენებს (დამუხტვის დენები). მათი მნიშვნელობები დამოკიდებულია გამტარების გარშემო განთავსებული დიელექტრიკის თვისებებზე და პოტენციალთა სხვაობაზე მავთულსა და დედამიწას შორის, სამფაზიანი ხაზის შემთხვევაში აგრეთვე პოტენციალების სხვაობაზე ფაზურ მავთულებს შორის. დამუხტვის დენები ემატება დატვირთვის დენს და განსაზღვრავენ ხაზის გასწვრივ საერთო დენის ცვლილებას. ამ დენით გამოწვეული მაგნიტური ველის დაძაბულობა აგრეთვე იცვლება ხაზის გასწვრივ. თავის მხრივ, ეს იწვევს იმას, რომ ე.მ.ძ-ების თვითინდუქცია და ურთიერთინდუქცია ხაზის სიგრძის სხვადასხვა ელემენტებისთვის არ არის ტოლი. ამ ე.მ.ძ-ების არატოლობა განსაზღვრავს ხაზის გასწვრივ ძაბვის და გადანაცვლების დენების ცვლილების რთულ კანონს.

კონკრეტულ მაგალითზე განვიხილოთ ხაზის გაწყვეტის მოდელირება დენისა და ძაბვის წყაროებით. ნახ.16ა-ზე წარმოდგენილი სქემისათვის მოცემულია კვანძური დენები: $I_{1კვ} = I_{2კვ} = I_{3კვ} = 1$ ა, ე.მ.ძ.

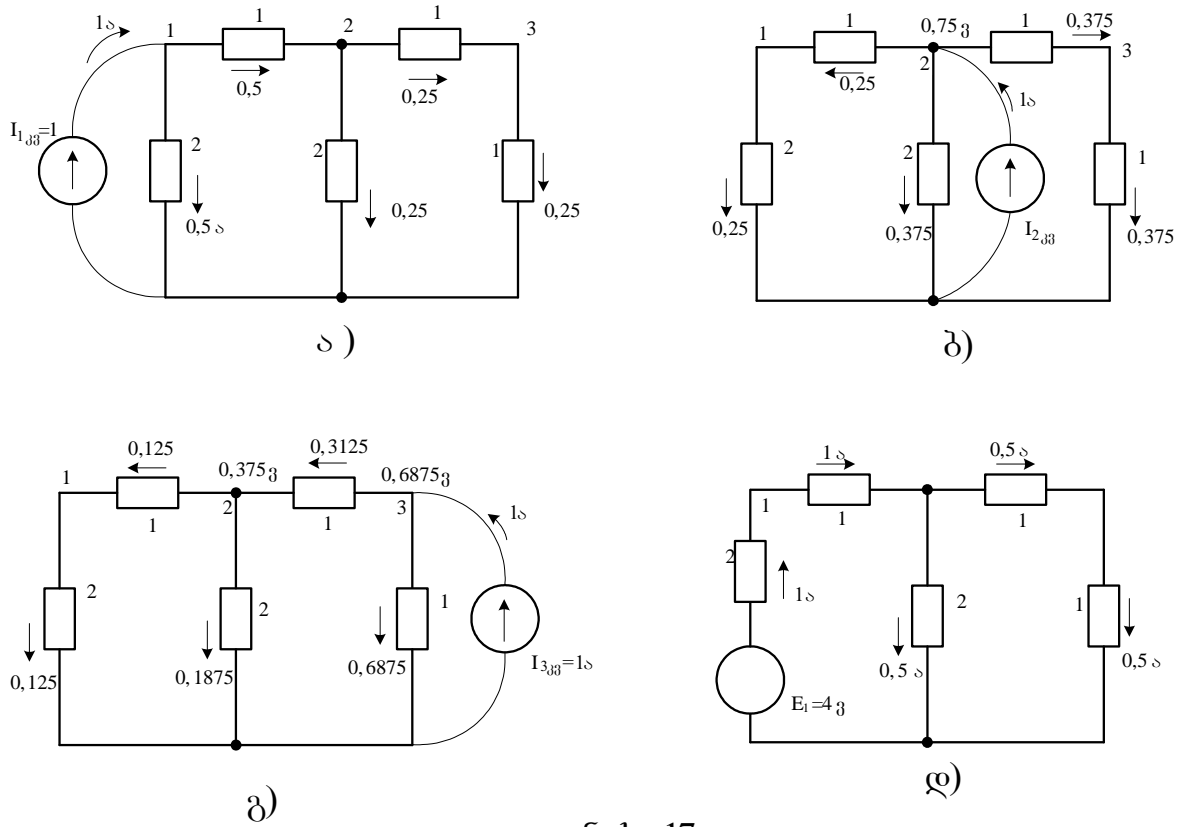
$E_1=4$ ვ. ჩართული პირველ შტოში და შტოების წინაღობები: $Z_1=Z_2=2$ ომი, $Z_3=Z_4=Z_5=1$ ომი.

მიღებული ელექტრული რეჟიმი წარმოდგენილი ქსელისათვის ნაჩვენებია ნახ.16 ბ-ზე.



ნახ. 16

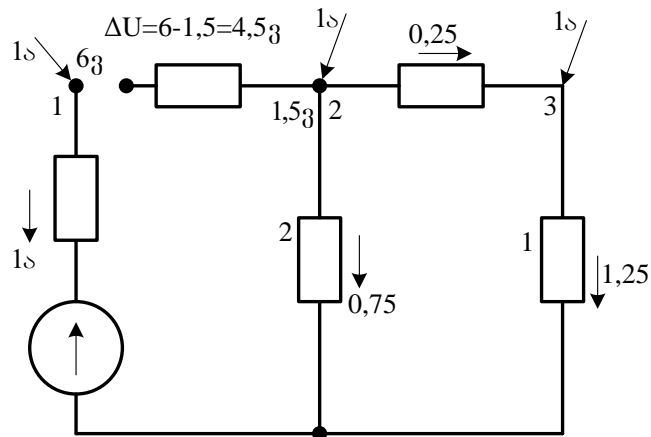
ნახ.16 ბ) წარმოდგენილი ელ. რეჟიმი არის $I_{1კვ}$, $I_{2კვ}$, $I_{3კვ}$ დენებისა და E_1 ე.მ.ძ-ის მიერ შექმნილი ელ. რეჟიმების სუპერპოზიცია. (ნახ.17 ა, ბ, გ, დ) თითოეული ამ ენერჯის წყაროს (კვანძური დენები შეიძლება წარმოდგენილი იქნან იდეალური დენის წყაროებით, რომლებიც ჩართული იქნებიან შესაბამის კვანძსა და ბაზისურ კვანძს შორის. მათ მიერ შექმნილი დენები ვრცელდებიან ერთსა და იმავე პასიურ წრედში, რადგანაც იდეალური დენის წყაროების შიდა წინააღობები უსასრულოდ დიდია, ხოლო ძაბვის წყაროსი კი უდრის ნულს.



ნახ. 17

ნახ.17-ზე წარმოდგენილი ელექტრული რეჟიმების ზედდება იძლევა ელ. რეჟიმს, რომელიც ასახულია სქემაზე ნახ.16 ბ.

ნახ.16 ა-ზე წარმოდგენილ სქემაზე მოვახდინოთ მე-4 ხაზის ანუ Z_{1-2} -ის გაწვევება. მივიღებთ რეჟიმს ნახ.18.

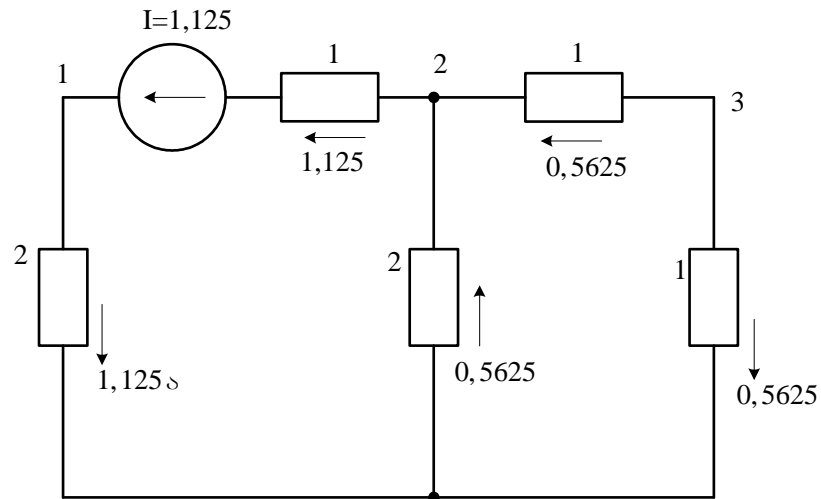


ნახ.18

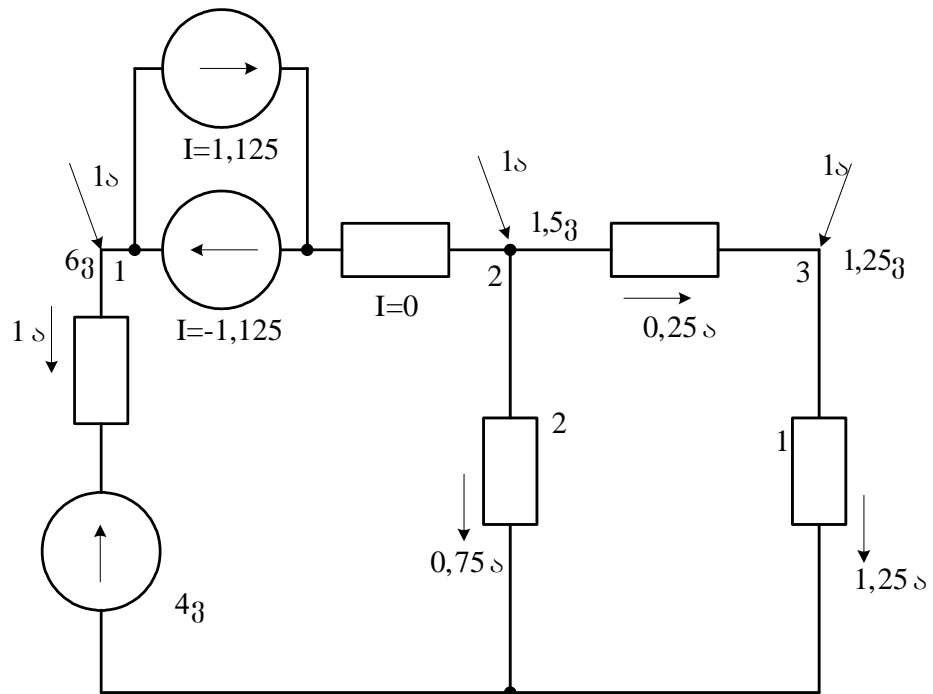
ნახ.18-ზე წარმოდგენილ ქსელში ძაბვა 1 და 2 კვანძებს შორის (ანუ ხაზის გაწვევების ადგილას) არის $\Delta U = U_1 - U_2 = 6 - 1,5 = 4,5$ ვ.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, საზის გაწვევების მოდელირება შეიძლება დენის წყაროთი. იმ შტოში, სადაც შემდგომში განიხილება გაწვევბა უნდა ჩავერთოთ იდეალური დენის წყარო, რომელსაც ექნება საწყისი დენის ტოლი $I=1.125$ და საწინააღმდეგოდ მიმართული დენი.

აგარიული დენები შტოებში მიიღება დენების აგარიული მდგენელებისა (ნახ.19) და საწყისი რეჟიმის (ნახ.16 ა) დენების სუპერპოზიციის შედეგად (ნახ.20).



ნახ.19



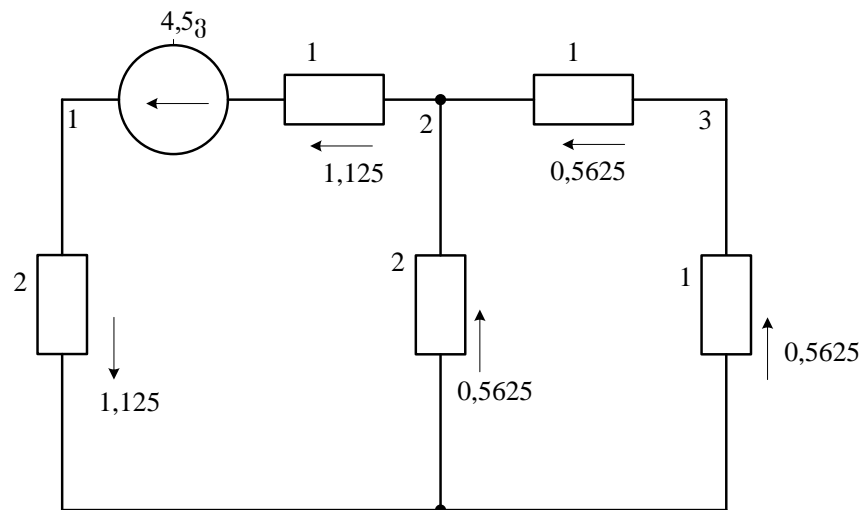
ნახ.20

ნახ.20-დან ჩანს, რომ მე-4-ე შტოში დენი ტოლია ნულის, ხოლო ძაბვა გაწვევების ადგილას: $\Delta U = 6 - 1,5 = 4,5$ ვ, რაც ემთხვევა ნახ.18-ზე მოყვანილ სიდიდეებს.

თუ გვინდა ხაზის გაწვევების მოდელირება ძაბვის წყაროთი, რომელსაც როგორც უკვე აღვნიშნეთ, აქვს გარკვეული უპირატესობა დენის წყაროებით მოდელირებასთან შედარებით, უნდა განვსაზღვროთ ავარიული შტოს საკუთარი გამტარობა ანუ გამტარობა გაწვევების ადგილას მიღებულ კვანძებს შორის.

განხილული სქემისათვის ეს სიდიდე იქნება $Y_{44} = 0,25$, ხოლო $Y_{44} \cdot \Delta U_4 = I_4$ საიდანაც $\Delta U_4 = \frac{I_4}{Y_{44}} = \frac{1,125}{0,25} = 4,5$

აქ - ΔU_4 არის ძაბვა გაწვევების ადგილას, I_4 - მე-4 შტოში გამავალი დენი გაწვევებამდე. ანუ ძაბვის წყაროს სიდიდე, რომელიც შექმნის დენების ავარიულ მდგენელებს შტოებში, იქნება 4,5 ვ. საკუთრივ ავარიული დენების მნიშვნელობა შტოებში იქნება დენების ავარიული მდგენელებისა (ნახ.21) და საწყისი რეჟიმის დენების (ნახ.16) ზედღების შედეგი.

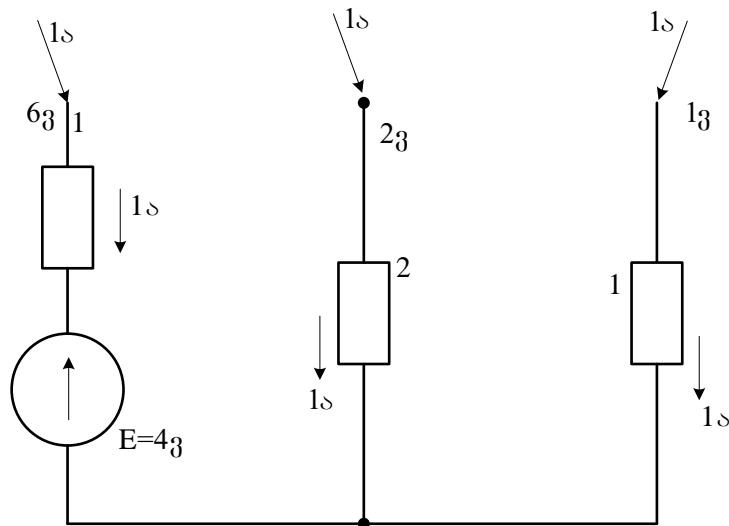


ნახ.21

ფიზიკურ მოდელებში იდეალური დენის წყაროს შეცვლა იდეალური ძაბვის წყაროთი, ან პირიქით, იწვევს შესაბამისი განტოლებების კოეფიციენტთა მატრიცის შებრუნებას. ვინაიდან ძაბვის წყაროს დენის წყაროთი შეცვლა გამოიწვევს შესაბამისი შტოების გახსნას და დენის წყაროს ძაბვის წყაროთი შეცვლა კი გახსნილი

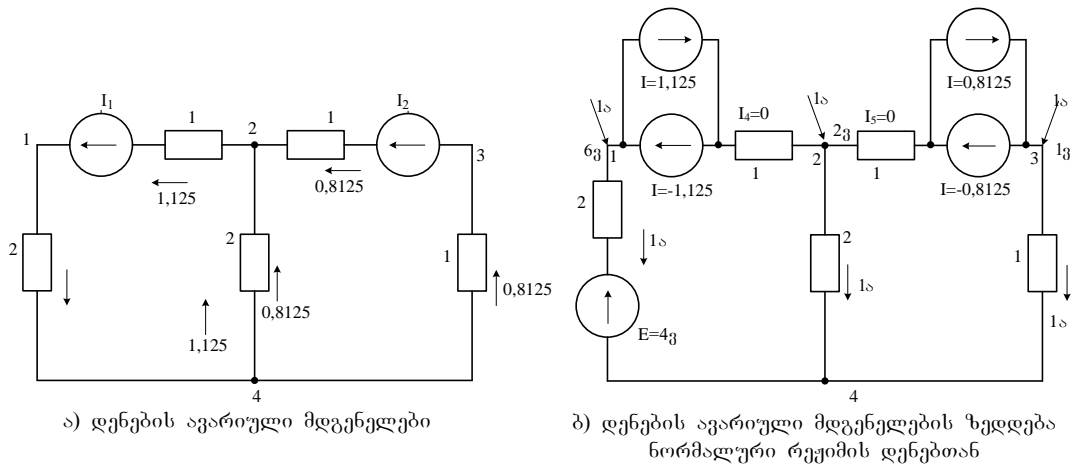
შტოების შეერთებას, რაც დასტურდება მოყვანილი მაგალითით. მეორე მოდელის გამოყენების დროს დაზიანების ადგილისა და რაოდენობის მიხედვით არ იცვლება შესაბამისი განტოლებების კოეფიციენტები, ანუ პასიური სქემის პარამეტრები. რაც წარმოადგენს ამ მოდელის უპირატესობას პირველთან შედარებით.

პირველი მოდელის შემთხვევაში, იმ შტოს, სადაც გვაქვს გაწყვეტა, შესაბამისი პარამეტრის მექანიკურად ამოშლა მატრიციდან, როგორც ამას ადგილი ჰქონდა მეორე მოდელის შემთხვევაში, ვერ მოხერხდება. ამ შემთხვევაში (3.2.1) ტოლობიდან ის ცვლადები, ანუ იმ შტოს დენები, სადაც არა აქვს ადგილი გაწყვეტას, უნდა გამოირიცხოს გაუსის მეთოდით, რაც გულისხმობს ყველა დარჩენილი ელემენტის (კოეფიციენტებისა და თავისუფალი წევრების) გადაანგარიშებას.



ნახ.22 ელ. რეჟიმი მე-4 და მე-5 შტოების გაწყვეტის შემთხვევაში

განვიხილოთ ერთდროული დაზიანება ორ შტოში. ნახ.22-ის მე-4 და მე-5 შტოებში ადგილი აქვს გაწყვეტას. ჯერ მოვახდინოთ გაწყვეტის მოდელირება დენის წყაროებით. დენის წყაროს დენის სიდიდე უნდა უდრიდეს ავარიულ დენს განხილულ შტოში და იყოს მიმართული საპირისპიროდ. ვიანგარიშოთ ავარიული მდგენელები (ნახ.23 ა) და შემდეგ მოვახდინოთ საწყის რეჟიმზე (ნახ. 16 ბ) ზედდება. მივიღებთ ავარიული რეჟიმის დროს დენების მნიშვნელობებს შტოებში (ნახ.23 ბ).

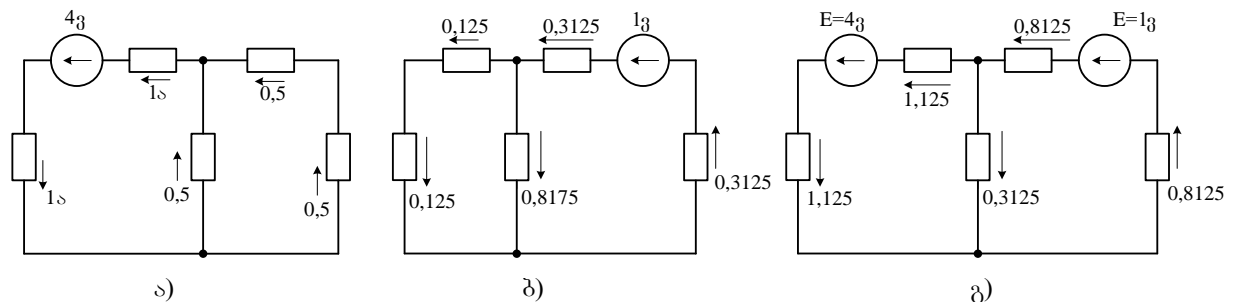


ნახ.23 მე-4 და მე-5 შტოებში ერთდროული დაზიანების შემთხვევა

ნახ.23 ბ-ზე მიღებული ელ. რეჟიმი ანუ დენის წყაროების ჩართვით მიღებული რეჟიმი ემთხვევა ელ. რეჟიმს, რომელიც მიიღება მე-4 და მე-5 შტოების გამორთვით. ამ შემთხვევაში ცნობილია დენის წყაროს სიდიდე, რომლითაც ხდება ავარიის მოდელირება (იგი უდრის ავარიამდელი დენის მნიშვნელობას) და უცნობია ავარიული რეჟიმის შესაბამისი სქემის პასიური პარამეტრების მნიშვნელობა, რომელიც უნდა განისაზღვროს დაზიანებების ადგილმდებარეობისა და რაოდენობის შესაბამისად. ძაბვის წყაროებით მოდელირების შემთხვევაში კი პირიქით, უცვლელია სქემის პარამეტრები (ძაბვის წყაროების ნულვანი წინაღობის გამო) და საძიებელია ძაბვის მნიშვნელობები.

განვიხილოთ ორ ადგილას გაწყვეტის მოდელირება ძაბვის წყაროებით.

ჩავრთოთ გაწყვეტის ადგილას ძაბვების ტოლი ნახ.22-ის იდეალური ძაბვის წყაროები მე-4 და მე-5 შტოებში. ამ ძაბვის წყაროებით მიღებული ელ. რეჟიმი წარმოდგენილია ნახ.24 ა, ბ-ზე.



ნახ.24 დენების ავარიული მდგენელები

დენის წყაროების ჩართვით მიღებული მოდელის შესაბამისი მათემატიკური მოდელი დაუკავშიროთ ძაბვის წყაროების ჩართვით მიღებული მოდელის შესაბამის განტოლებებს.

პირველ შემთხვევაში, როდესაც ქორდებად არჩეული გვექონდა მე-4 და მე-5 შტოები, სისტემის მდგომარეობის აღმწერ განტოლებად, ანუ მათემატიკურ მოდელად ავირჩიეთ კონტურულ დენთა განტოლება:

$$\begin{cases} Z_{44} \cdot I_4 + Z_{45} \cdot I_5 = U_4 \\ Z_{54} \cdot I_4 + Z_{55} \cdot I_5 = U_5 \end{cases} \text{ ანუ } \begin{bmatrix} Z_{44} & Z_{45} \\ Z_{54} & Z_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_4 \\ U_5 \end{bmatrix}$$

სადაც $[Z]$ არის კონტურულ წინაღობათა მატრიცა.

აღნიშნული მაგალითისათვის ამ განტოლებას ექნება სახე:

$$\begin{bmatrix} 5 & -2 \\ -2 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_4 \\ U_5 \end{bmatrix}$$

თუ შევიტანთ I_4 და I_5 დენების მნიშვნელობებს, რაც განისაზღვრება ავარიამდელი დენების მნიშვნელობის მიხედვით ანუ

$$I_4 = 1,125, \quad I_5 = 0,8125, \quad \text{მივიღებთ: } \begin{bmatrix} 5 & -2 \\ -2 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1,125 \\ 0,8125 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_4 \\ U_5 \end{bmatrix} \quad \text{და}$$

$$\begin{cases} 5 \cdot 1,125 - 2 \cdot 0,8125 = 4 \\ -2 \cdot 1,125 + 4 \cdot 0,8125 = 1 \end{cases} \text{ ანუ } U_4 = 4, \quad U_5 = 1$$

რაც ემთხვევა (ნახ. 23) წარმოდგენილ რეჟიმს.

ზოგადად სქემა შეიძლება განხილული იქნეს, როგორც ხეში შემავალი შტოებისა და ქორდების ერთობლიობა. თუ ყველა ქორდის გაწყვეტის მოდელირებას ვახდენთ დენის წყაროებით, შესაბამისი კოეფიციენტების მატრიცა იქნება კონტურების საკუთარი და ურთიერთწინააღობების მატრიცა. თუ რომელიმე ქორდა არ გვაქვს გაწყვეტილი კონტურული განტოლებებიდან უნდა გამოირიცხოს იმ კონტურის კონტურული დენი, სადაც არ გვაქვს გაწყვეტა. გამოირიცხვა იგულისხმება გაუსის მეთოდით, როდესაც წრფივ განტოლებათა სისტემა დაიყვანება ერთი რიგით ნაკლებ სისტემაზე. ჩვენი მაგალითის შემთხვევაში როდესაც არ გვაქვს გაწყვეტა მე-5 შტოში, მაშინ განტოლებებიდან გამოირიცხება გაუსის მეთოდით I_5 დენი და მივიღებთ:

$$\left(Z_{44} - \frac{Z_{45} \cdot Z_{54}}{Z_{55}} \right) I_4 = U_4 - \frac{Z_{45} \cdot Z_{54}}{Z_{55}} \quad (3.5.1)$$

აქ $U_5 = 0$ რადგანაც მე-5 შტოში არ გვაქვს გაწყვეტა.

შევიტანოთ რიცხვითი მნიშვნელობები და გვექნება:

$$\left(5 - \frac{2 \cdot 2}{4}\right) \cdot 1,125 = (5 - 1) \cdot 1,125 = 4 \cdot 1,125 = 4,5 \text{ გ.}$$

რაც ემთხვევა ნახ.20-ზე წარმოდგენილ რეჟიმს სადაც გვაქვს გაწვევა მხოლოდ მე-4 შტოში, ანალოგიურად მივიღებთ ძაბვის მნიშვნელობას მხოლოდ მე-5 შტოს გაწვევის დროს (ნახ. 25):

$$\left(Z_{55} - \frac{Z_{45} \cdot Z_{54}}{Z_{44}}\right) I_5 = 3,2 \cdot 0,8125 = 2,6 \text{ გ.}$$

ამგვარად, თუ გვაქვს წინასწარ გაანგარიშებული კონტურულ წინაღობათა მატრიცა და გვინდა გავიანგარიშოთ რამოდენიმე შტოში (ქორდაში) გაწვევის არსებობის დროს ძაბვის მნიშვნელობა, შესაბამისი განტოლებების კოეფიციენტების მატრიცა მიიღება კონტურულ წინაღობათა მატრიცის გაუსის მეთოდით გადაანგარიშების შედეგად.

განვიხილოთ ხაზის გაწვევის მოდელირება ძაბვის წყაროების ჩართვით.

სისტემის მდგომარეობის აღმწერ განტოლებას ექნება სახე:

$$\begin{bmatrix} Y_{44} & Y_{45} \\ Y_{54} & Y_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_4 \\ U_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} \quad \begin{cases} Y_{44} \cdot U_4 + Y_{45} \cdot U_5 = I_4 \\ Y_{54} \cdot U_4 + Y_{55} \cdot U_5 = I_5 \end{cases}$$

აქ მატრიცა Y - ქორდების საკუთარი და ურთიერთგამტარობების მატრიცა წარმოადგენს აღნიშნული ქორდების შესაბამისი კონტურების საკუთარი და ურთიერთწინააღობების მატრიცის შებრუნებულ მატრიცას.

$$Y = Z^{-1} = \begin{bmatrix} 5 & -2 \\ -2 & 4 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 0,25 & 0,125 \\ 0,125 & 0,3125 \end{bmatrix}$$

შევიტანოთ რიცხვითი მნიშვნელობები და ამოვხსნათ მე-2 მოდელის შესაბამისი განტოლებები:

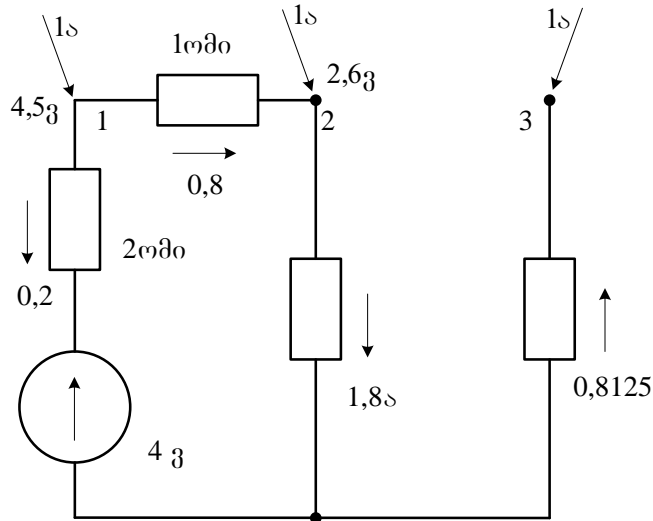
$$\begin{cases} 0,25 \cdot U_4 + 0,125 \cdot U_5 = 1,125 \\ 0,125 \cdot U_4 + 0,3125 \cdot U_5 = 0,8125 \end{cases} \quad (3.5.4)$$

საიდანაც $U_4 = 4$ და $U_5 = 1$

განვიხილოთ ხაზის გაწვევა მხოლოდ მე-4 შტოში, გვექნება: $0,25U_4 = 1,125$ და $U_4 = \frac{1,125}{0,25}$, საიდანაც $U_4 = 4,5$

მიღებული სიდიდის მნიშვნელობა ემთხვევა ძაბვას მე-4 შტოს გაწვევის ადგილას.

მხოლოდ მე-5 შტოს გაწვევების შემთხვევაში ავარიული ძაბვის მნიშვნელობა განისაზღვრება შემდეგნაირად: $0,3125U_5 = 0,8125$
 საიდანაც $U_5 = \frac{0,8125}{0,3125} = 2,6$



ნახ.25

ძაბვის წყაროებით მოდელირებას აქვს უპირატესობა დენის წყაროებით მოდელირებასთან შედარებით, ვინაიდან ნებისმიერი დაზიანების შემთხვევაში უცნობების დამაკავშირებელი კოეფიციენტების მატრიცის (შტოების საკუთარი და ურთიერთგამტარობების) ელემენტები რჩებიან უცვლელი და შეესაბამებინ საწყისი სქემის პარამეტრებს. ყოველი კონკრეტული სიტუაციისათვის ელემენტების ამორჩევა ხდება საწყისი სქემის შესაბამისი მატრიციდან.

დენის წყაროებით მოდელირებისას საჭირო ხდება გაუსის მეთოდით კონტურულ წინაღობათა მატრიცის გადაანგარიშება გაწვევების სხვადასხვა კომბინაციის შესაბამისად.

თავი IV

ენერგოსისტემის ნორმალური რეჟიმის პარამეტრების

განგარიშების ალგორითმები

4.1 ნორმალური რეჟიმის პარამეტრების განგარიშება განივი

განზოგადებული პარამეტრების საშუალებით

განვიხილოთ ენერგოსისტემის ნორმალური რეჟიმის პარამეტრების განგარიშება კვანძური განტოლებების საფუძველზე, როდესაც მოცემულია კვანძური დენები. ამისათვის განვიხილოთ მათემატიკური მოდელი, რომელიც ეფუძნება კვანძური ძაბვების განტოლებას:

$$\dot{Y}_{\alpha\beta} (\dot{U}_{\alpha\beta} - U_{\beta}) = \dot{I}_{\alpha\beta}$$

ამ შემთხვევაში ბაზისური ძაბვა არ უდრის ნულს და კვანძური დენი წარმოდგენილია კვანძური სიმძლავრის საშუალებით, ანუ

$$\dot{Y}_{\alpha\beta} \dot{U}_{\alpha\beta} = \left[\frac{S_i^*}{U_i^*} \right] + \dot{U}_{\alpha\beta} U_{\beta} \quad (4.1.1)$$

სადაც $\dot{Y}_{\alpha\beta}$ – არის კვანძების საკუთარი და ურთიერთგამტარობის მატრიცა.

$\dot{U}_{\alpha\beta}$, U_{β} – კვანძური ძაბვებისა და ბაზისური ძაბვების ვექტორმატრიცები.

$\dot{I}_{\alpha\beta} = \left[\frac{S_i^*}{U_i^*} \right]$ – კვანძური დენების ვექტორ-მატრიცა.

(4.1.1) განტოლების ორივე მხარე გავამრავლოთ $\dot{Y}_{\alpha\beta}$ მატრიცის შებრუნებულ მატრიცაზე $-\dot{Z}_{\alpha\beta}$, გვექნება:

$$\dot{Z}_{\alpha\beta} \dot{Y}_{\alpha\beta} \dot{U}_{\alpha\beta} = \dot{Z}_{\alpha\beta} \cdot \left[\frac{S_i^*}{U_i^*} \right] + \dot{Z}_{\alpha\beta} \dot{Y}_{\alpha\beta} \dot{U}_{\beta} \quad (4.1.2)$$

როელი, სხვადასხვა ნომინალური ძაბვის მქონე, სქემის შემთხვევაში U_{β} ვექტორის აგება პირდაპირი სქემის მიხედვით ხდება შემდეგნაირად: ჯერ პირდაპირი სქემიდან განისაზღვრება $\dot{Y}_{\alpha\beta} \cdot U_{\beta}$ ნამრავლი, რომელიც წარმოადგენს ბაზისურ კვანძთან შეერთებული

შტოების გამტარებლობაზე U_{β} დაბვის ნამრავლისაგან შედგენილ ვექტორს, რომელიც შემდგომში გამრავლდება $\dot{Z}_{\beta\beta}$ მატრიცაზე. ამგვარად მიიღება ყველა კვანძისათვის დაბვის ის ნაწილი, რომელიც წარმოადგენს ბაზისურ დაბვას ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის გათვალისწინებით.

$$\text{რადგან: } \dot{Z}_{\beta\beta} \dot{Y}_{\beta\beta} = \dot{Y}_{\beta\beta}^{-1} \dot{Y}_{\beta\beta} = E \text{ ამიტომ (4.12) განტოლება მიიღებს}$$

სახეს:

$$\dot{U}_{\beta\beta} = \dot{Z}_{\beta\beta} \cdot \left[\frac{S_i^*}{U_i^*} \right] + \dot{Z}_{\beta\beta} \dot{Y}_{\beta\beta} U_{\beta} \text{ ანუ } \dot{U}_{\beta\beta} = \dot{Z}_{\beta\beta} \cdot \left[\frac{S_i^*}{U_i^*} \right] + U_{\beta}$$

ბოლო გამოსახულება შეგვიძლია გადავწეროთ მატრიცულად:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \dots & \dot{Z}_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \dot{Z}_{n1} & \dots & \dot{Z}_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{S_1^*}{U_1^*} \\ \dots \\ \frac{S_n^*}{U_n^*} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{\beta} \\ \dots \\ U_{\beta} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

(4.13) განტოლება, როგორც არაწრფივი მატრიცული განტოლება, იხსნება რომელიმე იტერაციული მეთოდით. ჩვენს შემთხვევაში - მარტივი იტერაციის მეთოდით. შემოვიღოთ აღნიშვნა $\dot{I}_i = \frac{S_i^*}{U_i^*}$ და (4.13)

გადავწეროთ შემდეგნაირად:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{Z}_{11}\dot{I}_1 + \dot{Z}_{12}\dot{I}_2 + \dots + \dot{Z}_{1n}\dot{I}_n + U_{\beta} \\ \dots \\ \dot{U}_n = \dot{Z}_{n1}\dot{I}_1 + \dot{Z}_{n2}\dot{I}_2 + \dots + \dot{Z}_{nn}\dot{I}_n + U_{\beta} \end{cases} \quad (4.14)$$

ნულოვან მიახლოებად მივიჩნით კვანძებში ნომინალური დაბვების მნიშვნელობა და პირველი მიახლოება იქნება:

$$\begin{cases} U_1^{(1)} = f(U_1^{(0)}, U_2^{(0)} \dots U_n^{(0)}) \\ \dots \\ U_n^{(1)} = f(U_1^{(0)}, U_2^{(0)} \dots U_n^{(0)}) \end{cases} \quad (4.15)$$

ანალოგიურად i -ური მიახლოება იქნება:

$$\begin{cases} U_1^{(i)} = f(U_1^{(i-1)}, U_2^{(i-1)} \dots U_n^{(i-1)}) \\ \dots \\ U_n^{(i)} = f(U_1^{(i-1)}, U_2^{(i-1)} \dots U_n^{(i-1)}) \end{cases} \quad (4.16)$$

იტერაციული პროცესი წყდება მაშინ, როდესაც სხვაობა ორ მომდევნო მიახლოებას შორის იქნება ნაკლები წინასწარ აღებულ

მცირე რიცხვზე ε , რომელიც თავის მხრივ განისაზღვრება სასურველი სიზუსტის მიხედვით.

$$\text{ამგვარად, თუ: } \begin{cases} |\dot{U}_1^{(i)} - \dot{U}_1^{(i-1)}| < \varepsilon \\ |\dot{U}_2^{(i)} - \dot{U}_2^{(i-1)}| < \varepsilon \\ \dots \\ |\dot{U}_n^{(i)} - \dot{U}_n^{(i-1)}| < \varepsilon \end{cases} \text{ — იტერაციული პროცესი}$$

წდება და მიღებული ბოლო მიახლოება იქნება ამონახსნი, ანუ კვანძური ძაბვების მნიშვნელობა.

კომპიუტერზე პრაქტიკული რეალიზაციისათვის საჭიროა აღნიშნულ ალგორითმში გარკვეული ცვლილებებისა და დამატებების შეტანა, რომელიც საშუალებას მოგვცემს გადავწყვიტოთ როგორც რთული ენერგოსისტემისათვის დამახასიათებელი პრობლემების, ასევე გარკვეული ალგორითმული სირთულეები დაკავშირებული რთული დიდი განზომილების მქონე ქსელურ ამოცანებთან.

პირველ რიგში ეს ეხება გენერატორულ საღტეებზე ძაბვის რეგულირების პრობლემას და დატვირთვების სტატიური მახასიათებლების გათვალისწინებას. ეფექტური პროგრამების შესაქმნელად საჭიროა ასევე შესაფერისი მათემატიკური მეთოდის შერჩევა.

$$\text{იტერაციული პროცესის რეალიზაციისათვის (4.1.4)}$$

კომპლექსურსიდიდებიანი განტოლება იშლება ორ განტოლებათა სისტემად ნამდვილი და კომპლექსური სიდიდეებისთვის:

$$\begin{bmatrix} G_{11} & \dots & G_{1n} & -B_{11} & \dots & -B_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ G_{n1} & \dots & G_{nn} & -B_{n1} & \dots & -B_{nn} \\ B_{11} & \dots & B_{1n} & G_{11} & \dots & G_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{n1} & \dots & B_{nn} & G_{n1} & \dots & G_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U'_1 \\ \dots \\ U'_n \\ U''_1 \\ \dots \\ U''_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} IA_1 \\ \dots \\ IA_n \\ IR_1 \\ \dots \\ IR_n \end{bmatrix}$$

(4.1.2) მატრიცული განტოლება წარმოადგინოთ ორ განტოლებათა სისტემად დენის ნამდვილი და წარმოსახვითი ნაწილისათვის:

$$\begin{cases} G_{11}U'_1 + G_{12}U'_2 + \dots + G_{1n}U'_n - B_{11}U''_1 - B_{12}U''_2 - \dots - B_{1n}U''_n = IA_1 \\ \dots \\ G_{n1}U'_1 + G_{n2}U'_2 + \dots + G_{nn}U'_n - B_{n1}U''_1 - B_{n2}U''_2 - \dots - B_{nn}U''_n = IA_n \\ B_{11}U'_1 + B_{12}U'_2 + \dots + B_{1n}U'_n + G_{11}U''_1 + G_{12}U''_2 + \dots + G_{1n}U''_n = IR_1 \\ \dots \\ B_{n1}U'_1 + B_{n2}U'_2 + \dots + B_{nn}U'_n + G_{n1}U''_1 + G_{n2}U''_2 + \dots + G_{nn}U''_n = IR_n \end{cases}$$

კვანძური დენების ვექტორ მატრიცა დავშალოთ ორ ვექტორად: (ვწერთ ვექტორს i -ური კომპონენტისათვის):

$$\frac{S_i^*}{U_i^*} = \frac{(P_i - jQ_i) \cdot (U'_i + jU''_i)}{(U'_i - jU''_i) \cdot (U'_i + jU''_i)} = \frac{(PU'_i + QU''_i) + j(PU'_i - QU''_i)}{(U'_i)^2 + (U''_i)^2} = IA + jIR$$

სადაც:

$$\begin{cases} IA = \frac{(PU'_i - QU''_i)}{U_i^2} \\ IR = \frac{(PU''_i - QU'_i)}{U_i^2} \end{cases} \quad (4.1.7)$$

(4.1.7)-ის გათვალისწინებით (4.1.4) განტოლებათა სისტემის i -ური განტოლება წარმოვადგინოთ (ნამდვილი და წარმოსახვითი ნაწილები) შემდეგნაირად:

$$\begin{aligned} U'_i &= Y'_{i1}IA_1 - Y''_{i1}IR_1 + \dots + Y'_{in}IA_n - Y''_{in}IR_n + U_\delta \\ U''_i &= Y''_{i1}IA_1 - Y'_{i1}IR_1 + \dots + Y''_{in}IA_n - Y'_{in}IR_n + U_\delta \end{aligned}$$

გენერატორულ საღტეებზე ძაბვის რეგულირების მიზნებისათვის იტერაციის ყოველ ბიჯზე მოწმდება პირობა:

$$U_i < 1,03 \cdot U_i^{\text{მოც}} \text{ ან } U_i > 0,97 \cdot U_i^{\text{მოც}} \quad (4.1.8)$$

სადაც $U_i^{\text{მოც}}$ არის სასურველი ძაბვა i -ური გენერატორის საღტეზე, რომელიც განისაზღვრება საწყისი მონაცემებით

$$\text{ზემოთქმულის გათვალისწინებით} \quad (4.1.1) \quad \text{გადავწერთ}$$

შემდეგნაირად:

$$[U_i^*]^{-1} \cdot \dot{Y}_{33}(\dot{U}_{33} - U_\delta) = \dot{U}_i \cdot U_i^{-1}[S_i^*] \quad (4.1.9)$$

სადაც $[U_i^*]$ - n რიგის დიაგონალური მატრიცაა.

(4.1.8) და (4.1.9) პირობის შესრულების შემთხვევაში განისაზღვრება რეაქტიული სიმძლავრე ტოლობიდან:

$$[U_i^*]^{-1} \cdot \dot{Y}_{\mathcal{B}}(\dot{U}_{\mathcal{B}} - U_{\mathcal{B}}) = [P_i - jQ_i],$$

თუ $Q_i > Q_{max}$, მაშინ (4.1.7) გამოსახულებაში $Q_i = Q_{max}$,

თუ $Q_i < Q_{max}$ მაშინ (4.1.7) გამოსახულებაში $Q_i = Q_{max}$,

იტერაციული პროცესი გრძელდება რეაქტიული სიმძლავრის კორექტირების პირობებში.

კვანძური ძაბვების განსაზღვრის შემდეგ დენებისა და შემდგომ სიმძლავრეების განაწილება ქსელში სირთულეს აღარ წარმოადგენს.

4.2 რეჟიმის პარამეტრების განსაზღვრა გრძივი განზოგადებული პარამეტრების საშუალებით

(2.3.1) განტოლებებიდან მივიღეთ გამოსახულება, რომელიც იძლევა საშუალებას გავიანგარიშოთ რეჟიმის პარამეტრები, როდესაც მოცემულია შტოებში ჩართული ე.მ.ძ. დენების პოვნა შტოებში მოხდება (4.2.1) განტოლებით:

$$\left[Y_{\mathcal{L}} - [Y_{\mathcal{L}} M^T] [M Y_{\mathcal{L}} M^T]^{-1} [M Y_{\mathcal{L}}] \right] E_{\mathcal{B}} = I_{\mathcal{B}} \quad (4.2.1)$$

თუ მოცემულია შტოებში ჩასმული ე.მ.ძ. და კვანძური დენები, გაანგარიშებებს ვაწარმოებთ შემდეგი გამოსახულების მიხედვით:

$$\left[Y_{\mathcal{L}} - [Y_{\mathcal{L}} M^T] [M Y_{\mathcal{L}} M^T]^{-1} [M Y_{\mathcal{L}}] \right] E_{\mathcal{B}} = I_{\mathcal{B}} - [Y_{\mathcal{L}} M^T] [M Y_{\mathcal{L}} M^T]^{-1} I_{\mathcal{B}} \quad (4.2.2)$$

ამგვარად, ნორმალური რეჟიმის აქტიურ პარამეტრებს, ანუ ავარიული რეჟიმის გასაანგარიშებლად საწყის სიდიდეებს განვსაზღვრავთ (4.1.2), (4.2.1), ან (4.2.2) განტოლებებიდან. დენების ავარიული მდგენელების განმსაზღვრელი მოდელის მათემატიკური ასახვა იქნება მატრიცული განტოლება (4.2.1), ანუ ხაზების გაწყვეტის შედეგად დამყარებული რეჟიმის ასაღწერად ვირჩევთ (4.2.1) განტოლებას, სადაც საძიებელი ავარიული პარამეტრები აისახება $U_{\mathcal{B}}$ ვექტორის სახით, ხოლო საწყისი მონაცემები, ანუ ავარიამდელი დენების მნიშვნელობა იმ ხაზებში, სადაც ადგილი აქვს დაზიანებას იქნება ვექტორ-მატრიცა $I_{\mathcal{B}}$. აღნიშნული ვექტორის ის ელემენტები, რომელთა ინდექსები შეესაბამება დაზიანებული შტოების ნომრებს

იქნება ავარიამდელი დენების ტოლი, ხოლო დანარჩენი ელემენტები – დენის ავარიული მდგენელები შტოებში. მატრიცის ყველა ელემენტი, გარდა იმ ელემენტებისა, რომლებიც შეესაბამებიან ძაბვებს გაწვევების ადგილას, იქნება ნულის ტოლი.

(4.2.1) განტოლების მიხედვით, შტოების საკუთარი და ურთიერთგამტარობის მატრიცა $Y_{\mathcal{S}}$ აისახება ფორმულით:

$$Y_{\mathcal{L}} - [Y_{\mathcal{L}} M^T] [M Y_{\mathcal{L}} M^T]^{-1} [M Y_{\mathcal{L}}] = Y_{\mathcal{S}} \quad (4.2.3)$$

თავი V

გრძივი ასიმეტრიის დროს მიღებული რეჟიმების ანალიზი განსაკუთრებული ფაზის სიმეტრიული მდგენელების საშუალებით

5.1 სიმეტრიულ მდგენელთა მეთოდის გამოყენება არასიმეტრიული რეჟიმების ანგარიშის დროს

ელექტროდანადგარების უმრავლესობა მუშაობს სიმეტრიულ რეჟიმებში. ამ წრედებში მკვეთრი ასიმეტრია ატარებს ავარიულ ხასიათს და წარმოიშვება, როგორც წესი, ერთ რომელიმე კვეთში. ასხვაგვარ ასიმეტრიის ორ სახეს: განივი და გრძივი ასიმეტრია.

განივი ასიმეტრია წარმოიშვება იმ შემთხვევებში, როდესაც ფაზებს და ნეიტრალს (მიწას) ან ცალკეულ ფაზებს შორის ჩაირთვებიან ერთმანეთის არატოლი წინაღობები. ელექტროდანადგარებში განივი ასიმეტრიის ყველაზე გავრცელებული შემთხვევები არის ერთი ან ორი ფაზის მიწაზე, ან ფაზების ერთმანეთთან მოკლე შერთვით გამოწვეული ასიმეტრია. ფაზათა შორის მოკლე შერთვები (ორფაზა და სამფაზა) წარმოიშვებიან ქსელებში, როგორც დამიწებული, ისე იზოლირებული ნეიტრალით. ერთფაზა მოკლე შერთვები შესაძლებელია იყოს მხოლოდ ქსელებში დამიწებული ნეიტრალით.

გრძივი ასიმეტრია წარმოიშვება იმ შემთხვევაში, როცა ფაზის ხაზის გაკვეთაში ირთვებიან ერთმანეთის არატოლი წინაღობები. გრძივ ასიმეტრიას ეკუთვნის ერთი ან ორი სადენის გაწყვეტა.

ასიმეტრიის ადგილზე ძაბვები და დენები დაკავშირებულია ერთმანეთთან განსაზღვრული შეფარდებებით. ამ შეფარდებებს შესაძლებელია ეწოდოს ასიმეტრიის ადგილზე სასაზღვრო პირობები. განვიხილოთ ისინი სხვადასხვა შემთხვევისთვის.

სისტემაში არასიმეტრიული რეჟიმების ანგარიში რთულ ამოცანას წარმოადგენს. იმისათვის, რომ ეს ამოცანა გადაწყვეტილი იყოს უფრო მარტივად, არსებობს ხელოვნური მეთოდი, რომელსაც სიმეტრიულ მდგენელთა მეთოდსაც უწოდებენ.

ნებისმიერი სამი ვექტორისაგან შემდგარი არასიმეტრიული სისტემა შეიძლება ცალსახად დაიშალოს სამ სიმეტრიულ სისტემად: პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის სისტემებად - $F'_a, F'_b, F'_c, F''_a, F''_b, F''_c$ და F_a^0, F_b^0, F_c^0 .

$$\begin{cases} F_a = F_{a1} + F_{a2} + F_{a0} \\ F_b = F_{b1} + F_{b2} + F_{b0} \\ F_c = F_{c1} + F_{c2} + F_{c0} \end{cases} \quad (5.1.1)$$

ვექტორთა სისტემები შეიძლება იყოს ფაზური ძაბვის და დენის ვექტორთა სისტემები. აღნიშნულ დებულებას თუ დავუკავშირებთ სამფაზა ელექტრულ ქსელს, შეიძლება ვთქვათ, რომ ნებისმიერი არასიმეტრიული ელექტრული რეჟიმი შეიძლება წარმოვადგინოთ, როგორც სამი სიმეტრიული ელექტრული რეჟიმის ზედდება. (5.1.1) ტოლობები სამართლიანი იქნებიან ფაზური დენებისა და ძაბვებისათვის.

$$\begin{cases} \dot{I}_a = \dot{I}'_a + \dot{I}''_a + \dot{I}_a^0 \\ \dot{I}_b = \dot{I}'_b + \dot{I}''_b + \dot{I}_b^0 \\ \dot{I}_c = \dot{I}'_c + \dot{I}''_c + \dot{I}_c^0 \end{cases} \quad \text{და} \quad \begin{cases} \dot{U}_a^{\text{ფ}} = \dot{U}'_a + \dot{U}''_a + \dot{U}_a^0 \\ \dot{U}_b^{\text{ფ}} = \dot{U}'_b + \dot{U}''_b + \dot{U}_b^0 \\ \dot{U}_c^{\text{ფ}} = \dot{U}'_c + \dot{U}''_c + \dot{U}_c^0 \end{cases}$$

სიმეტრიულ სისტემაში ვექტორების ჯამი უდრის ნულს $F_A + F_B + F_C = 0$ შემოდებულია ფაზის ოპერატორი \mathbf{a} , რომელიც წარმოადგენს ვექტორს, რომლის არგუმენტი უდრის 120° , მოდული კი - ერთს. ნებისმიერი ვექტორის \mathbf{a} -ზე გამრავლების შემთხვევაში ხდება ამ ვექტორის შემობრუნება 120° -ით საათის საწინააღმდეგო მიმართულებით. მისი მნიშვნელობა განისაზღვრება შემდეგნაირად ვექტორი \mathbf{a} დავამთხვიოთ ნამდვილ რიცხვთა ღერძს და შემდეგ შემოვაბრუნოთ 120° -ით.

$$X = |a| \cdot \sin 30^\circ; \quad \text{და რაკი } |a| = 1 \quad x = \sin 30^\circ = \frac{1}{2};$$

$$Y = |a| \cdot \cos 30^\circ = \sqrt{1 - \frac{1}{4}} = \frac{\sqrt{3}}{2}; \quad a = -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ} = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^3 = 1$$

$$a^2 + a + 1 = 0$$

რადგანაც დენისა და ძაბვის მდგენელები (პირდაპირი, უკუ-ნულოვანი) წარმოადგენენ სიმეტრიულ სისტემებს, ფაზურ დენებს (ძაბვებს) შორის ძვრის კუთხე არის 120° , ხოლო მოდული აქვთ ტოლი. საკმარისია ერთ-ერთი ფაზის დენის (ძაბვის) განსაზღვრა და დანარჩენ ფაზებში მათ მნიშვნელობებს განვსაზღვრავთ ოპერატორ a -ს მეშვეობით.

ე.ი. თუ სიმეტრიულ სისტემაში გვაქვს ერთ-ერთი ფაზური პარამეტრის მნიშვნელობა ჩვენ a ოპერატორის მეშვეობით შეგვიძლია განვსაზღვროთ დანარჩენი ფაზური პარამეტრები. მაგალითად თუ ცნობილია A ფაზის დენი (ძაბვა), B და C ფაზებისათვის შეგვიძლია დავწეროთ:

$$\dot{I}_B = a^2 \cdot \dot{I}_A \text{ და } \dot{I}_C = a \cdot \dot{I}_A$$

$$\dot{U}_B = a^2 \cdot \dot{U}_A \text{ და } \dot{U}_C = a \cdot \dot{U}_A \text{ ანუ ზოგადად - (5.1.2)}$$

$$\dot{F}_B = a^2 \cdot \dot{F}_A; \dot{F}_C = a \cdot \dot{F}_A$$

$$\begin{cases} \dot{F}_A = F_A' + F_A'' + F_A^0 \\ \dot{F}_B = a^2 \cdot F_A' + a \cdot F_A'' + F_A^0 \\ \dot{F}_C = a \cdot F_A' + a^2 \cdot F_A'' + F_A^0 \end{cases} \quad (5.1.3)$$

ვექტორების a ოპერატორის საშუალებით წარმოადგენა მნიშვნელოვნად ამცირებს საძიებელი პარამეტრების რაოდენობას. (5.1.1) და (5.1.2)-ის გათვალისწინებით დავამყაროთ კავშირი ფაზურ პარამეტრებსა და სიმეტრიულ მდგენელებს შორის.

(5.1.3) განტოლებათა სისტემის ამოხსნა იძლევა:

$$\begin{cases} F_A^0 = \frac{1}{3}(\dot{F}_A + \dot{F}_B + \dot{F}_C) \\ F_A' = \frac{1}{3}(\dot{F}_A + a \cdot \dot{F}_B + a^2 \cdot \dot{F}_C) \\ F_A'' = \frac{1}{3}(\dot{F}_A + a^2 \cdot \dot{F}_B + a \cdot \dot{F}_C) \end{cases} \quad (5.1.4)$$

ნულოვანი მიმდევრობის სისტემა წარმოადგენს ერთფაზა სისტემას, ამიტომ არასიმეტრიულ სამფაზა სისტემაში ნულოვანი

მიმდევრობის დაბვა წარმოადგენს ნეიტრალის დაბვას მიწის მიმართ. გაუწონასწორებელ სისტემებში, ანუ სისტემებში სადაც გვაქვს ნულოვანი მიმდევრობის დენები, ფაზური დენების ვექტორული ჯამი უდრის ნულოვანი მიმდევრობის დენის გასამმაგებულ მნიშვნელობას. პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის სქემების პასიური პარამეტრები ზოგადად განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან.

პირდაპირი მიმდევრობის დენი უკავშირდება პირდაპირი მიმდევრობის დაბვას, ომის კანონის საფუძველზე, მხოლოდ პირდაპირი მიმდევრობის სქემაში. ასევე უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის დენები:

$$\begin{cases} \Delta U' = I' \cdot Z' \\ \Delta U'' = I'' \cdot Z'' \\ \Delta U^0 = I^0 \cdot Z^0 \end{cases} \quad (5.1.5) \quad \text{ან} \quad \begin{cases} I' = \Delta U' \cdot Y' \\ I'' = \Delta U'' \cdot Y'' \\ I^0 = \Delta U^0 \cdot Y^0 \end{cases} \quad (5.1.6)$$

სადაც $I', I'', I^0, U', U'', U^0$ – შტოებში გამავალი დენებისა და შესაბამისი დაბვის ვარდნების ვექტორ - მატრიცებია სათანადო მიმდევრობის სქემისათვის $Z', Z'', Z^0, Y', Y'', Y^0$ შტოების წინააღობებისა და გამტარობების მატრიცებია პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის სქემებისათვის. გენერატორებში არსებობს მხოლოდ პირდაპირი მიმდევრობის ე.მ.დ.

ფაზების გაწყვეტის ადგილას დაბვისა და დენის სიმეტრიული მდგენელებისათვის შეიძლება დავწეროთ:

$$\begin{cases} U' = E - I' \cdot Z' \\ U'' = -I'' \cdot Z'' \\ U^0 = -I^0 \cdot Z^0 \end{cases} \quad (5.1.7) \quad \text{ან} \quad \begin{cases} I' = I^N - U' \cdot Y' \\ I'' = -U'' \cdot Y'' \\ I^0 = -U^0 \cdot Y^0 \end{cases} \quad (5.1.8)$$

გრძივი ასიმეტრიის სხვადასხვა შემთხვევისთვის განტოლებები იწერება $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ დაბვებისთვის და $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ დენებისთვის ასიმეტრიის ადგილზე. თუ ფაზის კვეთში ჩართულია წინააღობა, მასზე დაბვა და დენი დაკავშირებულია ომის კანონით. ხაზის გაწყვეტის დროს ამ ფაზის დენი იქნება ნულის ტოლი, გაწყვეტის არარსებობის დროს ასიმეტრიის ადგილზე ნულის ტოლია დაბვა.

არასიმეტრიული უბნის $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ ფაზური დენების და $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ ფაზური დაბვების სიმეტრიული მდგენელების მეთოდის ანგარიშის ალგორითმი იქნება ასიმეტრიის ყველა სახისთვის ერთნაირი:

1) ადგენენ საანგარიშო სქემას, რომელშიც კომპენსაციის თანახმად ხაზის ასიმეტრიულ უბანს ცვლიან ეკვივალენტური წყაროთი არასიმეტრიული U_A, U_B, U_C ძაბვების სისტემით. განივი ასიმეტრიის დროს ეს წყარო ირთვება ფაზების და მიწას შორის, გრძივი ასიმეტრიის დროს – ფაზების კვეთაში.

2) წრედში მოქმედი დენების, ძაბვების, ე.მ.ძ-ის სამფაზა არასიმეტრიულ სისტემებს წარმოადგენენ პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის მდგენელების ჯამით.

3) საწყის წრედს ცვლიან სამი სქემით, სადაც თითოეულში დგას წინაღობა და მოქმედებენ შესაბამისი მიმდევრობის ე.მ.ძ-ები, ძაბვები და დენები. რადგან ეს სქემები იქნებიან სიმეტრიული, საკმარისია ანგარიში ვაწარმოოთ ერთი ფაზისთვის. აქედან გამომდინარე, ანგარიშისთვის ადგენენ ჩანაცვლების სამ ერთფაზიან სქემას: პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის.

4) ჩანაცვლების ერთფაზიან სქემებს გარდაქმნიან უმარტივეს სახეზე. მათთვის კირხჰოფის მეორე კანონით ადგენენ განტოლებებს.

5) ასიმეტრიის ადგილებზე დამატებით ჩაიწერება სასაზღვრო პირობები, მათში ძაბვები და დენები გამოისახება სიმეტრიული მდგენელების საშუალებით.

6) ხსნიან განტოლებათა სისტემას, ანგარიშობენ დენების და ძაბვების სიმეტრიულ მდგენელებს.

5.2 ავარიული რეჟიმის პარამეტრების ანგარიში განსაკუთრებული ფაზის სიმეტრიული მდგენელების საშუალებით

ამგვარად, გრძივი ასიმეტრიის დროს არსებული ელექტრული რეჟიმების ანალიზი შესაძლებელია სიმეტრიული მდგენელების მეთოდის გამოყენებით, რომლის არსიც მდგომარეობს არასიმეტრიული რეჟიმის დაშლაში სამ სიმეტრიულ რეჟიმად, ანუ რეჟიმებად, რომლებიც მყარდება პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის სქემებში და სადაც სამართლიანია სიმეტრიული ქსელებისათვის დადგენილი კანონები. როგორც უკვე აღვნიშნეთ, აქტიური პარამეტრების

ურთიერთდამოკიდებულებების ასაღწერად ქსელის პასიური განივი პარამეტრების ნაცვლად, როგორც [2] ლიტერატურაშია მოცემული, ვიყენებთ გრძივ განზოგადებულ პარამეტრებს და მათი საშუალებით აღვწერთ ძირითად განტოლებებს თითოეული მიმდევრობის სქემისათვის.

ამგვარად (4.2.1) განტოლება უნდა შევადგინოთ თითოეული მიმდევრობის სქემისთვის, ამისათვის უნდა გავიანგარიშოთ შტოების საკუთარი და ურთიერთგამტარობების მატრიცები პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის სქემებისათვის: Y', Y'', Y^0 .

ქსელის განივი განზოგადებული პარამეტრების ნაცვლად როგორც [2] ლიტერატურაშია აღწერილი, ვიყენებთ გრძივ განზოგადებულ პარამეტრებს და შესაბამისად ავარიული რეჟიმების აღმწერი ძირითადი განტოლებები იღებენ სახეს:

$$\begin{cases} I' = I^N - Y' U' \\ I'' = -Y'' U'' \\ I^0 = -Y^0 U^0 \end{cases} \quad (5.2.1)$$

აქ Y', Y'', Y^0 – შტოების საკუთარი და ურთიერთგამტარობებია პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის სქემებში;

$U', U'', U^0, I', I'', I^0$ – ძაბვები და დენებია პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობების სქემებში;

I^N – დენი დაზიანების ადგილას საწყის რეჟიმში.

პირდაპირი და უკუ მიმდევრობის სქემები არ შეიცავენ ნეიტრალური სადენის წინაღობას, რადგან ნულოვან სადენში ამ მიმდევრობის დენები არ გაივლიან (პირდაპირი და უკუ მიმდევრობისათვის $I_A + I_B + I_C = 0$);

ნულოვანი მიმდევრობის სქემა შედგება მიწაზე არასიმეტრიული (ერთფაზა ან ორფაზა) მოკლე შერთვის დროს და აგრეთვე, ერთი ან ორი ფაზის გაწყვეტის დროს. ნულოვანი მიმდევრობის ჩანაცვლების სქემის შედგენა უნდა იწყებოდეს იმ წერტილიდან, სადაც წარმოიშვა ასიმეტრია. იმისათვის, რომ ნულოვანი მიმდევრობის დენების გავლისათვის მივიღოთ ჩაკეტილი წრედი, სქემაში უნდა იყოს, ერთი მაინც, დამიწებული ნეიტრალი;

ნულოვანი მიმდევრობის სქემაში ნეიტრალური სადენის წინაღობა შეიყვანება სამმაგ სიდიდედ. ეს არის დაკავშირებული იმასთან, რომ ნულოვან სადენში გადის სამივე ფაზის I_0 დენები ($I^N = 3I_0$).

წარმოვადგინოთ არასრულფაზა რეჟიმის პარამეტრების ანგარიშის მეთოდი, რომელიც გულისხმობს ავარიული პარამეტრების განსაზღვრას განსაკუთრებული (ორი ფაზის გაწვევების შემთხვევაში იგულისხმება ის ფაზა, რომელიც არ არის გაწვევტილი) ფაზის დენის სიმეტრიული მდგენელების საშუალებით.

ძირითადი განტოლებები გამოვსახოთ ქსელის გრძივი განზოგადებული პარამეტრებით - შტოების საკუთარი და ურთიერთგამტარობებით.

ერთჯერადი დაზიანების შემთხვევაში, დაზიანების ადგილას განსაკუთრებული ფაზებისათვის განვსაზღვროთ პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის ძაბვების მნიშვნელობა.

თუ გენერატორის ე.მ.ძ-ების სისტემა სიმეტრიულია, გენერატორის ფაზური ძაბვა იქნება წარმოდგენილი მხოლოდ პირდაპირი მიმდევრობის სქემაში.

როგორც ცნობილია თითოეული მიმდევრობის სქემისათვის გვაქვს:

$$\begin{cases} I_A^0 = 1/3(I_A + I_B + I_C) \\ I_A' = 1/3(I_A + aI_B + a^2I_C) \\ I_A'' = 1/3(I_A + a^2I_B + aI_C) \end{cases} \quad (5.2.2) \quad \text{და} \quad \begin{cases} U_A^0 = 1/3(U_A + U_B + U_C) \\ U_A' = 1/3(U_A + aU_B + a^2U_C) \\ U_A'' = 1/3(U_A + a^2U_B + aU_C) \end{cases} \quad (5.2.3)$$

(5.2.3) გამოსახულებით ე.მ.ძ-ების არასიმეტრიული სისტემა იშლება სიმეტრიულ მდგენელებად და შედის ყოველი მიმდევრობის ჩანაცვლების სქემაში;

ვინაიდან კონკრეტულ დაზიანებას ახასიათებს გარკვეული სასაზღვრო პირობა და კერძოდ, ერთი ფაზის გაწვევების შემთხვევაში გვაქვს ტოლობა:

$$\begin{cases} I_A = 0 \\ U_B = 0 \\ U_C = 0 \end{cases} \quad (5.2.4)$$

(5.2.3) და (5.2.4) გამოსახულებების მიხედვით გვექნება:

$$U_A' = U_A'' = U_A^0 = \frac{1}{3}U_A \quad (5.2.5)$$

და რადგანაც $I_A = 0$,

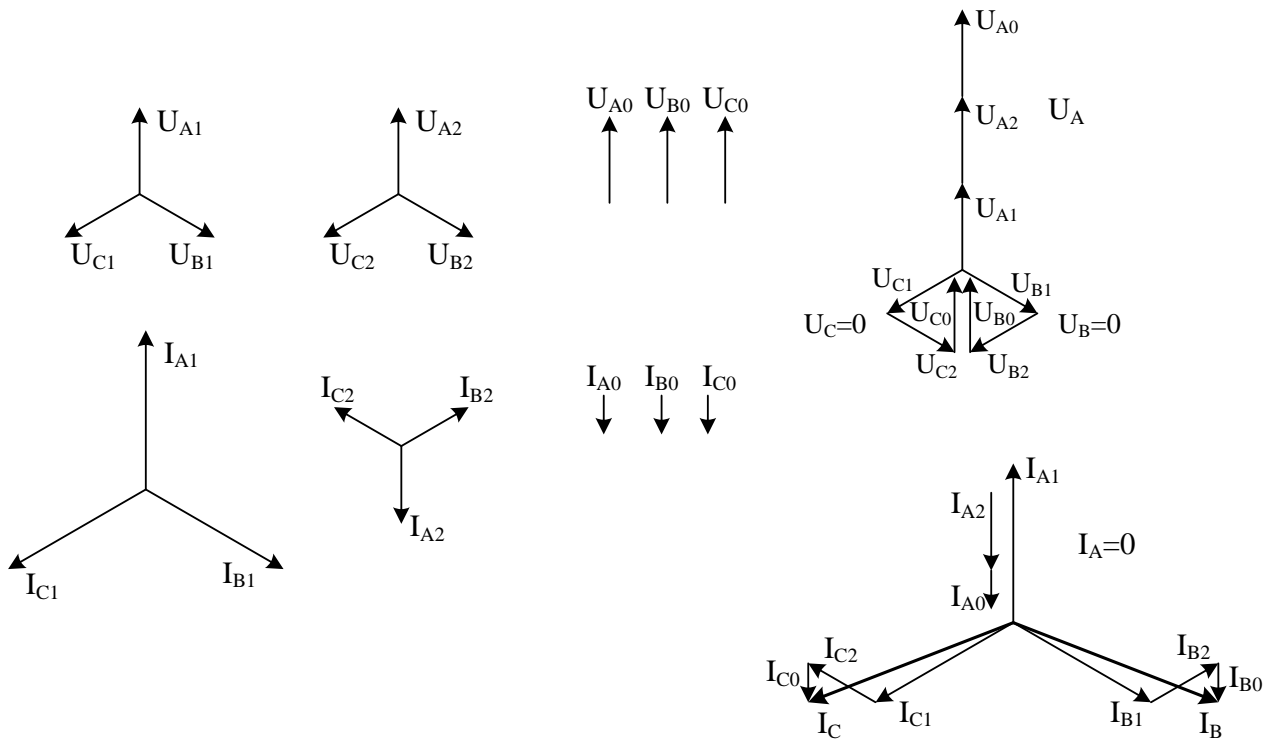
$$I'_A + I''_A + I_A^0 = 0 \quad (5.2.6)$$

(5.2.1) განტოლებების აჯამება (5.2.5) და (5.2.6) პირობების გათვალისწინებით გვაძლევს:

$$U'_A = \frac{I_N}{(Y' + Y'' + Y^0)} \quad (5.2.7)$$

სოლო ფაზური ძაბვა დაზიანების ადგილას იქნება $U_A = 3U'_A$.

A ხაზური სადენის გაწყვეტის განხილული შემთხვევისთვის პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის დენების და ძაბვების ვექტორული დიაგრამები და გაწყვეტის ადგილზე დენების და ძაბვების ვექტორული დიაგრამები ნახვენებია ნახ.26-ზე.



ნახ.26

იმ შემთხვევაში, როცა დატვირთვას არა აქვს კავშირი მიწასთან (დატვირთვა შეერთებულია ვარსკვლავად ნულოვანი სადენის გარეშე ან სამკუთხედად), ნულოვანი მიმდევრობის I_0 დენი იქნება ნულის ტოლი, რადგან მისი ცირკულაციისათვის ჩაკეტილი გზა არ არსებობს და ნულოვანი მიმდევრობის სქემა იქნება განრთული. იმ შემთხვევაში, როცა წრედს არ გააჩნია ნეიტრალური სადენი, ნულოვანი მიმდევრობის I_0 დენებს არა აქვთ ცირკულაციისათვის ჩაკეტილი გზა. აქედან, დატვირთვის შეერთების ვარსკვლავად ნულოვანი სადენის გარეშე ან სამკუთხედად $I_0 = 0$ და ხაზური დენების ანგარიშისთვის ადგენენ

მხოლოდ ორ სქემას: პირდაპირი და უკუ მიმდევრობის. ნულოვანი მიმდევრობის სქემა არ დგება.

ორი ფაზის (B და C ფაზების) გაწვევების შემთხვევაში გვაქვს დუალური ამოცანა, ანუ შემდეგი სასაზღვრო პირობები:

$$\begin{cases} I_B = 0 \\ I_C = 0 \\ U_A = 0 \end{cases} \quad (5.2.8)$$

ზემოთთქმულის ანალოგიურად მივიღებთ შემდეგ ტოლობებს:

$$I'_A = I''_A = I_A^0 = \frac{1}{3 \cdot I_A} \quad (5.2.9) \quad \text{და} \quad U_A = U'_A + U''_A + U_A^0 \quad (5.2.10)$$

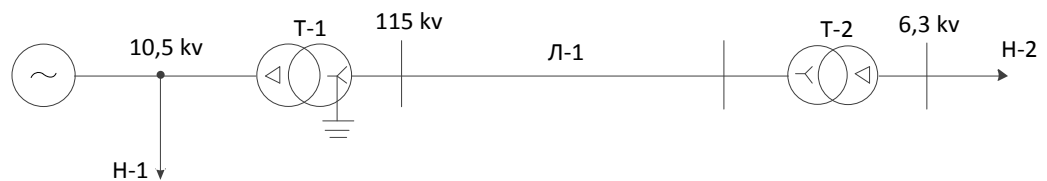
იმისათვის, რომ განვსაზღვროთ ძაბვები დაზიანებულ B და C ფაზებში, საჭიროა ჯერ განვსაზღვროთ A ფაზის პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის ძაბვები და შემდეგ სასაზღვრო პირობების გამოყენებით განვსაზღვროთ საძიებელი ძაბვები.

მივიღებთ:

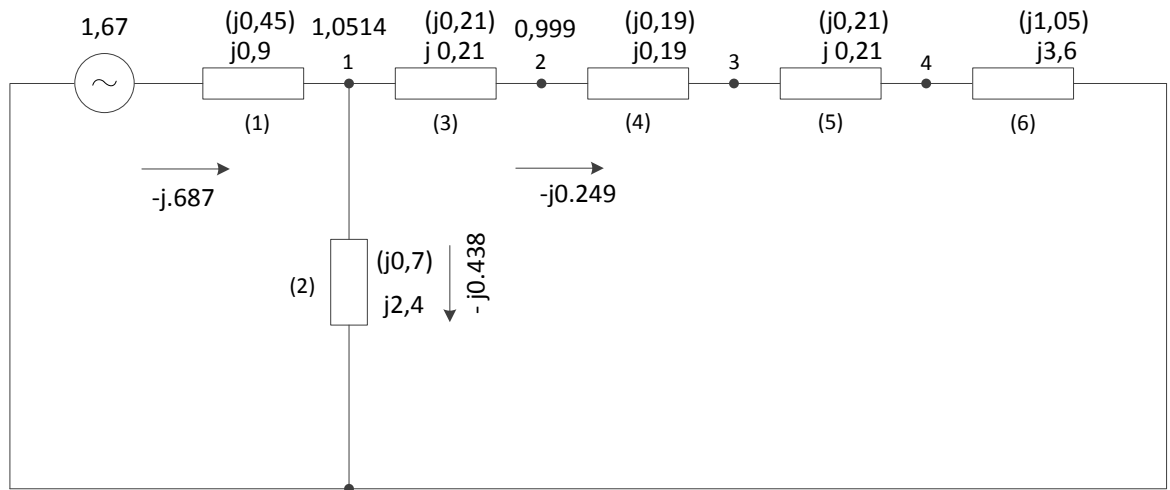
$$U_B^F = a^2 U'_A + a U''_A + U_A^0 = U'_A (a^2 - (aY^0 + Y'') / (Y'' + Y^0)) \quad (5.2.11)$$

$$U_C^F = a U'_A + a^2 U''_A + U_A^0 = U'_A (a - (a^2 Y^0 + Y'') / (Y'' + Y^0)) \quad (5.2.12)$$

განვიხილოთ რიცხვითი მაგალითი, რომელიც წარმოდგენილია ნახ.27-ზე. გაწვევება გვაქვს ხაზის, ანუ მე-4 შტოს, B და C ფაზებში. ვეძებთ ძაბვებს გაწვევების ადგილას. ტრანსფორმატორების გრაგნილების შეერთების თანახმად ნულოვანი მიმდევრობის დენების ცირკულაციას აღვილი არ ექნება, შესაბამისად ნულოვანი მიმდევრობის სქემის განზოგადებული პარამეტრები იქნება ნულის ტოლი.



ა - საწყისი სქემა,



ბ – ჩანაცვლებისსქემა

ნახ.27

პირველი კვანძის ძაბვა $U_1^N = 1.05144$, მეორე კვანძის ძაბვა $U_2^N = 0.999$ (ნახ.27).

ნახ.27-ზე წარმოდგენილ ქსელში არსებული ტრანსფორმატორების გრაგნილთა შეერთება გამორიცხავს ნულოვანი დენების არსებობას არასრულფაზოვანი რეჟიმების დროს.

პირდაპირი და უკუ მიმდევრობის სქემების პარამეტრები ფარდობით ერთეულებში წარმოდგენილია ნახ.27ბ-ზე. უკუ მიმდევრობის სქემის პარამეტრები მოცემულია ფრჩხილებში.

განვსაზღვროთ გრძივი განზოგადებული პარამეტრები ნახ.27-ზე წარმოდგენილი სქემისათვის ინციდენტის I მატრიცას ექნება სახე:

$$M = \begin{bmatrix} -11 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -11 \end{bmatrix};$$

110 კვ-იანქსელში ინდუქტიურობა ბევრად მეტია აქტიურზე, ამიტომ განხილულ მაგალითში შტოების აქტიური წინააღობები უგულვებელყოფილია. ე.ი. ურიშტოს წინააღობა იქნება: $Z_i = 0 + jX_i$ და შესაბამისად შტოების დიაგონალური მატრიცა პირდაპირი მიმდევრობის სქემისათვის იქნება:

$$Z_{\varphi} = \begin{bmatrix} 0 + j0.9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 + j2.4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 + j0.21 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 + j0.19 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 + j0.21 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 + j3.6 \end{bmatrix}$$

რომელიც შეიძლება გადავწეროთ შემდეგნაირად:

$$Z_{\varphi} = j \begin{bmatrix} 0.9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.21 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.19 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.21 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.6 \end{bmatrix}$$

შტოს გამტარობა, Z -ის შეპრუნებული სიდიდე, იქნება:

$$Y_i = \frac{1}{0 + jX_i} = \frac{0 - jX_i}{X_i^2} = -\frac{j1}{X_i} = -jY_i \quad \text{და} \quad \text{შესაბამისად, გამტარობების}$$

დიაგონალური მატრიცა პირდაპირი მიმდევრობის სქემისათვის იქნება:

$$Y_{\varphi} = Z_{\varphi}^{-1} = -j \begin{bmatrix} 1.1111 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4167 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4.7619 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5.2632 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.7619 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.277 \end{bmatrix}$$

პირდაპირი მიმდევრობის სქემის შტოების საკუთარი და ურთიერთგამტარობის მატრიცა იქნება:

$$Y_{\text{შტ}} = Y_{\varphi} - Y_1 \cdot Y_{\text{პპ}}^{-1} \cdot Y_2,$$

$$\text{სადაც: } Y_1 = Y_{\varphi} M^T = -j \begin{bmatrix} -1.1111 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4167 & 0 & 0 & 0 \\ 4.7619 & -4.7619 & 0 & 0 \\ 0 & 5.2632 & -5.2632 & 0 \\ 0 & 0 & 4.7619 & -4.7619 \\ 0 & 0 & 0 & 0.277 \end{bmatrix},$$

$$Y_2 = M Y_{\varphi} = -j \begin{bmatrix} -1.1111 & 0.4167 & 4.7619 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -4.7619 & 5.2632 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -5.2632 & 4.7619 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4.7619 & 0.2770 \end{bmatrix}$$

$$Y_{\text{პპ}}^{-1} = (M Y_{\varphi} M')^{-1} = -j \begin{bmatrix} 6.2897 & -4.7619 & 0 & 0 \\ -4.7619 & 10.0251 & -5.2632 & 0 \\ 0 & -5.2632 & 10.0251 & -4.7619 \\ 0 & 0 & -4.7619 & 5.0389 \end{bmatrix}^{-1} =$$

$$= j \begin{bmatrix} 0.5667 & 0.5385 & 0.5129 & 0.4847 \\ 0.5385 & 0.7112 & 0.6775 & 0.6403 \\ 0.5129 & 0.6775 & 0.8264 & 0.7810 \\ 0.4847 & 0.6403 & 0.7810 & 0.9365 \end{bmatrix}$$

$$Y'_{\mathcal{A}} = Y_{\mathcal{A}} - Y_{\mathcal{A}}M' [MY_{\mathcal{A}}M']^{-1}MY_{\mathcal{A}} = Y'_{\mathcal{A}} =$$

$$= -j \begin{bmatrix} 0.4115 & 0.2623 & 0.1492 & 0.1492 & 0.1492 & 0.1492 \\ 0.2623 & 0.3183 & -0.0559 & -0.0559 & -0.0559 & -0.0559 \\ 0.1492 & -0.0559 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 \\ 0.1492 & -0.0559 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 \\ 0.1492 & -0.0559 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 \\ 0.1492 & -0.0559 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 \end{bmatrix}$$

ანალოგიურად, უკუ მიმდევრობის სქემის პარამეტრების მიხედვით, ვლემულობთ შტოების საკუთარი და ურთიერთგამტარობის მატრიცას $Y''_{\mathcal{A}}$.

უკუ მიმდევრობის წინააღმდეგ დიაგონალურ მატრიცას ექნება სახე:

$$Z_{\mathcal{A}} = j \begin{bmatrix} 0.45 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.21 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.19 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.21 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.05 \end{bmatrix},$$

ხოლო მისი შებრუნებული მატრიცა – გამტარობების დიაგონალური მატრიცა იქნება:

$$Y_{\mathcal{A}} = Z_{\mathcal{A}}^{-1} = -j \begin{bmatrix} 2.2222 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.4286 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4.7619 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5.2632 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.7619 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9524 \end{bmatrix}$$

ისევე, როგორც პირდაპირი მიმდევრობის სქემის განხილვის დროს გვქონდა, უკუ მიმდევრობის სქემის განზოგადებულ პარამეტრებს – შტოების საკუთარ და ურთიერთგამტარობებს ვპოულობთ ფორმულით:

$$Y''_{\mathcal{A}} = Y_{\mathcal{A}} - Y_{\mathcal{A}}M' [MY_{\mathcal{A}}M']^{-1}MY_{\mathcal{A}} =$$

$$= -j \begin{bmatrix} 1.0612 & 0.7464 & 0.3147 & 0.3147 & 0.3147 & 0.3147 \\ 0.7464 & 0.9487 & -0.2023 & -0.2023 & -0.2023 & -0.2023 \\ 0.3147 & -0.2023 & 0.5171 & 0.5171 & 0.5171 & 0.5171 \\ 0.3147 & -0.2023 & 0.5171 & 0.5171 & 0.5171 & 0.5171 \\ 0.3147 & -0.2023 & 0.5171 & 0.5171 & 0.5171 & 0.5171 \\ 0.3147 & -0.2023 & 0.5171 & 0.5171 & 0.5171 & 0.5171 \end{bmatrix},$$

განვსაზღვროთ ავარიამდელი რეჟიმის პარამეტრების მნიშვნელობები.

$Y'_{\partial\partial}$ მატრიცისა და პირველ შტოში ჩართული ე.მ.ძ-ის $E_1 = 1.67$ საშუალებით ვპოულობთ ავარიამდელი დენების მნიშვნელობებს შტოებში:

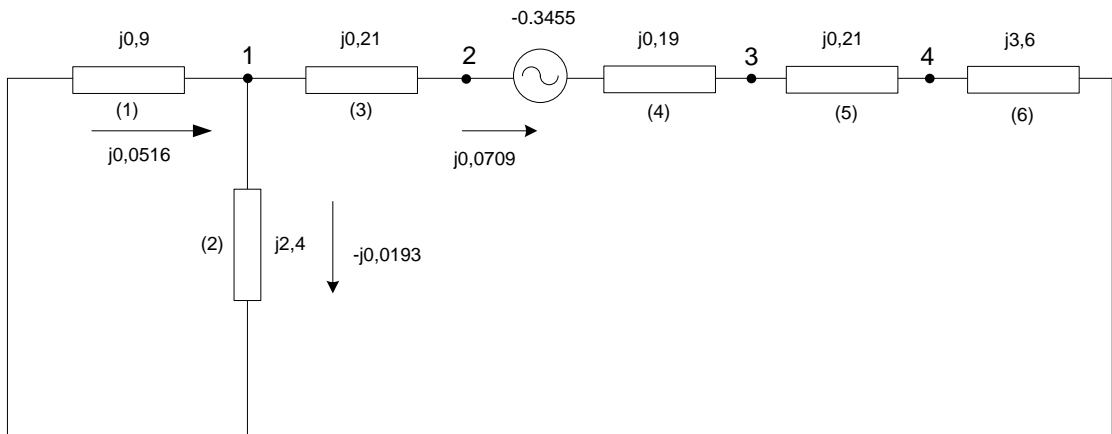
$$i_{\partial\partial} = Y'_{\partial\partial} E_1 = -j \begin{bmatrix} 0.4115 & 0.2623 & 0.1492 & 0.1492 & 0.1492 & 0.1492 \\ 0.2623 & 0.3183 & -0.0559 & -0.0559 & -0.0559 & -0.0559 \\ 0.1492 & -0.0559 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 \\ 0.1492 & -0.0559 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 \\ 0.1492 & -0.0559 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 \\ 0.1492 & -0.0559 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.67 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$= -j \begin{bmatrix} 0.6873 \\ 0.4381 \\ 0.2492 \\ 0.2492 \\ 0.2492 \\ 0.2492 \end{bmatrix}$$

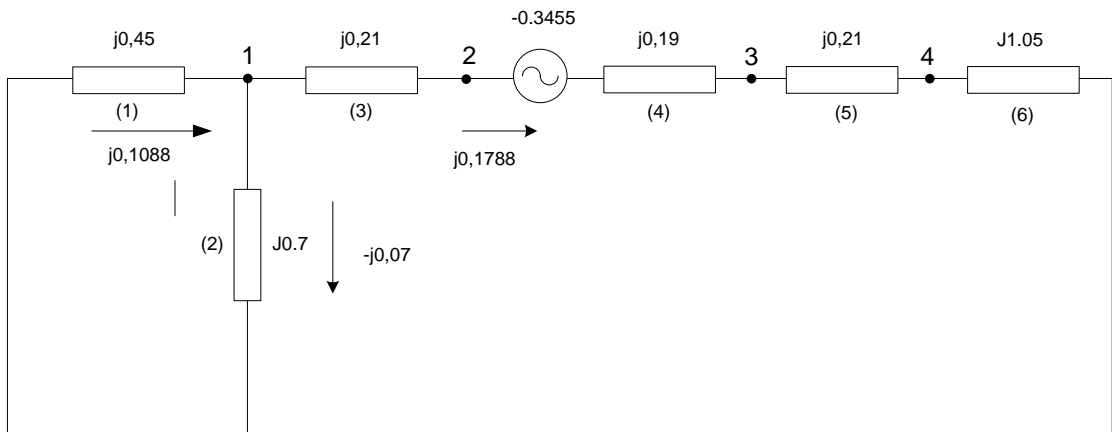
დენების ავარიულ მდგენელებს ვსაზღვრავთ პირდაპირი და უკუ მიმდევრობის სქემებიდან. დაზიანების ადგილას, მე-4 შტოში, ვსვავთ პირდაპირი და უკუ მიმდევრობის ძაბვებს (U'_4, U''_4), რომლებიც ერთმანეთის ტოლია. იმის გათვალისწინებით, რომ მოცემულ ქსელში ნულოვანი მიმდევრობის დენები ნულის ტოლია, რადგანაც ნახ.27-ზე წარმოდგენილ ქსელში არსებული ტრანსფორმატორების გრაგნილთა შეერთება გამორიცხავს ნულოვანი დენების არსებობას არასრულფაზოვანი რეჟიმების მიღების შემთხვევაში. ანუ $Y_{44}^0 = 0$.

$$U'_4 = U''_4 = \frac{I_4^N}{Y'_{44} + Y''_{44}} = -\frac{j0.2492}{-j0.2051 - j0.5171} = 0.3455$$

ძაბვის ავარიულ მდგენელს ქმნის საწინააღმდეგოდ მიმართული ე.მ.ძ-ის მქონე ძაბვის წყარო. ე.ი. პირდაპირი და უკუ მიმდევრობის დენების შემქმნელი ძაბვის წყაროს სიდიდე იქნება: $U'_4 = U''_4 = -0.3455$



ა) დენების ავარიული მდგენელები პირდაპირი მიმდევრობის ქსელში



ბ) დენების ავარიული მდგენელები უკუ მიმდევრობის ქსელში

ნახ.28

ამგვარად, პირდაპირი და უკუ მიმდევრობის სქემების შტოებში ჩართული ძაბვების ვექტორ-მატრიცებს ექნებათ სახე:

$$U' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0.3458 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad U'' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0.3458 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

პირდაპირი მიმდევრობის სქემის პარამეტრების მიხედვით, ვპოულობთ პირდაპირიმიმდევრობის დენებს

$$I'_{vet} = Y'_{vet} U' = -j \begin{bmatrix} 0.4115 & 0.2623 & 0.1492 & 0.1492 & 0.1492 & 0.1492 \\ 0.2623 & 0.3183 & -0.0559 & -0.0559 & -0.0559 & -0.0559 \\ 0.1492 & -0.0559 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 \\ 0.1492 & -0.0559 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 \\ 0.1492 & -0.0559 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 \\ 0.1492 & -0.0559 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 & 0.2051 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0.3458 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$= j \begin{bmatrix} 0.0516 \\ -0.0193 \\ 0.0709 \\ 0.0709 \\ 0.0709 \\ 0.0709 \end{bmatrix}$$

უკუ მიმდევრობის სქემის პარამეტრების მიხედვით, ვპოულობთ უკუ მიმდევრობის დენებს

$$I''_{vet} = Y''_{vet} U' = -j \begin{bmatrix} 1.0612 & 0.7464 & 0.3147 & 0.3147 & 0.3147 & 0.3147 \\ 0.7464 & 0.9487 & -0.2023 & -0.2023 & -0.2023 & -0.2023 \\ 0.3147 & -0.2023 & 0.5171 & 0.5171 & 0.5171 & 0.5171 \\ 0.3147 & -0.2023 & 0.5171 & 0.5171 & 0.5171 & 0.5171 \\ 0.3147 & -0.2023 & 0.5171 & 0.5171 & 0.5171 & 0.5171 \\ 0.3147 & -0.2023 & 0.5171 & 0.5171 & 0.5171 & 0.5171 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0.3458 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$= j \begin{bmatrix} 0.1088 \\ -0.0700 \\ 0.1788 \\ 0.1788 \\ 0.1788 \\ 0.1788 \end{bmatrix}$$

რადგანაც აღნიშნულ წრედში ნულოვანი მიმდევრობის დენები უდრის ნულს, დაზიანების ადგილას, მე-4 შტოში პირდაპირი და ნულოვანი მიმდევრობის დენები უნდა იყვნენ ტოლი და საწინააღმდეგოდ მიმართული, რათა დაკმაყოფილდეს ერთფაზა გაწყვეტის დროს არსებული პირობა (5.2.4). მართლაც,

$$I'_4 = I_4^N - U'_4 Y'_{44} = -j0.2491 - (-j0.0709) = -j0.178$$

$$I''_4 = -(-j0.1788) = j0.178$$

განვსაზღვროთ A ფაზის დენები მოცემული სქემის ყველა შტოში:

$$I_A = I^N - I'_{vet} - I''_{vet} = j \begin{bmatrix} 0.6873 \\ 0.4381 \\ 0.2492 \\ 0.2492 \\ 0.2492 \\ 0.2492 \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} 0.0516 \\ -0.0193 \\ 0.0709 \\ 0.0709 \\ 0.0709 \\ 0.0709 \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} 0.1088 \\ -0.0700 \\ 0.1788 \\ 0.1788 \\ 0.1788 \\ 0.1788 \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} -0.527 \\ -0.527 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

დაზიანების ადგილას ძაბვა იქნება:

$$U_4^A = 3U'_4 = 3 * 0.3455 = 1.0365$$

ორი ფაზის გაწვევების შემთხვევაში ავარიული ძაბვების გასაანგარიშებელი ფორმულები (5.2.11), (5.2.12) ნულოვანი დენების არარსებობის პირობებში, იღებენ სახეს:

$$\dot{U}' = \frac{I^N}{Y'}, \dot{U}_B^F = \dot{U}'_A(a^2 - 1), \quad \dot{U}_C^F = \dot{U}'_A(a - 1), \quad (5.2.13)$$

ამგვარად, ჩვენი მაგალითის შემთხვევაში ანგარიშს ვაწარმოებთ მხოლოდ პირდაპირი მიმდევრობის სქემის პარამეტრების მიხედვით. რადგანაც დენი ინდუქტიურ წრედებში ჩამორჩება ძაბვას 90° –ით, მისი მნიშვნელობა იქნება: $\dot{I}_4 = -j0.2497$. ხოლო მე-4 შტოს საკუთარი გამტარობა- $Y'_{44} = 0 - j0.2051$. (5.2.13) ფორმულების გამოყენებით ვღებულობთ ძაბვების მნიშვნელობებს დაზიანების ადგილას:

$$\dot{U}'_A = -\frac{j0.2492}{-j0.2051} = 1.215$$

$$\dot{U}_B^F = 1.215(-1.5 - j0.866) = -1.822 - j1.0522 \quad (5.2.14)$$

$$\dot{U}_C^F = 1.215(-1.5 + j0.866) = -1.822 + j1.0522 \quad (5.2.15)$$

თავი VI

6.1 გრძივი ასიმეტრიული რეჟიმების გაანგარიშება დაზიანებული ფაზის პარამეტრების მიხედვით

განვიხილოთ ფაზების გაწვევტის დროს ელექტრული რეჟიმის გაანგარიშება არა განსაკუთრებული, არამედ დაზიანებული ფაზების შესაბამისი აქტიური პარამეტრების სიმეტრიული შემდგენების საშუალებით (იგულისხმება, რომ ერთი შტოს ორი ფაზის გაწვევტა არის ორი ერთდროული ერთფაზა გაწვევტის რეჟიმების სუპერპოზიცია).

ერთფაზა დაზიანებების (ფაზების გაწვევტის), სასაზღვრო პირობები მოსახერხებელია უნიფიცირებული განტოლებების მისაღებად. ამიტომ წარმოდგენილი მეთოდიკის თანახმად, ყველა სახის დაზიანებას განვიხილავთ როგორც ერთფაზა ავარიული რეჟიმების ზედღებას (დამატებითი შემზღუდავი პირობების გათვალისწინებით), მაგ. ორი ფაზის გაწვევტას - როგორც ორ ერთფაზა გაწვევტას, სამი ფაზის - როგორც სამ ერთფაზა გაწვევტას. ამგვარად, ასეთი მიდგომა წარმოადგენს მეცნიერულ სიახლეს და საშუალებას იძლევა წრფივი განტოლებებით აღიწეროს ავარიული რეჟიმი ერთდროული სიმეტრიული და არასიმეტრიული დაზიანების დროს და განვიავარიების ანალიზის საშუალებები შეუზღუდავი გახადოს. განტოლებების კოეფიციენტები -შტოების გამტარობები ფაზების გაწვევტის ადგილას, გათვლილი უნდა იყოს წინასწარ (საწყისი ქსელის შესაბამისად) პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის სქემებისათვის. ჯერ განვიხილოთ სიმეტრიული გაწვევტებისათვის ჩამოყალიბებული მეთოდი, რომელიც შემდგომ განზოგადებულია არასიმეტრიული დაზიანებებისათვის.

ერთი ფაზის გაწვევტის შემთხვევაში ვიყენებთ ავარიული რეჟიმების აღმწერ ძირითად განტოლებებს (5.1.1) და აღნიშნული დაზიანების სასაზღვრო პირობებს:

$$\begin{cases} \dot{I}_A = 0 \\ \dot{U}_B = 0 \\ \dot{U}_C = 0 \end{cases}$$

აქ Y', Y'', Y^0 – შტოების საკუთარი და ურთიერთგამტარობებია პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის სქემებში.

$U', U'', U^0, I', I'', I^0$ – ძაბვები და დენებია პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობების სქემებში;

I^N – დენი დაზიანების ადგილას საწყის რეჟიმში.

როგორც ცნობილია, ერთჯერადი დაზიანების შემთხვევაში, დაზიანების ადგილას განსაკუთრებული ფაზებისათვის პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის დენებისა და ძაბვების მნიშვნელობა თვითოეული მიმდევრობის სქემის მიხედვით არის:

$$\dot{U}'_A = \dot{U}''_A = \dot{U}^0_A = \frac{1}{3} \dot{U}_A \quad (6.1.1)$$

და რადგანაც $\dot{I}_A = 0$,

$$\dot{I}'_A + \dot{I}''_A + \dot{I}^0_A = 0 \quad (6.1.2)$$

(5.1.1) განტოლებების აჯამვა (6.1.1) და (6.1.2) პირობების გათვალისწინებით გვაძლევს:

$$\dot{U}'_A = \frac{I^N}{Y' + Y'' + Y^0} \quad (6.1.3)$$

სოლო ფაზური ძაბვა დაზიანების ადგილას იქნება $\dot{U}_A = 3\dot{U}'_A$.

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, ზემოთგანხილული მოდელის საფუძველზე შეიძლება განვიხილოთ ნებისმიერი რაოდენობის და ნებისმიერ ადგილას მომხდარი ერთფაზა დაზიანება. რაკი პირდაპირი მიმდევრობის დენები ცირკულირებენ მხოლოდ პირდაპირი მიმდევრობის სქემაში, უკუ მიმდევრობის დენები – უკუ მიმდევრობის სქემაში და ნულოვანი მიმდევრობის შესაბამისად – ნულოვანი მიმდევრობის ქსელში და ამ ქსელებში დამყარებული ელექტრული რეჟიმები სიმეტრიულია, განტოლებებს ვწერთ მხოლოდ ერთი ფაზისათვის. თუ სხვადასხვა ადგილას მომხდარი დაზიანება ერთსახელა ფაზებშია, ე.ი ძაბვის წყაროები ჩასმულია ერთსახელა ფაზებში, მათი ურთიერთდამოკიდებულების განტოლებები დაიწერება ისევე, როგორც სიმეტრიული რეჟიმების დროს.

თუ დაზიანება სხვადასხვა ფაზებშია მომხდარი, მაშინ ყველა დაზიანების ადგილის აქტიური პარამეტრიც უნდა გამოვსახოთ იმ ფაზის მიხედვით, რომელ ფაზაშიც არის დაზიანება. მაგ. თუ დაზიანებას აქვს ადგილი i – ური შტოს B ფაზაში და განტოლება იწერება ამ შტოსათვის, ყველა სხვა დაზიანების ამსახველი ძაბვები გამოისახება შესაბამისი შტოს B ფაზის ძაბვისა და ვექტორთა ძვრის ოპერატორის a^{j120} –ის საშუალებით.

პირდაპირი და უკუ მიმდევრობის ქსელები ქმნიან სიმეტრიულ სამფაზა ქსელებს, სადაც ადგილი აქვს სამივე ფაზის გაწყვეტას, ნულოვანი მიმდევრობის ქსელში კი გვაქვს ერთფაზა დენები, რომლებიც გადიან ფაზებში და ბრუნდებიან მიწით.

განვიხილოთ შემთხვევა, როდესაც i – ურ შტოში გაწყვეტილია ფაზა B , ხოლო j – ში - ფაზა C . განტოლებათა სისტემა შევადგინოთ ავარიული რეჟიმის აღმწერი ძირითადი განტოლებების (5.1.1) მიხედვით.

i – ური შტოს განტოლება სამივე მიმდევრობის ქსელში იქნება:

$$\begin{cases} Y'_{ii} \dot{U}'_i + Y'_{ij} a \dot{U}'_j = I'_{iB} - I'_i = a^2 I'_{iA} - I'_i \\ Y''_{ii} \dot{U}''_i + Y''_{ij} a^2 \dot{U}'_j = -I''_i \\ Y^0_{ii} \dot{U}^0_i + Y^0_{ij} \dot{U}^0_j = -I^0_i \end{cases} \quad (6.14)$$

ასევე j – ური შტოსათვის გვექნება:

$$\begin{cases} Y'_{ji} a^2 \dot{U}'_i + y'_{jj} \dot{U}'_j = I'_{jC} - I'_j = a I'_{jA} - I'_j \\ Y''_{ji} a \dot{U}''_i + Y''_{jj} \dot{U}''_j = -I''_j \\ Y^0_{ji} \dot{U}^0_i + Y^0_{jj} \dot{U}^0_j = -I^0_j \end{cases} \quad (6.15)$$

შევკრიბოთ (6.14) განტოლებები (6.1.1) და (6.1.2) პირობების გათვალისწინებით, მივიღებთ:

$$(Y'_{ii} + Y''_{ii} + Y^0_{ii}) \dot{U}'_i + (a Y'_{ij} + a^2 Y''_{ij} + Y^0_{ij}) \dot{U}'_j = a^2 I'_{iA} \quad (6.15)$$

ანალოგიურად, ერთფაზა გაწყვეტის პირობების (6.1.1) და (6.1.2) გათვალისწინებით შევკრიბოთ (6.1.5) განტოლებები, მივიღებთ:

$$(a^2 Y'_{ji} + a Y''_{ji} + Y^0_{ji}) \dot{U}'_i + (Y'_{jj} + Y''_{jj} + Y^0_{jj}) \dot{U}'_j = a I'_{jA} \quad (6.1.6)$$

ამგვარად (6.1.5) და (6.1.6) განტოლებები ქმნიან სისტემას, რომლის ამონახსნის გასამზაგებელი მნიშვნელობები წარმოადგენს ძაბვებს დაზიანებული i და j – ური შტოების B და C ფაზებში გაწყვეტის ადგილას.

$$\begin{cases} (Y'_{ii} + Y''_{ii} + Y_{ii}^0)U'_i + (aY'_{ij} + a^2Y''_{ij} + Y_{ij}^0)U'_j = a^2I_{iA} \\ (a^2Y'_{ji} + aY''_{ji} + Y_{ji}^0)U'_i + (Y'_{jj} + Y''_{jj} + Y_{jj}^0)U'_j = aI_{jA} \end{cases} \quad (6.1.7)$$

ანგარიშების უნიფიცირების მიზნით, ყველა ხაზის ორი და სამი ფაზის გაწყვეტა, წარმოვადგინეთ, როგორც ფიქტიურ ხაზებში ერთფაზა გაწყვეტების დროს მიღებული ელექტრული რეჟიმების ზედდება დამატებითი პირობის გათვალისწინებით, რაც გულისხმობს იმ ფიქტიური ხაზების შერწყმას. შერწყმის შემთხვევაში ფიქტიური ხაზების საკუთარი და ურთიერთგამტარობა ერთმანეთის ტოლია და ეს პირობა დაცულია სამივე მიმდევრობის სქემაში.

$$\begin{cases} (Y'_{ii} + Y''_{ii} + Y_{ii}^0)U'_{iB} + (aY'_{ii} + a^2Y''_{ii} + Y_{ii}^0)U'_{iC} = a^2I_{iA} \\ (a^2Y'_{ii} + aY''_{ii} + Y_{ii}^0)U'_{iB} + (Y'_{ii} + Y''_{ii} + Y_{ii}^0)U'_{iC} = aI_{iA} \end{cases} \quad (6.1.8)$$

მიღებული განტოლებების ამონახსნის გასამზადებელი მნიშვნელობა წარმოადგენს i-ურ შტოში ძაბვებს B და C ფაზებში გაწყვეტის ადგილას.

ნახ.29-ზე წარმოდგენილი სქემისათვის განვიხილოთ მე-4 ხაზის B და C ფაზების გაწყვეტის შედეგად მიღებული აგარიული რეჟიმის შესაბამისი განტოლებები:

$$\begin{cases} (Y'_{44} + Y''_{44})U'_{4B} + (aY'_{44} + a^2Y''_{44})U'_{4C} = a^2I_{4A} \\ (a^2Y'_{44} + aY''_{44})U'_{4B} + (Y'_{44} + Y''_{44})U'_{4C} = aI_{4A} \end{cases} \quad (6.1.9)$$

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ნახ.29-ზე წარმოდგენილი ტრანსფორმატორების გრაგნილების შეერთების სქემა გამორიცხავს ნულოვანი მიმდევრობის დენების არსებობას და აგარიული პარამეტრები განპირობებული არიან მხოლოდ პირდაპირი და უკუ მიმდევრობის სქემებით. მიტომ მე-4 შტოს საკუთარი გამტარობებია:

როგორც უკვე აღვნიშნეთ უნიფიცირების მიზნით, ყველა ხაზის ორი და სამი ფაზის გაწყვეტა, წარმოვადგინეთ, როგორც ფიქტიურ ხაზებში ერთფაზა გაწყვეტების დროს მიღებული ელექტრული რეჟიმების ზედდება დამატებითი პირობის გათვალისწინებით, რაც გულისხმობს ამ ფიქტიური ხაზების შერწყმას. შერწყმის შემთხვევაში ფიქტიური ხაზების საკუთარი და ურთიერთგამტარობა ერთმანეთის ტოლია და ეს პირობა დაცულია სამივე მიმდევრობის სქემაში.

მოცემული სქემის პარამეტრების მიხედვით (6.1.9) განტოლება იღებს სახეს:

$$\begin{bmatrix} 0 - j0.7221 & -0.2701 + j0.3610 \\ 0.2701 + j0.3610 & 0 - j0.7221 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}'_{4B} \\ \dot{U}'_{4C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.2158 + j0.1246 \\ 0.2158 + j0.1246 \end{bmatrix} \quad (6.1.10)$$

მონახსნი იქნება:

$$U' = \begin{bmatrix} -0.6073 - j0.3507 \\ -0.6073 + j0.3507 \end{bmatrix}$$

(6.1.10) განტოლების ამონახსნის გასამმაგებელი მნიშვნელობები წარმოადგენს ძაბვებს დაზიანებული მე-4 ხაზის B და C ფაზების გაწვევების ადგილას.

$$\dot{U}f = \begin{bmatrix} -1.8222 - j1.0521 \\ -1.8222 + j1.0521 \end{bmatrix}$$

ხაზის გაწვევების მოდელირება შეიძლება მოვახდინოთ დაზიანების ადგილზე იდეალური ძაბვის წყაროს ჩართვით, რომლის ძაბვა, როგორც სიდიდით ასევე მიმართულებით, შეესაბამება გაწვევების ადგილის ძაბვას. ნებისმიერი რაოდენობის ხაზის გაწვევების ადგილის იმიტაცია შეიძლება მოვახდინოთ შესაბამისი იდეალური ძაბვის წყაროების ჩართვით. ამასთან ნებისმიერი რაოდენობის გაწვევების კომბინაციისას სქემის პასიური პარამეტრები, განსაზღვრული ე.მ.ძალის წყაროების ურთიერთდამოკიდებულებით, ე.მ.ძ-ის წყაროს შიდა წინააღობის ნულთან ტოლობის გამო, საანგარიშო სქემის შესაბამისი პარამეტრები უცვლელი რჩება.

განვიხილოთ შემთხვევა, როცა გაწვევები გვაქვს i, j, k შტოებში. i შტოში გაწვევითი გვაქვს ფაზა A, j შტოში – ფაზა B და k შტოში ფაზა – C.

$$\begin{cases} (y'_{ii} + y''_{ii} + y^0_{ii})u'_i + (ay'_{ij} + a^2y''_{ij} + y^0_{ij})u'_j + (a^2y'_{ik} + ay''_{ik} + y^0_{ik})u'_k = i_{iA} \\ (a^2y'_{ji} + ay''_{ji} + y^0_{ji})u'_i + (y'_{jj} + y''_{jj} + y^0_{jj})u'_j + (ay'_{jk} + a^2y''_{jk} + y^0_{jk})u'_k = i_{jB} = a^2i_{jA} \\ (ay'_{ki} + a^2y''_{ki} + y^0_{ki})u'_i + (a^2y'_{kj} + ay''_{kj} + y^0_{kj})u'_j + (y'_{kk} + y''_{kk} + y^0_{kk})u'_k = i_{kC} = ai_{jA} \end{cases} \quad (6.1.11)$$

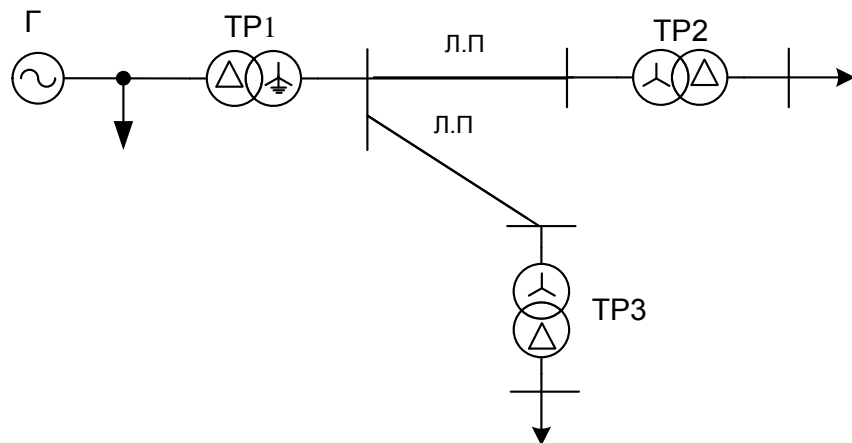
მიღებული გამოსახულების შედეგების გასამმაგებელი მნიშვნელობა არის ხაზის გაწვევების ადგილას ფაზური ძაბვა, ერთი ფაზის გაწვევების სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით: $u_{iA} = 3u'_i$; $u_{jB} = 3u'_j$; $u_{kC} = 3u'_k$.

(6.1.11)-ის ანალოგიურად შეიძლება შევადგინოთ განტოლებათა სისტემა, რომელიც გაწვევების ადგილას ძაბვას აკავშირებს ნებისმიერი კომბინაციის ერთფაზა გაწვევებთან.

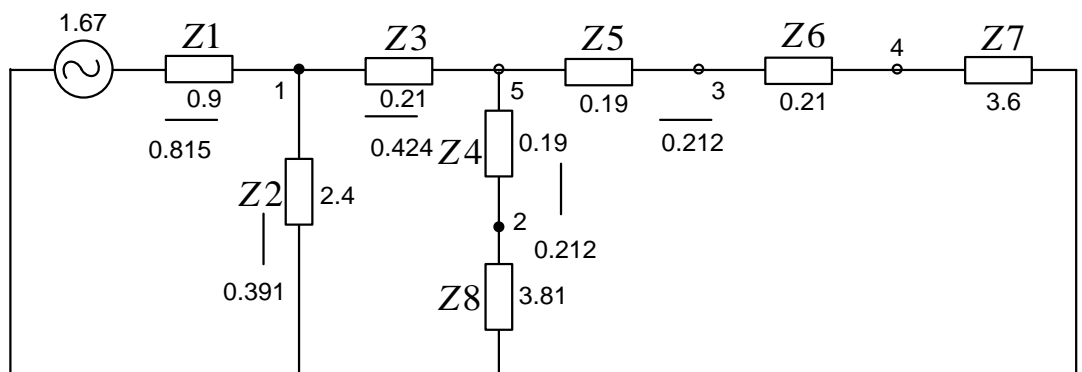
სიმეტრიული აგარიული რეჟიმი, მიღებული i ხაზის ყველა ფაზის გაწვევების შედეგად, შეიძლება განვიხილოთ როგორც სამი არასიმეტრიული რეჟიმის ზედდება, თითოეული მიღებული ერთი ფაზის გაწვევების შედეგად, ანუ განვიხილოთ, როგორც A, B, C ფაზების შესაბამისად i, j, k შტოების გაწვევებით მიღებული რეჟიმების ზედდება, აღნიშნული შტოების საკუთარი და ურთიერთგამტარობების ტოლობის გათვალისწინებით. ე.ი. გვაქვს შემდეგი:

$$\begin{cases} y'_{ii} = y'_{jj} = y'_{kk} = y'_{ij} = y'_{ik} = y'_{jk} \\ y''_{ii} = y''_{jj} = y''_{kk} = y''_{ij} = y''_{ik} = y''_{jk} \\ y^0_{ii} = y^0_{jj} = y^0_{kk} = y^0_{ij} = y^0_{ik} = y^0_{jk} \end{cases} \quad (6.1.12)$$

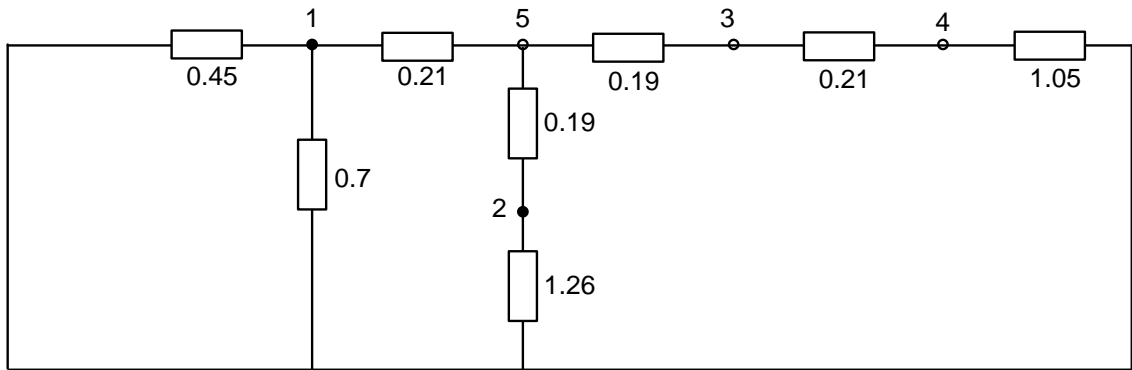
მაგალითისათვის განვიხილოთ სამი ფაზის გაწვევა მეოთხე შტოში (ნახ. 29ა). ანგარიშები განხორციელებულია მოცემული მეთოდით. პირდაპირი (უკუ) მიმდევრობის ჩანაცვლების სქემები წარმოდგენილია ნახ.29ბ. სქემის პარამეტრები მოცემულია ფარდობით ერთეულებში.



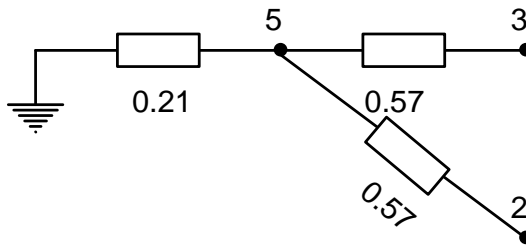
ა)



ბ)



გ)



დ)

ნახ.29 ა, ბ, გ, დ.

განხილული მაგალითისათვის ნულოვანი მიმდევრობის სქემის მიხედვით ნულოვანი მიმდევრობის დენები არ იარსებებს. არასიმეტრიული წყვეტების ნებისმიერი კომბინაციის ანგარიში იწარმოება პირდაპირი და უკუ მიმდევრობის სქემების განზოგადოებული პარამეტრებით, Y' და Y'' მატრიცის ელემენტებით. ავარიამდელი რეჟიმის აქტიური პარამეტრები დატანილია სქემაზე ნახ.29 ბ, გ. განზოგადოებული პარამეტრები შეირჩევა, Y' და Y'' მატრიცებიდან. რადგან ვთვლით, რომ ქსელის აქტიური წინაღობები ნულის ტოლია და გვაქვს მხოლოდ ინდუქტიობა, მეოთხე შტოსათვის მივიღებთ: $Y'_{44} = 0 - j0,2123$, $Y''_{44} = 0 - j0,5516$

გაწვეტამდე მეოთხე შტოს ფაზებში დენები იყო:

$$i_A = 0 - j0,212$$

$$i_B = a^2 i_A = -0,1836 + j0,106$$

$$i_C = -a i_A = 0,1836 + j0,106$$

$$\text{აქ } a = -0,5 + j0,866; a^2 = -0,5 - j0,866$$

წარმოდგენილი მეთოდის თანახმად სამი ფაზის გაწვევა წარმოდგენილია როგორც სამი ერთფაზა წვევტის კერძო შემთხვევები. ეს გვაძლევს საშუალებას შევიმუშაოთ საერთო მიდგომა ქსელის ნებისმიერ შტოში ფაზების ერთდროული სიმეტრიული და არასიმეტრიული გაწვევების ანგარიშისას. ამ შემთხვევაში ტოლობა მიიღება (6.1.11)-დან. გავითვალისწინოთ, რომ ნულოვანი მიმდევრობის დენები ნულის ტოლია და (6.1.12) ტოლობა

$$\begin{cases} (y'_{44} + y''_{44})u'_{4A} + (ay'_{44} + a^2y''_{44})u'_{4B} + (a^2y'_{44} + ay''_{44})u'_{4C} = i_{4A} \\ (a^2y'_{44} + ay''_{44})u'_{4A} + (y'_{44} + y''_{44})u'_{4B} + (ay'_{44} + a^2y''_{44})u'_{4C} = i_{4B} = a^2i_{4A} \\ (ay'_{44} + a^2y''_{44})u'_{4A} + (a^2y'_{44} + ay''_{44})u'_{4B} + (y'_{44} + y''_{44})u'_{4C} = i_{4C} = ai_{4A} \end{cases}$$

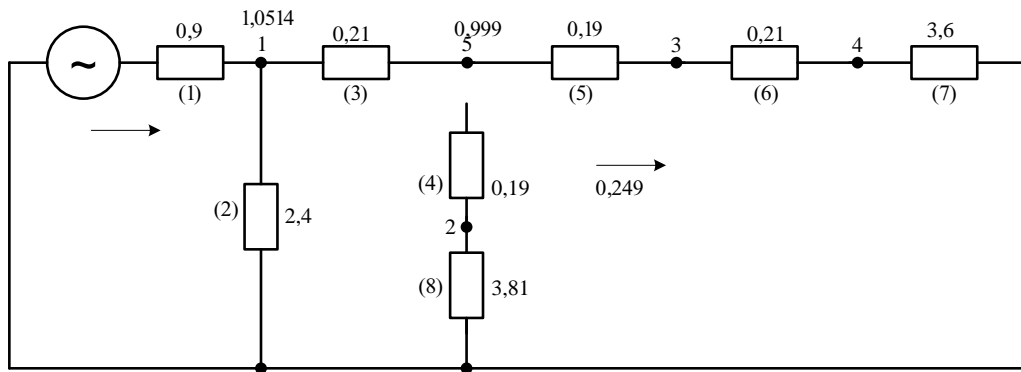
თუ ჩავსვამთ ფაზათა ძვრის ოპერატორის მნიშვნელობას, ასევე გავითვალისწინებთ პირდაპირი და უკუ მიმდევრობის სქემებში მეოთხე შტოს საკუთარი გამტარებლობის მნიშვნელობებს და მეოთხე შტოს ფაზურ დენებს, მივიღებთ:

$$\begin{bmatrix} (0 - j0,7640)(-0,2944 + j0,3820)(0,2940 + j0,3820) \\ (0,2940 + j0,3820)(0 - j0,7640)(-0,2940 + j0,3820) \\ (-0,2944 + j0,3820)(0,2944 + j0,3820)(0 - j0,7640) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_{4A} \\ u'_{4B} \\ u'_{4C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 - j0,2120 \\ -0,1840 + j0,1060 \\ 0,1840 + j0,1060 \end{bmatrix} \quad (6.1.13)$$

(6.1.13) სისტემის ამოხსნით მივიღებთ:

$$U' = \begin{bmatrix} u'_{4A} \\ u'_{4B} \\ u'_{4C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,3333 - j0 \\ -0,1668 - j0,2889 \\ -0,1668 + j0,2890 \end{bmatrix};$$

U' ვექტორის გასამმაგებელი პარამეტრები წარმოადგენს ძაბვას ფაზების წვევტის ადგილას ფარდობით ერთეულებში, რაც ემთხვევა აქტიურ პარამეტრებს რომლებიც გაანგარიშებულია მეოთხე შტოს წვევტის შემთხვევაში. აღნიშნული გამოსახულია ნახ. 30-ზე.



ნახ.30

განხილული მაგალითი ამტკიცებს შემოთავაზებული მეთოდის მართებულობას ფაზების გაწყვეტის ნებისმიერი კომბინაცია განხილული იქნეს, როგორც ერთფაზა გაწყვეტების ზედდების შედეგი.

განვიხილოთ მეხუთე შტოს A ფაზის წყვეტა მეოთხე შტოში სამფაზა წყვეტის დროს. ამისათვის ვირჩევთ აღნიშნული შტოების საკუთარ და ურთიერთგამტარებლობას და გადავიანგარიშოთ ფორმულებით, რომლებიც განსაზღვრავს (6.11) ტოლობის კოეფიციენტს ფაზების თანხვედრისას, ჩამორჩენისას და წინსწრებისას.

$$Y_1 = \begin{bmatrix} Y'_{44} & Y'_{45} \\ Y'_{54} & Y'_{55} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 - j0,2120 & 0 + j0,0377 \\ 0 + j0,1381 & 0 - j0,2120 \end{bmatrix},$$

$$Y_2 = \begin{bmatrix} Y''_{44} & Y''_{45} \\ Y''_{54} & Y''_{55} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 - j0,5520 & 0 + j0,1381 \\ 0 + j0,1758 & 0 - j0,5520 \end{bmatrix}.$$

თანხვედრი ფაზებისთვის გვექნება:

$$Y_{\text{თანხ}} = Y_1 + Y_2 = \begin{bmatrix} 0 - j0,7640 & 0 + j0,1758 \\ 0 + j0,1758 & 0 - j0,7640 \end{bmatrix},$$

ჩამორჩენილი ფაზისთვის გვექნება

$$Y_{\text{ჩამორჩ}} = aY_1 + a^2Y_2 = \begin{bmatrix} -0,2944 + j0,3820 & 0,0869 - j0,0879 \\ 0,0869 - j0,0879 & -0,2944 + j0,3820 \end{bmatrix}$$

ხოლო წინსწრები ფაზისთვის გვექნება:

$$Y_{\text{წინსწრ}} = a^2Y_1 + aY_2 = \begin{bmatrix} 0,2944 + j0,3820 & -0,0869 - j0,0879 \\ -0,0869 - j0,0879 & 0,2944 + j0,3820 \end{bmatrix}.$$

ტოლობა, რომელიც ასახავს ავარიულ რეჟიმს, მეხუთე შტოში მხოლოდ A ფაზის გაწყვეტას და მეოთხე შტოში სამივე ფაზის გაწყვეტის დროს მიიღებს სახეს:

$$\begin{bmatrix} (y'_{44} + y''_{44}) & (ay'_{44} + a^2y''_{44}) & (a^2y'_{44} + ay''_{44}) & (y'_{45} + y''_{45}) \\ (a^2y'_{44} + ay''_{44}) & (y'_{44} + y''_{44}) & (ay'_{44} + a^2y''_{44}) & (ay'_{45} + a^2y''_{45}) \\ (ay'_{44} + a^2y''_{44}) & (a^2y'_{44} + ay''_{44}) & (y'_{44} + y''_{44}) & (a^2y'_{45} + ay''_{45}) \\ (y'_{54} + y''_{54}) & (ay'_{54} + a^2y''_{54}) & (a^2y'_{54} + ay''_{54}) & (y'_{55} + y''_{55}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_{4A} \\ u'_{4B} \\ u'_{4C} \\ u'_{5A} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} i_{4A} \\ a^2i_{4A} \\ ai_{4A} \\ i_{5A} \end{bmatrix}$$

თანმხვედრ, ჩამორჩენილ და წინმსწრები ფაზების

გამოსახულებაში გამტარებლობის მნიშვნელობების ჩასმისას მივიღებთ:

$$\begin{bmatrix} (0 - j0,7640) & (-0,2944 + j0,3820) & (0,2944 + j0,3820) & (0 + j0,1758) \\ (0,2944 + j0,3820) & (0 - j0,7640) & (-0,2944 + j0,3820) & (0,0869 - j0,0879) \\ (-0,2944 + j0,3820) & (0,2944 + j0,3820) & (0 - j0,7640) & (-0,0869 - j0,0879) \\ (0 + j0,1758) & (0,0869 - j0,0879) & (0,0869 - j0,0879) & (0 - j0,7640) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u'_{4A} \\ u'_{4B} \\ u'_{4C} \\ u'_{5A} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 - j0,2120 \\ -0,1840 + j0,1060 \\ 0,1840 + j0,1060 \\ 0 - j0,2120 \end{bmatrix}$$

ამ ტოლობებიდან მიღებული მნიშვნელობები წარმოადგენს მეოთხე და მეხუთე შტოში ფაზების გაწყვეტისას ძაბვების პირდაპირი მიმდევრობის მნიშვნელობებს.

$$U_{\text{შტ}} = \begin{bmatrix} u'_{4A} \\ u'_{4B} \\ u'_{4C} \\ u'_{5A} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,3824 - j0 \\ -0,1913 - j0,2812 \\ -0,1912 + j0,2813 \\ 0,3455 - j0 \end{bmatrix}$$

თუ მოვახდენთ მეხუთე შტოს A ფაზის გაწყვეტისას ავარიული პარამეტრების გამოთვლას (არ იარსებებს მეოთხე შტო სამივე ფაზის გაწყვეტის გამო) სქემის ახალი კონფიგურაციისათვის ფორმულით Y' და Y'' მატრიცის ელემენტების წინასწარი გადაანგარიშებისას მივიღებთ: $u'_{5A} = 0,3455 - j0$, რაც ამტკიცებს წარმოდგენილი მეთოდის მართებულობას.

დასკვნა

ნებისმიერი სახის არასიმეტრიული რეჟიმების გასაანგარიშებლად ვეერდნობით სიმეტრიულ მდგენელთა მეთოდს, რომლის თანახმადაც არასიმეტრიული რეჟიმი იშლება სამ სიმეტრიულ რეჟიმად. ანგარიშების უნიფიცირების მიზნით მოვახდინეთ ნებისმიერი სახისა და რაოდენობის ხაზის გაწვევების წარმოდგენა, როგორც ერთფაზა გაწვევების კომბინაცია.

ნორმალური რეჟიმის გაანგარიშებას განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება იმ გარემოებების გამო, რომ ამ ანგარიშის შედეგები აუცილებელია არამარტო ექსპლუატაციის პროცესისათვის, არამედ აუცილებელია სხვადასხვა ამოცანის ამოხსნის დროსაც. ენერგოსისტემის ნორმალურად ფუნქციონირებისათვის ასევე აუცილებელია ავარიული რეჟიმებისა და დამყარებული არასრულფაზა რეჟიმების პარამეტრების გაანგარიშება და ანალიზი. დამყარებული არასრულფაზა რეჟიმების განხილვას განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება იმ გარემოებების გამო, რომ ენერგომომარაგების საიმედოობის უზრუნველსაყოფად დასაშვებია ხანგრძლივი დროით ასეთი რეჟიმების არსებობა.

ნებისმიერი ელექტრული რეჟიმი როგორც ნორმალური ასევე ავარიული აღიწერება ერთი და იმავე განტოლებებით. ტოპოლოგიური ანალიზის საფუძველზე ხდება სისტემის მდგომარეობის ამსახველი განტოლებების წარმოდგენა ინციდენტის მატრიცების საშუალებით. განსაკუთრებული ყურადღება აქვს დათმობილი განზოგადებულპარამეტრებიანი მატრიცული განტოლებებით სისტემის მდგომარეობის აღწერას და ამ განტოლებების გამოყენებას როგორც ნორმალური ასევე ავარიული რეჟიმების პარამეტრების გაანგარიშების დროს.

კვლევის მიზანს წარმოადგენდა მეთოდიკის დამუშავება, რომელიც იძლევა ავარიული პარამეტრების გაანგარიშების საშუალებას ნებისმიერი სახისა და რაოდენობის გრძივი დაზიანების დროს.

ელექტრული ქსელის ელექტრული რეჟიმების პარამეტრების გაანგარიშება და ანალიზი წარმოებს ჩანაცვლების სქემების მიხედვით.

სქემის ტოპოლოგია აისახება ინციდენტის I და II მატრიცებით, რომლებიც თავის მხრივ აისახებიან სქემის პასიური პარამეტრების ამსახველ მატრიცებში.

შემოთავაზებული უნიფიცირებული მეთოდის საფუძველზე შესაძლებელია შესრულდეს რთული ავარიული რეჟიმების გაანგარიშება. არასიმეტრიული დაზიანებების შემთხვევაში, სიმეტრიული სისტემებისათვის ჩამოყალიბებული თეორია გავრცელებულია ავარიული რეჟიმების სიმეტრიულ მდგენელებზეც. როგორც ცნობილია, არასიმეტრიული დაზიანებების ანალიზი ეყრდნობა სიმეტრიულ მდგენელთა მეთოდს, რომლის არსი მდგომარეობს არასიმეტრიული რეჟიმის დაშლაში სამ სიმეტრიულ რეჟიმად, რათა შემდგომ თვითოეული მიმდევრობის სქემაში გამოყენებული იქნეს ყველა ის მეთოდი, რომელიც სამართლიანია სიმეტრიული სისტემებისათვის. კავშირი მიმდევრობებს შორის მყარდება ავარიის ადგილას იმ სასაზღვრო პირობების მიხედვით, რომელიც ახასიათებს ამა თუ იმ დაზიანებას.

ერთფაზა დაზიანებების სასაზღვრო პირობები მოსახერხებელია უნიფიცირებული განტოლებების მისაღებად. ამიტომ წარმოდგენილი მეთოდის თანახმად, ყველა სახის დაზიანება განხილულია როგორც ერთფაზა ავარიული რეჟიმების ზედდება (დამატებითი შემზღუდავი პირობების გათვალისწინებით). გადამცემი ხაზის სამივე ფაზის გაწყვეტა წარმოიგინება როგორც სამი ერთფაზა გაწყვეტის შედეგად მიღებული რეჟიმის ზედდება (ასევე განხილვა ორი ფაზის გაწყვეტაც).

ასეთი მიდგომა წარმოადგენს მეცნიერულ სიახლეს. იგი საშუალებას იძლევა წრფივი უნიფიცირებული განტოლებებით აღიწეროს ავარიული რეჟიმი ერთდროული სიმეტრიული და ნებისმიერი სახის არასიმეტრიული დაზიანების დროს. ავარიების ანალიზის საშუალებები კი შეუზღუდავი გახადოს. განტოლებების კოეფიციენტები, ანუ შტოების საკუთარი და ურთიერთგამტარობები, გათვლილი პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის სქემებისათვის, წარმოდგენილი მეთოდის თანახმად, უცვლელი რჩებიან ავარიების ნებისმიერი რაოდენობისა და კომბინაციების შემთხვევაში, რადგანაც

ავარიული რეჟიმი მოდელირებულია ნულოვანი წინააღობის მქონე ძაბვის წყაროებით. წარმოდგენილი მეთოდისა და პროგრამა MATLAB-ის საშუალებით ჩატარებული ანგარიშების საფუძველზე შექმნილია მათემატიკური მოდელი. ჩამოყალიბებულია არასიმეტრიული გაწვევების აღმწერი უნიფიცირებული განტოლებების შედგენის ალგორითმი, რომელიც ამ ამოცანის კომპიუტერული პროგრამის დამუშავების საშუალებას მოგვცემს.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Идельчик В.И. Расчеты установившихся режимов электрических систем. Под ред. В.А. Веников. М. Энергия. 1977г.
2. С.А. Ульянов. Короткие замыкания в электрических системах. Москва 1949г.
3. Жуков Л.А. Страган И.П. установившейся режимы сложных электрических сетей и систем. Методы расчета. М Энергия. 1979г.
4. В.А. Веников. Глазунов. А.А. Жуков Л.С. Солдакина Л. А. электрические системы, т.2. электрические сети. Под ред. В.А. Веников. М. Высшая школа. 1960г.
5. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. . Москва. 1970.
6. Веников В.А. Глазунов А.А. Жуков Л.С. Солдаткина Л.А. Электрические системы. Т.2. Электрические сети . Под ред. В.А.Веникова. М. Высшая школа. 1971. 440 с.
7. Мельников Н.А. Электрические сети и системы. М. Энергия. 1975.
8. Костанян Г.Г. Задачи релейной защиты современных энергосистем. Авторефер. Москва, 1964.
9. Электротехнический справочник т.3. кн.1. Производство и распределение Электрической энергий. Под ред. Профессоров МЭИ. М. Энергоатомиздат. 1988.
10. Туркия Н. Унифицированные уравнения состояния электросистем. www.energyonline.ge. Электронный журнал EOL, Выпуск 2, Апрель 2010
11. Туркия Н.Г., Готуа Т.К., Расчет матрицы обобщенных параметров поперечных ветвей электрических сетей энергосистем. Электричество, энергоатомиздат, 1987, 3
12. Туркия Н. Унифицированные уравнения состояния электросистем “энергия” №1(2) 2010
13. ძულიაშვილით, ბანცაძევ.
ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესები ელექტრულ სისტემებში.
დამხმარე სახელმძღვანელო ტექნიკური უნივერსიტეტი. თბილისი. 2009წ.
14. ნემსაძე შ. ნაჭყებია შ. ელექტრული წრედების თეორია. ტექნიკური უნივერსიტეტი. თბილისი. 2008წ

15. მახარაძე გ. ბეგიაშვილი ვ. დარჩია ბ. ელექტრული ენერჯის გადაცემა და განაწილება. უნივერსალი. თბილისი. 2006წ.
16. კვაჭაძე ბ. ელექტრული სისტემის რელეური დაცვის საფუძვლები. სახელმძღვანელო-ტექნიკური უნივერსიტეტი. თბილისი. 2008წ
17. თურქია ნ, ძულიაშვილი თ. რთული სიმეტრიული ავარიული რეჟიმების ანალიზი. ჟურნალი ენერჯია. თბილისი 2006წ. №2
18. თურქია ნ, ბანცაძე ვ. ელექტრული ქსელების დამყარებული რეჟიმების ამსახველი განზოგადოებული პარამეტრებიანი განტოლებების მიღება ეკვივალენტური მოდელირების საფუძველზე. ჟურნალი ენერჯია. თბილისი 2006წ. №1
19. თურქია ნ, ბანცაძე ვ. დამყარებული რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება ელექტროსისტემების ქვესისტემადად დაშლის საშუალებით. ჟურნალი ენერჯია. თბილისი 2007წ. № 3-4
20. ნიშნიანიძე ო., ახალაძე ვ. არასრულფაზოვანი რეჟიმების ამსახველი განტოლებები “ენერჯია” N1(57), 2011.
21. Туркия Н. Нишнианидзе О. Расчеты аварийных параметров при одновременных разрывах фаз линий электрических систем. “Энергия” №2 (62) 2012
22. თურქია ნ. ნიშნიანიძე ო. ვახტანგაძე გ. “ავარიული ძაბვების განსაზღვრა ფაზების გაწყვეტის შემთხვევაში”. “ენერჯია” N3(59), 2011.