

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ნათია რთველაძე

სამძარღვა პარალელურად ჩართული და ექვივალენტური  
კვეთის სამი ერთმანეთს მშრალი იზოლაციით შესრულებული  
კაბელების ტემპერატურული რეჟიმების გამოკვლევა და მათი  
გამოყენების პირობების დადგენა

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ავტორ ეფერ ატი

სადოქტორო პროგრამა: „ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“

შიფრი: 0713

თბილისი

2022

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში  
ენერგეტიკის ფაკულტეტი  
ელექტრომომხმარებლის ტექნოლოგიების დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: პროფესორი მ. ქობალია

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2022 წლის "-----" "-----" "-----" საათზე  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკის ფაკულტეტის  
სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის სხდომაზე, კორპუსი VIII,  
სხდომათა დარბაზი.

მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას 77.

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

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი,  
პროფესორი

გ. გიგინეიშვილი

## ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

### სამუშაოს აქტუალობა.

ელექტრომომარაგების სისტემის საშუალო ძაბვის ქსელების მუშაობის საიმედოობას და მომხმარებლებზე ელექტროენერჯის უწყვეტ მიწოდებას ქსელის ელექტრომომარაგების ტრაქტში მონაწილე ყველა ძირითადი ელემენტის გამართული და შეუფერხებელი მუშაობა განაპირობებს. თავის მხრივ, ელემენტების საიმედო და შეუფერხებელ მუშაობას მათი მუშაობის რეჟიმები და ქსელში არსებული ელექტრომაგნიტურ დაბრკოლებების მიმართ მგრძობიარობა და მდგრადობა განსაზღვრავს. აღსანიშნავია, რომ ფუნქციონალური დანიშნულებისა და ელექტრომომარაგების საიმედოობაზე გავლენის მიხედვით, ელექტრომომარაგების სისტემების ელემენტებს შორის, ერთ-ერთი ძირითადს საშუალო და მაღალი ძაბვის საკაბელო ქსელი წარმოადგენს.

აღსანიშნავია, რომ ქალაქების ელექტრომომარაგების სისტემის საშუალო ძაბვის ქსელებში განვითარებული ავარიული გამორთვების ძირითადი წილი საკაბელო ხაზების დაზიანებებზე მოდის. იგი გამოწვეულია საკაბელო ქსელებში, მუშაობის ნორმალურ რეჟიმებსა და გარდამავალ პროცესებში წარმოქმნილი, ელექტრომაგნიტური პროცესებით განპირობებული გადაძაბვების შედეგად იზოლაზიის გარღვევითა და დენგამტარი ნაწილების გადახურებით.

ქალაქ თბილისში არსებულ საწარმოებში ახალი ტექნოლოგიური დანადგარებისა და კომპლექსების პრაქტიკულმა დანერგვამ და 4 - 5 სართულიანი სახლების მრავალსართულიანი კორპუსებით ჩანაცვლებამ ელექტრომომარაგების სისტემების საშუალო ძაბვის საკაბელო ქსელები ახალი გამოწვევების წინაშე დააყენა. კერძოდ, ინტენსიურად გაიზარდა ქალაქის უმრავლეს უბნებში ფართის ერთეულზე დადგმული ხვედრითი დატვირთვები. აქედან გამომდინარე, კონცენტრირებული დიდი დატვირთვების მქონე მომხმარებელთა ელექტროენერჯით

უზრუნველყოფისათვის, მნიშვნელოვნად გაიზარდა საშუალო (6-35 კვ) ძაბვის დამწვევი ქვესადგურების სიმძლავრეები და ურთულესი პრობლემები წარმოიქმნა მათი ელექტრომომარაგების საკაბელო ქსელების მოწყობასთან დაკავშირებით. შესაბამისად, რგოლური, ორმაგი რადიალური და ორმაგი გამჭოლი მაგისტრალური სქემებით შესრულებული პირველი საფეხურის საკაბელო ქსელით უზრუნველყოფისათვის აუცილებელი გახდა სამძარღვა კაბელების დაპარალელება ან ერთძარღვა დიდი განივკვეთის კაბელების გამოყენება. აქედან გამომდინარე, ბოლო პერიოდში, საშუალო და მაღალი ძაბვის ქსელებში, ელექტრომომარაგების დონის და ელექტრული დატვირთვების სიმკვრივის ინტენსიური ზრდის შედეგად, ერთფაზა პოლიეთილენის ნაქსოვი იზოლაციით შესრულებული ძალური კაბელების გამოყენება სულ უფრო და უფრო აუცილებელი ხდება.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, თანამედროვე ქალაქების მოქმედი ქსელების რეკონსტრუქციისა და ახალი ელექტრომომარაგების ქსელის მოწყობისას, ერთერთ აქტუალურ ამოცანას წარმოადგენს სამძარღვა და ერთძარღვა საკაბელო ხაზებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევა, ამ პროცესების მიერ ქსელის ელემენტებში გამოწვეული სიმძლავრისა და ელექტროენერჯის დანაკარგების განსაზღვრა, თითოეული მათგანის გემოყენებისას ქსელის ელექტრომომარაგების საიმედოობის დონის დადგენა, ურთიერთ შედარება, შესაბამისი დასკვნების გაკეთება და კონკრეტულ პირობებში მათი გამოყენების მიზანშეწონილობის დადგენა.

#### **სამუშაოს მიზანი.**

სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს საშუალო და მაღალი ძაბვის ერთძარღვა და სამძარღვა კაბელებით შესრულებულ სამფაზა საკაბელო ქსელებში მიდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევა, თვითეულ მათგანში განვითარებული თბური რეჟიმების შესწავლა, გამტარუნარიანობის განსაზღვრა, გამოწვეული სიმძლავრისა და ელექტროენერჯის დანაკარგების შეფასება, ურთიერთ შედარება და

კონკრეტული პირობებისათვის, მათი გამოყენების ოპტიმალური ვარიანტის დადგენა, ქსელის მუშაობის საიმედოობისა და მდგრადობის, ენერგეტიკული მაჩვენებლებისა და ენერგოეფექტურობის ამაღლების მიზნით.

### **პირითადი ამოცანები.**

სადისერტაციო ნაშრომის მიზნის მისაღწევად დაისახა შემდეგი ამოცანები:

1. სამძარღვა ნაქსოვი პოლიეთილენის იზოლაციით შესრულებული კაბელებით (ნპიმ) კაბელებით აღჭურვილ ქსელებში მუშაობის სტატიკურ და დინამიკურ რეჟიმებში განვითარებული ელექტრომაგნიტური პროცესების გამკვლევა და ტემპერატურული რეჟიმების დადგენა სიმეტრიული და ასიმეტრიული დატვირთვის პირობებში;

2. სამძარღვა და ერთძარღვა ნპიმ კაბელებით აღჭურვილ ქსელებში არასინუსოიდალური ფორმის მრუდის დატვირთვის დენის შედეგად წარმოქმნილი ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევა, ტემპერატურული რეჟიმების დადგენა, შეფასება და გამტარუნარიანობის დადგენა;

3. სამძარღვა ნპიმ კაბელებით აღჭურვილ ქსელებში, სხვადასხვა დატვირთვისა და მოკლედ შერთვის პირობებში, ჩართვა - გამორთვის შედეგად განვითარებული დინამიკურ პროცესების გამოკვლევა, წარმოქმნილი საკომუტაციო გადაძაბვების განსაზღვრა და კაბელის მუშაობის მდგრადობაზე გავლენის დადგენა;

4. სამძარღვა ნპიმ კაბელებით პარალელურად ჩართული კაბელების და მათ ცალკეულ ძარღვებს შორის, სიმეტრიული და ასიმეტრიული დატვირთვის პირობებში, დატვირთვის დენის გადანაწილების გამოკვლევა.

5. ერთძარღვა ნპიმ კაბელებით სამფაზა საკაბელო ქსელებში, ეკრანის სხვადასხვა მეთოდით დამიწების რეჟიმებში, განვითარებული ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევა, ეკრანში დაინდუქტირებული ელექტრომომძრავებელი ძალისა და დენის დადგენა,

მათი გალენა კაბელის თბურ რეჟიმსა და გადაძაბვებზე. ეკრანის დამიწების ოპტიმალური მეთოდის დამუშავება;

6. სამძარღვა პარალელურად ჩართული და ექვივალენტური კვეთის სამი ერთძარღვა ნპიმ კაბელებით კაბელების გამოყენების პირობების დადგენა, ურთიერთ შედარება და კონკრეტული პირობებისათვის, მათი გამოყენების ოპტიმალური ვარიანტის დადგენა, ქსელის მუშაობის საიმედოობისა და მდგრადობის, ენერგეტიკული მაჩვენებლებისა და ენერგოეფექტურობის ამაღლებისათვის.

#### **კვლევის მეთოდები:**

1. ერთძარღვა და სამძარღვა ნპიმ კაბელებით აღჭურვილი საკაბელო ქსელებში მუშაობის სტატიკურ და დინამიკურ რეჟიმებში განვითარებული ელექტრომაგნიტური პროცესების ექსპერიმენტული გამოკვლევები, სინუსოიდური და დამახინჯებული ფორმის დატვირთვის დენის პირობებში, ჩატარებულია სტუ–ს ენერგეტიკის ფაკულტეტის „ელექტრომომხმარების ტექნოლოგიების“ დეპარტამენტში ელექტრომაგნიტური თავსებადობის ლაბორატორიაში არსებულ „ელექტრომომხმარებლის ქსელის დატვირთვის ფიზიკურ მოდელზე“;

2. ექსპერიმენტული კვლევების პროცესის მიმდინარეობის კონტროლი და პარამეტრების გაზომვები მოკლედ შერთვის რეჟიმებისათვის შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში „ელექტრომომხმარების ტექნოლოგიების“ დეპარტამენტის, ელექტრომაგნიტური თავსებადობის ლაბორატორიის, კომპანია „Sedmax“-ის მიერ წარმოებული ელექტროენერჯის ხარისხის მაჩვენებლების კონტროლის ანალიზატორების ბაზაზე შექმნილი ლაბორატორიული სტენდის საშუალებით;

3. დატვირთვის ნორმალური რეჟიმების კვლევები ჩატარებულია სს „თელასის“ 110/10/6 კვ ძაბვის დამწვევი „ავშიანის, მუხიანის, დილომი-1-ის, ნუცუბიძის, მთაწმინდის, ბაგების, ვარკეთილის“ ქვესადგურების 10 და 6 კვ-ის სალტიდან გამავალი საკაბელო ხაზებზე „AV19-9085, AV28-9085, AV43-

9721, Av39-9474, MU5-9025, MU21-9025, DI23-2062, DI25-2700, DG16-2100, DG23-0200, DG1g-0200, NU14-3090, MC17-4055, MC23-4055, MC1-4055, MC8-4055, BA41-3160, BA25-3335, BA30-5080, BA22-5080“.

### **სამეცნიერო სიახლე.**

1. ერთდარღვა ნპიშ კაბელებით აღჭურვილ სამფაზა საკაბელო ქსელებში, მუშაობის ნორმალური და ავარიულ რეჟიმებში, განვითარებული ელექტრომაგნიტური პროცესების სრულყოფილი გამოკვლევის, მათ მიერ ქსელში წარმოქმნილი გადაძაბვების, გამოწვეული სიმძლავრისა და ელექტროენერჯის დანაკარგების შეფასებისათვის და კაბელის გამტარუნარიანობაზე გავლენის დადგენისათვის დამუშავებულია ელექტრული ჩანაცვლების სქემა. ჩანაცვლების სქემის საფუძველზე დასაბუთებულია, რომ ორმხრივ დამიწებული ეკრანის პირობებში, კაბელის ძარღვსა და ეკრანში მიმდინარე პროცესები მოკლედშერთვის რეჟიმში მომუშავე ძალოვანი ტრანსფორმატორის იდენტურია, ხოლო ერთმხრივ დამიწებული და ტრანსპოზიცირებული ეკრანის შემთხვევებში - უქმი სვლის რეჟიმში მომუშავე ძალოვანი ტრანსფორმატორისა.

2. ერთდარღვა ნპიშ კაბელების ეკრანის დამიწების პრაქტიკაში მიღებული „დასექციონირებული ერთმხრივ დამიწებული ეკრანით“ და „შუადამიწებული ეკრანით“ მეთოდებზე დაფუძნებული საკაბელო ქსელებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევების შედეგების ანალიზის საფუძველზე, დამუშავებულია ეკრანის დამიწების ახალი მეთოდი: „საკაბელო ქსელი დასექციონირებული შუადამიწებული ეკრანით“, რომელიც უზრუნველყოფს კაბელის ძარღვში გამავალი დენის მიერ დაინტუქტირებული ელექტრომამოძრავებელი ძალის მნიშვნელოვან შემცირებას.

### **ნაშრომის პრაქტიკული ღირებულებები და გამოყენების სფერო.**

1. ნაშრომში დამუშავებული ერთფაზა და სამფაზა ნპიშ კაბელებით აღჭურვილ სამფაზა საკაბელო ქსელებისათვის შემოთავაზებული ელექტრული ჩანაცვლების სქემების პრაქტიკული გამოყენება საშუალებას

გვადლევს დეტალურად გამოვიკვლიოთ საკაბელო ქსელებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესები, რაოდენობრივად შევაფასოთ მათ მიერ გამოწვეული სიმძლავრისა და ელექტროენერჯის დანაკარგები, დავადგინოთ მათი გავლენა კაბელების ტემპერატურულ რეჟიმებზე და განვსაზღვროთ კაბელების კონკრეტულ პირობებში გამტარუნარიანობა;

2. ეკრანის დამიწების ახალი მეთოდის „საკაბელო ქსელი დასექციონირებული შუადამიწებული ეკრანით“ პრაქტიკული გამოყენება უზრუნველყოფს ქსელის ძვირად ღირებული მოწყობილობების რაოდენობის, ქსელის სამონტაჟო სამუშაოების მოცულობის შემცირებასა და საექსპლუატაციო მომსახურების გამარტივებას. ამაცდროულად მისი გამოყენების პირობებში მცირეა ძარღვში გამავალი დენის მიერ ეკრანში დაინტუქტირებული ელექტრომაგნიტური ძალა და გამორიცხავს კაბელის გამჭოლი მოკლრდმერთვის შედეგად წარმოქმნილი გადაძაბვებისაგან დაზიანებას.

#### **ნაშრომის აპრობაცია.**

სადისერტაციო ნაშრომის ცალკეული შედეგები მოხსენებულ იქნა:

1. ქ. თბილისში 2020 წლის 7 – 10 დეკემბერს ჩატარებული II საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციის „ენერგეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები“-ის „ელექტროენერგეტიკული სისტემები და კომპლექსები“ -ის სექციის სხდომაზე;

2. ქ. თბილისში 2021 წლის 7 – 10 ივნისს ჩატარებული III საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციის „ენერგეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები“-ის „ელექტროენერგეტიკული სისტემები და კომპლექსები“ - ის სექციის სხდომაზე;

3. სადისერტაციო „კვლევითი კომპონტის“ - I, II III კოლოქვიუმების მოსმენისათვის ჩატარებულ სტუ-ს „ელექტრომობილარების ტექნოლოგიების“ დეპარტამენტის სხდომებზე;



4. 2022 წლის 28 მაისს ჩატარებული სტუ-ს ენერგეტიკის ფაკულტეტის „ელექტრომობილარების ტექნოლოგიების“ დეპარტამენტის სადისერტაციო ნაშრომის წინასწარი დაცვისათვის მიძღვნილ №12 გაფართოებულ სხდომაზე.

#### **ნაშრომის პუბლიკაცია.**

სამუშაოს ძირითადი შინაარსი გამოქვეყნებულია 3 სამეცნიერო ნაშრომში. მათ შორის 2 ჟურნალ „ენერჯის“ ე. თბილისში ჩატარებულ II და III საერთაშორისო სამეცნიერო – ტექნიკური კონფერენციებისათვის მიძღვნილ სპეციალურ გამოცემებში და 1 სამეცნიერო - საქართველოს საინჟინრო აკადემიის სამეცნიერო ტექნიკურ ჟურნალ „საქართველოს საინჟინრო სიახლენში“.

#### **სადისერტაციო ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა:**

სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავალის, 3 თავის, დასკვნების, გამოყენებული ლიტერატურის ჩამონათვალისა და დანართებისაგან. იგი მოიცავს 126 გვერდს, მათ შორის 17 ცხრილს, 31 ნახაზს და 8 დანართს.

## ნაშრომის ძირითადი შინაარსი

**შესავალში** ჩამოყალიბებულია ნაშრომში გადწყვეტილი სამეცნიერო – ტექნიკური პრობლემა. დადგენილია, რომ ქ.თბილისის ელექტრომომარაგების საშუალო (6-35 კვ) ძაბვის ქსელებში განვითარებული ავარიული გამორთვები ძირითადად საკაბელო ხაზების დაზიანებებზე მოდის. აღნიშნულია, რომ თანამედროვე ქალაქებში, გაზრდილი დადგმული ხვედრითი დატვირთვების ინტენსიური ზრდის გამო, საშუალო ძაბვის ელექტრომომარაგების ქსელის სამძარღვა კაბელებით შესრულება პრობლემას წარმოადგენს და აუცილებელი გახდა სამძარღვა კაბელების დაპარალელება ან მათი ერთძარღვა დიდი განივკვეთის კაბელებით ჩანაცვლება. დასაბუთებულია, რომ, ერთძარღვა და სამძარღვა დაპარალელებული მშრალი ნაქსოვი პოლიეთილენის იზოლაციით შესრულებული კაბელებით აღჭურვილ ქსელებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევა, თვითეულ მათგანში გამოწვეული სიმძლავრისა და ელექტროენერჯის დანაკარგების შეფასება, გამტარუნარიანობის განსაზღვრა, ურთიერთ შედარება და კონკრეტული პირობებისათვის, მათი გამოყენების ოპტიმალური ვარიანტის დადგენა, ქსელის მუშაობის საიმედოობისა და მდგრადობის, ენერგეტიკული მაჩვენებლებისა და ენერგოეფექტურობის ამაღლების ერთერთ პირობას წარმოადგენს. დასაბუთებულია არსებული პრობლემის აქტუალობა. ჩამოყალიბებული და განსაზღვრულია ნაშრომის სამეცნიერო კვლევის მიმართულება, ასევე კვლევის მიზანი და ამოცანები. ფორმულირებულია ნაშრომის მეცნიერული სიახლენი და პრაქტიკული ღირებულებების ძირითადი ასპექტები.

**პირველ თავში** ჩატარებულია ქ. თბილისის ელექტრომომარაგების სისტემის არსებული მდგომარობის შესწავლა და ქსელში განვითარებული ავარიული გამორთვების ანალიზი. მნიშვნელოვანია, რომ ქალაქის ელექტრომომარაგების საშუალო ძაბვის სისტემა 2191 ცალ, 1558.1 მვა

ჯამური სიმძლავრის, (10-6)/0.4 ძაბვის სატრანსფორმატორო ქვესადგურს მოიცავს და მათი ელექტრომომარაგების ქსელი, ძირითადად 6 და 10 კვ ძაბვის საკაბელო ქსელითაა შესრულებული, რომელთა ჯამური სიგრძე 3967.76 კილომეტრს შეადგენს. ამასთან, ელექტრომომარაგების ქსელის საშუალო და დაბალი ძაბვის საკაბელო ქსელების მნიშვნელოვანი ნაწილი მომველებულია და სასწრაფო, გადაუდებელ რეაბილიტაციას საჭიროებს.

ქ.თბილისის ელექტრომომარაგების ქსელის დისპეტჩერული მართვის სამსახურის ყოველდღიური ანგარიშის მიხედვით 2021 წელს ქსელის ტექნიკური გაუმართაობის გამო დაფიქსირდა 1567 გამორთვა. ავარიული გამორთვები ძირითადად განხორციელდა შემდეგი მიზეზებით: მომსახურე პერსონალის მიერ ავარიის ლიკვიდაციისათვის - 173 (11.0 %); რელეური დაცვის მოქმედების შედეგად ავარიის ლიკვიდაციისათვის - 1370 (87 %); ავარიული გამორთვა დაუდგენელი მიზეზებით - 24 (1,5 %).

კვლევის მასალებით დადასტურებულია, რომ საკაბელო ხაზების რეაქტიული სიმძლავრის კოეფიციენტი, დატვირთვის გრაფიკის გარკვეულ საფეხურებზე, საკმაოდ დაბალია. შედეგად, კაბელების მიერ გატარებული რეაქტიული სიმძლავრე სრული სიმძლავრის მნიშვნელოვან წილს შეადგენს. რიგ შემთხვევაში, იგი 40-45% -ს შეადგენს. შესაბამისად, კაბელის ძარღვებში გამოწვეული ელექტროენერჯის ჯამური დანაკარგების და მის მიერ გამოწვეული გახურების ეფექტის 40-45% რეაქტიულ სიმძლავრეზე მოდის.

ქვესადგურ „ჩუღურეთის“ 6 კვ ძაბვის მე-7, მე-18, 28-ე და 44 -ე საკაბელო ხაზების გამოკვლევების შედეგებიდან ნაჩვენებია, რომ კაბელებში გამავალი დენის მდალირიგის ჰარმონიკების სპექტრში ძირითადად დომინირებს მე-5 რიგის (250 ჰც სიხშირის) ჰარმონიკა. შესაბამისად, კაბელის იზოლაციის დამატებით გახურებას ძირითადად ეს ჰარმონიკა განაპირობებს.

აღნიშნულიდან გამომდინარე, საკაბელო ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის გატარებით გამოწვეული აქტიური და რეაქტიული

სიმძლავრის დანაკარგების განსაზღვრისათვის, გადაღებულ იქნა ქვესადგურ „ჩულურეთის“ დაბალი ძაბვის გამანაწილებელი მოწყობილობიდან გამავალი საკაბელო ხაზების ცალკეული ფაზების ძაბვების, დენებისა და მათ ვექტორებს შორის ძვრის კუთხეების ცვლილებების გრაფიკები ზაფხულისა და ზამთრის სეზონისათვის.

კვლევის შედეგების საფუძველზე გამოთვლილ იქნა აქტიური და რეაქტიული ტაქტირთვის გრაფიკები და რეაქტიული სიმძლავრის კოეფიციენტის მნიშვნელობები ყოველი ფიდერის დატვირთვის ყოველი საფეხურისათვის (ცხრი 1, დანართი 11-13).

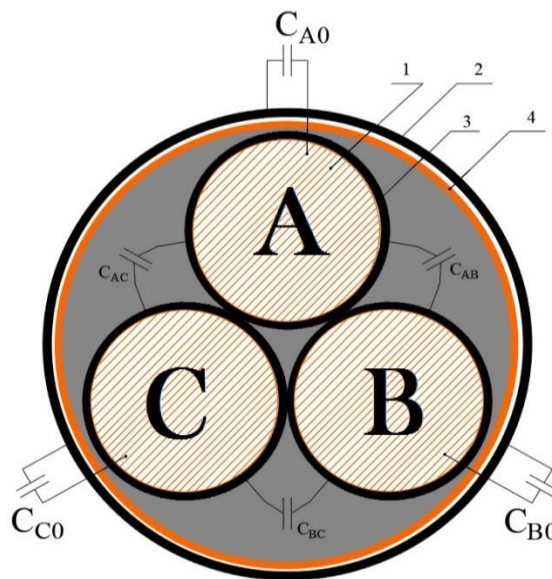
**მეორე თავში** ჩატარებულია სამძარღვა ნპიმ კაბელებში მიმდინარე ელექტრომაგნუტური პროცესების გამოკვლევა და დამუშავებულია საანგარიშო ელექტრული შენაცვლების სქემა. დადგენილია სამძარღვა პარალელურად ჩართულ ნპიმ კაბელებსა და ცალკეულ ძარღვებს შორის დატვირთვის დენის გადანაწილების უთანაბრობის მიზეზები. ამავდროულად, გამოკვლეულია ნპიმ კაბელებში დატვირთვის დენის არასიმეტრიულობით განპირობებული მიმდინარე ელექტრომაგნუტური პროცესები. ასევე, შესწავლილია დატვირთვის დენის ფორმის დამახინჯების შედეგად წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების გავლენა ელექტრომაგნიტურ პროცესებზე.

ელექტრომომარაგების სისტემის 6-35 კვ ძაბვის საკაბელო ქსელებში არსებული აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები წარმოქმნის მიზეზების მიხედვით შინაარსობრივად რადიკალურად განსხვავდებიან. შესაბამისად, ყოველი მათგანი სხვადასხვა სახის მდგენელებს მოიცავს და ელექტროტექნიკის კონკრეტული პრინციპით განპირობებული. ყოველი მათგანი ურთიერთ განსხვავებულ ფაქტორზეა დამოკიდებული და სიდიდით მნიშვნელოვნად განსხვავებულია.

მნიშვნელოვანია, რომ საშუალო ძაბვის საკაბელო ქსელში არსებული აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრისა და ენერჯის დანაკარგები ძირითადად კაბელის კონსტრუქციაზე, ელემენტების (ძარღვი, იზოლაცია,

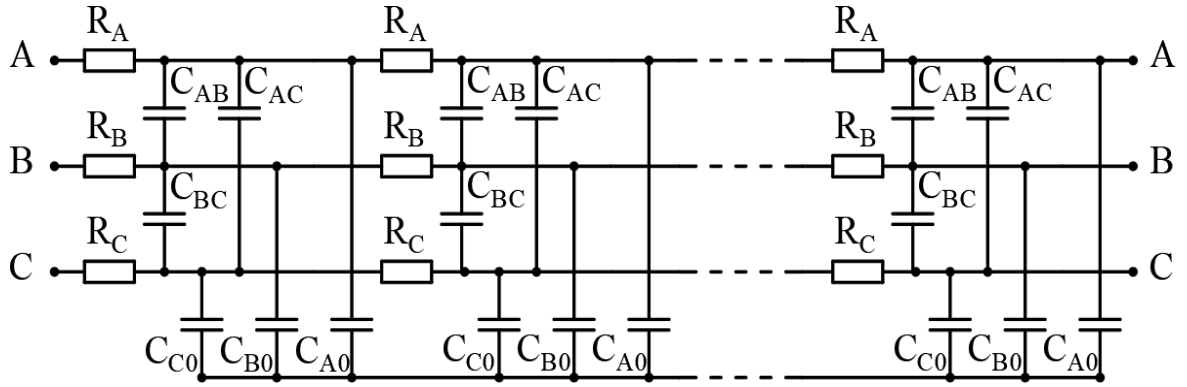
ეკრანი, გარსაცმი) მასალის გვარობაზე და საკაბელო ქსელის ტექნიკური შესრულებაზეა დამოკიდებული. საკაბელო ქსელებში წარმოქმნის მიზეზის მიხედვით, ძირითადად, ორი სახის დანაკარგები დომინირებს: პირველი, დანაკარგები რომლებსაც კაბელის ძარღვში (ძარღვებში) გამავალი დატვირთვის დენითაა განაპირობებული (ე.წ. დატვირთვის დანაკარგები) და მის ხარისხის მაჩვენებლებზეა (სიმეტრიულობა, დატვირთვის დენის ფორმა და ა.შ.) დამოკიდებული; მეორე, დანაკარგები რომლებიც დატვირთვის დენზე არაა დამოკიდებული, ე.წ. უქმი სვლის დანაკარგები და იგი ძირითადად ქსელის ძაბვის პარამეტრებითაა განპირობებული.

ნაქსოვი პოლიეთილენის იზოლაციით შესრულებული სამძარღვა კაბელის კონსტრუქციის მიხედვით შედგენილი კაბელის გამარტივებული კონსტრუქციულ-ელექტრული სქემის საფუძველზე (ნახ. 1) დამუშავებულია სამძარღვა კაბელის შენაცვლების საანგარიშო ელექტრული სქემა.



ნახ. 1. სამძარღვა კაბელის გამარტივებული კონსტრუქციულ - ელექტრული სქემა:

- 1-კაბელის დენგამტარი ძარღვი; 2 - კაბელის პოლიეთილენის გარსაცმი; 3 - კაბელის ძარღვის იზოლაცია; 4 - კაბელის სპილენძის ლენტით შეკრული მავთულებიანი ეკრანი;  $C_{AB}$ ,  $C_{BC}$ ,  $C_{AC}$  - კაბელის ძარღვებს შორის ტევადობა;  $C_{A0}$ ,  $C_{B0}$ ,  $C_{C0}$  - კაბელის ძარღვებს და ეკრანს შორის ტევადობა



ნახ.2. სამძარღვა კაბელის შენაწვლების საანგარიშო ელექტრული სქემა:  
 $R_A, R_B, R_C$  – კაბელის ძარღვის ხვედრითი აქტიური წინაღობა, ომი;  $C_{AB}, C_{BC}, C_{AC}$  – შესაბამისად, A და B, B და C, A და C ფაზების ძარღვებს შორის არსებული ხვედრითი ტევადობა, მკვ;  $C_{A0}, C_{B0}, C_{C0}$  – შესაბამისად, A, B, C, ფაზების ძარღვებსა და ეკრანს შორის არსებული ხვედრითი ტევადობა, მკვ.

საანგარიშო სქემის საფუძველზე შედგენილია სამძარღვა კაბელში წარმოქმნილი აქტიური სიმძლავრისა და ენერგიის დანაკარგების განსაზღვრის გამოსახულებები:

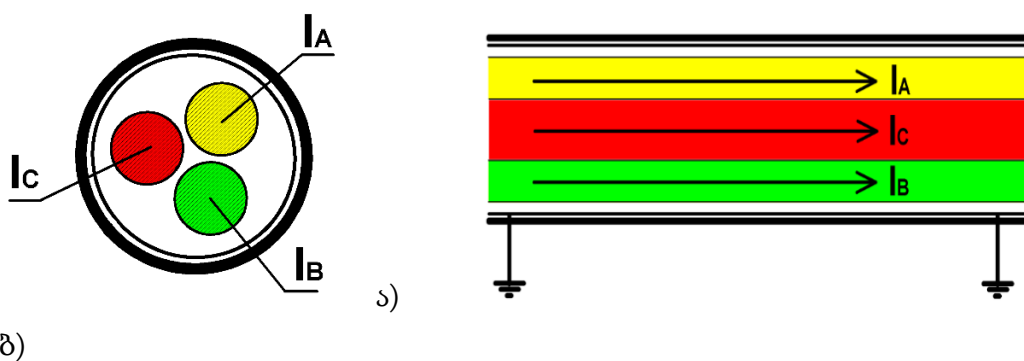
$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{შესაბამისად}} &= \Delta P_{\text{შესაბამისად}A} + \Delta P_{\text{შესაბამისად}B} + \Delta P_{\text{შესაბამისად}C} + \\ &+ \Delta P_{\text{შესაბამისად}AB} + \Delta P_{\text{შესაბამისად}BC} + \Delta P_{\text{შესაბამისად}CA} + \Delta P_{\text{შესაბამისად}}; \\ \Delta W_{\text{შესაბამისად}} &= \Delta W_{\text{შესაბამისად}A} + \Delta W_{\text{შესაბამისად}B} + \Delta W_{\text{შესაბამისად}C} + \\ &+ \Delta W_{\text{შესაბამისად}AB} + \Delta W_{\text{შესაბამისად}BC} + \Delta W_{\text{შესაბამისად}CA} + \Delta W_{\text{შესაბამისად}}, \end{aligned} \quad (1)$$

სადაც  $\Delta P_{\text{შესაბამისად}A}, \Delta P_{\text{შესაბამისად}B}, \Delta P_{\text{შესაბამისად}C}, \Delta W_{\text{შესაბამისად}A}, \Delta W_{\text{შესაბამისად}B}, \Delta W_{\text{შესაბამისად}C}$  – შესაბამისად, კაბელის A, B და C ძარღვების (ნახ. 1.)  $R_A, R_B, R_C$  აქტიურ წინაღობებში დატვირთვის დენის გავლის შედეგად, სითბოს სახით გამოყოფილი სიმძლავრის (ენერგიის) დანაკარგებია, კვტ (კვტ.სთ);  $\Delta P_{\text{შესაბამისად}AB}, \Delta P_{\text{შესაბამისად}BC}, \Delta P_{\text{შესაბამისად}CA}, \Delta W_{\text{შესაბამისად}AB} + \Delta W_{\text{შესაბამისად}BC} + \Delta W_{\text{შესაბამისად}CA}$  – შესაბამისად, კაბელის ძარღვებს შორის არსებულ  $C_{AB}, C_{BC}, C_{CA}$  ტევადობებში (ნახ. 2) წარმოქმნილი ტევადური დენით განპირობებული, ფაზათაშორის იზოლაციის გახურებაზე დახარჯული სიმძლავრის (ენერგიის) დანაკარგებია, კვტ (კვტ.სთ);  $\Delta P_{\text{შესაბამისად}}, \Delta W_{\text{შესაბამისად}}$  – კაბელის დამცავ გარსაცმში დატვირთვის დენის ასიმეტრიის შედეგად აღძრული ემმ-ით შექმნილი

დენების მიერ გამოყოფილი სითბოზე დახარჯული სიმძლავრეა (ენერგია), კვტ (კვტ.სთ).

სამძარღვა კაბელის ძარღვებს შორის იზოლაციაში გახურებაზე დახარჯული სიმძლავრისა და ენერგიის დანაკარგები  $\Delta P_{\text{შეღებAB}}$ ,  $\Delta P_{\text{შეღებBC}}$ ,  $\Delta P_{\text{შეღებCA}}$  კაბელში გამავალი დენის მაღალი რიგის ჰარმონიკის მიერ წარმოქმნილ დანაკარგების ჯამს წარმოადგენს და (3) გამოსახულებით განისაზღვრება.

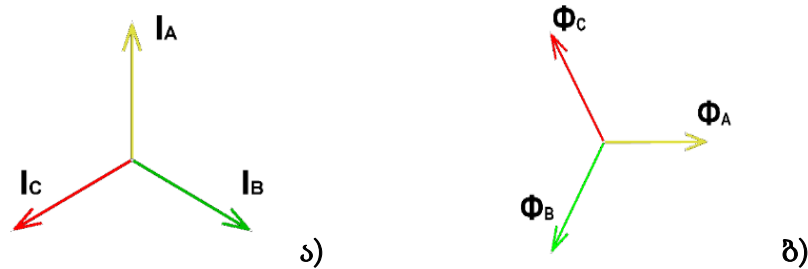
მნიშვნელოვანია, რომ სამძარღვა კაბელის ეკრანში, ემმ-ს ერთდროულად აინდუქტირებს კაბელის სამივე ძარღვში გამავალი დენების მიერ შექმნილი ჯამური მაგნიტური ველი. შესაბამისად, სამძარღვა ნპიშკ-ში მიმდინარე ელექტრომაგნუტური პროცესები, ერთიდაიგივე სიმძლავრის გადაცემისას, ძარღვებში გამავალი დენების ( $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ ) სიმეტრიისა და ასიმეტრიის შემთხვევაში (ნახ. 3), განსხვავებულად მიმდინარეობს და კაბელის ეკრანში გამოწვეული დანაკარგები მნიშვნელოვნად განსხვავებულია. კერძოდ, სიმეტრიული დატვირთვისას, კაბელის ძარღვებში (ნახ. 3) დაახლოებით თანაბარი სიდიდის დენი გადის  $I_A \approx I_B \approx I_C$ , ამ დენების ვექტორების (ნახ. 4,ა) ჯამი დაახლოებით ნულის ტოლია  $\vec{I}_\Sigma = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C \approx 0$ .



ნახ. 3. სამძარღვა კაბელის ძარღვებში გამავალი დატვირთვის დენების განაწილების სქემა

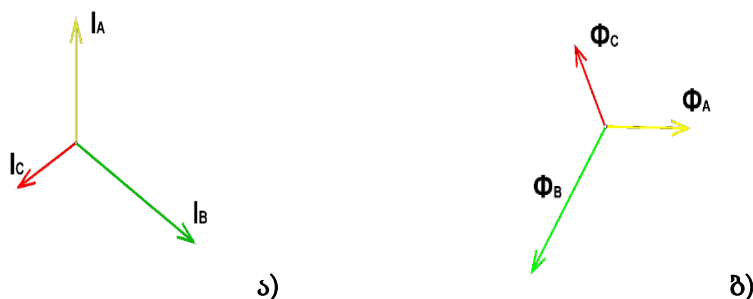
ასევე, დაახლოებით თანაბარია დენების მიერ შექმნილი ელექტრული ველების ნაკადების სკალარული მნიშვნელობები  $\Phi_A \approx \Phi_B \approx \Phi_C$

და ნულის ტოლია ნაკადების ვექტორების (ნახ. 5, ბ) ჯამი  $\vec{\Phi}_{\Sigma} = \vec{\Phi}_A + \vec{\Phi}_B + \vec{\Phi}_C \approx 0$ . შესაბამისად, ნულის ტოლია ჯამური ნაკადის მიერ ეკრანში დაინდუქტირებული ემძ, მის მიერ შექმნილი დენი და გამოწვეული აქტიური სიმძლავრისა და ენერგიის დანაკარგები.



ნახ. 4. ა) კაბელის დატვირთვის დენების და ბ) დატვირთვის დენების მიერ შექმნილი ელექტრული ველის ნაკადების ვექტორული დიაგრამა სიმეტრიული დატვირთვისას

სამფაზა კაბელის არასიმეტრიული დატვირთვისას, როცა კაბელის თითოეულ ძარღვში (ნახ. 3) განსხვავებული სიდიდის დენი გადის  $I_A \neq I_B \neq I_C$ , ამ დენების ვექტორების (ნახ. 5, ა) ჯამი ნულისგან განსხვავებულია  $\vec{I}_{\Sigma} = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C \neq 0$ . ასევე ურთიერთ განსხვავებულია დენების მიერ შექმნილი ელექტრული ველების ნაკადები (ნახ. 5, ბ)  $\Phi_A \neq \Phi_B \neq \Phi_C$  და მათი ვექტორების ჯამი  $\vec{\Phi}_{\Sigma} = \vec{\Phi}_A + \vec{\Phi}_B + \vec{\Phi}_C \approx 0$ . შედეგად, ჯამური ნაკადი ეკრანში დააინდუქტირებს ემძ-ს და შეიქმნება დენი, რომელიც ეკრანში გამოიწვევს აქტიური სიმძლავრისა და ენერგიის დანაკარგებს.



ნახ. 5. კაბელის დატვირთვის დენების და ბ) დატვირთვის დენების მიერ შექმნილი ელექტრული ველის ნაკადების ვექტორული დიაგრამა სიმეტრიული დატვირთვისას

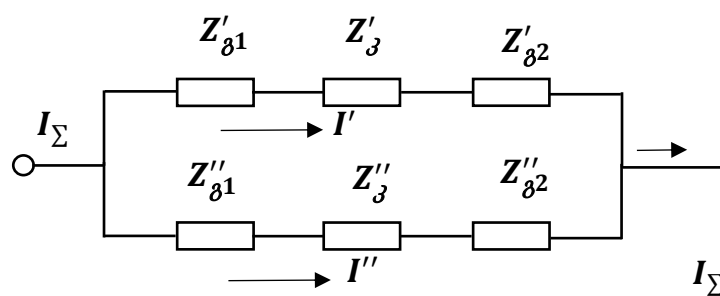


კაბელის თითოეული ფაზის ძარღვში დატვირთვის დენის გავლის შედეგად გამოწვეული დანაკარგები შემდაგი გამოსახულებებით განისაზღვრება:

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{მმმ}A} &= 2R \int_0^t I_{\text{მმმ}A} dt ; \\ \Delta W_{\text{მმმ}B} &= 2R \int_0^t I_{\text{მმმ}B} dt ; \\ \Delta W_{\text{მმმ}C} &= 2R \int_0^t I_{\text{მმმ}C} dt , \end{aligned} \quad (2)$$

სადაც  $R$  – კაბელის ძარღვების აქტიური წინააღმდეგობა, ომი;  $I_{\text{მმმ}A}$ ,  $I_{\text{მმმ}B}$ ,  $I_{\text{მმმ}C}$  – კაბელის A, B და C ფაზის ძარღვებში გამავალი დენის მოქმედი მნიშვნელობა, ა.

პარალელურად ჩართულ კაბელებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევისათვის შედგენილია შენაცვლების სქემა (ნახ. 3). ნახაზზე დატანილია შემდეგი აღნიშვნები:  $Z'_{g1}$  და  $Z''_{g1}$  – პირველი კაბელის ძარღვის დასაწყისსა და ბოლოში მიერთების კონტაქტის გარდამავალი წინააღმდეგობა, ომი;  $Z'_g$  – პირველი კაბელის ძარღვის წინააღმდეგობა, ომი;  $Z'_{g2}$  და  $Z''_{g2}$  – მეორე კაბელის ძარღვის დასაწყისსა და ბოლოში მიერთების კონტაქტის გარდამავალი წინააღმდეგობა, ომი;  $Z''_g$  – მეორე კაბელის ძარღვის წინააღმდეგობა, ომი;  $I'$  და  $I''$  – შესაბამისად, პირველ და მეორე კაბელში გამავალი დენი, ა;  $I_\Sigma$  – ჯამური დატვირთვის დენი, ა.



ნახ. 6. პარალელურად ჩართული კაბელების ერთიდაიგივე ფაზის ძარღვების შეერთების შენაცვლების სქემა

შენაცვლების სქემის საფუძველზე, პრაქტიკაში აპრობირებული მეთოდების გამოყენებით, შედგენილია პარამეტრების საანგარიშო გამოსახულებები:

$$\begin{aligned}
Z' &= Z'_3 + Z'_{g1} + Z'_{g2}; \\
Z'' &= Z''_3 + Z''_{g1} + Z''_{g2}; \\
\Delta Z &= Z' - Z''; \\
\Delta U &= I' Z' = I'' Z''; \\
K_{\text{უთ}Z} &= \frac{Z'}{Z''}; \\
I_{\Sigma} &= I' + I''; \\
\Delta I &= I' - I''; \\
K_{\text{უთ}I} &= \frac{I''}{I'}, \tag{3}
\end{aligned}$$

სადაც  $Z'$  და  $Z''$  – შესაბამისად, პირველი და მეორე კაბელის ერთიდაიგივე ფაზის ჯამური წინააღმდეგობაა, ომი;  $\Delta Z$  – ძარღვების ჯამური წინააღმდეგობებს შორის განსხვავებაა, ომი;  $\Delta U$  – ძაბვის ვარდნაა; ა, ვ;  $K_{\text{უთ}Z}$  – კაბელების ერთიდაიგივე ფაზის ძარღვების წინააღმდეგობებს შორის უთანაბრობის კოეფიციენტი;  $\Delta I$  – კაბელების ერთიდაიგივე ფაზის ძარღვებში გამავალ დენებს შორის სხვაობაა, ა;  $K_{\text{უთ}I}$  – კაბელების ერთიდაიგივე ფაზის ძარღვებში გამავალი დენებს შორის უთანაბრობის კოეფიციენტი. აღსანიშნავია, რომ კაბელის მიერთების კონტაქტი ექსპლუატაციის პერიოდში თანდათან უარესდება. ამავდროულად, კონტაქტის გარდამავალი წინააღმდეგობა გამავალი დენის ფუნქციაში იცვლება  $R_g = f(I)$ .

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, პარალელურად ჩართული კაბელების ერთიდაიგივე ფაზის ძარღვებში გამავალი დენების უთანაბრობა გამოწვეულია ძარღვების საწყისსა და ბოლოში მიერთების კონტაქტების გარდამავალი წინააღმდეგობების განსხვავების შედეგად.

წარმოდგენილი (3) გამოსახულებების გარდაქმნის საფუძველზე, მიღებულია კაბელების ძარღვების დენებს შორის სხვაობის ჯამურ დატვირთვის დენზე დამოკიდებულების ფორმულა:

$$\Delta I = K_{\text{უთ}Z} I_{\Sigma}. \tag{4}$$

როგორც (4) გამოსახულებიდან ჩანს, პარალელურად ჩართული კაბელების ერთი ფაზის ძარღვებში გამავალ დენებს შორის სხვაობა  $\Delta I$ , ერთიდაიგივე წინააღმდეგობის უთანაბრობის კოეფიციენტის  $K_{\text{უთანZ}}$  პირობებში, მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული ორივე ძარღვში გამავალი ჯამური დენზე  $I_{\Sigma}$ .

მნიშვნელოვანია, რომ პარალელურად ჩართული ძალოვანი კაბელების დაცვისათვის, რიგ შემთხვევაში, განივი დიფერენციალური დაცვა გამოიყენება. რადგან, განივი დიფერენციალური დაცვის პრინციპი დაფუძნებულია სხვადასხვა კაბელის ერთიდაიგივე ფაზის ძარღვებში გამავალი დენების სხვაობაზე, გამჭოლი მოკლედ შერთვებისას, გარდამავალი წინააღმდეგობების უთანაბრობით გამოწვეული დენის მნიშვნელობამ შეიძლება გადააჭარბოს დაცვის ამოქმედების დენს და ადგილი ჰქონდეს ხაზის ყალბ ამორთვას.

გამოკვლეულია სამძარღვა პარალელურად ჩართული ნპიშკ-ში მიმდინარე ელექტრომაგნეტური პროცესები დამახინჯებული ფორმის დატვირთვის დენის პირობებში.

**მესამე თავში ჩატარებულია** ერთძარღვა ნპიშ კაბელებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევა, სიმძლავრისა და ელექტროენერჯის დანაკარგების გამომწვევი მიზეზების დადგენა და ეკრანის დამიწების მეთოდის გავლენა.

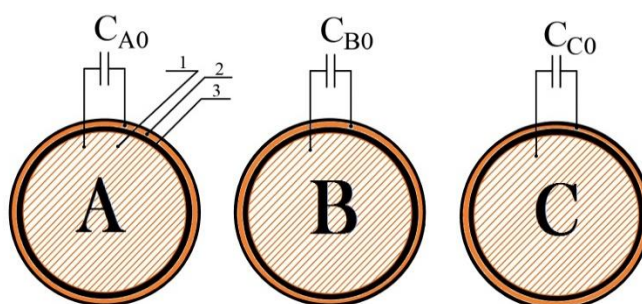
ბოლო პერიოდში, მნიშვნელოვნად გაიზარდა ელექტრომომარაგების სისტემის 6-35 კვ ძაბვის ქვესადგურების ძალოვანი ტრანსფორმატორების დადგმული სიმძლავრე. ამან საკაბელო ხაზების კვეთების გაზრდის მოთხოვნა გამოიწვია და რიგ შემთხვევაში, აუცილებელი გახდა სამძარღვა კაბელების ერთძარღვათი ჩანაცვლება და ქსელის ახალი არქიტექტურული მოწყობა. შესაბამისად, ელექტრომომარაგების ქსელის ენერგეტიკული მაჩვენებლების გაუმჯობესებისა და ენერგოეფექტურობის ამაღლებისათვის, საჭიროა გამოკვლეულ იქნეს ერთძარღვა კაბელებით აღჭურვილი სამფაზა ხაზებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესები (ემპ), განისაზღვროს

თითოეულ მათგანში ემპ-ის მიერ გამოწვეული დანაკარგები და დადგენილ იქნეს თითოეული მათგანის გავლენა ენერგეტიკულ მაჩვენებლებზე.

ნაქსოვი პოლიეთილენის იზოლაციით შესრულებული სამი ერთძარღვა კაბელით აღჭურვილ საკაბელო ქსელში (ნახ. 7.) არსებული აქტიური სიმძლავრისა და ენერგიის დანაკარგები სამივე ფაზის დანაკარგების ჯამს წარმოადგენს:

$$\Delta P_{\text{შეშ. შშ}} = \Delta P_{\text{შეშA}} + \Delta P_{\text{შეშB}} + \Delta P_{\text{შეშC}},$$

(5)

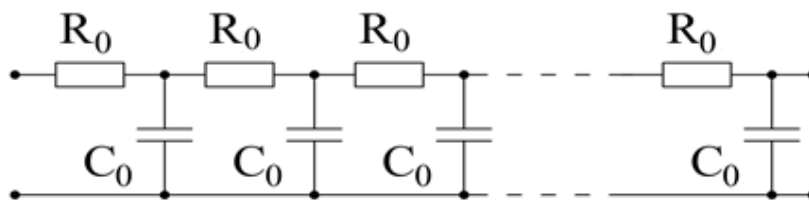


ნახ. 7. ერთძარღვა კაბელებით შესრულებული სამფაზა საკაბელო ქსელის კონსტრუქციულ-ელექტრული სქემა

შესაბამისად, მეტალის დამცავი გარსაცმის მქონე ერთძარღვა კაბელის (A ფაზისათვის) დანაკარგები შემდეგი გამოსახულებით განისაზღვრება:

$$\Delta P_{\text{შეშA}} = \Delta P_{\text{შეშA}} + \Delta P_{\text{შეშA}} + \Delta P_{\text{შეშA}};$$

$$\Delta W_{\text{შეშA}} = \Delta W_{\text{შეშA}} + \Delta W_{\text{შეშA}} + \Delta W_{\text{შეშA}}, \quad (6)$$



ნახ. 8. ერთძარღვა კაბელის საანგარიშო ელექტრული სქემა

სადაც  $\Delta P_{\text{შეშA}}$  და  $\Delta W_{\text{შეშA}}$  - შესაბამისად, კაბელის ძარღვის 1 (ნახ. 7)  $R_0$  აქტიურ წინაღობაში (ნახ. 8) დატვირთვის დენის გავლის შედეგად ძარღვის

გახურებაზე გამოყოფილი ჯოულ - ლენცის სითბოზე დახარჯული აქტიური სიმძლავრისა და აქტიური ენერჯის დანაკარგებია, კვტ და კვტ.სთ;  $\Delta P_{\text{შეღებ A}}$  და  $\Delta W_{\text{შეღებ A}}$  – შესაბამისად, კაბელის ძარღვსა და გარსაცმს 2 შორის არსებულ  $C_{AB}$ ,  $C_{AC}$ ,  $C_{BC}$  ტევადობებში (ნახ. 7) წარმოქმნილი ტევადური დენით განპირობებული, კაბელის იზოლაციის 3 გახურებაზე დახარჯული აქტიური სიმძლავრის და ენერჯის დანაკარგებია, კვტ და კვტ.სთ;  $\Delta P_{\text{შეღებ A}}$  და  $\Delta W_{\text{შეღებ A}}$  – შესაბამისად, კაბელის გარსაცმში ძარღვში გამავალი დენის შედეგად აღძრული ე.მ.დ.-ის შედეგად შექმნილი დენებით განპირობებული გარსაცმის გახურებაზე დახარჯული სიმძლავრისა და ენერჯის დანაკარგებია, კვტ და კვტ.სთ.

აღსანიშნავია, რომ კაბელის იზოლაციაში ტევადური დენების მიერ გამოყოფილი ტემპერატურით განპირობებული აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები, მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული კაბელის ძარღვში გამავალი დენის მრუდის ფორმის დამახინჯების კოეფიციენტზე. შესაბამისად, სიმძლავრის დანაკარგები იზოლაციასა და გარსაცმში, ძარღვში გამავალი დენის მაღალი რიგის ჰარმონიკის მიერ წარმოქმნილ დანაკარგების ჯამს წარმოადგენს:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{შეღებ}} &= \Delta P_{\text{შეღებ 1}} + \Delta P_{\text{შეღებ 2}} + \Delta P_{\text{შეღებ 3}} + \dots + \Delta P_{\text{შეღებ } i}, \\ \Delta P_{\text{შეღებ}} &= \sum_1^n \Delta P_{\text{შეღებ } i}; \\ \Delta P_{\text{შეღებ}} &= \Delta P_{\text{შეღებ 1}} + \Delta P_{\text{შეღებ 2}} + \Delta P_{\text{შეღებ 3}} + \dots + \Delta P_{\text{შეღებ } i}, \\ \Delta P_{\text{შეღებ}} &= \sum_1^n \Delta P_{\text{შეღებ } i}. \end{aligned} \quad (7)$$

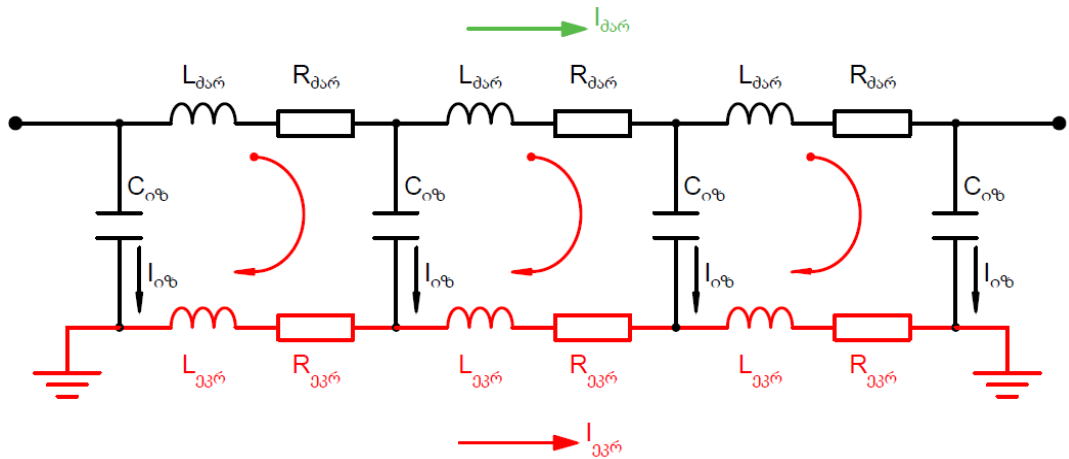
რიგ შემთხვევაში (მნიშვნელოვნად დამახინჯებული დიდი სიდიდის დატვირთვის დენის პირობებში), არახაზოვანი დატვირთვის დენის მიერ წარმოქმნილ მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრის პარამეტრების გავლენის ეფექტი, მნიშვნელოვნად აღემატება სხვა ფაქტორებით განპირობებულ დანაკარგებს.

ერთფაზა ნპიმ კაბელები, ძარღვის ძაბვის მაღალი დონის გამო, აღჭურვილია კარგი ელექტრული გამტარებლობის მქონე მასალისგან (სპილენძი) დამზადებული ეკრანით. მის ძირითად დანიშნულებას კაბელის

მთავარ იზოლაციაზე მოქმედი ელექტრული ველის თანაბრად განაწილება წარმოადგენს და იგი შესაძლებელია მხოლოდ ეკრანის მინიმუმ ერთმხრივ დამიწების პირობებში.

ერთგაზა საკაბელო ხაზების პროექტირებისა და ექსპლუატაციისას მნიშვნელოვანი პრობლემები წარმოიქმნება კაბელის ეკრანში დაინდუქტირებული გრძივი დენებისა და ძაბვის შეზღუდვის აუცილებლობის გამო. კაბელის ეკრანში დაინდუქტირებული გრძივი დენებისა და ძაბვის, ეკრანის ერთმხრივი დამიწების ან ტრანსპოზიციის საშუალებით, ეკრანში წარმოიქმნება ძაბვა, რომელიც მნიშვნელოვნად აღემატება იზოლაციის ელექტრულ სიმტკიცეს. ასევე, იგი საფრთხეს უქმნის კაბელთან ახლოს მყოფ ადამიანების სიცოცხლეს. აქედან გამომდინარე, აუცილებელია კაბელის ეკრანში დაინდუქტირებული დენისა და ძაბვის განსაზღვრის მათემატიკური მოდელის დაზუსტება კაბელების ოპტიმალური კვეთების შერჩევისათვის. შესაბამისად, საშუალო და მაღალი ძაბვის ერთგაზა კაბელებით შესრულებულ სამგაზა ქსელებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევა, მათ მიერ ქსელის ელემენტებში გამოწვეული ძაბვის, სიმძლავრისა და ელექტროენერჯის დანაკარგების მიზეზების დადგენა და შეფასება, მათი კონსტრუქციული შესრულების გავლენის დადგენა მუშაობის რეჟიმებზე, ელექტრომომარაგების საიმედოობასა და ქსელის მუშაობის მდგრადობაზე. ასევე, კვლევებით მიღებული შედეგების ანალიზის, კრიტიკული შეფასებისა და განზოგადოების საფუძველზე, მომზადდეს საპროექტო და საექსპლუატაციო ღონისძიებების ნუსხა, რომელიც უზრუნველყოფს ქსელის მუშაობის საიმედოობისა და მდგრადობის ამაღლებას, ენერგეტიკული მაჩვენებლებისა და ენერგოეფექტურობის გაუმჯობესებას, საექსპლუატაციო უსაფრთხოებას.

აღნიშნული პირობებით, შედგენილია ნპიმ ერთმარღვა საკაბელო ქსელების შენაცვლების ელექტრული სქემა (ნახ. 3).



ნახ. 9. ნაქსოვი პოლიეთილენის იზოლაციით შესრულებულ ერთძარღვა საკაბელო ქსელების შენაგვლების ელექტრული სქემა  
 $L_{\text{მარ}}$ ,  $L_{\text{გვრ}}$  – ძარღვისა და ეკრანის ინდუქციურობა;  $C_{\text{ობ}}$  – ძარღვსა და ეკრანს შორის ტევადობა;  $R_{\text{მარ}}$ ,  $R_{\text{გვრ}}$  – ძარღვისა და ეკრანის აქტიური წინაღობა;  $I_{\text{მარ}}$ ,  $I_{\text{გვრ}}$ ,  $I_{\text{ობ}}$  – ძარღვში, ეკრანსა და იზოლაციაში გამავალი დენი

ერთძარღვა კაბელებით შესრულებული სამფაზა ქსელში ჯამური აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები მუშაობის ნორმალური რეჟიმისათვის განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით:

$$\Delta P_{\text{საკაბ. ქსელ}} = \Delta P_{\text{კაბ A}} + \Delta P_{\text{კაბ B}} + \Delta P_{\text{კაბ C}}, \quad (1)$$

სადაც  $\Delta P_{\text{კაბ A}}$ ,  $\Delta P_{\text{კაბ B}}$ ,  $\Delta P_{\text{კაბ C}}$  – A, B და C ფაზებში დატვირთვის დენის გავლის შედეგად გამოწვეული აქტიური სიმძლავრის დანაკარგებია, კვტ.

ერთძარღვა კაბელში არსებული აქტიური სიმძლავრისა და აქტიური ენერჯიის დანაკარგები შემდეგი გამოსახულებებით განისაზღვრება:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{კაბ A}} &= \Delta P_{\text{მარ A}} + \Delta P_{\text{ობ A}} + \Delta P_{\text{გვრ A}}; \\ \Delta W_{\text{კაბ A}} &= \Delta W_{\text{მარ A}} + \Delta W_{\text{ობ A}} + \Delta W_{\text{გვრ A}}, \end{aligned} \quad (2)$$

სადაც  $\Delta P_{\text{მარ A}}$  – კაბელის ძარღვის აქტიურ წინააღმდეგობაში დატვირთვის დენის გავლის შედეგად გამოყოფილი დანაკარგები, კვტ. იგი მხოლოდ დატვირთვის დენის სიდიდესა და დამოკიდებულია;  $\Delta P_{\text{ობ A}}$  – კაბელის ძარღვისა და გარსაცმის შორის იზოლაციაში ტევადური დენით განპირობებული დანაკარგებია, კვტ. იგი დამოკიდებულია კაბელის ძარღვსა და ეკრანს შორის წარმოქმნილ ძაბვის სიდიდესა და სიხშირეზე. მნიშვნელოვანია, რომ დამახინჯებული ძაბვის მრუდის ფორმის

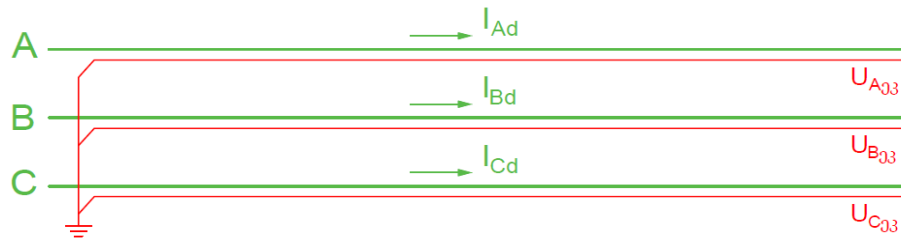
შემთხვევაში, იგი დამოკიდებულია მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრის პარამეტრებზე;  $\Delta P_{კვრA}$  – კაბელის ეკრანში ძარღვში გამავალი დენის შედეგად აღძრული ემმ-ის შედეგად განპირობებული დენებით განპირობებული დანაკარგებია, კვტ.

მნიშვნელოვანია, რომ ერთფაზა კაბელებით შესრულებული სამფაზა საკაბელო ქსელებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესები, ერთფაზა ორგრაგნილა ძალოვან ტრანსფორმატორში მიმდინარე პროცესების ანალოგიურია. კერძოდ, ორმხრივ დამიწებული ეკრანის პირობებში კაბელში მიმდინარე პროცესები, მოკლედშერთვის რეჟიმში მომუშავე ძალოვანი ტრანსფორმატორის იდენტურია, ხოლო ერთმხრივ დამიწებული და ტრანსპოზიცირებული ეკრანის შემთხვევაში - უქმი სვლის რეჟიმში მომუშავე ძალოვანი ტრანსფორმატორისა. შესაბამისად, ერთფაზა ძალოვანი კაბელების შესწავლისას, შეიძლება გამოვიყენოთ ძალოვანი ტრანსფორმატორების შენაცვლების სქემები, შემოთავაზებული შენაცვლების სქემის პარამეტრების გათვალისწინებით.

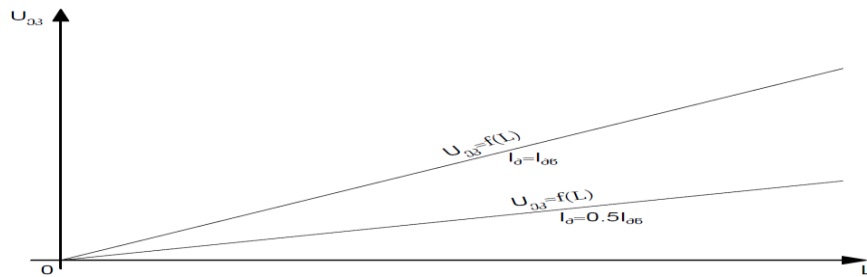
ერთფაზა კაბელებით შესრულებული სამფაზა საკაბელო ქსელებში მიმდინარე პროცესებს ეკრანის დამიწების შვიდი მეთოდი განსაზღვრავს: „ორმხრივ დამიწებული ეკრანით“, „ერთმხრივ დამიწებული ეკრანით“, „შუა დამიწებული ეკრანით“, „დასექციონირებული ეკრანით“, „სრული ციკლით ტრანსპოზიცირებული ეკრანით“, „ორმაგი ციკლით ტრანსპოზიცირებული შუა დამიწებული ეკრანით“ და „ორმაგი ციკლით ტრანსპოზიცირებული ეკრანით“.

„ორმხრივ დამიწებული ეკრანით“ სქემის შემთხვევაში ეკრანში დაინდუქტირებულმა დენმა შეიძლება კაბელის ძარღვში გამავალ დენის სიდიდეს მიაღწიოს და ეკრანის მაქსიმალურ დასაშვებ (თერმიული მდგრადობის) დენს გადააჭარბოს. ეკრანში დაინდუქტირებული დენის შემცირების, თბური რეჟიმის გაუმჯობესებისა და კაბელის გამტარუნარიანობის გაზრდის მიზნით, გამოიყენება სქემა „ერთმხრივ დამიწებული ეკრანით“ (ნახ. 10).





ა)



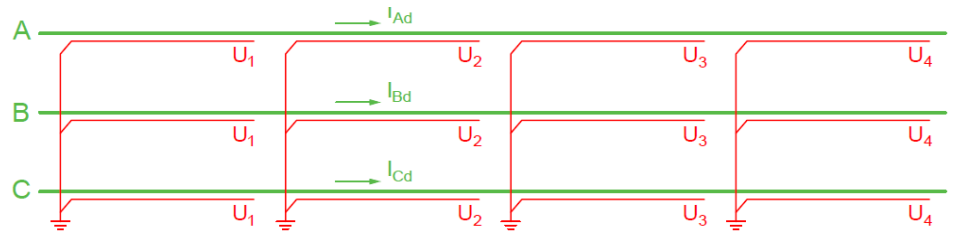
ბ)

**ნახ. 10.** ერთფაზა კაბელებით შესრულებული სამფაზა საკაბელო ქსელი ორმხრივ დამიწებული ეკრანით ა) და ეკრანში დატვირთვის დენის მიერ დაინდუქტირებული ძაბვის განაწილება საკაბელო ხაზის გასწვრივ ბ)

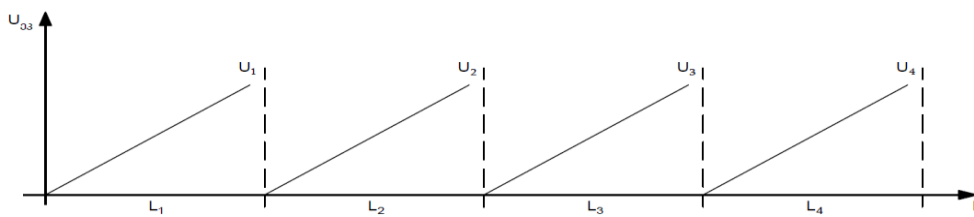
მნიშვნელოვანია, რომ „ერთმხრივ დამიწებული ეკრანის“ სქემის შემთხვევაში, არ არსებობს ეკრანში დაინდუქტირებული ემმ-ის დენის გავლის კონტური, როგორც მუშაობის ნორმალური რეჟიმის, ასევე საკაბელო ხაზის გარეთ წარმოქმნილი გამჭოლი მოკლედ შერთვისას. ეკრანში ძაბვის სიდიდე კაბელის სიგრძის პროპორციულად იზრდება და ეკრანის დაუმიწებელ ბოლოსა და მიწას შორის მაქსიმალურ მიშვნელობას აღწევს. მეზობელი ფაზების ეკრანების დაუმიწებელ ბოლოებს შორის ძაბვა  $\sqrt{3}$  – ჯერ აღემატება ერთი ფაზის ეკრანისა და მიწას შორის ძაბვას.

ეკრანსა და მიწას შორის წარმოქმნილი ძაბვის შემცირების მიზნით, პრაქტიკაში მიღებულია სქემა „დასექციონირებული ერთმხრივ დამიწებული ეკრანით“ (ნახ. 11). ამ შემთხვევაში, კაბელის დაუმიწებელი ეკრანის ბოლოს არსებული ძაბვა თანაბრად ნაწილდება სექციებზე. მნიშვნელოვანია, რომ სექციების რაოდენობას ხაზის სიგრძე და გადასაცემი სიმძლავრე (დენი) განსაზღვრავს. ეკრანსა და მიწას შორის, გამჭოლი,

მოკლედშერთვების შედეგად წარმოქმნილი გადაძაბვების შემცირებისათვის, ყოველი სექციის დაუმიწებელ ბოლოსთან გათვალისწინებულია გადაძაბვებისაგან შემზღუდავების ჩართვა.



ა)

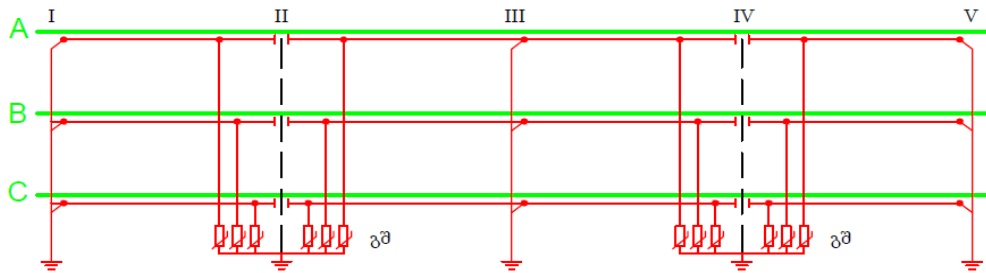


ბ)

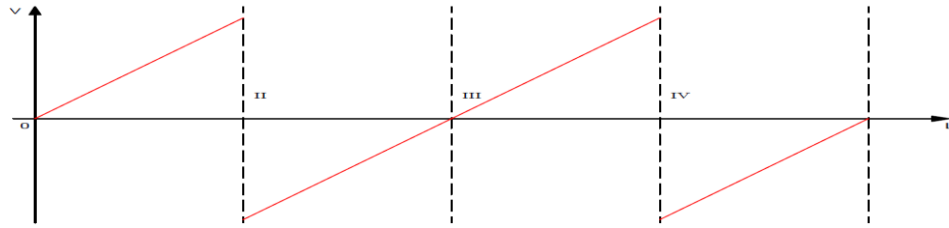
ნახ. 11. ერთფაზა კაბელებით შესრულებული სამფაზა საკაბელო ქსელი დასექციონირებული ეკრანით ა) და ეკრანში დატვირთვის დენის მიერ დაინდუქტირებული ძაბვის განაწილება საკაბელო ხაზის გასწვრივ ბ)

უნდა აღინიშნოს, რომ ერთფაზა საკაბელო ქსელების დასექციონირებული და განსაკუთრებით, ტრანსპოზიცირებული ეკრანით სქემების განხორციელება მოითხოვს ძვირად ღირებულ მოწყობილობებს და დიდი მოცულობის სამონტაჟო სამუშაოებს. ასევე, რთულია მათი საექსპლუატაციო მომსახურება.

ზემოაღნიშნული ნაკლოვანებების გამოსწორების მიზნით, ერთფაზა საკაბელო ქსელების ეკრანის დამიწების არსებული მეთოდების ანალიზის საფუძველზე, „დასექციონირებული ერთმხრივ დამიწებული ეკრანით“ და „შუადამიწებული ეკრანით“ მეთოდების სინთეზის საფუძველზე, ნაშრომში შემოთავაზებულია ეკრანის დამიწების ოპტიმალური სქემა (მეთოდი): „დასექციონირებული შუადამიწებული ეკრანით“ (ნახ. 4).



ა)



ბ)

**ნახ. 12. ერთფაზა კაბელებით შესრულებული სამფაზა საკაბელო ქსელი „დასექციონირებული შუადამიწებული ეკრანით“ ა) და ეკრანში დატვირთვის დენის მიერ დაინდუქტირებული ძაბვის განაწილება საკაბელო ხაზის გასწვრივ ბ)**

საკაბელო ხაზები „დასექციონირებული შუადამიწებული ეკრანით“ გამოირჩევა მუშაობის მაღალი საიმედოობით, საექსპლუატაციო უსაფრთხოებით, მაღალი ენერგეტიკული მაჩვენებლებით და გამტარუნარიანობით. აღნიშნული სქემის გამოყენება შეიძლება გრძელი საკაბელო ქსელების შემთხვევაში, იგი უზრუნველყოფს ქსელის ძვირად ღირებული მოწყობილობების ეკონომიას, ქსელის სამონტაჟო სამუშაოების მოცულობის შემცირებასა და საექსპლუატაციო მომსახურების გამარტივებას.

ერთძარღვა და სამძარღვა ნპიშ კაბელებით შესრულებული საკაბელო ქსელების შედარებას, ნაშრომში ჩატარებული გამოკვლევის შედეგების შეფასებას და მათი გამოყენების ოპტიმალური პირობების დადგენას.

## დასაკვნები

1. ნაშრომში ჩატარებული სამუშაოების, საფუძველზე შეიძლება გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნები:

2. ნაქსოვი პოლიეთილენის იზოლაციით შესრულებული პარალელურად ჩართული სამძარღვა კაბელების ერთიდაიგივე ფაზის ძარღვებს შორის დატვირთვის დენის გადანაწილებასთან დაკავშირებით ჩატარებული კვლევების შედეგებით დადასტურებულია, რომ მიუხედავად კაბელების პარამეტრების იდენტურობისა და ერთნაირი საექსპლუატაციო პირობებისა, ერთიდაიგივე ფაზების ძარღვებში გამავალი დენები მნიშვნელოვნად განსხვავებულია ერთმანეთისაგან და რიგ შემთხვევაში, მეტად დატვირთული ძარღვში გამავალი დენი მნიშვნელოვნად აჭარბებს კაბელის, ხანგრძლივ რეჟიმში გახურების პირობით გათვალისწინებულ დასაშვებ საპასპორტო დენს.

3. პარალელურად ჩართული კაბელების შენაცვლების სქემის პარამეტრების ხარისხობრივი და რაოდენობრივი ანალიზის საფუძველზე დადგენილია, რომ პარალელურად ჩართულ ძარღვებს შორის გამავალი დენების სხვაობა ძირითადად განპირობებულია კაბელის დასაწყისსა და ბოლოში მიერთებების კონტაქტის გარდამავალ წინააღმდეგობათა უთანაბრობით;

4. შემოთავაზებულია, პარალელურად ჩართული ერთიდაიგივე ფაზების ძარღვების წინააღმდეგობებს შორის უთანაბრობის გამოვლენის მეთოდი, რომელიც დაფუძნებულია პარალელურად ჩართულ ძარღვებში გამავალი ჯამური და ცალკეულ ძარღვებში გამავალი დენების სხვაობის ერთდროულ კონტროლის პრინციპზე.

5. ერთძარღვა ნკიშ შესრულებულ სამფაზა საკაბელო ქსელებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევის, მათ მიერ გამოწვეული სიმძლავრისა და ელექტროენერჯის დანაკარგების შეფასებისა

და კაბელის გამტარუნარიანობაზე გავლენის დადგენისათვის დამუშავებულია საკაბელო ქსელის ელექტრული შენაცვლების სქემა;

6. დასაბუთებულია, რომ ერთმარღვა კაბელებით შესრულებული სამფაზა საკაბელო ქსელებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესები, ერთფაზა ორგრაგნილა ძალოვან ტრანსფორმატორში მიმდინარე პროცესების ანალოგიურია. კერძოდ, ორმხრივ დამიწებული ეკრანის პირობებში მიმდინარე პროცესები მოკლედშერთვის რეჟიმში მომუშავე, ხოლო ერთმხრივ დამიწებული და ტრანსპოზიცირებული ეკრანის შემთხვევებში, უქმი სვლის რეჟიმში მომუშავე ძალოვანი ტრანსფორმატორის იდენტურია. შესაბამისად, ერთფაზა კაბელების კვლევებისას შეიძლება ძალოვანი ტრანსფორმატორების შენაცვლების სქემები გამოვიყენოთ შემოთავაზებული შენაცვლების სქემის პარამეტრების გათვალისწინებით;

7. დასაბუთებულია, რომ ორმხრივ ეკრანდამიწებულ ერთმარღვა კაბელებში ძირითადად დომინირებს კაბელის ეკრანში ძარღვში გამავალი დენის მიერ შექმნილი დენებით განპირობებული დანაკარგები. შესაბამისად, კაბელის თბურ რეჟიმს, გამტარუნარიანობას, ქსელის, მუშაობის საიმედოობასა და მდგრადობას, დიდ წილად, კაბელის ეკრანში წარმოქმნილი დანაკარგები განსაზღვრავს და დამოკიდებულია ეკრანის დამიწების მეთოდზე;

8. ერთმარღვა საკაბელო ქსელების ეკრანის დამიწების მეთოდების „დასექციონირებული ერთმხრივ დამიწებული ეკრანით“ და „შუადამიწებული ეკრანით“ სინთეზის საფუძველზე, დამუშავებულია ეკრანის დამიწების ოპტიმალური მეთოდი: „დასექციონირებული შუადამიწებული ეკრანით“, რომელიც უზრუნველყოფს კაბელის გადამაბვებისაგან დაზიანებას, ქსელის ძვირად ღირებული მოწყობილობების რაოდენობის, სამონტაჟო სამუშაოების მოცულობის შემცირებას და საექსპლუატაციო მომსახურების გამარტივებას.

## დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული ნაშრომები:

1. Чунашвили Б., Кобаля М., Петросян А., Гамрекелашвили Т., Ртвеладзе Н. Исследование электромагнитных процессов проходящих в однофазных и трехфазных и кабельных линиях в направлении определения потери мощности. „ენერჯია“, 2020, №4(96), ნაწილი I, გვ. 74–77.  
[http://www.energyonline.ge/2020/ENERGY\\_MPPE2020\\_4\\_96\\_2020\\_1.pdf](http://www.energyonline.ge/2020/ENERGY_MPPE2020_4_96_2020_1.pdf)
2. ჭუნაშვილი ბ., კობალია მ., პეტროსიანი ა., რთველაძე ნ. პარალელურად ჩართული სამძარღვა კაბელების ერთიდაიგივე ფაზების ძარღვებს შორის დატვირთვის დენის გადანაწილების გამოკვლევა და უთანაბრობის მიზეზების დადგენა. „ენერჯია“, 2021, №2(98), ნაწილი I, გვ. 39-42.  
<https://gtu.ge/pet/pdf/part%201.pdf>
3. რთველაძე ნ. ერთძარღვა პოლიეთილენის ნაქსოვი იზოლაციით შესრულებულ კაბელებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევა და ეკრანის დამიწების მეთოდის გავლენა ტემპერატურულ რეჟიმებზე. „საქართველოს საინჟინრო სიახლენი 3'21“, 2021, №3, ტ.94, გვ. 25–30.  
[https://dSPACE.nplg.gov.ge/bitstream/1234/375203/1/Saqartvelos\\_Sainjinro\\_Siakhleni\\_2021\\_N3.PDF](https://dSPACE.nplg.gov.ge/bitstream/1234/375203/1/Saqartvelos_Sainjinro_Siakhleni_2021_N3.PDF)

## Resume

The dissertation is dedicated to the study of electromagnetic processes in three-phase and single-phase cable lines made of woven polyethylene, determining the power and power losses caused by these processes in network elements, analyzing the level of reliability of the network power supply when using each of them, comparing them with each other, making relevant conclusions and determining the expediency of their use in specific conditions.

The first chapter studies the current state of the electricity supply system in Tbilisi and analyzes the emergency shutdowns in the network. It is important that the average voltage system of the city power supply includes 2191 units, 1558.1 MW total power, (10-6)/0.4 voltage transformer substations and their power supply network includes, 6-10 kV, 3967.76 km long cable network. It is important that a significant portion of cable networks are outdated and in need of urgent rehabilitation.

According to the daily report of the controller management service of the Tbilisi electricity supply network, in 2021 1567 power outages were registered due to technical malfunctions of the network. Emergency power cuts were mainly done for the following reasons: 173(11.0%) for breakdown elimination by service personnel, for breakdown liquidation as a result of relay protection -1370(87%), for unknown reasons -24(1.5%).

Research materials have shown that the reactive power factor of cable lines is significantly lower. As a result, the reactive power carried by the cables is 40-45% of the total capacity. It is also shown that the spectrum of high-order harmonics outgoing in cables is mainly dominated by 5th-order harmonics. Consequently, the additional heating of the cable insulation is mainly due to this harmonica.

In the second chapter, the current electromagnetic processes in the three-phase cables are investigated and an electrical replacement scheme is developed. Electromagnetic processes due to asymmetry of load current in cables are explored. The influence of high-order harmonics on electromagnetic processes generated as a result of load current distortion is studied. It is important that the active and reactive power and energy losses in a medium voltage cable network depend mainly on the cable design, the substance of the elements' materials, and the technical arrangement of the cable network.

The reasons for the unequal distribution of the load current between the three-phase cables connected in parallel and the separate phases are established.

Based on the qualitative and quantitative analysis of the parameters of the parallel connected cables' replacement circuit, it is established that the difference between output currents of the parallel-connected wires is mainly due to the inequality of the transient resistances of the contact at the beginning and end of the cable. A method for detecting inequality between the resistors of the same phases connected in parallel is proposed, which is based on the principle of

simultaneous control of the total output currents in the parallel circuits and the difference of output currents in the separate circuits. Studies have shown that despite the identity of the cable parameters and the same operating conditions, the currents in the cables of the same phases are significantly different from each other, and in some cases, the output current in a highly loaded cable significantly exceeds the allowable current under long-term heating conditions.

The third chapter examines the current electromagnetic processes in three-phase cable networks, identifies the causes of power and electricity losses and influence of screen grounding method on cable overheating and reducing conductivity.

Electrical replacement scheme of cable network has been developed to investigate the electromagnetic processes in three-phase cables made of single-phase woven polyethylene insulation, to estimate their power and power losses, and to determine the impact on cable conductivity. It is substantiated that the current electromagnetic processes in three-phase cable networks made of single-phase cables are similar to the current processes in a single-phase two winding power transformer. In particular, the processes in the case of a two-point grounding screen are identical to power transformer working in a short-circuit mode, and in the case of a single-point grounding and transposed screen, are identical to a power transformer working in idling mode. Accordingly, in the study of single-phase cables, power transformer replacement circuits can be used along with taking into account the parameters of the proposed replacement circuit. It is supported by evidence that in two-point screen-grounded single-phase cables mainly dominate losses due to currents generated by the current in the cable screen.

Based on the synthesis of screen grounding methods: "sectioned single-grounded screen" and "mid-grounded screen", a new screen grounding method has been developed: "sectioned mid-ground screen", which ensures damage protection from cable over voltages, reduces the number of expensive network devices, reduces the amount of installation work, and simplifies maintenance services.

Based on the conducted research, the following recommendations are proposed for the implementation of medium voltage cable networks of the power supply system.