

გ. მახარაძე, ვ. ბეგიაშვილი, ბ. ღარჩია

ელექტრული ენერგიის გაღაცემა და განაწილება



**გამომცემლობა „უნივერსალი“
თბილისი 2006**

ელექტრული ენერგიის გადაცემა და განაწილება. 2006. – 451 გვ.

წინამდებარე სახელმძღვანელოში გადმოცემულია ელექტრული ენერგიის გადაცემა-განაწილების საშუალებათა მოკლე აღწერა და მახასიათებელი პარამეტრები, გადაცემის რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშების მეთოდები და ამ პარამეტრების რეგულირების ხერხები.

წიგნში თანმიმდევრობით გაშუქებულია ყველა ის საკითხი, რაც გათვალისწინებულია ელექტროენერგეტიკული სპეციალობის ანალოგიური დასახელების დისციპლინის სასწავლო პროგრამით. ყოველ თავში, დაწყებული მესამედან, განხილულია შესაბამისი რიცხვითი მაგალითები, რაც აადვილებს ნათლად წარმოვიდგინოთ და გავაანალიზოთ თეორიული მსჯელობით მიღებული რეზულტატები.

წიგნი დაწერილია ელექტროენერგეტიკული სპეციალობის ბაკალავრ-მაგისტრებისთვის. იგი ღიდ დახმარებას გაუწევს, აგრეთვე, ელექტროენერგეტიკულ სფეროში დასაქმებულ ინჟინერ-პრაქტიკოსებს მათი თეორიული ცოდნის გაღრმავების საქმეში.

რეცენზენტები: პროფ. მ. სულაძე
ინჟ. დ. ქურციკიძე

© გ. მახარაძე, ვ. ბეგიაშვილი, ბ. დარჩია, 2006

გამომცემლობა „უნივერსალი“, 2006

თბილისი, 0128, ი. ჯანაშიას გამზ. 1, ☎: 29 09 60, 8(99) 17 22 30
E-mail: universal@internet.ge

ISBN 99940-61-03-8

წინათქმა

ელექტრობის შესახებ კაცობრიობამ ჯერ კიდევ ჩვენს ერაზდე იყოფა. იგი აღმოაჩინეს ძველ საბერძნეთში. მიუხედავად ამისა, ამ მიმართულებით მეცნიერული კვლევები მოგვიანებით ჩატარდა. XVIII საუკუნის მეორე და XIX საუკუნის პირველ ნახევარში აღმოჩენილი იქნა ელექტრობის მნიშვნელოვანი კანონები, რამაც თეორიული საფუძველი ჩაუყარა ელექტროტექნიკას, როგორც მეცნიერების დარგს და არსებითად მომწიფდა შეხედულება, რომ ელექტრული მოვლენები შეიძლება გამოყენებული იქნეს ტექნიკაში.

გამოჩენილი მეცნიერების პ. ერსტედის, ა. ამპერის, გ. ომის, კ. კირხჰოფის, მ. ფარადეის და სხვათა ფუნდამენტურმა გამოკვლევებმა შექმნეს ელექტროტექნიკის თეორიული ბაზა. მის საფუძველზე აგებული იქნა ელექტრული გენერატორები და ძრავები, რომელთა შემოაბის პრინციპები დღესაც იგივეა.

პრობლემად რჩებოდა ელექტროენერგიის გადაცემა შორ მანძილზე. ამ საქმეში დიდი გადაგრიანება მოახდინა 1888 წელს გ. ლოლივო-დობროვოლსკის მიერ სამუაზა ცვლადი დენის აღმოჩენამ. მისი ხელმძღვანელობით 1891 წელს აგებული იქნა 175 კმ სიგრძის ელექტროგადაცემის ხაზი 8500 ვ ძაბვაზე, რომლის საშუალებითაც გადაცემული იქნა 300 ცხენის ძალის (1კვ.ძ.=0,735კვტ) ელექტრული სიმძლავრე. მის მიერვე იმავე წელს გერმანიაში, მაინის ფრანკფურტში გამოფენის განათებისთვის აგებული იქნა მსოფლიოში პირველი ჰიდროელექტროსადგური (ჰესი).

საქართველოში ელექტროენერგეტიკის ისტორია XIX საუკუნის 80-იანი წლებიდან იწყება. პირველი მცირე სიმძლავრის თბოელექტროსადგური (თესი) გაშვებული იქნა 1887 წელს ქ. თბილისში, რომელიც ერთადერთი იყო 1895 წლამდე. 1895-97 წლებში გაშვებული იქნა თბოელექტროსადგური მანთაშევის ქარვასლასთან, სახაშინო ოპერის თაერის ახალ შენობასთან და ახლანდელი პ. მელიქიშვილის ქუჩაზე მდებარე თბილისის ღვინის სარდაფის განათებისთვის [60].

საქართველო წყლის ენერგორესურსების მიხედვით საგრძნობლად უსწრებს ევროპის ბევრ ქვეყანას. ჰიდროენერგორესურსების ხარჯზე ელექტრული ენერგიის მიღების საკითხებმა სპეციალისტთა ყურადღება მიიპყრო და XIX საუკუნის ბოლოსა და XX საუკუნის დამდეგს უკვე გადაიღვა პირველი მოკრძალებული ნაბიჯები წყლის იაფი ენერგიის პრაქტიკული გამოყენების მიმართულებით. აიგო რამდენიმე მცირე სიმძლავრის ჰიდროელექტროსადგური ძირითადად კურორტების მახლობლად: ბორჯომის

290ც.ბ. (1898წ.); ახალი ათონის 180ც.ბ. (1902წ.); გაგრის 410ც.ბ. (1904წ.); სოხუმის 600ც.ბ. (1908-1909წ.); ბიჭვინთის 45ც.ბ. (1913წ.); ბოლნისის 60ც.ბ. (1913წ.) და სხვა [60].

1905 წელს აიგო შედარებით მძლავრი თბილისის გრამეაის თბოელექტროსადგური დადგმული სიმძლავრით 1430 კვტ, რომლის დადგმული სიმძლავრე 1914 წლისთვის გაიზარდა 1680 კვტ-მდე.

1913 წლისთვის მოქმედი პიდროელექტროსადგურების (სულ 7 პესი) საერთო სიმძლავრე დაახლოებით 1,3 მგვტ-ს შეადგენდა, ხოლო ყველა ელექტროსადგურის (სულ 70-მდე თესი და პესი) საერთო სიმძლავრე აღწევდა 8 მგვტ-ს, წლიური გამომუშავებით დაახლოებით 20 მლნ კვტსთ.

პირველი შედარებით მძლავრი პიდროსადგური, რომელიც ექსპლუატაციაში შევიდა 1927 წლის 26 ივნისს, ეს იყო ზემოაჭალის (თბილისთან ახლოს) პესი (ზაპესი), დადგმული სიმძლავრით 4X3,2=12,8 მგვტ. სადგურის მეორე რიგის სამუშაოები დაიწყო 1931 წელს და დამთავრდა 1934 წელს. ამ პერიოდში ექსპლუატაციაში შევიდა კიდევ ორი აგრეგატი 12 მგვტ სიმძლავრის თითოეული.

შემდგომ წლებში ექსპლუატაციაში იქნა გაშვებული მთელი რიგი პიდრო და თბოელექტროსადგურები და გასული საუკუნის 80-იანი წლების ბოლოს საქართველოს ელექტროსადგურების დადგმულმა სიმძლავრემ 4700 მგვტ-ს მიაღწია. მათ შორის პესების 2700 და თბოსადგურების 2000 მგვტ-მდე. ელექტროენერგიის გამომუშავება 1989 წელს 15 მლრდ კვტსთ-ს შეადგინა, მათ შორის პესებზე 8,7 და თბოსადგურებზე 6,3.

ელექტროსადგურების მშენებლობის პარალელურად მიმდინარეობდა საპაერო ელექტროგადამცემის ხაზების მშენებლობა. რიონპესის პირველი რიგის გაშვებასთან (1932 წ.) დაკავშირებით ექსპლუატაციაში შევიდა პირველი 110კვ ძაბვის ელექტროგადამცემის ხაზი ზაპესი-რიონპესი (1933წ.), რომლითაც პარალელურ მუშაობაში ჩაირთო ზემო აჭალისა და რიონის პიდროსადგურები. ამ ხაზის ექსპლუატაციაში შესვლა უკავშირდება საქართველოს ელექტრო სისტემის შექმნის დასაწყისს. მას შემდეგ აშენდა მთელი რიგი 110, 220 და 500 კვ ძაბვის ელექტროგადამცემის ხაზები. პირველი 220კვ ძაბვის ხაზი აშენდა 1954 წელს - „ნავთლული-გყვარჩელსრესი“, ხოლო პირველი 500კვ ძაბვის ხაზი კი 1968 წელს - „თბილსრესი-შესტაფონი“.

1991-92 წლებიდან მოყოლებული თითქმის მთელი ათწლეულის განმავლობაში, საქართველოში განვითარებული ნეგატიური მოვლენების შედეგად, ენერგოსისტემის ზემოთ აღნიშნული პარამეტრები მკვეთრად შემცირდა და ქვეყნის ენერგეტიკული სექტორ-

რი ოცდამეერთე საუკუნეს მძიმე კრიზისული მდგომარეობით შეხვდა. კერძოდ, ელექტროსადგურების შესაძლო სიმძლავრე არ აღემატებოდა 1700-1800 მგვტ-ს, ხოლო მათ მიერ ელექტროენერგიის წლიური გამომუშავება კი დაახლოებით შეადგენდა 7,0 მლრდ კვტს-ს. მათ შორის ჰესებზე 6,0-6,5 მლრდ კვტს-მდე, ხოლო თბოსადგურებზე 1 მლრდ კვტს-მდე.

დღეისთვის საქართველოს ენერგეტიკაში აღდგენითი საშუალებები მიმდინარეობს. უახლოეს მომავალში დაიწყება ახალი ელექტროსადგურების მშენებლობა, გაიზრდება სისტემის დადგმული სიმძლავრე და როგორც შიგასასისტემო, ასევე სისტემათაშორისი ახალი ზემადალი ძაბვის ხაზების ექსპლუატაციაში გაშვების შემდეგ, ქვეყნის ენერგეტიკა აქტიურად ჩაერთდება იმ გლობალური ენერგეტიკული პროექტების განხორციელებაში, რომლებიც დაგეგმილია კავკასიის რეგიონში.

ქვეყნის ენერგეტიკული მეურნეობის განვითარების ღონე მნიშვნელოვან წილად განაპირობებს ეროვნული მეურნეობის განვითარების ღონესა და მოსახლეობის სოციალურ-ეკონომიკურ მდგომარეობას.

მეურნეობის ნებისმიერ დარგში ელექტრული ენერგიის ფართო გამოყენება განპირობებულია ამ სახის ენერგიის მკვეთრად გამოკვეთილი დადებითი თვისებებით: სისუფთავე; ტრანსპორტირების სიადვილე და სისწრაფე; მომხმარებლებს შორის განაწილების სიმარტივე; სხვა სახის ენერგიად გარდაქმნის ფართო შესაძლებლობა და ა.შ.

უნდა აღინიშნოს, რომ ელექტრული ენერგია უმუალოდ არ მოიხმარება. მანქანა-დანადგარებში მისი გარდაქმნით მიიღება მომხმარებლისთვის სასურველი სახის ენერგია. კერძოდ, ელექტრონატურებში - სხივური ენერგია, ელექტროდუმელებში - თბური ენერგია, ელექტროძრავებში - მექანიკური ენერგია და ა.შ.

ელექტრული ენერგიის წარმოება-გადაცემის პროცესს ახასიათებს განსაკუთრებული ტექნოლოგიური თავისებურებანი, რითაც ელექტრული სისტემა, მეურნეობის სხვა დარგებისაგან, მკვეთრად განსხვავდება. ამ თავისებურებათა რიცხეს მიეკუთვნება:

ა) ელექტროენერგიის წარმოება, მისი გადაცემა და მოხმარება, ანუ სხვა სახის ენერგიად გარდაქმნა, ხორციელდება პრაქტიკულად ღროის ერთსა და იმავე მომენტში. აქედან გამომდინარე, ელექტრულ სისტემაში ღროის ნებისმიერ მომენტში მუდამ უნდა არსებობდეს აქტიურ და რეაქტიულ სიმძლავრეთა ზუსტი ბალანსი. წინააღმდეგ შემთხვევაში სისტემის მდგრადი მუშაობა გამორიცხულია. მაშასადამე სისტემაში მუდამ უნდა გაგვაჩნდეს სიმძლავრის

სათანადო რეზერვი და შესაბამისი მარეგულირებელი მოწყობილობები;

ბ) ელექტრული სისტემაში გარდამავალი პროცესები მიმდინარეობს ძალიან სწრაფად, თითქმის სინათლის სიჩქარით. აქედან გამომდინარე, ელექტრული სისტემის ნორმალური ფუნქციონირებისთვის საჭიროა სწრაფმოქმედი სპეციალური ავტომატური მოწყობილობები, რომელთა დახმარებით თავიდან ავიცილებთ სისტემაში წარმოქმნილი ავარიის შემდგომ განვითარებას;

გ) ელექტრული სისტემა მჭიდრო კავშირშია მეურნეობის ყველა დარგთან და, აქედან გამომდინარე, სისტემის მუშაობისას წარმოქმნილი ნებისმიერი ხარვეზი მტკივნეულად შეიგრძნობა მომხმარებელთა მხრიდან. ეს თავისებურება აქტუალურს ხდის მომხმარებელთა კვების საიმედოობის საკითხს, რაც თავის მხრივ მოითხოვს ეკონომიკურად მიზანშეწონილ რეზერვს ენერგიის წარმოება-გადაცემა-განაწილების ყველა რგოლში.

აღნიშნული ტექნოლოგიური თავისებურებანი და სისტემაში შემავალი ენერგოდანადგარების ექსპლუატაციის სპეციფიური ხასიათი, მათი მუშაობის საიმედოობისა და მომხმარებელთა უწყვეტი ელექტრომომარაგების მოთხოვნა განსაკუთრებული სიმწვავეით სვამს ახალგაზრდა სპეციალისტთა და ელექტროენერგეტიკაში დასაქმებულ მუშაკთა კვალიფიკაციის ამაღლების საკითხს.

საქართველოში ელექტრული ენერგიის გადაცემა-განაწილების სასწავლო კურსი საქართველოს პოლიტექნიკური ინსტიტუტის (ახლანდელი ტექნიკური უნივერსიტეტი) შექმნის დღიდან (1928 წ.) იკითხება. თავდაპირველად ეს კურსი იკითხებოდა „ელექტრული ქსელების და სისტემების“ სასწავლო დისციპლინის სახელწოდებით. ამჟამად მას ეწოდება „ელექტრული ენერგიის გადაცემა და განაწილება“.

აღნიშნული მიმართულებით ქართულ ენაზე პირველი სახელმძღვანელო „ელექტრული ქსელებისა და სისტემების“ სახელწოდებით გამოცემული იყო 1972 წელს პროფესორების ი. ქურდიანისა და გ. ქურციკიძის მიერ [59]. შემდგომ, 1987-2005 წლებში, როგორც ინდივიდუალურად, ასევე თანაავტორებთან ერთად, პროფ. გ. მახარაძის მიერ გამოცემული იქნა რამდენიმე დამხმარე სახელმძღვანელო [27, 28, 29, 32, 33, 35, 38, 40, 41, 42], სადაც ამა თუ იმ სისრულით განიხილება ელექტრული ენერგიის გადაცემისა და განაწილების საკითხები.

წინამდებარე სახელმძღვანელოში, რომელიც ავტორთა მრავალწლიანი პედაგოგიური და პრაქტიკული გამოცდილების საფუძველზეა დაწერილი, პრაქტიკულად გაშუქებულია „ელექტრული

ენერგიის გადაცემა და განაწილების“ დიისციპლინის სასწავლო პროგრამით გათვალისწინებული ყველა საკითხი. სახელმძღვანელო მიზნად ისახავს დაეხმაროს ელექტროენერგეტიკული სპეციალობის სტუდენტ-ბაკალავრებს ელექტრული ენერგიის გადაცემისა და განაწილების პრობლემების სწორად დასმასა და გადაწყვეტაში, შესაბამისი უნარ-ჩვევების გამომუშავებაში და კვალიფიცირებულ ინჟინერ-ელექტრიკოსებად ჩამოყალიბებაში. იგი დიდ დახმარებას გაუწევს, აგრეთვე, ამავე სპეციალობის მაგისტრანტებსა და ექსპლუატაციის სფეროში მომუშავე ინჟინერ-ელექტრიკოსებს.

თავი 1 ელექტრული სისტემის ზოგადი დახასიათება

1.1 ელექტრული ენერგიის გადაცემის პრინციპული სქემა

ელექტრული სისტემა (ელექტროენერგეტიკული სისტემა) ენერგეტიკული სისტემის შემადგენელი ნაწილია, რომლის დანიშნულებაა ელექტრული ენერგიის წარმოება, გადაცემა და განაწილება. თავის მხრივ ენერგეტიკული სისტემა წარმოადგენს ყველა იმ მოწყობილობებისა და დანადგარების ერთობლიობას, რომლებიც მონაწილეობენ ყველა სახის ენერგიის მიღება-გარდაქმნა-გადაცემა-განაწილება-მომხარების სფეროში. ამრიგად, ენერგეტიკული სისტემის შემადგენლობაში შედის ორთქლის ქვაბები, ტურბინები, გენერატორები, ბოილერები, ელექტრული და თბური ენერგიების გადაცემის ხაზები და მაგისტრალები, გრანსფორმატორები, ელექტრული ძრავები, განათებისა და გამახურებელი ხელსაწყოები, დენის გარდამსახები, მანქანა-დანადგარები (ჩარხები, ტუმბოები, ვენტლატორები და ა.შ.). ენერგეტიკულ სისტემას ასევე მიაკუთვნებენ ენერგორესურსების წყაროებს (ჰიდროენერგეტიკული რესურსი; ბუნებრივი აირის, თხევადი და მყარი საწვავის საბადოები; ატომბირთვის ენერგია და ა.შ.).

ზოგადად, ელექტრომომარაგების სისტემაში შეიძლება გამოვყოთ მოწყობილობათა სამი ჯგუფი: ელექტრული ენერგიის წარმოების მიხედვით – ელექტრული სადგურები (კეების წყაროები), ელექტროენერგიის გადაცემა-განაწილების მიხედვით – ელექტრული ქსელები: ელექტრული ენერგიის მოხმარება-გამოყენების მიხედვით – ელექტრომიმღებები (მომხმარებლები).

ელექტრული ენერგიის მიღება წარმოებს ელექტროსადგურებზე, რომლებიც გამოყენებული პირველადი ენერგორესურსის მიხედვით შეიძლება იყოს:

- თბოელექტროსადგურები (თესი), სადაც პირველადი ენერგორესურსის სახით გამოიყენება ბუნებრივი აირი, თხევადი ან მყარი საწვავი;

- ჰიდროელექტროსადგურები (ჰესი), სადაც პირველადი ენერგორესურსის სახით გამოიყენება წყლის პოტენციური ენერგია;

- ატომური ელექტროსადგურები (აესი), სადაც პირველადი ენერგორესურსების სახით გამოიყენება ატომბირთვის დამლის შედეგად მიღებული თბური ენერგია და ა.შ.

ელექტრული ენერგიის გადაცემას თან ახლავს სიმძლავრისა და ძაბვის დანაკარგები ელექტროგადაცემის ხაზებსა და ტრანსფორმატორებში

$$\Delta P = 3 I^2 R \quad \text{და} \quad \underline{\Delta U} = \sqrt{3} I Z,$$

სადაც:

ΔP - აქტიური სიმძლავრის დანაკარგი ელექტროგადაცემაში; $\underline{\Delta U}$ - ძაბვის ვარდნა ამავე გადაცემაში; I , $\underline{I}$ - დაგვირთვის დენის მოდული, კომპლექსური მნიშვნელობა; $Z = R + jX$ - გადაცემის სრული წინაღობა; R , X - ელექტროგადაცემის აქტიური და რეაქტიული წინაღობა.

თუ ამ ფორმულებში დაგვირთვის დენს შევცვლით დაგვირთვის სიმძლავრით

$$\underline{I} = \frac{P - jQ}{\sqrt{3}U} \quad \text{ანუ} \quad I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3}U},$$

მივიღებთ

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R \quad \text{და} \quad \Delta U = \frac{PR + QX}{U}$$

სადაც:

P - დაგვირთვის აქტიური სიმძლავრე; Q - დაგვირთვის რეაქტიული სიმძლავრე; ΔU - ძაბვის დანაკარგი ელექტროგადაცემაში (ძაბვის ვარდნის გრძივი შემდგენი); U - ელექტროგადაცემის მუშა ძაბვა.

ანუ პროცენტებში

$$\Delta P\% = \frac{P(1 + \text{tg}^2 \varphi)}{U^2} R \cdot 100 \quad \text{და} \quad \Delta U\% = \frac{P(R + X \text{tg} \varphi)}{U^2} \cdot 100,$$

აქ $\text{tg} \varphi$ - რეაქტიული დაგვირთვის კოეფიციენტი - $\text{tg} \varphi = Q/P$; აქტიური (ობური) წინაღობა

$$R = \frac{\rho \ell}{F},$$

ხოლო რეაქტიული წინაღობა

$$X = x_0 \cdot \ell,$$

სადაც: ρ - სადენის მასალის ხვედრითი წინაღობა; ℓ - ელექტროგადაცემის სიგრძე; F - სადენის განივი კვეთი; x_0 - 1კმ სიგრძის ხაზის რეაქტიული წინაღობა.

მამასადამე, სიმძლავრისა და ძაბვის დანაკარგების პროცენტული მნიშვნელობების საანგარიშო გამოსახულებებს აქვთ შემდეგი სახე:

$$\Delta P\% = \frac{P\ell}{U^2} \cdot \frac{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)\rho}{F} \cdot 100 \quad (1.1)$$

და

$$\Delta U\% = \frac{P\ell}{U^2} \left(\frac{\rho}{F} + x_0 \operatorname{tg} \varphi \right) \cdot 100 \quad (1.2)$$

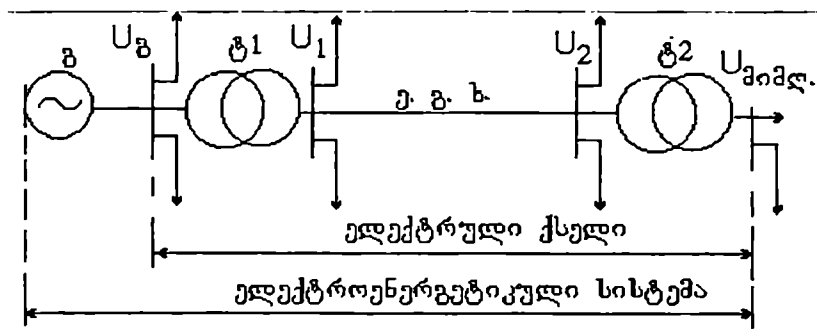
როგორც ამ გამოსახულებებიდან ჩანს, სხვა ერთნაირ პირობებში ელექტროგადაცემაში სიმძლავრისა და ძაბვის დანაკარგების პროცენტული მნიშვნელობები გადასაცემი სიმძლავრისა და ელექტროგადაცემის სიგრძის პროპორციულად იზრდება. ძაბვასთან მიმართებაში კი დანაკარგები ძაბვის კვადრატულპროპორციულად მცირდება.

ელექტროენერგიის მიმღების მუშაობის რეჟიმი გათვლილია ძაბვის გარკვეულ მნიშვნელობაზე. ამ მნიშვნელობიდან ძაბვის გადახრისას მომხმარებლის მუშაობის ეკონომიკური მაჩვენებლები უარესდება. გარდა ამისა, ელექტროგადაცემაში ელექტრული ენერგიის დანაკარგების დასაფარავად საჭიროა ელექტროსადგურებზე გაუზარდოთ პირველადი ენერგორესურსის ხარჯი, რაც უარყოფითად მოქმედებს ელექტროსისტემის მუშაობის ეკონომიკურ მაჩვენებლებზე.

სინქრონული გენერატორები მზადდება შედარებით დაბალ ნომინალურ ძაბვაზე (27კვ-მდე). შედარებით დიდ მანძილზე (რამდენიმე ათეული კმ და მეტი) შეადრებით დიდი სიმძლავრის (რამდენიმე ათეული თუ ასეული მგვტ და მეტი) გადაცემისას სიმძლავრისა და ძაბვის დანაკარგების შემცირების მიზნით ეკონომიკურად უფრო მიზანშეწონილი აღმოჩნდა ამალღებული ძაბვის გამოყენება.

აქედან გამომდინარე, ელექტრული ენერგიის გადაცემის პრინციპულ სქემაში გადაცემის თავსა და ბოლოში ჩართულია სამალღებელი და სადაბლღებელი გრანსფორმატორები (ნახ.1.1). ამ სქემის თანახმად ელექტროსადგურებზე წარმოებული ელექტრული ენერგიის ნაწილი შეიძლება გადაცემული იქნეს შედარებით დაბალ ძაბვაზე, ხოლო დანარჩენი ნაწილი კი ამალღებული ძაბვის საშუალებით გადაეცემა შედარებით შორ მღებარე მომხმარებლებს.

გადაცემის მიმღებ ბოლოში ხდება ძაბვის დადაბლება მიმღების-
თვის საჭირო დონემდე.



ნახ. 1.1 ელექტრული ენერგიის გადაცემის პრინციპული სქემა:
გ-ელექტრული გენერატორი; ტ1, ტ2-სამაღლებელი და
სადაბლებელი ტრანსფორმატორები; ე.გ.ხ.-ელექტროგადაცემის ხა-
ზი; $U_{გ}$ -გენერატორის ძაბვა; U_1, U_2 - ძაბვები ხაზის თავსა და ბო-
ლოში; $U_{მიმღ.}$ - ელექტრომიმღების ძაბვა

1.2 ელექტრული ქსელების დანიშნულება. აღნიშვნები. ტერმინოლოგია

ელექტრული ქსელი წარმოადგენს იმ დანადგარ-მოწყო-
ბილობათა ერთობლიობას, რომელთა დანიშნულებაა ელექტრული
ენერგიის გადაცემა კვების წყაროებიდან მომხმარებელამდე. ამ ამო-
ცანის შესრულების სირთულე დაკავშირებულია, ერთი მხრივ, მომ-
ხმარებელთა დიდ რაოდენობასთან და, მეორე მხრივ, კვების წყა-
როებიდან ამ მომხმარებელთა ტერიტორიულ დამორეხებასთან.

ელექტრული ქსელი შეიძლება იყოს საკმარისად რთული. მის
მახასიათებელ პარამეტრებზე და მუშაობის რეჟიმზე დამოკიდებუ-
ლია მომხმარებელთან მიწოდებული ელექტრული ენერგიის ხარის-
ხი. ამიტომ, ელექტრული ქსელები გულდასმით უნდა გაანგარიშდეს
და დაგეგმარდეს, კვალიფიციურად აიგოს და, ასევე, კვალიფი-
ციურად უნდა ხდებოდეს მათი ექსპლუატაცია.

ელექტრული ქსელის მუშაობის რეჟიმის დასახასიათებლად
გამოიყენება სრული სიმძლავრის მნიშვნელობა S , რომელიც სამუშაო
სიმძლავრის სისტემისთვის განისაზღვრება ფორმულით

$$\underline{S} = \sqrt{3} \underline{U} \cdot \underline{I}' = P + jQ, \text{ მგვა,} \quad (13)$$

სადაც: $\underline{I}$ - დენის კომპლექსური მნიშვნელობა, კა; $\underline{U}$ - ხაზური ძაბვის კომპლექსური მნიშვნელობა, კვ; P - აქტიური სიმძლავრე, მგვტ; Q - რეაქტიული სიმძლავრე, მგვარ.

აქტიური სიმძლავრე (მისი უცვლელი მნიშვნელობისას) გაზრადებული დროზე გვაძლევს ელექტრული ენერგიის რაოდენობას ამ დროში

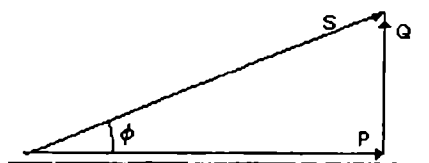
$$\mathfrak{W} = P \cdot t.$$

რეაქტიული სიმძლავრე წარმოადგენს ცვლადი დენის წრედში ენერგიის მიმოცვლის მახასიათებელი სურათის შემავსებელ სიდიდეს. ჩვეულებრივ, რეაქტიული სიმძლავრის მიმართ სარგებლობენ ანალოგიური ცნებით, როგორც აქტიურის მიმართ, თუმცა ის თავისი ფიზიკური თვისებებით მნიშვნელოვნად განსხვავდება აქტიური სიმძლავრისაგან [32; 46].

(13) გამოსახულების შესაბამისად, შეიძლება ავაგოთ სიმძლავრეთა სამკუთხედი (ნახ. 12), რომლის მიხედვით გვაქვს:

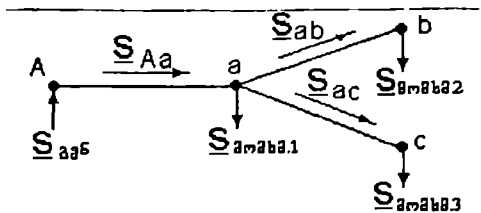
$$\left. \begin{aligned} S^2 &= P^2 + Q^2 \\ P &= S \cdot \cos \varphi \\ Q &= S \cdot \sin \varphi \\ Q &= P \cdot \operatorname{tg} \varphi \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

სადაც: $\cos \varphi$ - აქტიური სიმძლავრის კოეფიციენტი; $\operatorname{tg} \varphi$ - რეაქტიული სიმძლავრის კოეფიციენტი; φ - ძერის კუთხე ძაბვისა და დენის ვექტორებს შორის.



ნახ.12 სიმძლავრეთა სამკუთხედი

ელექტრული ქსელებისთვის გამოიყენება გრაფიკული აღნიშვნა ცალხაზოვანი სქემის სახით, სადაც ელექტრული ენერგიის გენერაციისა და მოხმარების ადგილებს (კვანძებს) აჩვენებენ გამსხვილებული წერტილებით ან პატარა წრეწირების სახით, ხოლო ენერგიის გადაცემის გზას (ელექტროგადაცემის ხაზები) გეომეტრიული ხაზების სახით (ნახ. 13).



ნახ.13 მარტივი ელექტრული ქსელის გრაფიკული აღნიშვნა

გენერაციის კვანძებში გენერაცია ნაჩვენებია კვანძისკენ მიმართული ისრით, ხოლო მოხმარების კვანძებში დატვირთვა ნაჩვენებია კვანძიდან გამომავალი ისრით. ასევე ისრებით აჩვენებენ ენერგიის გადაცემის მიმართულებას. ამასთან, იმ კვანძს, საიდანაც გამოდის ენერგიის გადაცემის მიმართულების აღნიშვნელი ისარი, ხაზის თავს უწოდებენ, ხოლო კვანძს, რომლისკენაც მიმართულია აღნიშნული ისარი, ხაზის ბოლოს.

სიმძლავრის დანაკარგების გამო სრული სიმძლავრე ხაზის თავსა და ბოლოში სხვადასხვაა და, შესაბამისად, აღნიშნავენ $\underline{S}^I$ და $\underline{S}^{II}$ სიმბოლოებით. შესაბამისად, სიმძლავრის დანაკარგი ხაზში

$$\Delta \underline{S} = \underline{S}^I - \underline{S}^{II}.$$

ელექტროგადაცემის უბანში ადგილი აქვს ძაბვის ვარდნას

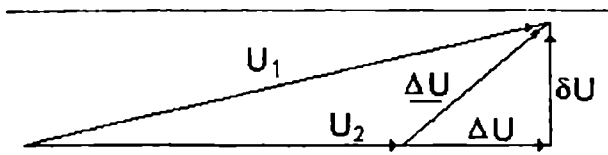
$$\underline{U}_1 - \underline{U}_2 = \underline{\Delta U} = \Delta U + j\delta U,$$

სადაც: ΔU - ძაბვის ვარდნის გრძივი შემდეგნი, δU - ძაბვის ვარდნის განივი შემდეგნი.

შესაბამისად, უბნის თავისა და ბოლოს ძაბვებს შორის კავშირი ჩაიწერება სახეში

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \Delta U + j\delta U. \quad (15)$$

ამ გამოსახულების თანახმად ძაბვების დიაგრამას აქვს 1.4 ნახაზზე ნაჩვენები სახე, სადაც $\underline{U}_2$ ძაბვის ვექტორი მიმართულია ნამდვილ რიცხვითა ღერძის გასწვრივ.



ნახ.14 ძაბვების დიაგრამა ელექტროგადაცემის უბნისთვის

1.3 ელექტროგადაცემის ნომინალური ძაბვა

ელექტრომოწყობილობებისა და დანადგარების ნომინალური ძაბვა ეწოდება ძაბვის იმ მნიშვნელობას, რომელზედაც გაანგარიშებულია და დამზადებულია მოცემული მოწყობილობა-დანადგარი ნორმალურ რეჟიმში ხანგრძლივი და ეუქეტური მუშაობისთვის. ელექტროგადაცემის ნომინალური ძაბვის სიდიდე გავლენას ახდენს მის ტექნიკურ მახასიათებლებზე – გადაცემის ზღვრული სიმძლავრე, ზღვრული სიგრძე, სიმძლავრისა და ენერგიის დანაკარგები, ძაბვის დანაკარგები და სხვა.

ელექტროგადაცემის ამა თუ იმ ხაზის ნომინალური ძაბვის ოპტიმალური მნიშვნელობის განმსაზღვრელი ფაქტორებია: მაქსიმალური გადასაცემა სიმძლავრე; ხაზის სიგრძე; სიმძლავრისა და ენერგიის გადაცემის რეჟიმი; ხაზში დაკარგული ენერგიის ღირებულება; მოწყობილობათა ტექნიკური და ეკონომიკური მაჩვენებლები; არსებული ქსელის განვითარების დონე; ქსელში არსებული ხაზების ნომინალური ძაბვის საფეხური და სხვა.

ხაზის ნომინალური ძაბვის დადგენა რთულ ტექნიკურ-ეკონომიკურ ამოცანას წარმოადგენს, რომლის გადაჭრა დაკავშირებულია სადენის განიკეთის, ფაზაში სადენების რაოდენობის, ჯაჭვთა რიცხვის შერჩევასთან და მოითხოვს კომპლექსურ გადაწყვეტას. შედარებით დაბალი ნომინალური ძაბვის ხაზი უფრო იაფია, მაგრამ ენერგიის დიდი დანაკარგების გამო ხასიათდება ამაღლებული საექსპლუატაციო ხარჯებით. მაღალი ნომინალური ძაბვის შემთხვევაში მცირდება ენერგიის დანაკარგები და გამგარი მასალის ხარჯი (გარდა იმ შემთხვევებისა, როცა სადენის განიკეთი ხაზზე შერჩეულია საერთო გვირგვინის თავიდან აცილების მიზნით (§3.2)), მარტივდება ელექტრული ქსელის შემდგომი განვითარების ამოცანა, მაგრამ იზრდება მშენებლობისა და მომსახურების ხარჯები.

1.1 ცხრილში მოცემულია საერთაშორისო ელექტროტექნიკური კომისიის მიერ რეკომენდირებული 50 ჰერცი სიხშირის ცვლადი დენის დანადგარების სტანდარტული ხაზური ძაბვები [56].

სინქრონული გენერატორების ნომინალური ძაბვა მასთან მიერთებულ ქსელში ძაბვის დანაკარგების კომპენსაციის მიზნით, ამ ქსელის ნომინალურ ძაბვასთან შედარებით ამაღლებულია 5%-ით. გარდა ცხრილში ნაჩვენები ძაბვებისა მძლავრი სინქრონული გენერატორებისთვის მიღებულია კიდევ შემდეგი ნომინალური ძაბვები: 13,8; 15,75; 18; 24 და 27 კვ.

**ცხრილი 1.1 - სამუშაო ცვლადი დენის დანადგარების
ფაბრიკის (ხაზური) ნომინალური ძაბვები**

ნომინალური ძაბვა, კვ	გენერატორები და სინქრონული კომპენსა- ტორები	ტრანსფორმატორები და ავტოტრანსფორმატორები				მაქსიმალური მუშა ძაბვა
		დატვირთვის ქვეშ ძაბვის რეგული- რების გარეშე (ПБВ)		დატვირთვის ქვეშ ძაბვის რეგული- რებით (РПН)		
		პირვე- ლადი გრადი- ლი	მეორე- ული გრადი- ლი	პირველ- ადი გრადი- ლი	მეორე- ული გრადი- ლი	
3	3,15	3; 3,15	3,15; 3,3		3,15	3,6
6	6,3	6; 6,3	6,3; 6,6	6,0; 6,3	6,6; 6,3	7,2
10	10,5	10; 10,5	10,5; 11	10,0; 10,5	11,0; 10,5	12,0
20	21,0	20	22	20; 21	22	24,0
35		35	38,5	35; 36,75	38,5	40,5
110			121	110; 115	115; 121	126
150			165	158	158	172
220			242	220; 230	230; 242	252
330		330	347	330	330	363
500		500	525	500		525
750		750	787	750		787
1150				1150		1200

ტრანსფორმატორებისა და ავტოტრანსფორმატორებისთვის სტანდარტით გათვალისწინებულია ძაბვათა ორი სკალა: ტრანსფორმატორებისთვის, რომლებიც აღჭურვილია დატვირთვის ქვეშ რეგულირებით (РПН რეგულირება) და ტრანსფორმატორებისთვის, რომლებზედაც ძაბვის მარეგულირებელი გამოყენების გადართვა წარმოების მხოლოდ ტრანსფორმატორის ქსელიდან ამორთვის შემდეგ (ПБВ რეგულირება).

ტრანსფორმატორები და ავტოტრანსფორმატორები РПН რეგულირებით მზადდება მაღალი ძაბვის გრადიენტზე მოწყობილი ძაბვის მარეგულირებელი გამოყენებით. მათი საშუალებით შეიძლება ძაბვის რეგულირება ტრანსფორმატორის ქსელიდან ამორთვის გარეშე $\pm(12-16)\%$ -ის ფარგლებში 1,5-2% ბიჯით. ПБВ რეგულირებით ძირითადად მზადდება საგენერატორო ძაბვების სამალბებელი

გრანსფორმატორები, რომლებიც უზრუნველყოფენ ძაბვის რეგულირებას $\pm 2X2,5\%$ -ს ფარგლებში.

გრანსფორმატორებისა და ავტოგრანსფორმატორების პირველადი და მეორეული გრადნილების ნომინალური ძაბვები შეესაბამება გრადნილის ძირითად (0%-იან) გამოყენების უქმი სვლის რეჟიმში. სამალღებელი გრანსფორმატორის შემთხვევაში პირველადი გრადნილი წარმოადგენს ენერგიის მიმღებს და ამიგომ, მისი ნომინალური ძაბვა მასთან მიერთებული გენერატორის ან მკვებავი ქსელის ნომინალურ ძაბვის ტოლია ან მაღალია მასზე 5%-ით. მეორეული გრადნილი, მასთან მიერთებული ქსელისთვის, წარმოადგენს მკვებავ გრადნილს და ამიგომ მისი ნომინალური ძაბვა, თვით გრანსფორმატორში და ქსელში ძაბვის დანაკარგების გარკვეულ წილად კომპენსაციისთვის, აიღება 5-10%-ით უფრო მაღალი, ვიდრე ქსელის ნომინალური ძაბვა.

14 ნომინალურ ძაბვათა გამოყენების ფარგლები

დაბალი ძაბვის მანაწილებელ ქსელში გამოიყენება 380 და 600 ვ ნომინალური ძაბვა. 380 ვ გავრცელებულია საქალაქო და სასოფლო ქსელების გარე და შიგა განათების სისტემებში და, აგრეთვე, მცირე სიმძლავრის ძრავული მომხმარებლების კვებისთვის. 600 ვ ნომინალური ძაბვა გამოიყენება მხოლოდ ძალოვანი დატვირთვის კვებისთვის.

3, 20 და 150 კვ ძაბვები ნაკლებად გამოყენებულია და ახლად-პროექტირებისას არარეკომენდირებულია. 6-10 კვ ძაბვაზე აიგება ქალაქების, სოფლებისა და სამრეწველო საწარმოთა ელექტრომომარაგების ქსელები, რომელიც გამოიყენება, ძირითადად, 380 ვ ძაბვის კვების ცენტრების შესაქმნელად. 10 კვ ძაბვის ქსელი უფრო ფართოდაა გავრცელებული, ვიდრე ნკვ. ეს უკანასკნელი გამოიყენება იმ შემთხვევაში, როცა სამრეწველო საწარმოთა ელექტრულ ძრავებს გააჩნიათ ამ საფეხურის ნომინალური ძაბვა.

35 კვ ძაბვა გამოიყენება ძირითადად სოფლის ადგილებში 6-10 კვ ძაბვის კვების ცენტრების შესაქმნელად (გრანსფორმატორები 35/0,38 კვ ძაბვაზე იშვიათად მზადდება).

110 კვ ძაბის გამოყენებით ხორციელდება ქალაქების, სამრეწველო საწარმოთა, ელექტროფიციტირებული რკინიგზის მომხმარებელთა ელექტრომომარაგება, შედარებით მცირე სიმძლავრის

ელექტროსადგურებიდან სიმძლავრის გაცემა და, ზოგჯერ, სოფლის ადგილებში უფრო დაბალი ძაბვის კვების ცენტრების შექმნა.

220 კვ ძაბვა გამოიყენება 110 კვ ძაბვის კვების ცენტრების შესაქმნელად და საშუალო სიმძლავრის ელექტროსადგურებიდან სიმძლავრის გასაცემად.

330 კვ ძაბვა 500 კვ ძაბვის ექსპლუატაციაში შეყვანამდე გამოიყენებოდა სისტემაწარმომქმნელი ქსელის ასაგებად, მძალერი ელექტროსადგურებიდან სიმძლავრის გასაცემად და სისტემათაშორისი კავშირებისთვის. მომხმარებელთა დატვირთვის და ელექტროსადგურების სიმძლავრეთა ზრდასთან ერთად 330 კვ ძაბვა თანდათან კარგავს სისტემაწარმომქმნელი ქსელისა და სისტემათაშორისი კავშირის ფუნქციას, რომელიც გადადის 500 და 750 კვ ძაბვის ფუნქციებში. ზოგიერთ რეგიონებში (ამერბაიჯანი, დაღესტანი) 330 კვ ძაბვა ღლესაც წარმოადგენს სისტემაწარმომქმნელი ქსელის ძაბვას.

500-750 კვ ძაბვა გამოიყენება სისტემაწარმომქმნელი ქსელებისა და 220 კვ ძაბვის კვების ცენტრების შესაქმნელად, მძლავრი ელექტროსადგურებიდან სიმძლავრეთა გადასაცემად და სისტემათაშორისი კავშირებისთვის.

რუსეთის გერიგორიაზე ექსპლუატაციაშია 1150 კვ ძაბვა, რომლის დანიშნულებაა დიდი სიმძლავრის (5000-8000 მგვგ) შორ მანძილზე (2000-3000 კმ) გადაცემა. ზოგიერთ ქვეყანაში (დასავლეთ ევროპა, თურქეთი, ირანი) გამოყენებაშია 400 კვ ძაბვის ელექტროგადაცემა, როგორც სისტემაწარმომქმნელი ქსელის ასაგებად, ასევე სისტემათაშორისი კავშირისთვის.

ცხრილში 12 მოცემულია სხვადასხვა ნომინალური ძაბვის ელექტროგადაცემის ხაზების ეკონომიკური დატვირთვები და გადაცემის ზღვრული სიგრძე იმ განიკვეთის სადენებისთვის, რომლებიც ფართოდ გამოიყენება ამ ძაბვის ხაზებზე.

15 ელექტრული ქსელების კლასიფიკაცია

ელექტრული ქსელები, რომლებიც ელექტრული ენერგიის გადაცემა-განაწილების ფუნქციას ასრულებს, შედგება საპაერო და საკაბელო ელექტროგადაცემის ხაზებისაგან, ქვესადგურებისაგან, მანაწილებელი და გადამრთველი პუნქტებისაგან. ელექტროგადაცემის ხაზების დანიშნულებაა ელექტრული ენერგიის გადაგანა ქსელის ერთი კვანძიდან მეორემდე. მანაწილებელ და გადამრთველ პუნქტებში ხდება მიწოდებული ელექტრული ენერგიის განაწილება

სხვადასხვა მომხმარებლებს შორის ძაბვის შეუსვლელად, ხოლო ქვესადგურებში კი წარმოებს მიწოდებული ელექტრული ენერგიის ნომინალური ძაბვის დადაბლება (ან ზოგ შემთხვევაში ამაღლება) და შემდგომი განაწილება მომხმარებლებს შორის.

**ცხრილი 12 6-1150კვ ხაზების ეკონომიკური და დასაშვები
ღატეირთვები და გადაცემის ზღვრული სიგრძე**

ნომინალური ძაბვა, კვ	სადენის განიგვმით, მმ ²	მკონომიკური დატვირთვა, მგვტ ($\gamma_{\text{მკ}}=1,1$ ა.მგვტ და $\cos\phi=0,85$)	დასაშვები დატვირთვა, მგვტ ($\gamma_{\text{მკ}}=1,1$ ა.მგვტ და $\cos\phi=0,85$)	გადაცემის ზღვრული სიგრძე, კმ ($P=P_{\text{მკ}}$)		
				მ.კ.კ		ძაბვის დანაკარგი $\Delta U=5\%$
				0,9	0,98	
6	25-50	0,25-0,50	1,2-2,4	8,0	1,6	4,8-4,2
10	25-50	0,40-0,80	2,4-4,0	14,0	2,8	8,1-7,0
20	25-70	0,80-2,30	4,1-5,6	28,0	5,6	16,2-12,5
35	25-95	1,43-5,42	8,2-17,0	48,0	9,6	28,3-19,5
110	70-185	12,6-33,2	43,9-82,5	152	30,4	68,9-43,7
150	150-300	36,7-73,4	99,3-152,2	207	41,0	67,1-43,6
220	240-400	86,1-143,4	232,2-316	304	61,0	74,4-51,9
330	2x240-2x400	258,2-430	592-805	455	91,0	
500	3x300-3x500	733-1223	1544-2084	690	138	
750	4x300-4x500	1467-2445	3088-4235	1040	204	
1150	8x300-8x500	4500-7500	9470-12987	1600	320	-

თანამედროვე ელექტრული სისტემის ელექტრული ქსელები გამოირჩევა საკმარისად რთული კონფიგურაციით და დიდი რაოდენობის სხვადასხვა ხასიათის ელემენტებით. ამ პირობებში ქსელების კლასიფიკაცია და მათი ერთმანეთისაგან გარკვეული გამოიყვანა შეიძლება განვახორციელოთ სხვადასხვა თვისებებისა და მარკენებლების გამოყენებით. კერძოდ, ქსელების კლასიფიკაცია შეიძლება მოვახდინოთ დენის გვარობის, ნომინალური ძაბვის დონის,

კონსტრუქციული შესრულების, კონფიგურაციის და დანიშნულების მიხედვით.

დენის გვარობის მიხედვით გვაქვს ცვლადი და მუდმივი დენის ქსელები.

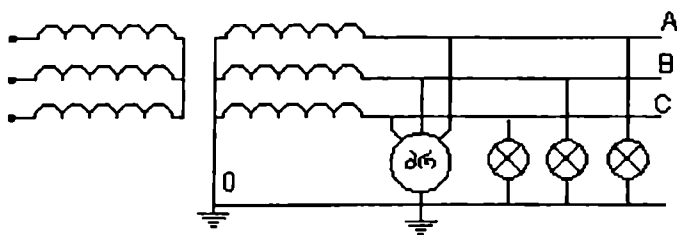
ცვლადი დენის ქსელის ძირითად ნაწილს გააჩნია სამფაზა შესრულება. 380 ვ ძაბვაზე ფართოდ გავრცელებულია ოთხსადენიანი სამფაზა სისტემა ნეიტრალის ყრუ ჩამიწებით (ნახ.1.5). ამ ქსელში გვაქვს 380/220 ვ ძაბვა (მრიცხველი გვიჩვენებს ქსელის ხაზურ ძაბვას, მნიშვნელი კი ფაზურს).

ასეთ ქსელებში ელექტრული ნათურები და სხვა ერთფაზა საყოფაცხოვრებო დანიშნულების ხელსაწყოები (უთო, ელექტროქურა, მაციყარი და ა.შ.) ჩაირთვება ერთერთ ფაზასა და ნულოვან სადენს შორის (ფაზურ ძაბვაზე), ხოლო სამფაზა ელექტრული ძრავი კი ჩაირთვება სამივე ფაზაზე.

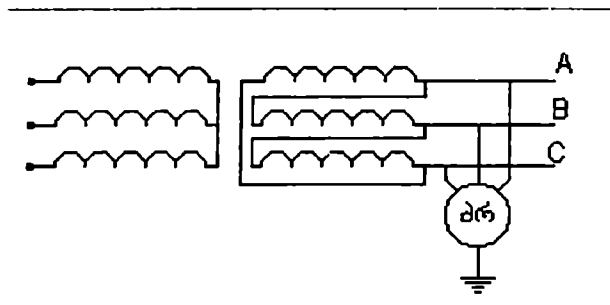
1000 ვოლტზე მეტი ძაბვის დანადგარებს აქვთ მხოლოდ სამფაზა შესრულება. 6-10 კვ ძაბვის ქსელში სარგებლობენ ფაზების სამკუთხედური შეერთებით, სადაც ელექტრული ძრავები და ძალოვანი ტრანსფორმატორები მიერთებულია სამივე ფაზაზე (ნახ. 1.6).

35 კვ და მეტი ძაბვის ქსელში სარგებლობენ ფაზების ვარსკლავური შეერთებით, სადაც ნეიტრალი შეიძლება იყოს იზოლირებული, ყრუდჩამიწებული ან ჩამიწებული ინდუქციურობის კოჭის გავლით.

მუდმივი დენის ქსელი გამოიყენება ზოგიერთი სამრეწველო საწარმოს ელექტრომომარაგებისთვის (ელექტროლიზის საამქროები, ალუმინის ქარხნები). ელექტროფიციერებულ რკინიგზაში შეიძლება გამოყენებული იქნეს როგორც მუდმივი, ასევე ცვლადი დენის ქსელი. მაღალი ძაბვის (± 400 ; ± 750 კვ) მუდმივი დენის ელექტროგადაცემა პერსპექტიული გადაწყვეტილებაა, რომელსაც ცვლადი დენის ელექტროგადაცემასთან შედარებით გააჩნია გარკვეული უპირატესობა (ელექტროგადაცემის ხაზის მარტივი კონსტრუქცია, ნაკლები კაპიტალური ხარჯები, შედარებით მაღალი საიმედოობა, სისტემებს შორის არასინქრონული კავშირის რეალიზაცია, სიმძლავრის მცირე დანაკარგები გვირგვინზე და სხვა), თუმცა ამასთან ერთად მას გააჩნია მთელი რიგი უარყოფითი მხარეც (ქვესაღგურების კონსტრუქციის სირთულე, დიდი რაოდენობის ვენტილებისა და სხვა აპარატურის არსებობის გამო ძაბვისა და დენის მრუდის ფორმის დამახინჯება, გადაცემის გაძვირება ინვენტორული ქვესაღგურების მიერ შედარებით დიდი რეაქტიული სიმძლავრის მოხმარების გამო და სხვა).



**ნახ. 15 ცვლადი დენის ოთხსადენიანი სამფაზა სისტემა
ნეიტრალის ყრუ ჩამოწებით**

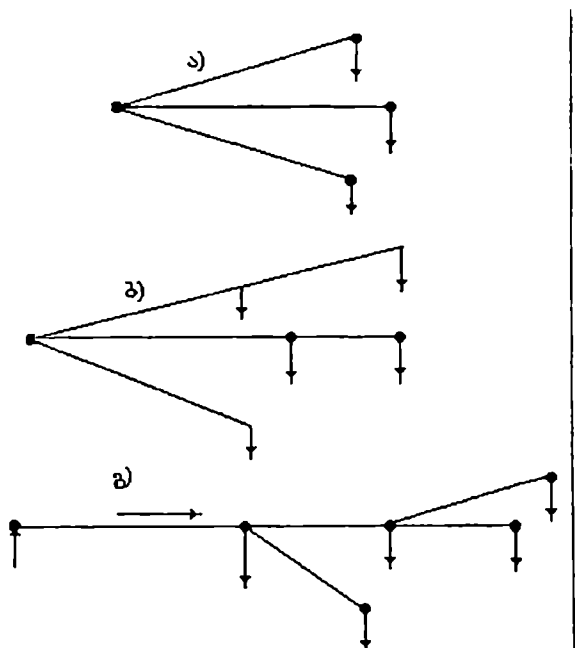


ნახ. 16 1000 ვოლტზე მეტი ძაბვის სამფაზა ქსელი

ნომინალური ძაბვის დონის მიხედვით ელექტრული ქსელები პირობითად შეიძლება იყოს: დაბალი (1000 ვ-მდე), საშუალო (3-35 კე), მაღალი (110-220 კე) და ზემო მაღალი (330-1150 კე) ძაბვის ქსელებად [46]. უნდა აღინიშნოს, რომ ოფიციალურ დოკუმენტებში ქსელების ასეთი კლასიფიკაცია არ აგმოიყენება. არსებულ გერმანოლოგიაში მიღებულია დაბალი (1000 ვ-მდე) და მაღალი (1000 ვ-ზე მეტი) ძაბვის ქსელებად კლასიფიკაცია.

კონსტრუქციული შესრულების მიხედვით გვაქვს საპაერო და საკაბელო ქსელები. საპაერო ქსელი აიგება პრაქტიკულად ყველა ნომინალურ ძაბვაზე და, შესაბამისად, ძაბვის მიხედვით იცვლება მათი კონსტრუქციული შესრულება. საკაბელო ხაზები ჩადებულია ძირითადად უშუალოდ მიწაში ან მიწაში მოწყობილ საკაბელო არხებში. საკაბელო ხაზები გაცილებით ძვირია, ვიდრე იმავე ნომინალური ძაბვის საპაერო ხაზები, თუმცა მათი დაზიანების ალბათობა უფრო დაბალია.

კონგიფურაციის მიხედვით ქსელები შეიძლება იყოს ღია და შეკრული. ღია ქსელი ეწოდება ქსელს, სადაც მოხმარებელს შეუძლია კვება მიიღოს მხოლოდ ერთი მხრიდან (ცალმხრივი კვების ქსელი) (ნახ.1.7) შეკრული ქსელი კი ეწოდება ქსელს, სადაც მოხმარებელს შეუძლია კვება მიიღოს არანაკლებ ორი მხრიდან. თავის მხრივ ღია ქსელი შეიძლება იყოს ერთუბნიანი რადიალური (ნახ.1.7ა), მრავალუბნიანი მაგისტრალურ-რადიალური (ნახ.1.7ბ) და მაგისტრალურ-განშტოებული (ნახ.1.7გ).

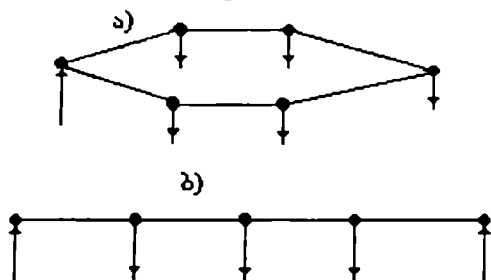


ნახ. 1.7 ღია ქსელი: ა)რადიალური; ბ)მრავალუბნიანი-რადიალური; გ)მაგისტრალურ-განშტოებული.

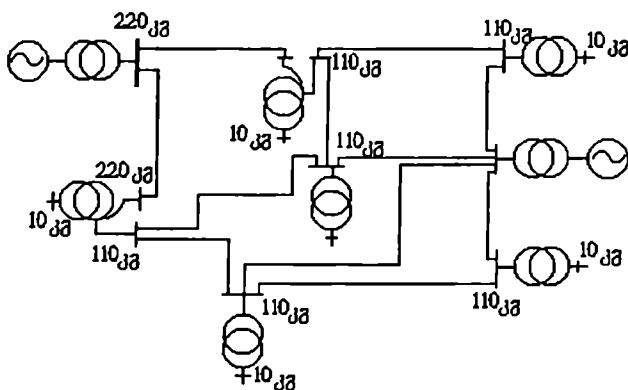
შეკრული ქსელების უმარტივეს სახეს წარმოადგენს ყულფური (ნახ.1.8 ა) და ორმხრივი კვების (ნახ.1.8ბ) ქსელები.

ელექტრული ენერგიის გადაცემისა და მოხმარებელთა კვების საიმედოობის ამაღლების მიზნით აგებენ რთულ შეკრულ ქსელებს (ნახ.1.9).

ქსელის კონფიგურაციის ამა თუ იმ სახეს განსაზღვრავს ამ ქსელის კვანძებში მიერთებულ მომხმარებელთა კვების საიმედოობის საჭირო დონე. კვების საიმედოობის დონის მიხედვით მომხმარებლები იყოფიან სამ კატეგორიად. პირველ კატეგორიას მიეკუთვნება ის მომხმარებლები, რომლებთანაც კვების შეწყვეტა დასაშვებია იმ დროით, რაც საკმარისი იქნება სარეზერვო კვების ავტომატური ჩართვისთვის (1 წმ-მდე). მეორე კატეგორიას მიეკუთვნება მომხმარებლები, რომელთანაც ენერგიის შეწყვეტა დასაშვებია იმ დროით, რაც საკმარისი იქნება სარეზერვო კვების ხელთ ჩართვისთვის მორიგე პერსონალის ან გამსვლელი ბრიგადის მიერ (არაუმეტეს 1 საათი). მესამე კატეგორიას მიეკუთვნება მომხმარებლები, რომელთანაც ენერგიის შეწყვეტა დასაშვებია იმ დროით, რაც საკმარისი იქნება დაზიანებული ელემენტის რემონტისთვის ან გამოცვლისთვის (არაუმეტეს 24 საათი).



ნახ. 18 უმარტივესი შეკრული ქელი: ა)ყულუერი;
ბ)ორმხრივი კვების



ნახ. 19 რთულ შეკრული ქსელი

პირველი კატეგორიის მომხმარებლებს შორის გამოყოფენ მეტად საპასუხისმგებლო მომხმარებლებს, რომელთაც სარეზერვო კვებასთან ერთად უნდა გააჩნდეს ავტონომიური კვების წყარო.

დანიშნულების მიხედვით გამოყოფენ რაიონულ (მკეებაე) და ადგილობრივ (მანაწილებელ) ქსელებს. რაიონული ქსელები ელექტროენერგიას გადასცემენ ენერგიის წყაროებიდან მსხვილი რაიონების კვების ცენტრებამდე ანუ რაიონულ ქვესადგურებამდე (რაიონული კვების ცენტრები). ადგილობრივი ქსელები კი ახდენენ ამ ენერგიის გადაცემას რაიონული კვების ცენტრებიდან ადგილობრივი კვების ცენტრებამდე ანუ მანაწილებელი ქსელების ქვესადგურებამდე.

რაიონულ ქსელებს მიაკუთვნებენ 110-220 კვ ძაბვის ქსელებს, ხოლო ადგილობრივ ქსელებს კი 35 კვ-მდე (ჩათვლით) ძაბვის ქსელებს, რომელთა შორის გამოყოფენ სასოფლო, საქალაქო და სამრეწველო დანიშნულების ქსელებს. 330-500 კვ ძაბვის ელექტროგადაცემის ხაზები წარმოადგენენ სისტემათაშორის ან შიგა სასისტემო ხაზებს, რომელთა დანიშნულებაა დიდი სიმძლავრის (რამდენიმე ასეული მგვტ) დიდ მანძილზე (რამდენიმე ასეული კმ) გადაცემა.

მკეებაეი ქსელები, როგორც წესი, შეკრულ ქსელებს წარმოადგენენ. რაიონული ქვესადგურების მაღალი ძაბვა 110-220 კვ-ია, ხოლო დაბალი კი 6, 10 ან 35კვ. ამ ქვესადგურებზე აყენებენ გრანსფორმატორებს, რომელთაც გააჩნიათ დატვირთვის ქვეშ ძაბვის რეგულირების საშუალება (РПН). ამ ქვესადგურების დაბალი ძაბვის სალტეები წარმოადგენენ მანაწილებელი (ადგილობრივი) ქსელის კვების ცენტრებს.

16 ელექტრული ქსელის რეჟიმების გაანგარიშების ამოცანები

ელექტრულ ქსელებს წაყენება მთელი რიგი ტექნიკური და ეკონომიკური ხასიათის მოთხოვნები. კერძოდ, ელექტრომომარაგების საიმედოობა, მიწოდებული ელექტრული ენერგიის მაღალი ხარისხი, მუშაობის ეკონომიკურობა, მომსახურე პერსონალის უსაფრთხოება და ა.შ. აქედან გამომდინარე, როგორც პროექტირებისას, ასევე ექსპლუატაციის პროცესში საჭიროა ჩატარდეს შესაბამისი ტექნიკურ-ეკონომიკური გაანგარიშებები. მათ შორის, სიმძლავრისა და ენერგიის დანაკარგების დადგენის მიზნით და, ასევე, ძაბვის ვარდნისა და დანაკარგის შეფასების თვალსაზრისით. ამ შემთხვე-

ვაში მიღებული შედეგების ანალიზის საფუძველზე დაისმება და გაანალიზდება იმ აუცილებელი დამატებითი ღონისძიებების გატარების საკითხი, რაც უზრუნველყოფს ქსელისადმი წაყენებული მოთხოვნების შესრულების პირობებს.

სადენში დენის გავლისას იზრდება მისი ტემპერატურა, რომლის დასაშვებზე მეტად ამაღლება იწვევს იმოლაციის დაჩქარებულ ცვეთას, შეერთების ადგილების დაზიანებას, საპაერო ხაზების მექანიკური სიმკეციის შემცირებას. ყველაფერი ეს ზრდის ქსელის ავარიულობის ალბათობას. ამ გარემოებათა გამო გარდება სადენებისა და კაბელების გაანგარიშება გახურებაზე, რომლის დროსაც დადგინდება მათი ის მინიმალური განივი კვეთი, რაც უზრუნველყოფს ამ სადენთა თბურ მედეგობას.

ქსელის ავარიულობა შეიძლება გამოიწვიოს, აგრეთვე, მისი ამა თუ იმ ელემენტის მექანიკური სიმკეციის დარღვევამ. ამიტომ ელექტრული ქსელი უნდა გაანგარიშდეს მექანიკურ სიმკეციეზე. ეს უფრო ეხება საპაერო ელექტროგადაცემის ხაზებს და ქვესადგურის მანაწილებელ მოწყობილობას. ამ გაანგარიშებისას დადგინდება საყრდენების, სადენებისა და სხვა ელემენტთა მექანიკური მუშაობის პირობები, მათზე მოქმედი მექანიკური დატვირთვები. გაანგარიშების საფუძველზე შემუშავდება კონსტრუქციული შესრულების სახე და შეირჩევა სათანადო მასალა, რაც უზრუნველყოფს მექანიკურ საიმედოობას.

გარდა ზემოთ ჩამოთვლილისა, ზოგადად, ქსელებისთვის უნდა ჩატარდეს გაანგარიშებები მოკლე შერთვის დენების, სისტემის მდგრადობის მარაგის, საპაერო ხაზების მეხმედეგობისა და ა.შ. დადგენის თვალსაზრისით.

ელექტრული ქსელის პროექტირება წარმოებს რამდენიმე წლის წინსწრებით, რის გამოც ანგარიშებისთვის საჭირო საწყისი ინფორმაციის სიზუსტე დაბალალბათურია. ამ პირობებში ზუსტი გაანგარიშების ჩატარების მოთხოვნა გამართლებული არ არის. აქ საკმარისია დადგინდეს ის საჭირო სიდიდეები, რაც საშუალებას მოგვცემს გადაეწყვიგოთ ძირითადი საკითხები. კერძოდ, ქსელის კონფიგურაციის შერჩევა, ელექტროგადაცემის ნომინალური ძაბვის დადგენა, სადენთა განიკვეთების შერჩევა და ა.შ. დამპროექტებლის ძირითადი ამოცანაა შექმნას ისეთი ქსელი, რაც უზრუნველყოფს მოთხოვნებს სიმძლავრისა და ძაბვის დანაკარგების შესახებ, შესაძლებელი იქნება ქსელის ეკონომიკური ექსპლუატაცია და მისი შემდგომი განვითარება.

ექსპლუატაციის პროცესში ქსელის მუშაობის რეჟიმების ანალიზისას აუცილებელია გაანგარიშების მაღალი სიზუსტე. ეს მოთ-

ხოვნა შესრულებადია, რადგანაც ანგარიშებისთვის საჭირო საწყისი ინფორმაცია ცნობილია მაღალი სიმუსკით: მომხმარებელთა დაგვირთვები, სადენტო განივი კვებები, ხაზების სიგრძე, ტრანსფორმატორთა რიცხვი და ნომინალური სიმძლავრე და ა.შ.

ქსელის ელექტრული მდგომარეობა უწყვეტად იცვლება, რაც დაკავშირებულია სხვადასხვა მომხმარებელთა ჩართვა-გამორთვასთან და ასევე, მათი მუშაობის რეჟიმების ცვლილებასთან. ელექტრული მდგომარეობის უფრო მკვეთრი ცვლილება შეიძწნევა მანაწილებელ, განსაკუთრებით, სამრეწველო ქსელებში. ქსელის ჯამური დაგვირთვის ბრდასთან ერთად აღნიშნული ცვლილებები ნაკლებად მკვეთრია და უფრო ექვემდებარება პროგნოზს. დავირთვები იცვლება შედარებით მდორედ და მცირე ფარგლებში. დაგვირთვების აღნიშნული სტაბილურობა უფრო შესამწწნევა მაღალი ძაბვის მკვებაე ქსელებში.

ელექტრული ქსელის მუშაობის დასახასიათებლად განიხილება მათი მუშა რეჟიმები. მუშა რეჟიმი ეს არის ქსელის გარკვეული დამყარებული მდგომარეობა, რომელიც ხასიათდება რეჟიმის პარამეტრებით.

უნდა განსვასხვავოთ ქსელის ელემენტების პარამეტრები და რეჟიმის პარამეტრები. ქსელის ელემენტების პარამეტრების ქვეშ იგულისხმება მათი წინაღობა, გამტარობა, ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი, ნომინალური ძაბვა, ხოლო რეჟიმის პარამეტრებს წარმოადგენს სიხშირე სისტემაში, ძაბვის მუშა მნიშვნელობა ქსელის კვანძებში, აქტიურ და რეაქტიულ სიმძლავრეთა ნაკადები შგოებში (ხაზებში, ტრანსფორმატორებში), სიმძლავრის დანაკარგები ქსელში და მის ცალკეულ ელემენტებში, ძაბვის ვარდნა და ა.შ.

პრაქტიკულად ქსელის ელემენტების პარამეტრები არ არის დამოკიდებული ქსელის მუშაობის რეჟიმებზე და განიხილება როგორც მუდმივი სიდიდეები. თუმცა გარემო ატმოსფერული პირობების (ჰაერის ტემპერატურა, ტენზომეცველობა, წვიმა და ა.შ.) შეცვლისას იცვლება სადენტის აქტიური წინაღობა და ხაზის აქტიური გამტარობა. ასევე საჭიროების შემთხვევაში, მიზანდასახულად იცვლება ტრანსფორმატორთა ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი. რეჟიმის პარამეტრები უშუალო დამოკიდებულებაშია მომხმარებელთა დაგვირთვაზე და იცვლება დროში მომხმარებელთა მუშაობის რეჟიმის ცვლილებასთან ერთად.

მომხმარებელთა ჯამური დაგვირთვა სხვადასხვაა დღელამის სხვადასხვა საათზე. ყველა ეს მნიშვნელობები მოქცეულია გარკვეულ მაქსიმალურ და ნომინალურ მნიშვნელობათა შორის. ამიტომ მაქსიმალური და მინიმალური დაგვირთვების რეჟიმი შეიძლე-

ბა საეკონომიკური აღმოჩენის ქსელის მუშაობის რეჟიმების დასახასიათებლად.

მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში ქსელის თითქმის ყველა ელემენტში გადის მაქსიმალური დენი (თუკა მოსალოდნელია, რომ ამ დროს ცალკეული ელემენტი არ იყოს მაქსიმალურად დატვირთული). ამ რეჟიმში შეიმჩნევა ძაბვითა და დენით ვარდნილობა. მინიმალური დატვირთვის რეჟიმში მომხმარებელთა დატვირთვები მინიმალურია და ასევე, მინიმალურია ქსელზე მიერთებული (მუშაობაში ჩართული) გენერატორების რიცხვიც.

რეჟიმები, რომელშიც ქსელის რეჟიმის მახასიათებელი პარამეტრები დროში მდგრად იცვლება, დამყარებულ რეჟიმს წარმოადგენს. ასეთი რეჟიმები შედარებით მსუბუქია და მარტივად ექვემდებარება მართვას.

ქსელის მუშაობის მძიმე რეჟიმს წარმოადგენს ავარიის შემდგომი რეჟიმი, რომელსაც ადგილი აქვს ქსელის ამა თუ იმ ელემენტის ავარიული (მეცხეული) გამორთვის შემდეგ. ის ხანმოკლე ავარიული პროცესი, რომელსაც ადგილი აქვს ელემენტის დაზიანების წარმოქმნის მომენტიდან მის ამორთვამდე, წარმოადგენს გარდამავალ პროცესს. ამ პროცესში რეჟიმის პარამეტრები დროში დიდი სისწრაფით და დიდ ფარგლებში იცვლება.

ქსელის დასახასიათებლად განიხილავენ ყველაზე უფრო მძიმე ავარიის შემდგომ რეჟიმს, რომელსაც შეიძლება ადგილი ჰქონდეს მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში ამა თუ იმ მაქსიმალურად დატვირთული ელემენტის მეცხეულად ამორთვის შემდეგ. ამ შემთხვევაში გარდამავალი პროცესის წარმატებული გავლა ქსელისადმი წაყენებულ მოთხოვნათა შორის ერთერთი ძირითადია.

დამყარებული რეჟიმების გაანგარიშების ერთერთ ძირითად ამოცანას წარმოადგენს ქსელის საკუთრივ წერტილებში ძაბვის სათანადო რეჟიმის უზრუნველყოფა. მკვლევარ ქსელებში ძაბვის მნიშვნელობები იზღუდება დანადგართა იზოლაციის მუშაობისა და სადაბლებელი ტრანსფორმატორების ფოლადის გახურების პირობებით. მანაწილებელ ქსელებში კი ძაბვის მნიშვნელობა დამატებით იზღუდება ელექტრომიმდებარე მუშაობის პირობით.

იზოლაციის მუშაობის პირობით ძაბვის ნომინალურზე მეტად ამაღლება დასაშვებია 20%-მდე 20 კვ (ჩათვლით) ქსელებში, 15%-მდე 35-220 კვ ძაბვის ქსელებში, 10%-მდე 330 კვ ძაბვის ქსელებში და 5%-მდე უფრო მაღალი ძაბვის ქსელებში. უმრავლეს ელექტრომიმდებარეთვის დასაშვებია ძაბვის ნომინალურიდან გადახრა $\pm 5\%$ -ის ფარგლებში.

ამრიგად, ელექტრული ქსელის რეჟიმები პირობითად შეიძლება დაყვით: დამყარებული რეჟიმები, გარდამავალი პროცესები (აგარიული რეჟიმები) და აგარიის შემდგომი რეჟიმები.

დამყარებულ რეჟიმში ქსელისადმი წაყენებულ ძირითად მოთხოვნებს წარმოადგენს მისი ეკონომიკურობა – მინიმალური დანაკარგები ქსელში, მომხმარებელთან მიწოდებული ენერგიის მაღალი ხარისხი, ქსელის თითოეული ელემენტის მუშაობა მისთვის დასაშვებ რეჟიმში და ა.შ. აგარიულ რეჟიმში ქსელისადმი წაყენებული ძირითადი მოთხოვნაა სისტემის მდგრადი მუშაობის შენარჩუნება, ცალკეული ელემენტების დაზიანებისაგან დაცვა, მეტად საპასუხისმგებლო მომხმარებელთან ენერგიის უწყვეტობის შენარჩუნება და ა.შ. აგარიის შემდგომ რეჟიმში ქსელისადმი წაყენებული მოთხოვნაა ნომინალური დამყარებული რეჟიმის აღდგენა უმოკლეს დროში.

თავი 2. ელექტრული ქსელის ძირითადი ელემენტები

2.1 საპაერო ხაზები. მოგადი ცნობები

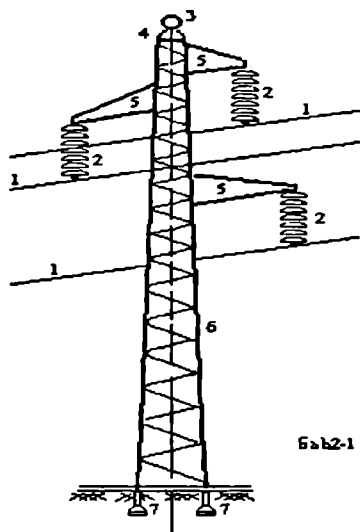
საპაერო ელექტროგადაცემის ხაზები ეს არის შიშველი სადენები გაკიდებული სპეციალური კონსტრუქციის მქონე საყრდენებზე იზოლატორების საშუალებით. ხაზის ძირითადი ნაწილებია: სადენი, საყრდენი, იზოლატორი და სახაზო არმატურა (ნახ.2.1).

მთელ რიგ ხაზებზე, აუცილებლობიდან გამომდინარე, გამოიყენება მეხსარიდი გვარლი, რომლის დანიშნულებაა ჭაბური სადენების დაცვა ატმოსფერული განმუხტვებისგან.

მოცემულ გარემო კლიმატურ პირობებში საპაერო ხაზების საიშველო მუშაობისთვის აუცილებელი ხდება სხვადასხვა დანიშნულების საყრდენის გამოყენება. მათ შორის ყველაზე უფრო ხშირად გვხვდება შუალედური და ანკერული საყრდენები.

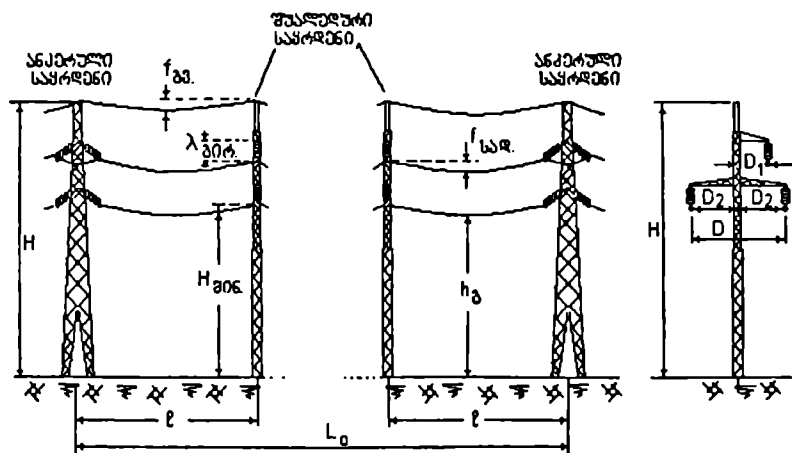
ხაზის კონსტრუქციული ნაწილი საერთოდ ხასიათდება მთელი რიგი საანგარიშო პარამეტრებით (ნახ.2.2): l - შუალედური მალი (ან უბრალოდ მალი), რომელიც წარმოადგენს მანძილს ორ მეზობელ საყრდენს შორის, გაზომილს პორიზონტალის გასწვრივ; L_0 - საანკერო მალი - მანძილი ორ მეზობელ ანკერულ საყრდენს შორის; h_g - გაბარიტული მანძილი, რომელიც წარმოადგენს უმოკლეს მანძილს საყრდენის უდაბლესი წერტილიდან მიწამდე ან რაიმე საინჟინრო ნაგებობამდე; D_1, D_2 - მანძილი სადენებიდან საყრდენის ღებამდე; D - საყრდენის განი; H - საყრდენის სიმაღლე; λ - იზოლატორთა გირლანდის სიგრძე; $H_{\text{აფ}}$ - სადენის დაკიდების მინიმალური სიმაღლე; f - სადენის (გვარლის) ჩაღუნვის ისარი ანუ ვერტიკალური მანძილი სადენის (გვარლის) დაკიდების წერტილსა და მის უდაბლეს წერტილს შორის (ნახ.1.3ა).

საპაერო ხაზების პროექტირების დროს ხშირად საქმე გვაქვს ისეთ მალეებთან, სადაც სადენის დაკიდების წერტილები განთავსებულია სხვადასხვა სიმაღლეზე (ნახ.2.3ბ). ეს შეიძლება გამოწვეული იყოს მიწის ზედაპირის პროფილით, ბუნებრივი თუ საინჟინრო დაბრკოლებების გადაკვეთის დროს ან სხვადასხვა სიმაღლის საყრდენების გამოყენებისას. ასეთ შემთხვევებში განიხილავენ ჩაღუნვის ისრის სამ მნიშვნელობას f_1, f_2 და f , შესაბამისად, სადენის დაკიდების წერტილებისა და ამ წერტილების შემაერთებული წრფის შუა წერტილის მიმართ (ნახ.2.3).

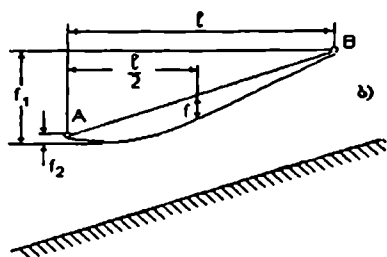
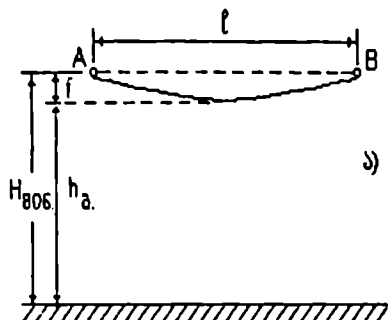


ნახ. 2.1 – საპაერო ხაზის
საყრდენი:

1) სადენი; 2) იზოლატორი;
3) მესხარიდი გეარლი;
4) გეარლამჭერი; 5) კონსო-
ლური ტრავერსა; 6) საყ-
რდენის ტანი; 7) ჟუნდამენ-
ტი



ნახ. 2.2 – საპაერო ხაზის სახასიათო პარამეტრები



ნახ. 2.3 – საპაერო ხაზის ჩაღუნვის ისრები: ა—სადენტო დაკიდების წერტილები ერთდამავე სიმაღლეზე; ბ—დაკიდების წერტილები სხვადასხვა სიმაღლეზეა

ხაზის ყველა კონსტრუქციული ელემენტი მუშაობს რთულ და დიდ ფარგლებში ცვლად კლიმატურ პირობებში. სადენებზე (იგულისხმება გვარლიც) მოქმედებს საკუთარი და ლიპყინულის წონა, ქარის დაწნევა და გარემოს ტემპერატურა. სადენებსა და საყრდენებზე მოქმედი რეზულტური მექანიკური ძალები აღწევს რამდენიმე ასეულ კილონიუტონსა და მეტს. თუ სადენები დაფარულია ლიპყინულით და მოქმედებს ქარიც, მაშინ ხაზი უფრო მძიმე მექანიკურ პირობებში მუშაობს.

სადენზე ლიპყინულის წარმოქმნა მოსალოდნელია გარემოს $(-5+7)^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურისას, თუ ამ დროს პაერში იმყოფება გადაცივებული წყლის ნაწილაკები (ნისლი). ამ პირობებში სადენტან პაერის შეხებისას ხდება აღნიშნული ნაწილაკების კრისტალიზაცია და წარმოიქმნება ლიპყინული (სადენის ზედაპირი დაიფარება ყინულით). ლიპყინულის ინტენსივობა ძირითადად დამოკიდებულია პაერის ტენზიუმეცველობაზე და ამიტომ მისი წარმოქმნა უფრო მოსალოდნელია წყალსაცავების, ტბებისა და ზღვის მახლობლობაში გამავალ ხაზების სადენებზე. ლიპყინულის კედლის სისქე ზოგჯერ რამდენიმე ათეულ მილიმეტრს აღწევს და მისი წონა ერთ საყრდენზე გადაანგარიშებით შეიძლება რამდენიმე ასეულ კილონიუტონამდე იყოს.

ლიპყინულით დაფარვის შედეგად იზრდება სადენის საანგარიშო ზედაპირი და შესაბამისად, იზრდება მასზე ქარის დაწოლა. ქარის შედარებით დაბალი სიჩქარისას (4-8 მ/წმ) სადენები განიცდიან ვიბრაციას, ხოლო უფრო მაღალი სიჩქარისას (10-30 მ/წმ) – კიროკვას.

ვიბრაცია იწვევს სადენის ცალკეული მავთულების მრავალჯერად გადალუნვას, სადენთა დაღლილობას. რის შედეგად სადენის დაკიდების წერტილებთან შეიძლება მოხდეს ამ მავთულების გადატეხვა, რასაც შემდგომში მოსალოდნელია მოპყვეს სადენის გაწყვეტა. სადენის როკვა ხასიათდება უფრო დაბალი სიხშირით, ვიდრე ვიბრაცია, მაგრამ გააჩნია მნიშვნელოვნად დიდი ამპლიტუდა, თითქმის ჩაღუნვის ისრის გოლი. როკვის დროს სადენის რხევა მიმდინარეობს თითქმის ვერტიკალურ სიბრტყეში და მას ადგილი აქვს მაშინ, როცა არაპერიოდიკული მიმართულების ქარი სადენისადმი მიმართულია მახვილი კუთხით.

როკვის დროს შესაძლებელია ხაზის გასწვრივ წარმოიქმნას ე.წ. „მორბენალი რკალი“, რაც განპირობებულია სადენების ერთმანეთთან ან გვარლთან მიახლოებით. როკვის შედეგად მოსალოდნელია როგორც სადენების, ასევე იზოლაგორებისა და, მოგჯერ, თვით საყრდენის მექანიკური დაზიანებაც კი.

სადენის მექანიკური მუშაობის რეჟიმზე გავლენას ახდენს პაერის ტემპერატურის ცვლილება, რაც იწვევს მისი სიგრძის შეცვლას. დაბალ ტემპერატურაზე სადენის სიგრძის შემცირებისას იზრდება მასში მექანიკური დაძაბულობა, ხოლო მაღალი ტემპერატურისას სადენის წაგრძელების გამო იზრდება ჩაღუნვის ისარი. ორივე ეს გარემოება გასათვალისწინებელია ხაზების მექანიკური რეჟიმების ანგარიშისას, რათა არ მოხდეს სადენის გაწყვეტა ან მისი მიწასთან ან რაიმე საინჟინრო ნაგებობასთან მიახლოების გაბარიტული მანძილის დარღვევა.

იმისთვის რომ ელექტროგადაცემის ხაზების მექანიკური მუშაობის პირობების გათვალისწინებით უზრუნველყოფილი იქნეს მომხმარებელთან მაღალი ხარისხის ელექტროენერგიის მიწოდება მინიმალური დანახარჯების პირობებში, აუცილებელია სრულდებოდეს ხაზებისადმი წაყენებული შემდეგი მოთხოვნები: 1. სადენებს გააჩნდეს კარგი ელექტრული გამტარობა; 2. ხაზები აგებული იქნეს არადეფიციტური მასალისაგან; 3. ყველა კონსტრუქციულ ელემენტს გააჩნდეს მაღალი მექანიკური სიმტკიცე და ქიმიური ზემოქმედებისა და კოროზიის მიმართ საკმარისი მედეგობა; 4. ხაზი, როგორც საინჟინრო ნაგებობა, იყოს ეკონომიკური.

2.2 საჰაერო ხაზების სადენები

ელექტროგადაცემის საჰაერო ხაზების არაიმოლირებული სადენები ძირითადად მზადდება სპილენძის, ალუმინისა და ფოლადისგან. ისინი იმყოფებიან რა ღია სივრცეში, განიცდიან სხვადასხვა სახის მექანიკურ (ქარი, ლიჰყინული, გარემოს ტემპერატუ-

რა), თუ ქიმიურ (ქიმიური ქარხნების გოგირდოვანი გაზები, ზღვის მარილი და სხვა) ზემოქმედებას და ამიგომ მათ მექანიკური სიმტკიცისა და კოროზიის მიმართ უნდა გააჩნდეს საკმარისად მაღალი მედეგობა.

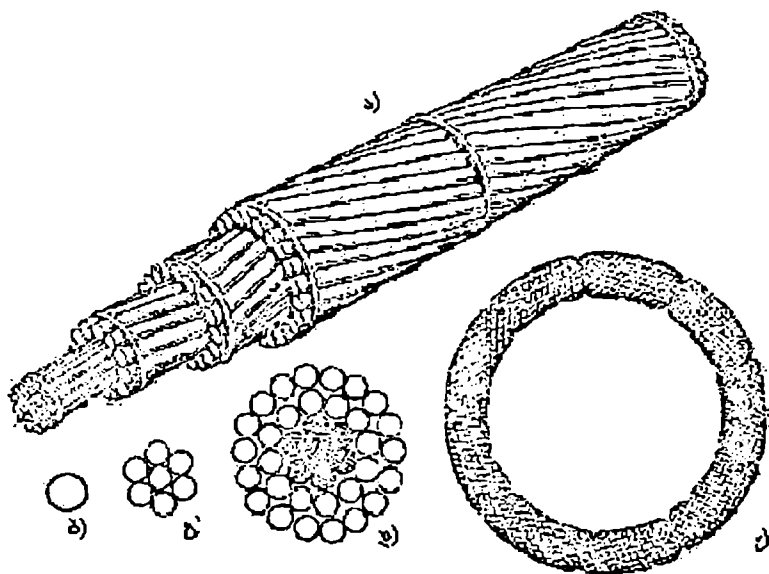
სპილენძს გააჩნია დაბალი ხვედრითი ელექტრული წინააღობა 17,8-18,5 ომი.მმ/კმ 20°C გარემოს ტემპერატურის დროს. მყარმდელი სპილენძის მათულის დროებითი წინააღობა გაწყვეტაზე შეადგენს 380-400 ნ/მმ²-ს. სპილენძი მოქნილი და არამტკიცადი მასალაა. მისი ჟანგის ფენას გააჩნია მაღალი ქიმიური და მექანიკური მედეგობა და კარგად იცავს სადენს კოროზიისა და ქიმიური ზემოქმედებისგან. სპილენძი ალუმინთან შედარებით ძვირი და დეფიციტური მასალაა, რის გამოც ის საპაერო ხაზების სადენებად ნაკლებად გამოიყენება.

დღესთვის სადენებად, ძირითადად, გამოიყენება ალუმინი, ფოლად-ალუმინის სადენები და, ზოგჯერ, ალუმინის სხვა მასალებთან (რკინა, სილიციუმი, მაგნიუმი) შენადნობებისაგან მიღებული სადენები (ალდრეი).

ალუმინს, სპილენძთან შედარებით, უფრო დიდი ხვედრითი ელექტრული წინააღობა გააჩნია (29,5-31,5 ომი.მმ²/კმ). ალუმინი გარემოს მხრიდან ქიმიური ზემოქმედების მიმართ მედეგია მის ზედაპირზე ალუმინის ჟანგის წარმოქმნის გამო. ალუმინს გააჩნია შედარებით დაბალი მექანიკური სიმტკიცე. მისი დროებითი წინააღობა გაწყვეტაზე 150-180 ნ/მმ²-ს შეადგენს. ამიგომ ალუმინისგან დამზადებული სადენები გამოიყენება 35 კე-მდე (ჩათვლით) ძაბვის ქსელებში.

ფოლადის სადენი ხასიათდება მაღალი მექანიკური სიმტკიცით. მისი დროებითი წინააღობა გაწყვეტაზე შეადგენს 600-700 ნ/მმ²-ს. ფოლადის სადენის დიდ უარყოფით მხარეს შეადგენს ის, რომ ცელადი დენის მიმართ მისი ელექტრული წინააღობა ალუმინის სადენთან შედარებით მაღალია და დამოკიდებულია მასში გამაჟალი დატვირთვის დენზე. აღნიშნულის გამო ფოლადი შეიძლება გამოყენებული იქნეს 10კე-მდე ძაბვის ქსელებში მცირე სიმძლავრის გადაცემისას, თუკი ამ შემთხვევაში ალუმინის სადენის გამოყენება ეკონომიკურად არახელსაყრელია. ეკონომიკური გაანგარიშებით მცირე დატვირთვების დროს საკმარისია მცირე განივკვეთის სპილენძის ან ალუმინის სადენი, მაგრამ ხაზის მექანიკური სიმტკიცის უზრუნველყოფის მიზნით აუცილებელია მნიშვნელოვნად უფრო დიდი განივკვეთის სადენი, რის გამოც იზრდება ხაზის ჯამური დანახარჯები და ფერადი ლითონის სადენების გამოყენება არაეკონომიკური აღმოჩნდება.

კონსტრუქციის მიხედვით სადენები არის: ერთმავთულიანი, მრავალმავთულიანი ერთი მასალისაგან; მრავალმავთულიანი ორი მასალისაგან (კომბინირებული სადენი) და ღრუ (ნახ. 2.4).



ნახ. 2.4-საჰაერო ხაზების სადენთა კონსტრუქციები:
ა-მრავალმავთულიანი სადენის საერთო ხედი; ბ- ერთმავთუ-
ლიანი; გ- მრავალმავთულიანი ერთი მასალისაგან; დ მრავალ-
მავთულიანი ორი მასალისაგან; ე-ღრუ

ერთმავთულიანი სადენი შედგება ერთი მავთულისაგან (ნახ.2.4ბ). იგი გამოიყენება 1000ვ-მდე ძაბვის ხაზზე. ერთი მასალისაგან დამზადებული მრავალმავთულიანი სადენი (ნახ.2.4გ) შეიცავს ერთმანეთში ჩახვეულ 2-3 მმ დიამეტრის მქონე რამდენიმე მავთულს. კონსტრუქციულად ამ სადენს აქვს ერთი ცენტრალური მავთული, რომლის გარშემო შესრულებულია მავთულების რამდენიმე ნახევარი. პირველი ნახევარი შეიცავს 6 მავთულს, ხოლო ყოველი შემდგომი – 6 მავთულით მეტს, ვიდრე წინა. ამრიგად, ერთი ცენტრა-

ლური მავთულის შემდეგ პირველ ნახევარში არის 6 მავთული, მეორეში 12, მესამეში 18 და ა.შ. მეზობელი ნახევრების დახვევის მიმართულება ურთიერთ საწინააღმდეგოა (ნახ.2.4ა), რაც საშუალებას იძლევა შევქმნათ შედარებით წრიული ფორმისა და თვითდარღვევის მიმართ მდგრადი სადენი.

ერთმავთულიანთან შედარებით მრავალმავთულიანი სადენი უფრო მოქნილია, რის გამოც იგი უფრო მოხერხებულია მონტაჟისა და გრანსპორტირების დროს. ექსპლუატაციის დროს ქარის ზემოქმედებით სადენები ირხევა, რაც იწვევს დამატებით მექანიკურ ძაბვას და მასალის დაღლილობას. ამ პირობებში ერთმავთულიან სადენთან შედარებით მრავალმავთულიანი მექანიკურად უფრო მედეგია.

ორი მასალისაგან დამზადებული მრავალმავთულიანი სადენის (ნახ. 2.4დ) შექმნის ძირითადი მიზანია მაღალი მექანიკური სიმტკიცისა და კარგი ელექტრული გამტარობის მქონე კომბინირებული სადენის მიღება. ამ მოთხოვნების დაკმაყოფილება შესაძლებელი გახდა ფოლად-ალუმინის სადენის შექმნის გზით. აქ მაღალი მექანიკური სიმტკიცის მქონე ფოლადის მავთულებს უკავიათ სადენის ცენტრალური ნაწილი, ხოლო გარე შრეებს (ნახევრებს) შეადგენს ალუმინის მავთულები. ფოლად-ალუმინის სადენები ფართოდ გამოიყენება 35კე და მეტი ძაბვის საპაერო ხაზებზე.

იმ საპაერო ხაზებისთვის, რომლებიც გადის ზღვის, მარილიანი ტბებისა ან ქიმიური საწარმოების მახლობლობაში, პაერში არსებული მავნე მინარევების ზემოქმედებისაღმი, განსაკუთრებით კოროზიისაღმი, მედეგობის უნარის ამაღლების მიზნით ფოლადის გულარის ან მთლიანად სადენის მავთულთშორის სივრცეს ავსებენ სპეციალური საპოხი მასალით.

ფოლად-ალუმინის სადენებში ალუმინისა და ფოლადის განივი კვეთების ფართობთა ფარდობა $F_{ალ} / F_{ფლ} = 4,0-8,5$ ფარგლებში იცვლება. იმ შემთხვევაში, როცა საჭიროა სადენის მექანიკური სიმტკიცის ამაღლება, სადენს ამზადებენ გაძლიერებული ფოლადის გულარით $F_{ალ} / F_{ფლ} = 4,0-4,5$, ხოლო როცა მექანიკურ სიმტკიცეს შედარებით დაბალი მოთხოვნა წაეყენება, სადენი მზადდება შემსუბუქებული ფოლადის გულარით $F_{ალ} / F_{ფლ} = 8,0-8,5$. დანარჩენ შემთხვევებში გვაქვს $F_{ალ} / F_{ფლ} = 7,0 - 7,5$.

განსაკუთრებულ შემთხვევაში, როცა საჭიროა მნიშვნელოვნად ამაღლებული სიმტკიე (ხევების, განიერი მდინარეების ან სხვა დაბრკოლებების გადაკვეთების დროს), ამზადებენ განსაკუთრებული კონსტრუქციის სადენებს, სადაც ფოლადის განივი კვეთი საგრძნობლად ამაღლებულია.

ფოლად-ალუმინის სადენის ფოლადის გულარას, ფოლადის სადენებსა და გვარლებს ამზადებენ მაღალი სიმკვრივის მქონე ფოლადისაგან, რომლის მღვრული წინაღობა შეადგენს 1200 ნ/მმ²-ს.

ფოლად-ალუმინის სადენის ელექტრულ გამტარობას ძირითადად განაპირობებს ალუმინის ნაწილი. ეს განპირობებულია იმით, რომ ჯერ ერთი, ალუმინი უკეთესი გამტარია, ვიდრე ფოლადი; მეორე მისი განივი კვეთი მნიშვნელოვნად მეტია ვიდრე ფოლადის; მესამე სადენში ცვლადი დენის განაწილების კანონის (ზედაპირული ეფექტის) თანახმად დენი უფრო მეტად გაედინება სადენის პერიფერიულ ნაწილში, ანუ ალუმინის გავლით. აღნიშნულიდან გამომდინარე ალუმინის მოცემული განივი კვეთის მქონე ფოლად-ალუმინის სადენის გამტარობა პრაქტიკულად ისეთივეა, რაც იმავე განივი კვეთის მქონე ალუმინის სადენისა.

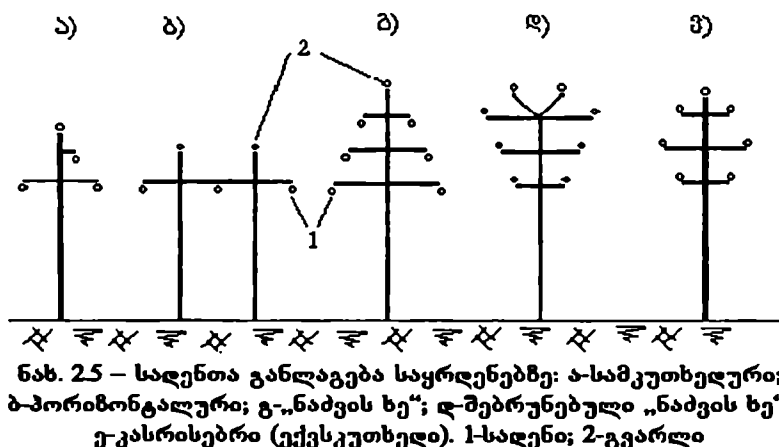
ღრუ სადენები (ნახ.2.4.ე) ძირითადად გამოიყენება 220კვ და მეტი ძაბვის ქვესადგურების ღია მანაწილებელი მოწყობილობების მოსალგვისთვის. ეს სადენი მზადდება სპილენძისგან ან ალუმინისგან. ცალკეული სპეციალური კონსტრუქციის მქონე ბრტყელი მავთულები ერთმანეთთან შეერთებული არის შევრილდრმულებით, რაც უზრუნველყოფს სადენის კონსტრუქციულ მდგრადობას. მოცემული განივი კვეთის ღრუ სადენის გარე დიამეტრი მნიშვნელოვნად დიდია, ვიდრე იმავე განივი კვეთის მქონე სხვა კონსტრუქციის სადენისა. ამის გამო სადენის გარე ზედაპირზე მკვეთრად მცირდება ელექტრული ვეილს დაძაბულობა და, შესაბამისად, სადენის გარე ზედაპირის მიმდებარე სივრცეში გამოირიცხება გვირგვინული განმუხტვის შესაძლებლობა, რაც თავის მხრივ გამოირიცხავს ენერგიის დანაკარგებს გვირგვინზე (თავი 3.). საპაერო ხაზების სადენების განივი კვეთების ფართობი სახელმწიფო სტანდარტით (სასტი) ნორმირებულია და მოთავსებულია 4-1000მმ² ფარგლებში. სადენთა კონსტრუქციული და საანგარიშო პარამეტრები მოცემულია დ-1 ცხრილში [28].

მემაღალი ხაზის ელექტროგადაცემის ხაზებზე გვირგვინული განმუხტვის მოვლენის თავიდან აცილების მიზნით ფაშური სადენები შეიცავენ ორ და მეტ ჩვეულებრივ ფოლად-ალუმინის სადენს. ასეთ ფაშას გახლეჩილ ფაშას უწოდებენ (ორად, სამად და ა.შ.). გახლეჩილ ფაშაში სადენები ერთმანეთისგან განცალკევებულია ხისტი განბჯენებით. განბჯენი ძირითადად მზადდება იმავე მასალისაგან, რომლისგანაც თვით სადენია დამზადებული. ფაშაში სადენებს შორის მანძილი 30-40 სმ-ს შეადგენს. ამ მანძილს გახლეჩის ბიჯს უწოდებენ. გახლეჩილი ფაშა, მის გარშემო ელექტრული ველის განაწი-

ლების თვალსაზრისით, დიდი დიამეტრის მქონე ფაზური სადენის ეკვივალენტურია.

სადენების მარკირება ხდება სადენის მასალისა და განივი კვეთის ნომინალური ფართობის მიხედვით. დღეისთვის საქართველოში შენარჩუნებულია სადენების მარკირება ყოფილი საბჭოთა კავშირის სტანდარტების მიხედვით. სპილენძის სადენი აღინიშნება M, ალუმინის A, ფოლად-ალუმინის AC, ალუმინის ღრუსადენი ΠA, სპილენძის ღრუ სადენი ΠM ასოებით. ასოითი აღნიშვნის შემდეგ მითითებულია სადენის ნომინალური განივი კვეთის ფართობი მმ²-ში. მაგ; M-50; A-70; AC-185/29 და ა.შ. კომბინირებული სადენის მარკის აღნიშვნაში პირველი რიცხვი მიუთითებს დენგამგარი ნაწილის ანუ ალუმინის ნომინალურ განიკვეთს, ხოლო მეორე კი – ფოლადის ნომინალურ განიკვეთს.

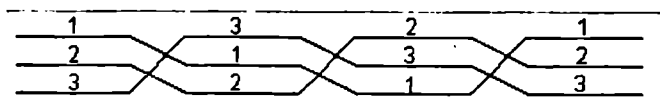
სადენების განლაგება საყრდენებზე შეიძლება სხვადასხვა სახის იყოს: ერთჯაჭვა საყრდენებზე - სამკუთხედური ან პორიზონტალური; ორჯაჭვა საყრდენებზე - „ნაძვის ხე“ ან კასრისებრი (ექვსკუთხედი) (ნახ.2.5).



სამკუთხედური განლაგება სრულდება 20კვ-მდე ძაბვის და 35-330 კვ ძაბვის ლითონის ან რკინაბეტონის საყრდენებიან ხაზებზე. პორიზონტალური განლაგება გამოიყენება 330კვ და მეტი ძაბვის ხაზებზე და აგრეთვე, 35-220კვ ძაბვის ხის საყრდენებიან ხაზებზე. ექსპლუატაციის თვალსაზრისით სადენთა პორიზონტალური განლაგება ითვლება საუკეთესოდ. იგი ეკონომიკურია, რადგანაც საშუალებ

ბას გააძლევს გამოვიყენოთ შედარებით დაბალი საყრდენები. ორჯაჭვა ხაზებზე რეკომენდირებულია სადენტო „კასრისებრი“ განლაგება, რის გამოც სადენტო როკვის დროს გამოირიცხება მათი ურთიერთჩახვევა და, შესაბამისად, ხაზის აუარიული ამორთვა.

ყველა შემთხვევაში აღნიშნული განლაგება ხასიათდება გარკვეული არასიმეტრიულობით, რაც იწვევს ხაზის რეჟიმის პარამეტრების არასიმეტრიულობას. აღნიშნულის თავიდან აცილების მიზნით განსაკუთრებით გრძელ ხაზებზე, შეიძლება განეხიროს სადენტო ტრანსპოზიცია, რომლის დროს სადენი იკავებს ჯერ ერთ, მერე მეორე და შემდეგ მესამე მდებარეობას (ნახ.2.6). სადენტო ტრანსპოზიცია რეკომენდირებულია განხორციელდეს 110კე და მეტი ძაბვის ხაზებზე, როცა ტრანსის სიგრძე აღემატება 100კმ-ს.



ნახ.2.6 - ერთჯაჭვა ხაზის სადენების ტრანსპოზიცია

აგმოსუფრული გადამეტებებისგან დამცავი მეხსარიდი გვარლი მაგრდება საყრდენის უმაღლეს წერტილში (ნახ.2.5). ამით ყველა ფაზური სადენი მოთავსებული აღმოჩნდება აგმოსუფრული გადამეტებისგან დაცვის ზონაში. ერთჯაჭვა ხაზებზე, როცა სადენები განლაგებულია სამკუთხედის წვეროებზე და ორჯაჭვა ხაზებზე, როცა სადენტო განლაგება „ნაძვისხის“ ან „კასრისებრი“ სახისაა, საკმარისია ერთი მეხსარიდი გვარლი (ნახ.2.5.ა.გ.ე), ხოლო სადენტო ერთ პორიზონტალურ სიბრტყეში (ნახ.2.5.ბ) ან შებრუნებული „ნაძვისხის“ სახით განლაგების დროს (ნახ.2.5.დ) აუცილებელია ორი მეხსარიდი გვარლი.

მეხსარიდი გვარლი მზადდება ფოლადის მრავალმავთულიანი სადენის სახით და გვხვდება გვარლის შემდეგი მარკები: C-35; C-50; C-70 და C-95.

გვარლი ხაზებს არამარტო მეხის პირდაპირი დაცემისგან იცავს, არამედ ხელს უწყობს ხაზის მახლობლობაში აგმოსუფრული განმუხტვით სადენებში აღძრული გადამეტებების ამპლიტუდის შემცირებას. გარდა ამისა, ის ამცირებს საპაერო ხაზების უარყოფით გავლენას კავშირგაბმულობის ხაზებზე და ბოლოს, გვარლი სასარგებლოა იმიტაც, რომ სადენტო გაწყვეტის შემთხვევაში ის გარკვეულ წილად იჭერს საყრდენს წაქცევისგან და ამით ხელს უწყობს მის მექანიკურ მდგრადობას.

220-330 კვ ძაბვის ხაზების საყრდენებზე გვარლი მაგრდება იზოლაგორების საშუალებით, რომლებიც დამუშავებულია 40 მმ სიგრძის სანაპერწკლო შუალებით. გვარლის ასეთი დამაგრება უზრუნველყოფს მის იზოლაციას საყრდენისგან, რაც მნიშვნელოვანია საყრდენის ჩამიწების გარდამავალი წინააღობის გაზომვის დროს. გვარლი ქვესადგურთან მიახლოებისას (1-2კმ), მიუხედავად ხაზის ნომინალური ძაბვისა, ჩამიწებული უნდა იყოს თითოეულ საყრდენზე. გვარლის ჩამიწების წინააღობა უნდა იყოს არანაკლებ 10-15ომი.

110 კვ ძაბვის ხაზის ხის საყრდენები ითვლება მეხგამძლედ, რის გამოც ხაზის მთელ სიგრძეზე მეხსარილ გვარლებს არ იყენებენ. ამ ხაზებზე გვარლებს დაკიდებენ და თან ჩამიწებენ ქვესადგურიდან 1,5-2 კმ მანძილზე, რაც შეიძლება ჩაითვალოს როგორც ქვესადგურის დაცვა მეხისგან.

საყრდენის გიპის მიუხედავად 6, 10 და 35 კვ ძაბვის ხაზების დაცვა გადამეტაძაბვისგან წარმოებს ქვესადგურის მისადგომებში. ამასთან 6, 10 კვ ძაბვის ხაზების დაცვა ხდება ღეროვანი მეხსარილით ან მილოვანი განმუხტველით, ხოლო 35 კვ ძაბვის ხაზებისა კი - მეხსარილი გვარლებით ქვესადგურიდან 0,8-1,5კმ სიგრძის მონაკვეთზე.

6, 10 კვ ძაბვის რკინაბეტონის საყრდენები ადამიანთა უსაფრთხოების მიზნით ჩამიწებული უნდა იყოს.

2.3 საპაერო ხაზების საყრდენები

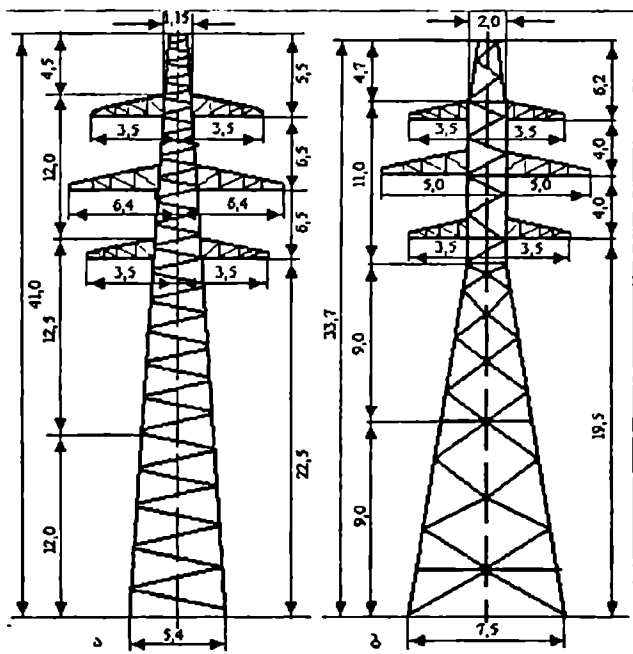
საპაერო ხაზების საყრდენები დანიშნულების, კონსტრუქციისა და მასალის მიხედვით სხვადასხვა სახისაა.

დანიშნულების მიხედვით გვაქვს: შუალედური, ანკერული, კუთხური, კუთხურ-ანკერული და სპეციალური. კონსტრუქციის მიხედვით გვხვდება: ვიწრო და ფართობაზიანი, პორტალური, V-სებრი, „რიუმკა“, საგრანსპომიციო და სხვა, ხოლო საყრდენებზე გაკიდებულ ჯაჭვთა რიცხვის მიხედვით ერთ და ორჯაჭვიანი. მასალის მიხედვით საყრდენები შეიძლება იყოს ხის, ლითონის და რკინაბეტონის.

2.7. - 2.14 ნახაზებზე ნაჩვენებია საპაერო ხაზების სხვადასხვა სახის საყრდენი. ამა თუ იმ სახის საყრდენის გამოყენება დამოკიდებულია ხაზის გრასის პროფილზე და საყრდენის დანიშნულებაზე გრასის მოცემულ უბანზე.

შუალედური საყრდენების დანიშნულებაა მოცემულ საანკერო შუალედში მიწის ზედაპირიდან და სხვა ჩამიწებული ელემენტებიდან სადენების გარკვეულ სიმაღლეზე დაჭერა. ეს საყრდენები მარტივი და იაფია. მათი რიცხვი გრასაზე შეადრებით დიდია, რიგ

შემთხვევებში საყრდენთა საერთო რაოდენობის 75-80%-ს აღწევს. შუალედურ საყრდენებზე ორივე მხრიდან მოქმედი სადენების დაჭიმვის გრძივი ძალები თითქმის ერთნაირია და ამიტომ ამ საყრდენებზე პრაქტიკულად მოქმედებს მხოლოდ ვერტიკალური ძალები – სადენთა და ხაზის სხვა ელემენტთა სიმძიმის ძალა. შუალედური საყრდენი ძირითადად ვიწრობაშიანია (ნახ.2.7ა).

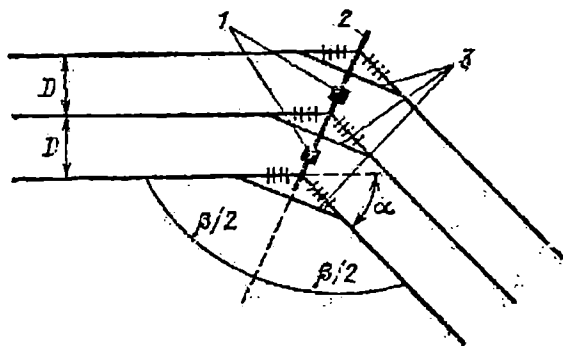


ნახ.2.7 თავისუფლად მდგომი ორჯაჭვია ლითონის საყრდენები:
ა-შუალედური 220 კვ; ბ-ანკერული 110 კვ

ანკერული საყრდენი გამოიყენება ხაზის საპასუხისმგებლო წერტილებში სადენების ხისგად დამაგრებისთვის. კერძოდ, ხაზის ბოლოში, საინჟინრო ნაგებობების თუ ხეობების, მდინარეებისა და წყალსაცავების გადაკვეთისას. ანკერულმა საყრდენმა უნდა გაუძლოს ორი ფაზის სადენების ცალმხრივი ძალის ზემოქმედებას. ანკერული საყრდენი ფართობაშიანი საყრდენია (ნახ.2.7.ბ). ყველაზე უფრო მძიმე პირობებში იმყოფება ხაზის საბოლოო (ქვესადგურზე შესვლა და გამოსვლა) ანკერული საყრდენი, რომელზედაც მოქმედებს სამივე ფაზის სადენების ცალმხრივი ძალა ხაზის მხრიდან

(ქვესადგურის პორტალის მხრიდან სადენტო ძალვა უმნიშვნელოა). ანკერული საყრდენი კონსტრუქციის სირთულის გამო ბეირადღირებულია, ვიდრე შუალედური და ამიტომ მათი რაოდენობა გრასაზე უნდა იყოს რაც შეიძლება მინიმალური. მეზობელ ანკერულ საყრდენებს შორის მანძილი ხაზის სწორხაზოვან უბნებზე 10-15კმ-ს აღწევს.

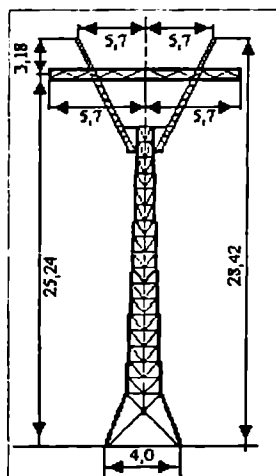
კუთხური საყრდენები გამოიყენება ხაზის გრასის მიმართულების შეცვლის (მოხვევის) შემთხვევაში. ხაზის მოხვევის კუთხე α წარმოადგენს ხაზის გრასის წინა და მომდევნო მიმართულებებს შორის კუთხეს (ნახ. 2.8). კუთხურ საყრდენებზე გრავერსა მიმართულია β კუთხის (α -ს დამატებითი კუთხე) ბისექტრისას მიმართულებით. კუთხური საყრდენის გაანგარიშების დროს მხედველობაში უნდა იქნეს მიღებული სადენტო დაჭიმვის ძალვის გოლქმედი ძალა, რომელიც მიმართულია β კუთხის ბისექტრისას მიმართულებით და მნიშვნელოვან სიდიდეს აღწევს მოხვევის დიდი კუთხისა და სადენტო დიდი განიკვეთების შემთხვევაში. 20⁰-მდე მოხვევის კუთხის დროს შეიძლება კუთხური საყრდენის ნაცვლად გამოვიყენოთ შუალედური. ამასთან, შესაბამისად, უნდა შეიცვალოს საყრდენზე სადენტის დამაგრების წესი. 60⁰-მდე მოხვევის კუთხის შემთხვევაში შეიძლება გამოყენებულ იქნეს რკინაბეტონის ერთდგარიანი საჭიმრებიანი საყრდენი. იქ, სადაც შესაბამისი პირობები არსებობს შეიძლება ანკერული და კუთხური საყრდენების ფუნქციები შევათავსოთ ერთ კუთხურ-ანკერულ საყრდენში.



ნახ.2.8 ხაზის გრასის მოხვევის კუთხე: 1-საყრდენები; 2-გრავერსა; 3-მლექიფი

სპეციალურ საყრდენებს შორის გამოყოფენ საგრანსპოზიციო და გადასასვლელ საყრდენებს. საგრანსპოზიციო საყრდენი გამოყენებული იქნება ხაზის იმ წერტილში, სადაც ხდება სადენთა გრანსპოზიცია (ფაშების ადგილმონაცვლეობა). გადასასვლელი საყრდენები კი გამოიყენება საინჟინრო თუ ბუნებრივი დარკოლებების გადალახვის დროს. ამ საყრდენთა სიმაღლე რიგ შემთხვევებში აღწევს 50-100 მ და მეტს.

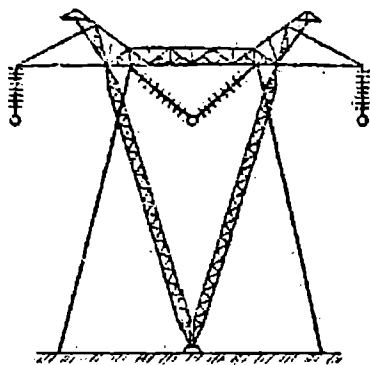
სადენების პორიზონტალური განლაგების შემთხვევებში ერთი პერიოდი ფართო გაერცელება ჰპოვა საყრდენმა „რიუმკაშ“ (ნახ.2.9).



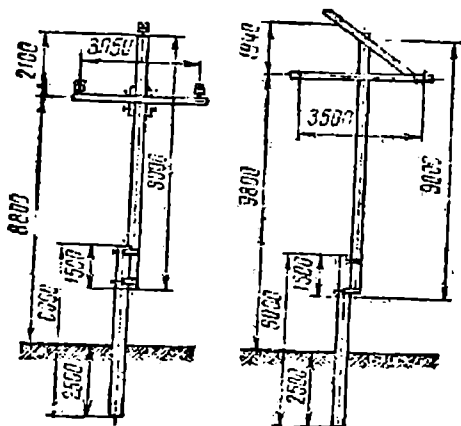
ნახ.2.9 შუალედური საყრდენი
„რიუმკაშ“ 220 კვ

გემაღალი ძაბვის ხაზებზე (750 და 1150 კვ) გამოიყენება V-სებრი შუალედური საყრდენი (ნახ.2.10).

ხის საყრდენები იაფია და მათი დამზადება მარტივია. უარყოფითი მხარეა სამსახურის მოკლე ვადიანობა. განსაკუთრებით მალე გამოდის მწყობრიდან მისი ქვედა ნაწილი, რომელიც ჩაფლულია მიწაში. გაუქვლენათვი ფიჭვისაგან დამზადებული ხის საყრდენის სამსახურის ვადა საშუალოდ 3-5 წელია. სამსახურის ვადის გაზრდა შეიძლება ხის ღეგალების ანგისეპტიკით (კრეოზი, ანტრაცენის ზეთი) გაქვლენის გზით. ქარხნული გაქვლენათა ხის საყრდენის სამსახურის ვადას ზრდის 15-20 წლამდე. ხის საყრდენები გამოიყენება 220 კვ-მდე ძაბვის ერთჯაჭვა ხაზებისთვის. იგი ძირითადად შედგება ორი ნაწილისაგან: განი და ნაჯღი (ქვესაღდარი) (ნახ.2.11).



ნახ.2.10 V-სებრი შუალედური საყრდენი 1150 კვ



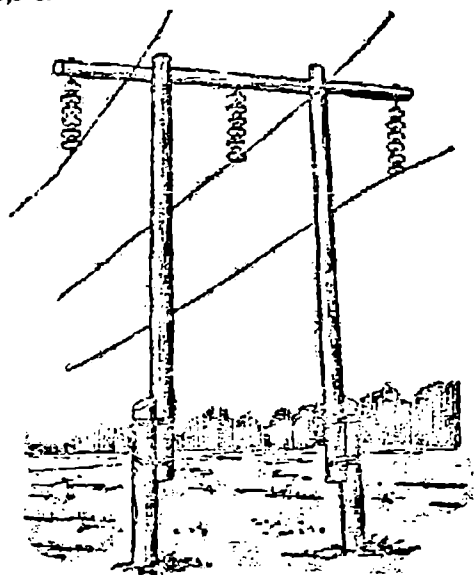
**ნახ.2.11 ხის საყრდენები: ა-სამანჭველე იზოლატორებით;
ბ-საკიდი იზოლატორებით**

10კვ-მდე ძაბვის ხაზებზე ძირითადად ამზადებენ ერთდგარიან ხის საყრდენებს. 110კვ ძაბვის და უმრავლეს შემთხვევაში 35კვ ძაბვის ხაზებზე აყენებენ ორდგარიან II-სებრ საყრდენს (ნახ.2.12). სამსახურის ვადის გაზრდის მიზნით ხის საყრდენების ნაჯღს უპირატესად ამზადებენ რკინაბეტონისგან.

ლითონის საყრდენები გამოიყენება 35კვ და მეტი ძაბვის ხაზებზე. ეს საყრდენები მოითხოვენ ლითონის დიდ ხარჯს და, ექსპლუატაციის პერიოდში კოროზიისგან დასაცავად, რეგულარულ შეღებვას.

რიგ შემთხვევებში კოროზიის თავიდან ასაცილებლად ახდენენ ლითონის საყრდენის დეგალეზის მოთუთიებას.

ლითონის საყრდენი უპირატესად გამოიყენება მთიან რეგიონებში, უფრო ძნელად მისადგომ ადგილებში, რადგანაც მათი გრანსპორტორება შეიძლება ცალკეული სექციების სახით. საყრდენის აწყობა წარმოებს დაყენების ადგილზე. საყრდენებს აყენებენ ხიმიწის, ასაკრებ ან მონოლითურ რკინაბეტონის ფუნდამენტებზე (ნახ.2.13). ფუნდამენტების გრუნტში ჩაღრმავების საშუალო სიმაღლეა 2,5-3,0 მ.

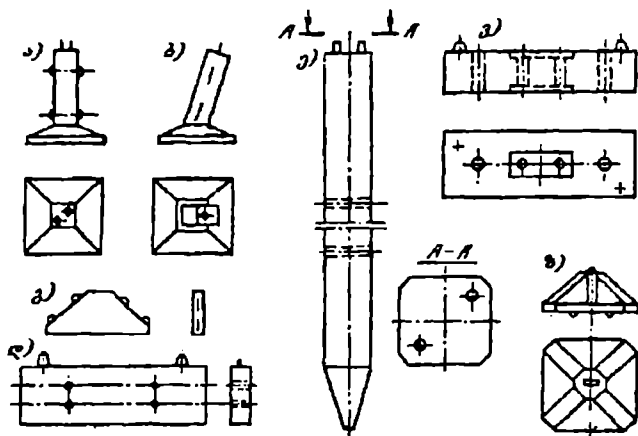


ნახ.2.12 ორდგარიანი II-სებრი ხის საყრდენი 110კვ

რკინაბეტონის საყრდენების სამსახურის ვადა უფრო ხანგრძლივია, ვიდრე ხის და მოითხოვს ლითონის საყრდენზე უფრო ნაკლებ ლითონს. იგი მარტივია მომსახურების თვალსაზრისით და

ამიგომ ფართოდ გამოიყენება 500კე-მდე ძაბვის ყველა საჰაერო ხაზებზე.

6, 10 კე ძაბვის ხაზებზე ძირითადად გამოიყენება მართკუთხა განიკუთის ერთდგარიანი რკინაბეტონის საყრდენი. სადენები მაგრდება სამანჭველე იზოლატორებზე, რომლებიც თავის მხრივ დამაგრებულნი არიან ლითონის გრავერსაზე.



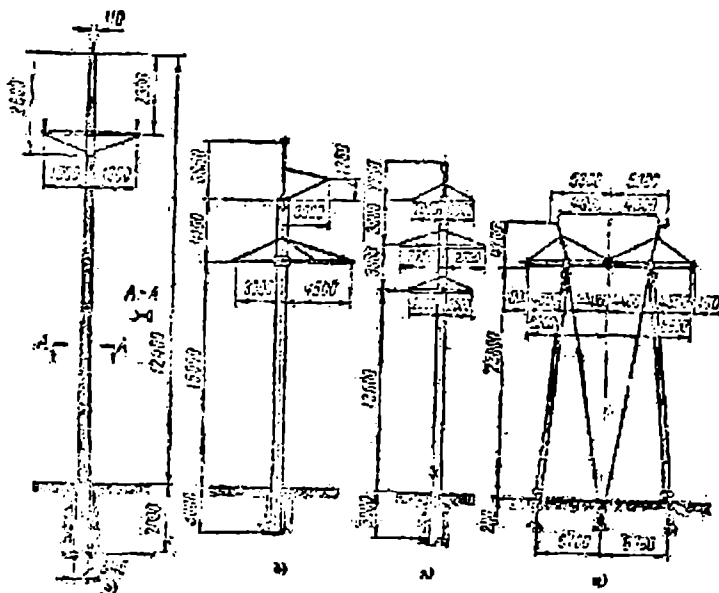
ნახ.2.13 საჰაერო ხაზის საყრდენთა რკინაბეტონის საძირკვლების ასაკრეფი დეტალები: ა-მართი საფეხური; ბ-დახრილი საფეხური; გ-დატვირთვის ფილა; დ-რიგელი; ე-ხიმიწი; ვ-როსტვერკი; ზ-საჭიმრების საანკერო ფილა.

35კე და მეტი ძაბვის ხაზების რკინაბეტონის საყრდენებს ამზადებენ ცენტრიფუგირებული ბეტონისაგან ლითონის გრავერსებით. ერთდგარიანი საყრდენები შეიძლება იყოს როგორც თავისუფლად მდგომი, ასევე საჭიმრებიანი.

რკინაბეტონის საყრდენის ღვარი ღრუ კონუსური მილის ფორმისაა სიგრძით 18-26მ. მას ამზადებენ ქარხნული წესით სპეციალურ ცენტრიდანულ ჩარხებზე. მეორე გრუნტში თავისუფლად მდგომი საყრდენის დაყენებისთვის წინასწარ ამოთხირიან ცილინდრული ფორმის ქვაბულს სიღრმით 2,5-3,2მ (ნახ. 2.14) და საყრდენს აწყობილ ფორმაში აყენებენ ამწე კოშკურის დახმარებით.

330-500 კე ძაბვის ხაზებზე სადენების პორიზონტალური განლაგების დროს გამოიყენება პორტალური რკინაბეტონის შუალედუ-

რი საჭიმრებიანი საყრდენები. ამ საყრდენებს აყენებენ რკინაბეტონის ფუნდამენტებზე სახსრულად ღვარის საყრდენ წერტილებში. ფუნდამენტს მიწაში ისე ჩაამაგრებენ, რომ საყრდენის ღვარის და ფუნდამენტის ღერძები ერთმანეთს ემთხვეოდეს (2.14დ).



ნახ.2.14 რკინაბეტონის საყრდენები: ა)შუალედური ერთღვარიანი სამანჭველ იზოლატორებით (35კვ); ბ)შუალედური ერთღვარიანი (220კვ); გ)შუალედური ერთღვარიანი ორჯაჭვად (110კვ); დ)საჭიმრებიანი შუალედური პორტალური (500კვ).

საყრდენის საჭიმრებს ამზადებენ ფოლადის ბაგირისაგან. საჭიმრების ქვედა ბოლო მაგრდება გრუნტში ჩამაგრებულ ღუმის ფოლასთან Σ -სებრი სპეციალური ანკერული საწვეის საშუალებით, რომელსაც ბოლოებზე დაჭიმვის რეგულირებისთვის გააჩნიათ კუთხვილები.

ბოლო ხანებში 35-330კვ ძაბვის ხაზებზე მიმართავენ უნიფიცირებული ლითონის და რკინაბეტონის საყრდენების გამოყენებას [11], რამაც მნიშვნელოვნად შეამცირა საყრდენთა ტიპები, მათი კონსტრუქციები და ღვაწლები. ეს საშუალებას გვაძლევს შევასრუ-

ლოთ საყრდენთა სერიული წარმოება, რაც აჩქარებს და აიაფებს ხაზების მშენებლობას.

2.4. საპაერო ხაზების იმოლაგორებო და სახაზო არმატურა

საპაერო ხაზის საყრდენის კონსტრუქციული ნაწილებიდან სადენთა იმოლირება ხორციელდება იმოლაგორებით, რომლებიც ხაზებზე ერთ-ერთი საპასუხისმგებლო ელემენტია და მათი სწორი შერჩევა უზრუნველყოფს ხაზების საიმედო ექსპლუატაციას. იმოლაგორებს, მსგავსად ხაზის სხვა ელემენტებისა, უწევთ მძიმე და ფართო დიაპაზონში ცვლად მექანიკურ და კლიმატურ პირობებში მუშაობა. მათ მოეთხოვებათ მაღალი საიმოლაციო თვისება, მექანიკური სიმტკიცე და ეკონომიკურობა. იმოლაგორების დასამზადებლად გამოიყენება ფაიფური და ნაწრთობი მინა, რომლებიც ხასიათდება მაღალი მექანიკური და ელექტრული სიმტკიცით და აგმოსფერული გემოქმედების მიმართ მაღალი მედეგობით.

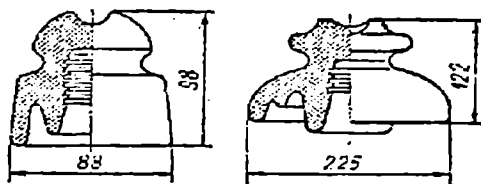
მინის იმოლაგორები უფრო მსუბუქია და უფრო უძლებს დარცმით დატვირთვებს, ვიდრე ფაიფურის. ნაწრთობი მინის იმოლაგორების ღირსებას წარმოადგენს ის, რომ ელექტრული გარღვევის, თერმული ან დამანგრეველი მექანიკური გემოქმედების დროს იგი არათუ იზზარება, არამედ იმსხვრევა. ეს საშუალებას გვაძლევს შედარებით ადვილად მოვებნოთ ხაზზე არათუ დამიანებული გირლანდა, არამედ თვით დამიანებული იმოლაგორიც კი.

იმოლაგორები მზადდება ორი ტიპის: სამანჭვლე და საკიდი. სამანჭვლე იმოლაგორები წარმოადგენს სპეციალური ფორმის მონოლითურ ფაიფურს (იმეიათად მინა). სადენი იმოლაგორებზე მაგრდება სპეციალური დარის დახმარებით, რომელიც მდებარეობს იმოლაგორების თავზე ან გვერდზე (ნახ.2.15ა). საკიდი იმოლაგორი თეფმისებური ფორმისაა (ნახ. 2.15ბ), რომლის ძირითადი ნაწილებია: ფაიფურის (მინის) სხეული; „ქუდი“ ჭედადი ფოლადისაგან; ფოლადის ღერძი და ცემენტის ჩანამენი, რომელიც წარმოადგენს მანიმოლირებელ საშუალებას „ქულსა“ და ფოლადის ღერძს შორის.

სამანჭვლე იმოლაგორები გამოიყენება 10კვ-მდე ძაბვის ხაზებზე და, აგრეთვე, სადენების მცირე განიკვეთების შემთხვევაში 35კვ ძაბვის ხაზებზე. ამ იმოლაგორების შიდა ზედაპირი ხრახნისებრი ფორმისაა, რაც იძლევა იმოლაგორების კაუჭზე ან მანჭვალზე ჩამოხრახნის საშუალებას. ჩამოხრახნა ხდება ოლიფაზე განზავებულ სურინჯში დასველებული ძენძის დახმარებით.

საშუალო და დიდი განიკეთების სადენების მქონე 35კე და, სადენის განიკეთის მიუხედავად, უფრო მაღალი ძაბვის ხაზებზე გამოიყენებენ საკიდ იმოლაგორებს, რომელთაგანაც აიკრიფება იმოლაგორთა გირლანდა (2.16 ა,ბ).

ა)



ბ)



ნახ.2.15 იმოლაგორები: ა) სამანჭვლე; ბ) საკიდი

გირლანდა შუალედურ საყრდენებზე ვერტიკალურ მდგომარეობაშია. მას სადენი უჭირავს გარკვეულ სიმაღლეზე და ამიგომ დამჭერ გირლანდას უწოდებენ. ანკერულ (კუთხურ) საყრდენებზე გირლანდა სადენის გასწვრივია გაჭიმული. ის ჭიმავს სადენს და ამიგომ დამჭიმავე გირლანდას უწოდებენ.

ზოგიერთი ტიპის ფაიფურის და მინის საკიდი იმოლაგორების ტექნიკური პარამეტრები მოცემულია 2.1 ცხრილში.

გირლანდაში იმოლაგორების რაოდენობა დამოკიდებულია ხაზის მუშა ძაბვაზე, ატმოსფეროს გატუქყიანების ხარისხზე, საყრდენის მასალაზე და გამოყენებული იმოლაგორების ტიპზე (ცხრ.2.2). იმოლაგორთა რაოდენობის ანგარიში წარმოებს იმ პირობით, რომ დენის გაჟონვის ხვედრითი სიგრძე უნდა შეადგენდეს არანაკლებ 13 მმ/კვ-ს. ანგარიშით მიღებულ რაოდენობას უმატებენ ერთ სარემერვო იმოლაგორს 110-220 კე ძაბვის ხაზებისთვის და ორ სარემერვო იმოლაგორს 330-500 კე ძაბვის ხაზებისთვის.

დამჭიმი გირლანდა მუშაობს უფრო მძიმე პირობებში, ვიდრე დამჭერი, რის გამოც მათი დამძველება ადრე ხდება. ამიგომ 35-110 კე ძაბვის ხაზებზე, სადაც იმოლაგორთა რიცხვი შედარებით მცირეა, დამჭიმ გირლანდაში მათი რაოდენობა ერთით მეტია, ვიდრე

დამჭერში. ხის საყრდენების შემთხვევაში გირლანდაში იზოლატორების რიცხვი ერთით ნაკლებია, ვიდრე ეს ნაჩვენებია 2.2 ცხრილში.

ცხრილი 2.1. საკიდი იზოლატორების ტექნიკური პარამეტრები

იზოლატორის ტიპი	ძაბვა, კე		გაყონვის ღუნის გზის სიგრძე, მმ	გარანტირებული ელექტრომაგნიტური სიმაღლე, დბ	იზოლატორის ზომები, მმ	
	გამრღევი	საყდელი წვიმის დროს			სიმაღლე	ღიამეტრი
ПФ 60-Б	110	32	280	60	140	270
ПФ 160-А	125	40	385	160	173	280
ПФ 200-А	125	44	420	200	194	350
ПФГ 60-А	110	45	470	60	198	270
ПС 60-А	90	37	255	60	130	255
ПС 120-А	90	40	325	120	140	260
ПС 220-А	110	40	390	220	200	320
ПСГ 60-А	90	-	400	60	130	350
ПС 300-А	-	-	350	300	217	320

ცხრილი 2.2. იზოლატორთა რაოდენობა გირლანდაში

იზოლატორის ტიპი	ნომინალური ძაბვა, კე					
	35	110	220	330	500	750
ПФ 60-А	3	7	14	20	-	-
ПФ 160-А	-	6	11	17	23	-
ПФ 200-А	-	-	10	14	20	-
ПС 60-А	3	8	14	21	-	-
ПС 120-А	-	7	12	17	25	38-41
ПФ 220-А	-	-	10	15	21	29-34

იმ შემთხვევაში, როცა მოითხოვება იზოლატორთა გირლანდის სიმტკიცის გაზრდა (გრძელი მალი, საპასუხისმგებლო გადასასვლელი და სხვა) გამოიყენებენ ორმაგ გირლანდას. გახლეჩილ ფაზებში დამჭიში გირლანდების რაოდენობა აიღება ფაზაში სადენების რაოდენობის ტოლი.

ზღვების, მარილიანი ტბების ან ქიმიური საწარმოების მახლობლობაში გამავალი ხაზების იმოლაგორებზე ილექება მარილები ან საწარმოო გამოწვევები, რომლებიც ამცირებენ იმოლაგორების წინააღმდეგ და მოსალოდნელია იმოლაგორის შედეგად ელექტრული განმუხტვა. ასეთ რაიონებში საჭიროა გაუმართლო იმოლაგორთა რიცხვი ან გამოვიყენოთ გაკონვის დენის უფრო დიდი გზის მქონე იმოლაგორები.

სადენების იმოლაგორებზე და იმოლაგორების საყრდენებზე დასამაგრებლად და, აგრეთვე, ხაზის ნომინალური საექსპლუატაციო პირობების უზრუნველყოფის მიზნით გამოიყენება დამხმარე ელემენტები, რომლებსაც სახაზო არმატურას უწოდებენ.

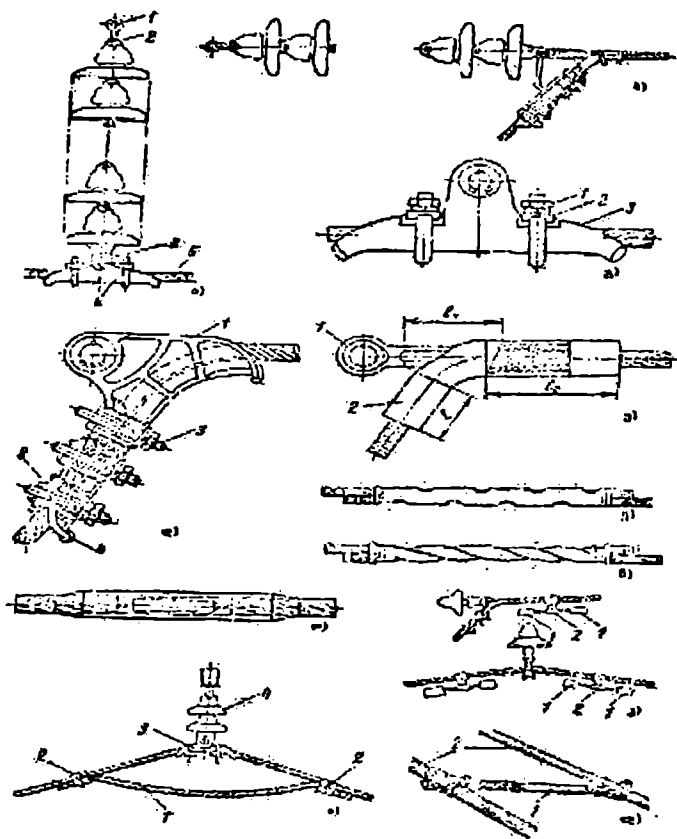
სახაზო არმატურა დანიშნულების მიხედვით გვხვდება შემდეგი სახის:

- მომჭერები, რომელთა დანიშნულებაა სადენებისა და გვარლების დამაგრება საყრდენებზე, რომლებიც თავის მხრივ იყოფა დამჭერ და დამჭიმ მომჭერებად;
დამცავი არმატურა – დამცავი რგოლი და ვიბრაციის ჩამქრობი;
- შემაერთებლები, რომელთა დანიშნულებაა მალში სადენების და გვარების გადახმა, აგრეთვე ანკერულ საყრდენებზე სადენების შლიეფებში გადახმა;
განხეხვები, რომელთა დანიშნულებაა გახლეჩილ ფაშაში სადენების ურთიერთგამიჯნვა;
ჩაჭიდების არმატურა, რომელთა დანიშნულებაა მომჭერების იმოლაგორებთან მიერთება, გირლანდის საკიდებზე დაკიდება და სხვა სახის გადახმულობა.

იმოლაგორთა დამჭერი გირლანდა მაგრდება შუალედური საყრდენის ტრავერსის ნაწიბურებზე საყურეთი, რომელიც ჩამაგრებულია ზედა იმოლაგორის ქედში. გირლანდის ქვედა იმოლაგორზე ყუნწის დახმარებით მიმაგრებულია დამჭერი მომჭერი, რომელშიც მოთავსებულია სადენი, დამჭერ მომჭერზე ხაზის მუშაობის ნომინალურ რეჟიმში მოქმედებს სადენისა და ლიკინულის სიმძიმის ვერტიკალური ძალა. გარდა ამისა, ქარის დროს მასზე მოქმედებს აგრეთვე ჰორიზონტალური ძალა. მომჭერში სადენი ჩაიდება ვარცლისებრ ჩაღრმავებაში და მაგრდება მასზე გარესახრახნისითა და ქანჩით.

ჩამაგრების სიმკაცრის მიხედვით დამჭერი მომჭერი შეიძლება იყოს: ყრუ, გამჭვი, შეზღუდული სიმკაცრის ჩანაკეთით და მრავალგორგოლაჭიანი. ყრუ მომჭერი გამოიყენება 35-220 კვ ძაბვის

საპაერო ხაზებისთვის, ხოლო 330 კვ და მეტი ძაბვის ხაზებისთვის გამოიყენება როგორც ყრუ, ასევე გამშვით მომჭერი.



ნახ.2.16 იზოლაგორთა გირლანდა და სახაშო არმაგურა: 1-დამჭერი გირლანდა; 1-საყურე; 2-იზოლაგორის ქეილი; 3-ყუნწი; 4-დამჭერი-მომჭერი; 5-სადენი. ბ-დამჭიში გირლანდა; გ-ყრუ მომჭერი; 1-მომჭიში ქანჩი; 2-გარე სახრახნისი; 3-მომჭერის კორპუსი (ნავე). დ-ჭანჭიკებიანი დამჭერი მომჭერი; 1-კორპუსი; 2-გარე სახრახნისი; 3-ქანჩი; 4-ალუმინის შუასადები. ე-ბ-საწნები დამჭიში მომჭერი; 1-ანკერი; 2-ალუმინის კორპუსი. ვ-ოვალურ მილისებრი შემაერთებული; ზ-დაგრების შემაერთებული; თ-დაწნების შემაერთებული; ი-ფიბრაციის ჩამჭრობი; 1-თუჯის გვირთები; 2-ფოლადის გვარდი. კ-შადემპურებული მარყუვი; 1-დამჭერის სადენი; 2-ქანჩი; 3-დამჭერი მომჭერი; 4-იზოლაგორთა გირლანდა. ლ-დისტანციური განბჯენი: 1-განბჯენი; 2-სადენი.

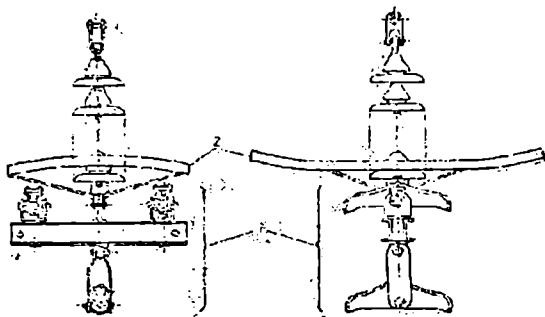
ყრუ მომჭერი (ნახ.2.16გ) მკვიდრად იჭერს სადენს ერთ-ერთ მალში მისი გაწყვეტის დროსაც კი. მომჭერში სადენის ჩამაგრების სიმტკიცე აღწევს ალუმინის სადენის სიმტკიცის 30-90%-ს, ფოლად-ალუმინის სადენის სიმტკიცის 20-30%-ს და ფოლადის გვარლის სიმტკიცის 10-15%-ს.

გამშვი მომჭერი გამოიყენება 300 მმ² და მეტი განივი კვეთის სადენებისთვის. მომჭერში სადენის ჩამაგრების სიმტკიცე შეადგენს 7-9 კნ-ს, რაც საკმარისია სადენის დაჭერისთვის ნორმალურ საექსპლუატაციო პირობებში. ერთი სადენის გაწყვეტისას, თუ ამ დროს გირლანდის გადახრა ვერტიკალური მდგომარეობიდან შეადგენს 35-45°-ს, გამშვი მომჭერი უშვებს სადენს ვარცლთან ერთად. ამ გზით საყრდენი განიჭვითება მასზე მოქმედი ცალმხრივი ძალები-საგან, რაც საშუალებას გვაძლევს გამოვიყენოთ უფრო მსუბუქი შუალედური საყრდენები.

გამშვი მომჭერის ნაკლი მდგომარეობს მასში, რომ სადენების როკვის დროს ზოგჯერ ადგილი აქვს მომჭერიდან სადენის ამოვარდნას ვარცლთან ერთად. გარდა ამისა, ერთ-ერთ მალში სადენის გაწყვეტის დროს მომჭერიდან გაშვების შემდეგ სადენი ვარცლთან ერთად ეყემა მიწაზე. ამ შემთხვევაში მოსალოდნელია სადენის დაზიანება და ძნელდება ხაზის აღდგენა. ბოლო ხანებში 500 კვ ძაბვის ხაზებზე გამოიყენება დამჭერი მომჭერი შემღულული სიმტკიცის ჩანაკეთით (6-8 კნ), რომელშიც ცალმხრივი ძალის დროს, თუ ძალა ჭარბობს ჩანაკეთის სიმტკიცეს, სადენი იწყებს მომჭერში გაძრომას. სადენი არ ეყემა მიწაზე, იგი რჩება მომჭერში. მომჭერში სადენის გაძრომისას შეიმჩნევა გახლეჩილი ფაზის ცალკეული სადენის დაზიანების შემთხვევები. ამის გამო, ელექტროდანადგართა მოწყობის წესების თანახმად 500 კვ ძაბვის ხაზების შუალედურ საყრდენებზე უფრო რეკომენდირებულია ყრუ მომჭერის გამოყენება.

მრავალგორგოლაჭიანი დამჭერი მომჭერი ფაქტიურად არ არის მომჭერი. აქ, როცა მემოხელ მალეებში სადენზე მოქმედი ჰიზების ძალები სხვადასხვაა, სადენს თავისუფლად შეუძლია გადაადგილდეს გორგოლაჭების გასწვრივ. აღნიშნული სახის დამჭერი გამოიყენება შუალედურ საყრდენებზე დიდი გადასასვლელების შემთხვევაში 300 მმ² და მეტი განივი კვეთის სადენისა და გვარლებისთვის. ამასთან ფოლად-ალუმინის სადენების მექანიკური დამიანებისაგან დაცვა უზრუნველყოფილია სპეციალური მოქნილი ქუროებით, რომლებიც წამოცმულია სადენზე მისი გორგოლაჭებზე მოსალოდნელი გადაადგილების მთელ სიგრძეზე.

2.17 ნახაზზე ნაჩვენებია დამჭერი გირლანდა ყრუ მომჭერებით გახლეჩილი ფაზისთვის. აქ ყუნწზე მიმაგრებულია დამაგებითი ელემენტი – მხრეული, რომელზედაც დამაგრებულია ყრუ დამჭერი მომჭერები.



ნახ.2.17 დამჭერი გირლანდა 500 კვ ძაბვის სამად გახლეჩილი ფაზისთვის; 1-დამჭერი მომჭერი, 2-დამცავი რგოლი, 3-მხრეული

330 კვ მეტი და, რიგ შემთხვევაში, 220 კვ ძაბვის ხაზებზე მომჭერსა და მასთან მიმდებარე იზოლატორს შორის მაგრდება ე.წ. დამცავი რგოლი (ნახ.2.17) გირლანდის გასწვრივ ძაბვის განაწილების გასათანაბრებლად და, აგრეთვე, ხაზზე გადამეგძაბვის დროს გირლანდის გადაფარვის შემთხვევაში იზოლატორების ზედაპირიდან რკალის ასარიცხვად.

ანკერულ (კუთხურ) საყრდენებზე სადენი დამჭიმ გირლანდაზე მაგრდება ყრუ დამჭიმი მომჭერით. ერთი და იმავე ფაზის სადენები ერთმანეთთან ელექტრულად შეერთებულნი არიან გირლანდის ქვეშ თავისუფლად დაკიდებული მოკლე სადენით, რომელსაც მარყუეს უწოდებენ. დამჭიმი მომჭერი არსებობს სხვადასხვა სახის: სოლური, ჭინჭიკებიანი და დასაწნეხი.

სოლური დამჭიმი მომჭერი გამოიყენება სპილენძისა და ალუმინის სადენების ყრუ დასამაგრებლად. ეს მომჭერი შემდგება ორი ნაწილისაგან: კორპუსი და ორი სოლი. სოლებს გააჩნიათ ნახევარცილინდრული შიგა ამონადები, რომელთა ზედაპირზე არის მღორე და არც ისე ღრმა ნაღარები. მათი საშუალებით სადენის გაჭიმვის დროს სოლი შედის კორპუსში. კორპუსის შიგა ზედაპირი ოდნავ კონუსურია, რის გამოც სოლის წანაცულება კორპუსში უზურნეულყოფს სადენის მგკიცე ჩამაგრებას.

ჭანჭიკებიანი დამჭერი მომჭერი (ნახ.2.16დ) გამოიყენება მცირე და საშუალო განიკვეთების ფოლად-ალუმინის სადენის დასამაგრებლად. სადენი ჩაიდება მომჭერის კორპუსის ნაღარში და მაგრდება გარესახრახნისითა და U-სებრი ჭანჭიკებით.

დასაწნეხი დამჭიმი მომჭერი გამოიყენება 300 მმ² და მეტი განიკვეთების მქონე ფოლად-ალუმინის სადენების დასამაგრებლად. იგი შედგება ფოლადის ანკერისაგან და ალუმინის კორპუსისაგან (ნახ. 2.16ე). ფოლადის ანკერში ჩაიწნეხება გამჭარის ფოლადის ნაწილი. ალუმინის კორპუსში მალის მხრიდან ჩაწნეხავენ გამჭარის ალუმინის ნაწილს, ხოლო საყრდენის მხრიდან კი - ყულფს. ამ მომჭერის ნაკლი ის არის, რომ სადენის მომჭერში ჩამაგრების დროს გვიხდება სადენის გაჭრა.

წარმოება სხვადასხვა დიამეტრის სადენებს სხვადასხვა სიგრძით უშვებს. ხაზზე მონტაჟის დროს მათ ერთმანეთთან შეაერთებენ სპეციალური კონსტრუქციის მქონე შემაერთებელი მომჭერებით შემოჭერის, დაგრეხის ან დაწნეხის გზით.

შემოჭერით სადენების შეერთება სრულდება ოვალურ-მილისებური შემაერთებელის საშუალებით. შესაერთებელი სადენების ბოლოები შეყავთ ოვალური ფორმის მილში ორივე მხრიდან და შემდეგ ამ მილს მარწუხით რამდენიმე ადგილას შემოუჭერენ ჭადრაკული რიგით. მილზე წარმოიქმნება ჩაღრმავებანი (ნახ.2.16ვ), ხოლო შესაერთებელი სადენები ლებულობენ გაღლისებურ ფორმას. შემოჭერის გზით სრულდება 120-185 მმ² განიკვეთის ალუმინის სადენების შეერთება.

უფრო ნაკლები განიკვეთის (16-95 მმ²) ალუმინის და 10-185 მმ² ფოლად-ალუმინის სადენების შეერთება წარმოებს დაგრეხის გზით (ნახ. 2.16 ზ). 240 მმ² და მეტი განიკვეთის ფოლად-ალუმინის სადენების და 70-95 მმ² ფოლადის გვარლების შეერთება ხდება დაწნეხის გზით (ნახ. 2.16 თ). ამ შემთხვევაში გამოიყენება ორი მილი: ფოლადის - ფოლადის მავთულების შესაერთებლად და ალუმინის - ალუმინის მავთულების შესაერთებლად. ჯერ შეაერთებენ ფოლადის მავთულებს ფოლადის მილში დაწნეხის გზით და შემდეგ მასზე გარედან, ასევე დაწნეხის გზით, შეაერთებენ ალუმინის მავთულებს ალუმინის მილში.

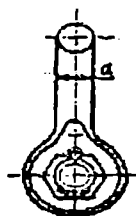
ხაზებზე სადენტა ვიბრაციის შემცირების მიზნით სადენებზე მათი დამაგრების წერტილიდან 0,5-1,0 მეტრის დაშორებით ჩამოკიდებენ ვიბრაციის ჩამქრობს (ნახ. 2.16ი), რომლის გვირგვინს მოძრაობაზე იხარჯება სადენის ვიბრაციის ენერგია. ვიბრაციის ჩამქრობის საკუთარი რხევის სიხშირე ბევრად უფრო ნაკლებია, ვიდ-

რე სადენის და ამიგომ ის იყავს სადენს დამაგრების წერტილში და-
მატებითი ძაბვის წარმოქმნისგან.

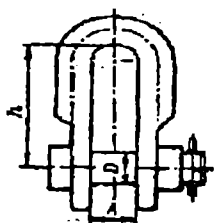
მცირე განიკეეთის ფოლად-ალუმინის სადენების ვიბრაციისა-
გან დაცვისთვის იყენებენ მადემპფერებელ მარყუქს (ნახ. 2.16კ).
მარყუქი მზადდება იმავე მასალისაგან, რომლისგანაც დამზადებუ-
ლია თვით სადენი.

იმ შემთხვევაში, როცა ხაზის ფაზები შეიცავს რამდენიმე სა-
დენს (გახლეჩილი ფაზა), მაშინ მალში რამდენიმე ადგილას აყუ-
ნებენ სადენტა დისტანციურ განბჯენს (ნახ. 2.16 ლ), რაც ხელს უშ-
ლის სადენების ურთიერთმეხებას ან ჩახვევას.

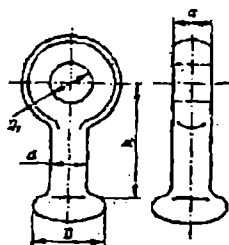
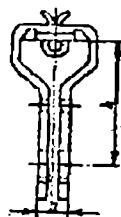
ჩაჭილების არმაგურას წარმოადგენს კავი (ნახ.2.18), ყუნწი
(ნახ.2.19) და საყურე (ნახ.2.20). კავი აკავშირებს გირლანდას საყ-
რდენტან ან საყრდენზე დამაგრებულ სხვა დეტალთან. საყურე იზო-
ლაგორის ქედს აკავშირებს კავთან ან საყრდენის დეტალთან. ყუნ-
წი აერთებს იზოლაგორის ღეროს მომჭერთან ან გირლანდის სხვა
დეტალთან სადენის მხრიდან.



ნახ. 2.18 კავი



2.19 ყუნწი



2.20 საყურე

2.5 კაბელები და საკაბელო ნაგებობები

ძალოვანი კაბელები შედგება ერთი ან რამდენიმე ერთმა-
ნეთისგან იზოლირებული სადენისგან. სადენი მზადდება ალუმინის-

გან (საპეციალურ შემთხვევაში სპილენძისგან) ერთმავთულიანი (16 მმ²-მდე განიკვეთისას) ან მრავალმავთულიანი. ტენის, მეაფას და მექანიკური დაზიანებისგან სადენის იზოლაციის დასაცავად კაბელებს უკეთებენ დამცავ გარსს და ფოლადის ჯაფმანს.

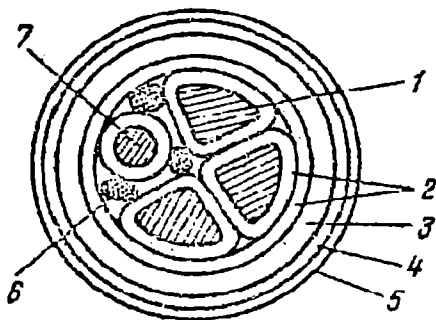
საპაერო ხაზებთან შედარებით საკაბელო ხაზები უფრო ძვირია, მრომატევეალია მშენებლობისა და მონტაჟის დროს, რემონტისას მოითხოვს უფრო მეტ დროს და უფრო კვალიფიციურ მომსახურე პერსონალს. იმავე სიმძლავრის გადაცემისას საკაბელო ხაზებში ლითონის ხარჯი მეტია, ვიდრე საპაერო ხაზებში. აღნიშნულიდან გამომდინარე, საკაბელო ხაზები უპირატესად აიგება იმ ადგილებში, სადაც საპაერო ხაზების აგება გარკვეულ წილად გაძნელებულია ან არაბიზანშეწონილია. მაგალითად, დასახლებულ პუნქტებში, სამრეწველო საწარმოთა ტერიტორიაზე და ა.შ. საკაბელო ხაზები ძირითადად გადის მიწაში, წყლის ქვეშ, დახურულ შენობებში და, ზოგჯერ, ღია სვერცეში.

საკაბელო ხაზების უპირატესობა მდგომარეობს მასში, რომ აქ გამოირიცხულია ატმოსფერული გადატეცაბებები, ქარისა და ღიბყინულის მოქმედება. მინიმუმადეა დაყვანილი უბედური შემთხვევები (მიუწედომელია გარეშე პირთათვის).

1 კვ-მდე ძაბვის ცვლადი დენის ქსელში გამოიყენება ოთხსადენიანი კაბელი, სადაც მეოთხე (ნულოვანი) სადენი უფრო ნაკლები განივი კვეთისაა, ვიდრე დანარჩენი სამი ფაზური სადენი. 6-35 კვ ძაბვის ქსელში სარგებლობენ სამსადენიანი (სამფაზა) კაბელით, ხოლო 110 კვ და მეტი ძაბვისას კი ერთსადენიანი (ერთფაზიანი) კაბელით.

სადენების ერთმანეთისაგან იზოლირებისთვის გამოიყენება მინერალური ბეთით გაჟღენთილი საკაბელო ქაღალდი (ფაზური იზოლაცია), რომელიც ლენტის სახით შემოხვეულია თითოეულ სადენზე. სამივე ფაზას ზემოდან ახვევენ კიდევ იმავე სტრუქტურის საერთო სარგყლისებრ იზოლაციას. 10 კვ-მდე (ჩათვლით) ძაბვის სამ და ოთხსადენიან კაბელებში, გარე ზომების შემცირების მიზნით, დენგამგარ სადენებს აძლევენ სექტორულ ფორმას (ნახ.2.21; 2.22). ამით მცირდება საიზოლაციო მასალის ხარჯი. სადენებს შორის სივრცეს ავსებენ ჯუთისაგან დამზადებული შემავსებლით. გაჟღენთილი საიზოლაციო ქაღალდის პერმეტიზაცია, მასში ჰაერის ან ტენის მოხვედრისგან დასაცავად, ხორციელდება ალუმინის ან, ზოგჯერ, ტყვიის დამცავი გარსით. როცა კაბელი მზადდება მიწაში ან წყალში ჩასადებად, მაშინ მისი დამცავი გარსი დაცული უნდა იქნეს ქიმიური ზემოქმედებისგან, რისთვისაც გარსზე ახვევენ ბიგუმში გაჟღენთილ საიზოლაციო ლენტის ან ბამბის ერთ-ორ ფენას (დამცავ

ვი საფარი). გრანსპორტირებისას, მონგაჟისას და ექსპლუატაციისას შექანიკური დაზიანებისგან დასაცავად კაბელს უკეთებენ ფოლადის ჯაფმანს ლენტის ან მავთულის სახით. დამცავი გარსი და ლითონის ჯაფმანი დაცული უნდა იქნეს კოროზიისგან, ქიმიური ზემოქმედებისგან და მიწაში მოხეგიალე დენებისგან. ამ ზნით, როგორც ჯაფმანსა და გარსს შორის, ასევე ჯაფმანზე გარედან აკეთებენ სპეციალურ დამცავ საფარს, რომელიც სრულდება ასფალტ-ბიტუმში გაყლენთილი ბამბის ჩალიჩის სახით.

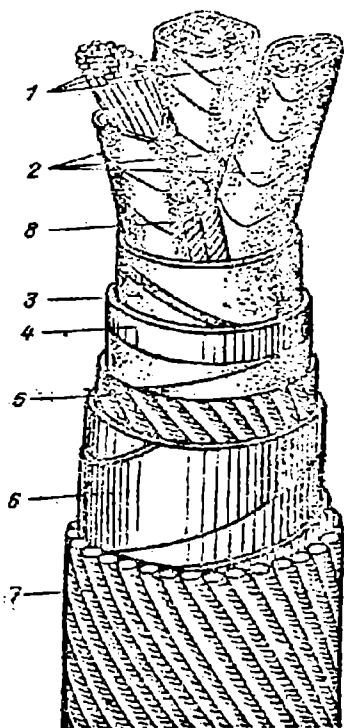


ნახ. 221 1 კე-მდე ძაბვის ოთხსადენიანი კაბელი: 1-ფაზური სადენი; 2-ქაღალდის იზოლაცია; 3-ალუმინის ან ტყვიის დამცავი გარსი;

4-ფოლადის ჯაფმანი; 5-დამცავი საფარი; 6-ქაღალდის შემავსებელი; 7-ნულოვანი სადენი

35 კვ ძაბვაზე კაბელი სრულდება ტყვიის გარსით განცალკევებული წრიული სადენებისგან (ნახ. 223). ცალკეული ფაზის ტყვიის გარსი ჩამოწებულია. იგი უზრუნველყოფს ფაზების ეკრანირებას და ამით უფრო ეფექტური ხდება კაბელის ფაზური იზოლაციის გამოყენება. ფაზათამორისი სივრცე შევსებულია ბიტუმში გაყლენთილი საკაბელო ნართით. ბლანტი გაყლენთის მქონე კაბელებში დატვირთვის დენით გახურების პირველი ციკლის შემდეგ ადგილი აქვს სიცარიელის წარმოქმნას, რაც გამოწვეულია იმით, რომ საკაბელო მასის (ზეთი-ბიტუმი) ტემპერატურული გაფართოების კოეფიციენტი მეტია, ვიდრე საიზოლაციო ქაღალდის, ტყვიისა და სხვათა კოეფიციენტები. სიცარიელის წარმოქმნა ასუსტებს კაბელის ელექტრულ სიმტკიცეს. აღნიშნულის თავიდან აცილების მიზნით, ამზადებენ აირსავესე კაბელებს, რომელშიც გაღის მოქნილი აირგამტარი შლანგი. მისი სა-

შუალებით კაბელის მთელ სიგრძეზე შესაძლებელია იზოლაციაში აირის (ძირითადად ამოგი 0,1 - 0,3 მგპა წნევით) თავისუფალი შესვლა. ამით შეივსება კაბელში წარმოქმნილი სიცარიელები, რაც თავიდან აგვაცილებს იზოლაციის ელექტრული სიმტკიცის შემცირების შემთხვევებს. 110 კვ და მეტი ძაბვის ერთსადენიან კაბელებში გამოიყენება სპილენძის ღრუ სადენი, რომლის შიგნითა სივრცე წარმოადგენს მეთვამყარ არხს (ნახ. 2.24). წნევის მიხედვით გვაქვს დაბალი (0,3 მგპა-მდე) და მაღალი (1,1-1,6 მგპა) წნევის კაბელები. ზეთის ჭარბი წნევა გამოირიცხავს კაბელში სიცარიელების წარმოქმნის შესაძლებლობებს და მნიშვნელოვნად ამაღლებს მის ელექტრულ სიმტკიცეს.

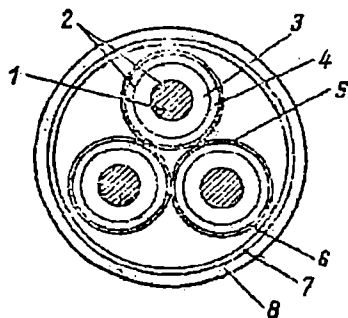


ნახ.2.22 1-10 კვ ძაბვის სამფაზა კაბელი: 1-ფაზური სადენი; 2-ფაზური იზოლაცია; 3-საერთო სარტყლისებრი იზოლაცია; 4-ალუმინის ან ტყვიის დამცავი გარსი; 5-ჯაფმანქვეშა ბალიში; 6-ფოლადის ჯაფმანი; 7-დამცავი საფარი; 8-შემავსებელი.

220-500 კვ ძაბვის საკაბელო ხაზებისთვის უფრო მიზანშეწონილია გამოვიყენოთ მაღალი წნევის კაბელები. ამ ხაზების სა-

მივე ფაზა მოთავსებულია ფოლადის მილგამგარში, რომელიც შეესებულია 1,6 მგა-მდე წნევის ზეობით (ნახ. 2.25).

გრანსპორტირებისა და მონტაჟის პირობების გათვალისწინებით კაბელები მზადდება შეადრებით მცირე სიგრძის (200±600 მეტრი), ამიგომ საკაბელო ხაზის აგებისას ხდება მათი გადაბმა შემართებული ქუროების საშუალებით. გარდა ამისა, მანაწილებელ მოწყობილობასთან მიერთებისთვის იყენებენ საბოლოო ჩანაშენსა და საბოლოო ქუროებს. ამ ქუროებისა და ჩანაშენის ძირითადი დანიშნულებაა კაბელების პერმეტიზაცია გადაბმისა და დაბოლოების ადგილებში.

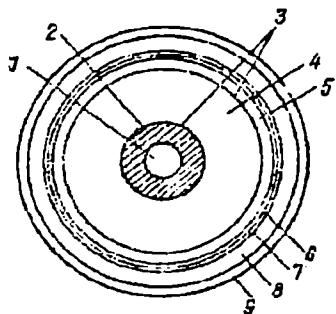


ნახ. 2.23 20-35 კე ძაბვის სამზაფა კაბელი: 1-წრიული ფაზური სადენი; 2-ნახევრად გამგარი ეკრანი; 3-ფაზური იზოლაცია; 4-ტყვიის გარსი; 5-ბალიში; 6-საკაბელო ნართი; 7-ფოლადის ჯაფშანი; 8-დამცავი საკაბელო ნართი

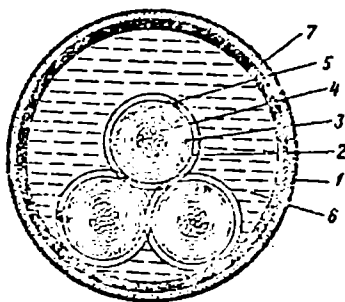
8-დამცავი საკაბელო ნართი

გრანსპორტირების, შენახვისა და მონტაჟის დროს კაბელი უნდა იყოს პერმეტიზებული, ამიგომ წარმოება კაბელს უშეგებს დარჩილული ბოლოებით, მათი დაყოფა ფაზებად უნდა მოხდეს უშუალოდ მონტაჟის დროს. კაბელის შეერთებისას ძარღვების ბოლოებზე მოხსნიან იზოლაციას და ამ ძარღვებს დარჩილავენ სპეციალური გარსაცმით. ქალადის ფაზური იზოლაციის აღდგენის შემდეგ კაბელის იმ ნაწილზე, სადაც მოხდა დამცველი ფენისა და გარსაცმის მოხსნა, დაამაგრებენ ქუროს. 1000 ვ ძაბვებამდე კაბელებისთვის ქურო წარმოადგენს ორი ნახევარისგან შემდგარ თუჯის გარსებს, რომლებიც ერთმანეთზე მაგრდებიან ჭანჭიკებით. ქუროს შიგა არეს შეავსებენ გაყვლებული საიზოლაციო საკაბელო

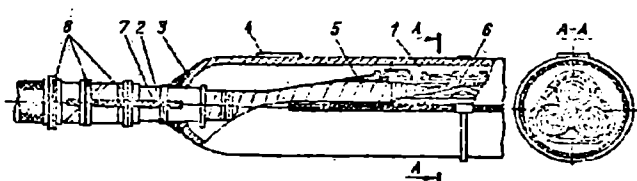
მასით (მეთი-ბიგუმის შედგენილობა). 10კე-მდე ძაბვის კაბელების-
თვის იყენებენ ეპოქსიდის ან გყვიის შემაერთებელ ქეროებს (2.26).



ნახ. 2.24. 110- 220კე ძაბვის და-
ბალი წნევის მეთსავსე ერთფა-
ზა კაბელი: 1-მეთის გამგარი
არხი; 2-ფაზური სადენი; 3-ნა-
ხევრად გამგარი ქაღალდის ეკ-
რანი; 4-იზოლაცია; 5-ლითონის
გარსი; 6-ბალიში; 7-სპილენძის
ლენგა; 8-ჯავშანი; 9-დამცავი
საფარი



ნახ. 2.25. 220-500 კე ძაბვის მა-
ღალი წნევის სამფაზა კაბელი:
1-ფოლადის მილგამგარი; 2-სპი-
ლენძის ლენგა (ეკრანი); 3-ქა-
ღალდის იზოლაცია; 4-ფაზური
სადენი; 5-ნახევარწრიული მაფ-
თული; 6-მეთი; 7-დამცავი სა-
ფარი

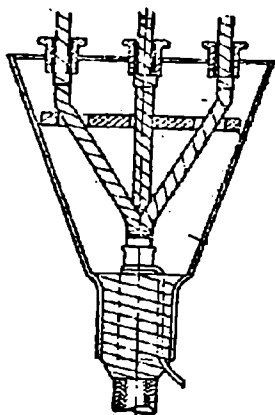


ნახ. 2.26. 6-110 კე ძაბვის კაბელის გყვიის შემაერთებული ქერო:
1-ფაზური სადენი; 2-გყვიის ან ალუმინის გარსი; 3-გყვიის ქერო;
4-საკაბელო მასის ჩასასხმელი ხერედი; 5-საკაბელო ქაღალდი;
6-შემაერთებული მასა; 7-ჩამიწების სადენი; 8-არტახი

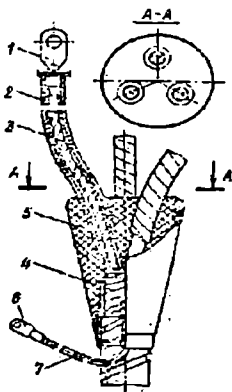
უმარტივესი სახის საბოლოო ჩანამენი წარმოადგენს ფო-
ლადის ძაბრს (ნახ. 2.27), რომელსაც გააჩნია ფაზების განბჯენი.

ფაზებად დაყოფის შემდეგ ძაბრს შეავსებენ მეთი-ბიგუმის სა-
კაბელო მასით.

10 კვ ძაბვის კაბელებისთვის ფართო გავრცელება პპოვა ეპოქსიდის საბოლოო ჩანაშენმა (ნახ. 2.28). კაბელების გრანსფორმაციებთან და მანაწილებელ მოწყობილობებთან მისაერთებლად გამოიყენება KHF 10-240 ტიპის ევრტიკალური იზოლატორებიანი საბოლოო ქურო (ნახ. 2.29). 110 კვ და უფრო მეტი ძაბვის კაბელების შემაერთებელ და საბოლოო ქუროებს აქვთ უფრო რთული კონსტრუქცია. მათი შესწავლა ხდება სპეციალურ კურსში.



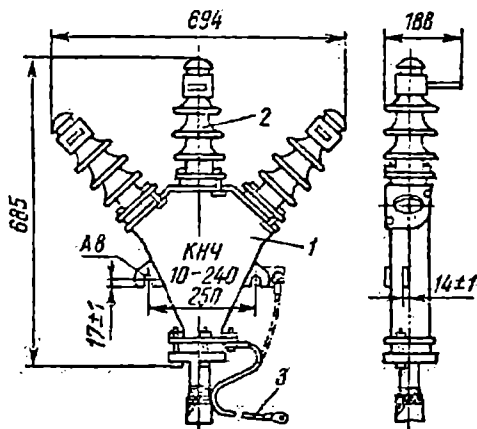
ნახ. 2.27 უმარტივესი სახის საბოლოო ჩანაშენი (ფოლადის ბაბრი)



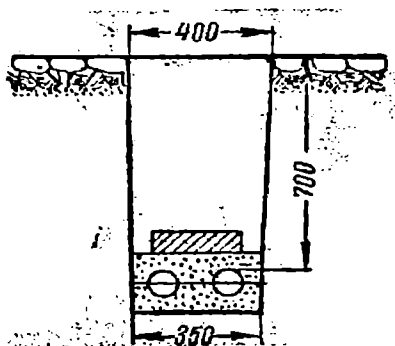
ნახ. 2.28 KBF-ტიპის მშრალი საბოლოო ჩანაშენი: 1-ბუნიკი; 2-პლასტმასის მილი; 3-ფაშური სადენი; 4-ლითონის გარსი; 5-კორპუსი (ეპოქსიდი); 6-ჩამიწების სადენის ბუნიკი; 7-ჩამიწების სადენი.

საკაბელო ხაზების გაყვანა ხორციელდება როგორც მენობის შიგნით, ასევე მის გარეთ. ფართოდ გამოიყენება კაბელების ჩალაგება მიწის გრანშეაში (ნახ. 2.30).

გრანშეის ფსკერზე დაყრიან ფხვიერ მიწას და ალაგებენ კაბელებს. დააყრიან ისევ მიწას და მსუბუქად დატკეპნიან. ეს ღონისძიება საჭიროა იმისთვის, რომ, ერთის მხრივ, თავიდან ავიცილოთ კაბელის დაზიანება ქვებისგან ან სხვა მყარი საგნებისგან და, მეორეს მხრივ, უზრუნველყოთ კაბელის ზედაპირის გრუნტთან კარგი შეხება გაცივების პირობების გაუმჯობესების მიზნით. შემდეგ ზემოდან დაალაგებენ აგურის ან ბეტონის ფილების დამსაყვე ფენას, რის შემდეგ გრანშეას აავესებენ მიწით და ალაგენენ სავალ ნაწილს.

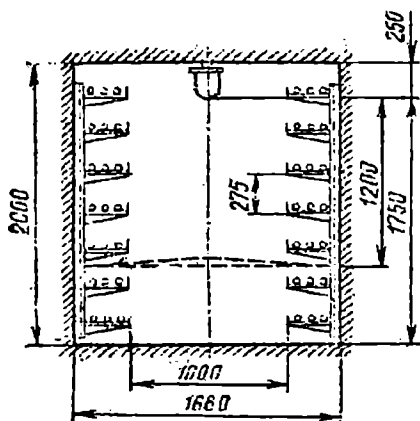


ნახ. 2.29 KH4 10-240 გიპის საბოლოო ქერო: 1-ლითონის კორპუსი; 2-ფაიფურის იზოლატორი; 3-ზამბიწების სადენი



ნახ. 2.30 კაბელი გრანშეაში

კაბელების ჩაწყობის აღნიშნული ტექნოლოგია მარტივია და ამავე დროს უზრუნველყოფილია გაცივების კარგი პირობები, მაგრამ ადგილი აქვს შემდეგ ხარვეზებს: ერთ გრანშეაში შეუძლებელია ჩაიწყოს 5-6 კაბელზე მეტი; კაბელის დაზიანების დიდი ალბათობა მიწის სხვადასხვა სახის სამუშაოების ჩატარების დროს; კაბელების რემონტის დროს გრანშეას და გზების გადათხრის აუცილებლობა. ბოლო ორი ნაკლის თავიდან აცილების მიზნით, იყენებენ აზბესტცემენტის მილებს, რომლებსაც ძირითადად ხმარობენ გზების, ქუჩების და სხვა საგალი ადგილების საკაბელო ხაზებით გადაკვეთის დროს. ამ შემთხვევაში ყოველ 25+75 მეტრის მანძილზე აყენებენ საკაბელო ჭებს, რომელთა მეშვეობით ხდება კაბელების ჩაწყობა. კაბელების ჩაწყობის ეს ტექნოლოგია ძვირია და ამასთან კაბელის დაზიანების დროს იგი მთლიანად უნდა გამოიყვალოს ერთი ჭიდან მეორემდე, მაშინ როცა გრანშეაში ჩაწყობის დროს

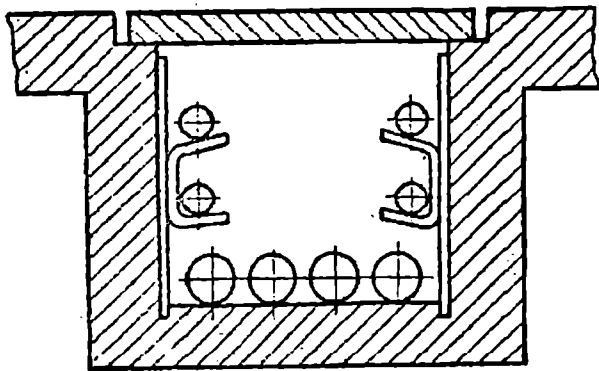


ნახ. 2.31 საკაბელო გვირაბი

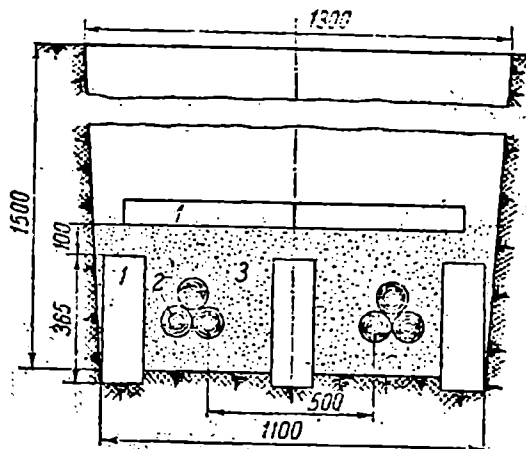
შესაძლებელი არის დაზიანების ადგილის აღდგენა შემაერთებული ქუროების მეშვეობით. ამავე დროს უარესდება კაბელების გაცივების პირობები, რაც იწვევს გახურების მიხედვით დასაშვები დენის შემცირებას 25+35%-ით.

თანამდეროვე მსხვილ საწარმოთა კვებისთვის საჭიროა საკაბელო ხაზების რიცხვის ზრდა. ამ შემთხვევაში უფრო ეკონომიური აღმოჩნდა საკაბელო გვირაბები (ნახ.2.31) და არხები (ნახ.2.32). გვირაბები გამოიყენება, როცა კაბელების რიცხვი აღწევს 20+50-ს, უფრო ნაკლები რიცხვის დროს კი სარგებლობენ არხებით.

110 კე ძაბვის სამუშალო წნევის ზეთსავესე კაბელებს აწყობენ გვირაბებში ან მიწის გრანშეაში (ნახ. 2.33). ამ შემთხვევაში მთელი საკაბელო ხაზი დაცულია მექანიკური დამიანებისგან რკინაბეტონის ფილებით.



ნახ. 2.32 საკაბელო არხი



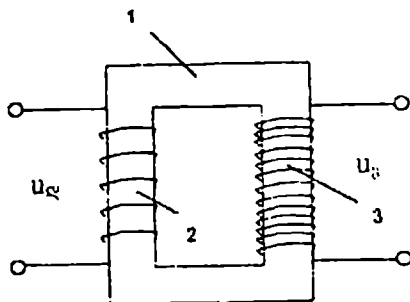
ნახ. 2.33 – 110 კე ძაბვის ზეთსავესე კაბელი გრანშეაში:
1-რკინაბეტონის ფილა; 2-კაბელი; 3-ფხვიერი ქვიშა

2.6 გრანსფორმატორები და ავტოგრანსფორმატორები

2.6.1 ზოგადი ცნობები

ელექტრულ სადგურებსა და ქვესადგურებზე აყენებენ ძაბვის სამალღებელ და სადაბლებელ გრანსფორმატორებს, რომელთა საშუალებით ცვლადი დენის ერთი საფეხურის ძაბვა გარდაიქმნება იმავე სიხშირის მეორე საფეხურის ძაბვად. გრანსფორმატორის მუშაობის პრინციპი ემყარება ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენას. კერძოდ, ჩაკეტილი კონტურით შემოსაზღვრულ ფართში გამავალი ცვლადი მაგნიტური ნაკადი ამავე კონტურში აღძრავს ინდუქციის ელექტრომაგნიტურ ძაბვას.

გრანსფორმატორის აქტიურ ნაწილს წარმოადგენს ფოლადის გულარა, რომელსაც მაგნიტოგამტარს უწოდებენ, და მასზე დახვეული სპილენძის გრაგნილი (ნახ.2.34).



ნახ.2.34 ორგრაგნილიანი გრანსფორმატორის პრინციპული სქემა.

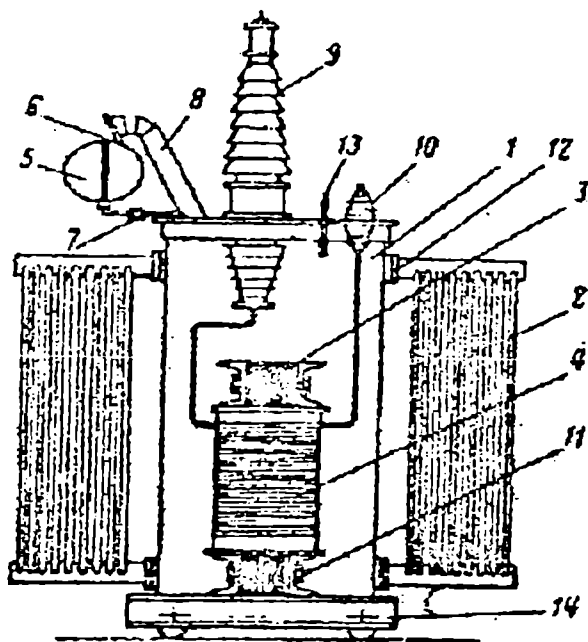
1-ფოლადის გულარა; 2-დაბალი ძაბვის გრაგნილი;

3-მაღალი ძაბვის გრაგნილი

ფოლადის გულარა სპილენძის გრაგნილებთან ერთად მოთავსებულია საგრანსფორმატორო ბეთით სავსე სპეციალურ აეზში, რომლის კედლებთან მიერთებულია რადიატორები, ხოლო სახურავზე კი განთავსებულია საფართოებელი და გამოსაფრქვევი (დამცავი) მილი (ნახ.2.35). საგრანსფორმატორო ბეთის დანიშნულებაა, ერთის მხრივ, გრაგნილებსა და კორპუსს შორის, და გრაგ-

ნილთა ხეიებს შორის საიმოლააციო გარემოს შექმნა და, მეორეს მხრივ, ტრანსფორმატორის გაცივება.

ტრანსფორმატორის გულარა აწყობილია სპეციალური ელექტროტექნიკური ფოლადის 0,35+0,50 მმ სისქის ფურცლებისგან, რომელთა ზედაპირი, გრიგალური ღებების შემცირების მიზნით, დაფარულია საიმოლააციო ფენით.



ნახ.235 ტრანსფორმატორის კოსტრუქციული სქემა:

1-აგზი; 2-რადიატორი; 3-მაგნიტოგამგარი (ფოლადის გულარა); 4-სპილენძის გრაგნილი; 5-საფართოებელი; 6-შეთის მაჩვენებელი მინის მილი; 7-გამზერი რელე; 8-გამოსაფრქვევი (დამცავი) მილი; 9-მაღალი ძაბვის შემყვანი; 10-დაბალი ძაბვის შემყვანი; 11-მომჭი-მი ჭანჭიკი; 12-რადიატორის ონკანი; 13-სპირტიანი თერმომეტრი; 14-ურიკა.

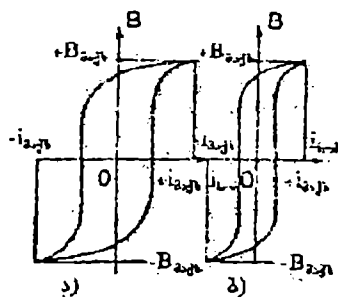
ტრანსფორმატორის გრაგნილი შესრულებულია მართკუთხა ან წრიული განიკვეთის მქონე სპილენძისგან, ზოგჯერ ალუმინის-

გან. გრაგნილები შესრულების მიხედვით შეიძლება იყოს ცილინდრული ან დისკოსებრი. ცილინდრული გრაგნილები მაგნიტოგამგარის ღეროებზე განლაგებულია კონცენტრულად. ამასთან დაბალი ძაბვის გრაგნილი უშუალოდ ღეროსთანაა განლაგებული, ხოლო მაღალი ძაბვის გრაგნილი კი ქმნის შემდგომ ფენას. დისკოსებრი მსურულების შემთხვევაში მაღალი და დაბალი ძაბვის გრაგნილები ღეროზე განლაგებულია მონაცვლეობით. გრაგნილები იზოლირებულია გულარასგან, ერთმანეთისგან და ავზის კედლისგან. გრანსფორმატორის ავზი ოვალური ფორმისაა და მზადდება ფურცლოვანი ფოლადისგან. სიხისტის გაზრდის მიზნით მასზე მიდუღებულია სიხისტის წიბოები.

მოდებული ძაბვის სიხშირის მიხედვით უქმი სვლის დენის სიდიდისა და მიმართულების მუდმივად ცვლილების გამო მაგნიტოგამგარში აღგილი აქვს ფოლადის დამაგნიტება-გადამაგნიტებას, რომელსაც თან სდევს მისი გახურება ე.ი. ენერგიის დანაკარგი. ამ ენერგიის სიმძლავრე ფოლადის ერთეული მასის მიმართ წარმოადგენს ერთ-ერთ მნიშვნელოვან მახასიათებელს მაგნიტოგამგარის ფოლადისთვის და მას ფოლადში ხვედრითი დანაკარგები ეწოდება.

განასხვავებენ დანაკარგების ორ ძირითად სახეს – დანაკარგების პისტერეზისზე (P_{Σ}) და დანაკარგების გრიგალურ დენებზე (P_{Γ}).

ფართი, რომელიც შემოსაზღვრულია პისტერეზისის ყულფით (ნახ.2.36) პროპორციულია სიმძლავრის იმ ხვედრითი დანაკარგებისა, რომლებიც იხარჯება ფოლადის გადამაგნიტებაზე.



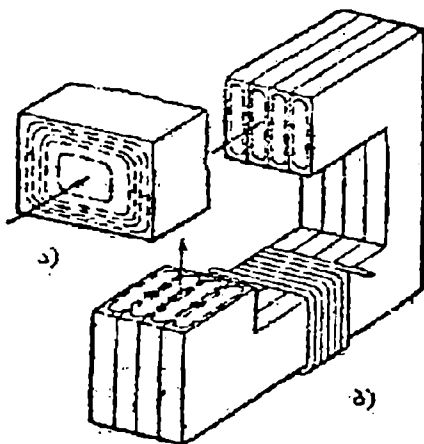
ნახ.2.36 პისტერეზისზე დანაკარგები მაგნიტოგამგარში:

- ა) მცირე სილიციუმის მქონე მაგნიტოგამგარი;
- ბ) სილიციუმის მაღალი შემცველობის ფოლადი.

გრიგალური ღენები წარმოიქმნებიან მაგნიტური ნაკადის მიმართულების პერპენდიკულარულ სიბრტყეში, (ნახ 237). ამიგომ ამ ღენებით გამოწვეული დანაკარგები დამოკიდებულია მაგნიტოგამგარის ზომებზე და პირდაპირ პროპორციულია ფოლადის სისქის კვადრატისა და უკუპროპორციულია ფოლადის ხეღრითი ელექტრული წინაღობისა. ამ კარგეების შემცირების მიზნით მაგნიტოგამგარს ამზადებენ არა მთლიანი ფოლადის სხმულისგან, არამედ ერთმანეთისგან იზოლირებული ფოლადის თხელი ფენებისგან.

ფოლადის ერთ-ერთ ძირითად მახასიათებელს წარმოადგენს მისი ინდუქცია, რომელიც გრანსფორმატორის მაგნიტოგამგარისა და გრანგნილების ზომებისა და წონის განმსაზღვრელია.

გრანსფორმატორის ზომების შემცირების მიზნით ცდილობენ გაზარდონ მაგნიტოგამგარის ინდუქცია. ამ მიზნით გამოიყენება ცოვად ნაგლინი მაღალი ინდუქციის მქონე სპეციალური ელექტროტექნიკური ფოლადი.



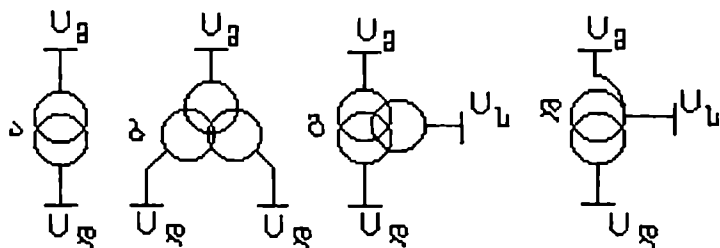
ნახ.237 გრიგალური ღენები გრანსფორმატორის მაგნიტოგამგარში: ა) მასიური რკინის ღროს; ბ) ერთმანეთისგან იზოლირებული თხელი ფირფიტების შემთხვევაში.

ელექტრულ ქსელში ფართოდ გამოიყენება სამფაზა ან ერთფაზა ორგრანგნილიანი და სამგრანგნილიანი გრანსფორმატორები და ავტოტრანსფორმატორები. როცა საჭირო ხდება ენერგიის გაცემა ძაბვის ორ სხვადასხვა საფეხურზე, მაშინ ეკონომიკურად ხელ-

საყრელია გამოვიყენოთ სამგრაგნილიანი გრანსფორმატორი, ვიდრე ორი ორგრაგნილიანი. ამ შემთხვევაში დაიზოგება მიწის ფართობი, მაგერიალური და კაპიტალური ხარჯები და მცირდება ენერგიის დანაკარგები. ასევე ეკონომიკურია სამუშაო გრანსფორმატორების გამოყენება ერთფაზასთან შედარებით, თუმცა ზემაღალი ძაბვის შემთხვევებში დიდი სიმძლავრეების გრანსფორმატორების გრანსპორტირების გააღვილების მიზნით უპირატესობა ენიჭება ერთფაზა ავტოგრანსფორმატორებს.

რიგ შემთხვევებში ორგრაგნილიანი გრანსფორმატორების დაბალი ძაბვის გრაგნილი შეიცავს ერთმანეთისგან იზოლირებულ ორ (ან მეტ) პარალელურ მტოს. ასეთ გრანსფორმატორებს გახლეჩილ გრაგნილიან გრანსფორმატორებს უწოდებენ. გრანსფორმატორთა ასეთი შესრულების შემთხვევაში მნიშვნელოვნად მცირდება მოკლედ შერთვის დენები და, შესაბამისად, შემსუბუქდება ამ ძაბვის შემკრები საღტეები და აპარატურა.

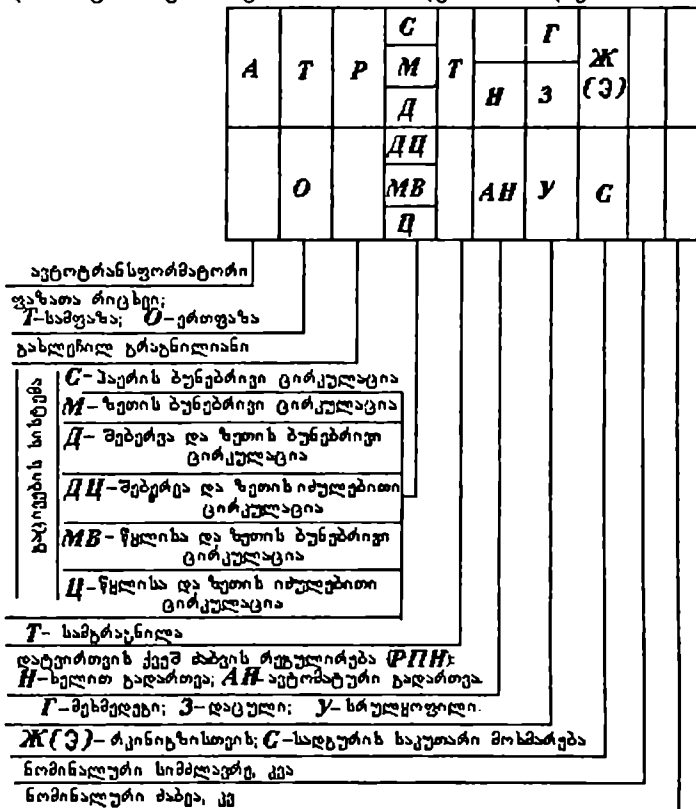
გრანსფორმატორთა პირობითი აღნიშვნა ნაჩვენებია 2.38 ნახაზზე, ხოლო 2.39 ნახაზზე მოცემულია ყოფილი საბჭოთა კავშირის ქარხნებში დამზადებული გრანსფორმატორების ტიპების აღნიშვნა.



ნახ.2.38 გრანსფორმატორთა პირობითი აღნიშვნები:
ა-ორგრაგნილა; ბ-ორგრაგნილა გახლეჩილი გრაგნილით;
გ-სამგრაგნილა; დ-ავტოგრანსფორმატორი

გრანსფორმატორთა ძირითად სახასიათო პარამეტრთა შორის განიხილება გრაგნილთა ნომინალური სიმძლავრე და ძაბვა, რომელთა მნიშვნელობა დადგენილია სასტ-ით (სახელმწიფო სტანდარტი). ორგრაგნილიანი გრანსფორმატორის ორივე გრაგნილის ნომინალური სიმძლავრე ერთნაირია და გრანსფორმატორის ნო-

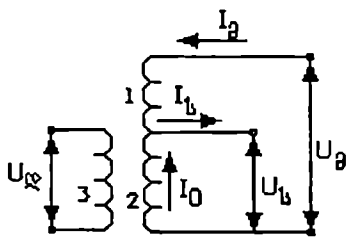
მინალური სიმძლავრის გოლია. ორად გახლეჩილი გრაგნილის შემთხვევაში თოთოეული გახლეჩილი გრაგნილის სიმძლავრე გრანსფორმატორის ნომინალური სიმძლავრის ნახევრის გოლია. სამგრაგნილიანი გრანსფორმატორები გრაგნილთა ნომინალური სიმძლავრეების მიხედვით შეიძლება იყოს შემდეგი შესრულების: 100/100/100%; 100/100/66.7% და 100/66.7/66.7%, სადაც თოთოეული რიცხვი, შესაბამისად, გვიჩვენებს მაღალი, საშუალო და დაბალი ძაბვის გრაგნილთა ნომინალური სიმძლავრის პროცენტულ მნიშვნელობას გრანსფორმატორის ნომინალური სიმძლავრის მიმართ.



ნახ.2.39 გრანსფორმატორების ტაბის აღნიშვნა

სხედასხეა მაღალი ნომინალური ძაბვის ქსელების დასაკაჟე შირებლად ძირითადში გამოიყენება აეგოგრანსფორმატორები. გან-

სხვაეებით გრანსფორმატორებისგან ავტოგრანსფორმატორების გრაგნილებს შორის, გარდა მაგნიტური კავშირისა, არის აგრეთვე ელექტრული კავშირიც. ავტოგრანსფორმატორი შეიცავს მიმდევრობით 1, საერთო 2 და დაბალი ძაბვის 3 გრაგნილებს (ნახ. 2.40). მიმდევრობითი და საერთო გრაგნილი ერთმანეთთან კავშირშია როგორც ელექტრულად, ასევე მაგნიტურად. დაბალი ძაბვის გრაგნილი დანარჩენ ორთან მხოლოდ მაგნიტურ კავშირშია.



ნახ.2.40 ავტოგრანსფორმატორის ერთი ფაზის ელექტრული სქემა

ავტოგრანსფორმატორის ნომინალური სიმძლავრე ეს ის ზღვრული სიმძლავრეა, რომელიც შეიძლება გადაეცეთ მაღალი ძაბვის მხრიდან საშუალო ძაბვის მხარეს:

$$S_6 = \sqrt{3}U_{\text{აფ.}} \cdot I_{\text{აფ.}} = \sqrt{3}U_{\text{სფ.}} \cdot I_{\text{სფ.}}$$

გარდა ნომინალური სიმძლავრისა, ავტოგრანსფორმატორები ხასიათდებიან აგრეთვე გიპიური სიმძლავრით, რომელიც მაგნიტური გზით გადაეცემა მიმდევრობითი გრაგნილიდან საერთო გრაგნილს და რომელზედაც გათვლილია ეს გრაგნილები:

$$S_{\text{გიპ.}} = S_{\text{აფ.}} = \sqrt{3}I_{\text{აფ.}}(U_{\text{აფ.}} - U_{\text{სფ.}}) = \sqrt{3}I_{\text{აფ.}}U_{\text{აფ.}}(1 - \frac{U_{\text{სფ.}}}{U_{\text{აფ.}}}) = S_6(1 - K_6) = \alpha S_6$$

სადაც $\alpha = 1 - K_6 < 1$ წარმოადგენს ავტოგრანსფორმატორის ხელსაყრლობის კოეფიციენტს. რადგანაც $\alpha < 1$, ვღებულობთ $S_{\text{გიპ.}} < S_6$.

გრანსფორმატორების მაგნიტოგამტარის გაანგარიშება ხდება მაგნიტური გზით გადაეცემული სიმძლავრის მიხედვით. აქედან გამომდინარე, ავტოგრანსფორმატორების მიმდევრობითი და საერთო გრაგნილები გაანგარიშდება ნომინალურზე ნაკლები სიმძლავრის ან გიპიური სიმძლავრის მიხედვით. ასევე, გიპიური სიმძლავრის მიხედვით გაანგარიშდება დაბალი ძაბვის გრაგნილიც.

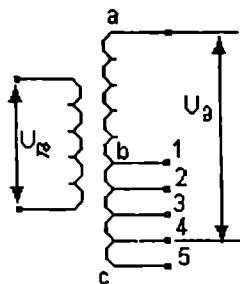
რადგანაც ავტოგრანსფორმატორის მაგნიტოგამტარის გაანგარიშება ხდება $S_{\text{გიპ.}} < S_6$ სიმძლავრის მიხედვით, მისი აქტიური ნა-

წილის ზომები ნაკლებია იმავე ნომინალური სიმძლავრის მქონე ორგრაგნილთა გრანსფორმატორების აქტიური ნაწილის ზომებთან შედარებით. აქედან გამომდინარე, ნაკლებია ავტოგრანსფორმატორის წონა, მეთის მოცულობა, სპილენძისა და ფოლადის ხარჯი, გაბარიტები, ნაკლებია დანაკარგები გრიგალურ დენებზე და სხვა, რაც მიუთითებს ავტოგრანსფორმატორების უპირატესობაზე იმავე სიმძლავრის ორგრაგნილიან გრანსფორმატორებთან შედარებით.

ეს უპირატესობა დამოკიდებულია ავტოგრანსფორმატორის ხელსაყრელობის კოეფიციენტზე და იგი მით მეტი ხარისხით გამოვლინდება, რაც უფრო ახლოსაა ერთმანეთთან ურთიერთდასაკავშირებელი ნომინალური ძაბვები. აღნიშნულის გამო ავტოგრანსფორმატორები ხელსაყრელია გამოვიყენოთ შემდეგი ნომინალური ძაბვების მქონე ელექტრული ქსელების დასაკავშირებლად: 220/110; 330/220; 500/220; 750/330; 1150/500; 1150/750 კვ. სხვა შემთხვევაში ავტოგრანსფორმატორთა ტექნიკურ-ეკონომიკური უპირატესობა უმნიშვნელოა.

გრაგნილებს შორის ელექტრული კავშირის გამო ავტოგრანსფორმატორთა უარყოფით მხარეს წარმოადგენს: 1. შედარებით გართულებულია რეგულირება დაყვანისა და ძაბვის რეგულირების საკითხები; 2. მაღალი ძაბვის ქსელში ერთფაზა ჩამიწების შემთხვევაში შესაძლებელია საშუალო ძაბვის ქსელი აღმოჩნდეს მაღალი ძაბვის ქვეშ, რომლის თავიდან აცილებისთვის აუცილებელია ნეიტრალის ყრუდ ჩამიწება; 3. ნეიტრალის ყრუდ ჩამიწება თავის მხრივ განაპირობებს მოკლე შერთვის დენების ზრდას.

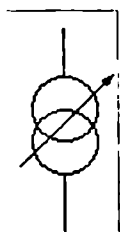
მომხმარებელთან მიწოდებული ელექტრული ენერგიის ხარისხის ერთერთი დამახასიათებელი პარამეტრია ძაბვა, რომლის საჭირო დონის უზრუნველყოფა, სხვა არსებული საშუალებების გარდა, შესაძლებელია გრანსფორმატორთა გრანსფორმაციის კოეფიციენტის შეცვლით. ეს ხორციელდება გრაგნილთა მუშა ხვეების რაოდენობის შეცვლის გზით. ამ მიზნით გრანსფორმატორის მაღალი ძაბვის გრაგნილს ამზადებენ არარეგულირებადი (აგ) და რეგულირებადი (აგ) ნაწილებისგან (ნახ.2.41). რეგულირებად ნაწილზე განხორციელებულია რამდენიმე გამომყვანი, რომელთა საშუალებით ხდება გრანსფორმაციის კოეფიციენტის შეცვლა.



ნახ.2.41 გრანსფორმატორის გრანსფორმაციის კოეფიციენტის ცვლილების პრინციპული სქემა

გამომყვანიდან გამომყვანზე გადართვის შესაბამისი მექანიზმის კონსტრუქციის მიხედვით გვაქვს ძაბვის რეგულირების ორი ხერხი. პირველი – გადართვა, როცა გრანსფორმატორი ამორთულია ქსელიდან (ძაბვა მოხსნილია) და, მეორე – გადართვა დატვირთვის ქვეშ. პირველ შემთხვევაში გვაქვს **ПБВ** გრანსფორმატორები, ხოლო მეორე შემთხვევაში კი **РПН** გრანსფორმატორები. **ПБВ** გრანსფორმატორებს აქვთ ძაბვის რეგულირების შედარებით მცირე დიაპაზონი მცირე რაოდენობის საფეხურებით $\pm 2 \times 2.5\%$, ან $\pm 1 \times 5\%$, ხოლო **РПН** გრანსფორმატორებს გააჩნიათ რეგულირების უფრო დიდი დიაპაზონი უფრო ბუსტი რეგულირებით $\pm 8 \times 1.5\%$, $\pm 9 \times 1.78\%$.

გრანსფორმატორებს, რომლებიც აღჭურვილნი არიან ძაბვის რეგულირების მოწყობილობებით, ელექტრულ სქემებზე პირობითად წარმოადგენენ 2.42 ნახაზზე ნაჩვენებ სახეში.



ნახ.2.42 ძაბვის რეგულირების მოწყობილობის მქონე გრანსფორმატორის პირობითი აღნიშვნა

2.6.2 გრანსფორმატორების გაცივების სისტემები

მუშაობის პროცესში გრანსფორმატორების ფოლადსა და სპილენძში ენერგიის დანაკარგები გარდაიქმნება სითბოდ და იწვევს გრანსფორმატორის ნაწილების გახურებას. გახურების ზღვრუ-

ლი მნიშვნელობა შეზღუდულია იზოლაციით, რომლის სამსახურის ვადა დამოკიდებულია გახურების ტემპერატურაზე.

გრანსფორმატორის გაცივების სისტემა ემყარება ზედაპირული გაცივების პრინციპს, რომლის დროსაც გამაცივებელ საშუალებას წარმოადგენს ჰაერი ან ზეთი. შესაბამისად გვაქვს მშრალი და ზეთიანი გრანსფორმატორები.

მშრალ გრანსფორმატორებში გახურებული ნაწილებიდან სითბოს ართმევა ხდება ჰაერის ბუნებრივი ცირკულაციის საშუალებით. გაცივების ეს სისტემა საკმარის ეფექტს იძლევა მხოლოდ მცირე სიმძლავრის მქონე გრანსფორმატორებისთვის. ამიგომ, ითვალისწინებენ რა სიძნელებებს იზოლაციის შესრულებაში, მშრალი გრანსფორმატორები მზადდება მხოლოდ 10 კვ-მდე ძაბვისა და 750 კვა სიმძლავრემდე. ზეთის არ არსებობის გამო მშრალი გრანსფორმატორები ხანძარუსაფრთხოა.

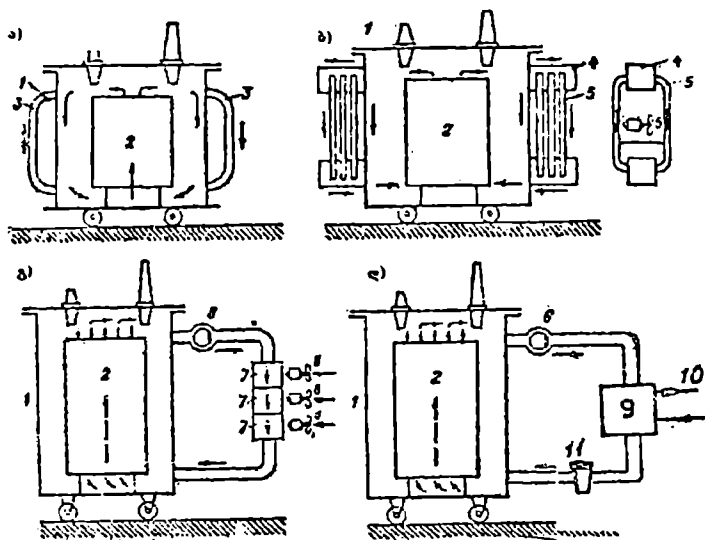
გრანსფორმატორეთა უდიდესი ნაწილი ცივდება ზეთით, რომელიც იმავდროულად ასრულებს საიზოლაციო ფუნქციასაც.

ზეთიანი გრანსფორმატორების გაცივების პრინციპი ხორციელდება სითბოს ართმევით გრანსფორმატორის ან სპეციალურად ამ მიზნებისთვის დაყენებული გამაცივებელი მოწყობილობის ზედაპირებიდან.

ზეთის გახურებული ფენა მოძრაობს აეზის სახურავისკენ და მის ადგილს იკავენს აეზის კედლებითა და რადიატორის მილებში გაცივებული ზეთის ახალი ფენები, რომლებიც გრანსფორმატორის გაცხელებული ნაწილებიდან ღებულობენ სითბოს ახალ ულუფას. ამ გზით ხდება ზეთის ბუნებრივი ცირკულაცია. გაცივების ეს სქემა საფუძვლად უდევს გრანსფორმატორის გაცივების ყველა სისტემას, რომელიც პრაქტიკაშია გამოყენებული. მათ რიცხვს მიეკუთვნება: ზეთის ბუნებრივი ცირკულაცია – პირობითი სახელწოდებით M სისტემა; ზეთის ბუნებრივი ცირკულაცია და შებერვა – II სისტემა; ზეთის იძულებითი ცირკულაცია და შებერვა – III სისტემა; ზეთისა და წყლის იძულებითი ცირკულაცია – IV სისტემა [63].

გაცივების M სისტემაში ზეთი ცირკულირებს ცხელი და ცივი ფენების სიმკვრივეებს შორის სხვაობათა გამო (ნახ. 2.43). ეს სისტემა ნაკლებად ეფექტურია და სითბოს სათანადო ართმევას უზრუნველყოფს მხოლოდ 25 კვა-მდე ნომინალური სიმძლავრის ურადიატორო და 1.6 მგვა-მდე ნომინალური სიმძლავრის მილებიანი რადიატორის მქონე გრანსფორმატორებისთვის. თუ გაცივების ეფექტურობის მიზნით შევექმნით სპეციალური კონსტრუქციის რადიატორებს (ზეთის ზედა და ქვედა კოლექტორი, მილებზე მიდუღებულია დამატებით წიბოები გაცივების ფართობის გაზრდის მიზნით),

გრანსფორმატორის ნომინალური სიმძლავრე ამ შემთხვევაში შეიძლება გაეზარდოს $10+16$ მგვა-მდე. ზღვრული სიმძლავრის გაზრდა (80 მგვა-მდე) შეიძლება თუ განვახორციელებთ გაცხელებული რადიატორების შემოქრევას სპეციალური შემხერი ვენტილატორების საშუალებით (ნახ. 2.43ბ). შემხერი ვენტილატორები შეიძლება გამოირთოს იქნეს თუ გრანსფორმატორის დატვირთვა არ აღემატება ნომინალური სიმძლავრის 25-30%-ს. გაცივების ამ სისტემას ეწოდება II სისტემა. უფრო მძლავრი (80 მგვა და მეტი) გრანსფორმატორების გაცივებისთვის გამოიყენება გაცივების უფრო ეფექტური სისტემა III, სადაც რადიატორების შემოქრევასთან ერთად განხორციელებულია ზეთის იძულებითი ცირკულაცია ზეთის მაგისტრალში ზეთის ტუმბოების დაყენების გზით (ნახ.2.43.გ).



ნახ.2.43 გრანსფორმატორთა გაცივების სისტემები: ა) I სისტემა; ბ) II სისტემა; გ) III სისტემა; დ) IV სისტემა. 1-ავზი; 2-აქტიური ნაწილი (გულარა სპილენძის გრაგნილებით); 3-გამაცივებელი ზედაპირი (რადიატორი); 4-კოლექტორი; 5-შილბიანი რადიატორი; 6-ზეთის ტუმბო; 7-რადიატორები; 8-შემხერი ვენტილატორები; 9-ზეთგამაცივებელი; 10-წყლის მაგისტრალი; 11-პაერდამჭერი

Д და ДА სისტემებში შემხერი ვენტლაგორების გაშვება და გაჩერება წარმოებს ავტომატურად მეთის ტემპერატურისა და ტრანსფორმატორის დატვირთვისგან დამოკიდებულებაში. ДА სისტემაში ელექტროენერგიის ხარჯი შებერვაზე თითქმის 2-3-ჯერ მეტია, ვიდრე Д სისტემაში და ტრანსფორმატორში ყოველ 1 კვტ დაკარგულ სიმძლავრეზე გაანგარიშებით შეადგენს დაახლოებით 20-30 ვტ-ს.

განსაკუთრებით მძლავრი ტრანსფორმატორებისთვის მოგჯერ გამოიყენება წყალ-მეთიანი გაციეების სისტემა, სადაც იძულებით ცირკულირებული მეთი ცივდება წყლიან გამაციებლებში ასევე იძულებითი ცირკულირებული წყლით (ნახ. 2.43.დ). წყლიანი მეთგამაციებლის მილებში მოძრაობს წყალი, ხოლო მილებს შორის სივრცეში კი მეთი.

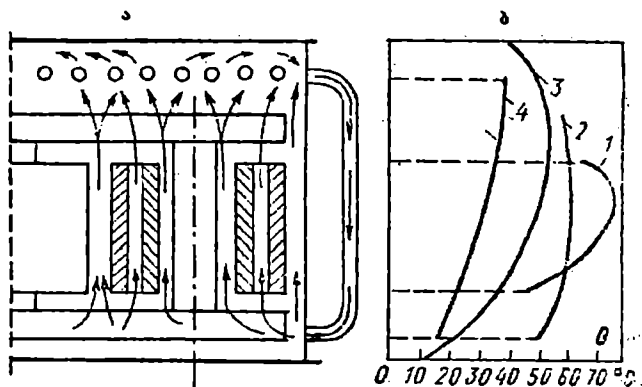
გაციეების სისტემის დროს მიღებული უნდა იქნეს ყველა შემადლო ღონისძიება, რათა ტრანსფორმატორში არ მოხედეს წყალი: 1. მეთის მოძრაობის მიხედვით მეთის ტუმბო ყოველთვის დგას მეთგამაციებლის წინ, რათა მასში მეთი ქმნიდეს ჰარბ წნევას და არა გაიშვიათებას; 2. მეთის მაგისტრალში მეთის წნევა 0,1-0,2 მგპა-ით მეტი უნდა იყოს, ვიდრე წყლის წნევა წყლის მაგისტრალში; 3. ტრანსფორმატორში შემავალ მეთმაგისტრალში აყენებენ ჰაერდამჰერს, საიდანაც პერიოდულად გამოუმეებენ ჰაერს სპეციალურად ამ მიზნისთვის ჩამონგაყებული ონკანის საშუალებით; 4. მეთის ტუმბოს ავარიულად გაჩერების დროს მეთის სტატიკური წნევა 0,03-0,05 მგპა-ით მეტი უნდა იყოს, ვიდრე წყლის წნევა გამაციებელში, რისთვისაც მეთგამაციებელი ტრანსფორმატორზე უფრო დაბლა უნდა იდგეს; 5. გაციეების სისტემის შემადგენელი კვანძები (მილგაყვანილობა, ტუმბოები, მეთგამაციებელი და სხვა) საიმედოდ უნდა იყოს გამკერვიებული.

გაციეების ეფექტურობის გაზრდის მიზნით, მეთის შემყვანი და გამოშყვანი მილები ტრანსფორმატორთან მიერთებულია მის დიაგონალურ წერტილებში.

ღია გარემოში დაყენებული ტრანსფორმატორები იმყოფებიან მზის სხივების პირდაპირი შემოქმედების ქვეშ. იმისთვის, რომ შემამციროთ ტრანსფორმატორის ავზის მელაპირის გახურებაზე მზის სხივების შემოქმედების ხარისხი, მიზანშეწონილია ავზის მელაპირი შეიღებოს ნათელი ფერით. ამასთან არარეკომენდირებულია გამოვიყენოთ ლითონური შემესების (ალუმინი, ბრინჯაო) შემსკელი საღებავები, რადგანაც ამ დროს მნიშვნელოვნად მცირდება თბოგადაცემა გამოსხივების გმით, რაც გამოიწვევს ტრანსფორმატორის გადახურების გაზრდას. დადგენილია, რომ ტრანსფორმატორის გა-

დახურება ლითონური საღებავებით შეღებვისას დაახლოებით 12%-ით მეტია, ვიდრე არალითონური საღებავებით შეღებვის დროს.

მუშაობის პროცესში გაცივების სისტემის მქონე გრანსფორმატორის ცალკეული ნაწილების ნამატი გემპერატურის განაწილების მიახლოებითი სურათი ნაჩვენებია ნახ.2.44-ზე. ამ ნახაზიდან ჩანს, რომ ყველაზე მეტად მაღალდება გრაგნილის და, შესაბამისად, მასზე დახვეული იზოლაციის გემპერატურა. ამ გემპერატურაზეა დამოკიდებული როგორც იზოლაციის, ასევე ზეთის დაძველების პროცესის სიჩქარე. ზეთის გემპერატურის ზიხედვით შეგვიძლია ვიმსჯელოთ გრანსფორმატორის ცალკეული ნაწილების გემპერატურათა შესახებ.



ნახ.2.44 გრანსფორმატორში ნამატი გემპერატურის განაწილების სურათი: ა)ზეთის ცირკულაციის კონვექციის პრინციპით; ბ)ნამატი გემპერატურის 35 განაწილების მრუდეები: 1-გრანგნილი; 2-მაგნიტო-გამტარი; 3-ზეთი; 4-მილების ზედაპირი

გრანსფორმატორის ცალკეული ნაწილების გემპერატურის კონტროლი ხორციელდება გრანსფორმატორებზე დაყენებული თერმომეტრების საშუალებით.

უნდა აღინიშნოს, რომ ზეთის გემპერატურა უფრო ნელა მყარდება, ვიდრე გრაგნილისა. ამიტომ დაგვირთვის ცვლილებისას თერმომეტრი გრაგნილის გემპერატურის ცვლილებას რამდენიმე საათის დაგვიანებით გვიჩვენებს. აქედან გამომდინარე გრანსფორმატორის ხანმოკლე გადაგვირთვების დროს ზეთის გემპერატურის მიხედვით არ შეიძლება ვიმსჯელოთ გრაგნილის გემპერატურის შესახებ.

ბუნებრივი გაცივების სისტემის (M სისტემა) მქონე გრანსფორმატორები შეიძლება განთავსებული იქნეს დახურულ შენობაში. გრანსფორმატორის გადახურებისა და თბოიზოლაციის დაჩქარებული დაძველების თავიდან აცილების მიზნით შენობა ალჭურვილი უნდა იყოს უწყვეტი ბუნებრივი ვენტილაციით, რომელიც უზრუნველყოფს პაერის თბილი მასის გადინებას შენობიდან გარეთ და ცივი მასების შეწოვას შენობაში.

შენობის არასაკმარისი ბუნებრივი ვენტილაციის დროს დასაშვებია ხელოვნური ვენტილაციის მოწყობა მორიგე პერსონალის მიდმივი მეთვალყურეობით. გრანსფორმატორის გადახურებისა და ღამიანების თავიდან აცილებისთვის განხორციელებული უნდა იქნას სიგნალიზაცია მართვის ფარგე ხელოვნური ვენტილაციის მუშაობის შეწყვეტისა და მეთის გემპერატურის ამაღლების შესახებ.

2.6.3 ნეიტრალის ჩამიწება გრანსფორმატორებში

გრანსფორმატორების გრაგნილები შეიძლება შეერთებული იქნეს ვარსკელავად ან სამკუთხედად. გრაგნილთა შეერთებას შეესაბამება ძაბვების გარკვეული ეექტორული ღიაგრამა. პირველადი და მეორეული მხარის ერთი და იგივე ფამის ძაბვის ეექტორებს შორის ძერის კუთხით განისაზღვრება გრაგნილთა შეერთების ჯგუფი, ამასთან საწყისად მიიღება პირველადი (მაღალი) მხარის ძაბვების ეექტორული ღიაგრამა. გრაგნილთა შეერთების სხვადასხვა სქემის შესაბამისად მივიღებთ შეერთების სხვადასხვა ჯგუფს (ნახ. 2.45), მათ შორის გამოყოფენ შეერთების ძირითად ჯგუფებს:

ორგრაგნილიანი გრანსფორმატორები:

ლუწი ჯგუფები $\lambda/\lambda_0 - 0$; $\Delta/\Delta - 0$;

კენგი ჯგუფები $\Delta/\lambda_0 - 11$; $\lambda/\Delta - 11$;

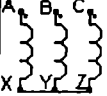
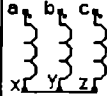
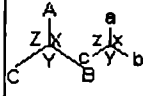
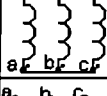
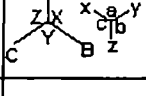
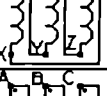
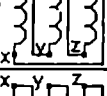
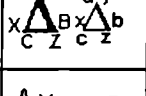
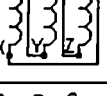
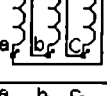
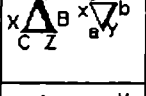
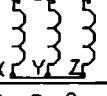
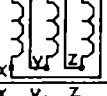
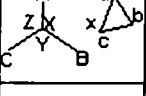
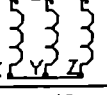
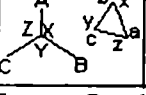
სამგრაგნილიანი გრანსფორმატორები და ავგოტრანსფორმატორები:

ლუწი ჯგუფები $\Delta/\Delta/\Delta - 0 - 0$;

კენგი ჯგუფები $\lambda_0/\Delta/\Delta - 11 - 11$; $\lambda_0/\lambda_0/\Delta - 0 - 11$.

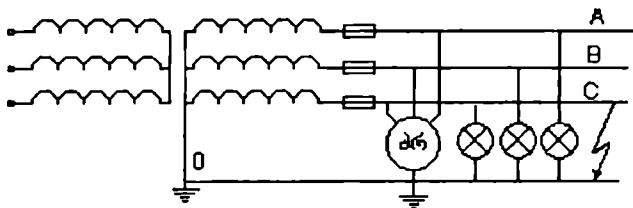
გრაგნილთა ვარსკელავად შეერთების დროს ნეიტრალური წერტილი (ნეიტრალი) შეიძლება იყოს მიწიდან იზოლირებული, ყრუდ ჩამიწებული ან ჩამიწებული ინდუქტიურობის კოჭის გავლით. 0,66; 6 და 10 კვ ნომინალური ძაბვის შემთხვევაში გრანსფორმატორის გრაგნილები, როგორც წესი, შეერთებულია სამკუთხედად და ამ ძაბვის ქსელები წარმოადგენს იზოლირებულ ნეიტრალიან ქსელებს.

„ელექტროდანადგართა მოწყობის წესების“ თანახმად 1000 ვოლტამდე ძაბვის ქსელებში ნეიტრალი შეიძლება იყოს ყრუდ ჩამიწებული ან იზოლირებული. 380 ვ ძაბვის ქსელებში ნეიტრალის ყრუდ ჩამიწების აუცილებლობა ნაკარნახევია მომსახურე პერსონალის უსაფრთხოების თვალსაზრისით. ამ ქსელებში ელექტრომოწყობილობათა კორპუსი მეტალურ კავშირშია ყრუდ ჩამიწებულ ნეიტრალთან ნულოვანი სადენის მეშვეობით (ნახ. 2.46). ამ დროს ნებისმიერი ფაზის კორპუსთან ან მიწასთან შეხება იწვევს მოკლედ შერთვის დიდ დენებს, რაც საკმარისია დაზიანებული ფაზის მცველის გადაწვისთვის, რის შემდეგ ქსელი აგრძელებს მუშაობას არასრულფაზა რეჟიმში. საღი ფაზების ძაბვა მიწის მიმართ იგივე რჩება და არ აღემატება ფაზურს.

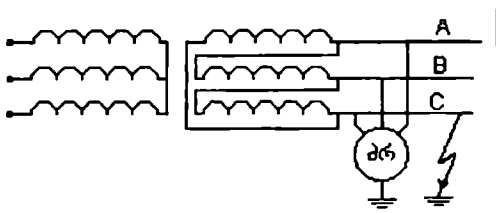
შერთვის ჯხუფი	მაღალი ძაბვის ტრანზილი შერთვისის ხემა	დაბალი ძაბვის ტრანზილი შერთვისის ხემა	ვექტორული დიანტამა	ჯხუფი ციკლური ტადართების შემდეგ
 -0				4; 8
 -6				10; 2
 -0				4; 8
 -6				10; 2
 -11				3; 7
 -5				9; 1

ნახ.2.45 ტრანსფორმატორის გრაგნილთა შერთვისის ჯგუფები

იზოლირებულ ნეიტრალიან სისტემაში (ნახ. 2.47) ერთი ფაზის მიწასთან შეხება (ერთფაზა ჩამიწება) არ იწვევს მოკლე შერთვასა და დაზიანებული ფაზის ამორთვას. ქსელი აგრძელებს მუშაობას სრულფაზა რეჟიმში, მაგრამ ამ დროს საღი ფაზების ძაბვა მიწის მიმართ იზრდება ხაზურამდე, რაც სახიფათოა მომსახურე პერსონალისთვის. ამავე ქსელში სხვა რომელიმე ფაზის მიწასთან შეხება უკვე ორფაზა მოკლე შერთვაა და გამოიწვევს ქსელის ამორთვას, რომ არაფერი ვთქვათ დანადგარის მოსალოდნელ დაზიანებაზე. ამიგომ იზოლირებულ ნეიტრალიან სისტემაში უნდა ხორციელდებოდეს იზოლაციის კონტროლი. კერძოდ, პირველივე ფაზის დაზიანება სწრაფად უნდა იქნეს აღმოჩენილი და ლიკვიდირებული, ხოლო უსაფრთხოებისადმი ამაღლებული მოთხოვნების პირობებში კი უნდა ხდებოდეს ქსელის დაზიანებული უბნის ავტომატური ამორთვა.



ნახ.2.46 ყრუდ ჩამიწებული ნეიტრალიანი ქსელი



ნახ.2.47 იზოლირებულ ნეიტრალიანი ქსელი

1000 ვოლტზე მეტი ძაბვის იზოლირებულ ნეიტრალიან ქსელში ერთფაზა ჩამიწებისას ჩამიწების წერტილში გამავალი გვეადური დენი დამოკიდებულია მიწის მიმართ ფაზათა გვეადობაზე, ნომინალური ძაბვის სიდიდეზე და მით მეტია, რაც მეტია ქსელის ხაზების ჯამური სიგრძე 1 კმ საპაერო ხაზების გვეადური დენების მნიშვნელობები 6 კვ ძაბვაზე შეადგენს 0,015, 10 კვ-ზე 0,025 და 35 კვ ძაბვაზე კი 0,10 ამპერს.

მიწასთან ფაზური სადენის არალითონური შეერთების დროს ჩამიწების წერტილში აღიძვრება არამდგრადი რკალი, რომელიც პერიოდულად ქრება და ინთება. ამ დროს ქსელში წარმოიქმნება მაღალი სიხშირის თავისუფალი ელექტრული რხევები, რასაც თან სდევს გადაძაბვები, რომელთა ამპლიტუდამ შეიძლება მიაღწიოს 32- U_{ϕ} სალ ფაზებზე და 22- U_{ϕ} დაზიანებულ ფაზაზე. ასეთი სიდიდის გადაძაბვები დანადგართა იზოლაციისთვის არ არის საშიში ხანმოკლე დროით. მაგრამ ხანგრძლივმა გადაძაბვამ შეიძლება გამოიწვიოს იზოლაციის იონიზაცია და მისი გარღვევა. გარდა ამისა, რკალმა შეიძლება ერთფაზა ჩამიწება გადაზარდოს ორ ან სამფაზა მოკლე შერთვაში.

იზოლირებულ ნეიტრალიან 6+35 კვ ძაბვის საპაერო ქსელებში გვეადური დენების ის ზღვრული მნიშვნელობები, რომლის დროსაც ჯერ კიდევ უზრუნველყოფილია რკალის თვითჩაქრობა შეადგენს 10 ამპერს.

ზემოთმოყვანილი მონაცემებიდან გამომდინარე ვასკენით, რომ თუ 35 კვ ძაბვის საპაერო ქსელის ხაზების ჯამური სიგრძე გადააჭარბებს 100კმ-ს, საჭირო ხდება გვეადური დენების შემცირება (კომპენსაცია). ეს შესაძლებელია ნეიტრალში ინდუქტიური კოჭის ჩართვით.

ინდუქტიურობის კოჭის სათანადო შერჩევით შეგვიძლია მივაღწიოთ ჩამიწების დენის ნულოვან მნიშვნელობას (სრული კომპენსაცია) და შესაბამისად ჩამიწების წერტილში წარმოქმნილი რკალი ჩაქრება. როგორც გამოკვლევები გვიჩვენებს, უმჯობესია, ადგილი ჰქონდეს ჭარბ კომპენსაციას ($I_L > 3I_C$), ვიდრე არასრულ კომპენსაციას. ამ უკანასკნელ შემთხვევაში მოსალოდნელია გადაძაბვები.

110 კვ და მეტი ძაბვის ქსელებში გვეადური დენები მნიშვნელოვნად დიდია, ვიდრე 35 კვ ძაბვის ქსელებში. აქ ერთი ფაზის ჩამიწების დროს (თუ ნეიტრალი იზოლირებულია) მოსალოდნელია მაღალი ამპლიტუდის გადაძაბვები, რომელთა თავიდან აცილების მიზნით ამ ძაბვის ქსელებში გრანსფორმატორების გრაგნილები შეერთებულია მხოლოდ ვარსკვლავად და მისი ნეიტრალი მუდამ ჩამიწებულია ყრუდ.

ყველა ან დიდი ნაწილი გრანსფორმატორის ნეიტრალების ჩამიწება იწვევს ერთფაზა მოკლედ შერთვის დენის მნიშვნელოვან ზრდას. ამიტომ 110 კვ ძაბვის ქსელებში დასაშვებია ნაწილი გრანსფორმატორების ნეიტრალების განმიწება. მაგრამ მთლიანად ქსელი ამ შემთხვევაში არ უნდა აღმოჩნდეს ნეიტრალის ჩამიწების გარეშე.

110 კვ და მეტი ძაბვის გრანსფორმატორები გათვლილია ნეიტრალის ეფექტური ჩამიწების პირობებში მუშაობისთვის და ამიტომ მათი ნეიტრალის იზოლაცია არასრულია. გრანსფორმატორები უნდა მუშაობდნენ ყრულ ჩამიწებული ნეიტრალით. ერთფაზა მოკლე შერთვის დენის შემცირების მიზნით, ნაწილი გრანსფორმატორების იზოლირებულ ნეიტრალიან რეჟიმში გადაყვანა დასაშვებია, თუ მათი ნეიტრალი ამ დროს დაცული იქნება ევნტილური მცდელობით.

დასაშვებია გრანსფორმატორების ნეიტრალის ჩამიწება სპეციალური რეაქტორების საშუალებით.

ჩამიწების ნეიტრალის მეორე დანადგარები და ელექტრული ქსელი მნიშვნელოვნად იაფია, განსაკუთრებით 110 კვ და მეტი ძაბვის შემთხვევაში. ნეიტრალის ჩამიწების შემთხვევაში იზრდება ექსპლუატაციის უსაფრთხოება, რადგანაც უზრუნველყოფილია რელეური დაცვის მუსტი და საიმედო მოქმედება და დამიანებული ადგილის სწრაფი ლოკალიზაცია.

2.6.4 გრანსფორმატორთა პარალელური მუშაობა

მომხმარებელთა ელექტრომომარაგების საიმედოობის ამაღლების მიზნით, ძაბვის სადაბლებელ (დამწვე) ქვესადგურებზე აყენებენ ორ ან მეტ გრანსფორმატორს, რომელთაც, რიგ შემთხვევებში, ჩართავენ პარალელურად. თუ პარალელურად მომუშავე გრანსფორმატორების პარამეტრები იდენტურია, მაშინ ისინი თანაბარი დატვირთვის რეჟიმში მუშაობენ. წინააღმდეგ შემთხვევაში ადგილი აქვს ერთერთი მათგანის გადატვირთვას, ხოლო მეორე აღმოჩნდება დატვირთაუმი. დატვირთვათა უთანაბრობა მით უფრო მკვეთრ ხასიათს ატარებს, რაც უფრო მეტად განსხვავდება გრანსფორმატორთა სახასიათო პარამეტრები.

პარალელური მუშაობის დროს აუცილებელია გრანსფორმატორები აკმაყოფილებდნენ შემდეგ პირობებს:

- მაღალი და დაბალი ნომინალური ძაბვები უნდა იყოს ერთნაირი. დასაშვებია გრანსფორმაციის კოეფიციენტებს შორის განსხვავება 0,5%-მდე;
გრავილთა შეერთების ჯგუფები უნდა იყოს ერთნაირი; მოკლე შერთვის ძაბვები უნდა იყოს ერთნაირი. დასაშვებია $\pm 10\%$ -მდე გადახრა მათი საშუალო მნიშვნელობიდან.
- არარეკომენდირებულია გრანსფორმატორთა პარალელური მუშაობა, თუ მათი ნომინალურ სიმძლავრეთა თანაფარდობა აღემატება სამს.

გრანსფორმატორთა გრანსფორმაციის კოეფიციენტებს შორის განსხვავება დამატებით იწვევს მათანაბრებელი ღენის გავლას, რომელიც ძირითადად ინდუქტიური ხასიათისაა და გრანსფორმატორებში დამატებით გადის რეაქტიული სიმძლავრე.

მათანაბრებელი ღენი (სიმძლავრე) გამოიწვევს დანაკარგების ზრდას. ამიგომ ასეთ რეჟიმში გრანსფორმატორების მუშაობა არახელსაყრელია. დასაშვებია მხოლოდ იმ დროით, რაც საკმარისია ერთი გრანსფორმატორიდან მეორეზე გადასასვლელად ან გრანსფორმატორის კოეფიციენტების შეცვლის ოპერაციის ჩასატარებლად.

გრაგნილთა სხვადასხვა შეერთების ჯგუფების მქონე გრანსფორმატორების პარალელურად ჩართვის დროს, ძაბვის ვექტორებს შორის ძერის კუთხე უკეთეს შემთხვევაში იქნება 30° , რაც გამოიწვევს გრანსფორმატორებში დამატებით რეაქტიული ღენის გასვლას, რომელიც რამდენჯერმე ჭარბობს ნომინალურ ღენს.

$$I_{\text{ზთ}} \approx \frac{26}{U_{\text{ა.ა.}}} \cdot I_{\text{ფ}}$$

აქედან გამომდინარე, გრაგნილთა სხვადასხვა შეერთების ჯგუფების მქონე გრანსფორმატორების პარალელური ჩართვა დაუშვებელია.

როცა გრანსფორმატორთა მოკლე შერთვის ძაბვები სხვადასხვაა, მაშინ მათ შორის დატვირთვის განაწილება მოხდება შემდეგი თანაფარდობით:

$$\frac{S_{\text{ფ1}}}{S_{\text{ფ2}}} \approx \frac{U_{\text{ა.ა.2}} \% \cdot S_{\text{ფ1}}}{U_{\text{ა.ა.1}} \% \cdot S_{\text{ფ2}}};$$

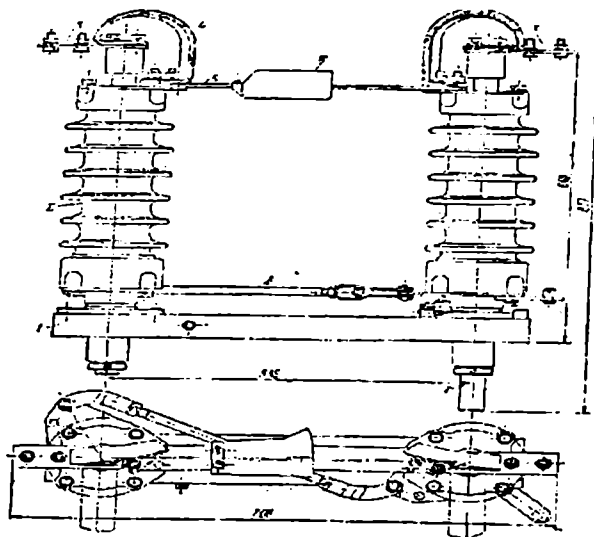
ცხადია, რომ გრანსფორმატორთა ნომინალურ სიმძლავრეებს შორის განსხვავება დამატებით მოქმედებს მათ შორის დატვირთვის გადანაწილებაზე. მცირე ნომინალური სიმძლავრის მქონე გრანსფორმატორი, რომლის მოკლე შერთვის ძაბვა მცირეა, მეორე პარალელურად მომუშავე გრანსფორმატორთან შედარებით უფრო მეტად დაიტვირთება პროცენტულად.

მამასადაბე, თუ სხვადასხვა პარამეტრების (ნომინალური სიმძლავრე, გრანსფორმაციის კოეფიციენტი, გრაგნილთა შეერთების ჯგუფი, მოკლე შერთვის ძაბვები) მქონე გრანსფორმატორები ჩართულია პარალელურად, მაშინ მათ შორის ადგილი აქვს სიმძლავრეთა გადანაწილებას, რაც უფრო საგრძნობია მცირე სიმძლავრის გრანსფორმატორებისთვის.

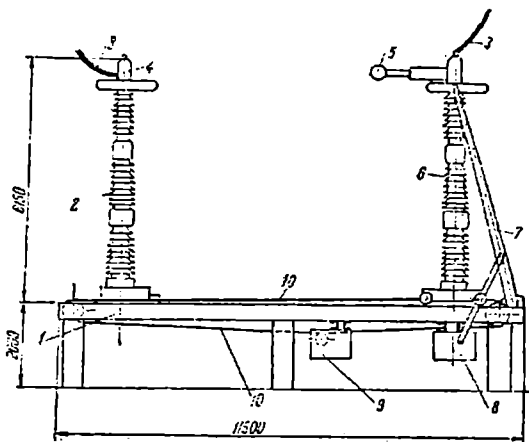
2.7 საკომუტაციო აპარატები

ელექტრულ სქემაში ჩართვა-გამორთვის პროცედურის ჩასატარებლად გამოიყენება სპეციალური საკომუტაციო აპარატები, რომელთა გამართულ მუშაობაზე დამოკიდებულია როგორც ცალკეული მანქანები, ასევე მთელი სისტემის საიმედო მუშაობა. მუშაობის პირობებიდან გამომდინარე, საკომუტაციო აპარატები იყოფა დაბალი (1000 ვ-მდე ჩათვლით) და მაღალი (1000 ვ-ზე მეტი) ძაბვის აპარატებად. მაღალი ძაბვის საკომუტაციო აპარატს განეკუთვნება გამთიშელები, ამოშრთველები, დატვირთვის ამოშრთველები, ავტომატები და სხვა.

გამთიშველი წარმოადგენს საკომუტაციო აპარატს, რომლის დანიშნულებაა უდენო წრედების ამოშრთვა-ჩართვა და ხილული გაწყვეტის აღცილის შექმნა. გამთიშველი ელექტრულ წრედს წყვეტს უშუალოდ პაერში რაიმე რეალმქრობი მოწყობილობის გამოყენების გარეშე. 2.48 ნახაზზე ნაჩვენებია 35 კე ძაბვის ორსვეტიანი პორიზონტალურად საბრუნი გამთიშველი, ხოლო 2.49 ნახაზზე კი ნაჩვენებია 500 კე ძაბვის მგორავი გამთიშველი.



ნახ.2.48 35კე ძაბვის ორსვეტიანი პორიზონტალურად საბრუნი გამთიშველი: 1-საყრდენი ძარა; 2-საყრდენი იზოლატორი; 3-სალტების მიერთების დაბოლოება; 4-მოქნილი კავშირი; 5-კონტაქტებიანი დანა; 6-უკონტაქტო დანა; 7-ღერძი; 8-წევა.



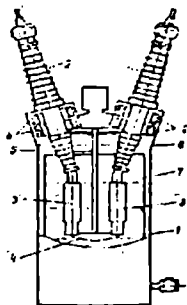
ნახ.2.49 500კვ ძაბვის მგორავი გამოიშველი: 1-საყრდენი ძარა; 2-უძრავი იზოლატორი; 3-შემაერთებელი სადენი; 4-უძრავი კონტაქტი; 5-მოძრავი კონტაქტი; 6-მგორავი იზოლატორი; 7-ჩამიწების დანა; 8-ჩამიწების დანის ამძრავი; 9-მგორავი იზოლატორის ძრავი; 10-ფოლადის გვარდი მგორავი იზოლატორის გადასაადგილებლად.

ამომრთველების დანიშნულებაა დენიანი წრედების ამორთვა-ჩართვა. მათ უხდებათ როგორც დატვირთვის, ასევე მოკლე შერთვის დენების გაწვევაც. ამისთვის ისინი ალჭურვილნი არიან სპეციალური რკალმქრობი მოწყობილობით. ამომრთველთა კონსტრუქციული შესრულება და მათი საექსპლუატაციო მახასიათებლები მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული ამომრთველში გამოყენებული რკალმქრობი საშუალების სახეობაზე, რომლის მიხედვითაც გვაქვს მეთიანი, საჰაერო, ელეგაზური და ა.შ. ამომრთველები. 2.50 ნახაზზე ნაჩვენებია 110 კვ ძაბვის მეთიანი ამომრთველი.

დატვირთვის ამომრთველების დანიშნულებაა მუშა მნიშვნელობის დენებისას ელექტრული წრედის გამორთვა-ჩართვა. მოკლე შერთვებისას ასეთი წრედების ამოსართავად დატვირთვის ამომრთველებთან მიმდევრობით აყენებენ დნობად მცველებს. უფრო ეფექტური აღმოჩნდა ჩვეულებრივი გამოიშველის შეთავსება მარტივი კონსტრუქციის რკალმქრობ კამერასთან. ამ სახის აპარატმა მიიღო დატვირთვის ამომრთველის სახელწოდება. დატვირთვის

ამომრთველები გამოიყენება ქვესადგურების 6, 10 კე ძაბვაზე მცირე სიმძლავრის წრედების ამორთვა-ჩართვისას.

ავტომატები გამოიყენება ელექტრული წრედების ხელით ან ავტომატურად ამორთვა-ჩართვისთვის. ისინი აღჭურვილნი არიან მარტივი რკალმჭრობი მოწყობილობით. მათი დახმარებით უზრუნველყოფილია ელექტრული წრედების დაცვა გადატვირთვისა და მოკლე შერთვის დენებისგან, რაც ხორციელდება შესაბამისი რე-
ლეებით.



ნახ.2.50 110კე ძაბვის გეთიანი
ამომრთველი: 1-ჟოლადის ავზი;
2-გამავალი იზოლატორი;
3-რკალმჭრობი კამერა;
4-დენგამტარი გრაფურსა;
5-წევა; 6-დენის გრანსფორმა-
ტორები (ჩაშენებული);
7-ავზის იზოლაცია; 8-შეთი.

2.8 რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარები

რეაქტიული სიმძლავრე პრაქტიკულად მოხერხებული ფორ-
მაა ცეცხლი დენის წრედში გარდამავალი პროცესების მიმდი-
ნარეობის ანალიზის თვალსაზრისით,

ელექტროსისტემებში რეაქტიული სიმძლავრის ძირითად მომ-
ხმარებლებს წარმოადგენენ სინქრონული ძრავები, ვენტილური
გარდამსახები, ინდუქტორი ელექტროდუმელები, გრანსფორმა-
ტორები, საპაერო ხაზები და სხვა. ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის
დანაკარგი ჯამური რეაქტიული დატვირთვის თითქმის 50%-ს აღ-
წევს. ამასთან, დანაკარგების 70-75%-ი მოდის გრანსფორმატორებ-
ში დანაკარგებზე. სამრეწველო საწარმოებში რეაქტიული სიმძლავ-
რის ძირითადი მომხმარებლებია ასინქრონული ძრავები, რომლებ-
მედაც მოდის საწარმოს მიერ მოთხოვნილი ჯამური რეაქტიული
სიმძლავრის 65-70%-ი [22].

ელექტრულ სისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის ძირითად
წყაროს წარმოადგენს ელექტროსადგურების სინქრონული გე-
ნერატორები. ნომინალური დატვირთვის პირობებში გენერატორები
იძლევიან ქსელის მიერ მოთხოვნილი რეაქტიული დატვირთვის

დაახლოებით 60%-ს. ხაზების მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე შეიძლება ჩათვალოს 20%-მდე [22,32]. ამასთან, მომხმარებელბამდე ამ სიმძლავრეთა გადაცემა როგორც ტექნიკურად, ასევე ეკონომიკურადაც ყოველთვის მიზანშეწონილი არ არის. აქედან გამომდინარე, ხშირ შემთხვევაში საჭირო ხდება ქსელში დავაყენოთ რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარები, რომელთა მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე უნდა ჭარბობდეს მოთხოვნილი რეაქტიული დატვირთვის 20%-ს მაინც.

რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია, როგორც ტექნიკური ღონისძიება, შეიძლება გამოყენებული იქნეს სხვადასხვა მიზნისთვის. კემოდ, ჯერ-ერთი, რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია აუცილებელია რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსის პირობიდან გამომდინარე, მეორე – მაკომპენსირებელი დანადგარების დაყენება ხონრციელდება ქსელში აქტიური სიმძლავრისა და ენერგიის დანაკარგის შემცირებისთვის და, მესამე – მაკომპენსირებელი დანადგარების საშუალებით შეგვიძლია ვარეგულიროთ ძაბვა მომხმარებელთა საღტეებზე.

რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია ეს არის მაკომპენსირებელი დანადგარის მიერ რეაქტიული სიმძლავრის მიზნობრივი გენერაცია ან მოხმარება.

ელექტრულ ქსელებში მაკომპენსირებელ დანადგარებს წარმოადგენენ სინქრონული კომპენსატორები, კონდენსატორთა ბატარეა, რეაქტორები და რეაქტიული სიმძლავრის სტატიკური წყაროები. მაკომპენსირებელი დანადგარები პირობითად შეიძლება დაყვოთ ორ ჯგუფად: 1. დანადგარები, რომელთა დანიშნულებაა მომხმარებელთა და ქსელის ელემენტების მიერ მოთხოვნილი რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია – სინქრონული კომპენსატორები და განივად ჩართული კონდენსატორთა ბატარეა; 2. დანადგარები, რომელთა დანიშნულებაა ხაზების რეაქტიული ელექტრული პარამეტრების კომპენსაცია – გრძივად ჩართული კონდენსატორთა ბატარეა და განივად ჩართული რეაქტორები.

სინქრონული კომპენსატორები წარმოადგენს უქმ სელაზე მომუშავე მემსუბუქებული კონსტრუქციის მქონე სინქრონულ ძრავას [46]. ჭარბი აგზნების რეჟიმში მუშაობისას კომპენსატორი წარმოადგენს რეაქტიული სიმძლავრის გენერატორს, ხოლო არასრული აგზნების რეჟიმში მუშაობისას კი – რეაქტიული სიმძლავრის მომხმარებელს. აგზნების დენის ცვლილება, როგორც წესი, ხორციელდება ავტომატურად.

უდიდესი სიმძლავრე, რომელიც შეიძლება კომპენსატორმა განავითაროს ჭარბი აგზნების რეჟიმში, მის ნომინალურ სიმძლავ-

რეს წარმოადგენს. მუშაობისას კომპენსატორი ქსელიდან მოითხოვს აქტიურ სიმძლავრეს, რომელიც მითი ნომინალური სიმძლავრის 2-4%-ს შეადგენს და განიხილება როგორც დანაკარგები კომპენსატორში. კონსტრუქციის თავისებურების გამო არასრული აგზნების რეჟიმში კომპენსატორი ქსელიდან იღებს $Q = 0,5Q_c$ სიმძლავრეს.

სინქრონული კომპენსატორი მზადდება რამდენიმე ათეული მეგარ სიმძლავრით.

სინქრონული კომპენსატორის დადებით თვისებას შეადგენს: ა) ქსელში ძაბვის ვარდნისას იზრდება კომპენსატორის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე აგზნების იმავე დენის პირობებშიც კი, ხოლო ძაბვის ამალღებისას კი პირიქით მცირდება გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე. კომპენსატორის ეს თვისება ძაბვის რეგულირების თვალსაზრისით დადებით მარეგულირებელ ეფექტს წარმოადგენს; ბ) გენერირებული ან მოხმარებული რეაქტიული სიმძლავრის მდორე და ავტომატური რეგულირება.

კომპენსატორის უარყოფით მხარეს შეადგენს: ა) შეიძლება დაყენებული იქნეს მხოლოდ 6 ან 10 კვ ძაბვის ქსელში; ბ) ექსპლუატაციისა და მონტაჟის შედარებითი სირთულე; გ) აქტიური სიმძლავრის შედარებით დიდი დანაკარგები.

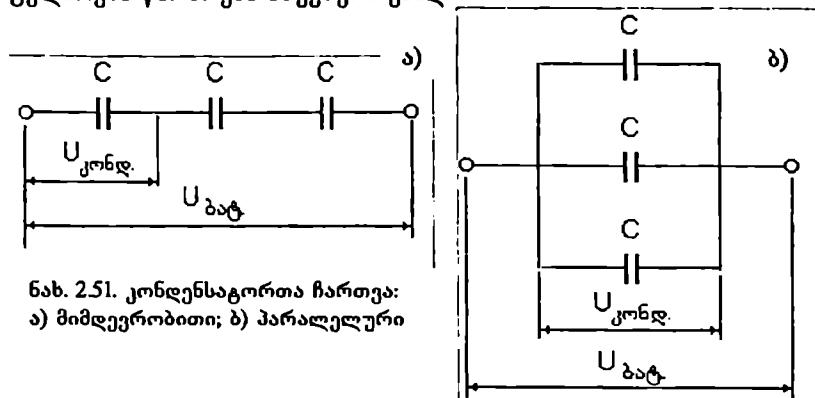
კონდენსატორთა ბატარეა. კონდენსატორთა ბატარეა გამოყენება: ა) ქსელის კვანძებში რეაქტიული სიმძლავრის გენერირებისთვის (განივი კომპენსაცია) და ბ) ხაზის რეაქტიული წინაღობის კომპენსაციისთვის (გრძივი კომპენსაცია).

კონდენსატორთა ბატარეა კომპლექტდება მიმდევრობით და პარალელურად შეერთებული ცალკეული კონდენსატორებისგან (ნახ. 251).

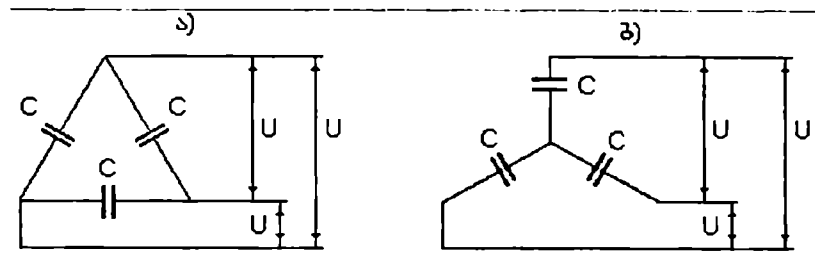
კონდენსატორები მზადდება 0,22-10 კვ ძაბვაზე 10-125 კვარ ერთეულოვანი სიმძლავრით.

სამუშაო ქსელში კონდენსატორთა ბატარეა ჩაირთვება სამკუთხედად (ნახ. 252, ა) ან ვარსკვლავად (ნახ. 252, ბ). სამკუთხედად შეერთებისას ბატარეის სიმძლავრე 3-ჯერ მეტია, ვიდრე ვარსკვლავად შეერთებისას. 1 კვ-მდე ძაბვის ქსელში შეერთება ხდება სამკუთხედად, ხოლო უფრო მაღალი ძაბვის შემთხვევაში კი ვარსკვლავად. ბატარეა შეიძლება იყოს რეგულირებადი და არარეგულირებადი. არარეგულირებად ბატარეაში კონდენსატორთა რიცხვი უცვლელია და ბატარეის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე დამოკიდებულია მოცემულ კვანძში ქსელის მუშა ძაბვის სიდიდეზე და იგი არ უნდა აღემატებოდეს კვანძის უმცირეს რეაქ-

ტიულ დატვირთვას. რეგულირებად ბატარეაში კონდენსატორთა რიცხვი ქსელის რეჟიმისგან დამოკიდებულებაში იცვლება ხელით ან ავტომატურად, რაც საშუალებას გვაძლევს ვარეგულიროთ ბატარიის მიერ რეაქტიული სიმძლავრის გენერაცია. ამასთან რეგულირება წარმოებს საფეხუროვნად.



ნახ. 251. კონდენსატორთა ჩართვა:
ა) მიმდევრობითი; ბ) პარალელური



ნახ. 252. კონდენსატორთა ბატარიის ჩართვა:
ა) სამკუთხედად; ბ) ვარსკვლავად

მუშაობისას კონდენსატორთა ბატარეა ქსელიდან იღებს აქტიურ სიმძლავრეს, რომელიც მისი ნომინალური სიმძლავრის 0,3-0,4%-ს შეადგენს და, რომელიც იხარჯება კონდენსატორის დიელექტრიკისა და კორპუსში დანაკარგებზე.

სინქრონულ კომპენსატორთან შედარებით კონდენსატორთა ბატარიის უპირატესობა შემდეგში მდგომარეობს:

– შესაძლებელია გამოყენებული იქნეს როგორც დაბალ (0,38 კვ), ასევე შედარებით უფრო მაღალი (6, 10 კვ) ძაბვაზე;

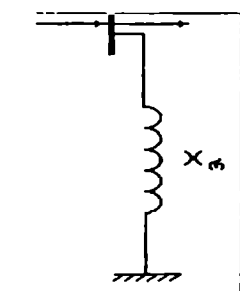
- აქტიური სიმძლავრის შედარებით მცირე დანაკარგები;
- ექსპლუატაციისა და მონტაჟის სიმარტივე.
ბატარეის უარყოფითი მხარეა:
- გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრის ძაბვისგან კვადრატულპროპორციული დამოკიდებულება რეგულირების უარყოფითი ეფექტით;
- რეაქტიული სიმძლავრის მხოლოდ გენერირების შესაძლებლობა;
- გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრის საფეხუროვანი რეგულირება, ან საერთოდ რეგულირების გარეშე;
- სამსახურის შედარებით მოკლე ვადა (8-10 წელი).

მიუხედავად გარკვეული უარყოფითი მხარეებისა, კონდენსატორთა ბატარეა უფრო ფართოდ გამოიყენება მანაწილებელ ქსელებში, ვიდრე სინქრონული კონპენსატორები.

კონდენსატორთა ბატარეა შეიძლება დაყენებული იქნეს: უშუალოდ მომხმარებელთან (ინდივიდუალური კომპენსაცია); მანაწილებელ ქსელებში (ჯგუფური კომპენსაცია); ქვესადგურის დაბალი ძაბვის (0,38; 6; 10 კე) სალტებზე (ცენტრალიზებული კომპენსაცია).

მაკომპენსირებელ მოწყობილობას მიეკუთვნება აგრეთვე მაშუნგებელი რეაქტორი (ნახ. 2.53) და რეაქტიული სიმძლავრის სტატიკური წყაროები (ნახ. 2.54, ა, ბ).

მაშუნგებელი რეაქტორი გამოიყენება ძირითადად ზემოაღნიშნული ძაბვის (330 კე და მეტი) ქსელში, როგორც ხაზების მიერ გენერირებული ჭარბი რეაქტიული სიმძლავრის მოხმარებელი. მოხმარებული რეაქტიული სიმძლავრის სიდიდე მოცემული კვანძის ძაბვის კვადრატის პროპორციულია. მაშუნგებელი



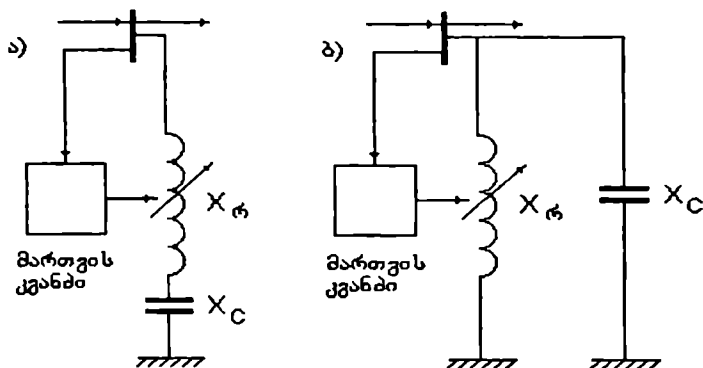
ნახ. 2.53. მაშუნგებელი რეაქტორი

რეაქტორი შეიძლება იყოს რეგულირებადი და არარეგულირებადი.

ქვესადგურის სალტებზე ძაბვის დასაშვები გადახრის პირობებში რეგულირებადი მაშუნგებელი რეაქტორის მიერ მოხმარებული რეაქტიული სიმძლავრე იცვლება $(0,8-1,1) U_c^2 / X_k$ ფარგლებში, სადაც X_k — რეაქტორის რეაქტიული წინაღობა.

რეაქტიული სიმძლავრის სტატიკური წყაროების დანიშნულებაა რეაქტიული სიმძლავრის გენერაციის ან მოხმარების მდორე რეგულირება, რაც მიიღწევა არარეგულირებად კონდენსატორთა ბატარეასთან მიმდევრობით (ნახ. 2.54 ა) ან პარალელურად (ნახ. 2.54

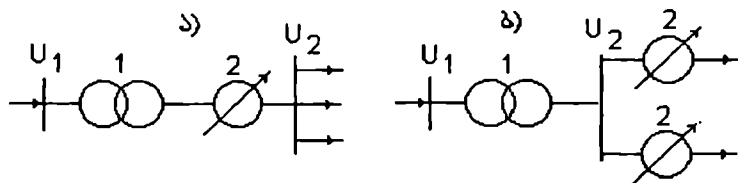
ბ) რეგულირებადი მამუენტებული რეაქტორის ჩართვით. სიმძლავრის რეგულირება მიიღწევა მართვის კვანძის გამოყენებით.



ნახ. 2.54. რეაქტიული სიმძლავრის სტატიკური წყაროები:
ა) მიმდევრობითი ჩართვა; ბ) პარალელური ჩართვა

2.9 სახაზო რეგულატორები (ვოლტსამატი გრანსფორმატორები)

სახაზო რეგულატორები (ვოლტსამატი გრანსფორმატორები) – ეს არის დამოუკიდებელი სტატიკური ელექტრული აპარატი, რომელიც გამოიყენება ძაბვის სარეგულირებლად ქვესადგურებზე. როცა ეს აპარატი გრანსფორმატორთან მიმდევრობითაა ჩართული (ნახ. 2.55 ა), მაშინ მას ვოლტსამატი გრანსფორმატორებს უწოდებენ, ხოლო თუ აღნიშნული აპარატი ხაზში ჩართულია მიმდევრობით, მაშინ მას სახაზო რეგულატორს უწოდებენ (ნახ.2.55ბ).



ნახ.2.55 ვოლტსამატი გრანსფორმატორი (ა) და სახაზო რეგულატორის (ბ) ჩართვის სქემები: 1-ძირითადი ძალოვანი გრანსფორმატორები; 2-ვოლტსამატი გრანსფორმატორები.

თავი 3. ელექტრული ქსელის ელემენტების მახასიათებელი პარამეტრები

3.1 გვირგვინული განმუხტვები ელექტროგადაცემის საჰაერო ხაზებზე

მაღალი და ზემოდალი ძაბვის ხაზებზე სადენისა და ფაზის კონსტრუქციული პარამეტრების შერჩევისას გათვალისწინებული უნდა იქნეს ისეთი მნიშვნელოვანი ფაქტორი, როგორიცაა სადენზე გვირგვინული განმუხტვის მოვლენა, რომელიც სადენის უშუალო მახლობლობაში მყოფი ჰაერის იონიზაციის პროცესს წარმოადგენს.

სადენის უშუალო მახლობლობაში ელექტრული ველის დაძაბულობა მნიშვნელოვნად მაღალია, ვიდრე მისგან დაშორებულ სივრცეში. ამიტომ სადენის ახლოს მყოფი ჰაერის ნაწილი მოლეკულები განიცდიან იონიზაციას. გარკვეულწილად ჰაერი გამტარი ხდება. ამ მოვლენას გვირგვინულ განმუხტვას უწოდებენ.

ხაზზე გვირგვინული განმუხტვა მისთვის ყველაზე უფრო ხელსაყრელი პირობებისას იწყება მაშინ, როცა სადენის ზედაპირზე ელექტრული ველის დაძაბულობა 1700-1900 კვ/მ-ს აღწევს. გვირგვინულ განმუხტვას თან ახლავს არასასურველი მოვლენები – რადიოდამბრკოლებები, აკუსტიკური ხმაური, სადენის ზედაპირის დაჟანგვის პროცესის გაძლიერება და ელექტროენერგიის დამატებითი დანაკარგები.

ხაზის მუშა ძაბვის ამადლებისას, საწყის სტადიაზე, რომელიც წინ უსწრებს საერთო გვირგვინის წარმოქმნას, სადენის ზედაპირზე იწყება მცირე სიმძლავრის ადგილობრივი (ლოკალური) განმუხტვები, რომელთაც არ გააჩნიათ მდგრადი ხასიათი. ძაბვის შემდგომი ამადლებით, გარკვეული მომენტიდან, ადგილი აქვს გვირგვინული განმუხტვის დენის მკვეთრ ზრდას. ეს მიუთითებს მასზე, რომ ადგილობრივი გვირგვინული განმუხტვები თანდათან ვრცელდება მთლიანად სადენის მთელ ზედაპირზე და წარმოიქმნება საერთო გვირგვინი, რის გამოც შეიმჩნევა გვირგვინული განმუხტვის დამახასიათებელი ტაკუნის და ხმაური, ხოლო ძაბვის შემდგომი ზრდისას კი ადგილი აქვს იისფერ-ცისფერ ნათებას.

პოტენციალთა სხვაობას, რომლის დროსაც იწყება საერთო გვირგვინის (გვირგვინული განმუხტვის) მოვლენა, გვირგვინულ განმუხტვის საწყის ძაბვას უწოდებენ. მისი სიდიდე დამოკიდებულია

სადენის ზედაპირის მდგომარეობაზე, გეომეტრიულ მომენტზე და სადენებს შორის მანძილზე. გვირგვინის საწყისი ძაბვა შეიძლება დავადგინოთ სადენის ზედაპირზე ელექტრული ველის საწყისი დაძაბულობის მიხედვით, რომელიც გლუვი, ცილინდრული და ერთიდიამავე რადიუსის მქონე პარალელური სადენების შემთხვევაში განისაზღვრება პიკის ფორმულით [45]

$$E_0 = 3030\delta \left(1 + \frac{0,0298}{\sqrt{r\delta}} \right) \text{ კვ/მ}, \quad (3.1)$$

სადაც r - სადენის რადიუსი, მ; δ - პაერის ფარდობითი სიმკვრივე

$$\delta = \frac{0,3855H}{273 + t} \quad (3.2)$$

აქ H - პაერის წნევა მმ.ვ.წყ.სვ; t - პაერის ტემპერატურა, °C

ელექტრული ველის საწყისი დაძაბულობა შეიძლება გამოვთვალოთ აგრეთვე ზალესკის ფორმულით

$$E_0 = 2450\delta \left(1 + \frac{0,0972}{\sqrt{r\delta}} \right)$$

როგორც ვხედავთ, გვირგვინის საწყისი დაძაბულობა თითქმის პაერის ფარდობითი სიმკვრივის პროპორციულია, რომელიც დამოკიდებულია ხაზის მდებარეობაზე ზღვის დონიდან და იცვლება გარემოს ტემპერატურის ცვლილებასთან ერთად (ნახ. 3.1). დაბალი ტემპერატურის მქონე რეგიონებში გვირგვინის საწყისი დაძაბულობა უფრო მაღალია და გვირგვინული განმუხტვის თავიდან აცილების თაველსაზრისით ამ რეგიონებში უფრო ხელსაყრელი პირობები არსებობს.

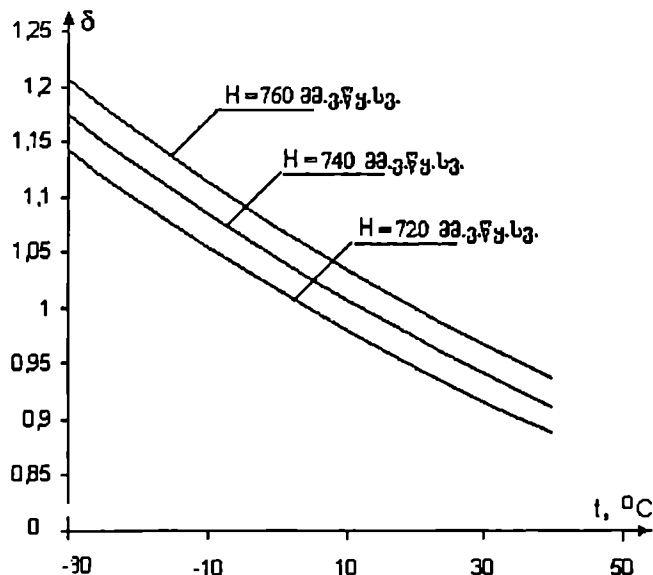
საპერო ხაზებზე მრავალმავთულიანი სადენების გამოყენებისას, რომელთა ზედაპირი არაგლუვია, საერთო გვირგვინის საწყისი დაძაბულობის გამოსახულებაში უნდა გავითვალისწინოთ სადენის სიგლუვის კოეფიციენტი m , რომლის რიცხვითი მნიშვნელობა დამოკიდებულია სადენის გარე შრეში მავთულების რაოდენობაზე და იცვლება 0,80-0,97 ფარგლებში.

საშუალოდ, როგორც ამას ექსპერიმენტები გვიჩვენებს, შეიძლება მივიღოთ $m=0,9$. უნდა აღინიშნოს, რომ საერთო გვირგვინის საწყისი დაძაბულობა სუფთა და ჭუჭყიანი სადენებისთვის ერთნაირი არ არის. ამიტომ, რადგანაც რეალურად საპერო ხაზებზე სადენები შედარებით უფრო ჭუჭყიანია, პიკის რეკომენდაციით AC მარკის სადენებისთვის მიიღებენ $m=0,82$.

ამრიგად, მრავალმავთულიანი სადენების შემთხვევაში გვაქვს

$$E_0 = 3030 \text{ მდ} \left(1 + \frac{0,0298}{\sqrt{r\delta}} \right) \text{ კვ/მ} \quad (3.3)$$

როგორც (3.1) და (3.3) გამოსახულებები გვიჩვენებენ, რაც მეტია სადენის რადიუსი, მით ნაკლებია საერთო გვირგვინის წარმოქმნის საწყისი დაძაბულობა.



ნახ. 3.1. პაერის ფარდობითი სიმკვრივე გარემოს სხვადასხვა პირობებში

სადენთა განიკვეთების შერჩევის დროს ელექტრული ველის დაძაბულობის დასაშვები მნიშვნელობა გამოითვლება იმ პირობით, რომ კარგ ამინდში ხაზზე საერთო გვირგვინის მოვლენას ადგილი არ ჰქონდეს. ამ პირობის შესასრულებლად ფაზის კონსტრუქცია და სადენების განიკვეთები ისე შერჩევა, რომ სადენის ზედაპირზე ელექტრული ველის მუშა დაძაბულობა აღწევდეს გვირგვინის საწყისი დაძაბულობის არაუმეტეს 90%-ს, ე.ი.

$$E \leq 0,9E_0. \quad 4)$$

სადენის ზედაპირზე ელექტრული ველის მუშა დაძაბულობა ამ სადენზე განთავსებული ელექტროობის რაოდენობის წრფივი

სიმკვრივის პროპორციულია. თავის მხრივ ელექტრობის რაოდენობა კი სადენის მუშა გვევადობის პროპორციულია [45]

$$E_{\text{გა}} = 1,47 \cdot 10^{-2} \frac{CU}{r} \text{ კვ/მ}, \quad (3.5)$$

სადაც: C - სადენის მუშა გვევადობა, პფ/მ; U - ხაზის მუშა ხაზური ძაბვა, კვ; r - სადენის რადიუსი, მ.

იმისთვის რომ მაღალი ნომინალური ძაბვის ხაზებზე ადგილი არ ჰქონდეს საერთო გვირგვინის მოვლენას, საჭიროა, შევამციროთ სადენის ზედაპირზე ელექტრული ველის მუშა დაძაბულობა. ეს კი მიიღწევა სადენის რადიუსის გაზრდით, ხოლო ზემოაღნიშნული ძაბვის ხაზებზე კი ფაზათა გახლეჩით (რამდენიმე სადენი ფაზაში).

სადენის მუშა გვევადობა განისაზღვრება მაქსიმალური განტოლებათა სისტემის ამოხსნის გზით და მისი საშუალო მნიშვნელობა სამფაზა ხაზისთვის, როცა შესრულებულია სადენთა ტრანსპოზიციის სრული ციკლი, გამოითვლება ფორმულით (§3.3.4)

$$C_{\text{სა}} = \frac{24,13}{\lg \frac{D_{\text{საზგ}}}{r}} \text{ პფ/მ}, \quad (3.6)$$

სადაც

$$D_{\text{საზგ}} = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{CA}} \quad (3.7)$$

სადენთა შორის საშუალო გეომეტრიული მანძილია, მ. D_{AB} , D_{AC} და D_{CA} , შესაბამისად, მანძილი A,B და C ფაზურ სადენებს შორის (ცხრ.3.1).

ცხრილი 3.1 სადენებს შორის საშუალო გეომეტრიული გასაშუალოებული მანძილები

$U_{\text{ნ,კვ}}$	35	110	150	220	330	500	750
$D_{\text{საზგ,მ}}$	3,5	5,0	6,5	8,0	11,0	14,0	19,5

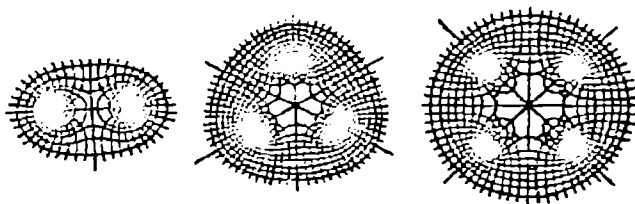
ფაზური სადენების ტოლგვერდა სამკუთხედის წვეროებზე განლაგების დროს სადენთა მუშა გვევადობა ერთნაირია, ხოლო მათი პორიზონტალური განლაგების შემთხვევაში კიდურა სადენების მუშა გვევადობა დაახლოებით (5-10)%-ით ნაკლებია, ვიდრე შუა სადენისა. აქედან გამომდინარე, შუა სადენის ზედაპირზე ელექტრული ველის დაძაბულობა თითქმის 5-10%-ით მეტია, ვიდრე კიდურა სადენის ზედაპირზე

$$E_{\text{შუაზღ}} = (1,05 - 1,10) \cdot E_{\text{კიდზღ}} \quad (3.8)$$

გახლეჩილი ფაზის სადენტა ზედაპირზე ელექტრული ველის დაძაბულობა არაერთნაირია, რადგანაც მოცემული ფაზის ერთი სადენტის ზედაპირის ამა თუ იმ წერტილში ელექტრული ველის დაძაბულობა შექმნილია როგორც თვით ამ სადენტის, ასევე ფაზის დანარჩენი სადენტების მუხტების მიერ. ელექტრულ ველის მაქსიმალურ დაძაბულობას ადგილი აქვს ფაზის გარე ზედაპირზე იმ წერტილში, რომელიც მდებარეობს ფაზისა და სადენტის ცენტრებზე გამავალ წრფეზე (ნახ.3.2)

$$E_{\text{მაქ}} = K \cdot E_{\text{საშ}}, \quad (3.9)$$

სადაც K - დაძაბულობის უთანაბრობის კოეფიციენტი.



ნახ. 3.2. გახლეჩილ ფაზებზე ელექტრო-მაგნიტური ველის განაწილების სურათი

გახლეჩილი ფაზის სადენტის ზედაპირზე ელექტრული ველის დაძაბულობის საშუალო მნიშვნელობა ზოგადად განისაზღვრება (3.5) ფორმულის ანალოგიურად

$$E_{\text{საშ}} = 1,47 \cdot 10^{-2} \frac{C_{\text{საშ}} U}{\pi r}, \quad \text{კვ/მ} \quad (3.10)$$

სადაც π - სადენტა რაოდენობა გახლეჩილ ფაზაში.

გახლეჩილი ფაზის მუშა ტევადობა განისაზღვრება (3.6) ფორმულის ანალოგიურად, სადაც r რადიუსი შეცვლილი უნდა იქნეს გახლეჩილი ფაზის ეკვივალენტური რადიუსით

$$C_{\text{საშ}} = \frac{24,13}{\text{tg} \frac{D_{\text{საშ}}}{r_{\text{ეკ}}}} \quad (3.11)$$

სადაც

$$r_{\text{ეკ}} = r \sqrt{\frac{n}{\prod_{i=2}^n a_{ii}}}, \quad (3.12)$$

გახლეჩილი ფაზის ეკვივალენტური რადიუსია, აქ α_{II} - ფაზის I-სა და II-ურ სადენებს შორის მანძილი, მ.

კერძო შემთხვევაში. როცა ფაზაში გვაქვს:
ორი სადენი (330კე)

$$r_{კკ} = \sqrt{r \cdot a}; \quad (3.12a)$$

სამი სადენი (500კე)

$$r_{კკ} = \sqrt[3]{r \cdot a^2}; \quad (3.12b)$$

ოთხი სადენი (750კე)

$$r_{კკ} = \sqrt[4]{\sqrt{2} r \cdot a^3}; \quad (3.12g)$$

ხუთი სადენი (750კე)

$$r_{კკ} = \sqrt[5]{2,62 r \cdot a^4}, \quad (3.12d)$$

სადაც α - ფაზის გახლეჩის ბიჯი და წარმოადგენს იმ წესიერი მრავალკუთხედის გვერდს, რომლის წვეროებზე განლაგებულია გახლეჩილი ფაზის სადენები.

გახლეჩილი ფაზის სადენის ზედაპირზე დაძაბულობის უთანაბრობის კოეფიციენტი K განისაზღვრება ფორმულით

$$K = 1 + \beta \frac{r}{a}, \quad (3.13)$$

სადაც β კოეფიციენტის სიდიდე (ცხრ.32) დამოკიდებულია სადნთა რაოდენობაზე ფაზაში და გამოითვლება ფორმულით

$$\beta = 2(n-1) \sin \frac{\pi}{n}. \quad (3.14)$$

ცხრილი 32 β კოეფიციენტის მნიშვნელობები გახლეჩილი ფაზისთვის.

n	2	3	4	5	6	8	10
β	2,0	3,48	4,24	4,7	5,0	5,36	5,58

(3.10) და (3.11) გამოსახულებების ერთობლივი განხილვით მივიღებთ სადენის ზედაპირზე ელექტრული ველის სამუქლო დაძაბულობის საანგარიშო გამოსახულებას გახლეჩილი ფაზისთვის

$$E_{\text{საზ}} = \frac{0,3547U}{nr \lg \frac{D_{\text{საზგ}}}{r_{\text{კაპ}}}}, \quad \text{კვ/მ} \quad (3.15)$$

ერთსადენიანი ფაზის შემთხვევაში ვსარგებლობთ ამავე ფორმულით, ოღონდ ვიღებთ $n=1$ და $r_{\text{კეფ}}=r$.
დაძაბულობის მაქსიმალური მნიშვნელობა (3.9)

$$E_{\text{მაქს}} = \frac{0,3547U \cdot K}{nr \lg \frac{D_{\text{საზგ}}}{r_{\text{კაპ}}}}, \quad \text{კვ/მ} \quad (3.16)$$

გახლეჩილი ფაზების შემთხვევაში გვირგვინზე სიმძლავრის დანაკარგების გაანგარიშებისას სარგებლობენ ელექტრული ეელის დაძაბულობის ეკვივალენტური მნიშვნელობით

$$E_{\text{კაპ}} = \frac{1+K}{2} E_{\text{საზ}}, \quad (3.17)$$

ანუ

$$E_{\text{კაპ}} = \frac{(1+K) \cdot 0,1773U}{nr \lg \frac{D_{\text{საზგ}}}{r_{\text{კაპ}}}}, \quad \text{კვ/მ} \quad (3.18)$$

გემოთმოყვანილი გამოსახულებები საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ კარგ ამინდში ხაზზე გვირგვინის წარმოქმნის $U=U_0$ ძაბვის საწყისი მნიშვნელობა. ამისათვის (3.16) გამოსახულებაში $E_{\text{მაქს}}$ შევცვალოთ E_0 -ით, განსაზღვრული (3.3) გამოსახულების მიხედვით, გვაქვს [45]

$$3030m\delta \left(1 + \frac{0,0298}{\sqrt{r\delta}} \right) = \frac{0,3547U_0K}{nr \lg \frac{D_{\text{საზგ}}}{r_{\text{კაპ}}}}$$

ანუ

$$U_0 = 8542,2 \frac{m\delta nr}{K} \left(1 + \frac{0,0298}{\sqrt{r\delta}} \right) \lg \frac{D_{\text{საზგ}}}{r_{\text{კაპ}}}, \quad \text{კვ} \quad (3.19)$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ მრავალმავთულიანი სადენისთვის $m=0,82$, მაშინ

$$U_0 = 7004,8 \frac{\delta n r}{K} \left(1 + \frac{0,0298}{\sqrt{r\delta}} \right) \lg \frac{D_{\text{სამკ}}}{r_{\text{კკ}}}, \text{ კვ.} \quad (3.20)$$

იმისთვის, რომ მოცემულ ხაზზე საერთო გვირგვინის მოვლენას ადგილი არ ქონდეს, საჭიროა სრულდებოდეს პირობა

$$U_{\text{კკ}} < U_0. \quad (3.21)$$

3.2 სიმბლავრისა და ენერგიის დანაკარგები გვირგვინზე

გვირგვინზე ენერგიის დანაკარგების სიდიდე დამოკიდებულია ხაზის ტრასის გასწვრივ გარემოს მეტეოროლოგიურ პირობებზე. ამინდის მიხედვით დანაკარგების სიდიდე იცვლება დიდ ფარგლებში. სხვადასხვა სახის ამინდის პირობებში ჩატარებული ექსპერიმენტების შედეგების საფუძველზე დადგენილია გვირგვინზე დანაკარგების გასაშუალოებული მნიშვნელობები.

ანგარიშების გამარტივების მიზნით განიხილავენ ამინდის ოთხ ძირითად ჯგუფს, რომლებიც ხასიათდებიან გვირგვინზე დანაკარგების გარკვეული გასაშუალოებული მნიშვნელობებით [10]:

პირველი - კარგი ამინდი;

მეორე - მშრალი თოვლი; ამ ჯგუფს მიეკუთვნება აგრეთვე ქარბუქი;

მესამე - წვიმა. ამ ჯგუფს მიეკუთვნება აგრეთვე სველი თოვლი;

მეოთხე - ჰირხლი. აქ განიხილება აგრეთვე ლიჟინული; ამინდის სხვა დანარჩენი სახე მიეკუთვნება კარგ ამინდს.

რეგიონისთვის, სადაც გადის განსახილველი ხაზის ტრასა, მეტეოროლოგიური დაკვირვებების საფუძველზე წინასწარ დადგინდება ამინდის ამა თუ იმ ჯგუფის ხანგრძლივობის ფარდობითი მნიშვნელობა

$$\psi_i = \frac{T_i}{8760}, \quad (3.22)$$

სადაც T_i - i -ური ჯგუფის ამინდის ხანგრძლივობა წლის განმავლობაში, სთ.

ამინდის თოთოეული i -ური ჯგუფისათვის გვირგვინზე სიმბლავრის დანაკარგები განისაზღვრება θ_i (კვკ/კმ.სმ²) განზოგადებული პარამეტრით, რომელიც $E_{\text{კკ}}/E_0$ ფარდობის ფუნქციას წარმოადგენს (ნახ.3.3).

დანაკარგების გაანგარიშების მეთოდის ემყარება იმ დაშვებას, რომ გვირგვინის კრიტიკული გრადიენტი წარმოადგენს მუდმივ

სიდიდეს. ამ დამუშავების საფუძველზე გვირგვინზე დანაკარგები უამრავი სადენების რაოდენობისა (n) და ამ სადენის რადიუსის (r) კვადრატის პროპორციულია.

$$\Delta P_i = nr^2 \cdot \theta_i, \quad (3.23)$$

აქ r აიღება სანტიმეტრებში.

უნდა აღინიშნოს რომ წვიმის დროს გვირგვინზე სიმძლავრის დანაკარგები (ნახ.3.3, მრუდი 3) მოცემულია ნალექების 1 მმ/სთ ინტენსივობისთვის. ამიტომ დანაკარგების გაანგარიშებისას საჭიროა წინასწარ დაეადგინოთ ნალექების საშუალო წლიური ინტენსივობა

$$I = \frac{H}{T}, \quad (3.24)$$

სადაც: H - ნალექების წლიური რაოდენობა, მმ; T - წვიმის საშუალო წლიური ხანგრძლივობა, სთ.

თუ $I \neq 1$ მმ/სთ, მაშინ 3.3 ნახაზის მიხედვით დადგენილი მკ პარამეტრი უნდა გავამრავლოთ α კოეფიციენტზე, რომლის მნიშვნელობა მოცემულია 3.4 ნახაზზე.

ეიყოს რა, ამინდის ხანგრძლივობის ფარდობითი მნიშვნელობა Ψ_i და შესაბამისი განზოგადოებული პარამეტრები, გვირგვინზე სიმძლავრის დანაკარგების საშუალო წლიური მნიშვნელობა ხაზის სამივე ფაზისთვის განისაზღვრება ფორმულით

$$\Delta P_{\text{კმ}} = 3nr^2 \sum_{i=1}^4 \Psi_i \theta_i \quad \text{კვტ/კმ}, \quad (3.25)$$

ხოლო ენერგიის დანაკარგები კი ფორმულით

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{კმ}} = \Delta P_{\text{კმ}} \cdot 8760 \quad \text{კვტს/კმ}; \quad (3.26)$$

ანუ (3.22) და (3.25) გამოსახულებათა გათვალისწინებით გვაქვს

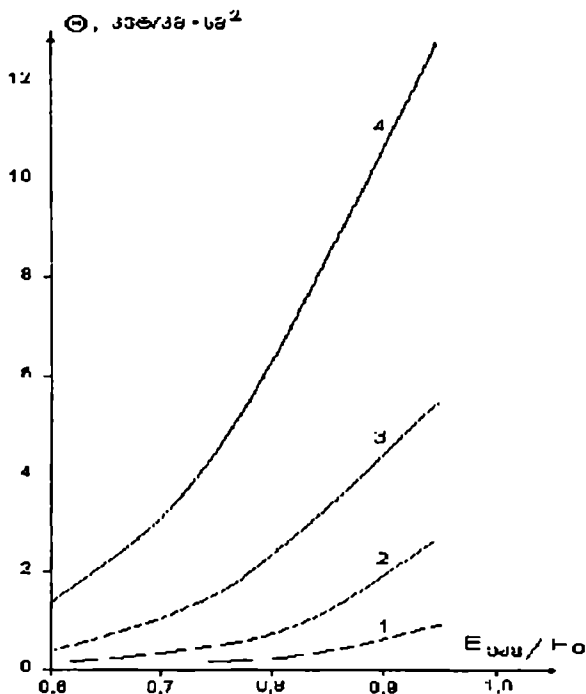
$$\Delta \mathcal{E}_{\text{კმ}} = 3nr^2 \sum_{i=1}^4 T_i \theta_i \quad \text{კვტს/კმ} \quad (3.27)$$

დღეღამის ინტერვალში გვირგვინულ განმუხტვაზე სიმძლავრის დანაკარგი არათანაბრადაა განაწილებული. იგი მაქსიმალურია ღამის საათებში (22 საათიდან 6-7 საათამდე). დროის ამ ინტერვალზე მოდის დანაკარგების თითქმის 50%, რაც აისახება ღამით მეტეოროლოგიური პირობების გაუარესებით, განსაკუთრებით გაზაფხულისა და შემოდგომის სეზონზე.

ზოგადად, ამინდთა ჯგუფებიდან დიდი ხვედრითი წილი მოდის კარგ ამინდზე (80%-მდე). მიუხედავად ამისა, დანაკარგების ხვედრითი წილი ამ ამინდში არ აღემატება 30-35%-ს (ცხრ.3.3). საერთოდ 330-750 კვ ძაბვის ხაზებზე გვირგვინზე დანაკარგების 50-60%

რეგისტრირდება წვიმისა და ჭირხლის დროს, თუმცა ასეთი ამინდის ხვედრითი წილი დაახლოებით 8%-ს შეადგენს.

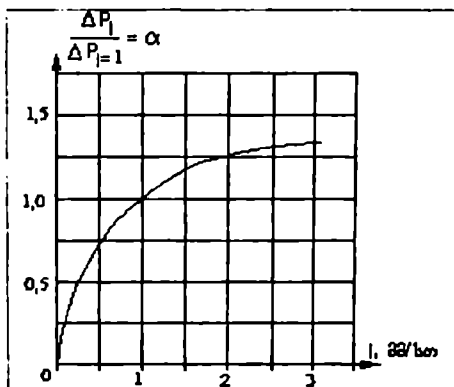
აღნიშნულიდან გამომდინარე, ცულ ამინდში გვირგვინზე დანაკარგების შემცირების მიზნით შეიძლება ეკონომიკურად მიზანშეწონილი აღმოჩნდეს ძაბვის შესაბამისი რეგულირება. 3.4 ცხრილში ნაჩვენებია ხაზის სამივე ფაზაზე გვირგვინზე დანაკარგების მნიშვნელობები სხვადასხვა მუშა ძაბვის დროს ყველაზე უფრო გავრცელებული მეტეოროლოგიური პირობებისთვის [45].



ნახ. 3.3. გვირგვინზე სიმძლავრის დანაკარგების განზოგადოებული პარამეტრი ამინდის სხვადასხვა ჯგუფისთვის: 1-კარგი ამინდი; 2-მშრალი თოვლი; 3-წვიმა; 4-ჭირხლი.

ხაზზე საერთო გვირგვინისა და სხვა არასასურველი მოვლენების თავიდან აცილების მიზნით სადენის ზედაპირზე ელექტრული ველის დაძაბულობა არ უნდა აღემატებოდეს საერთო გვირგვინის

წარმოქმნის საწყის დაძაბულობას. (3.15) გამოსახულების თანახმად მოცემული ნომინალური ძაბვის შემთხვევაში სადენის ზედაპირზე ელექტრული ველის დაძაბულობა მცირდება ფაზათაშორისი მანძილისა და სადენის რადიუსის გაზრდით და დამოკიდებულია გახლეჩილ ფაზაში სადენების რაოდენობაზე. ამასთან, ფაზათაშორისი მანძილი უმნიშვნელო გავლენას ახდენს ველის დაძაბულობის სიდიდეზე (ლოგარითმული კავშირის გამო), ხოლო სადენის რადიუსთან და ფაზაში სადენების რაოდენობასთან იგი უკუპროპორციულ დამოკიდებულებაშია.



ნახ. 3.4. გვირგვინზე დანაკარგების შემასწორებელი კოეფიციენტის მნიშვნელობა ნაღებების ინტენსივობის მიხედვით.

ცხრილი 3.3. გვირგვინზე სიმძლავრის დანაკარგების სტრუქტურა, %

ელექტროგადაცემის ხაზის ძაბვა და სადენი	გვირგვინზე დანაკარგების შემდგენელი, %			
	კარგი ამინდი $\psi_1=0,826$	მშრალი თოვლი $\psi_2=0,091$	წვიმა $\psi_1=0,057$	ჭირბოლი $\psi_1=0,026$
330 კე, 2XAC - 300/29	29,3	13,0	28,6	29,1
500 კე, 2XAC - 400/51	29,2	12,4	28,1	30,3
750 კე, 2XAC - 600/72	35,2	12,1	26,6	26,1

35 კე ძაბვის ხაზებზე სადენის ზედაპირზე ელექტრული ველის დაძაბულობა საერთო გვირგვინის წარმოქმნის საწყის მნიშვნელო-

ბასთან შედარებით მნიშვნელოვნად დაბალია და ამიტომ ამ ძაბვის ხაზებზე საერთო გვირგვინის თავიდან აცილების მიზნით სადენტა განიკვეთების შერჩევის დროს რაიმე შეზღუდვა არ არის.

110 და 220 კვ ძაბვის ხაზებზე საერთო გვირგვინის თავიდან აცილებისთვის საჭიროა სადენტის განიკვეთი შევარჩიოთ გარკვეულ მინიმალურ მნიშვნელობაზე მეტი. ზემაღალი ძაბვის შემთხვევაში კი ეკონომიკურად უფრო მიზანშეწონილია გამოვიყენოთ ფაზათა გახლეჩის მეთოდი.

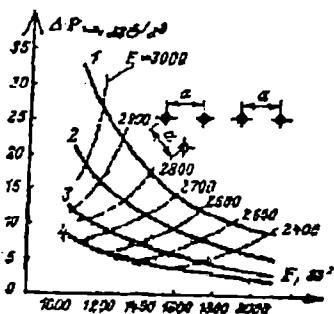
**ცხრილი 3.4. გვირგვინზე სიმძლავრის დანაკარგები
(კვტ/კმ/%) სხვადასხვა მუშა ძაბვის დროს**

სადენტის მარკა	ძაბვა, კვ / %				
	297/90	310/94	330/100	350/106	363/110
2XAC -240/39	2,0/60,1	2,7/81,82	3,3/100	5,5/166,7	6,9/209,1
2XAC -300/39	1,9/56,7	2,3/68,7	3,35/100	4,6/137,3	5,8/173,1
სადენტის მარკა	ძაბვა, კვ / %				
	475/95	490/98	500/100	510/102	525/105
3XAC -330/43	4,25/73,3	5,1/87,9	5,8/100	6,42/110,7	7,5/129,3
3XAC -400/51	3,5/72,9	4,24/88,3	4,8/100	5,35/111,5	6,2/129,2
სადენტის მარკა	ძაბვა, კვ / %				
	715/95	730/97	750/100	770/103	787/105
4XAC -500/64	10,4/75,6	11,36/82,6	13,75/100	15,7/114,2	18,0/130,9
5XAC -240/27	9,25/75,2	10,12/82,3	13,3/100	14,0/113,8	15,85/128,9

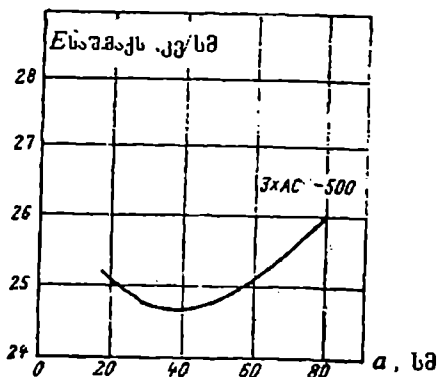
გახლეჩილი ფაზის ჯამური განიკვეთის მუდმივობის პირობებში, სადენტის ზედაპირზე ელექტრული ველის დაძაბულობა მცირდება ფაზაში სადენტა რაოდენობის გაზრდით და დამოკიდებულია გახლეჩის ბიჯზე. მუშა დაძაბულობის ზრდასთან ერთად ფაზის გახლეჩა კიდევ უფრო არსებით პრაქტიკულ მნიშვნელობას იძენს. 3.5 ნახაზზე 500კვ ძაბვის ხაზისთვის ფაზაში სხვადასხვა რაოდენობის სადენტების შემთხვევაში ნაჩვენებია გვირგვინზე დანაკარგების ცვლილება ფაზის ჯამური განიკვეთის მიხედვით, როცა ფაზის გახლეჩის ბიჯი $a=40$ სმ [45].

3.6 ნახაზზე ნაჩვენებია 500კვ ძაბვის ხაზის გახლეჩილი ფაზის სადენტის ზედაპირზე ელექტრული ველის დაძაბულობის ცვლილება, გამოწვეული ფაზის გახლეჩის ბიჯის ცვლილებით.

(3.10) და (3.11) გამოსახულებების ერთობლივი განხილვით მივიღებთ სადენის ზედაპირზე ელექტრული ველის საშუალო დაძაბულობის საანგარიშო გამოსახულებას გახლეჩილი ფაზისთვის (3.4) პირობის უზრუნველყოფის მიზნით 110კე მუშა ძაბვისას ხაზზე მინიმალური განიკვეთის სადენს წარმოადგენს AC-50/8, 220კე ძაბვის - AC-185/24, 330 კე ძაბვისას, AC-500/26 ან ფაზის ორად გახლეჩა - 2XAC-240/32, 500კე ძაბვისას ფაზის ორად გახლეჩა - 2XAC - 500/26 ან სამად გახლეჩა - 3XAC-240/32, ხოლო 750 კე ძაბვისას ფაზის ოთხად გახლეჩა - 4XAC-330/39 ან ხუთად გახლეჩა - 5XAC—240/56.



ნახ. 3.5 გვიგეინზე დანაკარგები ფაზაში სხვადასხვა რაოდენობის სადენის შემთხვევაში ($U_n=500$ კე, $a=40$ სმ)



ნახ. 3.6. 500კე ძაბვის ხაზზე ფაზის გახლეჩის ბიჯისაგან სადენის ზედაპირზე ელექტრული ველის დამოკიდებულობის გრაფიკი

გვირგვინზე დანაკარგების შემცირების მიზნით ნომინალური ძაბვების მიხედვით ფაზაში რეკომენდირებულია სადენტა შემდეგი მინიმალური განიკვეთები: 110 კვ - AC-70/11; 220 კვ - AC-240/32; 330 კვ - 2XAC-240/32; 500 კვ - 3XAC-330/43; 750 კვ - 4XAC-400/93.

ცხრილი 3.5. სადენტის ზედაპირზე ელექტრული ველის დაძაბულობა ერთსადენიანი და გახლეჩილი ($a=40$ სმ) ფაზების შემთხვევაში

ნომინალური ძაბვა, კვ	სადენტის რაოდენობა და მარკა	სადენტის რადიუსი, მმ	ფაზებს შორის საშუალო გეომეტრიული მანძილი, მ	ტახლეჩილი ფაზის ეკვივალენტური რადიუსი, სმ	დაძაბულობის უთანაბრობის კოეფიციენტი K	ეკვივალენტური დაძაბულობა $E_{კვ/მ}$	საერთო გვირგვინის საწყისი დაძაბულობა E_0 ვ/მ	ფარდობა $E_{კვ/მ}/E_0$
35	A-25	3,15	2,5	-	1	1293,5	3803,8	0,340
	AC-16/2,7	2,7	2,5	-	1	1476,6	3909,5	0,378
110	AC-50/8	4,8	3,5	-	1	2692,6	3553,0	0,758
	AC-70/11	5,7	3,5	-	1	2325,2	3465,3	0,671
220	AC-185/24	9,45	6,0	-	1	2819,4	3246,3	0,868
	AC-240/32	10,8	6,0	-	1	2516,8	3197,2	0,787
330	AC-500/26	15,0	8,0	11,0	1	2722,9	3089,0	0,881
	AC-600/72	16,6	8,0	-	1	2498,9	3059,5	0,816
	2X AC-240/32	10,8	8,0	6,75	1,054	2446,9	3197,2	0,765
	2X AC-300/39	12,0	8,0	6,93	1,06	2215,2	3160,8	0,701
500	AC-600/72	16,6	12,0	-	1	3650,3	3059,5	1,193
	2X AC-500/26	15,0	12,0	7,75	1,075	2618,5	3089,0	0,848
	3X AC-240/32	10,8	12,0	12,0	1,094	2647,4	3197,2	0,855
	3X AC-330/43	12,6	12,0	12,63	1,110	2293,6	3144,5	0,729
750	4X AC-330/39	12,0	15,0	18,14	1,127	2728,0	3160,8	0,863
	4X AC-400/22	13,3	15,0	18,61	1,141	2774,8	3126,8	0,791
	4X AC-400/93	14,55	15,0	19,04	1,154	2273,4	3098,5	0,734
	5X AC-240/32	10,8	15,0	23,55	1,127	2567,8	3197,2	0,803
	5X AC-240/56	11,2	15,0	23,72	1,132	2480,0	3184,2	0,779

3.3 საპაერო ელექტროგადაცემის ხაზების ელექტრული პარამეტრები

3.3.1 აქტიური წინაღობა

ელექტროსადენს მუდმივი და ცვლადი დენის მიმართ განსხვავებული წინააღობები გააჩნია. მუდმივი დენის მიმართ წინააღობას ომურს უწოდებენ $R_{\text{ოზ}}$, ხოლო ცვლადი დენის მიმართ წინააღობას კი აქტიურს $R_{\text{აქტ}}$. აქტიური წინააღობა ომურზე მეტია, რადგანაც გამგარში ცვლადი დენის გაულისას ადგილი აქვს ზედაპირულ ეფექტს, რაც ნიშნავს დენის გადანაწილებას სადენის განიკვეთის ცენტრიდან პერიფერიისკენ. ეს გამოწვეულია სადენის შიგნით აღძრული ელექტრომამოძრავებელი ძალის მოქმედებით. როგორც ელექტროტექნიკიდანაა ცნობილი სადენის ინდუქციური წინააღობა თვითინდუქციის ელექტრომამოძრავებელი ძალის პროპორციულია $X \propto E$, რომელიც თავის მხრივ მაგნიტური ნაკადის პროპორციულია $E \propto \Phi$. ამრიგად, რაც მეტია მაგნიტური ნაკადი, მით მეტია ინდუქციური წინააღობა.

სადენის განიკვეთის ცენტრთან ახლოს მდებარე ელემენტარული გამგარი ნაწილი შემოფარგლულია უფრო დიდი მაგნიტური ნაკადით, ვიდრე სადენის ზედაპირთან ახლო მდებარე ელემენტარული გამგარი ნაწილი. აქედან აგომოდინარე, სადენის ცენტრალურ ნაწილში ინდუქციური წინააღობა მეტია, ვიდრე განიკვეთის პერიფერიულ ნაწილში. ეს კი განაპირობებს დენის გადანაწილებას ცენტრიდან პერიფერიისკენ. შედეგად დენი სადენის ცენტრალურ ნაწილში ნაკლებია, ვიდრე ზედაპირის მახლობლობაში. დენის სიმკვრივე მინიმალურია სადენის ღერძზე, ხოლო მაქსიმალურია სადენის ზედაპირთან. სიმკვრივეთა შორის განსხვავება მით მეტია, რაც მეტია დენის სიხშირე, სადენის რადიუსი, მისი გამგარობა და მაგნიტური შეღწევადობა. შესაბამისად, ცვლადი დენისას, ზედაპირული ეფექტის არსებობის გამო სადენის განიკვეთი სრულად არ არის გამოყენებული.

ელექტროგადაცემის ხაზებში, რომელთა სადენები დამზადებულია ფერადი ლითონებისგან (ალუმინი, სპილენძი) და რომელშიც გადის სამრეწველო სიხშირის დენი, ზედაპირული ეფექტი არც ისე დიდია. ამიტომ ამ სადენთა აქტიური წინააღობა მცირედ განსხვავდება ომური წინააღობისაგან. ეს განსხვავება იზრდება სადენის განიკვეთის ზრდასთან ერთად (ცხრ.3.6). $F \leq 150 \text{ მმ}^2$ განიკვეთის სადენების აქტიური წინააღობა ომურს აღემატება არაუმეტეს 1%-ით.

**ცხრილი 3.6 სადენის აქტიური და ომური წინააღობების
თანაფარდობა**

სადენის განიკვეთი, მმ ²	$R_{აქ}/R_{ომ}$
300	1,020
400	1,045
500	1,050

სადენის ომური წინააღობა უშუალოდ გაიზომება საქარხნო პირობებში $+20^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურის დროს. ამიტომ $t \neq +20^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურისას სადენის საანგარიშო კუთრი წინააღობა უნდა ვიანგარიშოთ ფორმულით

$$\rho = \rho_{20} [1 + \alpha(t - 20)] \frac{\text{ომი.მმ}^2}{\text{კმ}}, \quad (3.28)$$

სადაც: ρ_{20} - სადენის კუთრი ომური წინააღობა $+20^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურის დროს; $\alpha = 0,004$ გრად⁻¹ - მასალის წინააღობის ტემპერატურული კოეფიციენტი.

1 კმ სიგრძის სადენის წინააღობა (ცხრ.დ2; დ3; დ4) განისაზღვრება ფორმულით

$$r_0 = \rho / F \text{ ომი/კმ}, \quad (3.29)$$

სადაც: F - სადენის გამგარი ნაწილის განიკვეთი, მმ².

საპაერო ელექტროგადაცემის ხაზებზე სადენებად გამოიყენება ალუმინი და მყარმიღული სპილენძი, რომელთათვის

$$\rho_{ალ} = 29,5 \frac{\text{ომი.მმ}^2}{\text{კმ}} \quad \text{და} \quad \rho_{სპ} = 18,0 \frac{\text{ომი.მმ}^2}{\text{კმ}}.$$

გაანგარიშებისას კუთრი წინააღობების ეს მნიშვნელობები უნდა გაიზარდოს შემდეგი მოსაზრებების გამო:

1. მრავალმაუთიანი სადენის სიგრძე მათი დახვევის გამო მეტია, ვიდრე თვით სადენის სიგრძე;

2. ხაზის აქტიური წინააღობის გაანგარიშება წარმოებს სადენის სტანდარტული განიკვეთის მიხედვით. სინამდვილეში უმეტეს შემთხვევაში სადენის საანგარიშო განიკვეთი სტანდარტულზე ნაკლებია;

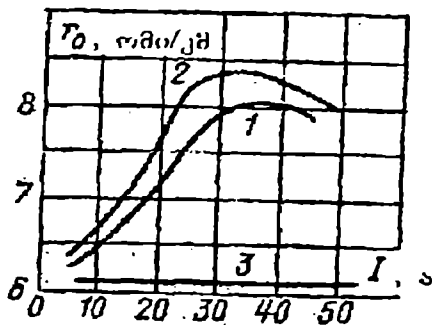
3. ჩაღუნვის ისრის გამო სადენის სიგრძე მეტია, ვიდრე ხაზის სიგრძე, რომლის მიხედვითაც გამოითვლება ხაზის აქტიური წინააღობა;

4. ზედაპირული ეფექტის გამო სადენის განიკვეთის გამოყენების ეფექტურობა ცვლადი ღენისას უფრო დაბალია, ვიდრე მუდმივი ღენისას.

აღნიშნულ მოსაზრებათა გამო საანგარიშო კუთრი წინაღობა აიღება

$$\rho_{\Sigma} = 31,5 \frac{\text{ომი.მმ}^2}{\text{კმ}} \quad \text{და} \quad \rho_{\Sigma} = 18,8 \frac{\text{ომი.მმ}^2}{\text{კმ}} \quad (3.30)$$

ფოლადის სადენში, მასალის მაღალი მაგნიტური შეღწევადობის გამო, მაღალია ზედაპირული ეფექტის ხარისხი. ამიტომ, ფოლადის სადენის აქტიური წინაღობა დამოკიდებულია დატვირთვის ღენის სიდიდეზე და იგი ომურ წინააღობასთან შედარებით მნიშვნელოვნად დიდია. ამასთან, მრავალმავთულიანი სადენის აქტიური წინააღობა უფრო ნაკლებია, ვიდრე ერთმავთულიანისა.



ნახ. 3.7 ფოლადის სადენის აქტიური წინააღობა: 1- მრავალმავთულიანი; 2- ერთმავთულიანი; 3- მუდმივი ღენის მიმართ.

ფოლადის სადენში გამავალი ცვლადი ღენი, გარდა ზედაპირული ეფექტისა, იწვევს აგრეთვე მის მუდმივ გადამაგნიცებას (პისკერების) და გრიგალური ღენების წარმოქმნას, რომლებიც თავის მხრივ იწვევენ აქტიური ენერგიის დამატებით დანაკარგებს. ეს დანაკარგები ზედაპირულ ეფექტთან ერთად გათვალისწინებული უნდა იქნეს ფოლადის სადენის აქტიური წინააღობის დამატებითი შემდეგნის სახით [9]

$$R_{0,\text{დამ}} = R_{0,\text{ზეფექტ}} + R_{0,\text{პისკ}} + R_{0,\text{გრიგ}} \quad \text{ომი/კმ} \quad (3.31)$$

ამრიგად, ცვლადი ღენის მიმართ ფოლადის სადენის აქტიური წინააღობა მნიშვნელოვნად იზრდება დატვირთვის ღენის ბრდასთან ერთად (ნახ.3.7)

$$R_0 = R_{0,\text{მუდმ.ღენი}} + R_{0,\text{დამ}} \quad \text{ომი/კმ} \quad (3.32)$$

ხაზის აქტიური წინააღობა ზოგადად იანგარიშება ფორმულით

$$R = r_0 \ell = \rho \frac{\ell}{F} \text{ ომი} \quad (3.33)$$

აქ: ℓ - ხაზის სიგრძე, კმ; r_0 - 1კმ სიგრძის ხაზის წინაღობა, ომი/კმ, რომელიც ფერადი ლითონისგან დამზადებული სადენისთვის იანგარიშება (3.29) გამოსახულების მიხედვით, ხოლო ფოლადის სადენებისთვის კი აიღება 3.7 ნახაზის მიხედვით.

3.3.2 რეაქტიული წინაღობა

სადენში გამავალი ცვლადი დენი ქმნის ცვლად მაგნიტურ ველს, რომელიც მასში აინდუქციერებს თვითინდუქციის ელექტრომამოძრავებელ ძალას. ამ ძალის გავლენით დენს სადენში ექმნება დამატებითი წინაღობა, რომელსაც ინდუქციურ რეაქტიულ წინაღობას უწოდებენ.

სამუშაო ხაზის მეზობელი სადენები, რომლებიც განსახილველი სადენის დენისთვის უკუსადენებს წარმოადგენენ, თავის მხრივ, ამ სადენში აინდუქციერებს ურთიერთინდუქციის ელექტრომამოძრავებელ ძალას, რომელიც რამდენადმე ამცირებს თვითინდუქციის ელექტრომამოძრავებელ ძალას და, შესაბამისად, სადენის რეაქტიულ წინაღობას.

აღნიშნულიდან გამომდინარე, რაც უფრო ახლოსაა ერთმანეთთან სამუშაო ხაზის სადენები, მით მეტია მეზობელი სადენების ურთიერთგავლენა და, შესაბამისად, ნაკლებია სადენის რეაქტიული წინაღობა. თუ წარმოვიდგენთ, რომ სამივე ფაზა ერთ გეომეტრიულ ღერძზე გადის, მაშინ თვით და ურთიერთინდუქციის ელექტრომამოძრავებელი ძალების გავლენით სადენის ინდუქციური რეაქტიული წინაღობა ნულის გოლი გახდება, რადგანაც ამ შემთხვევაში მაგნიტური ველები ურთიერთკომპენსირდებიან.

ინდუქციურ რეაქტიულ წინაღობაზე გავლენას ახდენს აგრეთვე სადენის დიამეტრი, სადენის მასალის მაგნიტური შეღწევადობა და ცვლადი დენის სიხშირე.

საკაერო ხაზების ერთი ფაზის სადენის ინდუქციური რეაქტიული წინაღობა იანგარიშება ფორმულით

$$x_0 = 2\pi f L_0 = \omega L_0 \text{ ომი/კმ}, \quad (3.34)$$

სადაც: f - ცვლადი დენის სიხშირე, ჰერცი; L_0 - სადენის ინდუქციურობის კოეფიციენტი, რომელიც $f=50$ ჰერცის ცვლადი დენის დროს გამოითვლება ფორმულით

$$L_0 = \left(4,61g \frac{D_{\text{საგ}}}{r} + 0,5\mu \right) \cdot 10^{-4} \text{ პერი/კმ.} \quad (335)$$

აქ: $D_{\text{საგ}}$ - ფაზებს შორის საშუალო გეომეტრიული მანძილი; r - სადენის რადიუსი; μ - სადენის მასალის ფარდობითი მანიტური შეღწევადობა.

$f=50$ პერცი სიხშირის ცელადი დენის შემთხვევაში 1კმ ხაზის ფაზური სადენის ინდუქციური რეაქტიული წინაღობის საანარიშო გამოსახულებას, (334) და (335) გამოსახულებათა გათვალისწინებით, აქვს სახე

$$x_0 = 0,144Ig \frac{D_{\text{საგ}}}{r} + 0,016\mu \text{ ომი/კმ.} \quad (336)$$

ამ გამოსახულებიდან ჩანს, რომ სადენის რეაქტიული წინაღობა შეიცავს ორ შემდგენს, რომელთაგანაც:

პირველი - გარე რეაქტიული წინაღობა

$$x'_0 = 0,144Ig \frac{D_{\text{საგ}}}{r} \quad (337)$$

განპირობებულია სადენის გარე მაგნიტური ველით და დამოკიდებულია მხოლოდ მის გეომეტრიულ ზომებზე;

მეორე - შიგა რეაქტიული წინაღობა

$$x''_0 = 0,016\mu, \quad (338)$$

განპირობებულია სადენის შიგა მაგნიტური ველით და დამოკიდებულია სადენის მასალის მაგნიტურ თვისებებზე ანუ სადენის შიგნით შექმნილ მაგნიტური ველის დაძაბულობაზე, რომელიც თავის მხრივ დამოკიდებულია სადენში გამავალ დენზე.

ფერადი ლითონებისთვის $\mu = 1$ და ამიტომ ამ მასალისაგან დამზადებული სადენებისთვის გვაქვს

$$x_0 = 0,144Ig \frac{D_{\text{საგ}}}{r} + 0,016 \text{ ომი/კმ} \quad (339)$$

რეაქტიული წინაღობის პირველი შემდგენი სადენის გეომეტრიულ ზომებთან ლოგარითმულ კავშირშია და იგი ამ ზომების ცვლილებისას უმნიშვნელოდ იცვლება. მეორე შემდგენი კი წარმოადგენს მუდმივ სიდიდეს. აღნიშნულის გამო ფერადი ლითონისგან დამზადებული სადენების შემთხვევაში საპაერო ხაზის რეაქტიული წინაღობა მცირე ფარგლებში იცვლება (ცხრ. დ2; დ3)

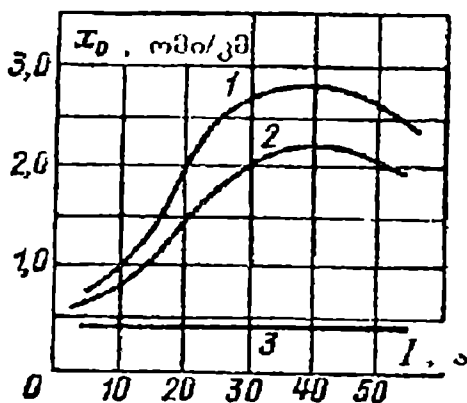
$$x_0 = (0,36 \div 0,44) \text{ ომი/კმ.} \quad (340)$$

ფაზებს შორის მანძილი ხაზის ნომინალური ძაბვის ზრდასთან ერთად იზრდება. ასევე იზრდება სადენის რადიუსიც, მაგრამ უფრო ნაკლები ხარისხით. ამიტომ უფრო მაღალი ძაბვის ხაზების სადენის რეაქტიული წინაღობა მეტია, ვიდრე უფრო დაბალი ძაბვის ხაზების სადენებისა.

ფოლადისთვის $\mu \gg 1$ და დამოკიდებულია მასში გამავალი დენის სიდიდეზე. ამიტომ ამ სადენებისთვის მიგა რეაქტიული წინაღობა მნიშვნელოვნად მეტია, ვიდრე ფერადი ლითონებისგან დამზადებული სადენებისა. ამასთან ერთმანეთულიანი სადენის წინაღობა უფრო მეტია ვიდრე მრავალმანეთულიანისა (ნახ.3.8).

როგორც ვხედავთ, ფოლადის სადენის რეაქტიული წინაღობა, მნიშვნელოვნად მეტია, ვიდრე ფერადი ლითონისგან დამზადებული სადენებისა. ამ გარემოებათა გამო ელექტრულ ქსელებში ენერგიის გადაცემისთვის ფოლადი არ გამოიყენება.

3.9 ნახაზზე ნაჩვენებია ფერადი ლითონისგან დამზადებული საჰაერო ხაზების აქტიური და რეაქტიული წინაღობების ცვლილებების გრაფიკები სადენის განიკვეთისგან დამოკიდებულებაში.



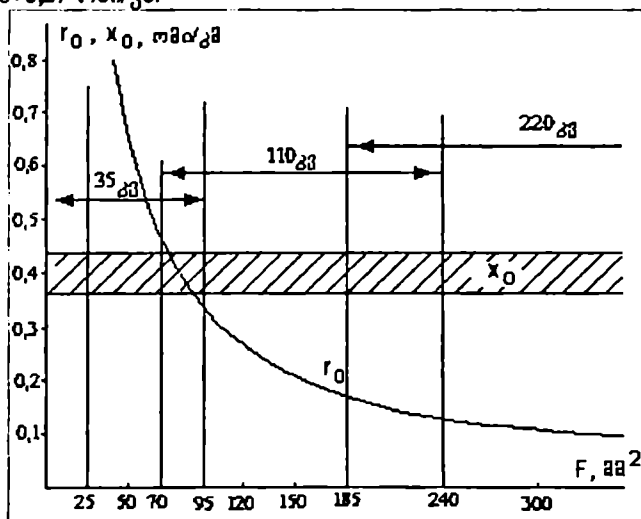
ნახ. 3.8. ფოლადის და ალუმინის სადენების ინდუქტიური რეაქტიული წინაღობები: 1-ერთმანეთულიანი ფოლადის სადენი; 2-მრავალმანეთულიანი ფოლადის სადენი; 3-ალუმინის სადენი.

როგორც ცნობილია 330 კვ და უფრო მეტი ძაბვის ელექტროგადაცემის ხაზებზე, გვირგვინზე აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების მიზნით, ახდენენ ფაზის გახლეჩას რამდენიმე სადენად. ასეთ შემთხვევაში 1 კმ ხაზის აქტიური წინაღობა (3.29) იანგარიშება ფაზის სადენების გამგარი ნაწილის ჯამური განიკვეთის მიხედვით, ხოლო რეაქტიული წინაღობა კი ფორმულით

$$x_0 = 0,144 \lg \frac{D_{\text{საფ}}}{r_{\text{კვ}}} + \frac{0,016}{n} \text{ მმ/კმ}, \quad (3.41)$$

სადაც n - გახლეჩილ ფაზაში სადენების რაოდენობა; $r_{\text{კვ}}$ - გახლეჩილი ფაზის ეკვივალენტური რადიუსი (3.12).

გახლეჩილი ფაზის რეაქტიული წინაღობა უფრო მცირეა, ვიდრე ერთსადენიანი ფაზისა. კერძოდ, ფაზის ორად გახლეჩის შემთხვევაში (330კვ) $x_0=0,32+0,33$ მმ/კმ; სამად გახლეჩის შემთხვევაში (500კვ) $x_0=0,30+0,31$ მმ/კმ; ოთხად გახლეჩის შემთხვევაში (750კვ) $x_0=0,29+0,30$ მმ/კმ და რვაად გახლეჩის შემთხვევაში (1150კვ) $x_0=0,26+0,27$ მმ/კმ.



ნახ. 3.9. ფოლად-ალუმინის და ალუმინის სადენის აქტიური და რეაქტიული წინაღობის სადენის განიკვეთზე დამოკიდებულების გრაფიკები

გამოთვლით რა 1კმ სიგრძის რეაქტიულ წინაღობას, შეგვიძლია განვსაზღვროთ ხაზის რეაქტიული წინაღობა ფორმულით

$$X = x_0 \cdot l. \quad \text{ომი} \quad (3.42)$$

საპაერო ხაზის საყრდენებზე სადენთა ურთიერთ არასიმეტრიული განლაგების გამო მათი რეაქტიული წინაღობები არაერთნაირია. კერძოდ, ფაზათა პორიზონტალური განლაგების დროს, რომელსაც პრაქტიკულად ადგილი აქვს 220კვ და მეტი ძაბვის ხაზზე

ბის შემთხვევაში, შუა ფაზის წინალობა კიდურა ფაზების წინალობაზე ნაკლებია. წინალობათა არაერთნაირობა იწვევს ხაზის რეჟიმის პარამეტრების არასიმეტრიულობას, რომლის თავიდან აცილების მიზნით ამ ძაბვის ხაზებზე შეიძლება განვახორციელოთ სადენტა გრანსპოზიციის სრული ციკლი, როცა ხაზის სიგრძე აღემატება 100კმ-ს.

3.3.3 აქტიური გამგარობა

ხაზის აქტიური გამგარობა განპირობებულია იზოლატორებში გაჟონვის დენებით გამოწვეული აქტიური სიმძლავრის დანაკარგებითა და დანაკარგებით გვირგვინზე.

დღესთვის სახაზო იზოლატორები საკმარისად მაღალხარისხოვანი და სრულყოფილია. ამიტომ, მათში გაჟონვის დენები ძალიან მცირეა და შესაბამისად, ამ დენებით გამოწვეული სიმძლავრის დანაკარგები შეიძლება უგულებელვყოთ.

გვირგვინზე აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები რიგ შემთხვევაში აღწევს მნიშვნელოვან სიდიდეს, განსაკუთრებით ზემაღალი ძაბვის ხაზებზე (§3.2). ამ დანაკარგების მიხედვით გამოვთვლით 1 კმ სიგრძის ხაზის აქტიურ გამგარობას

$$g_0 = \frac{\Delta P_{\text{გვ}}}{U_g^2} 10^{-3} \quad \text{სიმ/კმ}, \quad (3.43)$$

სადაც: $\Delta P_{\text{გვ}}$ - ხაზის სამივე ფაზაზე გვირგვინზე აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები, კვტ/კმ (3.25); U_g - ხაზის ნომინალური ხაზური ძაბვა, კვ.

თუ გავითვალისწინებთ, რომ საპაერო ხაზების სადენტების ზედაქირზე ელექტრული ველის დაძაბულობის შემცირების ღონისძიებები განხორციელებულია იმგვარად, რომ კარგ ამინდში გვირგვინზე სიმძლავრის დანაკარგებს ადგილი არ აქვს (§3.2), ხოლო დანარჩენ ამინდში კი ეს დანაკარგები ძალიან მცირეა, მაშინ შეგვიძლია ჩავთვალოთ $g_0=0$, რაც განსაკუთრებით დამახასიათებელია 110კვ და უფრო დაბალი ძაბვის ხაზებისთვის.

იმ შემთხვევაში, როცა $g_0 \neq 0$, ხაზის აქტიური გამგარობა გამოითვლება ფორმულით

$$G = g_0 \cdot \ell \quad \text{სიმ}, \quad (3.44)$$

აქ: ℓ - ხაზის სიგრძე, კმ.

3.3.4 რეაქტიული გამტარობა

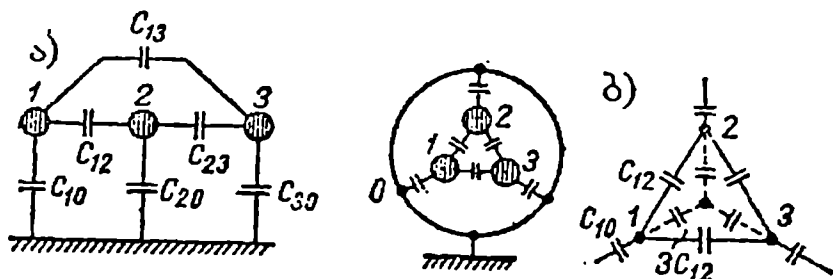
საპაერო ხაზის ნებისმიერი წყვილი სადენი და სადენი და მიწა შეგვიძლია განვიხილოთ როგორც კონდენსატორი შესაბამისი ტევადობით. ხაზის მუშა ტევადობა შედგება ფაზა-ფაზა და ფაზა-მიწა ტევადობებისგან (ნახ.3.10ა). საპაერო ხაზის მუშა ტევადობას ანგარიშობენ იმ დაშვებით, რომ ხაზზე განხორციელებულია სადენთა ტრანსპოზიციის სრული ციკლი. ამ შემთხვევაში $C_{12}=C_{13}=C_{23}=C$. ფაზის მუშა ტევადობა განისაზღვრება 3.10ბ ნახაზის მიხედვით.

$$C_1 = 3C + C_{1,0}$$

1 კმ ხაზის სიგრძის მუშა ტევადობა დამოკიდებულია სადენის რადიუსზე, სადენთა ურთოერთგანლაგების საშუალო გეომეტრიულ მანძილზე და განისაზღვრება ფორმულით [9; 45]

$$C_0 = \frac{0,02413}{\lg \frac{D_{\text{საშ}}}{r}} \cdot 10^{-6} \quad \text{ფ/კმ.} \quad (3.45)$$

ამ ფორმულაში უგულებელყოფილია გვარლისა და პარალელური ხაზის სადენების გავლენა, რაც ანგარიშებში იწვევს 5%-მდე ცდომილებას, რომელიც დასაშვებად მიიჩნევა.



ნახ. 3.10. ელექტროგადაცემის სამფაზა ხაზის ტევადობები:
ა-ტევადობების ჩართვის სქემა;
ბ-ერთი ფაზის ტევადობის საანგარიშო სქემა

გახლეჩილ სადენიანი ფაზის მუშა ტევადობა განისაზღვრება ფორმულით

$$C_0 = \frac{0,02413}{\lg \frac{D_{\text{საშ.}}}{r_{\text{კა}}}} \cdot 10^{-6} \text{ შ/კმ} . \quad (3.46)$$

ფაზის რეაქტიული ტევადური გამტარობა განისაზღვრება ფორმულით

$$b_0 = \omega C_0 = 2\omega f C_0 = \frac{7,58}{\lg \frac{D_{\text{საშ.}}}{r}} \cdot 10^{-6} \text{ სიმ/კმ} . \quad (3.47)$$

გახლეჩილი ფაზის შემთხვევაში r უნდა შეიცვალოს $r_{\text{კა}}$ -ით (3.12).

ხაზის ტევადურ გამტარობას გამოთვლიან ფორმულით

$$B = b_0 \ell \quad \text{სიმ}, \quad (3.48)$$

ℓ - ხაზის სიგრძე, კმ.

1 კმ ხაზის ტევადური გამტარობა ერთსადენიანი ფაზების შემთხვევაში იცვლება $(2,5-2,9) \cdot 10^{-6}$ ფარგლებში, ხოლო გახლეჩილი ფაზების შემთხვევაში იცვლება $3,4 \cdot 10^{-6}$ -დან (330კე) $4,4 \cdot 10^{-6}$ -მდე (1150კე) ფარგლებში.

35-500 კე ძაბვის ხაზებზე გამოყენებულ სადენთა საანგარიშო ელექტრული პარამეტრები მოცემულია დ-2 და დ-3 ცხრილებში

3.4 საკაბელო ხაზების ელექტრული პარამეტრები

საპაერო ხაზების მსგავსად, საკაბელო ხაზებს გააჩნიათ საანგარიშო ელექტრული პარამეტრები R , X , G და B . ამასთან R , X და B გამოითვლება როგორც საპაერო ხაზებისთვის, ხოლო აქტიური გამტარობა G – რომელიც განპირობებულია სიმძლავრის დანაკარგებით საკაბელო იზოლაციაში, გამოითვლება ცნობილი რეაქტიული გამტარობითა და დანაკარგების კუთხის ტანგენსით.

$$G = B \operatorname{tg} \delta,$$

სადაც დანაკარგების კუთხის ტანგენსი მოიცემა ქარხანა-დამამზადებლის მიერ და მოთავსებულია ფარგლებში

$$\operatorname{tg} \delta = 0,003 + 0,006.$$

საკაბელო ხაზებში ფაზებს შორის მანძილი გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე საჰაერო ხაზებში და, აქედან ამომდინარე, საკაბელო ხაზების რეაქტიული წინაღობა შედარებით მცირეა (ცხრ. დ4).

$$x_0 = (0,08-0,12) \text{ ომ/კმ}$$

10კვ-მდე (ჩათვლით) ძაბვის საკაბელო ქსელის რეჟიმების განგარიშებისას საკაბელო ხაზების რეაქტიული წინაღობები აქტიურთან შედარებით, მათი სიმცირის გამო, შეიძლება მხედველობაში არ მივიღოთ.

ფაზათა შორის საშუალო გეომეტრიული მანძილის სიმცირის გამო, საჰაერო ხაზებთან შედარებით საკაბელო ხაზების რეაქტიული გამგარობა რამდენჯერმე მეტია (ცხრ. დ4)

$$b_0 = (60 + 185) \cdot 10^{-6} \text{ სიმ/კმ.}$$

3.5 ხაზის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე

ხაზზე მოდებული ცეცხლი მუშა ძაბვის მოქმედებით მის გვედური გამგარობაში აღიძვრება ცეცხლი ელექტრული ველი და ადგილი აქვს ელექტრული მუხტების წანაცვლებას ანუ ხაზის ყოველ ერთეულოვან სიგრძეზე წარმოიშობა რეაქტიული გვედური დენი

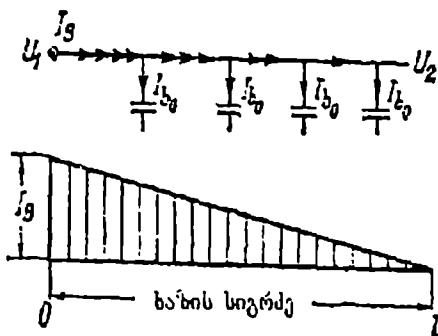
$$I_{co} = U_0 b_0 = \frac{U}{\sqrt{3}} b_0, \text{ ა/კმ}$$

აქ U - ხაზის ხაზური მუშა ძაბვა, ვ.

როგორც 3.11 ნახაზიდან ჩანს, როცა ხაზი ჩართულია ერთ ბოლოდან, მაშინ გვედური დენის სიდიდე იზრდება ხაზის ბოლოდან თავისკენ გადაადგილებასთან ერთად. ხაზის თავში გვედური დენი აღწევს თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას

$$I_c = I_{co} \cdot l = \frac{U}{\sqrt{3}} b_0 l = \frac{U}{\sqrt{3}} B \quad \text{ა.}$$

გვედური დენის სიდიდე ხაზის სიგრძისა და მუშა ძაბვის პირდაპირპროპორციულია. ამიტომ 35 კვ და უფრო დაბალი ძაბვის ხაზებისთვის ის ძალიან მცირეა და გაანგარიშებებში მას პრაქტიკულად არ ითვალისწინებენ, ხოლო 110 კვ და მეტი ძაბვის ხაზების შემთხვევაში კი გვედური დენები მნიშვნელოვნად დიდია და, ზოგჯერ, დაგვირთვის რეაქტიული ინდუქტიური დენის თანაზომადია. ამიტომ იგი გაანგარიშებებში გათვალისწინებული უნდა იქნეს.



ნახ. 3.11 ხაზის გასწვრივ ტევა ღური ღენის განაწილება

ცხრილი 3.7 ელექტროგადაცემის ხაზის გამტარობა და გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე

ნომინალური ძაბვა, კვ	ხაზის სიგრძე კმ	საღენის მარკა	ეკონომიკური დატვირთვა 1,1ა/მმ ² ღენის სიმკვრივისას ღროს, აკვ	ტევაღური გამტარობა $B \cdot 10^6$, სიმ	გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე, ΔQ_C , მგვარ	შარდობა $\frac{\Delta Q_C}{S_{\Sigma}} \cdot 100$, %
5	25	AC-70/11	4,7	67,5	0,83	1,6
110	70	AC-150/24	31,4	192	2,32	7,4
220	150	AC-300/39	125,6	396	19,2	15,3
330	250	2xAC-300/39	377,0	853	92,9	24,6
500	350	3xAC-400/51	1142,0	1267	316,8	27,7
750	500	5xAC-400/51	2855,0	2065	1162	40,7

ხაზში ტევაღური ღენის არსებობა განიხილება როგორც რეაქტიული ტევაღური დატვირთვა

$$\Delta Q_C = \sqrt{3} U I_C = U^2 B_0 \ell = U^2 B, \quad (3.49)$$

აქ ძაბვა აიღება კვებში.

ამ დატვირთვას აქვს ინდუქტიური დატვირთვის საწინააღმდეგო ნიშანი, ამიტომ ის განიხილება როგორც ხაზის მიერ გენერირებული ინდუქტიური რეაქტიული სიმძლავრე. 3.7 ცხრილში მოცემულია სხვადასხვა ძაბვის ხაზების მიერ გენერირებული რეაქტიული

სიმძლავრის მნიშვნელობები. ამ ცხრილიდან ჩანს, რომ 35 კვ და უფრო დაბალი ძაბვის ხაზების შემთხვევაში გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე პრაქტიკულად უმნიშვნელოა, ხოლო ძაბვის ზრდასთან ერთად იზრდება და 750 კვ ძაბვის შემთხვევაში აღწევს ეკონომიკური დატვირთვის თითქმის 40%-ს.

საკაბელო ხაზების რეაქტიული გამტარობა მნიშვნელოვნად მეტია, ვიდრე საჰაერო ხაზების და, შესაბამისად, დიდია გვეადური დენი და რეაქტიული სიმძლავრის გენერაცია. მაგალითად, 110 კვ ძაბვის 1 კმ სიგრძის საჰაერო ხაზის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე დაახლოებით 0,033 მგვარ-ს შეადგენს, მაშინ როცა იმავე ძაბვისა და სიგრძის საკაბელო ხაზის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე 1,2 მგვარ-ს აღწევს. აღნიშნულიდან გამომდინარე, ქსელის რეჟიმის გაანგარიშებისას მხედველობაში უნდა იქნეს მიღებული 10 კვ და მეტი ძაბვის საკაბელო ხაზების რეაქტიული გამტარობები.

3.6 ხაზის ნატურალური სიმძლავრე

მოცემული ნომინალური ძაბვის ხაზის გამტარუნარიანობა განისაზღვრება სამი პირობით: 1. გადაცემის ეკონომიკურობა, რომელიც დამოკიდებულია ხაზში ენერგიის დანაკარგების სიდიდეზე და შეფასდება ხაზის მარგი ქმედების კოეფიციენტის სიდიდის მიხედვით (ცხრ.1.2); 2. ძაბვის ღონე ელექტროგადაცემის ბოლოებში, რომელიც დამოკიდებულია ხაზში ძაბვის ვარდნის სიდიდეზე და შეფასდება ძაბვის დანაკარგის დასაშვები სიდიდის მიხედვით (ცხრ.1.2); 3. მკვეთრი ელექტროსაღგურების გენერატორების პარალელური მუშაობის მდგრადობა.

ზემოთქმულიდან გამომდინარეობს, რომ გადაცემის სიგრძის გაზრდით ხაზის გამტარუნარიანობა მცირდება, რაც გამოწვეულია ხაზის მუშაობის მ.ქ.კ. კოეფიციენტის შემცირებით, ძაბვის ზღვრული დანაკარგით, ან გადამცემი და მიმღები ბოლოების ძაბვის ვექტორებს შორის ძვრის კუთხის ზღვრული მნიშვნელობის გაზრდით.

ელექტროენერგიის მომხმარებლები აქტიური სიმძლავრის მოხმარებასთან ერთად მოიხმარენ რეაქტიულ სიმძლავრესაც, რომელიც შეიძლება ელექტროგადაცემის ხაზების საშუალებით გადაცემული იქნეს მკვეთრი ელექტროსაღგურების გენერატორებიდან, ან გენერირებული იქნეს ადგილზე სინქრონული კომპენსატორების ან კონდენსატორთა ბატარიების მიერ.

რეაქტიული სიმძლავრის გადაემა ზრდის ხაზის დატვირთვას და იწვევს როგორც ძაბვის, ასევე ენერგიის დანაკარგებს მასში. ამოცანა იმის შესახებ თუ რა რაოდენობის რეაქტიული სიმძლავრე გადაეცემა ელექტროგადაცემის ხაზით და რა რაოდენობის გამოვითქმემათ ადგილზე, ამოხსნილი უნდა იქნეს როგორც ხაზის მუშაობის ეკონომიკურობის, ასევე ძაბვის დასაშვები დანაკარგის გათვალისწინებით.

ელექტროგადაცემის ხაზში გამავალი რეაქტიული სიმძლავრის სიდიდებზე გაუღენას ახდენს ხაზის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე. როგორც (3.49) გამოსახულება გვიჩვენებს გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე პრაქტიკულად არ არის დამოკიდებული ხაზის დატვირთვაზე, მაშინ როცა ხაზის რეაქტიულ წინაღობაში რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგი დატვირთვის დენის კვადრატის პროპორციულია

$$\Delta Q_x = 3I^2 X = 3I^2 x_0 \cdot l.$$

გადასაცემი სიმძლავრის გარკვეულ მნიშვნელობისას შეიძლება აღმოჩნდეს, რომ რეაქტიულ წინაღობაში რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები კომპენსირდება ხაზის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრით

$$\Delta Q_x = \Delta Q_c$$

ანუ

$$3I^2 x_0 = 3U_{\phi}^2 \cdot b_0. \quad (3.50)$$

თუ ამ დროს ხაზით გადაეცემა მხოლოდ აქტიური სიმძლავრე ($\cos\varphi=1$)

$$P = 3U_{\phi} \cdot I, \quad (3.51)$$

მაშინ ხაზში იქნება აქტიური სიმძლავრის მინიმალური დანაკარგები. მუშაობის ამ რეჟიმში გადაეცემულ აქტიურ სიმძლავრეს ხაზის ნატურალურ სიმძლავრეს უწოდებენ $P=P_{\text{ნატ}}$.

(3.50)-დან განვსაზღვროთ დენი I და შევიტანოთ (3.51)-ში. ამასთან გავითვალისწინოთ, რომ $x_0 = \omega L_0$, $b_0 = \omega C_0$ და გვექნება

$$P_{\text{ნატ}} = \frac{3U_{\phi}^2}{\sqrt{L_0/C_0}} = \frac{U^2}{Z_c} \quad \text{მგვტ,} \quad (3.52)$$

აქ: U - ხაზური ძაბვა, კვ;

$$Z_c = \sqrt{x_0/b_0} = \sqrt{L_0/C_0} \quad \text{ომი,} \quad (3.53)$$

ხაზის ტალღური წინაღობა.

(3.35) და (3.45) გამოსახულებების გათვალისწინებით ფერადი ლითონებისგან დამზადებული სადენების მქონე ხაზებისთვის ვლებულობთ

$$Z_c = 45,81g \frac{D_{\text{საშვ}}}{r_{\text{შა}} \sqrt{9,05 + 1/n \lg \frac{D_{\text{საშვ}}}{r_{\text{შა}}}}}, \quad (3.54)$$

სხვადასხვა ნომინალური ძაბვის ზოგიერთი საპაერო ხაზის მახასიათებელი პარამეტრები მოცემულია 3.8 ცხრილში.

საკაბელო ხაზების ტალღური წინაღობა 3.5-4 ჯერ ნაკლებია, ვიდრე საპაერო ხაზებისა და ამიტომ მათი ნატურალური სიმძლავრე ამდენჯერე მეტია.

ელექტროგადაცემის ხაზით ნატურალურ სიმძლავრეზე მეტი სიმძლავრის გადაცემისას იზრდება ხაზში აქტიური სიმძლავრისა და ენერგიის დანაკარგები, მცირდება ძაბვის სიდიდე მიმღებ ქვესადგურზე. ეკონომიკური მოსაზრებებით მიჩნეულია, რომ 110-220 კვ მდე (ჩათვლით) და შედარებით მოკლე სიგრძის 330 კვ ძაბვის ხაზები მუშაობდეს ნატურალურ სიმძლავრეზე მეტი სიმძლავრის რეჟიმში, ხოლო უფრო მაღალი ძაბვის ხაზები კი ნატურალური სიმძლავრის რეჟიმში.

ცხრილი 3.8 ზოგიერთი საპაერო ხაზის მახასიათებელი პარამეტრები

ნომინალური ძაბვა, კვ	110	220	330	500	750
სადენების რაოდენობა ფაზაში	1	1	2	3	4
ფაზებს შორის საშუალო გეომეტრიული მანძილი, $D_{\text{საშვ}}$	5,0	8,0	11,0	14,0	19,5
სადენის მარკა	AC-70/11	AC-240/32	AC-300/39	AC-330/43	AC-400/93
სადენის რადიუსი r , სმ	0,57	1,08	1,2	1,26	1,46
გახლეჩილი ფაზის ეკვივალენტური რადიუსი, როცა $a=40$ სმ	-	-	6,93	12,63	19,04
1კმ ხაზის ელ.პარამეტრები:					
r_0 , ომი/კმ	0,457	0,133	0,053	0,032	0,020
x_0 , ომი/კმ	0,426	0,413	0,317	0,294	0,289
$g_0 \cdot 10^{-6}$ სიმ/კმ	-	-	0,031	0,023	0,024
$b_0 \cdot 10^{-6}$ სიმ/კმ	2,59	2,64	3,44	3,71	3,77
ტალღური წინაღობა, Z_c , ომი	413,0	403,0	307,0	284,3	278,7
ნატურალური სიმძლავრე $P_{\text{ნატ. მგვტ}}$	29,3	120,1	354,7	879,4	2018,3

3.7 ხაზის ჩანაცვლების სქემა

ხაზის ელექტრული პარამეტრები R , X , G და B თანაბრად განაწილებულია მთელ მის სიგრძეზე, რომლის ზუსტი გათვალისწინება შესაძლებელია მხოლოდ გრძელი ხაზების განტოლებების გამოყენების გზით (§5.2). 300 კმ-მდე სიგრძის ხაზებისთვის შეიძლება გამოყენებული იქნეს უფრო გამარტივებული მოდელი, რომლის თანახმად ხაზის პარამეტრები განიხილება როგორც შეყურსული პარამეტრები.

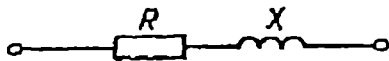
35 კმ-მდე (ჩათვლით) საპაერო ხაზები ხასიათდებიან გადაცემის მცირე სიგრძით. მათი დაბალი ნომინალური ძაბვისა და მცირე სიგრძის გამო განივი გამგარობის ღენი ძალიან მცირეა და იგი ხაზის მუშაობის რეჟიმის პარამეტრებზე პრაქტიკულად გავლენას ვერ ახდენს. ამიტომ ამ ძაბვის ხაზებში ანგარიშების დროს განივ პარამეტრებს (G, B) მხედველობაში არ ღებულობენ და ხაზის მათემატიკურ მოდელს (ჩანაცვლების სქემა) წარმოადგენენ მხოლოდ აქტიური (R) და რეაქტიული (X) წინაღობებით (ნახ. 3.12). ასეთი ჩანაცვლების სქემით შეგვიძლია ვისარგებლოთ 10 კმ-ზე უფრო დაბალი ძაბვის საკაბელო ხაზების შემთხვევაშიც.

110 კვ და მეტი ძაბვის ხაზების სიგრძე საკმარისად დიდია. მაღალი ნომინალური ძაბვისა და ხაზის დიდი სიგრძის გამო გამგარობის ღენი ხაზში დიდია, განსაკუთრებით 330 კვ და მეტი ძაბვის დროს. მათი გავლენა რეჟიმის პარამეტრებზე მნიშვნელოვანია. აღნიშნულის გამო მაღალი და ზემოდალი ძაბვის ხაზების მუშაობის რეჟიმის პარამეტრების ანგარიშების დროს G , B გამგარობების მხედველობაში მიღება აუცილებელია.

ზემოთქმულიდან გამომდინარე 300 კმ-მდე სიგრძის ხაზებისთვის საანგარიშო მათემატიკური მოდელი შეიძლება წარმოადგენელი იქნეს T-სებრი (ნახ.3.13) ან Π -სებრი (ნახ.3.14) ჩანაცვლების სქემის სახით, ხოლო უფრო გრძელი ხაზებისთვის კი აუცილებელია ვისარგებლოთ გრძელი ხაზის განტოლებებით (თავი 5).

T სქემის დროს ხაზის გამგარობა შეყურსული სახით ჩართულია სქემის შუაში, ხოლო Π სქემის დროს კი ნახევარ-ნახევარი თავსა და ბოლოში. უფრო მოხერხებულია და, შესაბამისად, ხაზებისთვის მიღებულია Π -სებრი ჩანაცვლების სქემა. იმ შემთხვევაში, როცა ხაზზე სადენთა განიკვეთები და ფაზის კონსტრუქცია შერჩეულია ისეთნაირად, რომ საერთო გვირგვინის მოვლენას ადგილი არ აქვს, მაშინ ხაზის აქტიური გამგარობა რეაქტიულ გამგარობასთან შედარებით მნიშვნელოვნად მცირეა $G \ll B$. ეს თანაფარ-

დობა საშუალებას გვაძლევს მივიღოთ $G=0$ და ხაზის ჩანაცვლების Π -სებრი სქემას ექნება 3.15 ნახაზზე ნაჩვენები სახე.

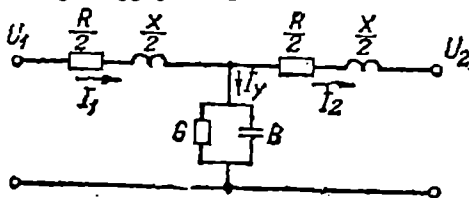


ნახ. 3.12. 35კე-ზე (ჩათვლით) ძაბვის ელექტროგადაცემის ხაზის ჩანაცვლების სქემა

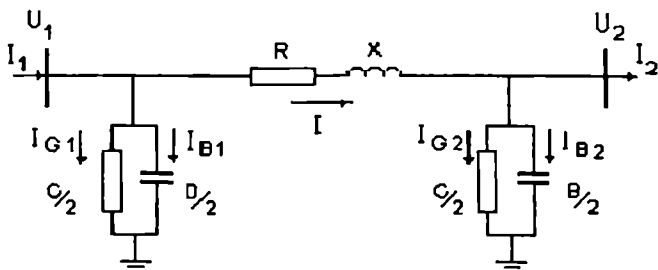
გამგარობის დენის სიდიდე დამოკიდებულია მუშა ძაბვის მნიშვნელობაზე, მაგრამ პრაქტიკული გაანგარიშების დროს სარგებლობენ ნომინალური ძაბვის მნიშვნელობით. ამ დამუშავების საფუძველზე ხაზის აქტიური გამგარობა შეგვიძლია შევსვალოთ გვირგვინზე სიმძლავრის დანაკარგებით, ხოლო რეაქტიული გამგარობა კი ხაზის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრით

$$\Delta P_{\Sigma} = U_{\Sigma}^2 G \quad \text{და} \quad \Delta Q_C = U_{\Sigma}^2 B.$$

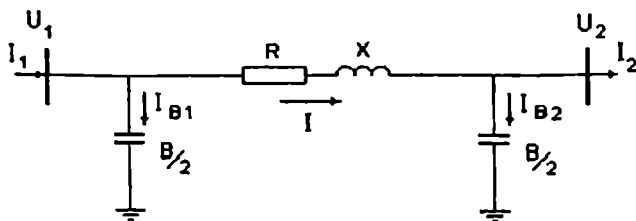
ასეთი გამარტივების შემდეგ Π -სებრი ჩანაცვლების სქემა მიიღება 3.16ა ნახაზზე ნაჩვენებ სახეს.



ნახ. 3.13. $\ell < 300$ კმ სიგრძის 110კე და მეტი ძაბვის ელექტროგადაცემის ხაზის ჩანაცვლების T-სებრი სქემა

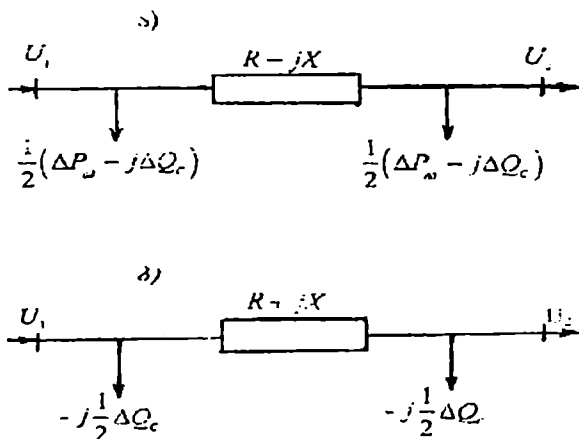


ნახ. 3.14 $\ell < 300$ კმ სიგრძის 110კე და მეტი ძაბვის ელექტროგადაცემის ხაზის ჩანაცვლების Π -სებრი სქემა



ნახ. 3.15 Π -სებრი ჩანაცვლების გამარტივებული სქემა, როცა $G=0$

თუ ტევადურ გამტარობას შევცვლით გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრით, მაშინ Π -სებრი ჩანაცვლების სქემა კიდევ უფრო გამარტივდება და მიიღებს 3.16b ნახაზზე ნაჩვენებ სახეს. აქ გამტარობის ღენი შეიცავს მხოლოდ ტევადურ რეაქტიულ შემადგენს, რომელსაც დაგვირთვის ღენის ინდუქტიური რეაქტიული შემადგენის საწინააღმდეგო ნიშანი აქვს.



ნახ. 3.16 ხაზის ჩანაცვლების სქემა : ა) $\Delta P_{გვ} \neq 0$, ბ) $\Delta P_{გვ} = 0$.

უნდა აღინიშნოს, რომ ჩანაცვლების სქემაზე R და X წინააღობებს ხაზის გრძივ პარამეტრებს უწოდებენ, ხოლო G და B გამტარობებს კი განივ პარამეტრებს.

ხაზის გრძივ და განივ პარამეტრებს ჩაწერენ კომპლექსურ სახეში:

გრძივი პარამეტრები (გრძივი წინალობა)

$$\underline{Z}=R+jX;$$

განივი პარამეტრები (განივი გამტარობა)

$$\underline{Y}=G+jB.$$

3.8 გრანსფორმატორებისა და ავტოგრანსფორმატორების ელექტრული პარამეტრები

3.8.1 გრანსფორმატორებისა და

ავტოგრანსფორმატორების საპასპორტო მონაცემები

გრანსფორმატორებისა და ავტოგრანსფორმატორების საპასპორტო მონაცემებს მიეკუთვნება ნომინალური სიმძლავრე S_n , გრაგნილთა ნომინალური ძაბვები $U_{გგ}$, $U_{სს}$, $U_{გა}$, აგრეთვე უქმი სელისა და მოკლე შერთვის დენის მონაცემები (უქმი სელის აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები $\Delta P_{უს}$, და უქმი სელის დენი $I_{უს}\%$, მოკლე შერთვის აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები $\Delta P_{გგ}$, და მოკლე შერთვის ძაბვა $U_{გგ}\%$) და ამ მონაცემების საფუძველზე განისაზღვრება გრანსფორმატორის ელექტრული პარამეტრები (გრანსფორმატორის განივი გამტარობა G , B და გრძივი წინალობა R , X).

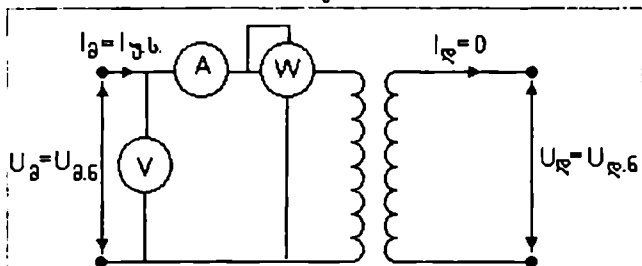
100 კვა და მეტი სიმძლავრის გრანსფორმატორებისთვის (ავტოგრანსფორმატორებისთვის) უქმი სელისა და მოკლე შერთვის მონაცემების განსაზღვრა წარმოებს გრანსფორმატორის ექსპლუატაციაში შეყვანამდე ქარხანა-დამამზადებლის მიერ და ექსპლუატაციისას კაპიტალური რემონტებისას და რემონტთაშორის შუალედებში.

უქმი სელის ცდისას მაღალი ძაბვის გრაგნილზე მოდებულია ნომინალური ძაბვა, ხოლო დაბალი ძაბვის გრაგნილი (და საშუალო ძაბვის გრაგნილი სამგრანსფორმატორიანი გრანსფორმატორებისა და ავტოგრანსფორმატორების შემთხვევაში) გახსნილია (ნახ.3.17).

სქემაში ჩართული A ამპერმეტრი გვიჩვენებს უქმი სელის დენის მნიშვნელობას $I_{უს}$, რომელსაც გამოსახავენ პროცენტობით გრანსფორმატორის საპასპორტო მონაცემს. უქმი სელის დენი ქმნის ფოლადის დამამაგნიტებელ სიმძლავრეს, რაც აუცილებელია მაგნი-

გური ნაკადის მისაღებად, რომლის გარეშე ტრანსფორმატორის მუშაობა შეუძლებელია.

$$I_{\text{კ.ს.}} \% = \frac{I_{\text{კ.ს.}}}{I_{\text{გ}}} \cdot 100 \quad (3.55)$$



ნახ. 3.17 ორგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის ერთი ფაზის უქმი სელის ცდის სქემა

უქმი სელის დენის საშუალებით შეგვიძლია განვსაზღვროთ უქმი სელისას ტრანსფორმატორში სრული სიმძლავრის დანაკარგები

$$\Delta S_{\text{კ.ს.}} = \sqrt{3} U_{\text{გ}} \cdot I_{\text{კ.ს.}}$$

ანუ (3.55)-ის გათვალისწინებით, გვაქვს

$$\Delta S_{\text{კ.ს.}} = S_{\text{გ}} \cdot I_{\text{კ.ს.}} \% \cdot 10^{-2} \quad (3.56)$$

$\Delta S_{\text{კ.ს.}}$ შეიძლება როგორც აქტიური, ასევე რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგებს

$$\Delta S_{\text{კ.ს.}} = \sqrt{\Delta P_{\text{კ.ს.}}^2 + \Delta Q_{\text{კ.ს.}}^2}$$

ტრანსფორმატორში უქმი სელის აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები $\Delta P_{\text{კ.ს.}}$, რომელიც ტრანსფორმატორის საპასპორტო მონაცემებს წარმოადგენს, გაიზომება სქემაში ჩართული W ვატმეტრის საშუალებით და, შესაბამისად, უქმი სელის რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები იქნება

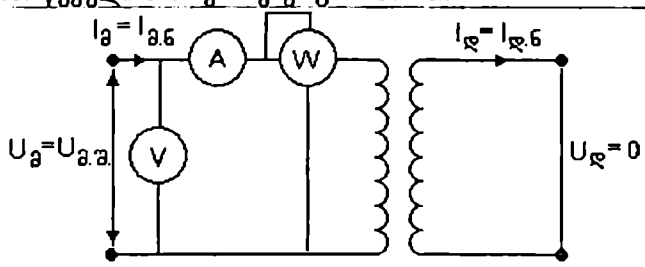
$$\Delta Q_{\text{კ.ს.}} = \sqrt{\Delta S_{\text{კ.ს.}}^2 - \Delta P_{\text{კ.ს.}}^2} \quad (3.57)$$

1 მგვა და მეტი სიმძლავრის ტრანსფორმატორებისთვის სახასიათოა უტოლობა $\Delta P_{\text{კ.ს.}} \ll \Delta S_{\text{კ.ს.}}$. და, შესაბამისად, 3.56-ის გათვალისწინებით შეგვიძლია ვწეროთ

$$\Delta Q_{\text{კ.ს.}} = S_{\text{გ}} \cdot I_{\text{კ.ს.}} \% \cdot 10^{-2} \quad (3.58)$$

უქმი სელის დენის მნიშვნელობა ნომინალური დენის მნიშვნელობის რამდენიმე ერთეულ პროცენტს შეადგენს. ამიტომ უქმი

სელის რეჟიმში ტრანსფორმატორის გრაგნილში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები უმნიშვნელოა და არ აღემატება რამდენიმე ათეულ ვატს. სქემაში ჩართული ვატმეტრის ჩვენების მიხედვით კი ტრანსფორმატორის უქში სელისას აქტიური სიმძლავრის ხარჯი (უქში სელის აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები) აღწევს რამდენიმე ათეულ თუ ასეულ კილოვატს. ეს მიუთითებს მასზე, რომ უქში სელის აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები, პრაქტიკულად, მთლიანად იხარჯება ტრანსფორმატორის ფოლადის გახურებაზე. კერძოდ, ტრანსფორმატორის დამაგნიტება-გადამაგნიტებაზე (პისტერეზისის მოვლენა) დახარჯული ენერგიისა და გრიგალური (ფუკოს) დენებით გამოწვეული სითბური ენერგიის სახით.



ნახ. 3.18 ორგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის ერთი ფაზის მოკლე შერთვის ცდის სქემა

მოკლე შერთვის ცდისას ორგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის დაბალი ძაბვის გრაგნილი მოკლედ შერთულია, ხოლო მაღალი ძაბვის გრაგნილზე მოდებულია იმ სიდიდის ძაბვა, რომელიც საკმარისია ორივე ამ გრაგნილში ნომინალური დენის შესაქმნელად (ნახ.3.18). ძაბვის ამ მნიშვნელობას, რომელიც სქემაში ჩართული V ვოლტმეტრით გაიზომება, ტრანსფორმატორის მოკლე შერთვის ძაბვას უწოდებენ $U_{g.2}$. მას გამოსახავენ პროცენტობით ტრანსფორმატორის ნომინალური ძაბვის მიმართ

$$U_{g.2} \% = \frac{U_{g.2}}{U_g} \cdot 100 \quad (3.59)$$

და იგი ტრანსფორმატორის საპასპორტო მონაცემს წარმოადგენს.

მოკლე შერთვის ძაბვის საშუალებით შეგვიძლია განვსაზღვროთ მოკლე შერთვისას ტრანსფორმატორში სრული სიმძლავრის დანაკარგები

$$\Delta S_{g.2} = \sqrt{3} U_{g.2} \cdot I_g$$

ანუ (3.59)-ის გათვალისწინებით, გვაქვს

$$\Delta S_{აა} = S_{\epsilon} \cdot U_{აა} \% \cdot 10^{-2}. \quad (3.60)$$

მოკლე შერთვის ცდისას გრანსფორმატორში აქტიური სიმძლავრის ხარჯი (მოკლე შერთვის დანაკარგები $\Delta P_{აა}$), რომელიც გრანსფორმატორის საპასპორტო მონაცემს წარმოადგენს, გაიზომება სქემაში ჩართული W ვატმეტრის საშუალებით და, შესაბამისად, მოკლე შერთვისას გრანსფორმატორში რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები

$$\Delta Q_{აა} = \sqrt{\Delta S_{აა}^2 - \Delta P_{აა}^2}. \quad (3.61)$$

მბლავრი (1 მგვა და მეტი) გრანსფორმატორებისთვის სახასიათოა უტოლობა $\Delta P_{აა} \ll \Delta S_{აა}$ და შეგვიძლია ვწეროთ

$$\Delta Q_{აა} = S_{\epsilon} \cdot U_{აა} \% \cdot 10^{-2}. \quad (3.62)$$

მოკლე შერთვის ძაბვის მნიშვნელობა გრანსფორმატორის ნომინალური ძაბვის (8-12)%-ს შეადგენს. აქედან გამომდინარე მოკლე შერთვისას გრანსფორმატორის ფოლადში სიმძლავრის დანაკარგები უმნიშვნელოა და რამდენიმე ათეულ ან ასეულ ვატს (ვარს) აღწევს. ცდისეულ სქემაში ჩართული ვატმეტრის ჩვენება კი რამდენიმე ასეულ კილოვატს შეადგენს. ეს მიუთითებს მასზე, რომ მოკლე შერთვის აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები მთლიანად იხარჯება გრანსფორმატორის გრაგნილის გახურებაზე, ხოლო მოკლე შერთვის რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები კი მთლიანად იხარჯება ფანგვის მაგნიტური ნაკადის შექმნაზე.

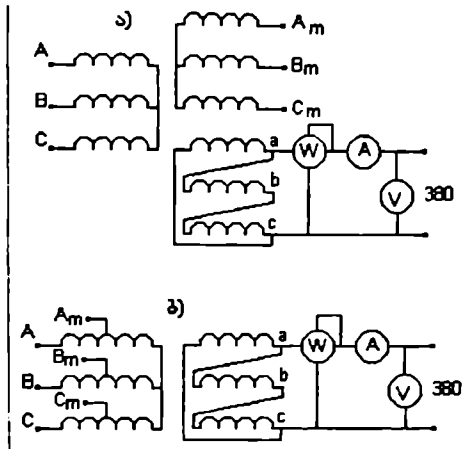
სამგრაგნილიანი გრანსფორმატორებისთვის და ავტოტრანსფორმატორებისთვის უქმი სელის დენის და უქმი სელის სიმძლავრის დანაკარგები ფოლადში გაიზომება იმავე პრინციპით, რაც ორგრაგნილიანი გრანსფორმატორის შემთხვევაში. ამასთან ცდის ჩატარებისას დაბალი და საშუალო ძაბვის გრაგნილები გახსნილია (ნახ. 3.19 და 3.20).

სამგრაგნილიანი გრანსფორმატორებისთვის და ავტოტრანსფორმატორებისთვის მოკლე შერთვის ცდა ტარდება ყოველი წყვილი გრაგნილისთვის ცალ-ცალკე, რომლის დროსაც გაიზომება შემდეგი სიდიდეები:

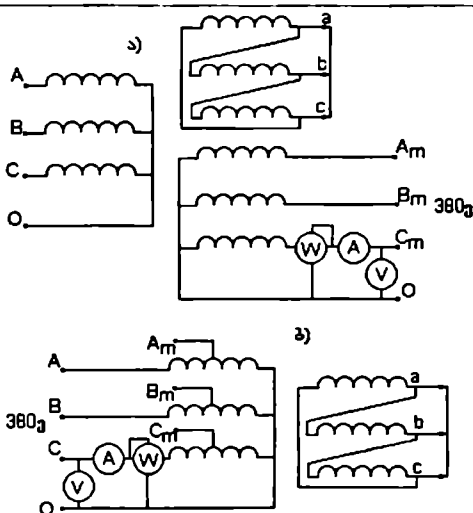
$\Delta P_{აა(მს)}$ და $U_{აა(მს)}\%$ - მოკლე შერთვის ცდა მაღალი და საშუალო ძაბვების გრაგნილთა მიმართ (მ-ს);

$\Delta P_{აა(მდ)}$ და $U_{აა(მდ)}\%$ - მოკლე შერთვის ცდა მაღალი და დაბალი ძაბვის გრაგნილთა მიმართ (მ-დ);

$\Delta P_{აა(სდ)}$ და $U_{აა(სდ)}\%$ - მოკლე შერთვის ცდა საშუალო და დაბალი ძაბვის გრაგნილთა მიმართ (ს-დ).



ნახ. 3.19 უქმი სელის ცდის სქემები სამგრანგილიანი ტრანსფორმატორებისა და ავტოტრანსფორმატორების შემთხვევაში



ნახ. 3.20 მოკლე შერთვის ცდის სქემები ავტოტრანსფორმატორების შემთხვევაში

აღრე გამოშვებული სამგრანგილიანი ტრანსფორმატორებისთვის, რომელთაც გრანგილთა სხედასხვა ნომინალური სიმძლავრე ($S_{გრ.ფ.}$) გააჩნიათ (100/100/100%, 100/100/66,7% ან 100/66,7/66,7). მოკ-

ლე შერთვის ცდის საპასპორტო მონაცემები მიყვანილი უნდა იქნეს გრანსფორმატორის ნომინალურ სიმძლავრეზე ($S_{გრ.ნ}$). მოკლე შერთვის ძაბვის მიყვანა წარმოებს ($S_{გრ.წ}/S_{გრ.ნ}$) ფარდობის პროპორციულად, ხოლო მოკლე შერთვის სიმძლავრის მიყვანა კი ამ ფარდობის კვადრატის პროპორციულად.

ავტოგრანსფორმატორებისთვის $\Delta P_{გ.გ(გ-ს)}$ და $U_{გ.გ(გ-ს)}\%$ მიყვანილია ავტოგრანსფორმატორის ნომინალურ სიმძლავრეზე, ხოლო $\Delta P_{გ.გ(გ-ლ)}$, $\Delta P_{გ.გ(ლ-ლ)}$, $U_{გ.გ(გ-ლ)}\%$ და $U_{გ.გ(ლ-ლ)}\%$ კი მიყვანილია ავტოგრანსფორმატორის დაბალი ძაბვის გრაგნილის ნომინალურ სიმძლავრეზე.

საპასპორტო პარამეტრების ჩაწერის აღნიშნული თავისებურება გამოწვეულია მოკლე შერთვის ცდის ჩატარების პირობებით. კერძოდ, მ-დ მოკლე შერთვისას მაღალი ძაბვის გრაგნილზე მოდებული ძაბვა აიღება ისეთი მნიშვნელობის, რომლის დროსაც მოკლედ შერთული დაბალი ძაბვის გრაგნილში გამავალი დენი შეესაბამება ამავე გრაგნილის ნომინალურ სიმძლავრეს და არა გრანსფორმატორის (ავტოგრანსფორმატორის) ნომინალურ სიმძლავრეს.

მოკლე შერთვის ცდის ჩატარების სქემიდან გამომდინარე, გვაქვს:

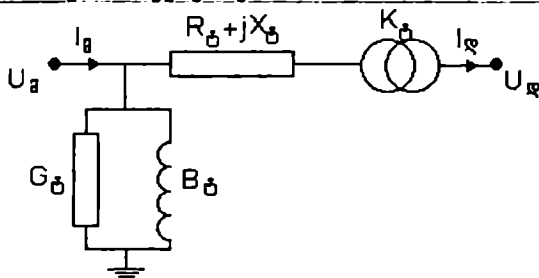
$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{გ.გ(გ-ს)} &= \Delta P_{გ.გ(გ)} + \Delta P_{გ.გ(ს)} \\ \Delta P_{გ.გ(გ-ლ)} &= \Delta P_{გ.გ(გ)} + \Delta P_{გ.გ(ლ)} \\ \Delta P_{გ.გ(ს-ლ)} &= \Delta P_{გ.გ(ს)} + \Delta P_{გ.გ(ლ)} \end{aligned} \right\} \quad (3.63)$$

$$\left. \begin{aligned} U_{გ.გ(გ-ს)}\% &= U_{გ.გ(გ)}\% + U_{გ.გ(ს)}\% \\ U_{გ.გ(გ-ლ)}\% &= U_{გ.გ(გ)}\% + U_{გ.გ(ლ)}\% \\ U_{გ.გ(ს-ლ)}\% &= U_{გ.გ(ს)}\% + U_{გ.გ(ლ)}\% \end{aligned} \right\} \quad (3.64)$$

სადაც $\Delta P_{გ.გ(ი)}$ და $U_{გ.გ(ი)}\%$ - i-ური გრაგნილის მოკლე შერთვის ძაბვა და სიმძლავრე მიყვანილი გრანსფორმატორის ნომინალურ სიმძლავრეზე.

3.8.2 ორგრაგნილიანი ტრანსფორმატორების ჩანაცვლების სქემა და ელექტრული პარამეტრები

ორგრაგნილიანი ტრანსფორმატორების საანგარიშო მათემატიკური მოდელი შეიძლება წარმოადგინოთ Γ -სებრი ჩანაცვლების სქემის სახით (ნახ. 3.21), რომლის გრძივი ნაწილი შეიცავს აქტიურ R_{Σ} და რეაქტიულ X_{Σ} წინაღობებს, ხოლო განივი ნაწილი კი აქტიურ G_{Σ} და რეაქტიულ B_{Σ} გამგარობებს, მიყვანილს მაღალი ნომინალური ძაბვის საფეხურზე.



ნახ. 3.21 ორგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის ჩანაცვლების საანგარიშო სქემა

ტრანსფორმატორის განივი გამგარობები შეგვიძლია განვსაზღვროთ უქმი სელისას ტრანსფორმატორში აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგებით.

$$G_{\Sigma} = \Delta P_{\Sigma} / U_{\Sigma}^2 \quad \text{და} \quad B_{\Sigma} = \Delta Q_{\Sigma} / U_{\Sigma}^2$$

თუ სიმძლავრის დანაკარგებსა და ძაბვას ჩავსვამთ კილოვრთეულებში, მივიღებთ

$$G_{\Sigma} = \frac{\Delta P_{\Sigma}}{U_{\Sigma}^2} \cdot 10^{-3} \text{ სიმ} \quad (3.65)$$

და

$$B_{\Sigma} = \frac{\Delta Q_{\Sigma}}{U_{\Sigma}^2} \cdot 10^{-3} \text{ სიმ}, \quad (3.66)$$

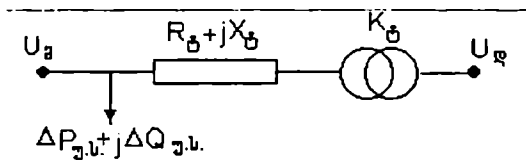
სადაც ΔP_{Σ} აიღება ტრანსფორმატორის საპასპორტო მონაცემიდან, ხოლო ΔQ_{Σ} განისაზღვრება (3.57) ან (3.58) გამოსახულებების მიხედვით.

მძლავრი გრანსფორმატორების შემთხვევაში, (3.58) გამოსახულების თანახმად, რეაქტიული გამტარობის საანგარიშო გამოსახულება მიიღებს სახეს

$$B_{\delta} = \frac{I_{\text{კლ.}} \% \cdot S_{\text{გ}}}{U_{\text{გ}}^2} \cdot 10^{-5} \quad \text{სიმ/კმ} \quad (3.67)$$

სადაც $I_{\text{კლ.}} \%$ აიღება გრანსფორმატორის საპასპორტო მონაცემებიდან.

გრანსფორმატორის ფოლადში სიმძლავრის დანაკარგები არ არის დამოკიდებული დატვირთვის დენზე (სიმძლავრეზე). იგი ძირითადად განისაზღვრება მუშა ძაბვის მნიშვნელობით და განიხილება როგორც მუდმივი სიდიდე. აქედან გამომდინარე, ორგრაგნილიანი გრანსფორმატორების ჩანაცვლების საანგარიშო სქემა შეიძლება გაეპარტივოს, სადაც განივი გამტარობის ნაცულად უუჩვენებთ სიმძლავრის დანაკარგებს გრანსფორმატორის ფოლადში (ნახ.3.22).



ნახ. 3.22 ორგრაგნილიანი გრანსფორმატორის ჩანაცვლების გამარტივებული საანგარიშო სქემა

გრანსფორმატორის აქტიური წინაღობა, რომელიც წარმოადგენს მაღალი ძაბვის გრაგნილისა და მაღალი ძაბვის საფეხურზე მიყვანილი დაბალი ძაბვის გრაგნილის წინაღობათა ჯამს, განისაზღვრება გრანსფორმატორის მოკლ შერთვის სიმძლავრის მიხედვით

$$\Delta P_{\text{გ.ა}} = 3I_{\text{გ}}^2 R_{\delta} = \frac{S_{\text{გ}}^2}{U_{\text{გ}}^2} R_{\delta},$$

აქედან

$$R_{\delta} = \frac{\Delta P_{\text{გ.ა}} \cdot U_{\text{გ}}^2}{S_{\text{გ}}^2}.$$

თუ ამ გამოსახულებაში შემავალ სიდიდეებს ჩავსვამთ კილოერთეულებში (კვტ, კვ, კვა), მაშინ გვაქვს

$$R_{\delta} = \frac{\Delta P_{\text{გ.ა}} \cdot U_{\text{გ}}^2}{S_{\text{გ}}^2} \cdot 10^3 \quad \text{ომი}, \quad (3.68)$$

სადაც ΔP_{aa} აიღება გრანსფორმატორის საპასპორტო მონაცემებიდან.

ანალოგიურად განისაზღვრება გრანსფორმატორის რეაქტიული წინაღობა

$$X_{\delta} = \frac{\Delta Q_{aa} \cdot U_{\delta}^2}{S_{\delta}^2} \cdot 10^3 \quad \text{ომი}, \quad (3.69)$$

სადაც ΔQ_{aa} დადგინდება (3.61) ან (3.62) გამოსახულებების მიხედვით.

მძლავრი გრანსფორმატორების შემთხვევაში, (3.62) გამოსახულების თანახმად, გრანსფორმატორის რეაქტიული წინააღობის საანგარიშო გამოსახულება მიიღებს შემდეგ სახეს

$$X_{\delta} = \frac{U_{aa} \% \cdot U_{\delta}^2 \cdot 10}{S_{\delta}}, \quad (3.70)$$

სადაც $U_{aa} \%$ აიღება გრანსფორმატორის საპასპორტო მონაცემებიდან.

ორგრაგნილიანი გრანსფორმატორების საპასპორტო მონაცემები და ელექტრული პარამეტრები მოცემულია დ-5.1 და დ-5.2 ცხრილებში.

3.8.3. სამგრაგნილიანი გრანსფორმატორების და ავტოგრანსფორმატორების ჩანაცვლების სქემა და ელექტრული პარამეტრები

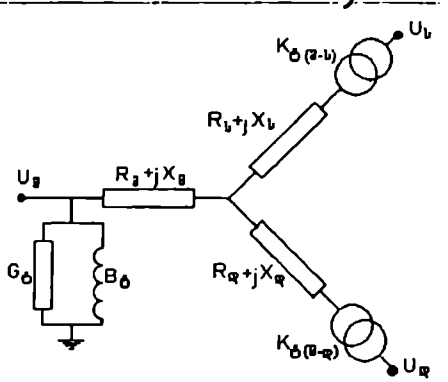
სამგრაგნილიანი გრანსფორმატორების და ავტოგრანსფორმატორების საანგარიშო მათემატიკურ მოდელს წარმოადგენენ სამსხივიანი Γ -სებრი ჩანაცვლების სქემის სახით (ნახ. 3.23), სადაც ნაჩვენებია განივი გამტარობები და ცალკეული გრაგნილის (სხივის) აქტიური და რეაქტიული წინააღობები, მიყვანილი მაღალი ძაბვის საფეხურზე.

განივი გამტარობანი (G_{δ} , B_{δ}) განისაზღვრება იმავე გამოსახულებებით, როგორც ორგრაგნილიანი გრანსფორმატორების შემთხვევაში. სხივების (გრაგნილების) აქტიური წინააღობების დასადგენად ჯერ (3.63) გამოსახულებიდან განესაზღვროთ მოკლე შერთვის დანაკარგების ცალკეული გრაგნილისთვის:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{\text{გაგ(გ)}} &= \frac{1}{2} (\Delta P_{\text{გაგ(გ-ს)}} + \Delta P_{\text{გაგ(გ-ღ)}} - \Delta P_{\text{გაგ(ს-ღ)}); \\ \Delta P_{\text{გაგ(ს)}} &= \frac{1}{2} (\Delta P_{\text{გაგ(გ-ს)}} + \Delta P_{\text{გაგ(ს-ღ)}} - \Delta P_{\text{გაგ(გ-ღ)}); \\ \Delta P_{\text{გაგ(ღ)}} &= \frac{1}{2} (\Delta P_{\text{გაგ(გ-ღ)}} + \Delta P_{\text{გაგ(ს-ღ)}} - \Delta P_{\text{გაგ(გ-ს)}). \end{aligned} \right\} \quad (3.71)$$

და შემდეგ (3.68) გამოსახულების შესაბამისად, ეპოულობთ:

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{გ,გ}} &= \frac{\Delta P_{\text{გაგ(გ)}} \cdot U_{\text{გ}}^2}{S_{\text{გ}}^2} \cdot 10^3 \\ R_{\text{გ,ს}} &= \frac{\Delta P_{\text{გაგ(ს)}} \cdot U_{\text{გ}}^2}{S_{\text{გ}}^2} \cdot 10^3 \\ R_{\text{გ,ღ}} &= \frac{\Delta P_{\text{გაგ(ღ)}} \cdot U_{\text{გ}}^2}{S_{\text{გ}}^2} \cdot 10^3 \end{aligned} \right\} \quad (3.72)$$



ნახ. 3.23 სამგრანგილიანი გრანსფორმატორის (ავტოგრანს-ფორმატორის) ჩანაცვლების სქემა.

სამგრანგილიანი გრანსფორმატორებისთვის ქარხანა-დამამზადებელი ხშირად იძლევა მოკლე შერთვის სიმძლავრის მხოლოდ ერთ მნიშვნელობას, რომელიც შეესაბამება მოკლე შერთვის ცდის ყველაზე უფრო მძიმე რეჟიმს ანუ, როცა მოკლე შერთვის სიმძლავრე მაქსიმალურია. ამ შემთხვევაში გრანგილთა აქტიური წინაღობების დასადგენად უნდა ვისარგებლოთ იმ პირობით, რომ გრანგილთა აქტიური წინაღობები ამ გრანგილების ნომინალურ სიმძლავრეთა უკუპროპორციულია. კერძოდ, როცა გრანგილთა ნომინალური

სიმძლავრეები ერთნაირია (100/100/100) მაშინ ჩანაცვლების სქემის სხივების (გრაგნილების) აქტიური წინაღობები, მიყვანილი მაღალი ძაბვის საფეხურზე, ერთნაირია

$$R_{\delta(თ)} = R_{\delta(ს)} = R_{\delta(ლ)} = R_{\delta}, \quad (3.73)$$

ხოლო როცა გრაგნილთა ნომინალური სიმძლავრე სხვადასხვაა (100/100/66,7 ან 100/66,7/66,7), მაშინ მათი აქტიური წინაღობები შემდეგ თანაფრდობაშია

$$\frac{R_{66,7}}{R_{100}} = \frac{100}{66,7} = 1,5 \quad (3.74)$$

თანამედროვე სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორების გრაგნილთა ნომინალური სიმძლავრეები ერთნაირია და ამიტომ (3.63) გამოსახულების თანახმად

$$\Delta P_{aa(2-ს)} = 3I_{\Sigma}^2 (R_{\delta(თ)} + R_{\delta(ს)}) = \frac{S_{\Sigma}^2}{U_{\Sigma}^2} \cdot 2R_{\delta} \cdot 10^{-3} \text{ კვტ.}$$

აქედან

$$R_{\delta(თ)} = R_{\delta(ს)} = R_{\delta(ლ)} = \frac{\Delta P_{aa} \cdot U_{\Sigma}^2}{2S_{\Sigma}^2} \cdot 10^3 \text{ ომი.} \quad (3.75)$$

იმ შემთხვევაში, როცა გრაგნილთა ნომინალური სიმძლავრეებია 100/100/66,7, მაშინ

$$R_{\delta(თ)} = R_{\delta(ს)} = \frac{\Delta P_{aa} \cdot U_{\Sigma}^2}{2S_{\Sigma}^2} \cdot 10^3 \quad (3.76)$$

და (3.74) გამოსახულების თანახმად

$$R_{\delta(ლ)} = 1,5R_{\delta(თ)} \quad (3.77)$$

თუ გრაგნილთა ნომინალური სიმძლავრეებია 100/66,7/66,7, მაშინ

$$\left. \begin{aligned} R_{\delta(თ)} &= \frac{\Delta P_{aa} \cdot U_{\Sigma}^2}{1,83S_{\Sigma}^2} \cdot 10^3 \text{ ომი} \\ R_{\delta(ს)} &= R_{\delta(ლ)} = 1,5R_{\delta(თ)}. \end{aligned} \right\} \quad (3.78)$$

ავტოტრანსფორმატორების მაღალი და საშუალო ძაბვის გრაგნილები ერთნაირი სიმძლავრისაა და ავტოტრანსფორმატორის ნომინალური სიმძლავრის ტოლია, ხოლო დაბალი ძაბვის გრაგნილის ნომინალური სიმძლავრე ავტოტრანსფორმატორის გიპიური სიმძლავრის ტოლია ან მასზე ნაკლებია.

როცა ავტოგრანსფორმატორის მოკლე შერთვის სიმძლავრე მოცემულია ყოველი წყვილი გრაგნილისთვის და ეს სიდიდეები მიყვანილია ავტოგრანსფორმატორის ნომინალურ სიმძლავრეზე, მაშინ გრაგნილთა აქტიური წინაღობების განსაზღვრისას ვისარგებლებთ (3.71) და (3.72) გამოსახულებებით. თუ მოკლე შერთვის სიმძლავრე მოცემულია ერთი სიდიდით ($\Delta P_{\text{გაგ(გ-ს)}}$) მაშინ (3.76) გამოსახულები შესაბამისად

$$R_{\text{გ(გ)}} = R_{\text{გ(ს)}} = \frac{\Delta P_{\text{გაგ(გ-ს)}} \cdot U_{\text{გ}}^2}{2S_{\text{გ}}^2} \cdot 10^3 \quad \text{ომი} \quad (3.79)$$

და (3.74)-ის შესაბამისად

$$R_{\text{გ(ლ)}} = R_{\text{გ(გ)}} \cdot \frac{S_{\text{გრაგ}}}{S_{\text{ლაგ}}} \quad (3.80)$$

სამგრაგნილიანი გრანსფორმატორებისა და ავტოგრანსფორმატორების გრაგნილთა რეაქტიულ წინაღობათა დასადგენად ჯერ (3.64) გამოსახულებათა საფუძველზე განესაზღვრაეთ ცალკეული გრაგნილის მოკლე შერთვის ძაბვებს:

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{გაგ(გ)}} \% &= \frac{1}{2} (U_{\text{გაგ(გ-ს)}} \% + U_{\text{გაგ(გ-ლ)}} \% - U_{\text{გაგ(ს-ლ)}} \%); \\ U_{\text{გაგ(ს)}} \% &= \frac{1}{2} (U_{\text{გაგ(გ-ს)}} \% + U_{\text{გაგ(ს-ლ)}} \% - U_{\text{გაგ(გ-ლ)}} \%); \\ U_{\text{გაგ(ლ)}} \% &= \frac{1}{2} (U_{\text{გაგ(გ-ლ)}} \% + U_{\text{გაგ(ს-ლ)}} \% - U_{\text{გაგ(გ-ს)}} \%). \end{aligned} \right\} \quad (3.81)$$

რომლის შემდეგ (3.70) გამოსახულების შესაბამისად გვაქვს

$$\left. \begin{aligned} X_{\text{გ(გ)}} &= \frac{U_{\text{გაგ(გ)}} \% \cdot U_{\text{გ}}^2}{S_{\text{გ}}} \cdot 10; \\ X_{\text{გ(ს)}} &= \frac{U_{\text{გაგ(ს)}} \% \cdot U_{\text{გ}}^2}{S_{\text{გ}}} \cdot 10; \\ X_{\text{გ(ლ)}} &= \frac{U_{\text{გაგ(ლ)}} \% \cdot U_{\text{გ}}^2}{S_{\text{გ}}} \cdot 10. \end{aligned} \right\} \quad (3.82)$$

ერთერთი სხივის (გრაგნილის) რეაქტიული წინაღობა მიიღება ნულთან ახლო მნიშვნელობის და მას ნულის გოლად მიიჩნევენ.

სამგრაგნილიანი გრანსფორმატორებისა და ავტოგრანსფორმატორების ჩანაცვლების გამარტივებულ საანგარიშო სქემას წარ-

მოადგენენ 322 ნახაზზე ნაჩვენები სქემის ანალოგიურად, სადაც განივი გამტარობები შეცვლილი იქნება უქმი სვლის დანაკარგებით.

სამგრაგნილიანი გრანსფორმატორებისა და ავტოგრანსფორმატორების საპასპორტო მონაცემები და ელექტრული პარამეტრები მოცემულია დ-6.1 და დ-6.2 ცხრილებში.

3.9 სადენებისა და კაბელების თბური მახასიათებლები

სადენებსა და კაბელებში გამავალი დენი იწვევს მათში სითბოს გამოყოფას, რაც ამავე სადენებში (კაბელებში) დაკარგული აქტიური ენერგიის ეკვივალენტურია. ხანგრძლივად გამავალი დენისას სადენის დამყარებული ტემპერატურა შეიძლება დადგენილი იქნეს თბური ბალანსის საფუძველზე

$$I^2 R = K S (\theta_{\text{სად}} - \theta_{\text{გარ}}), \quad (3.83)$$

სადაც: I - დატვირთვის დენი, ა; R - 1 მეტრი სიგრძის სადენის წინააღობა, ომი; S - ამავე სადენის ცილინდრული ზედაპირის ფართობი (გაცივების ზედაპირი, მ²); $\theta_{\text{სად}}$ - სადენის ტემპერატურა, °C; $\theta_{\text{გარ}}$ - გარემოს ტემპერატურა, °C; K - თბოგაცემის კოეფიციენტი, რომელიც რიცხობრივად სადენის 1 მ² ზედაპირის ფართობიდან 1 წამში გაცემული სითბოს (ვტ) ტოლია ვტ/წმ.მ² და მისი რიცხვითი მნიშვნელობა დამოკიდებულია სადენის განიკეთზე. კერძოდ, AC-70 მარკის სადენისთვის $K=15,38 \cdot 10^{-3}$ და AC-700 სადენისთვის $K=9,51 \cdot 10^{-3}$.

როგორც არაიზოლირებული სადენებისთვის, ასევე კაბელებისთვის დადგენილია მაქსიმალური დასაშვები ტემპერატურა, რომელიც ითვალისწინებს მათი თბური მდგრადობის პირობებს. ტემპერატურის ამაღლებით სადენების შეერთების ადგილებში (შემავრთებლებში) იწყება დაჟანგვის პროცესის გააქტიურება და შედეგად იზრდება შეერთების ელექტრული წინააღობა, რაც კიდევ უფრო ზრდის გამოყოფილი სითბოს რაოდენობას. შეერთების ადგილის გადახურებამ შეიძლება გამოიწვიოს სადენის მექანიკური სიმტკიცის დარღვევა. აღნიშნულის გამო მიღებულია, რომ მუშაობისას სადენის ტემპერატურამ არ გადააჭარბოს +70°C-ს. სწორედ ეს ტემპერატურაა მიღებული გახურების დასაშვებ ტემპერატურად არაიზოლირებული სადენებისთვის (საპაერო ხაზებისთვის). იზოლირებული სადენებისთვის იზოლაციის შენარჩუნების პირობიდან გამომდინარე, გახურების დასაშვებ ტემპერატურად მიღებულია +65°C.

სხვადასხვა ძაბვის კაბელებისთვის გახურების დასაშვები ტემპერატურა სხვადასხვაა და იცვლება (80-50)°C ფარგლებში (ცხრ.3.9).

გახურების დასაშვები ტემპერატურის მიხედვით შეიძლება განვსაზღვროთ არაიზოლირებული სადენებისთვის და კაბელებისთვის ზღერული დასაშვები ღენის მნიშვნელობა. (3.83) გამოსახულებიდან გვაქვს

$$I_{\text{ღას}} = \sqrt{\frac{KS(\theta_{\text{ღას}} - \theta_{\text{გარ}})}{R}}. \quad (3.84)$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ ერთეულოვანი სიგრძის არაიზოლირებული ერთმავთულიანი სადენის ზედაპირის ფართობი

$S=2\pi r_{\text{საღ}}$ და აქტიური წინააღობა კი $\rho/\pi r^2$, გვაქვს

$$I_{\text{ღას}} = \pi r_{\text{საღ}} \sqrt{\frac{K r_{\text{საღ}} (\theta_{\text{ღას}} - \theta_{\text{გარ}})}{\rho}}. \quad (3.85)$$

AC მარკის სადენისთვის კი

$$I_{\text{ღას}} = \sqrt{\frac{K \cdot 2\pi r_{\text{საღ}} (\theta_{\text{ღას}} - \theta_{\text{გარ}}) \cdot F}{\rho}} \quad (3.86)$$

ამ გამოსახულებებში: $r_{\text{საღ}}$ - სადენის გარე რადიუსი (მ); F - მუშა განივკვეთი (მ²).

ცხრილი 39 დასაშვები ტემპერატურა კაბელებისთვის, °C

ხაზური ძაბვა, კვ	1კვმ-მდე	3	6	10	20	35
ტყვიისა და ალუმინის გარსის მქონე კაბელები	80	80	65	60	50	50

(3.85) და (3.86) გამოსახულებათა ანალიზი გვიჩვენებს, რომ გახურებაზე დასაშვები ღენის მნიშვნელობა დამოკიდებულია სადენის კონსტრუქციულ ზომებსა და მასალაზე, გარემოს ტემპერატურაზე და თბოგაყვანის კოეფიციენტზე (გაცივების პირობებზე). ამავე პირობებით განისაზღვრება გახურებაზე დასაშვები ღენი კაბელებისთვისაც.

პრაქტიკაში სადენებისა და კაბელების ზღერული დასაშვები ღენების განსაზღვრისთვის სარგებლობენ ცხრილების (დ-7-1; დ-7-2; დ-7-3; დ-7-4) მონაცემებით, სადაც მიშველი (არაიზოლირებული) სადენებისთვის და ჰაერში გაკიდებული კაბელებისთვის გარემოს ტემპერატურად მიღებულია +25°C, ხოლო მიწაში (ან წყალში) ჩადებული კაბელებისთვის კი +15°C. თუ გარემოს ტემპერატურა საანგარიშოსგან განსხვავებულია, მაშინ დასაშვები ღენის მნიშვნელობის

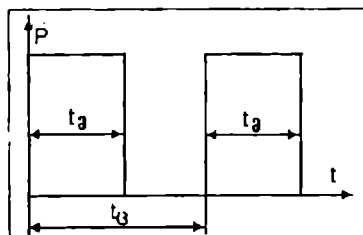
გამოთვლა წარმოებს შემასწორებელი კოეფიციენტების მიხედვით, რომელთა მნიშვნელობები მოცემულია შესაბამის ცხრილში (ცხრილი დ-8)

როცა გრანშეაში ან საკაბელო არხებში ჩაწყობილია რამდენიმე კაბელი, გაცივების პირობების გაუარესების გამო ერთი კაბელისთვის დასაშვები დენის მნიშვნელობა მცირდება და ამ შემცირების ჯერადობა დამოკიდებულია კაბელების რიცხვზე და მათ შორის მანძილზე. შესაბამისი შემასწორებელი კოეფიციენტების მნიშვნელობები მოცემულია ცხრილში (ცხრ. დ-9).

არის შემთხვევები, როცა ელექტრომიმღებთა ნაწილი მუშაობს ხანმოკლე-განმეორებითი დატვირთვის რეჟიმში. ეს რეჟიმი ხასიათდება ხანმოკლე ჩართვა-გამორთვებით (ნახ.3.24).

სადენები (კაბელები), რომელთა საშუალებით ენერგია გადაეცემა აღნიშნულ რეჟიმში მომუშავე ელექტრომიმღებს, მუშაობს გახურება-გაცივების განსხვავებულ პირობებში.

მუშა და არამუშა პერიოდების მონაცვლეობა რიგ შემთხვევაში იძლევა გახურებაზე დასაშვები დენის გამრდის შესაძლებლობას. ეს დაკავშირებულია მასთან, რომ არამუშა რეჟიმში სადენი ცივდება (ნახ.3.25) და მუშაობის მთელ ციკლში გაცივების პირობები უმჯობესდება.

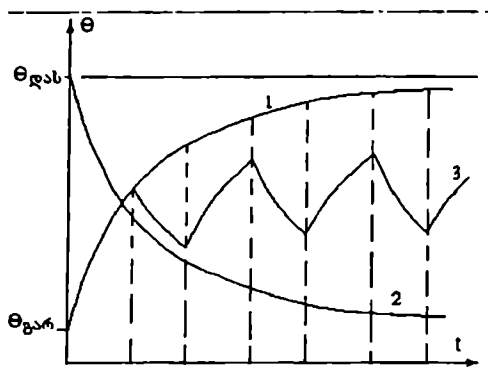


ნახ. 3.24 ელექტრომიმღების ხანმოკლე - განმეორებითი დატვირთვის გრაფიკი.

„ელექტროდანადგართა მოწყობის წესების“ თანახმად ხანმოკლე-განმეორებითი დატვირთვის რეჟიმში მომუშავე სადენებისთვის (კაბელებისთვის) გახურებაზე დასაშვები დენის გადაანგარიშება წარმოებს მაშინ, თუ მუშაობის მთელი ციკლის ხანგრძლივობა აღემატება $t_3=10$ წუთს, ხოლო მუშა პერიოდის ხანგრძლივობა კი არ აღემატება $t_g=4$ წუთს. გადაანგარიშების საანგარიშო გამოსახულებას, 10 მმ² და მეტი განივკვეთის მქონე სპილენძის და 16 მმ² და მეტი განივკვეთის მქონე ალუმინის სადენებისთვის, აქვს შემდეგი სახე

$$I'_{\text{ღს}} = I_{\text{ღს}} \cdot \frac{0,875}{\sqrt{t_g}}, \quad (3.87)$$

სადაც: $I_{\text{ღს}}$ - გახურებაზე დასაშვები დენი ხანგრძლივი დატვირთვისას; t_g - მუშა პერიოდის ხანგრძლივობის ფარდობითი მნიშვნელობა $t_g = t_g / t_{\Sigma}$.



ნახ. 3.25 სადენის ტემპერატურის ცვლილების გრაფიკები:
1-გახურების მრუდი ხანგრძლივად გამავალი დენისას;
2-გახურებული სადენის გაცივების მრუდი დატვირთვის დენის გამორთვის შემდეგ; 3-გახურება-გაცივების მრუდი ხანმოკლე-განმეორებითი დატვირთვის რეჟიმში

3.10 სისტემის დატვირთვის გრაფიკები

ელექტროსადგურების მიერ გამოშვებული ელექტრული ენერგიის მოხმარებლებს წარმოადგენს მრეწველობა, მშენებლობა, სასოფლო-სამეურნეო საწარმოები, ელექტროფიცირებული ტრანსპორტი, კაეშირგაბმულობა, საყოფაცხოვრებო მომსახურების სფერო და ა.შ. სადგურებზე გამოშვებული ენერგიის მცირე ნაწილი იხარჯება თვით ელექტროსადგურების საკუთარ საჭიროებაზე (ხარჯი საკუთარ მოხმარებაზე) და ენერგიის ტრანსპორტირებაზე (დანაკარგები ქსელში). მოხმარებელთა მიერ მოხმარებული ელექტრული ენერგია წარმოადგენს მარგად გაცემულ ენერგიას:

$$\Sigma \mathcal{E}_{\text{გამ}} = \Sigma \mathcal{E}_{\text{სადგ}} - \Sigma \mathcal{E}_{\text{საკომ.}} - \Sigma \Delta \mathcal{E}_{\text{ქ}},$$

სადაც: $\Sigma Q_{\text{მოშ.}}$ - მომხმარებელთა მიერ მოხმარებული ჯამური ენერგია (მარგად გაცემული ენერგია); $\Sigma Q_{\text{საღ.}}$ - სადგურების მიერ გამო-
მუშავებული ჯამური ენერგია; $\Sigma Q_{\text{საკ.მოშ.}}$ - სადგურების საკუთარ
საჭიროებაზე (საკუთარი მოხმარება) დახარჯული ენერგია; $\Sigma \Delta Q_{\text{ქ.}}$ -
ენერგიის დანაკარგები ქსელის ელემენტებში.

აღნიშნული განტოლება წარმოადგენს ენერგიის ბალანსის
განტოლებას. ანალოგიურად შეიძლება დაიწეროს აქტიურ და რეაქ-
ტიულ სიმძლავრეთა ბალანსის განტოლებებიც:

$$\Sigma P_{\text{მოშ.}} = \Sigma P_{\text{საღ.}} - \Sigma P_{\text{საკ.მოშ.}} - \Sigma \Delta P_{\text{ქ.}}$$

და

$$\Sigma Q_{\text{მოშ.}} = \Sigma Q_{\text{საღ.}} - \Sigma Q_{\text{საკ.მოშ.}} - \Sigma \Delta Q_{\text{ქ.}}$$

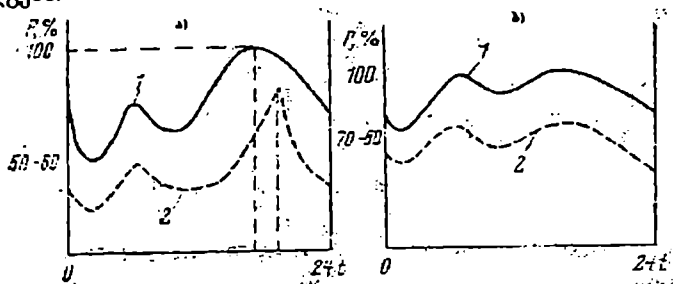
სისტემის ჯამური დატვირთვა დამოკიდებულია მომხმარე-
ბელთა მუშაობის რეჟიმზე. დროის ინტერვალში (დღელაზე, კვირა,
თვე) ცალკეული მომხმარებლის მიერ მოთხოვნილი სიმძლავრე იც-
ვლება მისი მუშაობის რეჟიმის შესაბამისად. აქედან გამომდინარე
იცვლება სისტემის ჯამური დატვირთვაც. ეს ცვლილება მოიცემა
დატვირთვის გრაფიკების სახით, სადაც აბსცისათა ღერძზე გადაი-
მომება დრო (სთ, დღე, თვე), ხოლო ორდინატაზე კი დატვირთვის
სიმძლავრე. განსახილველი დროის ინტერვალის (დღე, წელი და
სხვა) მიხედვით გვაქვს დღელამური, წლიური და სხვა დატვირთვის
გრაფიკები.

დატვირთვის გრაფიკის ფორმა დამოკიდებულია მომხმარე-
ბის გვარობაზე (მრეწველობა, მშენებლობა, განათების ქსელი და
ა.შ.) და მათი მუშაობის პირობებზე (ერთ-, ორ-, სამცვლიანი, სეზო-
ნური და სხვა). მიუხედავად იმისა, რომ ცალკეული მომხმარებელ-
ბის დატვირთვის გრაფიკი სხვადასხვა ფორმისაა, სისტემის ჯამური
დატვირთვის გრაფიკი გარკვეული კანონზომიერებით ხასიათდება.

სიმძლავრის მოხმარების შესახებ გარკვეული წარმოადგენის
მიღებისთვის ძირითადად სარგებლობენ დღელამური დატვირთვის
გრაფიკით, სადაც აშკარად გამოკვეთილია დამისა და დღის ჩაეარ-
დნები (მინიმუმი) და ღილისა და საღამოს პიკური დატვირთვები
(მაქსიმუმი) (ნახ.3.26).

თუ ენერგოსისტემაში ჭარბობს საყოფაცხოვრებო მომსახუ-
რების დატვირთვები, მაშინ საღამოს მაქსიმუმი მნიშვნელოვნად მე-
ტია, ვიდრე ღილის (ნახ.3.26 ა). ეს სხვაობა განსაკუთრებით შესამ-
ჩნევია გაფხულში. ამასთან გაფხულში საღამოს პიკი უფრო გვიან
დგება, ვიდრე ზამთარში. მინიმალური დატვირთვა, რომელიც ღამის
3-5 საათის პერიოდში შეიმჩნევა, მაქსიმალური დატვირთვის დაახ-

ლოებით 50-60%-ს შეადგენს. ენერგოსისტემაში, სადაც სამრეწველო დატვირთვების ხვედრითი წილი დიდია, საღამოს და დილის პიკური დატვირთვები თითქმის არ განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან (ნახ.3.26ბ). ასეთი სისტემის დღელამური დატვირთვის გრაფიკი უფრო თანაბარია - მინიმალური დატვირთვა მაქსიმალურის 70-80%-ს შეადგენს.



ნახ. 3.26 ენერგოსისტემის დღელამური დატვირთვის გრაფიკი:

ა) საყოფაცხოვრებო დატვირთვის დიდი ხვედრითი წილით;

ბ) სამრეწველო დატვირთვის დიდი ხვედრითი წილით;

1-ზამთრის პერიოდი; 2-ზაფხულის პერიოდი

დღელამური დატვირთვის გრაფიკის მოხაზულობაზე გავლენას ახდენს დღის ნათების ხანგრძლივობა და გარემოს ტემპერატურა. ნათების შემცირებული ხანგრძლივობისას დატვირთვა იზრდება და დილისა და საღამოს პიკები უფრო ხანგრძლივია. გარემოს დაბალი ტემპერატურისას დატვირთვა შედარებით მეტია, ვიდრე მაღალი ტემპერატურისას. დღელამური დატვირთვის გრაფიკი ხაზსიათდება შემდეგი მაჩვენებლებით (ნახ.3.27):

• მაქსიმალური $P_{\max}$ და მინიმალური $P_{\min}$ დატვირთვები;

• საანგარიშო პერიოდი T_0 , რომელიც დატვირთვის დღელამური გრაფიკისთვის შეადგენს $T_0=24$ სთ; ხოლო წლიური გრაფიკისთვის $T_0=8760$ სთ.

• საშუალო დღელამური დატვირთვა $P_{\text{სა}} = \frac{\Theta_{\text{დღ}}}{24}$,

• $\Theta_{\text{დღ}}$ - ელექტროენერგიის დღელამური მოხმარება

$$\Theta_{\text{დღ}} = \int_0^{T_0} p(t) dt ;$$

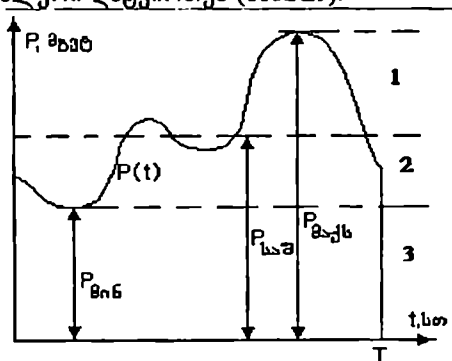
დატვირთვის უთანაბრობის კოეფიციენტი

$$\alpha = P_{\max} / P_{\text{სა}} ;$$

• ლაგვირთვის შვესების კოეფიციენტი $\beta = P_{\text{ლმ}} / P_{\text{მკ}} \cdot$

ლაგვირთვის გრაფიკი პირობითად იყოფა სამ ზონად: პიკური, რომელიც განთავსებულია საშუალო ღლეღამური ლაგვირთვის წრფის ზევით; ნახევარპიკური, რომელიც განთავსებულია მინიმალური და საშუალო ღლეღამური ლაგვირთვების შესაბამის წრფეებს შორის; ბაზისური, რომელიც მოთავსებულია მინიმალური ლაგვირთვის წრფის ქვემოთ.

ლაგვირთვის გრაფიკის ერთერთ სახედ განიხილება წლიური ლაგვირთვის გრაფიკი ხანგრძლივობის მიხედვით (ნახ.3.28), რომელიც წარმოადგენს თანდათანობით კლებად საფეხუროვან გრაფიკს. ყოველი საფეხური უჩვენებს მოცემული ლაგვირთვის ხანგრძლივობას წლის განმავლობაში. ასევე განიხილავენ მაქსიმალური ლაგვირთვების წლიურ გრაფიკს, სადაც აბსცისაზე გადაზომილია კალენდარული თვეები, ხოლო ორდინატაზე შესაბამისი თვის მაქსიმალური ლაგვირთვა (ნახ.3.29).



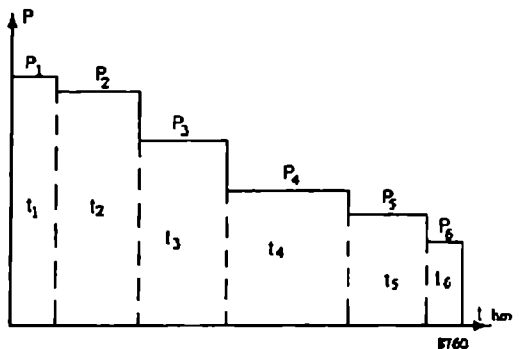
ნახ. 3.27 ღლეღამური ლაგვირთვის მახასიათებელი პარამეტრები: $P_{\text{მკ}}$; $P_{\text{ლმ}}$; $P_{\text{მინ}}$. 1-პიკური ზონა; 2-ნახევარპიკური ზონა; 3-ბაზისური ზონა

წლიური ლაგვირთვის გრაფიკი მოხერხებულია დავახასიათოთ მაქსიმალური ლაგვირთვის გამოყენების ხანგრძლივობით $T_{\text{მკ}}$. ამ პარამეტრით განისაზღვრება ის დრო, რომლის განმავლობაშიც მომხმარებელს, რომ ემუშავა მაქსიმალური ლაგვირთვით, ქსელიდან მიიღებდა იმავე რაოდენობის ენერგიას, რაც ფაქტიური გრაფიკით მუშაობისას. განმარტების თანახმად

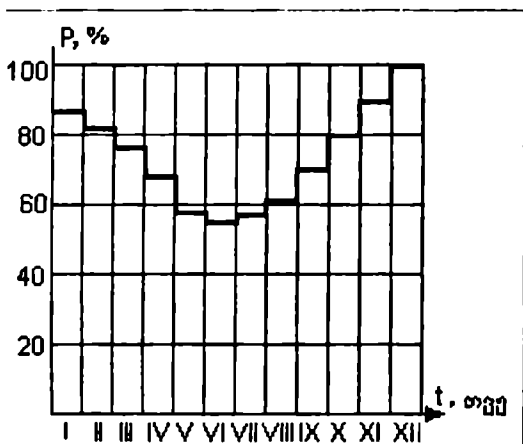
$$\Sigma_{\text{წელ}} = \int_0^{8760} p(t) dt = P_{\text{მკ}} \cdot T_{\text{მკ}},$$

აქედან

$$T_{\text{წელ}} = \frac{1}{P_{\text{მკ}}} \int_0^{8760} p(t) dt. \quad (3.88)$$



ნახ. 3.28 წლიური დატვირთვის გრაფიკი ხანგრძლივობის მიხედვით



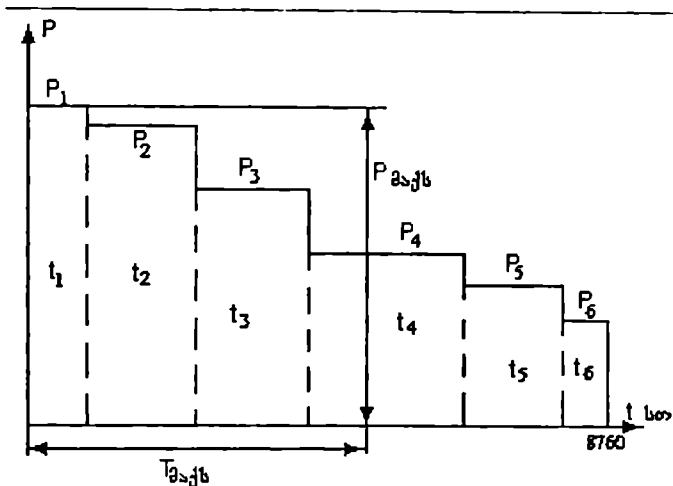
ნახ. 3.29 მაქსიმალური დატვირთვის წლიური გრაფიკი

მაქსიმალური დატვირთვის გამოყენების ხანგრძლივობა გრაფიკულად ნაჩვენებია 330 ნახამზე

პრაქტიკული დაკვირვებებისა და გამოთვლების საფუძველზე ზოგიერთი სახასიათო მომხმარებლებისთვის განსაზღვრულია $T_{გაჟ}$ დროის საუარაუდო ინტერვალები (ცხვ.3.10)

ელექტრული ენერგიის მომხმარებელთა მუშაობისთვის საჭიროა მათ ქსელიდან გადავცეთ არა მარტო აქტიური სიმძლავრე, არამედ რეაქტიულიც. ამიტომ ელექტრომიმღების დატვირთვის სრუ-

ლი დახასიათებისთვის საჭიროა რეაქტიული სიმძლავრის გრაფიკი.



ნახ. 3.30 მაქსიმალური დატვირთვის გამოყენების ხანგრძლივობის გრაფიკული წარმოდგენა

ცხრილი 3.10 ზოგიერთი მომხმარებლის მაქსიმალური დატვირთვის გამოყენების ხანგრძლივობა

მომხმარებლის დასახელება	$T_{\text{მაქს}}$ სთ
მიგა განათება და საყოფაცხოვრებო მომსახურების სფერო	2000-3000
სამრეწველო საწარმოები (ერთცელიანი)	1500-2000
სამრეწველო საწარმოები (ორცელიანი)	3000-4500
სამრეწველო საწარმოები (სამცელიანი)	5000-7000

პროექტირებისას მომხმარებელთა მოსალოდნელი აქტიური დატვირთვის გრაფიკი აიღება ტიპური გრაფიკების მიხედვით, რომლებიც მიიღება იმავე ტიპის მოქმედი ელექტრომიმღებების დატვირთვის გამომეების საფუძველზე. გამომეები შესრულებული უნდა იქნეს დროის სხვადასხვა პერიოდებისთვის, რომლის შემდეგ გარდება ამ ექსპერიმენტული მონაცემების სტატისტიკური დამუშავება. უშუალოდ გამომეების საფუძველზე მიღებული შედეგები მით უფრო სანდოა, რაც უფრო მეტი რაოდენობის მომხმარებელთა რეალური

დაგვირთვის რეჟიმში იქნება გამოკელებული. ამავსე გზით შეიძლება დადგენილი იქნეს რეაქტიული დაგვირთვის გრაფიკებიც. პროექტირებისას რეაქტიული დაგვირთვა შეიძლება ავიღოთ მიახლოებით რეაქტიული დაგვირთვის კოეფიციენტის (ცფ) მიხედვით, რომლის რიცხვითი მნიშვნელობა მაქსიმალური და მინიმალური აქტიური დაგვირთვის პერიოდებში სხვადასხვაა (ცფ_{მინ} > ცფ_{მაქ}).

3.11 დაგვირთვის სტატიკური მახასიათებლები

მომხმარებელთა მიერ მოთხოვნილი სიმძლავრე იცვლება როგორც დროში და, ასევე, რეჟიმის პარამეტრების, კერძოდ, ძაბვისა და სიხშირის ცვლილებისას. მომხმარებელთა დაგვირთვის შეცვლა იწვევს ქსელში სიმძლავრეთა ნაკადის ცვლილებას. შესაბამისად, იცვლება რეჟიმის პარამეტრებიც. მაშასადამე, ქსელის რეჟიმის პარამეტრები და მომხმარებელთა დაგვირთვა ურთიერთკავშირშია. აქედან გამომდინარე, ქსელის რეჟიმების გაანგარიშებისას არსებითი მნიშვნელობა აქვს დაგვირთვის მახასიათებლების გათვალისწინებას.

ნორმალურ დამყარებულ რეჟიმში დაგვირთვა დროში მდორედ და ნელა იცვლება და ამიტომ ამ რეჟიმებში მიზანშეწონილია განვიხილოთ დაგვირთვის სტატიკური მახასიათებელი:

$$P = P(U, f) \text{ და } Q = Q(U, f). \quad (3.89)$$

განსხვავებით სტატიკურიდან, დაგვირთვის დინამიკური მახასიათებლები დამატებით დროის ფუნქციას წარმოადგენს:

$$P = P\left(U; f; \frac{dU}{dt}; \frac{df}{dt}; \frac{d^2U}{dt^2}; \frac{d^2f}{dt^2}; \dots\right)$$

და

$$Q = Q\left(U; f; \frac{dU}{dt}; \frac{df}{dt}; \frac{d^2U}{dt^2}; \frac{d^2f}{dt^2}; \dots\right)$$

რეჟიმის პარამეტრების მდორე და მცირე ცვლილებისას დაგვირთვის ცვლილება შეიძლება გამოვსახოთ გამოსახულებებით:

$$\left. \begin{aligned} dP &= \frac{\partial P}{\partial U} \cdot dU + \frac{\partial P}{\partial f} \cdot df \\ dQ &= \frac{\partial Q}{\partial U} \cdot dU + \frac{\partial Q}{\partial f} \cdot df \end{aligned} \right\} \quad (3.90)$$

სიდიდეები: $\frac{\partial P}{\partial U}$, $\frac{\partial Q}{\partial U}$ და $\frac{\partial P}{\partial f}$, $\frac{\partial Q}{\partial f}$ წარმოადგენენ დატვირთვის

მარეგულირებელ ეფექტს. ამასთან, პრიველი და მეორე დატვირთვის მარეგულირებელი ეფექტია ძაბვის მიხედვით, ხოლო მესამე და მეოთხე კი იგივე სიხშირის მიხედვით.

რიცხოვრივად მოცემული პარამეტრის მიხედვით მარეგულირებელი ეფექტი დატვირთვის ცვლილების გოლია, როცა მოცემული პარამეტრი იცვლება ერთი ერთეულით, ხოლო მეორე პარამეტრი კი უცვლელია. მაგლითად:

$$\frac{\partial P}{\partial U} = dP, \text{ როცა } dU=1 \text{ და } df=0$$

ა6

$$\frac{\partial P}{\partial f} = dP, \text{ როცა } df=1 \text{ და } dU=0$$

ელექტრული ქსელის მომხმარებელთა შორის არის სხვადასხვა სახის მომხმარებლები, რომელთა დატვირთვის სტატიკური და დინამიკური მახასიათებლები ასევე სხვადასხვა სახისაა. ქსელის რეჟიმის გაანგარიშებისას ინგერესს წარმოადგენს არა ცალკეული მომხმარებლების დატვირთვის მახასიათებლები, არამედ ე.წ. განზოგადოებული მახასიათებელი, რომელიც განისაზღვრება საკმარისად დიდი ენერგორაიონის მომხმარებელთა მახასიათებლების მიხედვით.

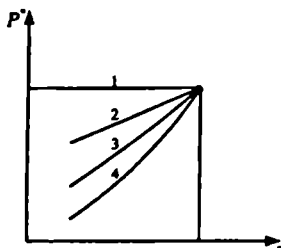
სხვადასხვა ენერგორაიონების მომხმარებელთა დატვირთვის სტატიკური განზოგადოებული მახასიათებლები პრაქტიკულად ერთმანეთის მსგავსია, რაც განპირობებულია იმით, რომ მომხმარებელთა შორის დიდი ხვედრითი წილი აქვს სინქრონულ ძრავებსა და ვარვარების ნათურებს. ამიტომ ქსელის დატვირთვის განზოგადოებული სტატიკური მახასიათებლის ფორმაზე განმსაზღვრელ გავლენას ახდენს სწორედ აღნიშნული მომხმარებლების სტატიკური მახასიათებლების ფორმა.

ვარვარების ნათურების, ელექტროლუმელებისა და მეტალურგიული ობიექტების (წინალობის ღუმელები, რკალური ღუმელები) მიერ მოთხოვნილი აქტიური სიმძლავრე არ არის დამოკიდებული სიხშირეზე, ხოლო ძაბვის შეცვლისას მათი აქტიური დატვირთვა იცვლება $\approx 1,8$ ხარისხის პროპორციულად [11]. რეაქტიულ სიმძლავრეს ეს მომხმარებლები არ მოითხოვენ.

ლუმინესცენცური ნათურების მიერ მოთხოვნილი აქტიური სიმძლავრე სიხშირის 1%-ით შეცვლისას იცვლება (0,5-0,8)%-ით, ხოლო ძაბვის 1%-ით შეცვლისას კი უფრო ნაკლები პროცენტით.

სინქრონული ძრავების სტატიკური მახასიათებლები, მოგადად სხვადასხვაა და განისაზღვრება იმ მექანიზმებით, რომლებიც მოძრაობაში მოდის ამ ძრავების მეშვეობით. ამ მანქანა-მოწყობილობების დიდი ნაწილის აქტიური დაგვირთვა უმნიშვნელოდაა და მოკიდებული ძაბვის ცვლილებაზე, ხოლო სიხშირის შეცვლისას კი თითქმის პირდაპირპროპორციულად იცვლება (ნახ.3.31, წირი 3) [52]. რეაქტიული დაგვირთვა დამოკიდებულია, როგორც ძაბვაზე, ასევე სიხშირეზე.

ცენტრიდანული ტუმბოებისა და ენტილატორების ელექტროამძრავების მიერ მოთხოვნილი აქტიური სიმძლავრე სიხშირის თითქმის მესამე ხარისხის პროპორციულად იცვლება (ნახ.3.31 წირი 4).



ნახ. 3.31 მომხმარებელთა აქტიური დაგვირთვის სტატიკური მახასიათებლები სიხშირის მიხედვით: 1-ვარვარების ნათურები, წინაღობის ღუმელები, რკალური ღუმელები; 2-ღუმინესცენური ნათურები; 3-დგუშიანი ტუმბოები, კომპრესორები, ბურთულებიანი წისქვილები; სამსხვრეველები; ლითონის საჭრელი ჩარხები; ამწე და საგრანპორტო მეაქნიზმები; 4-ცენტრიდანული ტუმბოები და ენტილატორები.

მომხმარებელთა დაგვირთვის ტიპური განზოგადოებული სტატიკური მახასიათებლები მოცემულია 3.32 და 3.33 ნახაზებზე [11; 26; 32]. ეს მახასიათებლები მიღებულია ელექტროსისტემის მომხმარებელთა შემდეგი პროცენტული შეზღუდვებისას:

მცირე სიმძლავრის ასინქრონული ძრავები — 34

დიდი სიმძლავრის ასინქრონული ძრავები — 14

განათება — 25

გამმართელები, ღუმელები და გამათბობელი ხელსაწყოები — 10

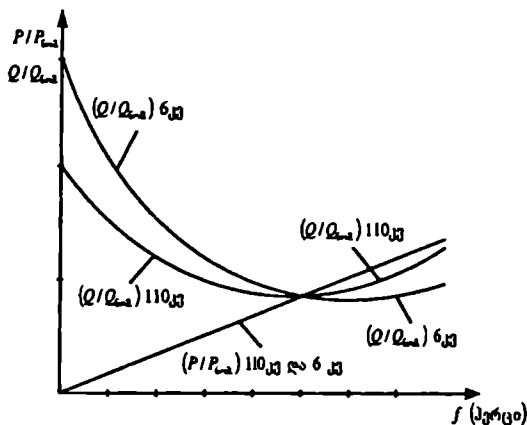
სინქრონული ძრავები — 10

დანაკარგები ქსელში — 7

როგორც 3.32 ნახაზზე წარმოადგენილი მახასიათებლიდან ჩანს, აქტიური დაგვირთვის ცვლილება სიხშირისგან პრაქტიკულად წრფივ დამოკიდებულებაშია. მისი დახრილობა განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$K_{\epsilon} = \frac{\Delta P_{\epsilon} / P_{\epsilon}}{\Delta f / f_{\epsilon}}, \quad (3.91)$$

სადაც ΔP_{ϵ} - მომხმარებელთა აქტიური სიმძლავრის ჯამური ცვლილება სისტემაში სიხშირის Δf სიდიდით შეცვლისას; P_{ϵ} - სისტემის ჯამური დატვირთვა f_{ϵ} სიხშირის დროს.



ნახ. 3.32 აქტიური და რეაქტიული დატვირთვის ტიპური განზოგადოებული სტატიკური მახასიათებლები სიხშირის მიხედვით ($U = \text{const}$)

(3.91) გამოსახულების თანახმად ეწერთ:

$$\Delta P_{\epsilon} = K_{\epsilon} \cdot P_{\epsilon} \cdot \frac{\Delta f}{f} \quad (3.92)$$

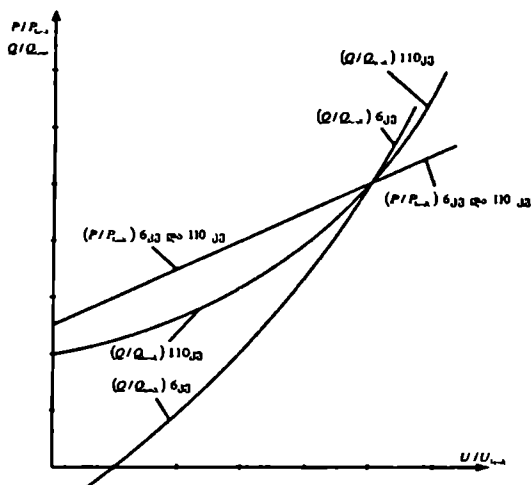
ანუ

$$\Delta f = \frac{\Delta P_{\epsilon} \cdot f}{K_{\epsilon} \cdot P_{\epsilon}} \quad (3.93)$$

ენერგოსისტემებისთვის $K_{\epsilon} \approx (1-3)$, რაც მიუთითებს მასზე, რომ სიხშირის 1%-ით შეცვლისას სისტემის ჯამური აქტიური დატვირთვა იცვლება $(1-3)\%$ -ით.

ამავე ნახაზის მიხედვით გვაქვს, რომ სიხშირის შემცირება იწვევს რეაქტიული დატვირთვის ზრდას, რაც ძირითადად განპირობებულია ანიქრონულ ძრავებსა და გრანსფორმატორებში მაგნიტუ-

რი ინდუქციის გაზრდით და გაქვნიის შედეგად მათი დამაგნიტების ღენის მნიშვნელოვანი ზრდით. სიხშირის შემცირებით მცირდება ხაშების მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე, რაც სისტემის ჯამური რეაქტიული სიმძლავრის მოხმარების გაზრდის გოლფასია. აღნიშნული ზრდა რამდენადმე კომპენსირდება ხაშების, ტრანსფორმატორებისა და ასინქრონული ძარვების ფანტვის რეაქტიულ წინაღობაში რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების ხარჯზე. მთლიანად ენერგოსისტემისთვის სიხშირის 1%-ით შემცირებისას რეაქტიული დატვირთვა იზრდება (1-1.5)%-ის ფარგლებში.



ნახ. 333. აქტიური და რეაქტიული დატვირთვის ტიპური განზოგადოებული მახასიათებლები ძაბვის მიხედვით ($f=\text{const}$)

333 ნახაზზე წარმოადგენილი მახასიათებლების მიხედვით ჩანს, რომ აქტიური დატვირთვა ძაბვისგან თითქმის წრფივ დამოკიდებულებაშია. ამასთან მისი დახრილობა მით მეტია, რაც მეტია ვარეარების ნათურების, გათბობისა და რკალური ღუმელების ხვედრითი წილი საერთო დატვირთვაში. მთლიანად სისტემისთვის ძაბვის 1%-ით შემცირებისას აქტიური დატვირთვა მცირდება (0.6-2)%-ის ფარგლებში. უნდა აღინიშნოს, რომ სინქრონული ძარვების დატვირთვის სიმძლავრე მცირედ იცვლება, ხოლო ზემოთ აღნიშნული საყოფაცხოვრებო მომხმარებელთა და რკალური ღუმელების დატვირთვა ძაბვის 1%-ით შემცირებისას მცირდება (1,6-2)%-ის ფარგლებში. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ძაბვის 1%-ით შემცირებისას

ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები იზრდება დაახლოებით 2%-ით.

რეაქტიული დაგვირთვა ძაბვისგან მრუდწირულ დამოკიდებულებაშია. ასინქრონული ძრავებისა და გრანსფორმატორების დამაგნიტების რეაქტიული სიმძლავრე ძაბვის შემცირებისას მკვეთრად მცირდება (დაახლოებით 2-3%-ით ძაბვის 1%-ით შემცირებისას). ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები, რომელთა ხვედრითი წილი ნომინალურ რეჟიმში ჯამური რეაქტიული დაგვირთვის (30-40)%-ს შეადგენს, ძაბვის 1%-ით შემცირებისას 2%-ით იზრდება. ამასთან ამ დაგვირთვის ხვედრითი წილი ძაბვის შემცირებით იზრდება.

გარდა აღნიშნულისა, ძაბვის შემცირებისას ხაზების ტევადური სიმძლავრე კვადრატულპროპორციულად მცირდება, რაც გარკვეულწილად ზრდის რეაქტიული სიმძლავრის დეფიციტს.

ძაბვის გარკვეულ მნიშვნელობამდე შემცირებისას სისტემის რეაქტიული დაგვირთვა მცირდება რაღაც მინიმალურ მნიშვნელობამდე და ძაბვის შემდგომი შემცირებისას კი იწყებს ზრდას. ენერგოსისტემისთვის რეაქტიული დაგვირთვის ეს მინიმალური სიდიდე შეიძლება დამყარდეს ძაბვის (75-85)%-ის მნიშვნელობისას [26].

შემოთ ჩატარებული ანალიზი საშუალებას გვაძლევს ენერგოსისტემის მუშაობის პირობების შესახებ გავაკეთოთ გარკვეული დასკვნები. კერძოდ, სისტემაში სიმძლავრის საწყისი ბალანსის დარღვევა იწვევს სისტემის ახალ დამყარებულ რეჟიმში გადასვლას, სადაც გენერაცია და მოხმარება ისევ დაბალანსებულია ელექტროენერგიის ხარისხის მაჩვენებლების შეცვლის ხარჯზე.

3.32 და 3.33 ნახაზებზე რეაქტიული დაგვირთვის სტატიკური მახასიათებლები წარმოდგენილია ძაბვის ორი საფეხურის (110 და 6 კე) მიმართ. განსხვავება მათ შორის განპირობებულია გრანსფორმატორებში რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგებისა და ამ დანაკარგებზე სიხშირისა და ძაბვის ცვლილების გავლენით.

3.12 დაგვირთვის წარმოდგენა საანგარიშო სქემებზე

ელექტრული ქსელის რეჟიმების გაანგარიშებისას გათვალისწინებული უნდა იქნეს ქსელის ყველა ელემენტის ძირითადი მახასიათებლები და მათ შორის, სისტემის დაგვირთვის სტატიკური მახასიათებლებიც, რომელთა სრულფასოვანი გათვალისწინება შესაძლებელია მხოლოდ ყოველი კონკრეტული მოხმარებლის დაგვირთვის სტატიკური მახასიათებლების საფუძველზე. ასეთი სიზუსტით

მიდგომა, ერთი მხრივ, ძნელია გაანგარიშების საწყისი ინფორმაციის მოპოვება-გადამუშავების თვალსაზრისით და, მეორე მხრივ, არც არის აუცილებელი, რადგანაც განზოგადოებული გიპიური სტატიკური მახასიათებლების გათვალისწინების საფუძველზეც კი გაანგარიშებებში საკმარისი სიმუსტის შედეგები მიიღწევა.

მიუხედავად იმისა, რომ განზოგადოებული გიპიური სტატიკური მახასიათებლების გათვალისწინებით გაანგარიშებები მნიშვნელოვნად მარტივდება, მაინც აღნიშნული გაანგარიშებები გაძნელებულია, რადგანაც ამ მახასიათებლების შესაბამისად ძაბვასა და დენს შორის არაწრფივი დამოკიდებულება არსებობს. ამიგომ აღნიშნული მახასიათებლების გათვალისწინებით ელექტრული ქსელის რეჟიმების ანგარიშები არც ისე ხშირად წარმოებს. უფრო ხშირად შემოიფარგლებიან ნაკლებად მკაცრი მიდგომით. კერძოდ, დაგვირთვას პირობითად წარმოადგენენ ამა თუ იმ სახის მარტივი მახასიათებლით: უცვლელი სიდიდის სიმძლავრით; უცვლელი სიდიდის დენით; მუდმივი სიდიდის წინააღობით (გამტარობით); კვანძის ჯამური დაგვირთვის დაყოფა სხვადასხვა პირობითი მახასიათებლების მიხედვით.

დაგვირთვის წარმოდგენა უცვლელი სიდიდის სიმძლავრით

$$\underline{S}_{\text{დაგ}} = P_{\text{დაგ}} + jQ_{\text{დაგ}} = \text{const} \quad (3.94)$$

ნიშნავს, რომ ქსელის კვანძებში მუშა ძაბვის შეცვლისას დაგვირთვის აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეები არ იცვლება. ე.ი. დაგვირთვის მარეგულირებელი ეფექტი ძაბვის მიხედვით

$$\frac{\partial P}{\partial U} = \frac{\partial Q}{\partial U} = 0, \quad (3.95)$$

რაც წინააღმდეგობაშია დაგვირთვის სტატიკურ მახასიათებელთან. დაგვირთვის (3.94) სახის პირობით მახასიათებელსა და სტატიკურ მახასიათებელს შორის განსხვავება უმნიშვნელოა მხოლოდ ძაბვის ძალიან მცირე გადახრისას (ნახ.3.34). ამიგომ დაგვირთვის პირობითი მახასიათებლის (3.94) სახით წარმოდგენა მისაღებია იმ ქსელებისთვის, რომლებიც აღჭურვილნი არიან ძაბვის რეგულირების მოწყობილობებით და შესაძლებლობა გააჩნიათ მიმღებთა საღკეებზე უზრუნველყონ მუშა ძაბვის სიდიდე ნომინალურის მახლობლობაში.

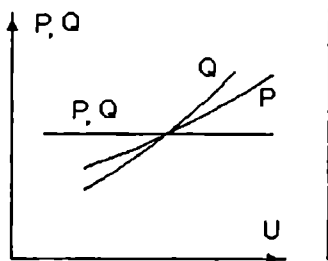
იმ შემთხვევაში, როცა ქსელის მოცემულ კვანძში აუცილებელია გათვალისწინებული იქნეს დაგვირთვის ძაბვისგან დამოკიდებულება, მაშინ უფრო მოხერხებულია დაგვირთვა წარმოვადგინოთ უცვლელი სიდიდის დენით

$$I_{\text{ლაგ}}^* = I_{\text{ლაგეაქტ}} + jI_{\text{ლაგრეაქტ}} = \text{const.} \quad (3.96)$$

დატვირთვის ასეთი სახით წარმოდგენა ნიშნავს, რომ მოცემულ კვანძში ქსელიდან მომხმარებლის მიერ მოთხოვნილი სიმძლავრე იცვლება მუშა ძაბვის პროპორციულად

$$\underline{S} = \sqrt{3} \underline{U} I_{\text{ლაგ}}^* \quad (3.97)$$

აქ $I_{\text{ლაგ}}^*$ - დატვირთვის დენის შეუღლებული მნიშვნელობა.



ნახ. 3.34 დატვირთვის მახასიათებლები: 1-აქტიური და რეაქტიული დატვირთვის პირობითი (3.94) სახის მახასიათებელი; 2-აქტიური დატვირთვის სტატიკური მახასიათებელი; 3-რეაქტიული დატვირთვის სტატიკური მახასიათებელი

კვანძის დატვირთვის დენის მნიშვნელობა დადგენილი უნდა იქნეს დატვირთვის მოცემული სიმძლავრისა და კვანძის მუშა ძაბვის მიხედვით. ეს უკანასკნელი (მუშა ძაბვა) კი წინასწარ ცნობილი არ არის და საძიებელ სიდიდეს წარმოადგენს. $U_{\text{კვ}} \geq 110$ კვ ძაბვის მანაწილებელ ქსელებში ძაბვა შედარებით ვიწრო ფარგლებში იცვლება და კვანძის დატვირთვის დენი შეიძლება განისაზღვროს ნომინალური ძაბვის მიხედვით. მკვებაჲ ქსელებში ($U_{\text{კვ}} \geq 110$ კვ) კვანძების მუშა ძაბვები საკმარისად დიდ ფარგლებში იცვლება და დატვირთვის წარმოდგენამ უცვლელი სიდიდის დენით, რომელიც განსაზღვრული იქნება ნომინალური ძაბვის მიხედვით, გაანგარიშებაში შეიძლება საკმარისად დიდი ცდომილებები გამოიწვიოს, თუმცა დატვირთვის (3.97) სახის პირობითი მახასიათებელით წარმოდგენისას მიიღწევა გარკვეული რაოდენობრივი შესაბამისობა პირობითი და სტატიკურ მახასიათებლებს შორის. კერძოდ, ძაბვის მიხედვით (3.97) სახის პირობითი მახასიათებლის შესაბამისი მარეგულირებელი ეფექტი

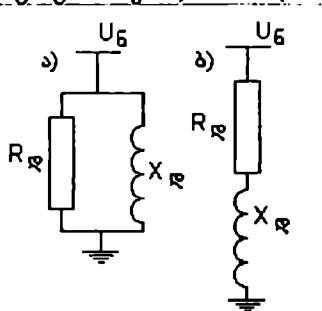
$$\frac{\Delta P^*}{\Delta U^*} = \frac{\Delta Q^*}{\Delta U^*} = 1,$$

მაშინ, როცა ნომინალური ძაბვის მახლობლობაში დატვირთვის სტატიკური მახასიათებლის მარეგულირებადი ეფექტი

$$\frac{\Delta P^*}{\Delta U^*} \approx 0,6 \text{ და } \frac{\Delta Q^*}{\Delta U^*} = \begin{cases} 2,3 - 6,10 \text{ კვ ძაბვაზე} \\ 1,6 - 110 \text{ კვ ძაბვაზე.} \end{cases}$$

ე.ი. დატვირთვის უცვლელი სიდიდის დენით წარმოდგენა, თუ ამ კვანძში ძაბვის ღრმა გადახრა არ არის მოსალოდნელი, მისაღება 110 კვ ძაბვის კვანძების შემთხვევაში.

იმ ქსელების რეჟიმების გაანგარიშებისას, სადაც შეიმჩნევა ძაბვის მნიშვნელოვანი გადახრები, უფრო მოხერხებულია დატვირთვა წარმოვადგინოთ პარალელურად ან მიმდევრობით შეერთებული წინააღობების (ან გამტარობების) სახით (ნახ. 3.35).



ნახ. 3.35 დარეირთვის წარმოდგენა წინააღობათა პარალელური (ა) ან მიმდევრობითი (ბ) შეერთების სახით.

ამ წინააღობათა სიდიდე შეირჩევა ისე, რომ ნომინალური ძაბვის დროს მომხმარებლის მიერ ქსელიდან მოთხოვნილი სიმძლავრე დატვირთვის მოცემული სიმძლავრის ტოლი იყოს.

აქედან გამომდინარე, ვწერთ:

პარალელური შეერთებისას

$$R_{\phi} = \frac{U_{\phi}^2}{P_{\phi}}, \quad X_{\phi} = \frac{U_{\phi}^2}{Q_{\phi}}; \quad (3.98)$$

მიმდევრობითი შეერთებისას

$$R_{\kappa} = \frac{U_6^2}{P^2 + Q^2} \cdot P, \quad X_{\kappa} = \frac{U_6^2}{P^2 + Q^2} \cdot Q. \quad (3.99)$$

დატვირთვის უცვლელი სიდიდის წინააღმდეგობით წარმოდგენისას ქსელიდან მოთხოვნილი სიმძლავრე იცვლება ძაბვის კვადრატის პროპორციულად. მაშასადამე, ამ შემთხვევაში ძაბვის მიხედვით დატვირთვის მარეგულირებელი ელემენტი

$$\frac{\Delta P^*}{\Delta U^*} = \frac{\Delta Q^*}{\Delta U^*} = 2$$

როგორც ვხედავთ დატვირთვის პირობითი სახის მახასიათებელით ((3,94), (3,96) ან (3,98) და (3,99)) წარმოდგენისას ძაბვის მიხედვით დატვირთვის ცვლილება ამა თუ იმ ხარისხით განსხვავდება რეალობისგან. აღნიშნული შეუსაბამობის ხარისხის შესამცირებლად მიზანშეწონილია კვანძში ჯამური დატვირთვა დაეყოს სხვადასხვა პირობითი მახასიათებლების მიხედვით. კერძოდ, დატვირთვა დაეყოს სამ ჯგუფად, რომელთაგანაც ერთი წარმოდგენილი იქნება უცვლელი სიდიდის სიმძლავრით (წილობრივი კოეფიციენტები α_1 და β_1); მეორე - უცვლელი სიდიდის ღენით (წილობრივი კოეფიციენტები α_2 და β_2) და მესამე - მუდმივი სიდიდის წინააღმდეგობით (წილობრივი კოეფიციენტები α_3 და β_3).

ცხრილი 3.11 დატვირთვის მარეგულირებელი ელემენტები

მარეგულირებელი ელემენტი	დატვირთვის წარმოდგენის მეთოდი				
	უცვლელი სიდიდის სიმძლავრით	უცვლელი სიდიდის ღენით	მუდმივი სიდიდის წინააღმდეგობით	დაჯგუფებით: $\alpha_1=0,5$ $\alpha_2=0,3$ $\alpha_3=0,2$ $\beta_1=0,3$ $\beta_2=0,6$	სტატიკური მახასიათებელით
$\frac{\Delta P^*}{\Delta U^*}$	0	1	2	0,7	0,6
$\frac{\Delta Q^*}{\Delta U^*}$	0	1	2	1,5	1,6

აღნიშნული წილობრივი კოეფიციენტების სათანადო შერჩევით ჯამური დაგვირთვის ეკვივალენტური პირობითი მახასიათებელი შესაძლებელია საკმარისი სიზუსტით მიუეახლოვოთ ამავე დაგვირთვის სტატიკურ მახასიათებელს (ცხრ.3.11).

დაგვირთვის ამ გზით წარმოდგენისას ეკვივალენტური მარეგულირებელი ეფექტი გამოითვლება ფორმულებით

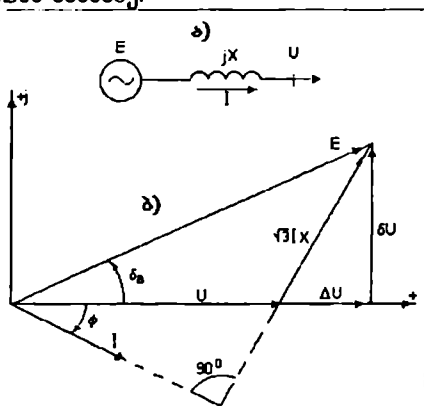
$$\frac{\Delta P^*}{\Delta U^*} = \alpha_1 + 2\alpha_z \quad (3.100)$$

და

$$\frac{\Delta Q^*}{\Delta U^*} = \beta_1 + 2 \cdot \beta_z \quad (3.101)$$

3.13 სინქრონული გენერატორების წარმოდგენა დამყარებული რეჟიმების გაანგარიშებისას

რეჟიმების გაანგარიშებისას სინქრონული გენერატორის სტატორის გრაგნილის აქტიური წინაღობა, მისი სიმცირის გამო, უგულებელყოფილია და გენერატორის ჩანაცვლების სქემას აქვს 3.36ა ნახაზზე ნაჩვენები სახე. ამ სქემის შესაბამისი ვექტორული დიაგრამა ნაჩვენებია 3.36ბ ნახაზზე.



ნახ. 3.36. ა) სინქრონული გენერატორის ჩანაცვლების სქემა და
ბ) შესაბამისი ვექტორული დიაგრამა.

გენერატორის სტატორის გრავილის რეაქტიული წინაღობა X და ელექტრომაგნიტური ძალა E მხედველობაში მიიღება მხოლოდ გარდამავალი პროცესების გაანგარიშებისას. დამყარებული რეჟიმების გაანგარიშებისას კი გენერატორი განიხილება როგორც გენერატორის ძაბვის საღებებზე მიერთებული დენის წყარო, რომელიც რეჟიმების გაანგარიშებისას შეიძლება მოცემული იქნეს სხვადასხვა სახით:

ა) *მუდმივი აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრე* $P_g = \text{const}$, $Q_g = \text{const}$. ჩანაცვლების სქემაზე გენერატორის მოცემა მუდმივი აქტიური დატვირთვით შეესაბამება მისი მუშაობის რეალურ პირობებს სიხშირის რეგულირების სისტემის მოქმედების გათვალისწინებით. მუდმივი რეაქტიული დატვირთვით მოცემა კი ნიშნავს, რომ გენერატორზე არ გვაქვს რეაქტიული დატვირთვის რეგულატორი და აქედან გამომდინარე აღნიშნული გარემოება არ შეესაბამება სისტემის რეალურ მართვას. დამყარებული რეჟიმების გაანგარიშებისას გენერატორების მოცემა მუდმივი რეაქტიული დატვირთვით, რიგ შემთხვევებში, აუცილებელია და, ამასთან, გენერაციის იმ კვანძებისთვის, სადაც ფიქსირებულია P_g და Q_g , საძიებელია კვანძის ძაბვის მოდული და ფაზა $U_g = \text{var}$ და $\delta_g = \text{var}$ (ანუ ძაბვის ნამდვილი და წარმოსახვით შემდგენები);

ბ) *მუდმივი აქტიური სიმძლავრე და მუდმივი სიდიდის ძაბვა* $P_g = \text{const}$, $U_g = \text{const}$. ამ შემთხვევაში საძიებელია გენერატორის რეაქტიული სიმძლავრე $Q_g = \text{var}$ და ძაბვის ფაზა $\delta_g = \text{var}$. ასეთი გენერატორი წარმოადგენს მბაბლანსებელს რეაქტიული სიმძლავრის მიხედვით. ამასთან, თუ $P_g = 0$, იგი შეესაბამება სინქრონულ კომპენსატორს, ხოლო თუ $P_g > 0$ – გენერატორს. გენერაციის კვანძში ძაბვის მოდულის ფიქსირება და რეაქტიული სიმძლავრის თავისუფლება შეესაბამება ძაბვის რეგულირების მოწყობილობის მქონე გენერატორებისა და სინქრონული კომპენსატორების მუშაობის რეალურ პირობებს;

გ) *ძაბვის მუდმივი სიდიდე და ფაზა* $U_g = \text{const}$, $\delta_g = \text{const}$. ამ შემთხვევაში გენერაციის მოცემულ კვანძში საძიებელია აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეები $P_g = \text{var}$ და $Q_g = \text{var}$. კვანძში საწყისი ინფორმაციის ამ სახეში მოცემა ნიშნავს, რომ აღნიშნული კვანძი მბაბლანსებელია როგორც აქტიური, ისე რეაქტიული სიმძლავრის მიხედვით და ბაბისურია ძაბვის მიხედვით. ასეთ კვანძს მბაბლანსებელს უწოდებენ. მბაბლანსებელი კვანძის არსებობა აუცილებელია, რადგანაც წინასწარ (რეჟიმის გაანგარიშებამდე) შეუძლებელია

მუსტად განისაზღვროს ქსელში სიმძლავრის დანაკარგი, რომელიც სისტემაში სიმძლავრის ბალანსის ერთერთი შემდგენელია.

3.14 მე-3 თავის რიცხვითი მაგალითები

მაგალითი 3.1 განესაზღვროთ 110 კვ ძაბვის ელექტროგადამცემის ხაზზე გვირგვინის წარმოაქმნის შესაძლებლობა, თუ ხაზის სადენის მარკაა AC-70/11, ფაზათაშორისი საშუალო გეომეტრიული მანძილი $D=4,0$ მ, ჰაერის ტემპერატურა $t=20^{\circ}\text{C}$, წნევა $H=760$ მმ.წყ.სტ.

დ.1 ცხრილიდან ვიღებთ $r=5,7 \cdot 10^{-3}$ მ.

ფაზის საშუალო ტევადობა (3.6)

$$C_{\text{სა}} = \frac{24,13}{\lg \frac{4,0}{5,1 \cdot 10^{-3}}} = 8,478 \text{ კუ/მ.}$$

სადენის შედაპირზე ელექტრული ველის დაძაბულობის საშუალო მნიშვნელობა (3.10)

$$E_{\text{სა}} = 1,47 \cdot 10^{-2} \frac{8,478 \cdot 110}{5,7 \cdot 10^{-3}} = 2405,7 \text{ კვ/მ.}$$

ჰაერის სიმკვრივე (3.2)

$$\delta = \frac{0,3855 \cdot 760}{270 + 20} = 1,0.$$

საერთო გვირგვინის წარმოქმნის საწყისი დაძაბულობა (3.3)

$$E_0 = 3030,10 \left(1 + \frac{0,0298}{\sqrt{5,7 \cdot 10^{-3} \cdot 1,0}} \right) = 3465,3 \text{ კვ/მ.}$$

საშუალო დაძაბულობის ფარდობითი მნიშვნელობა

$$\frac{E_{\text{სა}}}{E_0} = \frac{2405,7}{3465,3} = 0,69 < 0,9,$$

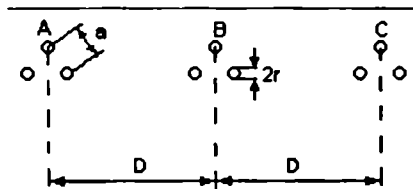
ე.ი. მოცემულ ნახაზზე საერთო გვირგვინს ადგილის არ აქვს (3.4).

მუშა ძაბვა, რომელის შემდეგ მოცემულ ხაზზე დაიწყება საერთო გვირგვინის მოვლენა (3.20)

$$U_0 = 7004,8 \cdot \frac{1,0 \cdot 1,0 \cdot 5,7 \cdot 10^{-3}}{1,0} \left(1 + \frac{0,0298}{\sqrt{1,0 \cdot 5,7 \cdot 10^{-3}}} \right) \times$$

$$\times \lg \frac{4,0}{5,7 \cdot 10^{-3}} = 158,5 \text{ კე.}$$

მაგალითი 32. განესაზღვროთ 500 კე ძაბვის ხაზზე გვირგვინის წარმოაქმნის შესაძლებლობა, თუ ფაზაში გვაქვს 3xAC-330/43 სადენები, რომელთათვის გახლეჩის ბიჯი $a = 30$ სმ, ხოლო ფაზები განლაგებულია პორიზონტალურად და მათ შორის მანძილი $D=12$ სმ (ნახ.337), პაერის ტემპერატურა $t=15^{\circ}\text{C}$, წნევა $H=750$ მმ ვ.წყსვ.



ნახ. 337. 500 კე ძაბვის ხაზზე სადენთა განლაგების სქემა

დ.1 ცხრილიდან ვიღებთ $r=12,6 \cdot 10^{-3}$ მ.

ფაზებს შორის საშუალოგეომეტრიული მანძილი (3.7)

$$D_{\text{საშ}} = \sqrt[3]{12 \cdot 12 \cdot 24} = 15,12 \text{ მ.}$$

გახლეჩილი ფაზის ეკვივალენტური რადიუსი (3.12 ბ)

$$r_{\text{კვ}} = \sqrt[3]{12,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3^2} = 0,10432 \text{ მ.}$$

ფაზის ელექტრული ველის საშუალო დაძაბულობა (3.15)

$$E_{\text{საშ}} = \frac{0,3457 \cdot 500}{3 \cdot 12,6 \cdot 10^{-3} \cdot \lg \frac{15,12}{0,1043}} = 2170,9 \text{ კვ/მ.}$$

ბ კოეფიციენტი ავიღოთ 32. ცხრილიდან

$$\beta=3,48.$$

დაძაბულობის უთანაბრობის კოეფიციენტი (3.13)

$$K = 1 + 3,48 \cdot \frac{12,6 \cdot 10^{-3}}{0,3} = 1,146.$$

დაძაბულობის ეკვივალენტური მნიშვნელობა (3.17)

$$E_{\text{აბ}} = \frac{1 + 1,146 \cdot 2170,9}{2} = 2329,4 \text{ კვ/მ.}$$

პაერის სიმკერვე (32)

$$\delta = \frac{0,3855 \cdot 750}{273 + 15} = 1,0039.$$

საერთო გვირგვინის წარმოქმნის საწყისი დაძაბულობა (33)

$$E_0 = 3030 \cdot 0,82 \cdot 1,0039 \left(1 + \frac{0,0298}{\sqrt{12,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1,0039}} \right) = 3155 \text{ კვ/მ.}$$

ეკვივალენტური დაძაბულობის ფარდობითი მნიშვნელობა

$$\frac{E_{\text{საშ}}}{E_0} = \frac{2329,4}{3155} = 0,74 < 0,9.$$

ამრიგად, მოცემულ ხაზზე საერთო გვირგვინის მოვლენას ადგილი არ აქვს.

ძაბვის მინიმალური მნიშვნელობა, რომლის შემდეგ მოცემულ ხაზზე დაიწყება საერთო გვირგვინი (320)

$$U_0 = 70004,8 \cdot \frac{1,0039 \cdot 3 \cdot 12,6 \cdot 10^{-3}}{1,146} \left(1 + \frac{0,0298}{\sqrt{12,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1,0039}} \right) \times$$

$$\times \lg \frac{15,12}{0,1043} = 634,4 \text{ კვ.}$$

$U_0 > U_{\text{გვკ}}$, საერთო გვირგვინს ადგილი არ აქვს.

მაგალითი 3.3. განესაზღვროთ სიმძლავრისა და ენერგიის დანაკარგები 3.1. და 3.2. მაგალითებში განხილულ ხაზებზე, თუ განსახილველი ხაზების გრასა გადის იმ რეგიონში, რომელიც ხასიათდება 3.3. ცხრილში ნაჩვენები ამინდის ფარდობითი ხანგრძლივობით.

1. $U_6=110$ კვ; სადენი AC-70/11; $r=0,57$ სმ

$F_{\text{საშ}}/E_0=24,05/34,65=0,69$ აქედან გამომდინარე 3.4 ნახაზიდან $\theta_1=0,08$; $\theta_2=0,27$; $\theta_3=1,0$; $\theta_4=3,0$.

სიმძლავრის დანაკარგები (325)

$$\Delta P_{\text{გაო}} = 3 \cdot 1 \cdot 0,57^2 (0,826 \cdot 0,08 + 0,091 \cdot 0,27 + 0,057 \cdot 1,0 + 0,026 \cdot 3,0) = 0,224 \text{ კვტ/კმ.}$$

ენერგიების დანაკარგები (326)

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{გაო}} = 0,224 \cdot 8760 = 1962,1 \text{ კვტს/კმ.}$$

2. $U_0=500$ კვ; სადენი $3 \times AC-330/43$; $r=1,26$ სმ; $E_{\text{საფ}}=21,71$ კვ/სმ;
 $K=1,146$; $E_0=31,55$ კვ/სმ.

განვსაზღვროთ ელექტრული ველის ეკვივალენტური დაძაბულობა (3.17)

$$E_{\text{კვ}} = \frac{1+1,146}{2} \cdot 21,71 = 23,29 \text{ კვ/სმ}$$

ფარდობა

$$E_{\text{კვ}} / E_0 = \frac{23,29}{31,55} = 0,74.$$

3.4. ნახაზიდან $\theta_1=0,13$; $\theta_2=0,45$; $\theta_3=1,5$; $\theta_4=4,3$.

სიმძლავრის დანაკარგები (3.25)

$$\Delta P_{\text{კვ}} = 3 \cdot 3 \cdot 1,26^2 (0,826 \cdot 0,13 + 0,091 \cdot 0,45 + 0,057 \cdot 1,5 + 0,026 \cdot 4,3) =$$

$$= 4,9 \text{ კვტ.სთ/კმ}$$

ენერგიის დანაკარგები (3.26)

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{კვ}} = 4,9 \cdot 8760 = 42924 \text{ კვტსთ/კმ.}$$

მაგალითი 3.4. განვსაზღვროთ 35 კვ ძაბვის ხაზის ელექტრული პარამეტრები. სადენის მარკა AC-50/8; ხაზის სიგრძე $\ell = 20$ კმ; ფაზებს შორის საშუალო გეომეტრიული მანძილი $D_{\text{საშ.გ.}}=2,5$ მ. გარემოს ტემპერატურა $+10^\circ\text{C}$. ატმოსფერული წნევა $H=760$ მმ.ვ.წყ.სვ.

1. აქტიური წინაღობა:

სადენის კუთრი საანგარიშო წინაღობა (3.28)

$$\rho = 32[1 + 0,004(10 - 20)] = 30,72 \frac{\text{ომი} \cdot \text{მმ}^2}{\text{კმ}}.$$

ხაზის აქტიური წინაღობა (3.33)

$$R = 30,72 \cdot \frac{20}{50} = 12,29 \text{ ომი}$$

2. რეაქტიული წინაღობა:

დ.1 ცხრილიდან სადენის რადიუსი $r=4,8$ მმ.

1 კმ სიგრძის რეაქტიული წინაღობა (3.39)

$$x_0 = 0,1441 \text{ გ} \frac{2500}{4,8} + 0,016 = 0,408 \text{ ომი/კმ}$$

ხაზის რეაქტიული წინაღობა (3.42)

$$X=0,408 \cdot 20=8,14 \text{ ომი}$$

3. აქტიური გამტარობა:

პაერის სიმკვრივე (3.2)

$$\delta = \frac{0,3855 \cdot 760}{273 + 10} = 1,035$$

სადენის ზედაპირზე ელექტრული ველის დაძაბულობის საშუალო მნიშვნელობა (3.15)

$$E_{\text{სა}} = \frac{0,3547 \cdot 35}{1 \cdot 4,8 \cdot 10^{-3} \lg \frac{2500}{4,8}} = 952,4. \text{ კვ/მ}$$

რადგანაც $952,4 < 1700 + 1900$ (§3.1), მოცემულ ხაზზე გვირგვინზე სიმძლავრის დანაკარგს ადგილი არ აქვს და $\Delta P_{\text{სა}} = 0$. მამასადაშე ხაზის აქტიური გამტარობა (3.43) $G_0 = 0$.

4. რეაქტიული გამტარობა:

1კმ სიგრძის ხაზის რეაქტიული გამტარობა (3.47)

$$b_0 = \frac{7,58}{2500} \cdot 10^{-6} = 2,79 \cdot 10^{-6}. \text{ სიმ/კმ}$$

ხაზის გამტარობა (3.48)

$$B = 2,79 \cdot 10^{-6} \cdot 20 = 55,8 \cdot 10^{-6} \text{ სიმ}$$

5. ხაზის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე (3.49)

$$\Delta Q_C = 35^2 \cdot 55,8 \cdot 10^{-6} = 0,068 \text{ მგვარ} = 68 \text{ კვარ}.$$

6. ხაზის ეკონომიკური დატვირთვა 1,1 ა/მმ² დენის სიმკვრივის დროს

$$S_{\text{ა}} = \sqrt{3} \cdot 35 \cdot 50 \cdot 1,1 = 3330 \text{ კვარ} = 3,33 \text{ მგვარ}.$$

7. გენერირებული სიმძლავრის უარდობითი მნიშვნელობა

$$\frac{\Delta Q_C}{S_{\text{ა}}} = \frac{68}{3300} = 0,0205 \text{ ანუ } 2,05\%$$

8. ხაზის ტალღური წინაღობა (3.53)

$$Z_C = \sqrt{0,408 / 2,79 \cdot 10^{-6}} = 382,4 \text{ ომი}$$

9. ხაზის გამტარუნარიანობა (3.52)

$$P_{\text{სა}} = \frac{35^2}{382,4} = 3,2 \text{ მგვტ}$$

მაგალითი 3.5. განვსაზღვროთ 220კვ ძაბვის ხაზის ელექტრული პარამეტრები. სადენის მარკა AC-400/93, ხაზის სიგრძე $\ell = 100$ კმ; ფაზებს შორის საშუალოგეომეტრიული მანძილი $D_{\text{საშ.გ.}} = 6,0$ მ. გარემოს ტემპერატურა $t = +30^\circ\text{C}$. ატმოსფერული წნევა $H = 760$ მმ.ვ.წყ.სე.

1. აქტიური წინაღობა:

$$\rho = 32[1 + 0,004(30 - 20)] = 33,28 \frac{\text{ომი} \cdot \text{მმ}^2}{\text{კმ}}$$

ხაზის აქტიური წინაღობა (3.33)

$$R = 33,28 \cdot \frac{100}{400} = 8,32 \text{ ომი}$$

2. რეაქტიული წინაღობა:

დ.1 ცხრილიდან სადენის რადიუსი $r = 14,55$ მმ.

1 კმ სიგრძის ხაზის რეაქტიული წინაღობა (3.39)

$$x_0 = 0,1441 \lg \frac{6000}{14,55} + 0,016 = 0,393 \text{ ომი/კმ}$$

ხაზის რეაქტიული წინაღობა (3.42)

$$X = 0,393 \cdot 100 = 39,3 \text{ ომი}$$

3. აქტიური გამტარობა:

პაერის სიმკვრივე (3.2)

$$\delta = \frac{0,3855 \cdot 760}{273 + 30} = 0,967$$

სადენის ზედაპირზე ელექტრული ველის დაძაბულობის საშუალო მნიშვნელობა (3.15)

$$E_{\text{საშ}} = \frac{0,3547 \cdot 220}{1 \cdot 14,55 \cdot 10^{-3} \lg \frac{6000}{14,55}} = 2050,7 \text{ კვ/მ}$$

საერთო გვირგვინის წარმოქმნის საწყისი დაძაბულობა (3.3)

$$E_0 = 3030 \cdot 0,82 \cdot 0,967 \left(1 + \frac{0,0298}{\sqrt{14,55 \cdot 10^{-3} \cdot 0,967}} \right) = 3006,2 \text{ კვ/მ}$$

$$\frac{E_{\text{საშ}}}{E_0} = \frac{2050,7}{3006,2} = 0,68$$

ამინდის ჯგუფების ფარდობითი მნიშვნელობები ავიღოთ 3.3 ცხრილის მიხედვით: $\Psi_1 = 0,826$; $\Psi_2 = 0,091$; $\Psi_3 = 0,057$; $\Psi_4 = 0,026$.

გვირგვინზე დანაკარგების განზოგადოებული პარამეტრი θ_i დაეადგინოთ 3.4 ნახაზზე მოცემული მრუდეების მიხედვით:

$$\theta_1=0,08; \theta_2=0,25; \theta_3=1,0; \theta_4=3,0 \frac{\text{კმბ}}{\text{კმ.სმ}^2}$$

გვირგვინზე სიმძლავრის დანაკარგები (3.25)

$$\Delta P_{\text{საშ}} = 3 \cdot 1 \cdot 1,455^2 (0,826 \cdot 0,08 + 0,091 \cdot 0,25 + 0,057 \cdot 1,0 + 0,026 \cdot 3,0) = 1,42 \text{ კეგ/კმ.}$$

ხაზში გვირგვინზე ჯამური დანაკარგები

$$\Delta P_{\text{სა}} = 1,42 \cdot 100 = 142 \text{ კეგ} = 0,142 \text{ მგეგ}$$

1 კმ ხაზის აქტიური გამტარობა (3.43)

$$g_0 = \frac{1,42 \cdot 10^{-3}}{220^2} = 0,294 \cdot 10^{-7} \text{ სიმ/კმ}$$

ხაზის აქტიური გამტარობა (3.44)

$$G=0,294 \cdot 10^{-7} \cdot 100=2,94 \cdot 10^{-6} \text{ სიმ.}$$

4. რეაქტიული გამტარობა:

1 კმ სიგრძის ხაზის რეაქტიული გამტარობა (3.47)

$$b_0 = \frac{7,58}{\lg \frac{6000}{14,55}} \cdot 10^{-6} = 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ სიმ/კმ.}$$

ხაზის რეაქტიული გამტარობა (3.48)

$$B=2,9 \cdot 10^{-6}=290 \cdot 10^{-6} \text{ სიმ.}$$

5. ხაზის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე (3.49)

$$\Delta Q_c = 220^2 \cdot 290 \cdot 10^{-6} = 14,04 \text{ მგეგარ.}$$

6. ხაზის ეკონომიკური დატვირთვა 1,1 ა/მმ² დენის სიმკერძის დროს

$$S_{\text{კ}} = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 400 \cdot 1,1 = 167464 \text{ კვარ} = 167,46 \text{ მგვა.}$$

7. გენერირებული სიმძლავრის ფარდობითი მნიშვნელობა

$$\frac{\Delta Q_c}{S_{\text{ა}}} = \frac{14,04}{167,46} = 0,0838 \text{ ანუ } 8,38\%.$$

8. ხაზის ტალღური წინაღობა (3.53)

$$Z_c = \sqrt{0,393/2,9 \cdot 10^{-6}} = 368,1 \text{ ომი}$$

9. ხაზის ნატურალური სიმძლავრე (3.52)

$$P_{\text{ნა}} = \frac{220^2}{368,1} = 131,5 \text{ მგვტ.}$$

მაგალითი 3.6. განესაზღვროთ 32 და 33 მაგალითებში განხილული 500 კვ ძაბვის ხაზის ელექტრული პარამეტრები. სადენის მარკა 3xAC-330/43; ხაზის სიგრძე $\ell = 600$ კმ; სადენის რადიუსი $r=12,6 \cdot 10^{-3}$ მ, ფაზის გახლეჩის ბიჯი $a = 30$ სმ; გარემოს ტემპერატურა $+15^{\circ}\text{C}$. ატმოსფერული წნევა $H=750$ მმ.ვ.წყ.სვ. ფაზები განლაგებულია ჰორიზონტალურად და ფაზათაშორისი სამუქლო გეომეტრიული მანძილი $D_{\text{საშ.}}=15,12$ მ.

1. აქტიური წინაღობა:

$$\rho = 32[1 + 0,004(15 - 20)] = 31,36 \frac{\text{ომი} \cdot \text{მმ}^2}{\text{კმ}}.$$

ხაზის აქტიური წინაღობა (3.33)

$$R = 31,36 \cdot \frac{600}{3 \cdot 330} = 19,02 \text{ ომი}$$

2. რეაქტიული წინაღობა:

ფაზის ეკვივალენტური რადიუსი (3.12 ბ)

$$r_{\text{აა}} = \sqrt[3]{1,26 \cdot 30^2} = 10,43 \text{ სმ}$$

1 კმ სიგრძის რეაქტიული წინაღობა (3.41)

$$x_0 = 0,1441g \frac{1512}{10,43} + \frac{0,016}{3} = 0,316 \text{ ომი/კმ}$$

ხაზის რეაქტიული წინაღობა (3.42)

$$X=0,316 \cdot 600=186,8 \text{ ომი}$$

3. აქტიური გამტარობა:

3.3. მაგალითის მიხედვით მივიღეთ, რომ $\Delta P_{\text{გთ}}=4,9$ კვტ/კმ.

ხაზში სიმძლავრის ჯამური დანაკარგები

$$\Delta P_{\text{გთ}}=4,9 \cdot 600=2940 \text{ კვტ}=2,49 \text{ მგვტ}$$

1 კმ ხაზის აქტიური გამტარობა (3.43)

$$g_0 = \frac{4,9 \cdot 10^{-3}}{500^2} = 0,196 \cdot 10^{-7} \text{ სიმ/კმ}$$

ხაზის აქტიური გამტარობა (3.44)

$$G=0,196 \cdot 10^{-7} \cdot 600=11,80 \cdot 10^{-6} \text{ სიმ.}$$

4. რეაქტიული გამტარობა:

1 კმ სიგრძის ხაზის რეაქტიული გამტარობა (3.47)

$$b_0 = \frac{7,58}{1512} \cdot 10^{-6} = 3,507 \cdot 10^{-6} \text{ სიმ/კმ.}$$

$$\lg \frac{1512}{10,43}$$

ხაზის რეაქტიული გამტარობა (3.48)

$$B=3,507 \cdot 10^{-6} \cdot 600=2104,3 \cdot 10^{-6} \text{ სიმ.}$$

5. ხაზის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე (3.49)

$$\Delta Q_c = 500^2 \cdot 2104,3 \cdot 10^{-6} = 526,08 \text{ მგვარ.}$$

6. ხაზის ეკონომიკური დატვირთვა 1,1 ა/მმ² ღენის სიმკვერივის დროს

$$S_{\text{კვ}} = \sqrt{3} \cdot 500 \cdot (3 \cdot 330) \cdot 1,1 = 941985 \text{ კვარ} = 941,99 \text{ მგვა.}$$

7. გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრის ფარდობითი მნიშვნელობა

$$\frac{\Delta Q_c}{S_{\text{კვ}}} = \frac{526,08}{941,99} = 0,558 \text{ ანუ } 55,8\%.$$

8. ხაზის ტალღური წინაღობა (3.53)

$$Z_c = \sqrt{0,316 / 3,507 \cdot 10^{-6}} = 300,2 \text{ ომი}$$

9. ხაზის ნატურალური სიმძლავრე (3.52)

$$P_{\text{ნატ}} = \frac{500^2}{300,2} = 832,8 \text{ მგვტ.}$$

მაგალითი 3.7. გამოთვალეთ ТРДН-40000/110 ორგრაგნილა გრანსფორმატორის საანგარიშო ელექტრული პარამეტრები.

დ-52 ცხრილიდან ავიღოთ მოცემული გრანსფორმატორის სა-
პასპორტო მონაცემები:

$$S_{\text{н}}=40000 \text{ კვა; } U_{\text{ა.н.}}=115 \text{ კე; } U_{\text{л.н.}}=210,5 \text{ კე; } U_{\text{а.а.}}\%=10,5;$$

$$\Delta P_{\text{а.а.}}=172 \text{ კვტ; } \Delta P_{\text{კ.н.}}=36 \text{ კვტ; } I_{\text{კ.н.}}\%=0,65.$$

(3.58) გამოსახულების თანახმად

$$\Delta Q_{\text{კ.н.}}=40000 \cdot 0,65 \cdot 10^{-2}=260 \text{ კვა.}$$

ანალოგიურად (გამოსახულება (3.62))

$$\Delta Q_{\text{а.а.}}=40000 \cdot 10,5 \cdot 10^{-2}=4200 \text{ კვარ.}$$

მამასადაბე (3.65), (3.66), (3.68) და (3.69) გამოსახულებების მიხედვით, გვაქვს

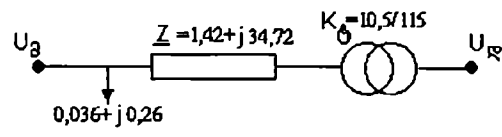
$$G_{\delta} = \frac{36}{115^2} \cdot 10^{-3} = 2,72 \cdot 10^{-6} \text{ სიმ};$$

$$B_{\delta} = \frac{260}{115^2} \cdot 10^{-3} = 19,66 \cdot 10^{-6} \text{ სიმ};$$

$$R_{\delta} = \frac{172 \cdot 115^2}{40000^2} \cdot 10^{-3} = 1,42 \text{ ომი};$$

$$X_{\delta} = \frac{4200 \cdot 115^2}{40000^2} \cdot 10^{-3} = 34,72 \text{ ომი};$$

(3.22) ნახამის შესაბამისად შევადგინოთ ჩანაცვლების გამარტივებული საანგარიშო სქემა (ნახ.3.38).



ნახ. 3.38.

მაგალითი 3.8. გამოთვალოთ ТДТН-25000/110 სამგრადნილა ტრანსფორმატორის საანგარიშო ელექტრული პარამეტრები.

დ.6-1 ცხრილიდან ავიღოთ მოცემული ტრანსფორმატორის საპასპორტო მონაცემები:

$$S_{\Sigma} = 25000 \text{ კვა}; \quad U_{\text{გ.н.}} = 115 \text{ კვ}; \quad U_{\text{ს.н.}} = 38,5 \text{ კვ}; \quad U_{\text{ღ.н.}} = 11 \text{ კვ};$$

$$U_{\text{გ.г.}} \% = 10,5; \quad U_{\text{გ.л.}} \% = 17,0; \quad U_{\text{გ.л.}} \% = 6,0;$$

$$\Delta P_{\text{გ.г.}} = 140 \text{ კვტ}; \quad \Delta P_{\text{ს.н.}} = 31 \text{ კვტ}; \quad I_{\text{კ.н.}} \% = 0,7.$$

(3.58) გამოსახულების თანახმად

$$\Delta Q_{\text{კ.н.}} = 25000 \cdot 0,7 \cdot 10^{-2} = 175 \text{ კვარ.}$$

(3.75) გამოსახულების მიხედვით

$$R_{\text{გ(г)}} = R_{\text{გ(л)}} = R_{\text{გ(л)}} = \frac{140 \cdot 115^2}{2 \cdot 25000^2} \cdot 10^3 = 1,5 \text{ ომი}$$

(3.81) გამოსახულების მიხედვით

$$U_{\text{გ(г)}} \% = \frac{1}{2} (10,5 + 17,5 - 6,5) = 10,75$$

$$U_{\text{გ(ს)}} \% = \frac{1}{2}(10,5 + 6,5 - 17,5) = -0,25 = 0$$

$$U_{\text{გ(ლ)}} \% = \frac{1}{2}(17,5 + 6,5 - 10,5) = 6,75$$

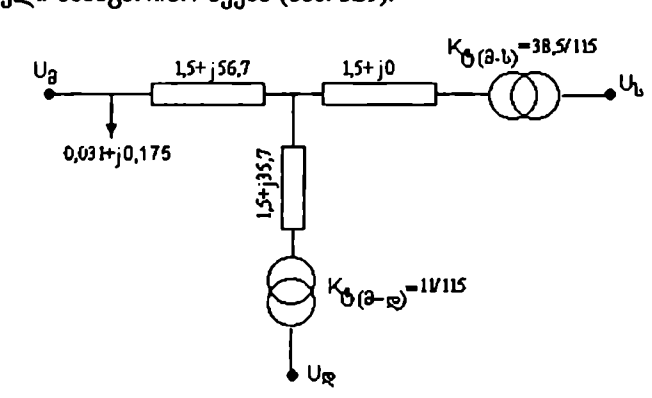
შესაბამისად, (3.82)-ის მიხედვით გვაქვს

$$X_g = \frac{10,75 \cdot 115^2}{25000} \cdot 10 = 56,68 \text{ ომი}$$

$$X_l = 0$$

$$X_{\text{გ}} = \frac{6,75 \cdot 115^2}{25000} \cdot 10 = 35,71 \text{ ომი}$$

3.23 ნახაზის შესაბამისად შევადგინოთ ჩანაცვლების გამარტივებული საანგარიშო სქემა (ნახ. 3.39).



ნახ. 3.39

მაგალითი 3.9. გამოთვალეთ ატმ-125000/220/110 ავტოტრანსფორმატორის საანგარიშო ელექტრული პარამეტრები.

დ-62 ცხრილიდან ავიღოთ მოცემული ავტოტრანსფორმატორის საპასპორტო მონაცემები:

$$S_{\text{გ}} = S_{\text{ს}} = 125000 \text{ კვა; } S_{\text{დ.გ}} = 62500 \text{ კვა;}$$

$$U_{\text{გ}} = 230 \text{ კვ; } U_{\text{ს}} = 121 \text{ კვ; } U_{\text{დ.გ}} = 11 \text{ კვ;}$$

$$U_{\text{გ(გ-ს)}} \% = 11; U_{\text{გ(გ-ლ)}} \% = 31; U_{\text{გ(ს-ლ)}} \% = 19.$$

$$\Delta P_{\text{გ(გ-ს)}} = 290 \text{ კვტ; } \Delta P_{\text{ს}} = 85 \text{ კვტ; } I_{\text{კ}} \% = 0.5.$$

(3.58) გამოსახულების თანახმად

$$\Delta Q_{\text{ს}} = 125000 \cdot 10,5 \cdot 10^{-2} = 625 \text{ კვარ.}$$

(3.79) და (3.80) გამოსახულებათა შესაბამისად გვაქვს

$$R_{\delta(გ)} = R_{\delta(ს)} = \frac{290 \cdot 230^2}{2 \cdot 125000^2} \cdot 10^3 = 0,5 \text{ ომი}$$

$$R_{\delta(ლ)} = 0,05 \cdot \frac{125000}{62500} = 1,0 \text{ ომი}$$

(3.81) გამოსახულების მიხედვით

$$U_{\Sigma(გ)} \% = \frac{1}{2} (11 + 31 - 19) = 11,5;$$

$$U_{\Sigma(ს)} \% = \frac{1}{2} (11 + 19 - 31) = -0,5 = 0;$$

$$U_{\Sigma(ლ)} \% = \frac{1}{2} (31 + 19 - 11) = 19,5.$$

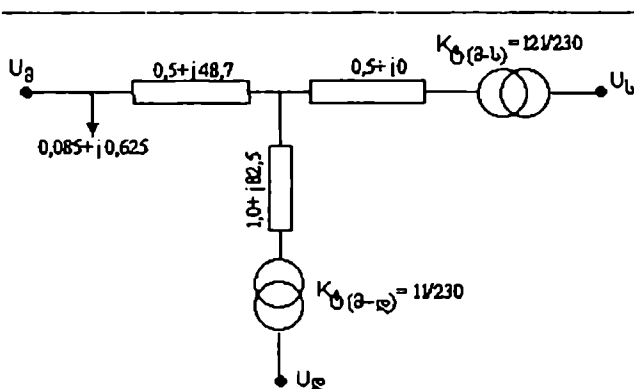
შესაბამისად (3.82) გამოსახულების მიხედვით გვაქვს

$$X_g = \frac{11,5 \cdot 230^2}{125000} \cdot 10 = 48,7 \text{ ომი}$$

$$X_l = 0$$

$$X_{\Sigma} = \frac{19,5 \cdot 230^2}{125000} \cdot 10 = 82,5 \text{ ომი}$$

3.23 ნახაზის შესაბამისად შევადგინოთ ჩანაცვლების გამარტივებული საანგარიშო სქემა (ნახ. 3.40)



ნახ. 3.40

თავი 4. ელექტროგადაცემის უბნის რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება

4.1 ელექტროგადაცემის ხაზი როგორც ოთხპოლუსა

მრავალ ელექტროტექნიკურ მოწყობილობას, რომელიც ემსახურება სიგნალის ან ენერგიის გადაცემას, გააჩნია ორი შესავალი და ორი გამოსავალი მომჭერი. ასეთ მოწყობილობას ოთხპოლუსას უწოდებენ. ამასთან თუ ოთხპოლუსას გააჩნია ენერგიის შიგა წყარო, მაშინ ის აქტიურ ოთხპოლუსას წარმოადგენს. წინააღმდეგ შემთხვევაში გვაქვს პასიური ოთხპოლუსა.

ელექტროგადაცემის ხაზი პასიურ ოთხპოლუსას მიეკუთვნება, რომელსაც გააჩნია $1,1'$ შესავალი და $2,2'$ გამოსავალი მომჭერი (ნახ.4.1). შემაველ პარამეტრებს წარმოადგენს $\underline{U}_1$ ძაბვა და $\underline{I}_1$ დენი, გამომავალ პარამეტრებს კი $\underline{U}_2$ ძაბვა და $\underline{I}_2$ დენი. ეს პარამეტრები ზოგადად კომპლექსური სიდიდეებია. კომპლექსურ სიდიდეებს წარმოადგენს, აგრეთვე, თვით ოთხპოლუსას შიგა ელექტრული პარამეტრებიც: წინაღობა $\underline{Z}$ და გამტარობა $\underline{Y}$.

დენების მიმართულებები შევირჩიოთ ისე, როგორც ეს ნაჩვენებია 4.1. ნახაზზე. ამასთან შესავალ მომჭერებზე ენერგიის ნაკადის დადებითი მიმართულებაა ენერგიის წყაროდან ოთხპოლუსასკენ, ხოლო გამოსავალ მომჭერებზე – ოთხპოლუსადან მიმღებისკენ. მიმართულებათა ასეთი შერჩევა მიზანშეწონილია, რადგანაც ოთხპოლუსა განიხილება როგორც ენერგიის გადაცემის მოწყობილობა.

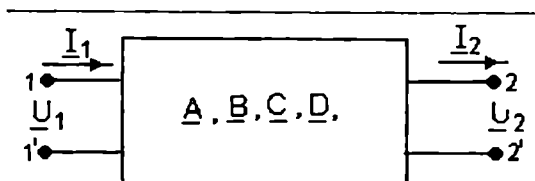
ოთხპოლუსა ზოგადად შედგება რამდენიმე დამოუკიდებელი კონტურისაგან. პირველი კონტური მოიცავს ენერგიის წყაროს და $1,1'$ შესავალ მომჭერებს, მეორე კონტური $2,2'$ მომჭერებსა და მიმღებს. დანარჩენი დამოუკიდებელი კონტურები მოთავსებულია შიგნით ოთხპოლუსაში. შესავალი მომჭერზე ძაბვა $\underline{U}_1$ განიხილება როგორც $\underline{I}_1$ დენის აღმძვრელი.

განგოლებათა სისტემა, რომელიც კავშირს ამყარებს ოთხპოლუსას შემაველ $\underline{U}_1$, $\underline{I}_1$ და გამომავალ $\underline{U}_2$, $\underline{I}_2$ სიდიდეებს შორის, ოთხპოლუსას განგოლებებს უწოდებენ. ამ განგოლებათა სისტემის ჩაწერის ყველაზე უფრო გავრცელებული ფორმაა შემდეგი:

$$\underline{U}_1 = \underline{A}\underline{U}_2 + \sqrt{3}\underline{B}\underline{I}_2 \quad (4.1)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{C}\frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}} + \underline{D}\underline{I}_2, \quad (4.2)$$

სადაც $\underline{U}_1$ და $\underline{U}_2$ - ხაზური ძაბვები თავსა და ბოლოში, კვ: I_1 , I_2 - ფაზური დენები; $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$, $\underline{D}$ - ოთხპოლუსას განზოგადოებული მუდმივები. $\underline{A}$ და $\underline{D}$ მუდმივებს არ გააჩნიათ განზომილება, ხოლო $\underline{B}$ -ს აქვს წინააღობის განზომილება და $\underline{C}$ -ს კი გამტარობის.



ნახ. 4.1 ელექტროგადაცემის ხაზი, როგორც პასიური ოთხპოლუსა.

ნებისმიერი ოთხპოლუსას შემთხვევაში, ადგილი აქვს ტოლობას

$$\underline{A} \underline{D} - \underline{B} \underline{C} = 1. \quad (4.3)$$

სიმეტრიული ოთხპოლუსას შემთხვევაში ადგილი აქვს ტოლობას

$$\underline{A} = \underline{D}. \quad (4.4)$$

ელექტროგადაცემის ხაზის, როგორც ოთხპოლუსას, განზოგადოებული მუდმივები განისაზღვრება $\underline{Z}$ და $\underline{Y}$ პარამეტრებით.

ელექტროგადაცემის განზოგადოებული მუდმივების დასადგენად განვიხილოთ ხაზის მუშაობის უქმი სელისა და მოკლე შერთვის რეჟიმები (ნახ. 3.14).

უქმი სელის რეჟიმში (ნახ. 4.2) $I_2 = 0$, მაშინ (4.1)-დან გვაქვს

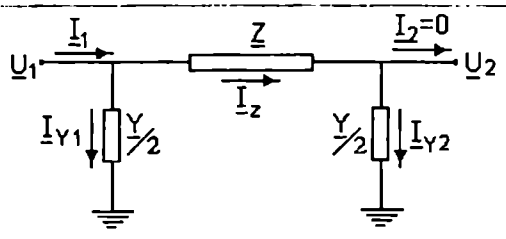
$$\underline{A} = \frac{\underline{U}_{1კ.}}{\underline{U}_{2კ.}}. \quad (4.5)$$

მამასადამე, განზოგადოებული მუდმივა $\underline{A}$ ხაზის თავსა და ბოლოში ძაბვათა ფარდობის ტოლია მისი უქმი სელის რეჟიმის დროს.

ამ რეჟიმში (4.2)-დან

$$\underline{C} = \frac{\underline{I}_{1კ.}}{\underline{U}_{2კ.} / \sqrt{3}}. \quad (4.6)$$

ე.ი. განზოგადოებული მუდმივა $\underline{C}$ ხაზის თავში დენისა და ბოლოში ძაბვის ფაზურ მნიშვნელობათა ფარდობის ტოლია უქმი სელის რეჟიმის დროს.



ნახ. 4.2 ხაზის A და C განზოგადოებული მუდმივების განსაზღვრისთვის

უქში სელის რეჟიმში ხაზის ბოლოში ჩართულ გამტარობაში გამავალი გამტარობის დენი $I_{Y2} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{Y}{2}$. ხოლო ამ დენით გამოწვეული ძაბვის ვარდნა ხაზში და, შესაბამისად, ძაბვა ხაზის თავში

$$U_1 = U_2 + \sqrt{3} I_{Y2} \cdot Z = U_2 \left(1 + \frac{ZY}{2}\right)$$

(4.5)-ის თანახმად

$$\underline{A} = 1 + \frac{ZY}{2} \quad (4.7)$$

ვიცით რა ძაბვა ხაზი თავში, განესაზღვროთ I_{Y1}

$$I_{Y1} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{Y}{2} \text{ ანუ } I_{Y1} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{Y}{2} \left(1 + \frac{ZY}{2}\right)$$

და დენი ხაზის თავში

$$I_1 = I_{Y1} + I_{Y2} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{Y}{2} \left(2 + \frac{ZY}{2}\right)$$

ანუ

$$I_1 = \frac{U_2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{Y}{2} \left(1 + \frac{ZY}{4}\right).$$

მამასადაგე (4.6)-ის თანახმად

$$\underline{C} = \underline{Y} \left(1 + \frac{ZY}{4}\right). \quad (4.8)$$

მოკლე შერთვის რეჟიმში (ნახ.4.3) $U_2 = 0$, ამიგომ (4.1)-დან გვაქვს

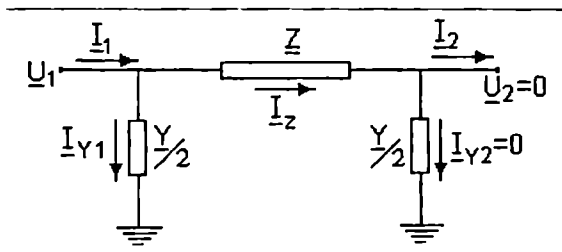
$$\underline{B} = \frac{\underline{U}_{1, \text{თ}} / \sqrt{3}}{\underline{I}_2} \quad (4.9)$$

ამრიგად, განზოგადოებული მუდმივა $\underline{B}$ ხაზის თავში ფაზური ძაბვისა და ხაზის ბოლოში დენის მნიშვნელობათა ფარდობის ტოლია მისი მოკლე შერთვის რეჟიმის დროს.

ამავე რეჟიმში (4.2)-დან

$$\underline{D} = \frac{\underline{I}_{1,33}}{\underline{I}_{2,33}} \quad (4.10)$$

ე.ი. განზოგადოებული მუდმივა $\underline{D}$ ხაზის თავსა და ბოლოში დენების მნიშვნელობათა ფარდობის ტოლია.



ნახ. 4.3 ხაზის $\underline{B}$ და $\underline{D}$ განზოგადოებული მუდმივების განსაზღვრისთვის

რადგანაც $\underline{U}_2=0$, ხაზის ბოლოში ჩართულ გამტარობაში გამავალი დენი ნულის ტოლია და ხაზის $\underline{Z}$ წინალობაში გაივლის მხოლოდ $\underline{I}_2=\underline{I}_{233}$ დენი, რომელიც გამოიწვევს ძაბვის ვარდნას ხაზის $\underline{Z}$ წინალობაში და, შესაბამისად, ხაზის თავში ძაბვა

$$\underline{U}_{133} = \sqrt{3} \underline{I}_2 \underline{Z}$$

მამასაღამე (4.9)-ის თანახმად

$$\underline{B} = \underline{Z}. \quad (4.11)$$

$\underline{U}_{133}$ ძაბვით გამოწვეული დენი ხაზის თავში ჩართულ გამტარობაში $\underline{I}_{Y1} = \frac{\underline{U}_{133}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\underline{Y}}{2} = \underline{I}_2 \frac{\underline{ZY}}{2}$

და, შესაბამისად, დენი ხაზის თავში

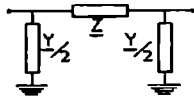
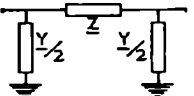
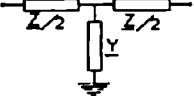
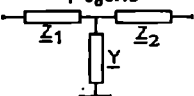
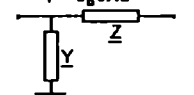
$$\underline{I}_{133} = \underline{I}_{233} + \underline{I}_{233} \frac{\underline{ZY}}{2} = \underline{I}_{233} \left(1 + \frac{\underline{ZY}}{2}\right).$$

მამასაღამე, (4.10)-ის თანახმად

$$\underline{D} = 1 + \frac{\underline{ZY}}{2}. \quad (4.12)$$

ელექტროგადაცემის განზოგადოებული მიღწევები, მისი სხვადასხვა სახის ჩანაცვლების სქემის შემთხვევებში, მოცემულია 4.1-ცხრილში.

ცხრილი 4.1 ელექტროგადაცემის განზოგადოებული შემთხვევები

ჩანაცვლების სქემის სახე	A	B	C	D
სიმეტრიული Π-სეგზი 	$1 + \frac{ZY}{2}$	Z	$Y(1 + \frac{ZY}{4})$	$1 + \frac{ZY}{2}$
არასიმეტრიული Π-სეგზი 	$1 + ZY_2$	Z	$Y_1 + Y_2 + Y_1 Y_2 Z$	$1 + ZY_1$
სიმეტრიული T-სეგზი 	$1 + \frac{ZY}{2}$	$Z(1 + \frac{ZY}{4})$	Y	$1 + \frac{ZY}{2}$
არასიმეტრიული T-სეგზი 	$1 + Z_1 Y$	$Z_1 + Z_2 + Z_1 Z_2 Y$	Y	$1 + Z_2 Y$
Γ-სეგზი 	1	Z	Y	$1 + ZY$

220კვ-მდე (ჩათვლით) ძაბვის ხაზებისთვის, რომელთა სიგრძე არ აღემატება 150კმ-ს, შეგვიძლია მივიღოთ

$$\left. \begin{aligned} \underline{A} &= \underline{D} = 1 \\ \underline{B} &= \underline{Z} \\ \underline{C} &= \underline{Y} \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

ამ შემთხვევაში ანგარიშებში ცდომილება არ აღემატება 1%-ს.

4.2 ხაზის რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშების ამოცანები

ოთხპოლუსას განგოლებათა სისტემა (4.1) და (4.2) შეიცავს ხაზის მუშაობის რეჟიმის ოთხ პარამეტერს $\underline{U}_1$, $\underline{I}_1$, $\underline{U}_2$ და $\underline{I}_2$, ხოლო განგოლებათა რიცხვი კი ორია. ე.ი. ამ სისტემას ცალსახა ამონახსნი რომ გააჩნდეს, საჭიროა რეჟიმის ამ ოთხი პარამეტრიდან ცნობილი (მოცემული) იყოს რომელიმე ორი. იმისდა მიხედვით, თუ რეჟიმის რომელი ორი პარამეტრი იქნება მოცემული, გვექნება ხაზის მუშაობის რეჟიმის გაანგარიშების შემდეგი ოთხი ამოცანა:

1) ცნობილია ძაბვა და დენი ხაზის ბოლოში $\underline{U}_2$ და $\underline{I}_2$. უნდა განისაზღვროს ძაბვა და დენი შესაყალზე ანუ ხაზის თავში $\underline{U}_1$ და $\underline{I}_1$;

2) ცნობილია ძაბვა და დენი ხაზის თავში $\underline{U}_1$ და $\underline{I}_1$. უნდა განისაზღვროს ძაბვა და დენი ხაზის ბოლოში $\underline{U}_2$ და $\underline{I}_2$;

3) ცნობილია დენი ხაზის თავში $\underline{I}_1$ და ძაბვა ბოლოში $\underline{U}_2$. უნდა განისაზღვროს ძაბვა თავში $\underline{U}_1$ და დენი ბოლოში $\underline{I}_2$;

4) ცნობილია დენი ხაზის ბოლოში $\underline{I}_2$ და ძაბვა ხაზის თავში $\underline{U}_1$. უნდა განვსაზღვროთ ძაბვა ხაზის ბოლოში $\underline{U}_2$ და დენი თავში $\underline{I}_1$.

ყველა ეს ამოცანა ელექტროგადაცემისთვის პრაქტიკულად დამახასიათებელია. გაანგარიშების პირველ ამოცანას უწოდებენ „რეჟიმის გაანგარიშება ბოლოს მონაცემებით“, ხოლო მეორე ამოცანას - „რეჟიმის გაანგარიშება თავის მონაცემებით“. მესამე და მეოთხე შერეული მონაცემების ამოცანებია.

პირველი ამოცანის ამონახსნი მოცემულია (4.1) და (4.2) განგოლებათა სისტემის სახით.

მეორე ამოცანის ამოხსნისთვის (4.1) განგოლება გავამრავლოთ $\underline{D}$ -ზე, ხოლო (4.2) განგოლება კი $\sqrt{3}\underline{B}$ -ზე, გვაქვს

$$\left. \begin{aligned} \underline{DU}_1 &= \underline{ADU}_2 + \sqrt{3}\underline{DBI}_2 \\ \sqrt{3}\underline{BI}_1 &= \underline{BCU}_2 + \sqrt{3}\underline{DBI}_2 \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

პირველს გამოვაკლოთ მეორე და გავითვალისწინოთ (4.3) მივიღებთ

$$\underline{U}_2 = \underline{DU}_1 - \sqrt{3}\underline{BI}_1. \quad (4.15)$$

შევიტანოთ ეს (4.1)-ში, გვექნება

$$\underline{U}_1 = \underline{ADU}_1 - \sqrt{3}\underline{ABI}_1 + \sqrt{3}\underline{BI}_2.$$

ანუ

$$\sqrt{3}\underline{BI}_2 = \underline{U}_1(1 - \underline{AD}) + \sqrt{3}\underline{BAI}_1.$$

(4.3)-ის გათვალისწინებით გვაქვს

$$\sqrt{3}\underline{BI}_2 = -\underline{BCU}_1 + \sqrt{3}\underline{BAI}_1.$$

$$I_2 = \underline{A}I_1 - \underline{C}\frac{U_1}{\sqrt{3}} \quad (4.16)$$

(4.15) და (4.16) გვაძლევს მეორე ამოცანის ამოხსნას.

მესამე ამოცანის ამოხსნისთვის ანალოგიური ანგარიშებით ეღებულობთ

$$I_2 = \frac{1}{\underline{D}} \left(I_1 - \underline{C}\frac{U_2}{\sqrt{3}} \right) \quad (4.17)$$

$$\underline{U}_1 = \frac{1}{\underline{D}} (\underline{U}_2 + \sqrt{3}\underline{B}I_1) \quad (4.18)$$

მეოთხე ამოცანის ამოხსნისთვის გვაქვს

$$\underline{U}_2 = \frac{1}{\underline{A}} (\underline{U}_1 - \sqrt{3}\underline{B}I_2) \quad (4.19)$$

$$I_1 = \frac{1}{\underline{A}} \left(\underline{C}\frac{U_1}{\sqrt{3}} + I_2 \right) \quad (4.20)$$

ვიცით რა ოთხპოლუსას შესავალსა და გამოსავალზე ძაბვები და ღენები, განესაზღვრავთ სიმძლავრეს ხაზის თავსა და ბოლოში და სიმძლავრის დანაკარგებს ხაზში:

სიმძლავრე ხაზის თავში

$$\underline{S}_1 = \sqrt{3}\underline{U}_1 I_1^* \quad (4.21)$$

სიმძლავრე ხაზის ბოლოში

$$\underline{S}_2 = \sqrt{3}\underline{U}_2 I_2^* \quad (4.22)$$

სიმძლავრის ჯამური დანაკარგი ხაზში

$$\Delta \underline{S} = \underline{S}_1 - \underline{S}_2, \quad (4.23)$$

ანუ

$$\Delta P = P_1 - P_2, \text{ და } \Delta Q = Q_1 - Q_2. \quad (4.24)$$

ელექტროგადაცემა, როგორც ფიზიკური მოწყობილობა, ხასიათდება მუშაობის მარგი ქმედების კოეფიციენტით

$$\eta\% = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100. \quad (4.25)$$

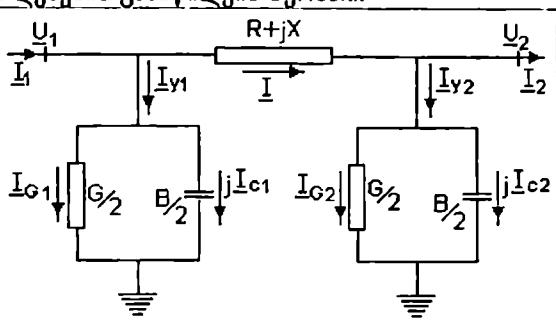
4.3. ელექტროგადაცემის რეჟიმის გაანგარიშება

დატვირთვის ღენის მიხედვით

ელექტროგადაცემის რეჟიმის ვექტორული დიაგრამის აგება და ანალიზი ჩაუატაროთ რეჟიმის გაანგარიშების პირველი ამოცა-

ნის მიხედვით ანუ როცა ცნობილია ხაზის ბოლოს მონაცემები $\underline{U}_2$ და $\underline{I}_2$ და უნდა განისაზღვროს თავის მონაცემები $\underline{U}_1$ და $\underline{I}_1$.

ზოგადობისთვის ჩავთვალოთ, რომ ხაზს გააჩნია როგორც გრძივი R, X , ასევე განივი ელექტრული პარამეტრები G, B და ხაზის ჩანაცვლების სქემას აქვს 4.4. ნახაზზე წარმოდგენილი სახე, სადაც ნაჩვენებია დენების განაწილის სურათი.



ნახ. 4.4 ელექტროგადაცემის ხაზში დენების განაწილების სურათი

ხაზის ბოლოში $\underline{U}_2$ ძაბვის ვექტორი მიემართოთ ნამდვილ რიყხეთა ღერძის გასწვრივ, მაშინ $\underline{U}_2 = U_2$. დაგვირთვის $\underline{I}_2$ დენის ვექტორი $\underline{U}_2$ ვექტორს ჩამორჩება φ_2 კუთხით (იგულისხმება, რომ $\underline{I}_2$ დაგვირთვის დენის რეაქტიული შემდგენი ინდუქტიური ხასიათისაა). $\underline{U}_2$ ძაბვით ვიპოვით ხაზის ბოლოში ჩართულ გამგარობაში გამავალ გამგარობის დენს

$$\underline{I}_{Y2} = \underline{I}_{G2} + j\underline{I}_{C2} = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{G + jB}{2},$$

სადაც

$$\underline{I}_{G2} = \frac{\underline{U}_2}{2\sqrt{3}} \cdot G - \text{გამგარობის დენის აქტიური შემდგენი};$$

$$\underline{I}_{C2} = \frac{\underline{U}_2}{2\sqrt{3}} \cdot B - \text{გამგარობის დენის რეაქტიული გევაღური}$$

შემდგენი.

$\underline{I}_{G2}$ ფაზით ემთხვევა $\underline{U}_2$ ძაბვას, ხოლო $\underline{I}_{C2}$ წინ უსწრებს მას 90° -ით (ნახ. 4.5).

ხაზში გამავალი დენი

$$\underline{I} = \underline{I}_2 + \underline{I}_{Y2} = \underline{I}_2 + \underline{I}_{G2} + j\underline{I}_{C2}.$$

როგორც ღიაგრაშიდან ჩანს ხაზის გამგარობის ღენის გევა-
დური შემდგენი გარკვეულწილად აკომპენსირებს დატვირთვის ღე-
ნის რეაქტიულ ინდუქტიურ შემდგენს

$$I_K = I_{2K} - I_{C2}$$

კომპენსაციის შემდეგ, რიგ შემთხვევაში, ხაზში ღენი შეიძლე-
ბა დატვირთვის ღენზე უფრო ნაკლები აღმოჩნდეს. ამას, განსაკუთ-
რებით, ადგილი აქვს მაღალი და შემადალი ძაბვის ხაზებში. იმ შემ-
თხვევებში, როცა ხაზის აქტიური გამგარობა ნულის გოლია, ხაზში
ღენი მოდულით ყოველთვის დატვირთვის ღენზე ნაკლებია.

ხაზში გამავალი ღენის თოთოული შემდგენი (დატვირთვის
და გამგარობის ღენი) იწვევს ხაზის R და X წინაღობებში ძაბვის
ვარდნას

$$\Delta \underline{U} = \sqrt{3} \underline{I} \underline{Z} = \sqrt{3} \underline{I}_2 \underline{Z} + \sqrt{3} \underline{I}_Y \underline{Z}$$

აქტიურ წინაღობაში ძაბვის ვარდნის ვექტორი მიმართულე-
ბით ემთხვევა შესაბამისი ღენის ვექტორს, ხოლო რეაქტიულ წინა-
ღობაში კი წინ უსწრებს მას 90°-ით. ძაბვის ვარდნის ცალკეულ ვექ-
ტორთა სიდიდე გამოითვლება ცნობილი ფორმულებით:

$$\sqrt{3} I_2 R; \sqrt{3} I_2 X; \sqrt{3} I_{C2} R; \sqrt{3} I_{C2} X; \sqrt{3} I_{C2} R; \text{ და } \sqrt{3} I_{C2} X$$

გადავზომოთ ეს ვექტორები A წერტილიდან (ნახ.4.5) თანმიმ-
დევრობით მათი მიმართულებების გათვალისწინებით. ამ ვექტორე-
ბის ჯამი გვაძლევს $\overline{AD}$ ვექტორს, რომელიც წარმოადგენს ძაბვის
ვარდნას ხაზში. იგი შეიცავს გრძივ და განივ შემდგენს

$$\overline{AD} = \overline{AF} + \overline{FD}$$

ანუ

$$\Delta \underline{U} = \Delta U + j \delta U,$$

სადაც $\Delta U = |\overline{AF}|$ - ძაბვის ვარდნის გრძივი შემდგენი;

$$\delta U = |\overline{FD}| - \text{ძაბვის ვარდნის განივი შემდგენი.}$$

ამრიგად, ხაზის თავში $\underline{U}_1$ ძაბვისთვის გვაქვს

$$\underline{U}_1 = U_2 + \Delta \underline{U} \quad (4.26)$$

ანუ

$$\underline{U}_1 = U_2 + \Delta \underline{U} + j \delta U \quad (4.27)$$

$\underline{U}_1$ ძაბვის მოდული განისაზღვრება ფორმულით

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U)^2 + \delta U^2}, \quad (4.28)$$

რომლის საშუალებით განესაზღვრავთ I_{Y1} გამგარობის ღენს, გაშეაღლს ხაზის თაღში ზართულ გამგარობაში,

$$I_{Y1} = I_{G1} + jI_{C1} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{G + jB}{2}$$

საღაც

$I_{G1} = \frac{U_1}{2\sqrt{3}} \cdot G$ - გამგარობის ღენის აქტიური შემღგენი;

$I_{C1} = \frac{U_1}{2\sqrt{3}} \cdot B$ - გამგარობის ღენის რეაქტიული შემღგენი.

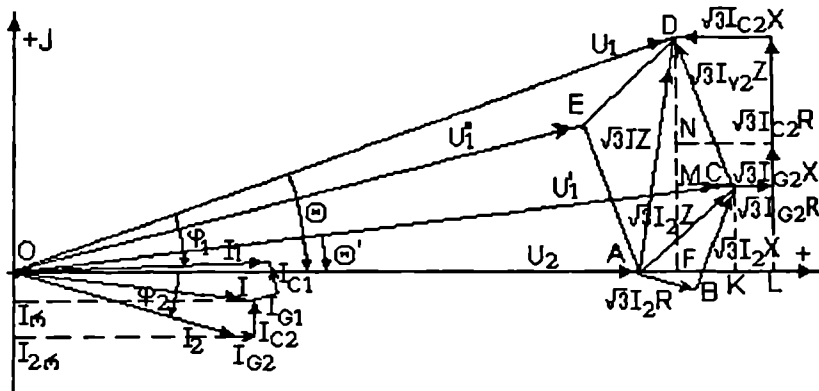
I_{G1} ჟაზით ემთხეღეღ U_1 ძაბღის ეღექტორს, ხოლო I_{C1} წინ უსწრებს მას 90° -ით (ნახ.4.5).

ხაზის თაღში ღენი

$$I_1 = I + I_{Y1} = I + I_{G1} + jI_{C1}. \quad (4.29)$$

ეღექტორული ღიაგრაღის შესაბაღის მასშტაბში აღეღის გზით ეღოღით ყვეღა საძიებულ სიღიღეს, მათ შორის ძაბღსა და ღენს ხაზის თაღში U_1 , I_1 და მათ შორის ძღრის φ_1 კუთხეს.

სიმძღღერე ხაზის თაღსა და ბოლოში და სიმძღღერის ღანა-კარგეღი ხაზში განისაზღღრეღა (4.21)-(4.24) ჟორმუღებით.



ნახ. 4.5 ეღექტროგაღაცემის ეღექტორული ღიაგრაღა

ეღექტორული ღიაგრაღის ღახმარეღით ხაზის რეეღმის პარამეტრეღის ანგარიში მოითხოღს ზუსტ გრაფიკულ აღეღებს, რაც ღაკავშირეღულია მნიშვნეღოღან ცღომიღეღებთან და იღი პრაქტიკულად მოუხერხეღელია, მაგრამ მის საფუძეღელზე ხაზის რეეღმის პა-

რამგერების მიმართ შეგვიძლია გავაკეთოთ მნიშვნელოვანი დასკვნები.

ხაზში ძაბვის ვარდნის $\overline{AD}$ ვექტორი წარმოადგენს $\overline{AC}$ და $\overline{CD}$ ვექტორების ჯამს, რომელთაგანაც $\overline{AC}$ არის ხაზში ძაბვის ვარდნა, გამოწვეული დატვირთვის I_2 დენით, ხოლო $\overline{CD}$ - ძაბვის ვარდნა გამოწვეული I_{Y2} გამგარობის დენით (ნახ.4.5)

$$\overline{AC} = \sqrt{3} I_2 Z \quad \text{და} \quad \overline{CD} = \sqrt{3} I_{Y2} Z$$

დატვირთვის დენის სიდიდე დამოკიდებულია მომხმარებლის მუშაობის რეჟიმზე და იგი შეიძლება იცვლებოდეს 0-დან (უქმი სვლის რეჟიმი) მაქსიმუმამდე (მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმი). გამგარობის დენი კი დამოკიდებულია მუშა ძაბვასა და ხაზის გამგარობაზე, რომელიც 35კვ-მდე (ჩათვლით) ძაბვის ხაზებზე ნულის ტოლია, ხოლო უფრო მაღალი ძაბვის ხაზებზე აღწევს საკმარისად დიდ მნიშვნელობას. ამასთან, თუ ხაზზე გვირგვინის მოვლენას ადგილი არ აქვს, მაშინ გამგარობის დენი შეიყავს მხოლოდ რეაქტიულ (ტევადურ) შემდგენს.

დიაგრამიდან ჩანს, რომ თუ ხაზს არ გააჩნია განივი (განსაკუთრებით ტევადური) გამგარობა, მაშინ ხაზის თავში ძაბვა U_1' მეტია, ვიდრე იგივე ძაბვა განივი გამგარობის არსებობისას $|U_1'| > |U_1|$. ე.ი. ხაზის ტევადური გამგარობის (აქტიური გამგარობა უმნიშვნელოა) არსებობისას იმავე სიმძლავრის გადაცემისთვის საკმარისია ხაზის თავში დავიჭიროთ შედარებით დაბალი ძაბვა, ვიდრე ეს საჭიროა ტევადური გამგარობის არ არსებობისას.

ტევადური გამგარობის არსებობის შემთხვევაში ხაზის თავსა და ბოლოს ძაბვების ვექტორებს შორის ძვრის კუთხე იზრდება ($\theta > \theta'$), რადგანაც ტევადური გამგარობის დენი ამცირებს ხაზში ძაბვის ვარდნის გრძივ შემდგენს FL სიდიდით და ზრდის განივ შემდგენს ND სიდიდით (ნახ. 4.5). KL და MN მონაკვეთები განპირობებულია გამგარობის დენის აქტიური შემდგენით.

დატვირთვის დენის შემცირებისას ძაბვის ვარდნის ABC სამკუთხედი იკუმშება A წეროსკენ, $\overline{CD}$ გადაადგილდება თავისი თავის პარალელურად ისე, რომ D წერტილი მიისწრაფვის E წერტილისკენ და ძაბვა ხაზის თავში მცირდება თავის მინიმალურ მნიშვნელობამდე U_1'' , რომლის დროს გვაქვს ხაზის უქმი სვლის რეჟიმი ($I_2=0$).

დიაგრამიდან ჩანს, რომ უქმი სელის რეჟიმში ძაბვა ხაზის თავში უფრო ნაკლებია, ვიდრე ბოლოში, რაც განპირობებულია გამტარობის ღენის გეგადური შემდგენის არსებობით.

4.4 ელექტროგადაცემის რეჟიმის გაანგარიშება დატვირთვის სიმძლავრის მიხედვით

ხაზის ბოლოში მომხმარებლის დატვირთვას წარმოადგენენ $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$ სახით, სადაც P_2 აქტიური, ხოლო Q_2 ინდუქტიური რეაქტიული ტვირთია. გადაცემის რეჟიმის გაანგარიშების დროს შეიძლება ადგილი ჰქონდეს შემდეგ ორ შემთხვევას: 1) ცნობილია ძაბვა ხაზის ბოლოში U_2 ან 2) ცნობილია ძაბვა ხაზის თავში U_1 .

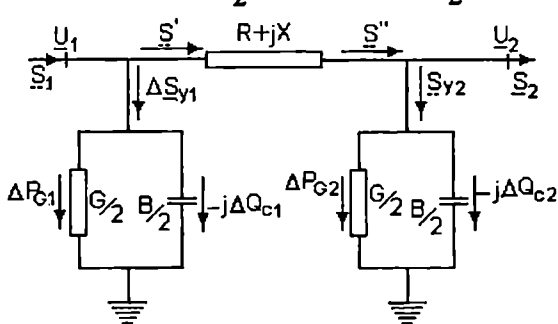
განვიხილოთ პირველი შემთხვევა. იგი ფაქტიურად წარმოადგენს რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშების პირველ ამოცანას (§4.2). ვისარგებლოთ ხაზის ჩანაცვლების Π -სებრი სქემით (ნახ. 4.6).

U_2 ძაბვა ხაზის ბოლოში ჩართულ გამტარობაში გამოიწვევს სიმძლავრის დანაკარგებს

$$\Delta \underline{S}_{Y2} = \Delta P_{G2} - j\Delta Q_{C2} = \sqrt{3}U_2 I_{Y2}^* = U_2^2 \frac{(G - jB)}{2} = U_2^2 \frac{G}{2} - jU_2^2 \frac{B}{2}$$

ანუ

$$\Delta P_{G2} = \frac{U_2^2 G}{2} \quad \text{და} \quad \Delta Q_{C2} = \frac{U_2^2 B}{2}. \quad (4.30)$$



ნახ. 4.6 ელექტროგადაცემის ხაზში სიმძლავრეთა განაწილების სურათი

შესაბამისად ხაზის $\underline{Z}$ წინააღობიდან გამავალი სიმძლავრე

$$\Delta \underline{S}'' = P'' + jQ'' = \underline{S}_2 + \Delta \underline{S}_{Y2} = P_2 + \Delta P_{G2} + j(Q_2 - \Delta Q_{C2}),$$

ე.ი.

$$P'' = P_2 + \Delta P_{G2} \quad \text{და} \quad Q'' = Q_2 - \Delta Q_{C2} \quad (4.31)$$

ეს სიმძლავრე $\underline{Z}$ წინააღობაში გამოიწვევს სიმძლავრის დანაკარგებსა და ძაბვის ვარდნას:

$$\Delta \underline{S}_Z = \Delta P_R + j \Delta Q_X = 3I^2 \underline{Z} = 3 \cdot \left(\frac{S''}{\sqrt{3}U_2} \right)^2 \underline{Z} = \frac{(S'')^2}{U_2^2} (R + jX), \quad (4.32)$$

ანუ

$$\Delta P_R = \frac{(P'')^2 + (Q'')^2}{U_2^2} R \quad (4.33)$$

და

$$\Delta Q_X = \frac{(P'')^2 + (Q'')^2}{U_2^2} X. \quad (4.34)$$

ძაბვის ვარდნა

$$\Delta \underline{U} = \sqrt{3} I \underline{Z} = \sqrt{3} \cdot \frac{(S'')^*}{\sqrt{3} U_2} \underline{Z} = \frac{(P'' - jQ'')(R + jX)}{U_2},$$

ანუ

$$\Delta \underline{U} = \frac{P''R + Q''X}{U_2} + j \frac{P''X - Q''R}{U_2}, \quad (4.35)$$

სადაც

$$\Delta U = \frac{P''R + Q''X}{U_2} \quad (4.36)$$

წარმოადგენს ძაბვის ვარდნის გრძივ შემდგენს და

$$\delta U = \frac{P''X - Q''R}{U_2} \quad (4.37)$$

წარმოადგენს ძაბვის ვარდნის განივ შემდგენს.

ამრიგად, ხაზის $\underline{Z}$ წინააღობაში შემავალი სიმძლავრე

$$\Delta \underline{S}' = P' + jQ' = \underline{S}'' + \Delta \underline{S}_Z$$

ანუ

$$\underline{S}' = P'' + \frac{(P'')^2 + (Q'')^2}{U_2^2} R + j \left[Q'' + \frac{(P'')^2 + (Q'')^2}{U_2^2} X \right].$$

ე.ი.

$$P' = P'' + \Delta P_R \quad \text{და} \quad Q' = Q'' + \Delta Q_X \quad (4.38)$$

ხოლო ძაბვა ხაზის თავში (4.27)

$$\underline{U}_1 = (U_2 + \Delta U) + j\delta U \quad (4.39)$$

ანუ

$$\underline{U}_1 = U_2 + \frac{P''R + Q''X}{U_2} + j \frac{P''R - Q''X}{U_2} \quad (4.40)$$

U_1 ძაბვის მოდული (4.28)

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U)^2 + (\delta U)^2}. \quad (4.41)$$

განესაზღვროთ სიმძლავრის დანაკარგები ხაზის თავში ჩართულ გამტარობაში

$$\Delta S_{Y1} = \sqrt{3} \underline{U}_1 I_{Y1}^* = U_1^2 \frac{G}{2} - j U_1^2 \frac{B}{2}$$

ანუ

$$\Delta P_{G1} = \frac{U_1^2 G}{2} \quad \text{და} \quad \Delta Q_{C1} = \frac{U_1^2 B}{2} \quad (4.42)$$

და, შესაბამისად, სიმძლავრე ხაზის თავში

$$\underline{S}_1 = \underline{S}' + \Delta \underline{S}_{Y1} = P' + \Delta P_{G1} + j(Q' - \Delta Q_{C1}) \quad (4.43)$$

სიმძლავრის ჯამური დანაკარგი ხაზში (4.23)

$$\Delta \underline{S} = \underline{S}_1 - \underline{S}_2 = P' + \Delta P_{G1} + j(Q' - \Delta Q_{C1}) - P_2 - jQ_2,$$

ანუ (4.38) და (4.31)-ის გათვალისწინებით გვაქვს

$$\Delta P = \Delta P_R + \Delta P_{G1} + \Delta P_{G2} \quad (4.44)$$

და

$$\Delta Q = \Delta Q_X - (\Delta Q_{C1} + \Delta Q_{C2}). \quad (4.45)$$

U_2 ძაბვა მიემართოთ ნამდვილ რიყხვთა ღერძის გასწვრივ და (4.39) გამოსახულების მიხედვით ავაგოთ ძაბვების დიაგრამა (ნახ.4.7ა). ძაბვების დიაგრამიდან ჩანს, რომ ხაზში ძაბვის დანაკარგი AD მონაკვეთის გოლია

$$U_A = AC = \underline{U}_1 - \underline{U}_2 \quad (4.46)$$

ანუ

$$U_A = \sqrt{(U_2 + \Delta U)^2 + \delta U^2} - U_2. \quad (4.47)$$

220 კმ-მდე (ჩათვლით) ძაბვის ხაზებისთვის შეგვიძლია ვისარგებლოთ ფესვის მიახლოებითი მნიშვნელობით და გვაქვს

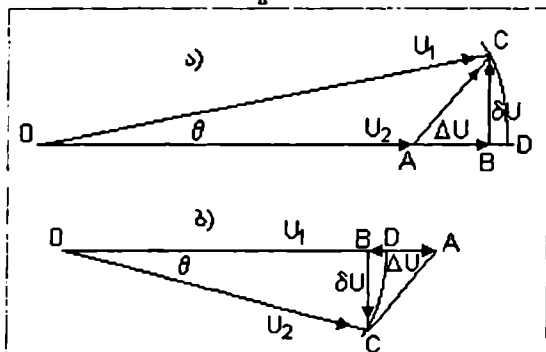
$$U_A = \left(U_2 + \Delta U + \frac{(\delta U)^2}{2(U_2 + \Delta U)} \right) - U_2$$

ანუ

$$U_{\Delta} = \Delta U + \frac{(\delta U)^2}{2(U_2 + \Delta U)}. \quad (4.48)$$

110კემდე (ჩათვლით) ძაბვის ხაზებში θ კუთხე იმდენად მცირეა, რომ შეგვიძლია ხაზში ძაბვის დანაკარგი ძაბვის გრძივი შემდეგნის ტოლად მივიღოთ

$$U_{\Delta} = \Delta U. \quad (4.49)$$



4.7 ელექტროგადაცემის ძაბვების დიაგრამა: ა) ცნობილია U_2 ; ბ) ცნობილია U_1 .

განვიხილოთ მეორე შემთხვევა. ეს შემთხვევა თავისი შინაარსით მეოთხე ამოცანას წარმოადგებს იმ განსხვავებით, რომ აქ I_2 დენის ზუსტი მნიშვნელობის დადგენა არ ხერხდება, რადგანაც უცნობია U_2 ძაბვა. აქ ანგარიშები უნდა ჩავატაროთ ორ ეტაპად. პირველ ეტაპზე საჭიროა დაუადგინოთ U_2 ძაბვის საანგარიშო მნიშვნელობა, რომლის შემდეგ ანგარიშების მეორე ეტაპი ჩატარდა პირველი შემთხვევის ანალოგიურად.

ანგარიშის პირველი ეტაპი ჩავატაროთ შემდეგი მიმდევრობით. (4.30) ფორმულით, რომელშიც U_2 ძაბვას შევცვლით ნომინალური ძაბვით, გამოვთვალოთ სიმძლავრის დანაკარგები ხაზის ბოლოში ჩართულ გამტარობაში

$$\Delta P_{G2} = \frac{U_6^2 G}{2} \quad \text{და} \quad \Delta Q_{C2} = \frac{U_6^2 B}{2}, \quad (4.50)$$

რომელთა გათვალისწინებით გამოვთვლით P' და Q' (4.31). ამის შემდეგ განვსაზღვროთ სიმძლავრის დანაკარგები ხაზის Z წინააღობაში (4.33) და (4.34) ფორმულებით, სადაც ასევე U_2 ძაბვის ნაყ-

ულად გამოვიყენოთ ნომინალური ძაბვა. შემდეგ (4.38) ფორმულე-
ბით გამოთვალეთ P' და Q' .

აღნიშნული გამოთვლების შემდეგ ვისარგებლოთ (4.36) და
(4.37) ფორმულებით, სადაც U_2 -ის ნაცვლად ავიღოთ U_1 და P'', Q'' -ის
ნაცვლად კი - P', Q' :

$$\Delta U = \frac{P'R + Q'X}{U_1} \text{ და } \delta\Delta = \frac{P'X - Q'R}{U_1}, \quad (4.51)$$

რომელთა საშუალებით დაეადგენთ U_2 ძაბვას (4.27)

$$U_2 = U_1 - \Delta U - j\delta U \quad (4.52)$$

ანუ

$$U_2 = \sqrt{(U_1 - \Delta U)^2 + \delta U^2}. \quad (4.53)$$

დაეადგენთ რა U_2 ძაბვის მნიშვნელობას ჩაეატარებთ გაანგა-
რიშების მეორე ეტაპს.

როგორც ეხედაეთ გამოთვლების მეორე შემთხვევის დროს
გაანგარიშებები ჩატარდა ორ ეტაპად. სადაც პირველ ეტაპზე ვად-
გენთ U_2 ძაბვის მნიშვნელობას. თუ რამდენად ზუსტია U_2 ძაბვის მი-
ღებული მნიშვნელობა, დადგინდება მეორე ეტაპის გამოთვლების
ჩატარების შემდეგ, როცა განისაზღვრება U_1 ძაბვა, რომელიც უნდა
ემთხვეოდეს მის მოცემულ მნიშვნელობას.

როგორც პრაქტიკული გაანგარიშებები გვიჩვენებს, ანგარი-
შების ეს ორი ეტაპი საკმარისია იმ თვალსაზრისით, რომ ცდომი-
ლება არ აღემატებოდეს საინჟინრო გაანგარიშებებისთვის დასაშ-
ვებ სიდიდეს.

იმ შემთხვევაში, როცა გამოთვლებით მიღებული U_1 ძლიერ
განსხვავდება მოცემულისგან ($U_{1\text{მო}} - U_{1\text{მღ}}$), საკმარისია ეს სხვაობა
აღგებრულად დაეუმატოთ პირველ ეტაპზე მიღებულ U_2 -ის მნიშვნე-
ლობას და გამოთვლების მეორე ეტაპი ჩაეატაროთ U_2 ძაბვის ამ
ახალი მნიშვნელობის მიხედვით.

ამ მეორე შემთხვევისთვის ძაბვების დიაგრამას აქვს 4.7ბ ნა-
ხაზზე ნაჩვენები სახე.

ძაბვის დანაკარგი ხაზში იანგარიშება ფორმულით

$$U_{\Delta} = \Delta U - \frac{\delta U^2}{2(U_1 - \Delta U)}. \quad (4.54)$$

4.5 ელექტროგადაცემის რეჟიმის გაანგარიშება გადასაცემა სიმძლავრის მიხედვით

გადასაცემა სიმძლავრე წარმოადგინოთ $S_1 = P_1 + jQ_1$ სახით (ნახ.4.6). რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშებისას შეიძლება გვექონდეს ორი შემთხვევა: 1) ცნობილია ძაბვა ხაზის თავში; 2) ცნობილია ძაბვა ხაზის ბოლოში.

განვიხილოთ პირველი შემთხვევა. იგი თავისი შინაარსით წარმოადგენს რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშების მეორე ამოცანას (§4.2). გამოთვლების მიმდევრობა ჩავატაროთ 4.6 ნახაზის შესაბამისად.

ხაზის თავში ჩართულ გამტარობაში U_1 ძაბვით განპირობებული სიმძლავრის დანაკარგები გამოითვლება (4.42) ფორმულებით

$$\Delta P_{G1} = U_1^2 \frac{G}{2} \quad \text{და} \quad \Delta Q_{C1} = U_1^2 \frac{B}{2}. \quad (4.55)$$

შესაბამისად ხაზის Z წინააღობაში შემაჯავალი სიმძლავრე

$$S' = S_1 - \Delta S_{Y1} = P_1 - \Delta P_{G1} + j(Q_1 - (-\Delta Q_{C1})),$$

ანუ

$$P' = P_1 - \Delta P_{G1} \quad \text{და} \quad Q' = Q_1 + \Delta Q_{C1}, \quad (4.56)$$

რომელიც Z წინააღობაში გამოიწვევს სიმძლავრის დანაკარგებს და ძაბვის ვარდნას:

სიმძლავრის დანაკარგი

$$\Delta S_Z = \Delta P_R + j\Delta Q_X = \frac{(S')^2}{U_1^2} \cdot Z = \frac{(S')^2}{U_1^2} (R + jX), \quad (4.57)$$

ანუ

$$\Delta P_R = \frac{(P')^2 + (Q')^2}{U_1^2} \cdot R \quad (4.58)$$

და

$$\Delta Q_X = \frac{(P')^2 + (Q')^2}{U_1^2} \cdot X; \quad (4.59)$$

ძაბვის ვარდნა (4.51)

$$\Delta U = \frac{P'R + Q'X}{U_1}$$

და

$$\delta U = \frac{P'X - Q'R}{U_1}$$

ძაბვა ხაზის ბოლოში

$$U_2 = \sqrt{(U_1 - \Delta U)^2 + \delta U_2^2},$$

ხოლო ძაბვის დანაკარგის მიახლოებითი მნიშვნელობა (4.54)

$$U_{\Delta} = \Delta U - \frac{\delta U^2}{2(U_1 - \Delta U)}.$$

ხაზის $\underline{Z}$ წინაღობიდან გამავალი სიმძლავრე (ნახ.4.6)

$$\underline{S}'' = \underline{S}' - \Delta \underline{S}_Z = P' - \Delta P_R + j(Q' - \Delta Q_X)$$

ანუ

$$P'' = P' - \Delta P_R \quad \text{და} \quad Q'' = Q' - \Delta Q_X. \quad (4.60)$$

ხაზის ბოლოში ჩართულ გამტრობაში U_2 ძაბვით განპირობებული სიმძლავრის დანაკარგები ეიანგარიშით (4.30) ფორმულებით

$$\Delta P_{G2} = \frac{U_2^2 G}{2} \quad \text{და} \quad \Delta Q_2 = \frac{U_2^2 B}{2}. \quad (4.61)$$

შესაბამისად; ხაზის ბოლოში სიმძლავრე

$$S_2 = S'' - \Delta S_{r2} = P'' - \Delta P_{G2} + j(Q'' - (-\Delta Q_{C2}))$$

ანუ

$$P_2 = P'' - \Delta P_{G2} \quad \text{და} \quad Q_2 = Q'' + \Delta Q_{C2} \quad (4.62)$$

სიმძლავრის ჯამური დანაკარგი ხაზში გამოითვლება (4.44) და (4.45) ფორმულებით.

განვიხილოთ მეორე შემთხვევა. ეს შემთხვევა თავისი შინაარსით წარმოადგენს რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშების მესამე ამოცანას (§4.2) იმ განსხვავებით, რომ აქ I_1 დენის ზუსტი მნიშვნელობა არ ვიცით, რადგანაც $\underline{U}_1$ ძაბვა საძიებელი სიდიდეა. ამიტომ ანგარიშებს ვატარებთ ორ ეტაპად ქვემოთ ნაჩვენები მიმდევრობით.

პირველი ეტაპი. ნომინალური ძაბვის მიხედვით გამოვთვალოთ

$$\Delta P_{G1} = \frac{U_1^2 G}{2} \quad \text{და} \quad \Delta Q_{C1} = \frac{U_1^2 B}{2}. \quad (4.63)$$

შემდეგ გამოვთვალოთ

$$P' = P_1 - \Delta G_1 \quad \text{და} \quad Q' = Q_1 + \Delta Q_{C1}, \quad (4.64)$$

ხოლო ამის შემდეგ (4.51) ფორმულით, რომელშიც U_1 -ს შევცვლით U_0 -ით, გამოვთვალოთ ძაბის ვარდნა

$$\Delta U = \frac{P'R + Q'X}{U_6} \quad \text{და} \quad \delta U = \frac{P'X - Q'R}{U_6} \quad (4.65)$$

ამ გამოთვლების ჩატარების შემდეგ (4.41) ფორმულით ვიპოვით U_1 ძაბვას და გადავდივართ მეორე ეტაპზე, სადაც გამოთვლებს ჩავატარებთ პირველი შემთხვევის ანალოგიურად.

მეორე ეტაპის დამთავრების შემდეგ თუ $U_{2.ზოლ} - U_{2.ზაღ}$ სხვაობა აღემატება საინჟინრო გაანგარიშებისთვის დასაშვებ ცდომილებას, მაშინ ეს სხვაობა ალგებრულად დაეუმატოთ პირველ ეტაპზე მიღებულ U_1 ძაბვის მნიშვნელობას და მეორე ეტაპის გამოთვლები ჩავატაროთ U_1 ძაბვის ამ ახალი მნიშვნელობით.

4.6 ელექტროგადაცემის რეჟიმის გაანგარიშება იკერაციული მეთოდის გამოყენებით

როგორც წინა პარაგრაფში აღვნიშნეთ ელექტროგადაცემის რეჟიმის გაანგარიშების იმ ამოცანათა ამოხსნა, როცა დატვირთვის სიმძლავრე მოცემულია ხაზის ერთ ბოლოში, ხოლო ძაბვა კი მეორე ბოლოში, ტარდება ორ ეტაპად. რეჟიმის პარამეტრების ანგარიშის ამ მეთოდს თან ახლავს გარკვეული ცდომილება, რომლის დასაშვებ ფარგლებში დაყვანისთვის შეიძლება მოგვიხდეს გამოთვლების რამდენჯერმე განმეორება.

შედარებით ნაკლებად შრომატევადი გამოთვლების პირობებში მნიშვნელოვნად უფრო მაღალი სიზუსტე მიიღწევა, თუ აღნიშნული სახის საწყისი ინფორმაციის ამოცანას ამოვხსნით იკერაციული მეთოდის გამოყენებით.

(4.1), (4.2) და (4.15), (4.16) გადაცემის განტოლებებში ღენები შევცვალოთ შესაბამისი სიმძლავრით

$$I_1 = \frac{S_1^*}{\sqrt{3}U_1^*} \quad \text{და} \quad I_2 = \frac{S_2^*}{\sqrt{3}U_2^*},$$

გვაქვს

$$\underline{U}_1 = \underline{AU}_2 + \frac{BS_2^*}{U_1^*}, \quad (4.66)$$

$$\frac{S_1^*}{U_1^*} = C^* U_2^* + D^* \frac{S_2^*}{U_2^*} \quad (4.67)$$

და

$$\underline{U}_2 = \underline{DU}_1 - \frac{BS_1^*}{U_1^*}, \quad (4.68)$$

$$\frac{\underline{S}_2}{\underline{U}_2} = \underline{A} \cdot \frac{\underline{S}_1}{\underline{U}_1} - \underline{C} \cdot \underline{U}_1 \quad (4.69)$$

რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშების მეოთხე სახის ამოცანის ამოსახსნელად (მოცემულია $\underline{S}_2$ და $\underline{U}_1$) (4.66)-დან დაედგინოთ $\underline{U}_2$ ძაბვა იტერაციული მეთოდის გამოყენებით, გვაქვს

$$\underline{U}_2^{(i)} = \frac{1}{\underline{A}} \left(\underline{U}_1 - \frac{\underline{BS}_2}{(\underline{U}_1^{(i-1)})^r} \right) \quad (4.70)$$

$\underline{U}_2$ ძაბვის ნულოვან მიახლოებად მივიღოთ $\underline{U}_2 = \underline{U}_6$ და გამოვთვალოთ $\underline{U}_2^{(1)}, \underline{U}_2^{(2)} \dots$ იტერაციული მნიშვნელობები. იტერაციული პროცესი გაუაგრძელოთ სასურველი სიზუსტის მიღწევამდე.

ვიყიოთ რა $\underline{U}_2$, (4.67)-დან განვსაზღვრაოთ $\underline{S}_1$ -ს

$$\underline{S}_1 = \underline{C} \cdot \underline{U}_1 \underline{U}_2 + \underline{D} \cdot \underline{S}_2 \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} \quad (4.71)$$

მესამე სახის ამოცანის (მოცემულია $\underline{S}_1$ და $\underline{U}_2$) ამოსახსნელად (4.68)-ის თანახმად ეწეროთ

$$\underline{U}_1^{(i)} = \frac{1}{\underline{D}} \left(\underline{U}_2 + \frac{\underline{BS}_1}{(\underline{U}_1^{(i-1)})^r} \right) \quad (4.72)$$

$\underline{U}_1$ ძაბვის ნულოვან მიახლოებად მივიღოთ $\underline{U}_1 = \underline{U}_6$ და გამოვლევოთ ჩავატაროთ იტერაციის გზით, რომლის დასრულების შემდეგ (4.69)-დან განვსაზღვრაოთ $\underline{S}_2$ -ს

$$\underline{S}_2 = \underline{A} \cdot \underline{S}_1 \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} - \underline{C} \cdot \underline{U}_1 \underline{U}_2 \quad (4.73)$$

4.7 თანაბარგანაწილებული დაგვირთვის მქონე უბნის რეჟიმის გაანგარიშება

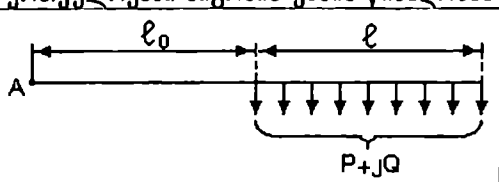
10 კვ და უფრო დაბალი ძაბვის ზოგიერთი ქსელი ხასიათდება ერთმანეთთან ახლო მდებარე და თითქმის ერთნაირი სიდიდის დაგვირთვის მქონე სამომხმარებლო კვანძებით. ასეთი შემთხვევა უფრო ხშირად შეიმჩნევა დასახელებული პუნქტებისა და ქალაქების საყოფაცხოვრებო მომსახურების მაგისტრალურ ქსელებში, რომელთა ჯამური დაგვირთვა შეიძლება განვიხილოთ როგორც თანაბრად განაწილებული მთელი მაგისტრალის გასწვრივ.

დაეუშვათ, რომ თანაბარგანაწილებულ დაგვირთვის ადგილი აქვს მაგისტრალური უბნის მხოლოდ გარკვეულ მონაკვეთზე (ნახ.

4.8), მაშინ ამ მონაკვეთის ერთეულოვან სიგრძეზე მოსული დატვირთვაა

$$P_0 + jQ_0 = \frac{P + jQ}{\ell},$$

ხოლო ამავე ერთეულოვანი სიგრძის უბნის წინააღობაა $z_0 = r_0 + jx_0$.



4.8 თანაბარგანაწილებული დატვირთვის მქონე ქსელის უბანი

მაგისტრალური უბნის ℓ_0 სიგრძის სათავე უბანზე გაედინება ჯამური $P + jQ$ დატვირთვა და ცხადია, რომ ამ უბანზე სიმძლავრის დანაკარგისთვის გვაქვს

$$\Delta P_{\ell_0} = \frac{P^2 + Q^2}{U_6^2} r_0 \ell_0$$

და

$$\Delta Q_{\ell_0} = \frac{P^2 + Q^2}{U_6^2} x_0 \ell_0.$$

თანაბარგანაწილებული სამუაზა დატვირთვის მქონე ℓ სიგრძის უბანზე აქტიური სიმძლავრის დანაკარგი შეგვიძლია გამოვთვალოთ შემდეგი ფორმულით

$$\Delta P = 3 \int_0^{\ell} \left[\left(\frac{P}{\ell} (\ell - x) \right)^2 + \left(\frac{Q}{\ell} (\ell - x) \right)^2 \right] \frac{r_0 dx}{U_6^2},$$

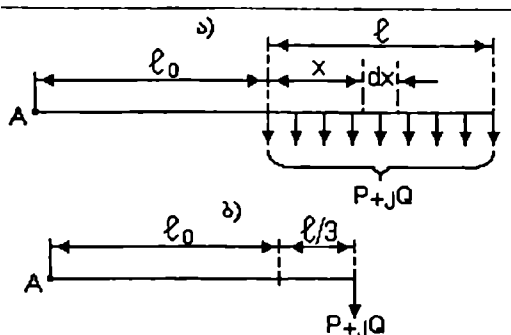
სადაც x - მანძილი თანაბარგანაწილებული უბნის სათავედან ამ უბნის dx ელემენტამდე (ნახ.4.9ა).

ინტეგრირების ჩატარების შემდეგ ვღებულობთ

$$\Delta P_{\ell} = \frac{1}{3} \frac{P^2 + Q^2}{U_6^2} r_0 \ell.$$

ანალოგიურად

$$\Delta Q_{\ell} = \frac{1}{3} \frac{P^2 + Q^2}{U_6^2} x_0 \ell.$$



4.9 სიმძლავრის დანაკარგის ანგარიშისთვის თანაბარგანაწილებული დატვირთვის მქონე უბანში: ა-საწყისი სქემა; ბ-ეკვივალენტური სქემა.

ე.ი. მივიღეთ, რომ დატვირთვის თანაბარგანაწილებულობის შემთხვევაში, უბანზე სიმძლავრის დანაკარგები სამჯერ ნაკლებია, ვიდრე როცა იგივე ჯამური დატვირთვა მოდებულია ამავე უბნის ბოლოში.

მთლიანად მაგისტრალისთვის გვაქვს

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= \frac{P^2 + Q^2}{U_g^2} \left(\ell_0 + \frac{\ell}{3} \right) \cdot r_0 \\ \Delta Q &= \frac{P^2 + Q^2}{U_g^2} \left(\ell_0 + \frac{\ell}{3} \right) \cdot x_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.74)$$

მაშასადამე, სიმძლავრის დანაკარგების გამოსათვლელად, საჭიროა თანაბარგანაწილებული დატვირთვა მოვდოთ ამ უბნის ერთ მესამედ სიგრძეზე (ნახ.4.9 ბ).

ამავე თანაბარგანაწილებული დატვირთვის მქონე უბანზე ძაბვის დანაკარგები (ძაბვის ვარდნის გრძივი შემდგენი) შეგვიძლია გამოეთვალოთ შემდეგი ფორმულით

$$\Delta U_t = \int_0^\ell \left[\frac{P}{\ell} (\ell - x) x_0 + \frac{Q}{\ell} (\ell - x) x_0 \right] \frac{dx}{U_g}$$

ანუ

$$\Delta U_t = \frac{Pr_0 + Qx_0}{U_g} \cdot \frac{\ell}{2}.$$

ე.ი. მივიღეთ, რომ უბანზე დატვირთვის თანაბარგანაწილებულობის შემთხვევაში ძაბვის დანაკარგი ორჯერ ნაკლებია, ვიდრე იმ შემთხვევაში, როცა იგივე ჯამური დატვირთვა მოდებულია შე-

ყურსულად უბნის ბოლოში. მამასადამე, მთელი მაგისტრალისთვის გვაქვს

$$\Delta U = \Delta U_{\text{თ}} + \Delta U_{\text{ქ}} = \frac{Pr_0 + Qx_0}{U_{\text{გ}}} \left(\ell_0 + \frac{\ell}{2} \right). \quad (4.75)$$

4.8 გრანსფორმატორული უბნის რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება

ქსელის გრანსფორმატორულ უბანს ელექტროგადაცემის (ხაზის) უბანთან შედარებით დამატებით გააჩნია გრანსფორმაციის კოეფიციენტი. სადაბლებელი გრანსფორმატორის შემთხვევაში უბნის ბოლოდ განიხილება დაბალი ნომინალური ძაბვის კვანძი, ხოლო სამაღლებელი გრანსფორმატორის შემთხვევაში კი მაღალი ნომინალური ძაბვის კვანძი (ნახ.4.10 ა.ბ.). როგორც ვიცი, გრანსფორმატორთა ელექტრული პარამეტრები მიყვანილია მაღალი ძაბვის საფეხურზე (§3.8.2; §3.8.3). აქედან გამომდინარე, უბნის რეჟიმის გაანგარიშების ნებისმიერი ამოცანა (§4.2) მოითხოვს დაბალი ძაბვის მუშა მნიშვნელობის მიყვანას მაღალი ძაბვის საფეხურზე

$$U'_{\text{გ}} = U_{\text{გ}} / K_{\text{გ}},$$

სადაც $K_{\text{გ}}$ - გრანსფორმატორის კოეფიციენტი

$$K_{\text{გ}} = U_{\text{გ.გ.}} / U_{\text{გ.მ.ზ.}}$$

აქ $U_{\text{გ.გ.}}$ - გრანსფორმატორის დაბალი ნომინალური ძაბვა;

$U_{\text{გ.მ.ზ.}}$ - მაღალი ძაბვის გრადნილის გამომყვანის ძაბვა

$$U_{\text{გ.მ.ზ.}} = U_{\text{გ.გ.}} \left(1 + \frac{n\alpha\%}{100} \right);$$

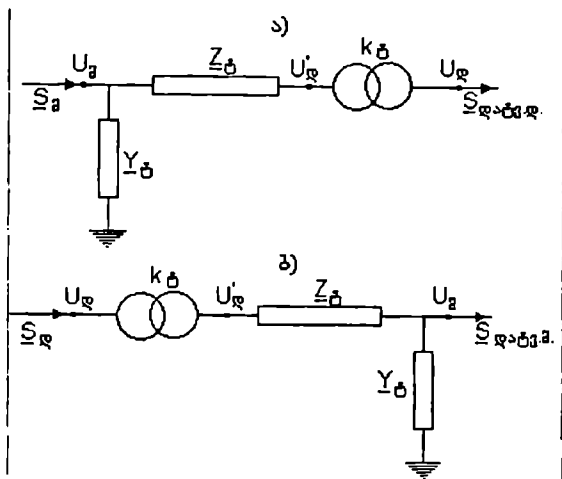
$U_{\text{გ.გ.}}$ - გრანსფორმატორის მაღალი ნომინალური ძაბვა;

n - გამომყვანის ნომერი;

$\alpha\%$ - მაღალი ძაბვის გრადნილის ხვეების ცვლილების პროცენტული მნიშვნელობა.

ამრიგად

$$U'_{\text{გ}} = U_{\text{გ}} \cdot \frac{U_{\text{გ.გ.}} \left(1 + \frac{n\alpha\%}{100} \right)}{U_{\text{გ.გ.}}}. \quad (4.76)$$



4.10 ორგრაგნილიანი გრანსფორმატორის ჩანაცვლების საანგარიშო სქემა: ა) სადაბლებელი; ბ) სამალლებელი

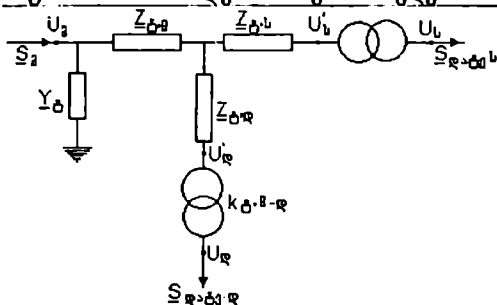
რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება U_1 და U'_2 ძაბვების მქონე კვანძებს შორის წარმოებს იმავე პრინციპითა და მიმდევრობით, როგორც ელექტროგადაცემის ხაზის შემთხვევაში.

გრანსფორმატორული უბნის გაანგარიშებისას უმრავლეს შემთხვევაში ცნობილია მაღალი ძაბვის მუშა მნიშვნელობა, რადგანაც ის განპირობებულია სისტემის მუშაობის რეჟიმით. აქედან გამომდინარე, სადაბლებელი გრანსფორმატორების შემთხვევაში გვაქვს რეჟიმის გაანგარიშების მეოთხე ამოცანა (§4.4), ხოლო სამალლებელი გრანსფორმატორების შემთხვევაში კი მესამე ამოცანა (§4.5).

გამოთვლების შემდეგ დავადგენთ U'_2 ძაბვას და შემდეგ ცნობილი n გამოყვანის ნომრის პირობებში, (4.76) გამოსახულების საშუალებით განვსაზღვრავთ U_2 ძაბვის მნიშვნელობას. თუ იგი არ აკმაყოფილებს მისაღმი წაყენებულ მოთხოვნებს, ის შეიძლება შევცვალოთ გრანსფორმაციის კოეფიციენტის შეცვლის გზით ანუ შესაბამისი გამოყვანის შერჩევით.

სამგრაგნილიანი გრანსფორმატორის ან ავტოგრანსფორმატორის შემთხვევაში ჩანაცვლების საანგარიშო სქემას აქვს 4.11 ნახაზზე ნაჩვენები სახე (სადაბლებელი გრანსფორმატორის შემთხვევა). უმრავლეს შემთხვევაში გრანსფორმატორული უბნის რეჟიმის

გაანგარიშებას ატარებენ არა რომელიმე კვანძის (თავის ან ბოლოს) ცნობილი (მოცემული) ძაბვის მიხედვით, არამედ ტრანსფორმატორის ნომინალური ძაბვის მიხედვით.



4.11 სამტრანსფორმირაციო სადაბლებელი ტრანსფორმატორის რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშების ჩანაცვლების სქემა

აღნიშნულიდან გამომდინარე 4.10 ნახაზზე წარმოდგენილი სქემის შესაბამისად ტრანსფორმატორის გრაფიკში სიმძლავრის დანაკარგებისთვის ვწერთ (გამოსახულებები (4.33) და (4.34))

$$\Delta S_{ტრ} = \frac{S_{ლავალ}^2}{U_6^2} (R_6 + jX_6)$$

ანუ (3.68) და (3.69) გამოსახულებათა გათვალისწინებით

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{ტრ} &= \Delta P_{გო} \left(\frac{S_{ლავალ}}{S_6} \right)^2, \\ \Delta Q_{ტრ} &= \Delta Q_{გო} \left(\frac{S_{ლავალ}}{S_6} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (4.77)$$

ტრანსფორმატორის ფოლადში დანაკარგები

$$\Delta P_{ფლ} = U_6^2 G \quad \text{და} \quad \Delta Q_{ფლ} = U_6^2 B$$

ანუ (3.65) და (3.66) გამოსახულებათა გათვალისწინებით

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{ფლ} &= \Delta P_{ჟლ}, \\ \Delta Q_{ფლ} &= \Delta Q_{ჟლ}, \end{aligned} \right\} \quad (4.78)$$

მაშასადამე, ტრანსფორმატორში სიმძლავრის ჯამური დანაკარგი

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{\delta} &= \Delta P_{ჟლ} + \Delta P_{გო} \left(\frac{S_{ლავალ}}{S_6} \right)^2, \\ \Delta Q_{\delta} &= \Delta Q_{ჟლ} + \Delta Q_{გო} \left(\frac{S_{ლავალ}}{S_6} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad 9)$$

ვიცით რა დანაკარგები, გამოთვლით $\underline{S}_{\text{დაგეგ.}}$: სადაბლებელი გრანსფორმატორის შემთხვევაში (ნახ.4.10ა)

$$\underline{S}_{\text{დაგეგ.}} = \underline{S}_{\text{დაგეგ.}} + (\Delta P_{\phi} + j\Delta Q_{\phi}); \quad (4.80)$$

სამაღლებელი გრანსფორმატორის შემთხვევაში (ნახ.4.10ბ)

$$\underline{S}_{\text{დაგეგ.}} = \underline{S}_{\text{დაგეგ.}} - (\Delta P_{\phi} + j\Delta Q_{\phi}). \quad (4.81)$$

ძაბვის ეარდნის შემდგენები გრანსფორმატორში:

სადაბლებელი გრანსფორმატორის შემთხვევაში (ნახ.4.10ა)

$$\left. \begin{aligned} \Delta U &= \frac{P_{\text{დაგეგ.}} \cdot R + Q_{\text{დაგეგ.}} \cdot X}{U_{\phi}}; \\ \delta U &= \frac{P_{\text{დაგეგ.}} \cdot X - Q_{\text{დაგეგ.}} \cdot R}{U_{\phi}}. \end{aligned} \right\} \quad (4.82)$$

შესაბამისად, ძაბვის დანაკარგი გრანსფორმატორში

$$U_{\Delta} = \Delta U - \frac{\delta U^2}{2(U_{\phi} - \Delta U)} \quad (4.83)$$

და ძაბვა გრანსფორმატორის (ქვესაღვეურის) დაბალი ძაბვის სალტეზე

$$U_{\phi} = K_{\phi} (U_{\phi} - U_{\Delta}); \quad (4.84)$$

სამაღლებელი გრანსფორმატორის შემთხვევაში (ნახ.4.10ბ)

$$\left. \begin{aligned} \Delta U &= \frac{P_{\text{დაგეგ.}} \cdot R + Q_{\text{დაგეგ.}} \cdot X}{U_{\phi}}; \\ \delta U &= \frac{P_{\text{დაგეგ.}} \cdot X - Q_{\text{დაგეგ.}} \cdot R}{U_{\phi}}. \end{aligned} \right\} \quad (4.85)$$

შესაბამისად, ძაბვის დანაკარგი გრანსფორმატორში

$$U_{\Delta} = \Delta U - \frac{\delta U^2}{2(U_{\phi} + \Delta U)} \quad (4.86)$$

და ძაბვის გრანსფორმატორის (საღვეურის) დაბალი ძაბვის სალტეზე

$$U_{\phi} = K_{\phi} (U_{\phi} + U_{\Delta}). \quad (4.87)$$

სამგრაგნილიანი გრანსფორმატორის ან ავტოგრანსფორმატორის რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება გარდება ცალკეული გრაგნილის (უბნების) მიხედვით. ამასთან, დაბალი და საშუალო ძაბვის გრაგნილთა პარამეტრები იანგარიშება როგორც გრანსფორმატორული უბნებისთვის, ხოლო მაღალი გრაგნილის უბანი კი – როგორც ჩვეულებრივი ელექტროგადამცემის უბანი (გრანსფორმა-

ციის კოეფიციენტების გარეშე). უნდა აღინიშნოს, რომ ამ გაანგარიშებისას $K_{\phi, \phi}$ და $K_{\phi, \phi}$ უნდა იყოს ურთიერთმეტანხმებული.

ქვესადგურებზე, საიდანაც ელექტრულ კვებას ღებულობს I და II კატეგორიის მომხმარებლები და, აგრეთვე, ელექტროსისტემის რაიონულ ქვესადგურებზე, კვების საიმედოობის დონის ამაღლების მიზნით აყენებენ ორ და მეტ გრანსფორმატორს. ამასთან შესაძლებელია მათი გაყოფილი ან პარალელური მუშაობა.

გაყოფილი მუშაობისას ყოველი გრანსფორმატორი მიერთებულია საღტეების გამოყოფილ სექციასთან. ასეთი სექციისას მცირდება დაბალი ძაბვის ქსელში მოკლე შერთვის დენები, რაც ამსუბუქებს მოწყობილობათა და საკომუტაციო აპარატურის მუშაობას. მაგრამ გრანსფორმატორთა ასეთი რეჟიმი პარალელურ მუშაობასთან შედარებით არაეკონომიკურია, რადგანაც გრანსფორმატორები, უმეტეს შემთხვევაში, დატვირთული იქნება ნომინალურ სიმძლავრეთა არაპროპორციულად.

ერთიდაიგივე ტიპის გრანსფორმატორთა პარალელური მუშაობისას ქვესადგურის ჯამური S დატვირთვა ნაწილდება მათ შორის თანაბრად და, ამ შემთხვევაში, ერთ გრანსფორმატორში სიმძლავრის დანაკარგები (4.79) იქნება

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{\phi, 1} &= \Delta P_{\phi} + \Delta P_{\phi} \left(\frac{S/n}{S_{\phi}} \right)^2 \\ \Delta Q_{\phi, 1} &= \Delta Q_{\phi} + \Delta Q_{\phi} \left(\frac{S/n}{S_{\phi}} \right)^2 \end{aligned} \right\}$$

ხოლო n გრანსფორმატორში

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{\phi, n} &= n \cdot \Delta P_{\phi, 1} = n \cdot \Delta P_{\phi} + \frac{1}{n} \Delta P_{\phi} \left(\frac{S}{S_{\phi}} \right)^2 \\ \Delta Q_{\phi, n} &= n \cdot \Delta Q_{\phi, 1} = n \cdot \Delta Q_{\phi} + \frac{1}{n} \Delta Q_{\phi} \left(\frac{S}{S_{\phi}} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (4.88)$$

4.9 მე-4 თავის რიცხვითი მაგალითები

მაგალითი 4.1. განესაზღვროთ (3.5) მაგალითში განხილული 220 კვ ძაბვის ხაზის რეჟიმის პარამეტრები, თუ ცნობილია $\underline{U}_1=225$ კვ და $\underline{I}_2=0,40-j0,25$ კა (მეოთხე ამოცანა).

მოცემული ხაზის ელექტრული პარამეტრებია (მაგალითი 3.5)

$$\underline{Z}=8,32+j39,3 \text{ ომი და } \underline{Y}=(2,94+j290) \cdot 10^{-6} \text{ სიმ.}$$

ოთხპოლუსას განზოგადოებული მუდმივები:

(4.7) და (4.12) გამოსახულებათა თანახმად

$$\underline{A}=\underline{D}=1+\frac{(8,32+j39,3)(2,94+j290) \cdot 10^{-6}}{2}=0,9943+j0,0013;$$

(4.11) გამოსახულების თანახმად

$$\underline{B}=8,32+j39,3 \text{ ომი;}$$

(4.8) გამოსახულების თანახმად

$$\underline{C}=(2,94+j290) \cdot 10^{-6} \cdot \left(1+\frac{(8,32+j39,3)(2,94+j290) \cdot 10^{-6}}{2}\right)=$$

$$=(2,749+j289,19) \cdot 10^{-6} \text{ სიმ.}$$

(4.19) და (4.20) გამოსახულებათა შესაბამისად

$$\underline{U}_2=\frac{1}{0,9943+j0,0013}((225-1,73(8,32+j39,3)(0,40-j0,25)))=$$

$$=203,336-j23,365 \text{ კვ;}$$

$$\underline{I}_2=\frac{1}{0,9943+j0,0013}\left((2,749+j289,19) \cdot 10^{-6} \cdot \frac{225}{\sqrt{3}}+0,40-j0,25\right)=$$

$$=0,3999-j0,2189 \text{ კა;}$$

სიმძლავრე ხაზის თავსა და ბოლოში (4.21) და (4.22):

$$\underline{S}_1=\sqrt{3} \cdot 225(0,3999+j0,2189)=155,66+j85,21 \text{ მგვა;}$$

$$\underline{S}_2=\sqrt{3} \cdot (203,336-j23,365)(0,40+j0,25)=150,83+j81,44 \text{ მგვა.}$$

სიმძლავრის დანაკარგი ხაზში (4.24)

$$\Delta P=155,66-150,83=4,83 \text{ მგვტ;}$$

$$\Delta Q=85,21-81,14=4,07 \text{ მგვარ.}$$

გადაცემის მ.ქ.კ. კოეფიციენტი (4.25)

$$\eta\%=\frac{150,83}{155,66} \cdot 100=96,9.$$

მაგალითი 4.2 განვსაზღვროთ 330 კვ ძაბვის ელექტროგადამცემის ხაზის რეჟიმის პარამეტრები თუ $Z=10+j45$ ომი; $Y=j500 \cdot 10^{-6}$ სიმ; $S_2=400+j180$ მგვა და $S_2=300$ კვ.

სიმძლავრის დანაკარგები ხაზის ბოლოში ჩართულ გამტარობაში (4.30)

$$\Delta P_{G2} = 0; \Delta Q_{G2} = \frac{300^2 \cdot 500 \cdot 10^{-6}}{2} = 22,5 \text{ მგვარ.}$$

ამრიგად, (4.31)-ის მიხედვით, გვაქვს

$$P'' + jQ'' = 400 + j180 - j22,5 = 400 + j157,5 \text{ მგვა.}$$

სიმძლავრის დანაკარგი ხაზის Z წინააღობაში (4.33), (4.34)

$$\Delta P_R = \frac{400^2 + 157,5^2}{300^2} \cdot 10 = 20,53 \text{ მგვტ,}$$

$$\Delta Q_R = \frac{400^2 + 157,5^2}{300^2} \cdot 45 = 92,4 \text{ მგვარ.}$$

მაშასადამე (4.38)-ის შესაბამისად

$$P' = 400 + 20,53 = 420,53 \text{ მგვტ,}$$

$$Q' = 157,5 + 92,4 = 249,9 \text{ მგვარ.}$$

ძაბვის ვარდნა ხაზში:

გრძივი შემტენი (4.36)

$$\Delta U = \frac{400 \cdot 10 + 157,5 \cdot 45}{300} = 36,96 \text{ კვ}$$

განივი შემტენი (4.37)

$$\delta U = \frac{400 \cdot 45 - 157,5 \cdot 15}{300} = 54,75 \text{ კვ}$$

ძაბვა ხაზის თავში (4.39)

$$U_1 = 300 + 36,96 + j54,75 = 336,96 + j54,75 \text{ კვ}$$

U_1 ძაბვის მოდული (4.41)

$$U_1 = \sqrt{336,96^2 + 54,75^2} = 341,38 \text{ კვ.}$$

ძაბვის დანაკარგი ხაზში (4.46)

$$U_\Delta = 341,38 - 300 = 41,38 \text{ კვ.}$$

იგივე (4.48) ფორმულით

$$U_\Delta = 36,96 + \frac{54,75^2}{2 \cdot 336,96} = 41,41 \text{ კვ.}$$

სიმძლავრის დანაკარგები ხაზის თავში ჩართულ გამგარობაში (4.42)

$$\Delta P_{G1} = 0; \quad \Delta Q_{C1} = \frac{341,38^2 \cdot 500 \cdot 10^{-6}}{2} = 29,14 \text{ მგვარ.}$$

სიმძლავრე ხაზის თავში (4.43)

$$\underline{S}_1 = 420,53 + j(249,9 - 29,14) = 420,53 + j220,76 \text{ მგვა.}$$

სიმძლავრის ჯამური დანაკარგები ხაზში (4.44), (4.45)

$$\Delta P = 20,53 \text{ მგვტ; } \Delta Q = 92,4 - (29,14 + 22,5) = 40,76 \text{ მგვარ.}$$

ხაზის მ.ქ.კ. კოეფიციენტი (4.25)

$$\eta\% = \frac{400}{420,53} \cdot 100 = 95,11.$$

მაგალითი 4.3. განესაზღვროთ 110კვ ძაბვის ელექტროგადამცემის ხაზის რეჟიმის პარამეტრები, თუ $Z=8+j20$ ომი; $\underline{U}=j130 \cdot 10^{-6}$ სიმ; $\underline{S}_1=40+j30$ მგვა და $U_1=115$ კვ.

ხაზის თავში ჩართულ გამგარობაში სიმძლავრის დანაკარგები (4.55)

$$\Delta P_{G1}=0; \quad \Delta Q_{C2} = 115^2 \cdot \frac{130}{2} \cdot 10^{-6} = 0,86 \text{ მგვარ.}$$

$\underline{Z}$ წინაღობაში შემაველი სიმძლავრე (4.56)

$$P'=40 \text{ მგვტ; } Q'=30 - (0,86)=30,86 \text{ მგვარ.}$$

სიმძლავრის დანაკარგი ხაზის $\underline{Z}$ წინაღობაში (4.58); (4.59)

$$\Delta P_R = \frac{40^2 + 30,86^2}{115^2} \cdot 8 = 1,54 \text{ მგვტ;}$$

$$\Delta Q_R = \frac{40^2 + 30,86^2}{115^2} \cdot 20 = 3,85 \text{ მგვარ.}$$

$\underline{Z}$ წინაღობიდან გამავალი სიმძლავრე (4.60)

$$P''=40 - 1,54=38,46 \text{ მგვტ,}$$

$$Q''=30,86 - 3,85=27,01 \text{ მგვარ.}$$

ძაბვის ვარდნა ხაზში (4.51)

$$\Delta U = \frac{40 \cdot 8 + 30,86 \cdot 20}{115} = 8,14 \text{ კვ}$$

$$\delta U = \frac{40 \cdot 20 - 30,86 \cdot 8}{115} = 4,81 \text{ კვ}$$

ძაბვა ხაზის ბოლოში (4.52)

$$\underline{U}_2 = 115 - 8,14 - j4,81 = 106,84 - j4,81 \text{ კვ}$$

$$U_2 = \sqrt{(115 - 8,14)^2 + 4,81^2} = 106,97 \text{ კვ.}$$

სიმძლავრის დანაკარგი ხაზის ბოლოში ჩართულ გამტარობაში (4.61)

$$\Delta P_{G2} = 0; \Delta Q_{C2} = 106,97^2 \cdot \frac{130}{2} \cdot 10^{-6} = 0,74 \text{ მგვარ.}$$

სიმძლავრე ხაზის ბოლოში (4.62)

$$P_2 = 38,46 \text{ მგვტ; } Q_2 = 27,01 - (-0,74) = 27,75 \text{ მგვარ.}$$

სიმძლავრის ჯამური დანაკარგი ხაზში (4.24)

$$\Delta P = 40 - 38,46 = 1,54 \text{ მგვტ, } \Delta Q = 30 - 27,75 = 2,25 \text{ მგვარ.}$$

ხაზის მ.ქ.კოეფიციენტი (4.25)

$$\eta\% = \frac{38,46}{40} \cdot 100 = 96,15.$$

მაგალითი 4.4. განვსაზღვროთ 330 კვ ძაბვის ელექტროგადამცემის ხაზის რეჟიმის პარამეტრები იტერაციული მეთოდის გამოყენებით (§4.6), თუ $Z = 10 + j45$ ომი; $Y = j500 \cdot 10^{-6}$ სიმ; $S_2 = 400 + j180$ მგვა; $S_1 = 336,96 + j54,75$ კვ (მაგალითი 4.2).

გამოვთვალოთ ხაზის განზოგადოებული მუდმივები (გამოსახულებები 4.7; 4.8; 4.11):

$$\underline{A} = \underline{D} = 1 + \frac{(10 + j45) \cdot j500 \cdot 10^{-6}}{2} = 0,989 + j0,0025;$$

$$\underline{B} = 10 + j45;$$

$$\underline{C} = j500 \cdot 10^{-6} \left(1 + \frac{(10 + j45) \cdot j500 \cdot 10^{-6}}{4} \right) = (-0,625 + j4972) \cdot 10^{-6}.$$

მივიღოთ $U_2^{(0)} = 330$ კვ და (4.70)-ის მიხედვით გამოვთვალოთ $\underline{U}_2$ -ს იტერაციული მნიშვნელობები. შედეგები წარმოვადგინოთ ცხრილის სახით.

იტერაციის ნომერი	0	1	2	3
$\underline{U}_2$, კვ	330	303,63 + j4,95	301,3 + j0,21	300,09 + j0,04

(4.71)-ის მიხედვით განვსაზღვროთ $\underline{S}_1$

$$\begin{aligned} \underline{S}_1 &= (-0,625 - j4972) \cdot 10^{-6} (336,96 + j54,75) \cdot (300,09 + j0,235) + \\ &+ (0,989 - j0,0025) \cdot (400 + j180) \cdot \frac{336,96 + j54,75}{300,09 + j0,04} = 420,69 + j220,59 \text{ მგვა} \end{aligned}$$

როგორც ვხედავთ ანგარიშით მიღებული შედეგები მაღალი სიზუსტით ემთხვევა 4.2 მაგალითში მიღებულ შედეგებს.

მაგალითი 4.5. განესაზღვროთ 110 კვ ძაბვის ელექტროგადაცემის ხაზის რეჟიმის პარამეტრები იგერაციული მეთოდის გამოყენებით, თუ $Z=8+j20$ ომი; $Y=j130 \cdot 10^{-6}$ სიმ; $S_1=40+j30$ მგვა; $U_2=106,84-j4,81$ კვ (მაგალითი 4.3).

განესაზღვროთ ხაზის განზოგადოებული მუდმივები:

$$A = D = 1 + \frac{(8 + j20) \cdot j130 \cdot 10^{-6}}{2} = 0,9987 + j0,00025;$$

$$B = 8 + j20;$$

$$C = j13010^{-6} \left(1 + \frac{(8+j20) \cdot j13010^{-6}}{4} \right) = (-0,034 + j12992) \cdot 10^{-6}.$$

მივიღოთ $U_1^{(0)} = 110$ კვ და (4.72)-ის მიხედვით გამოვთვალოთ U_1 -ს იგერაციული მნიშვნელობები. შედეგები წარმოვადგინოთ ცხრილის სახით.

იგერაციის ნომერი	0	1	2	3
U_1 , კვ	110	115,204+j0,22	115,182-j0,025	115,17-j0,006

(4.73)-ის მიხედვით

$$S_2 = (0,9987 - j0,00052)(40 + j30) \cdot \frac{106,84 - j4,81}{115,17 - j0,006} - (-j130 \cdot 10^{-6}) \cdot (115,17 + j0,006) \cdot (106,84 - j4,81) = 38,62 + j27,77 \text{ მგვა}.$$

როგორც ვხედავთ ამ ანგარიშით მიღებული შედეგები მაღალი სიზუსტით ემთხვევა 4.3 მაგალითში მიღებულ შედეგებს.

ამავე ელექტროგადაცემის ხაზის რეჟიმის პარამეტრები განესაზღვროთ (4.13) დაშვების პირობებში, რომლის თანახმად

$$A=D=1; \quad B=8+j20 \quad \text{და} \quad C=j130 \cdot 10^{-6}.$$

(4.72)-ის მიხედვით გამოვთვალოთ U_1 ძაბვის იგერაციული მნიშვნელობები და შედეგები ჩაეწეროთ ცხრილში

იგერაციის ნომერი	0	1	2	3
U_1 , კვ	110	115,201+j0,28	114,88+j0,032	114,9+j0,064

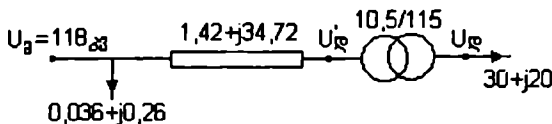
(4.73)-ის მიხედვით

$$S_2 = (40 + j30) \cdot \frac{106,84 - j4,81}{114,90 + j0,064} + j130 \cdot 10^{-6} \cdot (114,90 - j0,064) \cdot (106,84 - j4,81) = 38,53 + j27,82 \text{ მგვა}.$$

მიღებული შედეგები გვიჩვენებენ, რომ 110 კვ ძაბვის ელექტროგადაცემის ხაზის შემთხვევაში (4.13) სახის დაშვებისას გამოთვლების შედეგებში ცდომილება უმნიშვნელოა.

მაგალითი 4.6. გამოვთვალოთ 3.7 მაგალითში განხილული ტრანსფორმატორის რეეიმის პარამეტრები, თუ $U_g=118$ კე და $S_{\text{ლაგლ}}=30+j20$ მგვა.

ჩანაცვლების საანგარიშო სქემას აქვს სახე (ნახ.4.12)



ნახ. 4.12

სიმძლავრის დანაკარგები ტრანსფორმატორში (გამოსახულება 4.79)

$$\Delta P_{\phi} = 0,036 + 0,172 \left(\frac{30^2 + 20^2}{40^2} \right) = 0,146 \text{ მგვტ}$$

$$\Delta Q_{\phi} = 0,026 + 4,2 \left(\frac{30^2 + 20^2}{40^2} \right) = 3,673 \text{ მგვარ}$$

$$S_{\text{ლაგლ}} = 30 + j20 + 0,176 + j3,673 = 30,176 + j23,673 \text{ მგვა}$$

ძაბვის ვარდნის შემდგენები (გამოსახულება (4.82))

$$\Delta U = \frac{30 \cdot 1,42 + 20 \cdot 34,72}{110} = 6,7 \text{ კვ}$$

$$\delta U = \frac{30 \cdot 34,72 - 20 \cdot 1,42}{110} = 9,2 \text{ კვ}$$

ძაბვის დანაკარგი ტრანსფორმატორში (გამოსახულება 4.83)

$$U_{\Delta} = 6,7 - \frac{9,2^2}{2(110 - 6,7)} = 6,3 \text{ კვ}$$

ძაბვა ტრანსფორმატორის (ქვესადგურის) დაბალი ძაბვის სალტებზე (გამოსახულება 4.84)

$$U_{\kappa} = \frac{10,5}{115} (118 - 6,3) = 10,2 \text{ კვ}$$

თავი 5. შორეული ელექტროგადაცემა

5.1 შორ მანძილზე ენერგიის გადაცემის თავისებურებანი

ელექტროენერგეტიკა ვითარდება მსხვილი ენერგოგაერთიანებების შექმნის გზით. ამჟამად ექსპლუატაციაშია შესული მძლავრი ელექტრული სადგურები, რომელთა სიმძლავრის გადაცემას ესაჭიროება მაღალი გამგარუნარიანობის ელექტროგადაცემის ხაზები. სხედასხვა ქვეყნის ენერგოსისტემებს შორის იქმნება სისტემათა-შორისი კავშირები. რიგ შემთხვევებში დიდი სიმძლავრის გადაცემა ხდება ერთი სისტემის ცალკეულ რეგიონებს შორის.

განასხვავებენ სუსტ და ძლიერ სისტემათაშორის კავშირებს, რომელთა სიგრძე ცალკეულ შემთხვევაში აღწევს ათას კილომეტრს და მეტს. სუსტი სისტემათაშორისი კავშირის საშუალებით გადაცემა შედარებით მცირე სიმძლავრე, რომელიც საკმარისია ენერგიის მიმღებ ენერგოსისტემაში პიკური დატვირთვის მოსახსნელად და სიხშირისა და ძაბვის რეგულირებისთვის. ძლიერი კავშირით გადაცემული სიმძლავრე შეადგენს ცალკეული სისტემის ჯამური დატვირთვის მნიშვნელოვან ნაწილს. ყველა ამ შემთხვევაში საქმე გვაქვს დიდი სიმძლავრის შორ მანძილზე გადაცემის პრობლემურ საკითხებთან.

ელექტროენერგიის დანაკარგების შემცირების მიზნით შორ მანძილზე დიდი სიმძლავრის გადაცემისას ტექნიკურ-ეკონომიკური თვალსაზრისით მიზანშეწონილია ზემოაღნიშნული ნომინალური (330 კვ და მეტი) ძაბვის გამოყენება. ასეთი ძაბვის გამოყენება ეკონომიკურად მიზანშეწონილია, აგრეთვე, დიდი სიმძლავრის მოკლე მანძილზე გადაცემის დროსაც კი.

მძლავრი ელექტრული სადგურიდან ზემოაღნიშნული ძაბვის ხაზით ელექტროენერგიის გადაცემის მიზანშეწონილობა დადგენილი უნდა იქნეს შემდეგი ორი ვარიანტის ტექნიკურ-ეკონომიკური შედარების საფუძველზე: 1) იაფი პირველადი ენერგორესურსის (სათბობის) მახლობლობაში ელექტროსადგურის აშენება და შორ მანძილზე მდებარე მომხმარებელამდე ელექტრული ენერგიის გადაცემა ზემოაღნიშნული ძაბვის ხაზით; 2) სათბობის გადაზიდვა შორ მანძილზე და ელექტროსადგურის აშენება მომხმარებელთან ახლოს. ამ ვარიანტთა შედარებისას მხედველობაში უნდა იქნეს მიღებული არა მარტო ენერგობიძოვების მშენებლობის ეკონომიკური მაჩვენებლები, არამედ ეკოლოგიის საკითხები როგორც მშენებლობის რეგიონში,

ასევე ელექტროენერგიის ან სათბობის ტრანსპორტირების მთელ მანძილზე.

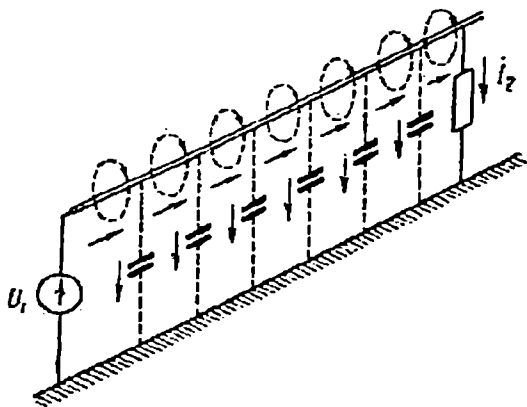
მთელ რიგ შემთხვევებში ზემაღალი ძაბვის მძლავრი ელექტროგადაცემის განხორციელება განპირობებულია დასაკავშირებელი ელექტროსისტემების მდგრადი მუშაობის უზრუნველყოფის მიზნით.

ზემაღალი ძაბვის ხაზები გამოირჩევიან მთელი რიგი თავისებურებებით, რაც გათვალისწინებული უნდა იქნეს რეეიმის პარამეტრების გაანგარიშების დროს: ა) ხაზის მთელი სიგრძეზე ელექტრული პარამეტრების თანაბრად განაწილებულობა და ენერგიის გადაცემის ტალღური პროცესი; ბ) ხაზის მუშაობის რეეიმისა და გადასაცემი სიმძლავრის მართვის მიზნით სპეციალური ღონისძიებებისა და მოწყობილობათა გამოყენება; გ) შინაგანი გადამეტაბვის ჯერადობის შეზღუდვის სპეციალური დამცავი მოწყობილობის გამოყენება; დ) ფაზის რამდენიმე სადენად გახლეჩა, რაც მკვეთრად ზრდის ფაზის წონას და ამკაცრებს მოთხოვნებს ხაზის მექანიკური სიმტკიცისა და მდგრადობის მიმართ.

საპაერო ელექტროგადაცემის ხაზით ელექტრული ენერგიის გადაცემა წარმოადგენს სადენებისა და მათ გარშემო არსებულ დიელექტრიკში ელექტრომაგნიტური ველის გავრცელების პროცესს. ცვლადი ძაბვის მოქმედებით ხაზის ნებისმიერ მცირე მონაკვეთზე გვაქვს ცვლადი ელექტრული ველი, რომელიც სადენის გარშემო არსებულ დიელექტრიკში წარმოქმნის ტედაური ხასიათის წანაცვლების დენს (§3.5). ეს დენი, დაედება რა ხაზში გამაჟალ დატვირთვის დენს, იწვევს მისი ამპლიტუდის ცვლილებას. აქედან გამომდინარე, ხაზის გასწვრივ იცვლება მაგნიტური ველის დაძაბულობის ამპლიტუდა, რის გამოც ხაზის ცალკეულ ელემენტებში წარმოიქმნება სხვადასხვა სიდიდის თვით და ურთიერთინდუქციის ე.მ. ძალა. ეს კი, თავის მხრივ, განაპირობებს ხაზის გასწვრივ ძაბვის ცვლილების რთულ ხასიათს და შედეგად, რთული ხასიათისაა წანაცვლების დენის ამპლიტუდის ცვლილებაც. ერთსადენიანი საპაერო ხაზის ელექტრომაგნიტური ველის ელემენტების პირობითი სურათი წარმოადგენილია 5.1. ნახაზზე.

წანაცვლების დენის სიდიდე ხაზის ცალკეულ მცირე მონაკვეთზე დამოკიდებულია ერთის მხრივ ხაზის გარშემო არსებული გარემოს (ჰაერის) დიელექტრიკულ თვისებებზე და მეორეს მხრივ, ფაზებსა და ფაზასა და მიწას შორის პოტენციალთა სხვაობაზე. ზემაღალი ძაბვის ხაზებზე ეს დენები საკმარისად დიდ მნიშვნელობებს აღწევს.

აღნიშნულიდან გამომდინარე გრძელი ხაზის მუშაობის რეჟიმის პარამეტრების ანალიზისთვის აუცილებელია მხედველობაში იქნეს მიღებული ხაზის პარამეტრთა თანაბრად განაწილების ფაქტორი.



ნახ. 5.1 ერთსაღენიანი საპარო ხაზის ელექტრომაგნიტური ველის პირობითი სურათი

5.2 გრძელი ელექტროგადაცემის განტოლებები

ზემაღალი ძაბვის ხაზებში ელექტრული ენერგიის გადაცემის გალღური ხასიათის გათვალისწინების მიზნით L სიგრძის ხაზი განვიხილოთ როგორც თანაბარგანაწილებული პარამეტრების მქონე წრედი, რომლის თითოეულ dl ელემენტს გააჩნია აქტიური $r_0 dl$ და რეაქტიული (ინდუქტიური) $x_0 dl$ წინაღობა და აქტიური $g_0 dl$ და რეაქტიული (ტევადური) $b_0 dl$ გამგარობა (ნახ.5.2).

როცა ხაზის თავში მოდებულია $\underline{U}_1 = U_1 \sin \omega t$ სინუსოდალური ხაზური ძაბვა, მაშინ ხაზის თავიდან l მანძილზე მდებარე dl ელემენტის (ნახ. 5.2.ა) ბოლოების ძაბვებსა და დენებს შორის თანაფარდობა (ნახ.5.2.ბ) განისაზღვრება შემდეგი განტოლებებით:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial \underline{U}_l}{\partial l} &= \sqrt{3}(r_0 + jx_0) \cdot \underline{I}_l = \sqrt{3} \underline{Z}_0 \underline{I}_l, \\ -\frac{\partial \underline{I}_l}{\partial l} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(g_0 + jb_0) \cdot \underline{U}_l = \frac{1}{\sqrt{3}} \underline{Y}_0 \underline{U}_l. \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

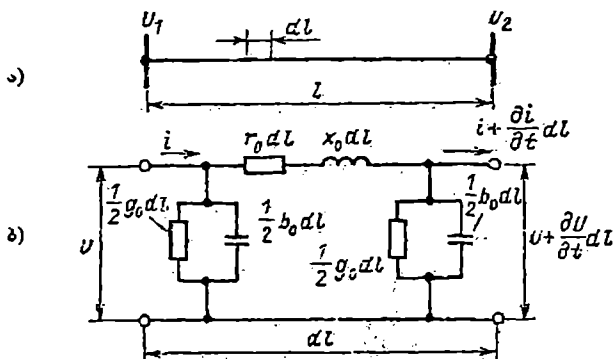
ამ განტოლებათა სისტემის ამოხსნით ვღებულობთ

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_e &= \underline{A}_1 e^{\sqrt{Z_0 Y_0} l} + \underline{A}_2 e^{-\sqrt{Z_0 Y_0} l}, \\ \underline{I}_e &= \frac{1}{\sqrt{3 Z_c}} (\underline{A}_1 e^{\sqrt{Z_0 Y_0} l} - \underline{A}_2 e^{-\sqrt{Z_0 Y_0} l}) \end{aligned} \right\} \quad (52)$$

სადაც: $\underline{A}_1$ და $\underline{A}_2$ ინტეგრირების მუდმივებია და განისაზღვრება საწყისი პირობებიდან, ხოლო

$$Z_c = \sqrt{Z_0 / Y_0} \quad (53)$$

სიდიდეს ხაზის ტალღურ წინაღობას უწოდებენ.



ნახ. 52 ხაზი თანაბრდება ნაწილებული პარამეტრებით:
ა) ხაზი; ბ) ხაზის dl ელემენტების ჩანაცვლების სქემა

(52) გამოსახულებათა მოგადი ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ელექტრული ენერგიის გადაცემისას ხაზის ნებისმიერ წერტილში ძაბვა და დენი შეიძლება განვიხილოთ როგორც ორი ურთიერთ საპირისპიროდ მოძრავი (პირდაპირი და უკუ) ტალღების ჯამი. პირდაპირი ტალღა, მივა რა ხაზის ბოლოში, ნაწილობრივ გარდატეხება და ნაწილობრივ აირეკლება. არეკლილი ტალღა წარმოადგენს უკუ ტალღას.

განვსაზღვროთ ინტეგრირების მუდმივები.

როცა $l = 0$, მაშინ $\underline{U}_l = \underline{U}_1$ და $\underline{I}_l = \underline{I}_1$, შესაბამისად, გვაქვს

$$\underline{U}_1 = \underline{A}_1 + \underline{A}_2 \quad \text{და} \quad \underline{I}_1 = \frac{1}{\sqrt{3 Z_c}} (\underline{A}_1 - \underline{A}_2), \quad \text{აქედან}$$

$$\underline{A}_1 = \frac{1}{2} (\underline{U}_1 + \sqrt{3} \underline{I}_1 Z_c) \quad \text{და} \quad \underline{A}_2 = \frac{1}{2} (\underline{U}_1 - \sqrt{3} \underline{I}_1 Z_c)$$

ამ სიდიდეთა (5.2)-ში ჩასმითა და იმის გათვალისწინებით, რომ

$$\operatorname{ch} x = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \quad \text{და} \quad \operatorname{sh} x = \frac{e^x - e^{-x}}{2},$$

ვღებულობთ

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_\epsilon &= \underline{U}_1 \operatorname{ch} \gamma_0 \ell - \sqrt{3} \underline{I}_1 \underline{Z}_c \operatorname{sh} \gamma_0 \ell, \\ \underline{I}_\epsilon &= \underline{I}_1 \operatorname{ch} \gamma_0 \ell - \frac{\underline{U}_1}{\sqrt{3} \underline{Z}_c} \operatorname{sh} \gamma_0 \ell. \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

სადაც

$$\gamma_0 = \sqrt{\underline{Z}_0 \cdot \underline{Y}_0} = \beta_0 + j\alpha_0 \quad (5.5)$$

წარმოადგენს ტალღის გავრცელების კოეფიციენტს.

(5.4) გამოსახულების მიხედვით L სიგრძის ხაზის ბოლოში რეჟიმის პარამეტრებისთვის გვექნება ($\ell = L$)

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_2 &= \underline{U}_1 \operatorname{ch} \gamma_0 L - \sqrt{3} \underline{I}_1 \underline{Z}_c \operatorname{sh} \gamma_0 L, \\ \underline{I}_2 &= \underline{I}_1 \operatorname{ch} \gamma_0 L - \frac{\underline{U}_1}{\sqrt{3} \underline{Z}_c} \operatorname{sh} \gamma_0 L. \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

თუ მიღებულ განტოლებებსა და (4.15), (4.16) გამოსახულებებს ერთმანეთს შევადარებთ, ელექტროგადაცემის განზოგადოებული მუდმივებისთვის მივიღებთ

$$\underline{A} = \underline{D} = \operatorname{ch} \gamma_0 L, \quad (5.7)$$

$$\underline{B} = \underline{Z}_c \operatorname{sh} \gamma_0 L, \quad (5.8)$$

$$\underline{C} = \frac{1}{\underline{Z}_c} \operatorname{sh} \gamma_0 L. \quad (5.9)$$

იმ შემთხვევაში, როცა ხაზი უქმი სელის რეჟიმში მუშაობს ($\underline{I}_2=0$), მაშინ (5.6) განტოლებათა სისტემის მეორე განტოლების მიხედვით ხაზის თავის რეჟიმის პარამეტრებს შორის არსებობს შემდეგი თანაფარდობა

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\sqrt{3} \underline{Z}_c} \operatorname{th} \gamma_0 L$$

და, შესაბამისად, ხაზის ბოლოში ძაბვა

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 / \operatorname{ch} \gamma_0 L$$

ხოლო, (5.4) გამოსახულების შესაბამისად ხაზის გასწვრივ ძაბვისა და დენის განაწილების კანონზომიერება გამოსახება ფორმულებით:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_e &= \underline{U}_1 (\operatorname{ch} \gamma_0 \ell - \operatorname{th} \gamma_0 L \cdot \operatorname{sh} \gamma_0 \ell) \\ \underline{I}_e &= \frac{\underline{U}_1}{\sqrt{3} Z_c} (\operatorname{th} \gamma_0 L \cdot \operatorname{ch} \gamma_0 \ell - \operatorname{sh} \gamma_0 \ell) \end{aligned} \right\} \quad (5.10)$$

დავადგინოთ ხაზის გასწვრივ ძაბვისა და დენის განაწილების კანონზომიერება, როცა მოცემულია ხაზის ბოლოს პარამეტრები $\underline{U}_2$ და $\underline{I}_2$. ამ შემთხვევაში (5.1) განგოლებათა სისტემის ამოხსნის საფუძველზე ხაზის თავიდან ℓ მანძილზე მდებარე წერტილში ძაბვა და დენი იქნება:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_e &= \underline{U}_2 \operatorname{ch} \gamma_0 (L - \ell) + \sqrt{3} \underline{I}_2 Z_c \operatorname{sh} \gamma_0 (L - \ell) \\ \underline{I}_e &= \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} Z_c} \operatorname{sh} \gamma_0 (L - \ell) + \underline{I}_2 \operatorname{ch} \gamma_0 (L - \ell) \end{aligned} \right\} \quad (5.11)$$

და, შესაბამისად, ხაზის თავში ($\ell=0$) რეჟიმის პარამეტრები იქნება

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \operatorname{ch} \gamma_0 L + \sqrt{3} \underline{I}_2 Z_c \operatorname{sh} \gamma_0 L, \\ \underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} Z_c} \operatorname{sh} \gamma_0 L + \underline{I}_2 \operatorname{ch} \gamma_0 L. \end{aligned} \right\} \quad (5.12)$$

როცა ხაზი მუშაობს უქმი სვლის რეჟიმში ($\underline{I}_2=0$), მაშინ

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \operatorname{ch} \gamma_0 L \quad \text{და} \quad \underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} Z_c} \operatorname{sh} \gamma_0 L, \quad (5.13)$$

ხოლო ხაზის გასწვრივ ძაბვისა და დენის განაწილების კანონზომიერება განისაზღვრება ფორმულებით:

$$\underline{U}_e = \underline{U}_2 \operatorname{ch} \gamma_0 (L - \ell) \quad \text{და} \quad \underline{I}_e = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} Z_c} \operatorname{sh} \gamma_0 (L - \ell). \quad (5.14)$$

ელექტროგადაცემის ხაზის რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშებისას უფრო პრაქტიკულია გადაცემის განგოლებები ჩაწერილი იქნეს დატვირთვის სიმძლავრის საშუალებით. ამისთვის დატვირთვის დენი $\underline{I}_2$ გამოვსახოთ $\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2$ სიმძლავრითა და $\underline{U}_2 = U_2$ ძაბვით

$$\underline{I}_2 = \frac{P_2 - jQ_2}{\sqrt{3} U_2},$$

რომლის (5.11) განგოლებებში ჩასმით მივიღებთ

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_e &= \underline{U}_2 \left[\operatorname{ch} \gamma_0 (L - \ell) + (P_2 - jQ_2) \frac{Z_c}{U_2^2} \operatorname{sh} \gamma_0 (L - \ell) \right], \\ \underline{I}_e &= \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} Z_c} \left[\operatorname{sh} \gamma_0 (L - \ell) + (P_2 - jQ_2) \frac{Z_c}{U_2^2} \operatorname{ch} \gamma_0 (L - \ell) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (5.15)$$

და შესაბამისად ხაზის თავის რეჟიმის პარამეტრები იქნება

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \left[\operatorname{ch} \gamma_0 L + (P_2 - jQ_2) \frac{Z_c}{U_2^2} \operatorname{sh} \gamma_0 L \right], \\ \underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} Z_c} \left[\operatorname{sh} \gamma_0 L + (P_2 - jQ_2) \frac{Z_c}{U_2^2} \operatorname{ch} \gamma_0 L \right]. \end{aligned} \right\} \quad (5.16)$$

ანალოგიურად, (5.4) სისტემის მიხედვით შეგვიძლია გადაცემის განტოლებები ჩაეწეროს $\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1$ გადასაცემი სიმძლავრის საშუალებით:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_e &= \underline{U}_1 \left(\operatorname{ch} \gamma_0 \ell - (P_1 - jQ_1) \frac{Z_c}{U_1^2} \operatorname{sh} \gamma_0 \ell \right), \\ \underline{I}_e &= \frac{\underline{U}_1}{\sqrt{3} Z_c} \left((P_1 - jQ_1) \frac{Z_c}{U_1^2} \operatorname{ch} \gamma_0 \ell - \operatorname{sh} \gamma_0 \ell \right). \end{aligned} \right\} \quad (5.17)$$

და, შესაბამისად, ხაზის ბოლოში რეჟიმის პარამეტრები იქნება

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_2 &= \underline{U}_1 \left(\operatorname{ch} \gamma_0 L - (P_1 - jQ_1) \frac{Z_c}{U_1^2} \operatorname{sh} \gamma_0 L \right), \\ \underline{I}_2 &= \frac{\underline{U}_1}{\sqrt{3} Z_c} \left((P_1 - jQ_1) \frac{Z_c}{U_1^2} \operatorname{ch} \gamma_0 L - \operatorname{sh} \gamma_0 L \right). \end{aligned} \right\} \quad (5.18)$$

(5.15)-ში სიდიდე

$$\frac{U_2^2}{P_2 - jQ_2} = Z_1$$

წარმოადგენს ხაზის ბოლოში ჩართული დატვირთვის წინააღობას. თუ ეს წინააღობა აღმოჩნდება ხაზის ტალღური წინააღობის ტოლი (ანუ როგორც ამბობენ „ხაზი აწყობილია“ ტალღურ წინააღობამდე), მაშინ (5.15) მიიღებს სახეს

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_e &= \underline{U}_2 [\operatorname{ch} \gamma_0 (L - \ell) + \operatorname{sh} \gamma_0 (L - \ell)] \\ \underline{I}_e &= \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} Z_c} [\operatorname{ch} \gamma_0 (L - \ell) + \operatorname{sh} \gamma_0 (L - \ell)] \end{aligned} \right\}$$

ანუ ჰიპერბოლური ფუნქციების განმარტების თანახმად

$$\underline{U}_c = U_2 e^{j(\omega t - \varphi)} \quad \text{და} \quad \underline{I}_c = \frac{U_2}{\sqrt{3} Z_c} e^{j(\omega t - \varphi)}.$$

მამასადამე, როცა ხაზი აწყობილია ტალღურ წინაღობაზე ($Z_c = Z_c$), მაშინ ხაზში არსებობს მხოლოდ პირდაპირი ტალღა, ანუ ხაზის ბოლოში ტალღის არეკლვას ადგილი არ აქვს.

ამ შემთხვევაში ხაზის თავიდან l მანძილზე მდებარე წერტილში ხაზში გამავალი მიმძლავრე

$$\underline{S}_c = \sqrt{3} \underline{U}_c \underline{I}_c^* = \frac{U_2^2}{Z_c} e^{2j(\omega t - \varphi)}.$$

მამასადამე ხაზის თავსა და ბოლოში სიმძლავრე იქნება

$$\underline{S}_1 = \frac{U_2^2}{Z_c} e^{2j\varphi} \quad \text{და} \quad \underline{S}_2 = \frac{U_2^2}{Z_c},$$

ხოლო ხაზში სიმძლავრის დანაკარგები

$$\Delta S = \underline{S}_1 - \underline{S}_2 = \frac{U_2^2}{Z_c} (e^{2j\varphi} - 1).$$

5.3 ენერგიის გადაცემის ტალღური პროცესის სახასიათო პარამეტრების ფიზიკური არსი

როგორც აღენიშნეთ ელექტროგადაცემის ხაზით ელექტრული ენერგიის გადაცემისას ძაბვა და დენი ხაზის ნებისმიერ წერტილში შეიძლება განვიხილოთ როგორც ორი ურთიერთსაპირისპირო მიმართულების მოძრავი ტალღების ჯამი. ე.ი. ხაზის გასწვრივ ძაბვისა და დენის გავრცელება და, შესაბამისად, ელექტრული ენერგიის გადაცემა ტალღური პროცესია. ეს პროცესი ხასიათდება სხვადასხვა პარამეტრით: ტალღური წინაღობა; ტალღის გავრცელების კოეფიციენტი; ხაზის ტალღური სიგრძე; ტალღის გავრცელების სიჩქარე და სხვა.

ტალღური წინაღობა განისაზღვრება (5.3) ფორმულით

$$Z_c = \sqrt{Z_0 / Y_0} = \sqrt{(r_0 + jx_0) / (g_0 + jb_0)} = Z_c e^{j\varphi_{zc}}, \quad (5.19)$$

სადაც

$$Z_c = \sqrt{(r_0^2 + x_0^2) / (g_0^2 + b_0^2)} \quad (5.20)$$

და

$$\psi_{zc} = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{g_0 x_0 - b_0 r_0}{r_0 g_0 + x_0 b_0}. \quad (5.21)$$

ტალღური წინაღობის ფიზიკური არსი შეიძლება დაეადგინოთ (5.2) გამოსახულებათა დახმარებით. ამ გამოსახულებებიდან პირველი ჩაეწეროს პირდაპირი და უკუ ტალღების ჯამის სახით

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_{(1)} + \underline{U}_{(2)}.$$

მამინ მეორე გამოსახულების მიხედვით გვაქვს

$$I_c = I_{(1)} - I_{(2)} = \frac{1}{\sqrt{3} Z_c} (\underline{U}_{(1)} - \underline{U}_{(2)}),$$

აქედან

$$Z_c = \frac{\underline{U}_{(1)} - \underline{U}_{(2)}}{\sqrt{3} (I_{(1)} - I_{(2)})} = \frac{\underline{U}_{(1)g} - \underline{U}_{(2)g}}{I_{(1)} - I_{(2)}}.$$

ამრიგად, ტალღური წინაღობა ეს არის პირდაპირი და უკუ ტალღების ძაბვებისა და დენების სხვაობათა ფარდობა. იგი ასევე შეგვიძლია განვიხილოთ როგორც ერთი რომელიმე მიმართულების ტალღის ძაბვისა და დენის ფარდობა, როცა არ არსებობს მეორე მიმართულების ტალღა:

$$Z_c = \frac{\underline{U}_{(1)g}}{I_{(1)}}, \text{ როცა } \underline{U}_{(2)g}=0 \text{ და } I_{(2)}=0$$

ან

$$Z_c = \frac{\underline{U}_{(2)g}}{I_{(1)}}, \text{ როცა } \underline{U}_{(1)g}=0 \text{ და } I_{(1)}=0.$$

საპაერო ხაზებისთვის ტალღური წინაღობა დიდ ფარგლებში იცვლება. ის ძირითადად დამოკიდებულია ხაზის ფაზის კონსტრუქციულ ზომებზე (3.54). ერთსადენიანი ფაზის შემთხვევაში $Z_c=380-400$, ხოლო ორად და მეტად გახლეჩილი ფაზების შემთხვევაში $Z_c=260-290$ ომი (ცხრ.3.8). რადგანაც საპაერო ხაზებისთვის $x_0 g_0 < r_0 b_0$, ტალღური წინაღობის არგუმენტი უარყოფითია და მისი მნიშვნელობა $(-1+3)^0$ -ს ფარგლებშია.

ტალღის გავრცელების კოეფიციენტი განისაზღვრება (5.5) გამოსახულებით

$$\gamma_0 = \sqrt{Z_0 \cdot Y_0} = \sqrt{(r_0 + jx_0)(g_0 + jb_0)} = \gamma_0 e^{j\varphi} = \beta_0 + j\alpha_0 \quad (5.22)$$

სადაც

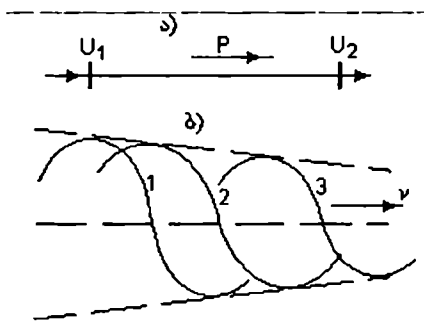
$$\gamma_0 = \sqrt{(r_0^2 + x_0^2)(g_0^2 + b_0^2)}, \quad (5.23)$$

$$\psi_{\gamma_0} = \frac{1}{2} \left(\arctg \frac{x_0}{r_0} + \arctg \frac{b_0}{g_0} \right) \quad (5.24)$$

და შესაბამისად

$$\beta_0 = \gamma_0 \cos \psi_{\gamma} \quad \text{და} \quad \alpha_0 = \gamma_0 \sin \psi_{\gamma}. \quad (5.25)$$

β_0 - ტალღის ქრობის მუდმივა, რომელიც გვიჩვენებს ხაზში ტალღის გადაადგილებისას ძაბვის (დენის) ამპლიტუდის ქრობის ხარისხს (ნახ.53), ხოლო α_0 - ფაზის ცვლილების კოეფიციენტი და გვიჩვენებს ტალღის გადაადგილებისას ძაბვის (დენის) ფეჭტორის შემობრუნებას საწყისი მიმართულების მიმართ (ნახ.54).



ნახ. 5.3 ელექტრული ენერგიის გადაცემის ტალღური ხასიათი: ა) ენერგიის გადაცემის მიმართულება; ბ) ხაზის გასწვრივ ტალღის გავრცელება.

ტალღის გავრცელების კოეფიციენტის რიცხვითი მნიშვნელობა დამოკიდებულია ხაზის ფაზის კონსტრუქციულ მომენტზე. როგორც ანგარიშები გვიჩვენებს ტალღის ქრობის კოეფიციენტი ზემაღალი ძაბვის ხაზებისთვის აღწევს $\beta_0 = (3-6) \cdot 10^{-5}$ 1/კმ, ხოლო ფაზის ცვლილების (ფაზური) კოეფიციენტი კი $\alpha_0 = (0,060-0,065)$ გრად/კმ $= (1,04+1,10) \cdot 10^{-3}$ რად/კმ.

ხაზში ტალღის გავრცელების მახასიათებელი პარამეტრია ტალღის სიგრძე λ . იგი წარმოადგენს მანძილს ტალღის იმ ორ შემოხვევს შორის, რომელთა რხევის ფაზები ერთმანეთისგან განსხვავდებიან 2π -ით. განმარტების თანახმად $\alpha_0 \lambda = 2\pi$, აქედან ტალღის სიგრძე

$$\lambda = \frac{2\pi}{\alpha_0} = \frac{360}{\alpha_0}, \text{ კმ} \quad (526)$$

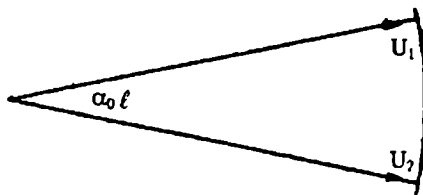
გაღება $T=1/f$ პერიოდის განმავლობაში გაერცელდება λ მანძილზე. აქედან გამომდინარე გაღლის გაერცელების სიჩქარე

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f = \frac{2\pi}{\alpha_0} f. \quad (527)$$

სიდიდე

$$\lambda_0 = \alpha_0 L, \text{ გრად} \quad (528)$$

გვიჩვენებს გაღლის რა ნაწილი მოთაესდება ხაზის მთელ L სიგრძეში. მას ხაზის გაღლურ სიგრძეს უწოდებენ.



ნახ. 5.4 ძაბვის ვექტორის შემობრუნება ხაზში გაღლის გადაადგილების დროს.

(526) და (528) გამოსახულებათა საფუძველზე დავადგენთ კაემირს ხაზის გაღლურ სიგრძესა და გაღლის სიგრძეს შორის

$$\lambda_0 = 2\pi \frac{L}{\lambda}. \quad (529)$$

ტექნიკურ-ეკონომიკური გაანგარიშების თანახმად ზემოაღნიშნული ძაბვის ხაზებზე გამოიყენება გახლეჩილი ჭაბები დიდი განიკეთის საღენებით, რომელთათვისაც დამახასიათებელია $I_0 \ll X_0$ და $G_0 \ll B_0$ (ცხრ. 3.8). ამ პირობებში ხაზში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები მცირეა და ამიტომ ასეთ ხაზებს პირობითად უდანაკარგო ხაზებს უწოდებენ. თუ გაანგარიშებისას ჩავთვლით $I_0 = G_0 = 0$, მაშინ ენერგიის გადაცემის გაღლური პროცესის სახით პარამეტრები მნიშვნელოვნად გამარტივდება. კერძოდ:

გაღლური წინაღობა ნამდვილი სიდიდეს

$$Z_c = \sqrt{\frac{x_0}{b_0}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \sqrt{\frac{X}{B}}. \quad (530)$$

გაღლის გაერცელების კოეფიციენტი წარმოსახვითი სიდიდეს

$$\gamma_0 = j\sqrt{x_0 \cdot b_0} = j\omega\sqrt{L_0 \cdot C_0}, \quad (531)$$

ანუ

$$\beta_0 = 0 \text{ და } \alpha_0 = \omega \sqrt{L_0 \cdot C_0} = \sqrt{x_0 \cdot b_0}. \quad (5.32)$$

ტალღის სიგრძე

$$\lambda = \frac{1}{f \sqrt{L_0 C_0}}; \quad (5.33)$$

ტალღის გავრცელების სიჩქარე

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}; \quad (5.34)$$

ხაზის ტალღური სიგრძე

$$\lambda_0 = \omega \sqrt{L_0 \cdot C_0} \cdot L = \sqrt{X \cdot B}. \quad (5.35)$$

(5.30)-(5.35) გამოსახულებაში L_0 და C_0 - 1კმ ხაზის ინდუქტიურობა და ტევადობა.

5.4 უდანაკარგო ხაზის გადაცემის განტოლებები

ელექტროგადაცემის ხაზში მიმდინარე პროცესის ანალიზის გამარტივების მიზნით მიღებულია ხაზი განვიხილოთ, როგორც უდანაკარგო (იდეალური) - $r_0 = 0$ და $g_0 = 0$. თუმცა ეს დამუშევა ზეგრძელი ხაზების შემთხვევაში რეეიმის პარამეტრების გაანგარიშებისას გარკვეულ ცდომილებებს იწვევს, რადგანაც აღნიშნული ხაზებისთვის $r_0 L$ და $g_0 L$ ანგარიშგასაწევი სიდიდეებია.

უდანაკარგო ხაზის გადაცემის განტოლებები მიიღება (5.4) და (5.11) განტოლებათა სისტემიდან, თუ მათში ჩავსვამთ ტალღური წინალობის და ტალღის გავრცელების კოეფიციენტების მნიშვნელობებს, განსაზღვრულს (5.30) და (5.32) გამოსახულებების მიხედვით:

$$\underline{U}_e = \underline{U}_1 \operatorname{chj} \alpha_0 \ell - \sqrt{3} \underline{I}_1 Z_c \operatorname{shj} \alpha_0 \ell,$$

$$\underline{I}_e = \underline{I}_1 \operatorname{chj} \alpha_0 \ell - \frac{\underline{U}_1}{\sqrt{3} Z_c} \operatorname{shj} \alpha_0 \ell.$$

და

$$\underline{U}_e = \underline{U}_2 \operatorname{chj} \alpha_0 (L - \ell) + \sqrt{3} \underline{I}_2 Z_c \operatorname{shj} \alpha_0 (L - \ell),$$

$$\underline{I}_e = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} Z_c} \operatorname{shj} \alpha_0 (L - \ell) + \underline{I}_2 \operatorname{chj} \alpha_0 (L - \ell).$$

წარმოსახვითი არგუმენტის პიკერბოლური ტრიგონომეტრიული ფუნქციები შევცვალოთ ჩვეულებრივი ტრიგონომეტრიული ფუნქციებით

$$\operatorname{ch} jx = \cos x \quad \text{და} \quad \operatorname{sh} jx = j \sin x,$$

მაშინ

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_e &= \underline{U}_1 \cos \alpha_0 \ell - j\sqrt{3} \underline{I}_1 Z_C \sin \alpha_0 \ell, \\ \underline{I}_e &= \underline{I}_1 \cos \alpha_0 \ell - j \frac{\underline{U}_1}{\sqrt{3} Z_C} \sin \alpha_0 \ell. \end{aligned} \right\} \quad (536)$$

და

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_e &= \underline{U}_2 \cos \alpha_0 (L - \ell) + j\sqrt{3} \underline{I}_2 Z_C \sin \alpha_0 (L - \ell), \\ \underline{I}_e &= j \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} Z_C} \sin \alpha_0 (L - \ell) + \underline{I}_2 \cos \alpha_0 (L - \ell). \end{aligned} \right\} \quad (537)$$

თუ ამ გამოსახულებებში $\underline{I}_1$ და $\underline{I}_2$ დენებს შევცვლით შესაბამისი სიმძლავრეებით და ბაზისურ ვექტორად (536)-ში მივიღებთ $\underline{U}_1$ ვექტორს, ხოლო (537)-ში კი $\underline{U}_2$ ვექტორს, გვექნება

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_e &= \underline{U}_1 (\cos \alpha_0 \ell - Q_{1*} \sin \alpha_0 \ell - j P_{1*} \sin \alpha_0 \ell), \\ \underline{I}_e &= \frac{\underline{U}_1}{\sqrt{3} Z_C} (P_{1*} \sin \alpha_0 \ell - j(Q_{1*} \cos \alpha_0 \ell + \sin \alpha_0 \ell)). \end{aligned} \right\} \quad (538)$$

და

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_e &= \underline{U}_2 (\cos \alpha_0 (L - \ell) + Q_{2*} \sin \alpha_0 (L - \ell) + j P_{2*} \sin \alpha_0 (L - \ell)), \\ \underline{I}_e &= \frac{\underline{U}_1}{\sqrt{3} Z_C} (P_{2*} \cos \alpha_0 (L - \ell) - j(Q_{2*} \cos \alpha_0 (L - \ell) + \sin \alpha_0 (L - \ell))). \end{aligned} \right\} \quad (539)$$

სადაც

$$P_{1*} = \frac{P_1}{P_{\text{ბაზ1}}}; \quad P_{2*} = \frac{P_2}{P_{\text{ბაზ2}}}; \quad Q_{1*} = \frac{Q_1}{P_{\text{ბაზ1}}}; \quad Q_{2*} = \frac{Q_2}{P_{\text{ბაზ2}}}. \quad (540)$$

თავის მხრივ

$$P_{\text{ბაზ1}} = \frac{U_1^2}{Z_C} \quad \text{და} \quad P_{\text{ბაზ2}} = \frac{U_2^2}{Z_C}$$

ხაზის ნატურალური სიმძლავრე, განსაზღვრული ხაზის თავის და ბოლოს ძაბვების მიხედვით, შესაბამისად.

უნდა აღინიშნოს, რომ უდანაკარგო ხაზისთვის $P_1 = P_2$, მაგრამ როცა $U_1 \neq U_2$, მაშინ $P_1 \neq P_2$.

(538) საშუალებას გაძლევს დავადგინოთ ხაზის გასწვრივ ძაბვისა და დენის ცვლილების ხასიათი, როცა მოცემულია (ცნობი-

ლია) ხაზის თავის პარამეტრები U_1, P_1 და Q_1 , ხოლო (5.39)-ით და-
ვადგენთ იმავე ხასიათს, როცა მოცემულია ხაზის ბოლოს პარამეტ-
რები U_2, P_2 და Q_2 .

ხაზის თავისა დაბოლოს პარამეტრებს შორის კავშირს მივი-
ღებთ, თუ (5.38)-ში ავიღებთ $\ell = L$, ხოლო (5.39)-ში კი $\ell = 0$:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_2 &= U_1 (\cos \alpha_0 L - Q_1 \sin \alpha_0 L - j P_1 \sin \alpha_0 L), \\ I_2 &= \frac{U_1}{\sqrt{3} Z_c} (P_1 \cos \alpha_0 L - j (Q_1 \cos \alpha_0 L + \sin \alpha_0 L)). \end{aligned} \right\} \quad (5.41)$$

და

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= U_2 (\cos \alpha_0 L + Q_2 \sin \alpha_0 L + j P_2 \sin \alpha_0 L), \\ I_1 &= \frac{U_2}{\sqrt{3} Z_c} (P_2 \cos \alpha_0 L - j (Q_2 \cos \alpha_0 L + \sin \alpha_0 L)). \end{aligned} \right\} \quad (5.42)$$

5.5 უღანაკარგო ხაზის გასწვრივ ძაბვის ცვლილების ხასიათი

ელექტროგადაცემის ხაზის გასწვრივ ძაბვის ცვლილების ხა-
სიათი დამოკიდებულია მუშაობის რეჟიმზე.

გავეანალიზოთ (5.38) გამოსახულება, რომელშიც საწყის ინ-
ფორმაციას წარმოადგენს ძაბვა და სიმძლავრე ხაზის თავში U_1, P_1
და Q_1 :

1) როცა $P_1=0$ და $Q_1=0$, გვაქვს $\underline{U}_\ell = U_1 \cos \alpha_0 \ell$.

ე.ი. ძაბვა მაქსიმალურია ხაზის თავში და ხაზის ბოლოსკენ
გადაადგილებასთან ერთად მცირდება კოსინუსის კანონით;

2) როცა $P_1=1$ და $Q_1=0$, მაშინ (5.38)-დან ვღებულობთ

$$\underline{U}_\ell = U_1 (\cos \alpha_0 \ell - j \sin \alpha_0 \ell) = U_1 e^{-j\alpha_0 \ell},$$

ე.ი. ძაბვა ხაზის გასწვრივ სიდიდით უცვლელია და ხდება
მხოლოდ მისი შემობრუნება U_1 საწყისი ვექტორის მიმართ $\alpha_0 \ell$
კუთხით (ნახ.5.4);

3) როცა $P_1 > 1$ და $Q_1=0$, მაშინ

$$\underline{U}_\ell = U_1 (\cos \alpha_0 \ell - j P_1 \sin \alpha_0 \ell),$$

ე.ი. ხაზის გასწვრივ გადაადგილებასთან ერთად ძაბვა სი-
დიდით იზრდება

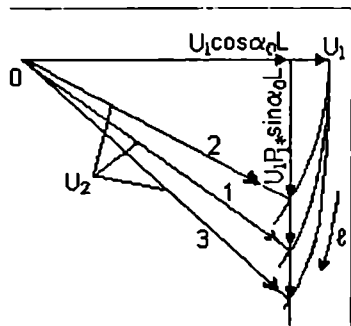
$$U_e = U_1 \sqrt{\cos^2 \alpha_0 \ell + P_1^2 \sin^2 \alpha_0 \ell},$$

და მისი ვექტორი შემობრუნდება $\alpha_0 \ell$ სიდიდებზე მეტი კუთხით.

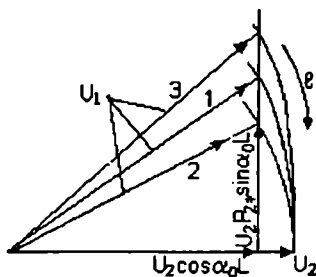
ხაზის გასწვრივ ძაბვის ცვლილების შემოთაღნიშნული კანონზომიერება განპირობებულია იმით, რომ: ა) როცა $P_{1*}=1$ და $Q_{1*}=0$, მაშინ ხაზის რეაქტიულ წინაღობაში რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები კომპენსირდება ხაზის ტევადურ გამტარობაში გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრით და ხაზში რეაქტიული სიმძლავრის დინებას ადგილი არ აქვს. რადგანაც ხაზი უდანაკარგოა ($r_0 = 0$) ძაბვის დანაკარგი ხაზში არ არის და ძაბვა ხაზის გასწვრივ უცვლელია (ნახ.5.5 წირი 1); ბ) როცა $P_{1*}<1$ და $Q_{1*}=0$, მაშინ ხაზში რეაქტიული სიმძლავრის გენერაცია ჭარბობს რეაქტიულ წინაღობაში დანაკარგებს და, რადგანაც $Q_{1*}=0$, ადგილი აქვს ხაზის თავიდან ბოლოსკენ ჭარბი რეაქტიული სიმძლავრის დინებას, რაც იწვევს ძაბვის დანაკარგს და ძაბვა ხაზის ბოლოსკენ დაგაადგილებასთან ერთად მცირდება (ნახ.5.5 წირი 2); გ) როცა $P_{1*}>1$ და $Q_{1*}=0$, მაშინ ხაზში რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგი ჭარბობს გენერაციას და დეფიციტის დასაფარავად ხაზში მის ბოლოდან შემოდის რეაქტიული სიმძლავრე, რომელიც მაქსიმალურია ხაზის ბოლოში, თანდათან მცირდება თავისკენ გადაადგილებისას და თავში ხდება ნულის გოლი. რეაქტიული სიმძლავრის ასეთი ნაკადი იწვევს ძაბვის ზრდას ხაზის ბოლო წერტილებში (ნახ.5.5 წირი 3). (5.39) გამოსახულებაში რეჟიმის საწყის ინფორმაციას წარმოადგენს ხაზის ბოლოს პარამეტრები – U_2 , P_2 და Q_2 . ამ გამოსახულების თანახმად ხაზის მუშაობის სხვადასხვა რეჟიმში ძაბვის განაწილების ხასიათს აქვს 5.6 ნახაზზე ნაჩვენები სახე.

აღნიშნული საწყისი პარამეტრების პერობებში, როცა $P_{2*}<1$ და $Q_{2*}=0$, მაშინ ხაზის ჭარბი რეაქტიული სიმძლავრე მიედინება ხაზის თავისკენ, ხოლო როცა $P_{2*}>1$ და $Q_{2*}=0$, მაშინ რეაქტიული სიმძლავრის დეფიციტი დაიფარება ხაზის თავიდან შემოსული სიმძლავრით იმ შემთხვევაში, როცა მოცემულია სიმძლავრე ხაზის ბოლოში (P_2 , Q_2) და ძაბვა ხაზის თავში (U_1), მაშინ (5.39) და (5.42) გამოსახულებათა ერთობლივი ამოხსნით ვღებულობთ

$$\underline{U}_e = U_1 \frac{\cos \alpha_0 (L - \ell) + Q_2 \sin \alpha_0 (L - \ell) + j P_2 \sin \alpha_0 (L - \ell)}{\cos \alpha_0 L + Q_2 \sin \alpha_0 L + j P_2 \sin \alpha_0 L} \quad (5.43)$$



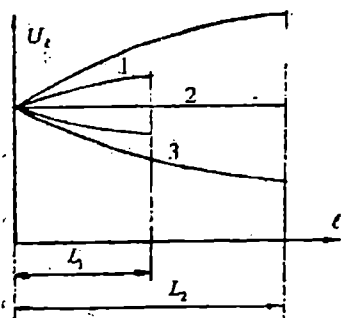
ნახ. 5.5 ხაზის გასწვრივ ძაბვის ცვლილების დიაგრამა, როცა $U_1 = \text{const}$ და $Q_1 = 0$



ნახ. 5.6 ხაზის გასწვრივ ძაბვის ცვლილების დიაგრამა, როცა $U_2 = \text{const}$ და $Q_2 = 0$

როცა $P_2 < 1$ და $Q_2 = 0$ ხაზის გასწვრივ ძაბვის ცვლილების ხასიათს ექნება 5.7 ნახაზზე ნაჩვენები სახე (წირი 1). როცა $P_2 = 1$ და $Q_2 = 0$, მაშინ ძაბვა ხაზის გასწვრივ ერთიდაიგივეა სიდიდით, (ნახ.5.7 წირი 2), ხოლო როცა $P_2 > 1$ და $Q_2 = 0$, მაშინ U_e ძაბვა სიდიდით მცირდება ხაზის ბოლოსაკენ გადაადგილებასთან ერთად (ნახ.5.7 წირი 3). როცა $L = l$, მაშინ

$$U_2 = \frac{U_1}{\cos \alpha_0 l + Q_2 \sin \alpha_0 l + j P_2 \sin \alpha_0 l}$$



ნახ. 5.7 ხაზის გასწვრივ ძაბვის ცვლილების გრაფიკი, როცა $Q_2 = 0$ და: 1) $P_2 < 1$; 2) $P_2 = 1$; 3) $P_2 > 1$.

გამორთულ ბოლოში ძაბვის ამაღლება დამოკიდებულია ხაზის სიგრძეზე და განისაზღვრება ფორმულით

როცა ხაზი მიმდებარეობს ბოლოში გამორთულია, ე.ი. გვაქვს უქმი სელის რეჟიმი $P_2 = 0$, $Q_2 = 0$, მაშინ ხაზის გასწვრივ ძაბვა იცვლება

$$U_e = U_1 \frac{\cos \alpha_0 (L - \ell)}{\cos \alpha_0 L} \quad (5.44)$$

კანონით და ხაზის ბოლოში ძაბვა აღწევს

$$U_2 = \frac{U_1}{\cos \alpha_0 L}$$

მნიშვნელობას.

$$\Delta U \% = \left(\frac{1}{\cos \alpha_0 L} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (5.45)$$

ანგარიშებით ვღებულობთ, რომ $L=100$ კმ სიგრძის ხაზისთვის $\Delta U \%=0,6\%$, ხოლო $L=500$ კმ სიგრძის ხაზისთვის $\Delta U \%=15,6\%-ს$.

5.6 ელექტროგადაცემის წრიული დიაგრამა და კუთხური მახასიათებლები

გრძელი ელექტროგადაცემის ხაზი ერთმანეთთან აკავშირებს ორ მძლავრ ელექტროსისტემას, ან მძლავრ ელექტროსადგურს მძლავრ ელექტროსისტემასთან. ორივე ამ შემთხვევაში ხაზის ორივე ბოლოში არსებობს ელექტრომამოძრავებელი ძალის წყარო. ასეთ შემთხვევაში ხაზის მუშაობის რეჟიმის პარამეტრების გასაანგარიშებლად მიზანშეწონილია გადასაცემი სიმძლავრის საანგარიშო გამოსახულება გამოვსახოთ ხაზის ბოლოების ძაბვების საშუალებით.

ხაზის ბოლოებში სიმძლავრე განისაზღვრება ცნობილი ფორმულებით

$$S_1 = \sqrt{3} U_1 I_1^* \text{ და } S_2 = \sqrt{3} U_2 I_2^* \quad (5.46)$$

(5.6) და (5.12) განტოლებათა სისტემების პირველ განტოლებებში გავითვალისწინოთ (5.7) და (5.8). მიღებული განტოლებებიდან განვსაზღვროთ I_1 და I_2 , გვაქვს

$$I_1 = \frac{1}{\sqrt{3B}} (AU_1 - U_2) \text{ და } I_2 = \frac{1}{\sqrt{3B}} (U_1 - AU_2)$$

დენების ეს მნიშვნელობები ჩავსვათ (5.46)-ში, მივიღებთ

$$\underline{S}_1 = \frac{\underline{A}^* \underline{U}_1^2}{\underline{B}} - \frac{\underline{U}_1 \underline{U}_2^*}{\underline{B}},$$

$$\underline{S}_2 = \frac{\underline{A}^* \underline{U}_2^2}{\underline{B}} + \frac{\underline{U}_1^* \underline{U}_2}{\underline{B}}.$$

$\underline{U}_2$ ძაბვის ვექტორი მიემართოთ ნამდვილ რიცხვთა ღერძის დადებითი მიმართულებით და კომპლექსური სიდიდეები ჩაეწეროთ მაჩვენებლიან ფორმაში:

$$\underline{A} = A e^{j\psi_A}; \quad \underline{B} = B e^{j\psi_B} \quad \underline{U}_1 = A e^{j\psi}; \quad \underline{U}_2 = U_2.$$

მაშინ

$$\left. \begin{aligned} \underline{S}_1 &= U_1^2 \frac{A}{B} e^{j(\psi_B - \psi_A)} - \frac{U_1 U_2}{B} e^{j(\psi_B + \delta)}, \\ \underline{S}_2 &= -U_1^2 \frac{A}{B} e^{j(\psi_B - \psi_A)} + \frac{U_1 U_2}{B} e^{j(\psi_B - \delta)}, \end{aligned} \right\} \quad (5.47)$$

სადაც δ - ხაზის ბოლოების ძაბვის ვექტორებს შორის ძვრის კუთხე.

შემოვიღოთ აღნიშვნები

$$\left. \begin{aligned} U_1^2 \frac{A}{B} &= \rho_1; \\ U_2^2 \frac{A}{B} &= \rho_2; \\ \frac{U_1 U_2}{B} &= \rho, \end{aligned} \right\} \quad (5.48)$$

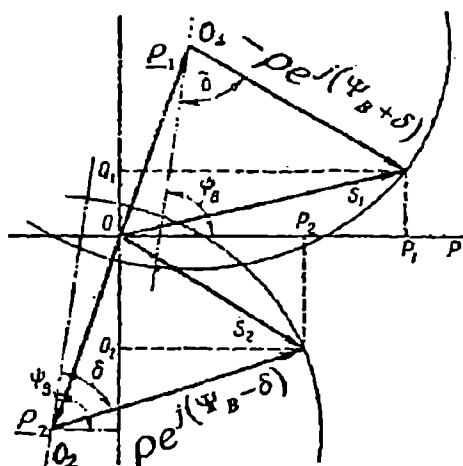
მაშინ გვაქვს

$$\left. \begin{aligned} \underline{S}_1 &= \rho_1 e^{j(\psi_B - \psi_A)} - \rho e^{j(\psi_B + \delta)}, \\ \underline{S}_2 &= -\rho_2 e^{j(\psi_B - \psi_A)} + \rho e^{j(\psi_B - \delta)}, \end{aligned} \right\} \quad (5.49)$$

ამრიგად, ხაზის ბოლოებში მოცემული ძაბვების პირობებში $\underline{S}_1$ და $\underline{S}_2$ დამოკიდებულია მხოლოდ δ ცვლადზე.

(5.49) გამოსახულება წარმოადგენს იმ წრეწირთა განტოლებებს, რომელთა რადიუსია ρ , ხოლო ცენტრები მდებარეობს $\underline{\rho}_1$ და

ρ_2 ვექტორების O_1 და O_2 ბოლოებში (ნახ.5.8). ამ გრაფიკის სიმბლავრის წრიულ დიაგრამას უწოდებენ.



ნახ. 5.8 ხაზის სიმბლავრის წრიული დიაგრამა

(5.47) გამოსახულების მიხედვით ეწერთ

$$P_1 = U_1^2 \frac{A}{B} \cos(\psi_B - \psi_A) - \frac{U_1 U_2}{B} \cos(\psi_B + \delta), \quad (5.50)$$

$$Q_1 = U_1^2 \frac{A}{B} \sin(\psi_B - \psi_A) - \frac{U_1 U_2}{B} \sin(\psi_B + \delta), \quad (5.51)$$

$$P_2 = -U_2^2 \frac{A}{B} \cos(\psi_B - \psi_A) + \frac{U_1 U_2}{B} \cos(\psi_B - \delta), \quad (5.52)$$

$$Q_2 = -U_2^2 \frac{A}{B} \sin(\psi_B - \psi_A) + \frac{U_1 U_2}{B} \sin(\psi_B - \delta). \quad (5.53)$$

ამ გამოსახულებებს სიმბლავრის კუთხურ მახასიათებლებს უწოდებენ, რადგანაც როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ხაზის ბოლოებში ცნობილი ძაბვების პირობებში P_1, P_2, Q_1, Q_2 სიმბლავრეები დამოკიდებულია მხოლოდ ძაბვებს შორის ძერის δ კუთხეზე.

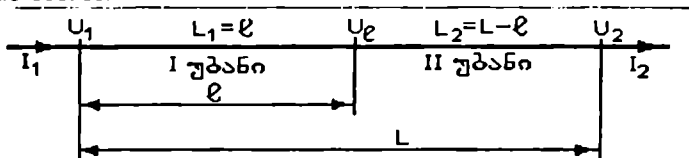
5.7 რეალურ ხაზში ძაბვისა და დენის ცვლილება მოცემული U_1 და U_2 ძაბვების დროს

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ (§5.5) ხაზის გასწვრივ ძაბვის მნიშვნელოვან ცვლილებას ადგილი აქვს მაშინ, როცა მასში გამავალი აქტიური სიმძლავრე მნიშვნელოვნად განსხვავდება ნატურალურისგან და ამასთან ეს ცვლილება დამოკიდებულია Q_2 რეაქტიული დატვირთვის სიდიდემზე.

ხაზის ძაბვის ქვეშ ჩართვისას შეუძლებელია ერთდროულად ჩაერთოს ორივე ბოლო და ამიტომ დროის მცირე პერიოდში ხაზს მაინც უწევს უქმი სვლის რეჟიმში მუშაობა, რომლის დროსაც მოსალოდნელია ძაბვის მნიშვნელოვანი ამაღლება მის ღია ბოლოში, რაც სახიფათოა სახაზო იზოლაციის მუშაობის თვალსაზრისით.

სხვადასხვა სახის ღონისძიების გატარების შემდეგ შეიძლება ხაზის ორივე ბოლოში მიეღწიოთ ძაბვათა სასურველ მნიშვნელობებს. მაგრამ ეს კიდეც არ ნიშნავს იმას, რომ ხაზის შუა წერტილებში ძაბვა არ ამაღლდება იზოლაციისთვის სახიფათო მნიშვნელობამდე.

აღნიშნულიდან გამომდინარე საჭიროა გაგვაჩნდეს საანგარიშო გამოსახულება, რომელიც საშუალებას მოგვცემს ხაზის მუშაობის ნებისმიერ რეჟიმში დავადგინოთ მის გასწვრივ ძაბვის ცვლილების ხასიათი.



ნახ. 5.9 ძაბვის განაწილების კანონზომიერების დადგენისთვის

ხაზის თავიდან l მანძილზე მდებარე წერტილში ძაბვის სიდიდის დადგენისთვის ხაზი წარმოდგენით გავყოთ ორ ნაწილად (ნახ.5.9), რომელთათვის განზოგადოებული მუდმივები (5.7)-(5.9) ჩაიწერება სახეში

$$\left. \begin{aligned} \underline{A}_1 &= \underline{D}_1 = \operatorname{ch} \gamma_0 l; & B_1 &= Z_c \operatorname{Sh} \gamma_0 l; \\ \underline{C}_1 &= \frac{1}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma_0 l; \\ \underline{A}_2 &= \underline{D}_2 = \operatorname{ch} \gamma_0 (L-l); & B_2 &= Z_c \operatorname{Sh} \gamma_0 (L-l); \\ \underline{C}_2 &= \frac{1}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma_0 (L-l). \end{aligned} \right\} (5.54)$$

გალაცემის (5.12) განტოლებები ჩაეწეროთ ხაზის ორივე უბნისთვის:

I უბანი

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_c \operatorname{ch} \gamma_0 \ell + \sqrt{3} \underline{I}_c \underline{Z}_c \operatorname{sh} \gamma_0 \ell \\ \underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}_c}{\sqrt{3} \underline{Z}_c} \operatorname{sh} \gamma_0 \ell + \underline{I}_c \operatorname{ch} \gamma_0 \ell \end{aligned} \right\}$$

II უბანი

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_c &= \underline{U}_2 \operatorname{ch} \gamma_0 (L - \ell) + \sqrt{3} \underline{I}_2 \underline{Z}_c \operatorname{sh} \gamma_0 (L - \ell) \\ \underline{I}_c &= \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3} \underline{Z}_c} \operatorname{sh} \gamma_0 (L - \ell) + \underline{I}_2 \operatorname{ch} \gamma_0 (L - \ell) \end{aligned} \right\}$$

ამ განტოლებათა ერთობლივი ამოხსნით ვღებულობთ

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_c &= \frac{1}{\operatorname{sh} \gamma_0 L} [\underline{U}_1 \operatorname{sh} \gamma_0 (L - \ell) + \underline{U}_2 \operatorname{sh} \gamma_0 \ell] \\ \underline{I}_c &= \frac{1}{\sqrt{3} \underline{Z}_c \operatorname{sh} \gamma_0 L} [\underline{U}_1 \operatorname{ch} \gamma_0 (L - \ell) - \underline{U}_2 \operatorname{ch} \gamma_0 \ell] \end{aligned} \right\} \quad (5.55)$$

$\underline{U}_2$ ძაბვის ვექტორი მიემართოთ ნამდვილ რიცხვთა ღერძის გასწვრივ და გვექნება

$$\underline{U}_c = \frac{U_2}{\operatorname{sh} \gamma_0 L} [K e^{j\phi} \operatorname{sh} \gamma_0 (L - \ell) + \operatorname{sh} \gamma_0 \ell] \quad (5.56)$$

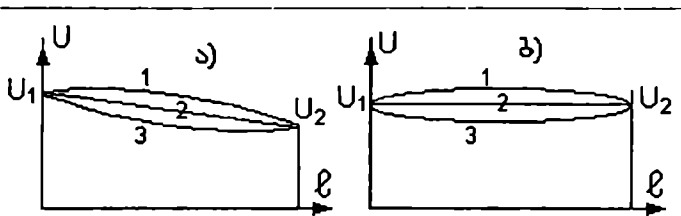
$$\underline{I}_c = \frac{U_2}{\sqrt{3} \underline{Z}_c \operatorname{sh} \gamma_0 L} [K e^{j\phi} \operatorname{ch} \gamma_0 (L - \ell) - \operatorname{ch} \gamma_0 \ell] \quad (5.57)$$

სადაც

$$K = \frac{U_1}{U_2} \quad (5.58)$$

წარმოადგენს ძაბვის ვარდილობას ხაზში.

მოცემული U_1 და U_2 ძაბვების პირობებში ხაზის გასწვრივ ძაბვის ცვლილების გრაფიკები ნაჩვენებია 5.10 ნახაზზე.



ნახ. 5.10 ძაბვის განაწილება ხაზის გასწვრივ: ა) როცა $U_1 \neq U_2$; ბ) როცა $U_1 = U_2$. 1) $P_1 < 1$; 2) $P_1 = 1$; 3) $P_1 > 1$.

5.8 ხაზის რეჟიმის პარამეტრების ურთიერთდამოკიდებულება

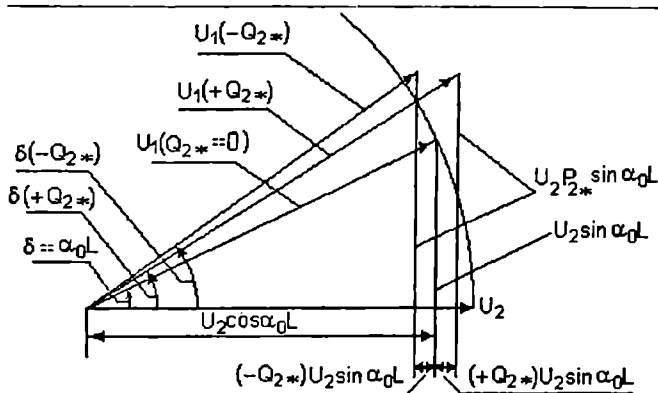
ელექტროგადაცემის ხაზის მუშაობის ნებისმიერი რეჟიმის დამახასიათებელი პარამეტრებია აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრე ხაზის თავსა და ბოლოში (P_1, P_2, Q_1, Q_2), ძაბვები ამავე ბოლოებში (U_1, U_2) და ამ ძაბვებს შორის ძვრის კუთხე (δ). ხაზის მუშაობის განგარიშების მიზანია ამ პარამეტრების მნიშვნელობათა დადგენა.

ნებისმიერი პარამეტრის მნიშვნელობა უნდა იყოს გეჟნიკურად დასაშვები და ეკონომიკურად მიზანშეწონილი. მამასადამე, ელექტროგადაცემის რეჟიმის ანგარიში გეჟნიკურ-ეკონომიკური ხასიათის ამოცანას წარმოადგენს.

რეჟიმის გაანგარიშებისას ხშირად წინასწარ ცნობილია P_2, U_1 და U_2 პარამეტრები. ასეთი სახის საწყისი ინფორმაციის არსებობა განპირობებულია იმით, რომ: 1) P_2 -ს სიდიდე ნაკარნახევია მიმღებ სისტემაში აქტიური სიმძლავრის ბალანსის პირობით; 2) ხაზის თავში ძაბვის სიდიდე U_1 შეზღუდულია ხანგრძლივად დასაშვები მაქსიმალური მნიშვნელობით და ამასთან მისი სიდიდე განაპირობებს თვით ელექტროგადაცემის მუშაობის მდგრადობას; 3) ხაზის ბოლოში ძაბვა U_2 განსაზღვრულია მიმღები სისტემის მუშაობის რეჟიმითა და მდგრადობის პირობით. აღნიშნულის გამო გადაცემის განგოლებებიდან გამომდინარე ხაზის ბოლოში რეაქტიული სიმძლავრის სიდიდე და მიმართულება ფაქტიურად განსაზღვრულია.

(5.42) გამოსახულების საფუძველზე აუაგოთ ძაბვების დიაგრამა (ნახ.5.11). დიაგრამიდან ჩანს, რომ მოცემული ხაზისთვის ცნობილი P_2 სიმძლავრის გადაცემისას U_1 ძაბვის სიდიდე და ძვრის კუთხე დამოკიდებულია ხაზი ბოლოში რეაქტიული სიმძლავრის სიდიდესა

და მიმართულებებზე. U_1 შედარებით მცირეა, როცა $Q_2 < 0$ და უფრო დიდია, როცა $Q_2 > 0$.



ნახ. 5.11 ძაბვის დიაგრამა, როცა ცნობილია ხაზის ბოლოს მონაცემები

ამრიგად, ხაზში ძაბვის ვარდნილობაზე $K=U_1/U_2$ გავლენას ახდენს Q_2 . მართლაც (5.42)-დან გვაქვს

$$K = \sqrt{(\cos \alpha_0 L + Q_2 \sin \alpha_0 L)^2 + (P_2 \sin \alpha_0 L)^2} \quad (5.59)$$

როგორც ამ გამოსახულებიდან ჩანს ძაბვის ვარდნილობაზე გავლენას ახდენს, აგრეთვე, ხაზის სიგრძე. კერძოდ, როცა $Q_2=0$, მაშინ: 1) $P_2 < 1$ პირობებში ძაბვის ვარდნილობა, ხაზის სიგრძის ზრდასთან ერთად მცირდება და იგი თავის მინიმალურ მნიშვნელობას აღწევს, როცა $L=1500$ კმ; 2) $P_2 > 1$ პირობებში კი იზრდება და თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას აღწევს, ასევე, როცა $L=1500$ კმ-ს. ხაზის სიგრძის შემდგომი ზრდისას 3000 კმ-მდე ძაბვის ვარდნილობის კოეფიციენტის ცვლილების ხასიათი ზემოთ თქმულის საპირისპიროა.

Q_2 სიმძლავრის სიდიდისა და მიმართულების შერჩევა საშუალებას გვაძლევს შივილოთ ძაბვის ვარდნილობის სასურველი სიდიდე.

Q_2 სიმძლავრის სიდიდე და მიმართულება გავლენას ახდენს აგრეთვე δ ძერის კუთხის მნიშვნელობაზე. ძერის კუთხე მცირეა, როცა $Q_2 > 0$ და დიდია, როცა $Q_2 < 0$. (ნახ.5.11) ელექტროგადაცემის მუშაობის მდგრადობის თვალსაზრისით, სხვა ერთნაირ პირობებში,

უმჯობესია ხაზის თავში იყოს შესაძლო მაქსიმალური ძაბვა და ძერის კუთხე რაც შეიძლება დაბალი. ე.ი. უფრო ხელსაყრელია რეჟიმი, როცა $Q_2 > 0$. 5.11 ნახაზიდან ჩანს, რომ

$$\delta = \arctg \frac{P_2 \cdot \sin \alpha_0 L}{\cos \alpha_0 L + Q_2 \cdot \sin \alpha_0 L} = \arctg \frac{P_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_0 L}{1 + Q_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_0 L}. \quad (5.60)$$

როგორც ეხედავთ ძაბვების ექვტორებს შორის ძერის კუთხის მნიშვნელობაზე, სხვა პარამეტრებთან ერთად, გავლენას ახდენს ხაზის სიგრძეც. როცა $P_2=1$ და $Q_2=0$ (5.60)-დან ვღებულობთ $\delta = \alpha_0 L$. ე.ი. ძერის კუთხე ხაზის სიგრძის პირდაპირპროპორციულია.

მიმღები სისტემის მდგრადი მუშაობის უზრუნველყოფის მიზნით დაბალი მნიშვნელობის ძერის კუთხის მისაღებად საჭიროა სრულდებოდეს $Q_2 > 0$ პირობა, განსაკუთრებით, საკმარისად გრძელი ხაზების შემთხვევაში. თუ მიმღები სისტემა $Q_2 > 0$ პირობას ვერ უზრუნველყოფს, მაშინ აუცილებელი ხდება ხაზის ბოლოში დამატებით დაყენებული იქნეს რეაქტიული სიმძლავრის მიმღები რეაქტორები.

ხაზში რეაქტიული სიმძლავრის ნაკადი გავლენას ახდენს ხაზის გასწვრივ ძაბვის განაწილების ხასიათზე და რეალურ ხაზებში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგებზე. აღნიშნულიდან გამომდინარე მოცემული P_2 აქტიური სიმძლავრის გადაცემისას δ კუთხის დაბალი მნიშვნელობის უზრუნველყოფის მიზნით Q_2 სიმძლავრის შერჩევის საკითხი დადგენილი უნდა იქნეს ტექნიკურ-ეკონომიკური გაანგარიშების საფუძველზე.

5.9 გრძელი ელექტროგადაცემის ხაზის მღერული სიმძლავრე და გადაცემის მარაგის კოეფიციენტი

ცნობილი U_1 და U_2 ძაბვების პირობებში გრძელი ელექტროგადაცემის ხაზით მიმღებ სისტემაში გადაცემული აქტიური სიმძლავრე ზოგადად განისაზღვრება (5.52) გამოსახულებით

$$P_2 = -U_2^2 \frac{A}{B} \cos(\psi_B - \psi_A) + \frac{U_1 U_2}{B} \cos(\psi_B - \delta)$$

ამ გამოსახულებიდან ჩანს, რომ მღერული სიმძლავრე, რომელიც შეიძლება გადაცემული იქნეს მოცემული ხაზით, შეადგენს

$$P_{2\text{მ}} = -U_2^2 \frac{A}{B} \cos(\psi_B - \psi_A) + \frac{U_1 U_2}{B}. \quad (5.61)$$

ამ დროს ძაბვებს შორის ძაერის კუთხე $\delta = \psi_B$.

უდანაკარგო ხაზის შემთხვევაში განზოგადებული მუდმივე-
ბისთვის გვაქვს (5.7)-(5.8):

$$\left. \begin{aligned} A &= \cos \alpha_0 L \quad \text{და} \quad \psi_A = 0^\circ, \\ B &= Z_c \sin \alpha_0 L \quad \text{და} \quad \psi_B = 90^\circ, \end{aligned} \right\} \quad (5.62)$$

სადაც $Z_c = \sqrt{x_0 / b_0}$.

ამრიგად, უდანაკარგო ხაზით გადაცემული აქტიური სიმ-
ძლავრე იქნება

$$P_2 = \frac{U_1 U_2}{B} \sin \delta = \frac{U_1 U_2}{Z_c \sin \alpha_0 L} \sin \delta \quad (5.63)$$

ხოლო ზღვრული სიმძლავრისთვის ვღებულობთ

$$P_{2\text{მ}} = \frac{U_1 U_2}{Z_c \sin \alpha_0 L}. \quad (5.64)$$

რადგანაც გემაღალი ძაბვის ხაზებისთვის $\alpha_0 \approx 0,06$
გრად/კმ, $L=(0-3000)$ კმ სიგრძის ხაზებისთვის $\sin \alpha_0 L > 0$, ხოლო
 $L=(3000-6000)$ კმ სიგრძის ხაზებისთვის $\sin \alpha_0 L < 0$. აქედან გამომ-
დინარე, ხაზის ზღვრული სიმძლავრე პირველ შემთხვევაში დადები-
თია და მეორე შემთხვევაში კი უარყოფითი. ხაზის სიგრძის შემ-
დგომი ზრდისას ზღვრული სიმძლავრის მნიშვნელობები პერიოდუ-
ლად მეორება 6000კმ პერიოდით (ნახ. 5.12).

ზღვრული სიმძლავრის აბსოლუტური მინიმუმი

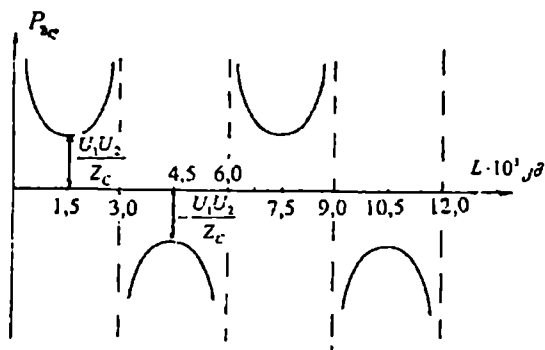
$$P_{\text{მინ}} = \frac{U_1 U_2}{Z_c},$$

რომელსაც ადგილი აქვს $L=1500:4500$ და ა.შ. კმ სიგრძის ხაზების
შემთხვევაში (ნახ.5.12).

მოცემული სიმძლავრის დაგვირთვის ზღვარი, როგორც წესი,
დადგინდება თვით ამ ხაზის დანიშნულებით და იგი ისეთი უნდა
იყოს, რომ მიმღები სისტემის მუშაობის სტაბილური ზღვრადობის
უზრუნველყოფის მიზნით ხაზს კიდევ გააჩნდეს სიმძლავრის გადაცე-
მის შესაძლებლობის გარკვეული მარაგი

$$K_{\text{მარ.}} \% = \frac{P_{\text{მ}} - P_0}{P_{\text{მ}}} \cdot 100 \geq K_{\text{მარ.,ნორმ}} \%, \quad (5.65)$$

სადაც P_0 - ხაზის დატვირთვა; $K_{\text{გარ.პროგ}}\%$ - სიმძლავრის გადაცემის მარაგის ნორმა, %.



ნახ. 5.12 ხაზი სიგრძისაგან მისი ზღვრული სიმძლავრის დამოკიდებულების გრაფიკი

მამასადაბე მოცემული ხაზის დატვირთვის გელა ზღვარი

$$P_{0, \text{გლ}} = (1 - K_{\text{გარ.პროგ}} \% \cdot 10^{-2}) \cdot P_{\Sigma}. \quad (5.66)$$

(5.65) გამოსახულებიდან ჩანს, რომ სიმძლავრის გადაცემის მარაგის სასურველი კოეფიციენტის უზრუნველყოფის მიზნით ან უნდა შევამციროთ ხაზის დატვირთვა P_0 , ან გაუმარდოთ ხაზის ზღვრული სიმძლავრე.

მოცემული სიგრძის ელექტროგადაცემის ხაზის ზღვრული სიმძლავრის გაზრდა შესაძლებელია ან უფრო მაღალი ნომინალური ძაბვის ხაზის, ან იმავე ნომინალური ძაბვის მეორე ხაზის აგებით. ორივე შემთხვევაში იზრდება მშენებლობისა და ექსპლუატაციის ხარჯები. გარდა ამისა, რეჟიმისაგან დამოკიდებულებაში საჭირო ხდება ხაზიდან ჭარბი რეაქტიული სიმძლავრის ართმევა (როცა $P_2 < 1$), ან პირიქით მიწოდება (როცა $P_2 > 1$), რაც ასევე დამატებით კაპიტალურ ხარჯებს მოითხოვს.

როგორც (5.60) განგოლებიდან ჩანს $Q_2 = 0$ და $P_2 = \text{const}$ რეჟიმში ხაზის სიგრძის ზრდისას ხაზის ბოლოებში ძაბვათა ექვტორებს შორის ძვრის კუთხე θ იზრდება, რომელმაც შეიძლება მიაღწიოს იმ ზღვრულ მნიშვნელობას, რომლის დროსაც გადაცემის მარაგის კოეფიციენტი ნულის ტოლია.

აღნიშნულიდან გამომდინარე ხაზის სიგრძის ზრდასთან (1500 კმ-მდე) ერთად, მიმღები სისტემის მდგრადობის უზრუნველყოფის თვალსაზრისით საჭიროა შევამციროთ გადასაცემი სიმძლავრე.

$L=(0-3000)$ კმ სიგრძის ხაზებით მიმდები სისტემის მუშაობის სტატიკური მდგრადობის $\partial P/\partial \delta > 0$ კრიტერიუმის უზრუნველყოფა შესაძლებელია მაშინ, როცა ძაბვათა ვექტორებს შორის ძერის კუთხე $\delta=(0+90^\circ)$, ხოლო $L=(3000-6000)$ კმ სიგრძის ხაზებით კი მაშინ, როცა $\delta=(180+270^\circ)$.

გადასაცემი სიმძლავრის მარაგის კოეფიციენტის უზრუნველყოფის მიზნით, ძერის კუთხის საჭირო მნიშვნელობის მიღწევა შეიძლება Q_2 რეაქტიული სიმძლავრის სიდიდისა და მიმართულების სათანადო შერჩევით.

5.10 რეაქტიული სიმძლავრე ხაზის თავსა და ბოლოში

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ გრძელი ხაზის სახასიათო რეჟიმებს შორის ყველაზე უფრო პრაქტიკულს წარმოადგენს რეჟიმი, რომლის საწყისი ინფორმაცია მოცემულია ძაბვათა მნიშვნელობებით ხაზის თავსა და ბოლოში (U_1, U_2) და გადასაცემი აქტიური სიმძლავრის სახით ხაზის ბოლოში (P_2). ამ პირობებში ხაზის თავსა და ბოლოში რეაქტიულ სიმძლავრეთა ნაკადი სიდიდითა და მიმართულებით მკაცრად განსაზღვრულია.

ანალიზის გამარტივების მიზნით განვიხილოთ უდანაკარგო ხაზი, რომლისთვისაც განზოგადოებული მუდმივები განისაზღვრება (5.62) გამოსახულებით. ამ პირობებში (5.51) და (5.53) ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$Q_1 = U_1^2 \frac{\cos \alpha_0 L}{Z_c \sin \alpha_0 L} - \frac{U_1 U_2}{Z_c \sin \alpha_0 L} \cdot \cos \delta;$$

$$Q_2 = -U_2^2 \frac{\cos \alpha_0 L}{Z_c \sin \alpha_0 L} + \frac{U_1 U_2}{Z_c \sin \alpha_0 L} \cdot \cos \delta.$$

ანუ

$$Q_1 + Q_2 = (U_1^2 - U_2^2) \frac{\operatorname{ctg} \alpha_0 L}{Z_c}. \quad (5.67)$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ (5.40)-დან

$$Q_1 = Q_1 \cdot P_{\omega_0 1} = Q_1 \cdot \frac{U_1^2}{Z_c} \text{ და } Q_2 = Q_2 \cdot P_{\omega_0 2} = Q_2 \cdot \frac{U_2^2}{Z_c},$$

მივიღებთ

$$Q_1 \cdot \frac{U_1^2}{Z_c} + Q_2 \cdot \frac{U_2^2}{Z_c} = (U_1^2 - U_2^2) \frac{\operatorname{ctg} \alpha_0 L}{Z_c}.$$

მამასადაბე რეაქტიული სიმძლავრე ხაზის თავში

$$Q_1 = \left(1 - \frac{1}{K^2}\right) \operatorname{ctg} \alpha_0 L - \frac{1}{K^2} Q_2. \quad (5.68)$$

თავის მხრივ Q_2 შეიძლება განესაზღვროთ (5.59)-დან

$$Q_2 = -\operatorname{ctg} \alpha_0 L + \sqrt{(K / \sin \alpha_0 L)^2 - P_2^2}. \quad (5.69)$$

როგორც მიღებული გამოსახულებიდან ჩანს, U_1 , U_2 და P_2 საწყისი პირობებისას ხაზის თავსა და ბოლოში რეაქტიული სიმძლავრე განისაზღვრება ერთმნიშვნელოვნად. ამასთან (5.67)-ის თანახმად მათი ჯამი მოცემულ პირობებში მუდმივი სიდიდეა.

თუ ძაბვის ვარდნილობა $K=1$, მაშინ ხაზის სიგრძისა და გადასაყვამი აქტიური სიმძლავრის მიუხედავად $Q_1 = -Q_2$. ხოლო როცა $K=1$ და $P_2=1$, მაშინ ხაზის სიგრძის მიუხედავად $Q_1 = Q_2 = 0$.

იმ შემთხვევაში, თუ ხაზის ბოლოებში ანგარიშით მიღებულ Q_1 და Q_2 სიდიდეთა შესაბამისად არ ხერხდება რეაქტიულ სიმძლავრეთა ბალანსის დამყარება, მაშინ შენარჩუნებული ვერ იქნება ძაბვის სასურველი ვარდნილობა.

თუ რაიმე მოსაზრებით P_2 სიმძლავრის გადაცემისას საჭიროა ხაზის ბოლოში Q_2 წინასწარ დადგენილი სიმძლავრის შენარჩუნება, მაშინ (5.59) გამოსახულებით ჯერ უნდა განისაზღვროს ძაბვის ვარდნილობა და შემდეგ (5.68) გამოსახულებით კი Q_1 .

ხაზის დამყარებული რეჟიმისას მის ბოლოებში რეაქტიულ სიმძლავრეთა ბალანსი განხორციელებული უნდა იქნეს გარკვეული ტექნიკური საშუალებებით. მოცემული ხაზისთვის (5.69) და (5.68) გამოსახულებებით Q_2 და Q_1 სიმძლავრეთა დადგენის შემდეგ საჭიროა უზრუნველყოთ ხაზიდან რეაქტიული სიმძლავრის ართმევა ან მიწოდება, იმისდა მიხედვით, გვაქვს მისი სიჭარბე თუ დეფიციტი.

პრაქტიკულად აღნიშნული ღონისძიება ხორციელდება ხაზის თავში არსებული გენერატორების და, საჭიროების შემთხვევაში, მამუნიტების რეაქტორების გამოყენებით, ხოლო ხაზის ბოლოში კი სინქრონული კომპენსატორების ან სტატიკური რეგულირებადი რეაქტიული სიმძლავრის წყაროს გამოყენებით, რომელიც წარმოადგენს პარალელურად (მიმდევრობით) ჩართულ კონდენსატორთა ბატარეასა და მამუნიტებელ რეაქტორს. აღნიშნულ წყაროს შეუძლია რეაქტიული სიმძლავრის როგორც გაყვამის, ასევე მიღების რეჟიმში მუშაობა, რაც ხორციელდება ავტომატური მართვის გზით. ხაზის

ბოლოში არც ისე იშვიათად ჩართავენ არარეგულირებად მაშენებელ რეაქტორსაც.

5.11 გრძელი ელექტროგადაცემის ხაზის პარამეტრების კომპენსაცია

გრძელი ხაზის გამგარუნარიანობა ანუ სიმძლავრის გადაცემის შესაძლებლობა, გადაცემის მარაგის ნორმირებული კოეფიციენტის უზრუნველყოფის პირობებში, განისაზღვრება (5.66) გამოსახულებით, რომელიც (5.64)-ის გათვალისწინებით ჩაიწერება შემდეგ სახეში

$$P_{0, \text{ზ}} = (1 - K_{\text{პარ.ნორმ}} \% \cdot 10^{-2}) \cdot \frac{U_1 U_2}{Z_c \sin \alpha_0 L} \quad (5.70)$$

ხაზში არსებული ძაბვის სამალღებელი და სადაბლებელი გრანსფორმატორები თავიანთი ელექტრული წინააღობებით ამცირებენ ხაზის ზღვრულ სიმძლავრეს და შესაბამისად, მის გამგარუნარიანობას.

L სიგრძის ხაზის გამგარუნარიანობის ამაღლება შესაძლებელია ნომინალური ძაბვის ამაღლებით (შემდეგი საფეხურის ნომინალური ძაბვის გამოყენებით), ან მოცემულ პირობებში ხაზის ელექტრული პარამეტრების შეცვლის გზით, რაც გამოიწვევს როგორც Z_c ტალღური წინააღობის, ასევე α_0 ფაზური კოეფიციენტის შეცვლას.

Z_c და α_0 პარამეტრების შეცვლას, რომელიც ხორციელდება ხაზი ელექტრული პარამეტრების შეცვლის გზით, ხაზის ელექტრული პარამეტრების კომპენსაციას უწოდებენ.

ხაზის პარამეტრების კომპენსაცია შეიძლება განხორციელდეს მაკომპენსირებელი დანადგარებით, რომლებიც კონსტრუქციისა და შესაძლებლობის მიხედვით იყოფიან: ა) არარეგულირებადი სტატიკური მოწყობილობა (რეაქტორები და კონდენსატორები); ბ) სინქრონული მანქანები-კომპენსატორები; გ) მართვადი სტატიკური დანადგარები (რეაქტორები მაგნიტური სისტემის მუდმივი დენის შემავნიტებით; კონდენსატორები ავტომატური ენტილური მართვით; რეაქტორ-კონდენსატორები ენტილური კომუტაციით).

ზემაღალი ძაბვის გრძელ ხაზებზე პრაქტიკულად ყოველთვის მიერთებულია (ან ხაზში ჩართულია) მაკომპენსირებელი დანადგარები. მათი საშუალებით მიიღწევა არა მარტო ხაზის გამგარუნარიანობის საჭირო მნიშვნელობა, არამედ ხაზის გასწვრივ ძაბვის დო-

ნის გათანაბრება. ასევე, მათი საშუალებით: იზღუდება ხაზის მიერ გენერირებული რეაქტიული ნაკადების გადაღინება; მცირდება შინაგანი გადამტეხვები; მიმღებ სისტემაში მყარდება რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსი.

არსებობს ხაზის პარამეტრების კომპენსაციის ორი გზა:

1) განივი, როცა მაკომპენსირებული დანადგარი ჩართულია ხაზის ფაზურ სადენსა და მიწას შორის და 2) გრძივი, როცა აღნიშნული დანადგარი ჩართულია ფაზურ სადენში მიმდევრობით.

გრძივი კომპენსაციის დანადგარებს (კონდენსატორთა ბატარეა) უმთავრესად გვეადური წინაღობა გააჩნია და ისინი ხაზის ინდუქტიურ წინაღობას ამცირებენ, რაც გამოც მცირდება ხაზის ტალღური წინაღობა და შედეგად იზრდება ხაზის გამტარუნარიანობა და გადაცემის მარაგის კოეფიციენტი. გრძივი კომპენსაცია პირობითად ხაზის ტალღური სიგრძის შემცირების ეკვივალენტურია (535).

$$\gamma_g = \alpha_0 L = \sqrt{(X_b - X_{g\lambda})} \cdot B,$$

სადაც $X_{g\lambda}$ - მაკომპენსირებული დანადგარის გვეადური წინაღობა.

ნახევარტალღის ტოლი ელექტრული სიგრძის მქონე (≈ 3000 კმ) ხაზისთვის $Z_c \sin \alpha_0 L = 0$ და, შესაბამისად, ხაზის ზღვრული სიმძლავრე მნიშვნელოვნად დიდია - ბევრად აღემატება ნატურალურს. როცა ხაზის სიგრძე განსხვავებულია ნახევარტალღის სიგრძისგან, მას პარამეტრების კომპენსაციის გზით შეიძლება მიეცეს ის თვისებები, რაც ბუნებრივად გააჩნია ნახევარტალღური სიგრძის ხაზს. ასეთ შემთხვევაში ამბობენ „ხაზი აწყობილია ნახევარტალღაზე“. გამოკვლევები ადასტურებენ, რომ ამ სახის კომპენსაცია ტექნიკურ-ეკონომიკურად მიზანშეწონილია როცა ხაზის ბუნებრივი სიგრძე 1500-3000კმ ფარგლებშია.

შორეული ელექტროგადაცემის ხაზის პარამეტრების კომპენსაცია შეიძლება განხორციელდეს შემდეგნაირად:

ა) **ხაზის მხოლოდ ტალღური წინაღობის კომპენსაცია.** ამ დროს ხაზზე მაკომპენსირებული დანადგარები იმ ინგარიშით შეირჩევა, რომ შემცირდეს მხოლოდ Z_c . ეს შეიძლება განხორციელდეს თუ ხაზის ინდუქტიურ წინაღობას იმდენჯერვე შევამცირებთ, რამდენჯერაც გავზრდით მის გვეადურ გამტარობას. ამ შემთხვევაში ტალღის გავრცელების კოეფიციენტი და ხაზის ტალღური სიგრძე არ შეიცვლება.

აღნიშნული ღონისძიებების განხორციელების შედეგად მნიშვნელოვნად იზრდება ხაზის ზღვრული სიმძლავრე და შესაბამისად მისი გამტარუნარიანობა. თუ გადასაცემი P_0 სიმძლავრე იმავე სიდი-

დის რჩება, მაშინ რეჟიმის შესაბამისი ძერის კუთხე შემცირდება და მიმღები სისტემის სტატიკური მდგრადობის მარაგის კოეფიციენტი გაიზრდება.

ბ) ხაზის მხოლოდ ტალღური სიგრძის კომპენსაცია ანუ „ხაზის აწყობა“. ამ დროს ხაზის ინდუქტიურობას და ტევადობას ხელოვნურად ერთნაირი ჯერადობით ამცირებენ. ამ შემთხვევაში ხაზის ტალღური წინაღობა უცვლელი რჩება, ხოლო ტალღის გავრცელების კოეფიციენტი და შესაბამისად ხაზის ტალღური სიგრძე მცირდება. შედეგად იზრდება ხაზის ზღერული სიმძლავრე და მისი მინიმალური მნიშვნელობა $P_{\text{მლ}}=f(L)$ გრაფიკზე (ნახ. 5.12) უფრო მარჯვნივ გადაინაცვლებს. ამ ღონისძიებით ხაზის გამგარუნარიანობა იზრდება.

გ) ხაზის ყველა რეაქტიული პარამეტრის სრული კომპენსაცია ანუ ხაზის შორეულებით ნულოვან სიგრძეზე დაყვანა. ამ დროს მაკომპენსირებული დანადგარები მთლიანად აკომპენსირებენ როგორც ინდუქტიურ წინააღობას, ასევე ტევადურ გამგარობას და ხაზს გააჩნია მხოლოდ აქტიური პარამეტრები. ხაზით გადასაცემი სიმძლავრის მაქსიმუმი შემზღუდულია მხოლოდ სადენთა გახურების პირობით.

პრაქტიკულად ხაზის პარამეტრების კომპენსაციის დროს მისი ინდუქტიუობა და ტევადობა სხვადასხვა ჯერადობით იცვლება, რაც ერთდროულად იწვევს ხაზის როგორც ტალღური წინააღობის, ასევე ტალღური სიგრძის შეცვლას.

აღსანიშნავია, რომ როცა ხაზზე მიერთებულია შეყურსულ პარამეტრებიანი საკომპენსაციო დანადგარი (პრაქტიკულად ასეც არის), მაშინ ცნებები „ხაზის ტალღური წინააღობა“, „ტალღური სიგრძე“ და „ნატურალური სიმძლავრე“ პირობითია.

5.12 გრძელი ელექტროგადაცემის ხაზის დამყარებული რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება

შორ მანძილზე ელექტროენერგიის გადაცემა მაღალი ეკონომიკური მაჩვენებლებით უნდა გამოირჩეოდეს. აქ უმრავლეს შემთხვევაში ხაზის მუშაობის რეჟიმის პარამეტრების დასაშვებ ფარგლებში შენარჩუნება სპეციალური მაკომპენსირებული დანადგარების გამოყენების გარშე ფაქტიურად შეუძლებელი ხდება. ამიტომ ესა თუ ის დამყარებული რეჟიმი მოითხოვს ტექნიკურ-ეკონომიკურ დასაბუთებას.

გადამცემი და მიმღები სისტემის მუშაობის რეჟიმებიდან გამომდინარე ელექტროგადაცემის ხაზს უწევს სხვადასხვა ლაგირ-

თვით მუშაობა. თითოეულ ამ შემთხვევაში ანგარიში გარდება ხაზის მუშაობის რეჟიმის პარამეტრების განსაზღვრის მიზნით. რეჟიმის პარამეტრთა დასაშვები მნიშვნელობების დასადგენად და აუცილებლობის შემთხვევაში, შესაბამისი მაკომპენსირებელი დანადგარების ეკონომიკურად გამართლებულ სიმძლავრეთა განსასაზღვრად საჭიროა გამოვიყენოთ ხაზის მაქსიმალური და მინიმალური დატვირთვების რეჟიმები. თუ ამ რეჟიმებში მოხერხდა გექნიკურ-ეკონომიკურად გამართლებული რეჟიმის პარამეტრების უზრუნველყოფა, მაშინ სხვა დანარჩენ რეჟიმებში უზრუნველყოფილი იქნება მუშაობის ნორმალური (დასაშვები) პარამეტრები.

ელექტროგადაცემის ხაზის რეჟიმი ხასიათდება ძაბვებისა და სიმძლავრეთა მნიშვნელობებით მის თავსა და ბოლოში და ძვრის კუთხით ამ ძაბვებს შორის $U_1, U_2, P_1, Q_1, P_2, Q_2$ და δ (§5.6). ამ შვიდ პარამეტრს შორის კავშირი მოცემულია (550)-(553) ოთხი განტოლებით. აქედან გამომდინარე ხაზის რეჟიმის პარამეტრების ცალსახად დასადგენად საჭიროა ამ პარამეტრებიდან მოცემული იყოს რომელიმე სამი, როგორც გაანგარიშების საწყისი ინფორმაცია.

თეორიული თვალსაზრისით საწყის ინფორმაციად შეიძლება გაგვაჩნდეს პარამეტრთა შემდეგი კომბინაცია: 1) U_1, U_2, P_1 ; 2) U_1, U_2, P_2 ; 3) U_1, P_1, Q_1 ; 4) U_2, P_2, Q_2 .

უნდა აღინიშნოს, რომ ზემოაღნიშნული ძაბვის ხაზებით არ იგეგმება რეაქტიული სიმძლავრის გადაცემა. ამიტომ საწყის პარამეტრთა კომბინაციის „3“ და „4“ შემთხვევა ნაკლებად პრაქტიკულია.

აღნიშნულ საწყის ინფორმაციათა საფუძველზე (550)-(553) განტოლებების ამოხსნის ალგორითმი მოცემულია ქვემოთ:

1) ცნობილია U_1, U_2 და P_1

(550)-დან განესაზღვრავთ ძაბვებს შორის ძვრის კუთხეს

$$\delta = \arccos \left[\frac{U_1}{U_2} A \cos(\psi_B - \psi_A) - \frac{P_1 B}{U_1 U_2} \right] - \psi_B. \quad (5.71)$$

ვიცით რა δ კუთხე (551)-(553) გამოსახულებებით განესაზღვრავთ შესაბამისად Q_1, P_2 და Q_2 პარამეტრებს;

2) ცნობილია U_1, U_2 და P_2 .

(552)-დან განესაზღვრავთ δ კუთხეს

$$\delta = \psi_B - \arccos \left[\frac{P_2 B}{U_1 U_2} + \frac{U_2}{U_1} A \cos(\psi_B - \psi_A) \right]. \quad (5.72)$$

და (550), (551) და (553) გამოსახულებებით განესაზღვრავთ შესაბამისად P_1, Q_1 და Q_2 პარამეტრებს;

3) ცნობილია U_1, P_1 და Q_1 .

(5.50) და (5.51) განგოლებათა საფუძველზე განესაზღვრაუთ U_2 ძაბვას

$$U_2 = \frac{B}{U_1} x$$

$$x \sqrt{\left[U_1^2 \frac{A}{B} \cos(\psi_B - \psi_A) - P_1 \right]^2 + \left[U_1^2 \frac{A}{B} \sin(\psi_B - \psi_A) - Q_1 \right]^2} \quad (5.73)$$

ამის შემდეგ (5.71)-ით განესაზღვრაუთ δ კუთხეს, (5.52) და (5.53) გამოსახულებებით კი განესაზღვრაუთ შესაბამისად P_2 და Q_2 პარამეტრებს;

4) ცნობილია U_2 , P_2 და Q_2 .

(5.52) და (5.53) განგოლებათა საფუძველზე განესაზღვრაუთ U_1 ძაბვას

$$U_1 = \frac{B}{U_2} x$$

$$x \sqrt{\left[U_2^2 \frac{A}{B} \cos(\psi_B - \psi_A) + P_2 \right]^2 + \left[U_2^2 \frac{A}{B} \sin(\psi_B - \psi_A) + Q_2 \right]^2} \quad (5.74)$$

ამის შემდეგ (5.72)-ით განესაზღვრაუთ δ კუთხეს, ხოლო (5.50) და (5.51) გამოსახულებებით კი, შესაბამისად, P_1 და Q_1 პარამეტრებს.

თუ ანგარიშით მიღებულ Q_1 და Q_2 სიმძლავრეთა მნიშვნელობებს ვერ უზრუნველყოფს გადამცემი და მიმღები სისტემები, მაშინ ხაზის თავსა და ბოლოში საჭირო გახდება მაკომპენსირებელი დანადგარის დაყენება, რომელთა სიმძლავრე უნდა დადგინდეს თითოეულ ბოლოში რეაქტიული სიმძლავრის ბალანსის მიხედვით.

მინიმალური დატვირთვების რეჟიმში საჭიროა განისაზღვროს ძაბვის მნიშვნელობა ხაზის შუალედურ ($\ell \approx L/2$) წერტილში, რისთვისაც ვისარგებლებთ (5.56) გამოსახულებით. თუ U_ℓ ძაბვის სიდიდე დასაშვებზე მეტი აღმოჩნდება, მაშინ საჭიროა ამ წერტილში დაეაყენოთ სათანადო სიმძლავრის მაშუნგებელი რეაქტორი.

ხაზის შუალედურ წერტილში ძაბვის მაღალი მნიშვნელობა მოსალოდნელია რეჟიმში, როცა $P_2=0$. ამ შემთხვევაში (5.72)-ის თანახმად

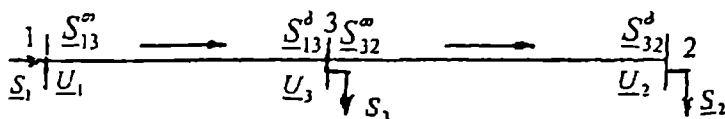
$$\delta = \psi_B - \arccos \left[\frac{U_2}{U_1} A \cos(\psi_B - \psi_A) \right] \quad (5.75)$$

და (5.57) -ის შესაბამისად, როცა $\ell = \frac{L}{2}$, გვაქვს

$$\underline{U}_{(\frac{L}{2})} = \frac{U_2 \operatorname{sh} \gamma_0 \frac{L}{2}}{\operatorname{sh} \gamma_0 \frac{L}{2}} [\operatorname{Ke}^{\beta} + 1] = \frac{U_2}{2 \operatorname{ch} \gamma_0 \frac{L}{2}} [\operatorname{Ke}^{\beta} + 1], \quad (5.76)$$

სადაც δ აიღება (5.75)-ის მიხედვით.

იმ შემთხვევაში, როცა ხაზის შუალედურ წერტილში აღგილი აქვს სიმძლავრის ართმევას (ნახ.5.13), მაშინ მისი რეეიმის პარამეტრების ანგარიშები ჩატარდება ცალ-ცალკე თითოეული უბნისთვის საწყისი ინფორმაციის შესაბამისი ზემოთ ჩამოყალიბებული ერთერთი ალგორითმის მიხედვით.



ნახ. 5.13 ხაზის რეეიმის პარამეტრები სიმძლავრის შუალედური ართმევის დროს.

ანგარიშით მიღებული შედეგების მიხედვით დაეადგენთ მაკომპენსირებული დანადგარის სიმძლავრეს თითოეულ კეანძში და მათ შორის „3“-შიც

$$Q_{\text{საჯ}} = Q_3 + Q_{32} - Q_{13}. \quad (5.77)$$

5.13 გრძელი ხაზის რეეიმის პარამეტრების გაანგარიშების გამარტივებული მეთოდები

გრძელი ხაზის გადაცემის განგოლებები ითვალისწინებს ხაზის მთელ სიგრძეზე მისი ელექტრული პარამეტრების ($Z=Z_0L$ და $Y=Y_0L$) თანაბრად განაწილებულობას და ამიგომ ხაზის გამოგადლოებული მუდმივები განისაზღვრება პიპერბოლური გრიგონომეტრიული ფუნქციების საშუალებით

$$\underline{A} = \underline{D} = \operatorname{ch} \gamma_0 L; \quad \underline{B} = \underline{Z}_c \operatorname{sh} \gamma_0 L \quad \text{და} \quad \underline{C} = \frac{1}{\underline{Z}_c} \operatorname{sh} \gamma_0 L,$$

$$\text{სადაც } \gamma_0 = \sqrt{Z_0 Y_0} \quad \text{და} \quad Z_c = \sqrt{Z_0 / Y_0}.$$

განზოგადოებული მოდმეების ასეთი სახით წარმოადგენა რეეიმის პარამეტრების გაანგარიშების ჩატარებისას მოითხოვს საკმარისად რთულ მათემატიკურ გამოთვლებს. ეს გამოთვლები მნიშვნელოვნად მარტივდება, თუ ხაზს წარმოადგენთ II-სებრი ჩანაცვლების სქემით (§4.3-4.5). ამ შემთხვევაში განზოგადოებული მუღმეები განისაზღვრება მარტივი მათემატიკური გამოსახულებებით (ცხრილი 4.1)

$$\underline{A} = \underline{D} = 1 + \frac{ZY}{2}; \quad \underline{B} = \underline{Z}; \quad \text{და} \quad \underline{C} = \underline{Y} \left(1 + \frac{ZY}{4} \right).$$

სადაც $\underline{Z}$ და $\underline{Y}$ განიხილება როგორც შეყურსული პარამეტრები.

იმისთვის, რომ გრძელი ხაზის რეეიმის პარამეტრების ანგარიშისას ვისარგებლოთ II-სებრი ჩანაცვლების სქემით, საჭიროა შეყურსული პარამეტრების საანგარიშო გამოსახულებებში შემოვიყენოთ ე.წ. შემასწორებელი კოეფიციენტები, რომელთა საშუალებით გათვალისწინებული იქნება პარამეტრთა თანაბრად განაწილებულობა.

შემასწორებელ კოეფიციენტთა საანგარიშო გამოსახულებების დასადგენად საკმარისია $\underline{Z}$ და $\underline{Y}$ -ის მიმართ ამოცხნათ განტოლებათა შემდეგი სისტემა

$$\underline{A} = \underline{D} = 1 + \frac{ZY}{2} = \text{ch}_{\underline{Y}_0} L$$

$$\underline{B} = \underline{Z} = \underline{Z}_c \text{sh}_{\underline{Y}_0} L,$$

საიდანაც ვღებულობთ

$$\underline{Z} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}} \text{sh} \sqrt{\underline{Z}_0 \cdot \underline{Y}_0} \cdot L \quad \text{და} \quad \underline{Y} = 2 \sqrt{\frac{\underline{Y}_0}{\underline{Z}_0}} \text{th} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\underline{Z}_0 \cdot \underline{Y}_0}{2}} \cdot L.$$

ანუ

$$\underline{Z} = \underline{Z}_0 \cdot L \cdot \underline{K}_Z \quad \text{და} \quad \underline{Y} = \underline{Y}_0 \cdot L \cdot \underline{K}_Y, \quad (5.78)$$

სადაც

$$\underline{K}_Z = \frac{\text{sh} \sqrt{\underline{Z}_0 \cdot \underline{Y}_0} \cdot L}{\sqrt{\underline{Z}_0 \cdot \underline{Y}_0} \cdot L} \quad (5.79)$$

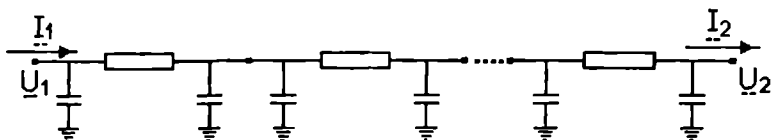
და

$$\underline{K}_Y = \frac{2 \text{th} \frac{1}{2} \sqrt{\underline{Z}_0 \cdot \underline{Y}_0} \cdot L}{\sqrt{\underline{Z}_0 \cdot \underline{Y}_0} \cdot L} \quad (5.80)$$

შემასწორებელი კოეფიციენტებია.

ამრიგად, მოცემული ხაზისთვის წინასწარ გამოთვლით შემასწორებელი კოეფიციენტების მნიშვნელობებს, რომელთა საშუალებით დავადგენთ ხაზის მეყურსულ ელექტრულ პარამეტრებს და შემდეგ რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშებას ჩაეატარებთ Π -სებრი ჩანაცვლების სქემის მიხედვით.

Π -სებრი ჩანაცვლების სქემის გამოყენებისას შეგვიძლია განვსაზღვროთ რეჟიმის პარამეტრები მხოლოდ ხაზის თავსა და ბოლოში. გრძელი ხაზის შემთხვევაში მთელ რიგ სახასიათო რეჟიმებში საჭირო ხდება გამოთვალთ ძაბვის მნიშვნელობა ხაზის შუალედურ წერტილებში. ამ მიზნით გრძელი ხაზი უნდა წარმოვიდგინოთ ერთმანეთთან მიმდევრობით ჩართულ რამდენიმე უბნად და თითოეული უბნისთვის ვისარგებლოთ Π -სებრი ჩანაცვლების სქემით. ჩანაცვლების ასეთ სქემას ჯაჭვურ სქემას უწოდებენ (ნახ.5.14).



ნახ. 5.14 ელექტროგადაცემის ხაზის ჩანაცვლების ჯაჭვური სქემა

5.14 მე-5 თავის რიცხვითი მაგალითები

მაგალითი 5.1 500 კე ძაბვის გადაცემის ხაზისთვის განესაზღვროთ ტალღური პროცესის სახასიათო პარამეტრები და განზოგადოებული მუდმივები. ხაზის სიგრძე $L=500$ კმ, 1 კმ სიგრძის ხაზის ელექტრული პარამეტრები:

$$Z_0 = r_0 + jx_0 = 0,032 + j0,29 \text{ ომი/კმ};$$

$$Y_0 = g_0 + jb_0 = (0,031 + j3,83) \cdot 10^{-6} \text{ სიმ/კმ}.$$

1. გადაცემის ტალღური პროცესის სახასიათო პარამეტრები:

ა) ხაზის ტალღური წინააღობა (5.20; 5.21)

$$Z_C = \sqrt{(0,032^2 + 0,29^2) / (0,031^2 + 3,83^2)} \cdot 10^{-12} = 276,0 \text{ ომი},$$

$$\Psi_Z = \frac{1}{2} \arctg \frac{0,031 \cdot 0,29 - 3,83 \cdot 0,032}{0,032 \cdot 0,031 + 0,29 \cdot 3,83} = -2,92^\circ$$

ე.ი.

$$Z_C = 275,6 - j14,06 \text{ ომი};$$

ბ) ტალღის გავრცელების კოეფიციენტი (5.23-5.25)

$$\gamma_0 = \sqrt{(0,032^2 + 0,29^2) / (0,031^2 + 3,83^2)} \cdot 10^{-3} = 1,057 \cdot 10^{-3};$$

$$\Psi_{\gamma_0} = \frac{1}{2} \left(\arctg \frac{0,29}{0,032} + \arctg \frac{3,83}{0,031} \right) = 86,82^\circ.$$

ე.ი.

$$\beta_0 = 6,25 \cdot 10^{-3} \text{ } \frac{1}{\text{კმ}} \text{ და } \alpha_0 = 1,055 \cdot 10^{-3} \text{ რად/კმ};$$

ანუ

$$\gamma_0 = (6,25 + j105,5) \cdot 10^{-3} \text{ } \frac{1}{\text{კმ}};$$

გ) ტალღის სიგრძე (5.26)

$$\lambda = \frac{2\pi}{105,5 \cdot 10^{-3}} = 5955,6 \text{ კმ};$$

დ) ტალღის სიჩქარე (5.27)

$$v = 5955,6 \cdot 50 = 297781 \text{ კმ/წმ};$$

ე) ხაზის ტალღური სიგრძე (5.28)

$$\lambda_0 = 1,055 \cdot 10^{-3} \cdot 500 = 0,533 \text{ რად} = 30,2^\circ$$

2. ხაზის განზოგადოებული მუდმივები (5.7-5.9):

$$\underline{A} = \underline{D} = \text{ch}[(6,25 + j105,5) \cdot 10^{-3} \cdot 500] = (864,2 + j1,725) \cdot 10^{-3}$$

ანუ $A=D=0,8642$ და $\psi_A = \psi_D = 1,14^\circ$;

$$\underline{B} = (275,6 - j14,06) \cdot \text{sh}[(6,25 + j105,5) \cdot 10^{-5} \cdot 500] = 14,53 + j138,52;$$

ანუ $B=139,28$ და $\psi_B = 84,01^\circ$;

$$\underline{C} = \frac{\text{sh}[(6,25 + j105,5) \cdot 10^{-5} \cdot 500]}{275,6 - j14,06} = (4,61 + j182,8) \cdot 10^{-6}$$

ანუ $C=1,8283 \cdot 10^{-3}$ და $\psi_C = 89,85^\circ$.

მაგალითი 5.2 ავაგოთ წრიული დიაგრამები და კუთხური მახასიათებლები 5.1 მაგალითში განხილული ხაზისთვის თუ $U_1=510$ და $U_2=490$ კვ.

გამოვთვალოთ ρ_1 , ρ_2 და ρ სიდიდეები (5.48)

$$\rho_1 = 510^2 \frac{0,8642}{139,28} = 1614,05, \text{ მგვტ};$$

$$\rho_2 = 490^2 \frac{0,8642}{139,28} = 1498,99, \text{ მგვტ};$$

$$\rho = \frac{510 \cdot 490}{139,28} = 1787,55 \text{ მგვტ}.$$

$$\text{გამოვთვალოთ } \psi_B - \psi_A = 84,01^\circ - 1,14^\circ = 82,87^\circ.$$

ხაზის ბოლოებში სიმძლავრეების საანგარიშო გამოსახულებებს (5.49) ექნებათ სახე:

$$\underline{S}_1 = 1614,05 e^{j82,87} - 1787,55 e^{j(84,01+\delta)};$$

$$\underline{S}_2 = -1498,99 e^{j82,87} + 1787,55 e^{j(84,01-\delta)}.$$

ამ გამოსახულებათა მიხედვით ავაგოთ წრიული დიაგრამები (ნახ.5.16).

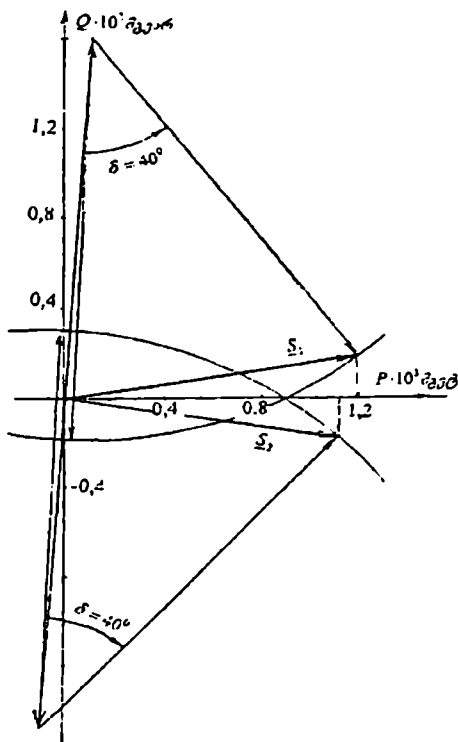
შეავდგინოთ კუთხური მახასიათებლების საანგარიშო გამოსახულებები (5.50; 5.53):

$$P_1 = 200,33 - 1787,55 \cdot \cos(84,01 + \delta);$$

$$Q_1 = 1601,53 - 1787,55 \cdot \sin(84,01 + \delta);$$

$$P_2 = -186,32 + 1787,55 \cdot \cos(84,01 - \delta);$$

$$Q_2 = -1487,3 + 1787,55 \cdot \sin(84,01 - \delta).$$

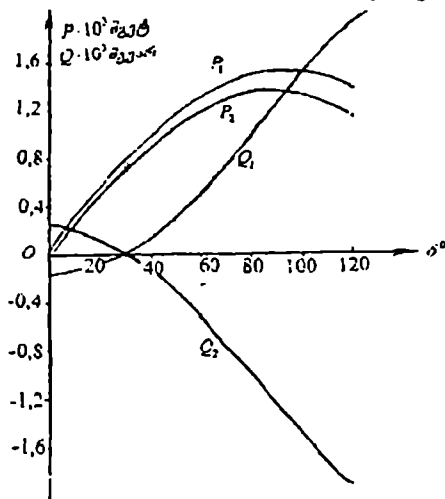


ნახ. 5 16

გამოთვალთ სიმძლავრეთა მნიშვნელობები სხვადასხვა δ კუთხისთვის და შედეგები შევიტანოთ ქვემოთ ცხრილში. ამავე ცხრილში ნაჩვენებია ხაზის მ.კ.

δ , გრად	P_1 , მვტ	Q_1 , მვარ	P_2 , მვტ	Q_2 , მვარ	η , %
0	14,42	-176,26	0,22	290,59	-
10	326,0	-181,64	306,10	231,10	93,99
20	633,71	-132,85	597,01	119,48	94,25
30	928,31	-31,35	864,12	-40,96	93,12
40	1200,80	119,76	1099,30	-245,34	91,57
50	1442,9	315,85	1295,45	-487,46	89,80
60	1647,30	551,09	1446,56	-759,95	87,83

ავაგოთ შესაბამისი კუთხური მახასიათებლები (ნახ.5.17).



ნახ. 5.17

მაგალითი 53. 5.1. და 5.2 მაგალითებში განხილული ხაზის-თვის დაუადგინოთ ძაბვის განაწილების სურათი მთელ სიგრძეზე.

ხაზის თავიდან ℓ მანძილზე დამორებულ წერტილში ძაბვის საანგარიშო გამოსახულება (5.56) განსახილველ შემთხვევაში ასე ჩაიწერება:

$$\underline{U}_\epsilon = \frac{490}{\text{sh}[(6,25 + j105,5) \cdot 10^{-5} \cdot 500]} \times \left\{ \frac{510}{490} e^{j\theta} \text{sh}[(6,25 + j105,5) \cdot 10^{-5} \cdot (500 - \ell)] + \text{sh}[(6,25 + j105,5) \cdot 10^{-5} \cdot \ell] \right\}$$

გამოვთვალოთ პიქერბოლური სინუსის მნიშვნელობები სხვადასხვა ℓ -სთვის. ანგარიშის შედეგები წარმოადგინოთ ცხრილის სახით.

$\ell, \text{კმ}$	100	200	250	300	400	500
$\text{sh}_{\gamma_0 \ell}$	0,0063+ +j0,106	0,0127+ +j0,208	0,0154+ +j0,261	0,018+ +j0,312	0,023+ +j0,408	0,027+ +j0,504

მოცემული ხაზისთვის:

$$P_{\text{გაგ}} = \frac{U_2^2}{P_{Zc}} = \frac{490^2}{276} = 870, \text{ მგვტ;}$$

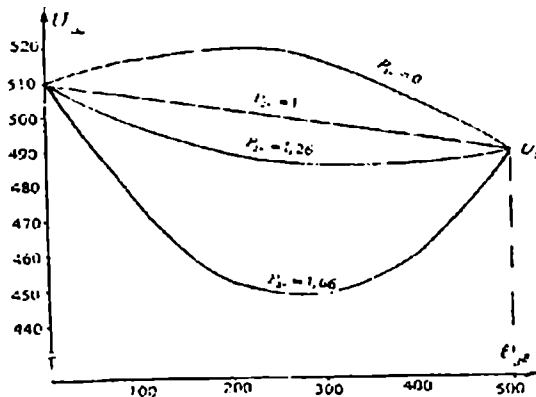
$$P_{\Sigma} = \frac{U_1 U_2}{Z_c \sin \alpha_0 L} = \frac{510 \cdot 490}{276 \cdot \sin 1,055 \cdot 10^3 \cdot 500} = 1798,7, \text{ მგვტ.}$$

ვისარგებლოთ 52 მაგალითის ანგარიშის შედეგებით და წინამდებარე მაგალითის ანგარიში ჩაეატაროთ შემდეგი შემთხვევებისთვის:

- 1) $\delta = 0^\circ \Rightarrow P_1=14,42, P_2=0,22, \text{ მგვტ, } P_{\Sigma}=0;$
- 2) $\delta = 30^\circ \Rightarrow P_1=928,3, P_2=864,1, \text{ მგვტ, } P_{\Sigma}=1,0;$
- 3) $\delta = 40^\circ \Rightarrow P_1=1200,8, P_2=1099, \text{ მგვტ, } P_{\Sigma}=1,26;$
- 4) $\delta = 60^\circ \Rightarrow P_1=1647,3, P_2=1446,5 \text{ მგვტ, } P_{\Sigma}=1,66.$

გამოთვლების შედეგები შევიტანოთ ქვემოთ ცხრილში. ამავე ცხრილის ბოლო სტრიქონში ნაჩვენებია გადასაცემი სიმძლავრის მარაგის მნიშვნელობა (5.65). ხაზის გასწვრივ ძაბვის განაწილების მრუდი ნაჩვენებია 5.18 ნახაზზე.

ძაბვა ხაზის გასწვრივ, კე (კომპლექსური სიდიდე/მოდული)				
ℓ, კმ	U ₁ და U ₂ ძაბვებს შორის ძერის კუთხე, δ°			
	0	30	40	60
0	$\frac{510 + j0}{510,0}$	$\frac{441,7 + j255}{510,0}$	$\frac{3907 + j3278}{5100}$	$\frac{2550 + j4417}{5100}$
100	$\frac{5166 - j1,9}{5167}$	$\frac{4621 + j2056}{5057}$	$\frac{4207 + j2643}{4968}$	$\frac{3104 + j3570}{4730}$
200	$\frac{5185 - j2,8}{5186}$	$\frac{476,4 + j157,8}{501,2}$	$\frac{4457 + j2008}{4888}$	$\frac{3611 + j2713}{4516}$
250	$\frac{5189 - j3,0}{5190}$	$\frac{483,6 + j129,6}{500,7}$	$\frac{457,9 + j168,4}{487,8}$	$\frac{3875 + j2266}{4489}$
300	$\frac{5150 - j2,0}{5150}$	$\frac{487,2 + j102,6}{4980}$	$\frac{466,7 + j132,7}{485,2}$	$\frac{4100 + j1811}{448,2}$
400	$\frac{504,3 - j2,0}{504,3}$	$\frac{490,3 + j51,84}{493,0}$	$\frac{480,0 + j67,4}{485,7}$	$\frac{451,2 + j91,6}{460,4}$
500	$\frac{490 + j0}{490,0}$	$\frac{490 + j0}{490,0}$	$\frac{490 + j0}{490,0}$	$\frac{490 + j0}{490,0}$
K _{გარ} , %	100	52,0	38,9	19,6



ნახ.5.18

მაგალითი 5.4. განვსაზღვროთ 5.13 ნახაზზე ნაჩვენები ელექტროგადაცემის რეჟიმის პარამეტრები, თუ მოცემულია: $U_1=510$ კვ, $U_2=480$ კვ, $U_3=490$ კვ, $L_{1-2}=500$ კმ, $L_{2-3}=300$ კმ, $P_2=400$ მგვტ, $P_3=300$ მგვტ, სადენის მარკა 3xAC-330/43.

განსახილველი ელექტროგადაცემის პერველი უბნის (უბანი 1-3) ელექტრული პარამეტრები ავიღოთ 5.1 მაგალითიდან:

$$Z_c=275,6-j14,06. \quad Z_c=276 \text{ ომი.}$$

$$\beta_0 = 6,25 \cdot 10^{-5} \quad 1/\text{კმ} \quad \text{და} \quad \alpha_0 = 1,055 \cdot 10^{-3} \quad \text{რად/კმ};$$

$$A=D=0,864; \quad \text{და} \quad \psi_A = \psi_D = 1,14^\circ; \quad B=139,28; \quad \psi_B = 84,01^\circ.$$

მეორე უბნის (უბანი 3-2) გალღური პროცესის სახასიათო პარამეტრები იგივეა, რაც პირველი უბნის, ხოლო განზოგადოებული მუდმივები კი განვსაზღვროთ (5.7) და (5.8) გამოსახულებებით:

$$\underline{A} = \underline{D} = \text{ch}\{(6,25 + j105,5) \cdot 10^{-5} \cdot 300\} = 0,9505 + j0,0058$$

$$\text{ანუ } A=D=0,9505 \quad \text{და} \quad \psi_A = \psi_D = 0,35^\circ;$$

$$\underline{B} = (275,6 - j14,06) \cdot \text{sh}\{(6,25 + j105,5) \cdot 10^{-5} \cdot 300\} = 9,345 + j85,74$$

$$\text{ანუ } B=86,245 \quad \text{და} \quad \psi_B = 83,75^\circ$$

რადგანაც მოცემულია $P_{3-2} = P_2 = 400$ მგვტ, რეჟიმის პარამეტრების განსაზღვრისთვის გამოვიყენოთ 5.12 პარაგრაფში ჩამოყალიბებული ალგორითმიდან მეორე.

(5.72) გამოსახულების მიხედვით U_3 და U_2 ძაბვის ვექტორებს მორის ძერის კუთხე

$$\delta_{32} = 83,75 - \arccos\left\{\frac{400 \cdot 86,245}{490 \cdot 480} + \frac{480}{490} \times\right. \\ \left. \times 0,9505 \cdot \cos(83,75^\circ - 0,35^\circ)\right\} = 8,45^\circ$$

(5.50)-ის მიხედვით

$$P_{32}^m = 490^2 \cdot \frac{0,9505}{86,245} \cos(83,75^\circ - 0,35^\circ) - \\ - \frac{490 \cdot 480}{86,245} \cos(83,75^\circ + 8,45^\circ) = 408,83 \text{ მკგ.}$$

(5.51)-ის მიხედვით

$$Q_{32}^m = 490^2 \cdot \frac{0,9505}{86,245} \sin(83,75^\circ - 0,35^\circ) - \\ - \frac{490 \cdot 480}{86,245} \sin(83,75^\circ + 8,45^\circ) = -96,51 \text{ მკვარ.}$$

(5.53)-ის მიხედვით

$$Q_{32}^b = -480^2 \cdot \frac{0,9505}{86,245} \sin(83,75^\circ - 0,35^\circ) + \\ + \frac{490 \cdot 480}{86,245} \sin(83,75^\circ - 8,45^\circ) = 115,46 \text{ მკვარ.}$$

„3“ კვანძისთვის დაეწეროთ აქტიური სიმძლავრის ბალანსის განტოლება და განესაზღვროთ აქტიური დატვირთვა 1-3 უბნის ბოლოში

$$P_{13}^b = P_{32}^m + P_3 = 408,83 + 300 = 708,83 \text{ მკვტ}$$

(5.72)-ის მიხედვით U_1 და U_3 ძაბვის ვექტორებს შორის ძერის კუთხე

$$\delta_{13} = 84,01^\circ - \arccos\left\{\frac{708,83 \cdot 139,28}{510 \cdot 490} + \frac{490}{510} \times\right. \\ \left. \times 0,864 \cdot \cos(84,01^\circ - 1,14^\circ)\right\} = 23,88^\circ.$$

(5.50), (5.51) და (5.53) გამოსახულებათა მიხედვით, ვღებულობთ

$$P_{13}^m = 510^2 \cdot \frac{0,864}{139,28} \cos(84,01^\circ - 1,14^\circ) - \frac{510 \cdot 490}{139,28} \times \\ \times \cos(84,01^\circ + 23,88^\circ) = 571,43 \text{ მკვტ};$$

$$Q_{13}^{\circ} = 510^2 \cdot \frac{0,864}{139,28} \sin(84,01^{\circ} - 1,14^{\circ}) - \\ - \frac{510 \cdot 490}{139,28} \cos(84,01^{\circ} + 23,88^{\circ}) = -106,49 \text{ მგვარ};$$

$$Q_{13}^{\circ} = -490^2 \cdot \frac{0,864}{139,28} \sin(84,01^{\circ} - 1,14^{\circ}) + \\ + \frac{510 \cdot 490}{139,28} \cos(84,01^{\circ} - 23,88^{\circ}) = 77,98 \text{ მგვარ}.$$

როგორც ანგარიშის შედეგები გვიჩვენებს განსახილველი ელექტროგადაცემის საკონტროლო კვანძებში საჭიროა განხორციელდეს ჭარბი რეაქტიული სიმძლავრის ართმევა. კერძოდ „1“ კვანძში 106,49 მგვარ; „3“ კვანძში $(77,98+96,51)=174,49$ მგვარ და „2“ კვანძში 115,46 მგვარ.

მაგალითი 5.5. განესაზღვროთ 5.1 მაგალითში განხილული ელექტროგადაცემის ხაზის ელექტრული პარამეტრების შემასწორებელი კოეფიციენტები.

(5.79) გამოსახულების თანახმად

$$\underline{K}_z = \frac{\text{sh}(6,25 + j105,5) \cdot 10^{-5} \cdot 500}{(6,25 + j105,5) \cdot 10^{-5} \cdot 500} = \frac{0,027 + j0,504}{0,0313 + j0,528} = \\ = 0,954 + j0,0054.$$

(5.80)-ის თანახმად

$$\underline{K}_y = \frac{2 \text{th} \frac{1}{2} (6,25 + j105,5) \cdot 10^{-5} \cdot 500}{(6,25 + j105,5) \cdot 10^{-5} \cdot 500} = \\ = \frac{0,033 + j0,531}{0,0313 + j0,528} = 1,006 - j0,0021.$$

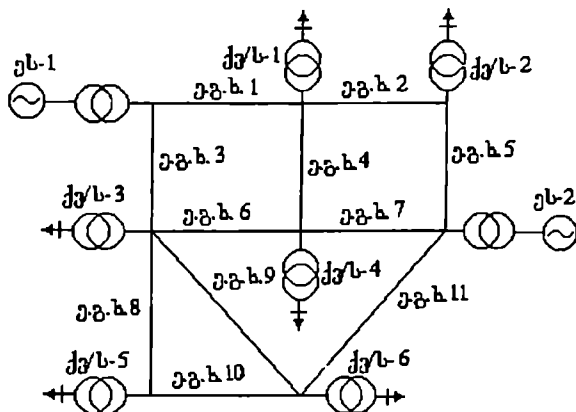
შესაბამისად, ხაზის შეყურსული ელექტრული პარამეტრები იქნება (5.78):

$$\underline{Z} = (0,032 + j0,29) \cdot 500 \cdot (0,954 + j0,0054) = 14,482 + j138,25 \text{ ომი} \\ \underline{Y} = (0,031 + j3,83) \cdot 10^{-6} \cdot 500 \cdot (1,006 - j0,0021) = \\ = (19,61 + j1926,5) \cdot 10^{-6} \text{ სიმენსი}.$$

თავი 6. ელექტრული ქსელის რეჟიმების პარამეტრების გაანგარიშება

6.1. ქსელის ჩანაცვლების საანგარიშო სქემები

ელექტრული ქსელების ექსპლუატაციისას საჭიროა წინასწარ შეფასებული იქნეს ის პირობები, რომელშიც მოუწევთ მუშაობა მომხმარებლებსა და ქსელის მოწყობილობა-დანადგარებს. ასეთი შეფასებები საშუალებას გვაძლევს დავსახოთ შესაბამისი ღონისძიებები, რაც უზრუნველყოფს მომხმარებელთან მიწოდებული ელექტრული ენერგიის ხარისხს და ქსელის მოწყობილობა-დანადგარების მუშაობის დასაშვებ რეჟიმს. ამ მიმართულებით ჩატარებული გაანგარიშებები, გარდა აღნიშნულისა, საშუალებას იძლევა დავადგინოთ საჭირო რაოდენობის ელექტროენერგიის წარმოება-გადაცემის ოპტიმალური პირობები, ანუ განვახორციელოთ ელექტრული ქსელის და მთლიანად ენერგოსისტემის რეჟიმების ოპტიმიზაცია.



ნახ. 6.1 ელექტრული ქსელის შეერთების სქემა

ქსელის რეჟიმის გაანგარიშების ამოცანას წარმოადგენს რეჟიმის პარამეტრების დადგენა. ამ ამოცანის საწყის ინფორმაციას შეადგენს: ელექტრული ქსელის შეერთების სქემა (ნახ.6.1); ამ სქემის ელემენტების მახასიათებელი პარამეტრები; მომხმარებელთა დატვირთვები; გენერაციის კვანძების საანგარიშო სიმძლავრე ან ელექტრული სადგურის მუშაობის დისპეტჩერული გრაფიკი; ქსელის ცალკეულ კვანძებში ძაბვის საკონტროლო მნიშვნელობები და სხვა.

რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება წარმოებს მისი ჩანაცვლების საანგარიშო სქემის მოხდელით. იგი წარმოადგენს ქსელის ცალკეული ელემენტების ჩანაცვლების სქემების ერთობლიობას, შეერთებულს იმავე მიმდევრობით, რა მიმდევრობითაც შეერთებულია ეს ელემენტები ქსელის შეერთების სქემაში.

ჩანაცვლების საანგარიშო სქემაზე 35 კვ და უფრო დაბალი ძაბვის ელექტროგადაცემის ხაზები წარმოდგენილი იქნება მათი აქტიური და რეაქტიული წინაღობების სახით, ხოლო უფრო მაღალი ძაბვის (110 კვ და მეტი) ხაზები კი II-სებრი ჩანაცვლების სქემის სახით.

220 კვ-მდე (ჩათვლით) ძაბვის ქსელებში დასაშვებია ჩანაცვლების საანგარიშო სქემის გამარტივება. კერძოდ: 1) ელექტროგადაცემის ხაზების განივი გამგარობანი შევსლავით მათში სიმძლავრის დანაკარგებით; 2) სადაბლებელი ქვესადგურები შევსვალთ ქვესადგურის საანგარიშო დატვირთვებით; 3) ელექტროსადგურები შევსვალთ სადგურის საანგარიშო სიმძლავრით.

ხაზის განივ გამგარობაში სიმძლავრის დანაკარგები განისაზღვრება ნომინალური ძაბვის მიხედვით

$$\Delta S_{Y, \kappa} = U_{\kappa}^2 Y_{\kappa}^* = \Delta P_{\kappa, \kappa} - j \Delta Q_{C, \kappa},$$

სადაც: $\Delta P_{\kappa, \kappa} = U_{\kappa}^2 G_{\kappa}$ - ხაზში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები გვირგვინზე; $\Delta Q_{C, \kappa} = U_{\kappa}^2 B_{\kappa}$ - ხაზის გვეადურ გამგარობაში რეაქტიული (გვეადური) სიმძლავრის დანაკარგები.

ქვესადგურის საანგარიშო დატვირთვა წარმოადგენს ქვესადგურის დატვირთვისა და ამ ქვესადგურის გრანსფორმატორების ფოლადსა და სპილენძში დანაკარგების ჯამს

$$\Sigma_{\text{საანგქვეს.}} = \Sigma_{\text{ლაგვ.}} + \Delta S_{\text{ვლ}} + \Delta S_{\text{სა}} = \Sigma_{\text{ლაგვ.}} + \Delta S_{\text{გ}} \quad (6.1)$$

გრანსფორმატორებში დანაკარგების ანგარიში ჩატარდება (4.77) და (4.78) ფორმულებით:

$$\Delta S_{\text{ვლ}} = \Delta S_{\text{კუ}} = \Delta P_{\text{კუ}} + j \Delta Q_{\text{კუ}}$$

და

$$\Delta S_{\text{გრანგ}} = (\Delta P_{\text{გგ}} + j \Delta Q_{\text{გგ}}) \left(\frac{S_{\text{ლაგვ}}}{S_{\text{გ}}} \right)^2$$

როცა ქვესადგურზე დგას n რაოდენობის ერთნაირი ორგრაგნილა გრანსფორმატორი, მაშინ მათში სიმძლავრის ჯამური დანაკარგები გამოითვლება ფორმულებით (5.4.8):

დანაკარგები ფოლადში

$$\underline{\Delta S_{\text{ჯლ}}} = n(\Delta P_{\text{ჯლ}} + j\Delta Q_{\text{ჯლ}}) \quad (6.2)$$

დანაკარგები გრავნილებში

$$\underline{\Delta S_{\text{გრავ}}} = \frac{1}{n}(\Delta P_{\text{გგ}} + j\Delta Q_{\text{გგ}}) \left(\frac{S_{\text{ლავ}}}{S_{\text{გ}}} \right)^2, \quad (6.3)$$

აქ: $S_{\text{ლავ}}$ - გრანსფორმატორების (ქვესადგურის) ჯამური დატვირთვა; $S_{\text{გ}}$ - ერთი გრანსფორმატორის ნომინალური სიმძლავრე.

თუ ქვესადგურზე ღვას n რაოდენობის ერთნაირი სამგრაგნილა გრანსფორმატორი, მაშინ ფოლადში დანაკარგები გამოითვლება (6.2) გამოსახულებით, ხოლო გრავნილებში დანაკარგები კი შემდეგი გამოსახულებით

$$\underline{\Delta S_{\text{გრავ}}} = \frac{1}{nS_{\text{გ}}^2} [S_{\text{გ}}^2(R_{\text{გ}} + jX_{\text{გ}}) + S_{\text{ლ}}^2(R_{\text{ლ}} + jX_{\text{ლ}}) + S_{\text{გ}}^2(R_{\text{გ}} + jX_{\text{გ}})] \quad (6.4)$$

სადაც: $S_{\text{გ}}$, $S_{\text{ლ}}$, $S_{\text{გ}}$ - გრანსფორმატორის მაღალი, საშუალო და დაბალი ძაბვის გრავნილებში გამავალი ჯამური სიმძლავრე; $R_{\text{გ}}$, $R_{\text{ლ}}$, $R_{\text{გ}}$ და $X_{\text{გ}}$, $X_{\text{ლ}}$, $X_{\text{გ}}$ - ამ გრავნილთა აქტიური და რეაქტიული წინაღობები.

(6.1) გამოსახულების თანახმად ქვესადგურის საანგარიშო დატვირთვა:

ორგრავნილა გრანსფორმატორებიან ქვესადგურზე

$$\underline{S_{\text{საანგავქვ}}} = P_{\text{ლავ}} + n\Delta P_{\text{ჯლ}} + \frac{1}{n}\Delta P_{\text{გგ}} \left(\frac{S_{\text{ლავ}}}{S_{\text{გ}}} \right)^2 + j \left(Q_{\text{ლავ}} + n\Delta Q_{\text{ჯლ}} + \frac{1}{n}\Delta Q_{\text{გგ}} \left(\frac{S_{\text{ლავ}}}{S_{\text{გ}}} \right)^2 \right) \quad (6.5.ა)$$

სამგრაგნილა გრანსფორმატორებიან ქვესადგურზე

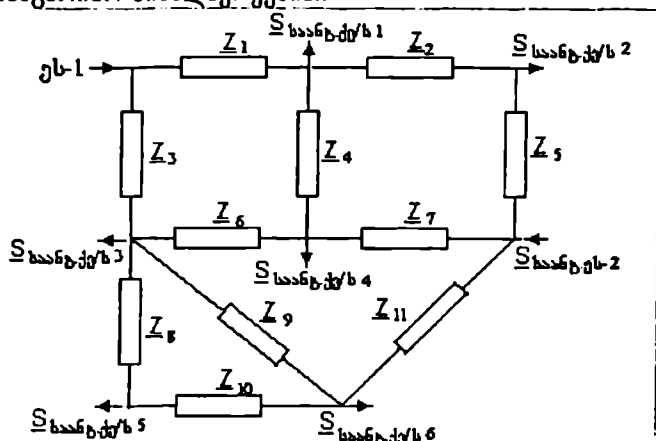
$$\begin{aligned} \underline{S_{\text{საანგავქვ}}} = & P_{\text{ლავ}} + n\Delta P_{\text{ჯლ}} + \frac{1}{nS_{\text{გ}}^2} [S_{\text{გ}}^2 \cdot R_{\text{გ}} + S_{\text{ლ}}^2 R_{\text{ლ}} + S_{\text{გ}}^2 R_{\text{გ}}] + \\ & + j \left(Q_{\text{ლავ}} + n\Delta Q_{\text{ჯლ}} + \frac{1}{nS_{\text{გ}}^2} [S_{\text{გ}}^2 X_{\text{გ}} + S_{\text{ლ}}^2 X_{\text{ლ}} + S_{\text{გ}}^2 X_{\text{გ}}] \right) \end{aligned} \quad (6.5.ბ)$$

სადგურის საანგარიშო სიმძლავრე წარმოადგენს სადგურის მიერ განეითარებულ სიმძლავრეს გამოკლებული სადგურის საკუთარი მოხმარების ხარჯისა და სამალვებელ გრანსფორმატორებში დანაკარგების ჯამი

$$\underline{S_{\text{საანგავქვ}}} = \underline{S_{\text{სადგ}}} - \underline{S_{\text{სგ}}} - \underline{\Delta S_{\text{გ}}}. \quad (6.6)$$

აღნიშნული გაანგარიშებების შესრულების შემდეგ შეგვიძლია შევადგინოთ ქსელის ჩანაცვლების გამარტივებული საანგარიშო სქემა, სადაც ქვესადგურები შეცვლილია ამ ქვესადგურების საანგა-

რიმონ დატვირთვებით, ხოლო ელექტროსადგურები კი ამ სადგურების საანგარიშო სიმძლავრეებით.



ნახ. 6.2 ელექტრული ქსელის ჩანაცვლების საანგარიშო სქემა

ჩანაცვლების სქემის შემდეგი გამარტივება შესაძლებელია, თუ ქსელის კვანძებს წარმოვადგენთ კვანძის საანგარიშო დატვირთვებისა და საანგარიშო სიმძლავრეთა სახით (ნახ.6.2).

კვანძის საანგარიშო დატვირთვა ეს არის ამ კვანძში მიერთებული ქვესადგურის საანგარიშო დატვირთვას მინუს კვანძში მიერთებული ყველა ელექტროგადამცემის ხაზების მიერ გენერირებულ რეაქტიულ სიმძლავრეთა ნახევარჯამი. კვანძის საანგარიშო სიმძლავრე კი ეს არის ამ კვანძში მიერთებული ელექტრული სადგურის საანგარიშო სიმძლავრეს პლუს კვანძში მიერთებული ყველა ელექტროგადამცემის ხაზების მიერ გენერირებულ რეაქტიულ სიმძლავრეთა ნახევარჯამი (ხაზში გვირგვინზე დანაკარგები უგულებელყოფილია). ე.ი. გვაქვს:

ქვესადგურის შემთხვევაში

$$S_{\text{საანგ.ტვ}} = S_{\text{საანგ.ტვ.ს}} - j \frac{1}{2} \sum \Delta Q_C, \quad (6.7)$$

რომლის დადებითი მნიშვნელობა გულისხმობს კვანძიდან გამომაველ სიმძლავრეს:

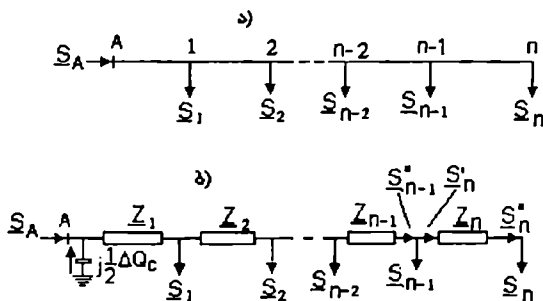
სადგურის კვანძის შემთხვევაში

$$S_{\text{საანგ.ტვ}} = S_{\text{საანგ.ტვ.დ.}} + j \frac{1}{2} \sum \Delta Q_C, \quad (6.8)$$

რომლის დადებითი მნიშვნელობა გულისხმობს კვანძში შემავალ სიმძლავრეს.

6.2 ღია ქსელის რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება

ღია ქსელი შეიძლება იყოს მაგისტრალურ-რადიალური ან მაგისტრალურ-განშტოებული. ღია მაგისტრალურ-რადიალურ ქსელში მომხმარებლები განთავსებული არიან ერთმანეთის მიყოლებით ერთი რადიალური ხაზის გასწვრივ (ნახ.6.3ა). ამ ქსელის ჩანაცვლების საანგარიშო სქემა წარმოდგენილია კვანძების საანგარიშო დატვირთვების ბაზაზე (ნახ. 6.3ბ)



**ნახ. 6.3 მაგისტრალურ-რადიალური ქსელი: ა)შეერთების სქემა;
ბ)ჩანაცვლების საანგარიშო სქემა**

მოცემული ქსელის რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშების თანმიმდევრობა განვიხილოთ ორი სახასიათო შემთხვევისთვის: 1) როცა მოცემულია ძაბვა ქსელის ბოლო კვანძში U_n („რეჟიმის გაანგარიშება ბოლოს მონაცემებით“) და 2) როცა მოცემულია კვების წყაროს ძაბვა U_A („რეჟიმის გაანგარიშება თავის მონაცემებით“).

პირველ საანგარიშო შემთხვევაში ძაბვის საწყის ექვტორად აიღება U_n ძაბვა და სიმძლავრე ქსელის ყოველი უბნის თავსა და ბოლოში და ძაბვა ყოველ კვანძში ცალსახად განისაზღვრება ერთდღიგივე სახის თანამიმდევრობითი გაანგარიშებების ჩაგარების გზით ბოლოდან თავისკენ. კერძოდ, $S_n'' = S_n$ დატვირთვისა და U_n ძაბვის საფუძველზე განესაზღვრავთ Z_n წინააღობაში სიმძლავრის დანაკარგებსა და ძაბვის ვარდნას:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_n &= \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U_n^2} \cdot R_n; \quad \Delta Q_n = \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U_n^2} \cdot X_n; \\ \Delta U_n &= \frac{P_n R_n + Q_n X_n}{U_n}; \quad \delta U_n = \frac{P_n X_n - Q_n R_n}{U_n}; \end{aligned} \right\} (6.9)$$

შესაბამისად

$$\underline{S}'_n = P'_n + jQ'_n = P_n + \Delta P_n + j(Q_n + \Delta Q_n)$$

და

$$\underline{U}_{n-1} = U_n + \Delta U_n + j\delta U_n$$

ანუ

$$\left. \begin{aligned} U_{n-1} &= \sqrt{(U_n + \Delta U_n)^2 + \delta U_n^2} = U_n + \Delta U_n + \frac{\delta U_n^2}{2(U_n + \Delta U_n)} \end{aligned} \right\} (6.10)$$

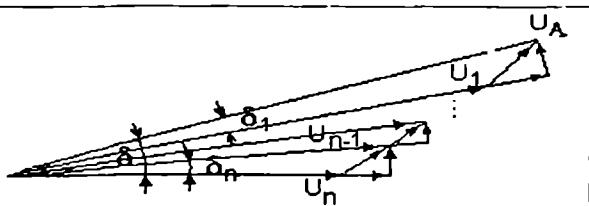
$n-1$ კვანძისთვის დაეწეროთ კირხჰოფის პირველი კანონი და განესაზღვროთ სიმძლავრე $n-1$ უბნის ბოლოში

$$\underline{S}''_{n-1} = \underline{S}'_{n-1} + \underline{S}_{n-1} = P'_n + P_{n-1} + j(Q'_n + Q_{n-1}) \quad (6.11)$$

ამ სიმძლავრითა და U_{n-1} ძაბვით განესაზღვრავეთ სიმძლავრის დანაკარგებსა და ძაბვის ვარდნას $n-1$ უბანზე, რაც n უბანზე ჩატარებული გაანგარიშებების ანალოგიურად საშუალებას მოგვცემს დავადგინოთ $\underline{U}_{n-1}$ და $\underline{S}''_{n-2}$. ანალოგიურ გაანგარიშებებს ჩავატარებთ მომდევნო უბნებზე. მივიღებთ მოცემული ქსელის რეჟიმის სრულ სურათს. ამასთან კვების წყაროს დაგვირთვა

$$\underline{S}_A = \underline{S}'_1 - j\frac{1}{2}\Delta Q_{C1} \quad (6.12)$$

ძაბვა $\underline{U}_A$ ზოგადად განსხვავდება U_n ძაბვისგან როგორც სიდიდით, ასევე ფაზით. ჩატარებულ გაანგარიშებებში ძაბვა ყოველი უბნის ბოლოში განიხილებოდა როგორც საწყისი ვექტორი. ამიტომ მოცემულ შემთხვევაში ძაბვების დიაგრამას აქვს 6.4 ნახაზზე ნაჩვენები სახე.



ნახ.6.4 ძაბვების დიაგრამა მაგისტრალურ-რადიალური ქსელისთვის (რეჟიმის გაანგარიშება ბოლოს მონაცემებით)

ძერის კუთხე $\underline{U}_A$ და U_n ძაბვათა ვექტორებს შორის

$$\delta = \sum_{i=1}^n \delta_i.$$

35 კვ და უფრო დაბალი ძაბვის ქსელებისთვის, საინჟინრო გაანგარიშებებისთვის საკმარისი სიზუსტით, შეგვიძლია ვწეროთ

$$\delta = \arctg \frac{\sum_{i=1}^n \delta U_i}{U_n + \sum_{i=1}^n \Delta U_i}. \quad (6.13)$$

მეორე საანგარიშო შემთხვევაში, როცა ცნობილია ძაბვა კვების წყაროს სალტეზე $\underline{U}_A$, გაანგარიშებები უნდა ჩატარდეს ორ ეტაპად.

პირველ ეტაპზე განისაზღვრება მხოლოდ სიმძლავრის დანაკარგები უბნებზე თანმიმდევრობით ბოლოდან თავისკენ ნომინალური ძაბვის მიხედვით. კერძოდ, გამოვთვლით სიმძლავრის დანაკარგებს n უბანზე

$$\underline{\Delta S}_n = \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U_n^2} (R_n + jX_n), \quad (6.14)$$

რის მიხედვითაც დაუადგენთ $\underline{S}'_n$ სიმძლავრეს ამ უბნის თავში. შემდეგ (6.11) გამოსახულების საფუძველზე $n-1$ კვანძისთვის დაწერილი სიმძლავრის ბალანსის განტოლებიდან დაუადგენთ $\underline{S}''_{n-1}$ სიმძლავრეს და ა.შ. ყველა დანარჩენ უბნებზე იმავე მიმდევრობით, როგორც პირველ შემთხვევაში.

მეორე ეტაპზე განისაზღვრება ძაბვის დანაკარგები თავიდან ბოლოსკენ $\underline{U}_A$ ცნობილი ძაბვისა და პირველ ეტაპზე განსაზღვრული უბნის თავში გამავალი სიმძლავრის მიხედვით.

$\underline{U}_A$ ძაბვის ვექტორი მიემართოთ ნამდვილ რიცხვთა ღერძის გასწვრივ და ვწეროთ

$$\Delta \underline{U}_1 = \Delta U_1 + j\delta U_1 = \frac{P'_1 R_1 + Q'_1 X_1}{U_A} + j \frac{P'_1 X_1 - Q'_1 R_1}{U_A} \quad (6.15)$$

და

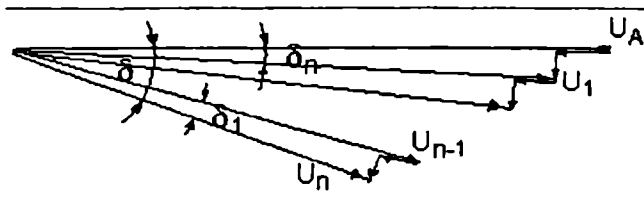
$$\underline{U}_1 = U_A - \Delta U_1 - j\delta U_1,$$

ანუ

$$\underline{U}_1 = U_A - \Delta U_1 + \frac{\delta U_1^2}{2(U_A - \Delta U_1)}. \quad (6.16)$$

შემდეგ გადავიღოთ მე-2 უბანზე, სადაც საწყის ვექტორად ავიღებთ U_1 ძაბვის ვექტროს და ა.შ.

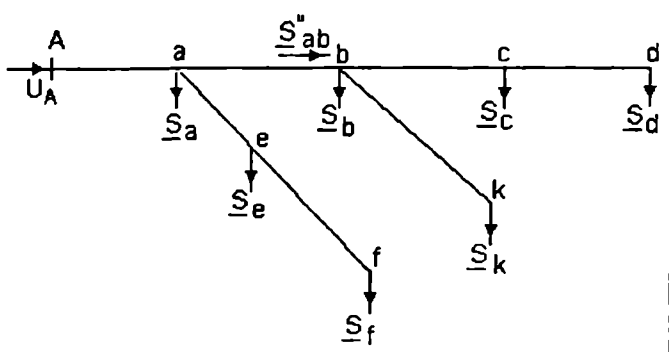
ამ საანგარიშო შემთხვევაში ძაბვების დიაგრამას აქვს 6.5 ნახაზზე ნაჩვენები სახე.



ნახ.6.5 ძაბვების დიაგრამა მაგისტრალურ-რადიალური ქსელისთვის (რეეიმის გაანგარიშება ცნობილი U_A ძაბვის მიხედვით)

$U_{\Sigma 35}$ კვ ძაბვის მანაწილებელი ქსელებისთვის თითქმის ყოველთვის ცნობილია კვების წყაროს ძაბვა U_A და ამიტომ პარამეტრების გაანგარიშებისთვის ვსარგებლობთ მეორე შემთხვევაში ჩამოყალიბებული მიმდევრობით.

ქსელის რეეიმის პარამეტრების გაანგარიშების მეთოდოლოგია, რომელიც ჩამოყალიბებულია შემოთხვევაში, შეიძლება გამოვიყენოთ მაგისტრალურ-განშტოებული ქსელის (ნახ. 6.6) რეეიმის პარამეტრების გაანგარიშებისთვისაც. აქ უფრო მოხერხებულია გაანგარიშები ჩავატაროთ „თავის მონაცემებით“ ანუ ცნობილი U_A ძაბვის მიხედვით.



ნახ. 6.6 მაგისტრალურ-განშტოებული ქსელი

პირველ ეტაპზე სიმძლავრის დანაკარგების გამოთვლას ვიწყებთ რომელიმე ბოლო უბნიდან, ეთქვათ cd უბნიდან. გამოთვლებს ვახდენთ იმავე მიმდევრობით, როგორც მაგისტრალურ-რადიალურ ქსელში, ოღონდ პირველ (სელის მიხედვით) განშტოებამდე – ხ კვანძამდე. ანალოგიურ გამოთვლებს ჩავატარებთ ამ კვანძთან მიერთებულ განშტოებაში (განშტოება bx).

განშტოების კვანძისთვის დაწერილი კირხჰოფის პირველი კანონის მიხედვით დავადგენთ კვების წყაროს მხრიდან ამ კვანძში შემომავალ სიმძლავრეს - $\Sigma_{\text{ხ}}''$ (ნახ.6.6) და გამოთვლებს გაეაგრძელებთ ანალოგიურად კვების ცენტრამდე ყველა არსებული განშტოების გათვალისწინებით.

მეორე ეტაპზე განისაზღვრება ძაბვის დანაკარგები მიმდევრობით თავიდან ბოლოსკენ და, შესაბამისად, ძაბვათა მნიშვნელობები კვანძებში.

უნდა აღინიშნოს, რომ $U_{\text{კვ}} 35$ კვ ძაბვის მანაწილებელ ქსელებში იყენებენ შედარებით უფრო დაბალი განიკეთის სადენებს, რომელთა აქტიური წინაღობა თითქმის რეაქტიული წინაღობის თანაზომადია, ზოგჯერ, მეტიც. გარდა ამისა, ეს ქსელები ხასიათდება რეაქტიური სიმძლავრის დაბალი კოეფიციენტით. ორივე ეს გარემოება განაპირობებს ძაბვის ვარდნის განივი შემდგენის შედარებით მცირე მნიშვნელობას, რაც საშუალებას გვაძლევს უგულებელვყოთ იგი და ქსელის კვანძებში ძაბვები განვსაზღვროთ მხოლოდ ძაბვის ვარდნის გრძივი შემდგენის გათვალისწინებით

$$U_{\text{ბოლ}} = U_{\text{აქვ}} - \Delta U_{\text{ხაზ}}.$$

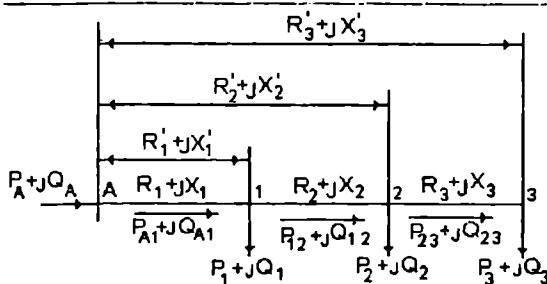
6.3 მანაწილებელი ქსელების რეჟიმების გაანგარიშების კერძო შემთხვევები

საშუალო და დაბალი ძაბვის, განსაკუთრებით $U_{\text{კვ}} 10$ კვ, ქსელებში შეიმჩნევა ძაბვის უმნიშვნელო დანაკარგები. აღნიშნულის გამო ხშირად გაანგარიშებების პირველ ეტაპზე გამოთვლებს ატარებენ იმ დაშვებით, რომ ქსელის ყველა კვანძში ძაბვა ერთნაირია და ნომინალურის ტოლია. ე. ი. მხედველობაში არ ღებულობენ ძაბვის კარგვებს ქსელში. ძაბვის დანაკარგის გაუთვალისწინებლობა სიმძლავრის დანაკარგის გაუთვალისწინებლობის ტოლფასია. ამ დაშვების პირობებში მაგისტრალური ქსელის ნებისმიერ უბანში გა-

მაველი სიმძლავრე ამ უბნის შემდგომ (ქსელის შეერთების სქემის მიხედვით) მდებარე კვანძების დატვირთვების ჯამის ტოლია (ნახ.6.7).

წარმოდგენილ ნახაზზე კვანძური დატვირთვები ჩაწერილია შესაბამისი კვანძის ნომრით (ინდექსით), ხოლო უაზნში გამავალი სიმძლავრე უბნის თავისა და ბოლოს ნომრებით. სიმძლავრის დანაკარგების გათვალისწინებლობის გამო გვაქვს

$$\left. \begin{aligned} P_{A1} + jQ_{A1} &= (P_1 + P_2 + P_3) + j(Q_1 + Q_2 + Q_3), \\ P_{12} + jQ_{12} &= (P_2 + P_3) + j(Q_2 + Q_3), \\ P_{23} + jQ_{23} &= P_3 + jQ_3. \end{aligned} \right\} \quad (6.17)$$



ნახ.6.7 ძაბვის დანაკარგის დასადგენად მაგისტრალურ ქსელში

ამავე ნახაზზე კვების ცენტრიდან ნებისმიერ კვანძამდე ჯამური წინაღობები აღნიშნულია R'_i, X'_i სიმბოლოებით და გვაქვს

$$\left. \begin{aligned} R'_1 + jX'_1 &= R_1 + jX_1, \\ R'_2 + jX'_2 &= (R_1 + R_2) + j(X_1 + X_2), \\ R'_3 + jX'_3 &= (R_1 + R_2 + R_3) + j(X_1 + X_2 + X_3) \end{aligned} \right\} \quad (6.18)$$

ჩაწეროთ ძაბვის ჯამური დანაკარგი მთელი ქსელისთვის

$$\begin{aligned} \Delta U &= \Delta U_{A1} + \Delta U_{12} + \Delta U_{23} = \frac{P_{A1} \cdot R_1 + Q_{A1} \cdot X_1}{U_6} + \\ &+ \frac{P_{12} \cdot R_2 + Q_{12} \cdot X_2}{U_6} + \frac{P_{23} \cdot R_3 + Q_{23} \cdot X_3}{U_6} \end{aligned}$$

(6.17) და (6.18) გამოსახულებათა გათვალისწინებით, დატვირთვის საში კვანძის მქონე მაგისტრალური ქსელისთვის, ვღებულობთ

$$\Delta U = \frac{1}{U_6} (P_1 R'_1 + Q_1 X'_1 + P_2 R'_2 + Q_2 X'_2 + P_3 R'_3 + Q_3 X'_3)$$

ანუ, ზოგადად, ღატვიროვის n კვანძის მქონე მაგისტრალური ქსელისთვის გვაქვს

$$\Delta U = \frac{1}{U_6} \left(\sum_{i=1}^n P_i R'_i + \sum_{i=1}^n Q_i X'_i \right) \quad (6.19)$$

როცა n საკმარისად დიდია, (რასაც ადგილი $U_6 \leq 10$ კვ ძაბვის მაგისტრალურ ქსელებში) (6.19) გამოსახულება მნიშვნელოვნად ამარტივებს რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშების პროცესს. გარდა ამისა, აღნიშნული გამოსახულება საშუალებას გვაძლევს მივიღოთ მაგისტრალურ ქსელში სადენთა განიკვეთების საანგარიშო გამოსახულება გამარტივებულ ფორმაში.

მაგისტრალურ-განშტოებულ ქსელში ძაბვის დანაკარგი კვების ცენტრიდან რომელიმე ბოლო კვანძამდე წარმოადგენს კვების ცენტრიდან განშტოებამდე და განშტოებიდან მის ბოლომდე ძაბვის დანაკარგების ჯამს. მაგალითად, ნ.ნ. ნახაშვი წარმოადგენილი ქსელისთვის გვაქვს

$$\Delta U_f = \Delta U_{\text{აზ}} + \Delta U_{\text{მ}}. \quad (6.20)$$

ზემოთ აღნიშნული დაშვებისას სიმძლავრის დანაკარგები ქსელში შეგვიძლია ვიანგარიშოთ შემდეგი, შედარებით მარტივი, გამოსახულებით

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= \frac{1}{U_6^2} \sum_{k=1}^m (P_k^2 + Q_k^2) R_k, \\ \Delta Q &= \frac{1}{U_6^2} \sum_{k=1}^m (P_k^2 + Q_k^2) X_k, \end{aligned} \right\} \quad (6.21)$$

სადაც: k – ქსელის უბნის ნომერი; m – უბანთა საერთო რაოდენობა; P_k, Q_k – უბანზე გამავალი აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრე, რომელთა დადგენა შესრუდება (6.17) გამოსახულების მიხედვით; R_k, X_k – ამავე უბნის წინაღობები.

გარდა ზემოთ აღნიშნული დაშვებისა (ძაბვა ქსელის ყველა კვანძში თითქმის ერთნაირია და ნომინალურის ტოლია) მაგისტრალურ-რადიალურ მანაწილებელ ქსელებში შეიძლება განვიხილოთ რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშების შემდეგი კერძო შემთხვევები:

1. მაგისტრალის ყველა უბანზე გვაქვს სადენთა ერთდარბოვე განიკვეთი და საყრდენებზე მათი განლაგება ერთნაირია. ამ

შემთხვევაში ყველა უბანი ხასიათდება ერთდღივივე r_0 და ერთი-დღივივე x_0 წინააღობებით. შესაბამისად (6.19) გამოსახულება მიიღებს სახე

$$\Delta U = \frac{1}{U_\epsilon} \left(r_0 \sum_{i=1}^n P_i \ell'_i + x_0 \sum_{i=1}^n Q_i \ell'_i \right), \quad (6.22)$$

სადაც ℓ_i - 1-ური კვანძის დაშორება კვების ცენტრიდან (კმ).

თუ გავითვალისწინებთ, რომ ქსელის კვანძებში რეაქტიული სიმძლავრის კოეფიციენტები თითქმის ერთნაირია

$$\frac{Q_i}{P_i} = \text{tg}\varphi_i = \text{idem},$$

გვაქვს

$$\Delta U = \frac{1}{U_\epsilon} (r_0 + x_0 \text{tg}\varphi) \sum_{i=1}^n P_i \ell'_i. \quad (6.23)$$

2. ღატვირთვა სამომხმარებლო კვანძებში სუფთა აქტიურია. ამ შემთხვევაში რეაქტიული ღატვირთვები ნულის გოლია და (6.19) გამოსახულების თანახმად გვაქვს

$$\Delta U = \frac{1}{U_\epsilon} \sum_{i=1}^n P_i R'_i \quad (6.24)$$

თუ მაგისტრალური ქსელი შესრულებულია ერთდღივივე განიკვეთის სადენებით და საყრდენებზე მათი განლაგებაც ერთნაირია, მაშინ (6.22) გამოსახულების თანახმად გვაქვს

$$\Delta U = \frac{r_0}{U_\epsilon} \sum_{i=1}^n P_i \ell'_i \quad (6.25)$$

ანუ

$$\Delta U = \frac{\rho}{FU_\epsilon} \sum_{i=1}^n P_i \ell'_i, \quad (6.26)$$

სადაც: ρ - სადენის კუთრი წინააღობა, $\frac{\text{ომ}\cdot\text{მმ}^2}{\text{კმ}}$; F - სადენის გამგარი

ნაწილის განივი კვეთი, მმ^2 .

3. უბნების რეაქტიული წინააღობა შედარებით მცირეა. ცუდადი დენის ნებისმიერი ხაზი ხასიათდება რეაქტიული წინააღობით, რომლის მნიშვნელობა საპაერო ხაზებისთვის იცვლება 0,36-0,44 ომ/კმ ფარგლებში, ხოლო საკაბელო ხაზებისთვის კი 0,08-0,12 ომ/კმ ფარგლებში (§3.3.2). დაბალი ძაბვის მანაწილებელ ქსელებში, სადენთა დაბალი განიკვეთების ($F \leq 50 \text{მმ}^2$) პირობებში, ხაზის აქ-

გიური წინაღობა რამდენჯერმე მეტია რეაქტიულთან შედარებით. ეს განსხვავება კიდევ უფრო ღრმავდება საკაბელო ხაზებისთვის.

თუ ამ პირობებში სიმძლავრის კოეფიციენტი ($\cos \varphi$) მაღალია, მაშინ ძაბვის დანაკარგის საანგარიშო გამოსახულებაში (6.23) $r_0 \gg x_0 \tan \varphi$ და ქსელში ძაბვის დანაკარგი შეგვიძლია ვიანგარიშოთ (6.25) გამოსახულებით. ამ შემთხვევაში გაანგარიშებებში ცლო-მილება არ აღემატება 10% თუ [16]:

ა) დაბალი ძაბვის საჰაერო ხაზებში, როცა $\cos \varphi = 0,9$, ალუმი-ნის სადენთა განიკვეთი $F_{\text{ალ}} \leq 16 \text{ მმ}^2$ და სპილენძის სადენის განიკვეთი $F_{\text{სპ}} \leq 10 \text{ მმ}^2$, ხოლო თუ $\cos \varphi = 0,8$, შესაბამისად გვაქვს $F_{\text{ალ}} \leq 10 \text{ მმ}^2$ და $F_{\text{სპ}} \leq 6 \text{ მმ}^2$;

ბ) დაბალი ძაბვის საკაბელო ხაზებში, როცა $\cos \varphi = 0,9$, ალუ-მინის სადენის განიკვეთი $F_{\text{ალ}} \leq 70 \text{ მმ}^2$ და სპილენძის სადენის განიკვეთი $F_{\text{სპ}} \leq 50 \text{ მმ}^2$, ხოლო თუ $\cos \varphi = 0,8$, შესაბამისად, გვაქვს $F_{\text{ალ}} \leq 50 \text{ მმ}^2$ და $F_{\text{სპ}} \leq 35 \text{ მმ}^2$.

6.4 მარტივი შეკრული ქსელების რეჟიმების პარამეტრების გაანგარიშება

6.4.1 შესავალი

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ (§1.5) შეკრული ქსელი ეწოდება ქსელს, სადაც მომხმარებელს შეუძლია კვება მიიღოს არანაკლებ ორი მხრიდან. შეკრული ქსელების რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება საკმარისად რთულია, ვიდრე ღია ქსელის. ღია ქსელის უბნებში გამავალი სიმძლავრე შეიძლება მოიძებნოს შესაბამის მომხმარებელთა დატვირთვებისა და, ასევე, შესაბამის უბნებზე სიმძლავრის დანაკარგების უბრალო აჯამვის გზით. შეკრული ქსელების რომელიმე უბანზე გამავალი სიმძლავრე კი დამოკიდებულია შეკრული ქსელის სხვა უბანთა ელექტრულ პარამეტრებზე და ქსელის ყველა კვანძის ელექტრულ დატვირთვაზე. იგი უნდა განისაზღვროს სპეციალური გამოთვლებით. კერძოდ, კირხჰოფისა და ომის კანონების მიხედვით დაწერილ განტოლებათა სისტემის ამოხსნის გზით. მიუხედავად იმისა, რომ აღნიშნულ განტოლებათა სისტემა შეიძლება შედგენილი იქნეს ცნობილი მეთოდების გამოყენებით, ქსელის რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება მაინც საკმარისად რთულ ამოცანას წარმოადგენს. ეს სირთულე დაკავშირებულია მასთან, რომ დატვირთვის მოცემული სიმძლავრის მიხედვით დატვირ-

თვის დენის განსაზღვრა შესაძლებელია ამ დაგვირთვის მიერთების კვანძში არსებული მუშა ძაბვის საშუალებით

$$I_1 = S_1^* / \sqrt{3} U_1^* \quad (6.27)$$

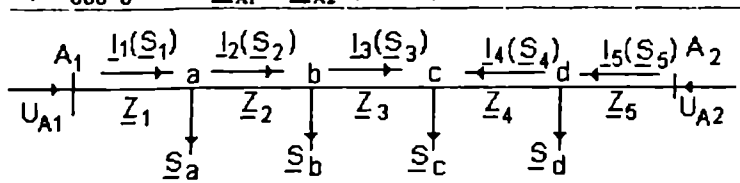
ქსელის კვანძებში კი ძაბვები გაანგარიშების საწყის ეტაპზე უცნობია.

ამ პირობებში უფრო მოხერხებული აღმოჩნდა გაანგარიშების თანდათანობითი მიახლოების (იტერაციული) მეთოდი, რომელიც ქსელების ელექტრული რეჟიმების გაანგარიშების ძირითად მეთოდად განიხილება.

თანდათანობითი მიახლოების (იტერაციული) მეთოდი გულისხმობს ნაკლებად ზუსტი ამონახსნიდან უფრო ზუსტ ამონახსნზე გადასვლას. ამ დროს პირველი იტერაცია მიიღება შერჩევის გზით. კერძოდ, საძიებელი სიდიდეების მნიშვნელობებად აიღება მათი შესაძლო მნიშვნელობათა შორის რომელიმე ერთი.

6.4.2 სიმძლავრეთა განაწილება ორმხრივი კვების ქსელში

ორმხრივი კვების ქსელი უმარტივესი შეკრული ქსელია (ნახ.1.8). ამ ქსელის კვება შეიძლება ხორციელდებოდეს ერთი კვების წყაროდან (ყულფური ქსელი) (ნახ.1.8ა) ან ორი სხვადასხვა კვების წყაროდან (ორმხრივი კვების ქსელი) (ნახ.1.8ბ). უბნები, რომლებიც მიერთებული არიან კვების წყაროს საღტეებთან სათავე უბნებს წარმოადგენენ. ნებისმიერი ყულფური ქსელი წარმოდგენით შეიძლება გაეჭრათ კვების ცენტრში და მივიღებთ ორმხრივი კვების ქსელს. ამ ქსელის გაანგარიშებისას შეგვიძლია დაეუშვათ, რომ კვების ცენტრებში ძაბვები, ზოგადად სხვადასხვა როგორც მოდულით, ასევე ფაზით $\underline{U}_{A1} \neq \underline{U}_{A2}$ (ნახ.6.8).



ნახ. 6.8 სიმძლავრეთა განაწილებისთვის ორმხრივი კვების ქსელში

აღნიშნული ქსელის კვანძების დატვირთვების ქვეშ იგულისხმება კვანძის საანგარიშო დატვირთვა (წ6.1), რომელშიც გათვალისწინებულია კვანძში მიერთებულ გრანსფორმატორებში ნომინალური ძაბვის მიხედვით გამოთვლილი სიმძლავრის დანაკარგები და ამავე კვანძში მიერთებული ხაზების მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე.

რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება ტარდება ორ ეტაპად. პირველ ეტაპზე ახდენენ სიმძლავრეთა განაწილებას დანაკარგების გათვალისწინების გარეშე. ე.ი. მიიღებენ, რომ ქსელის ყველა კვანძში ძაბვა ნომინალურის ტოლია. ამ დაშვების პირობებში შევადგონოთ კირხჰოფის მეორე კანონის შესაბამისი განტოლება: A_1 და A_2 კვების ცენტრებს შორის უბნებზე ძაბვის ეარდნათა ალგებრული ჯამი ამ ცენტრების ძაბვათა სხვაობის ტოლია (ნახ.68)

$$\sqrt{3}(I_1 Z_1 + I_2 Z_2 + I_3 Z_3 - I_4 Z_4 - I_5 Z_5) = U_{A1} - U_{A2}. \quad (6.28)$$

თუ უბნებში გამავალ დენებს შევცვლით შესაბამისი სამფაზო სიმძლავრეებით

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U_\phi},$$

მივიღებთ

$$S_1' Z_1 + S_2' Z_2 + S_3' Z_3 - S_4' Z_4 - S_5' Z_5 = (U_{A1} - U_{A2}) \cdot U_\phi. \quad (6.29)$$

უბნებში გამავალი სიმძლავრეები გამოვსახოთ პირველ სათავე უბანში გამავალი სიმძლავრისა და კვანძების საანგარიშო დატვირთვებით (კირხჰოფის პირველი კანონი):

$$\left. \begin{aligned} S_2' &= S_1' - S_a'; & S_3' &= S_1' - S_a' - S_b'; \\ S_4' &= S_a' + S_b' + S_c' - S_1'; & S_5' &= S_a' + S_b' + S_c' + S_d' - S_1'; \end{aligned} \right\} \quad (6.30)$$

სიმძლავრეთა ეს მნიშვნელობები ჩავსვათ (6.29)-ში და განვსაზღვროთ პირველ სათავე უბანზე გამავალი სიმძლავრე, მივიღებთ

$$S_1 = \frac{(U_{A1} - U_{A2}) U_\phi}{Z_1' + Z_2' + Z_3' + Z_4' + Z_5'} + \frac{S_a' (Z_2' + Z_3' + Z_4' + Z_5')}{Z_1' + Z_2' + Z_3' + Z_4' + Z_5'} + \frac{S_b' (Z_3' + Z_4' + Z_5') + S_c' (Z_4' + Z_5') + S_d' Z_5'}{Z_1' + Z_2' + Z_3' + Z_4' + Z_5'};$$

მემოვიღოთ აღნიშვნები:

$Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 = Z_{A1, A2}$ - ორმხრივი კვების ქსელის უბანთა ჯამური წინაღობა;

$Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 = Z_{2,A2}$ - მეორე კვანძიდან მეორე კვების ცენტრამდე უბანთა წინაღობების ჯამი:

$Z_3 + Z_4 + Z_5 = Z_{3,A2}$ - მესამე კვანძიდან მეორე კვების ცენტრამდე უბანთა წინაღობების ჯამი და ა.შ. ანუ, ზოგადად, $\sum_{j=m}^n Z_j = Z_{m,A2}$ - m კვანძიდან მეორე კვების ცენტრამდე უბანთა წინაღობების ჯამი, აქ j-უბნის ნომერი; m-კვანძის ნომერი.

ამრიგად, პირველ სათავე უბანზე გამავალი სიმძლავრის საანგარიშო გამოსახულებას აქვს სახე

$$S_1 = \frac{(U_{A1}^* - U_{A2}^*) U_5^*}{Z_{A1,A2}^*} + \frac{\sum_{m=1}^n S_m Z_{m,A2}^*}{Z_{A1,A2}^*} \quad (6.31)$$

თუ ქსელის რომელიმე კვანძში გვაქვს ფიქსირებული დატვირთვის მქონე კვების წყარო, მაშინ (6.31) გამოსახულებაში ამ წყაროს დატვირთვა აიღება „--“ ნიშნით.

(6.31) გამოსახულება გვიჩვენებს, რომ ორმხრივი კვების უბნებში გამავალი სიმძლავრე შეიცავს ორ შემდგენს. პირველი მათგანი გამოწვეულია კვების ცენტრების ძაბვათა სხვადასხვაობით და მას მათანაბრებელ სიმძლავრეს უწოდებენ

$$S_{\text{ავ}} = \frac{(U_{A1}^* - U_{A2}^*) U_5^*}{Z_{A1,A2}^*}; \quad (6.32)$$

მეორე შემდგენი კი გამოწვეულია კვანძური დატვირთვებით.

იმ შემთხვევაში, თუ კვების ცენტრების ძაბვები ერთნაირია $U_{A1} = U_{A2}$, მაშინ ქსელში მათანაბრებელი სიმძლავრე ნულის ტოლია და სათავე უბანში გამავალი S_1 სიმძლავრე გამოითვლება ფორმულით

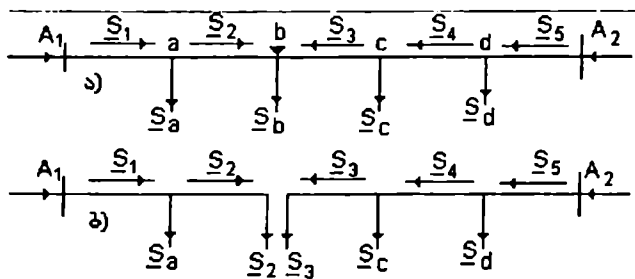
$$S_1 = \frac{\sum_{m=1}^n S_m Z_{m,A2}^*}{Z_{A1,A2}^*}. \quad (6.33)$$

ეიყოს, რა სათავე უბანზე გამავალი სიმძლავრე, (6.30) გამოსახულებათა საშუალებით, დაფადგნთ ქსელის დანარჩენ უბნებზე გამავალ სიმძლავრეებს. ამით მთავრდება ორმხრივი კვების ქსელის რეჟიმის გაანგარიშების პირველი ეტაპი. მეორე ეტაპზე დადგინდება სიმძლავრისა და ძაბვის დანაკარგები ქსელში, ანუ ქსელის რეჟიმის პარამეტრები.

6.4.3 რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება ორმხრივი კეების ქსელში

დავუშვათ, რომ ორმხრივი კეების ქსელში გაანგარიშების პირველი ეტაპის შედეგების მიხედვით სიმძლავრეთა განაწილებამ მიიღო 6.9ა ნახაზზე ნაჩვენები სახე, სადაც b კვანძში სიმძლავრე შემოდის ორივე მხრიდან. ქსელის ასეთ კვანძს სიმძლავრეთა გამყოფ (დენგამყოფ) კვანძს უწოდებენ და აღნიშნავენ ∇ : სიმბოლოთი. ეს კვანძი ხასიათდება ძაბვის უმცირესი მნიშვნელობით მთელ ქსელში.

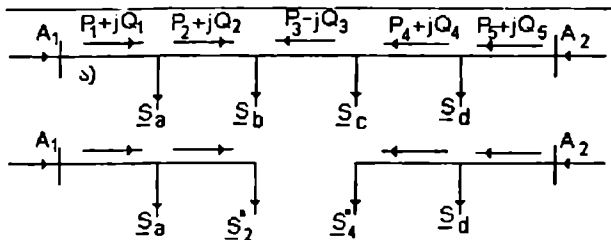
რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშებისთვის ორმხრივი კეების ქსელი შეგვიძლია პირობითად გავჭრათ სიმძლავრეთა გამყოფ კვანძში. შედეგად მივიღებთ ორ ღია ქსელს. მიღებული ღია ქსელების ბოლო კვანძების დატვირთვები, რომლებიც ფაქტიურად ერთი და იგივე კვანძია, აიღება ამ კვანძთან მიმდებარე შესაბამის უბნებში გამავალ სიმძლავრეთა გოლად (ნახ.6.9ბ). ცხადია, რომ აღნიშნული ოპერაცია არ შეცვლის სიმძლავრეთა განაწილების სურათს ქსელში. გაყოფის შედეგად მიღებული ღია ქსელების რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება ჩატარდება 6.2 პარაგრაფში გადმოცემული მეთოდით. ამასთან, იმ შემთხვევაში, როცა ცნობილია კეების ცენტრების ძაბვები, გაანგარიშებებს ვახდენთ „თავის მონაცემების“ მიხედვით. იმ შემთხვევაში კი როცა ეს ძაბვები მოცემული არ არის, მაშინ ვირჩევთ ძაბვის დასაშვებ მნიშვნელობას სიმძლავრეთა გამყოფ კვანძში და გაანგარიშებას ვახდენთ „ბოლოს მონაცემების“ მიხედვით.



ნახ. 6.9 რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშებისთვის
ორმხრივი კეების ქსელში

რიგ შემთხვევაში, გაანგარიშების პირველი ეტაპის შემდეგ, შეიძლება მივიღოთ სიმძლავრეთა ორი გამყოფი კვანძი. ერთი მათ-

განი აქტიურ სიმძლავრეთა გამყოფი და მეორე კი რეაქტიულ სიმძლავრეთა გამყოფი (ნახ.6.10ა).



ნახ. 6.10 ორმხრივი კვების ქსელი ორი გამყოფი კვანძით

ამ შემთხვევაში, გაანგარიშების მეორე ეტაპზე, პრველ რიგში გამოვთვლით სიმძლავრის დანაკარგებს გამყოფ კვანძებს შორის განთავსებულ უბნებზე. 6.10ა ნახაზის მიხედვით გვაქვს

$$\Delta P_3 = \frac{P_3^2 + Q_3^2}{U_6^2} R;$$

$$\Delta Q_3 = \frac{P_3^2 + Q_3^2}{U_6^2} X.$$

შესაბამისად

$$\underline{S}_2'' = P_2'' + jQ_2'' = P_2 + j(Q_2 + \Delta Q_3)$$

და

$$\underline{S}_4'' = P_4'' + jQ_4'' = P_4 + \Delta P_3 + jQ_4.$$

ამ ლაგირთვებს მოვლბთ შესაბამისად „ხ“ და „ც“ კვანძებში (ნახ. 6.10ბ) და რეჟიმის პარამეტრების შემდგომი გაანგარიშება შესრულდება ორივე ღია ქსელისთვის ცალკააკე.

6.4.4 სხვადასხვა ნომინალური ძაბვის მარტივი შეკრული ქსელის რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება

როცა შეკრული ქსელი შეიცავს სხვადასხვა ნომინალური ძაბვის ელემენტებს (ნახ.6.11ა), მაშინ რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება რამდენადმე გართულებულია. ამ შემთხვევაში, პირველ რიგში, საჭიროა ქსელის ყველა ელემენტის ელექტრული პარამეტრები დაიყვანოთ ერთ ბაზისურ ძაბვაზე შემდეგი ფორმულების გამოყენებით:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Y}' &= \underline{Y} \left(\frac{U_{\text{ნომ}}}{U_{\text{ბაზ}}} \right)^2 \\ \underline{Z}' &= \underline{Z} \left(\frac{U_{\text{ბაზ}}}{U_{\text{ნომ}}} \right)^2 :: \\ \underline{U}' &= \underline{U} \left(\frac{U_{\text{ბაზ}}}{U_{\text{ნომ}}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (6.34)$$

სადაც $\underline{Z}, \underline{Y}, \underline{U}$ - პარამეტრთა მნიშვნელობები ნომინალურ ძაბვაზე; $\underline{Z}', \underline{Y}', \underline{U}'$ - იგივე ბაზისურ ძაბვაზე; $U_{\text{ბაზ}}$ - ბაზისური ძაბვა; $U_{\text{ნომ}}$ - ნომინალური ძაბვა.

პრაქტიკულად, ბაზისურ ძაბვად ირჩევენ ქსელის ერთერთ ნომინალურ ძაბვას, ეთქვათ $U_{\text{ნომ.ღაბ.}}$, მაშინ ღაცვანის ფორმულები მიიღებს სახეს:

$$\underline{Z}' = \underline{Z} \cdot K_{\phi}^2$$

$$\underline{Y}' = \underline{Y} / K_{\phi}^2$$

$$\underline{U}' = \underline{U} / K_{\phi}$$

სადაც, $K_{\phi} = \frac{U_{\text{ნომ.ღაბ.}}}{U_{\text{ნომ.მაღ.}}}$ - ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი.

იმ შემთხვევაში, როცა ორივე სადაბლებელ ქვესადგურზე ტრანსფორმატორთა ტრანსფორმაციის კოეფიციენტები ერთნაირია, მაშინ ქსელში სიმძლავრეთა განაწილებისას ვსარგებლობთ (6.33) გამოსახულებით. ხოლო როცა $K_{\phi 1} \neq K_{\phi 2}$, მაშინ ქსელში დამატებით გაივლის მათანაბრებელი სიმძლავრე

$$\underline{S}_{\text{მათ}} = \frac{\underline{\Delta E}}{\underline{Z}_{\text{კონგ}}} \cdot U_{\text{კ}},$$

სადაც: $\underline{Z}_{\text{კონგ}}$ - შეკრული კონგურის ჯამური წინაღობა; $\underline{\Delta E}$ - ეს ის დამატებითი ელექტრომაგნიტური ძალა, რომელიც განპირობებულია ტრანსფორმატორთა ტრანსფორმაციის კოეფიციენტების სხვადასხვაობით (ნახ.6.11ბ)

$$\underline{\Delta E} = U_{\text{ნომ.ღაბ.}} \left(1 - \frac{K_{\phi 2}}{K_{\phi 1}} \right) \quad (6.35)$$

მაშასადამე მათანაბრებელი სიმძლავრე

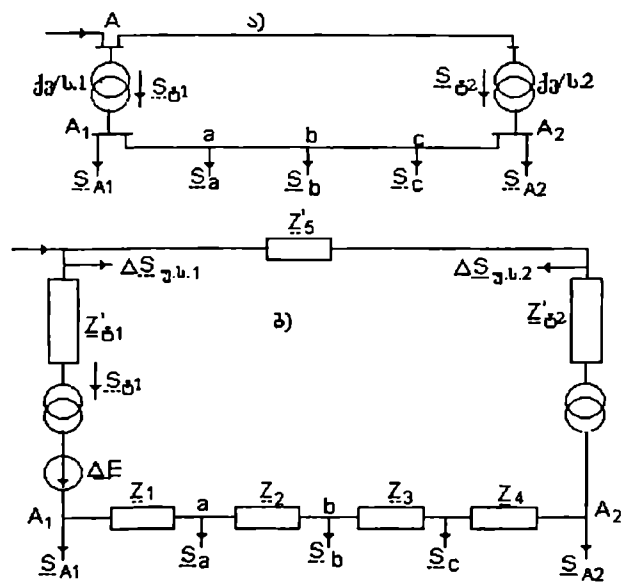
$$\underline{S}_{\text{მათ}} = \frac{U_{\text{ნომ.ღაბ.}}^2}{\underline{Z}_{\text{კონგ}}} \left(1 - \frac{K_{\phi 2}}{K_{\phi 1}} \right) \quad (6.36)$$

რომელიც დაბალი ძაბვის ქსელში გ1 გრანსფორმატორის დაბალი ძაბვის სალტებიდან მიედინება გ2 გრანსფორმატორის დაბალი ძაბვის სალტებისკენ.

(631) გამოსახულების გათვალისწინებით, მოცემული ქსელის პირველ სათავე უბანზე (ჩვენს შემთხვევაში გ1 გრანსფორმატორის უბანი) გამავალი სიმძლავრე იქნება

$$S_{\delta 1} = \frac{U_{\text{ნომდ.აბ.}}^2}{Z'_{\text{კოფ}}} \left(1 - \frac{K_{\delta 2}}{K_{\delta 1}} \right) + \frac{1}{Z'_{\text{კოფ}}} \left[\begin{aligned} & S_{A1} (Z'_1 + Z'_2 + Z'_3 + Z'_4 + Z'_{\delta 2} + Z'_{\delta 3}) + \\ & S_{A2} (Z'_2 + Z'_3 + Z'_4 + Z'_{\delta 2} + Z'_{\delta 3}) + \\ & S_{A3} (Z'_3 + Z'_4 + Z'_{\delta 2} + Z'_{\delta 3}) + S_{C1} (Z'_4 + \\ & + Z'_{\delta 2} + Z'_{\delta 3}) + S_{A2} (Z'_{\delta 2} + Z'_{\delta 3}) + \\ & + \Delta S_{\text{კაბ.}} Z'_{\delta 3} \end{aligned} \right] \quad (637)$$

ამით გაანგარიშების პირველი ეტაპი დამთავრებულია.



ნახ. 6.11 სხვადასხვა ნომინალური ძაბვის მარტივი შეკრული ქსელი

მეორე ეტაპის გაანგარიშება შეიძლება ჩატარდეს დაყვანილი ჩანაცვლების სქემის მიხედვით, ან ჩანაცვლების იმ სქემის მიხედ-

ვით, სადაც ყველა ელემენტის ელექტრული პარამეტრი მოცემულია თავიანთ ნომინალურ ძაბვაზე.

როგორც ვხედავთ, გრანსფორმატორთა კოეფიციენტების შეცვლით შეგვიძლია შევცვალოთ სიმძლავრეთა განაწილება ქსელში. საჭიროების მიხედვით შეგვიძლია დავტვირთოთ მაღალი ძაბვის ქსელი და განვტვირთოთ დაბალი ძაბვის ქსელი, ან პირიქით. ამით შესაძლებლობა გვაქვს ვცვალოთ სიმძლავრის დანაკარგები ქსელში. ამრიგად, $K_{\Sigma 1}$ და $K_{\Sigma 2}$ კოეფიციენტების სათანადო შერჩევით შეგვიძლია სიმძლავრის დანაკარგები დავიყვანოთ მინიმუმამდე. შეკრულ ქსელში სიმძლავრეთა იმ განაწილებას, რომლის დროსაც ქსელში სიმძლავრის დანაკარგები მინიმალურია, სიმძლავრეთა ეკონომიკური განაწილება ეწოდება. ხოლო სიმძლავრეთა იმ განაწილებას, რომელიც თავისთავად დამყარდება ქსელში გარედან ჩარევის გარეშე, სიმძლავრეთა ბუნებრივი განაწილება ეწოდება.

უნდა აღინიშნოს, რომ გრანსფორმაციის კოეფიციენტი შეიძლება განვიხილოთ როგორც კომპლექსური სიდიდე, რაც ნიშნავს მას, რომ შეკრულ კონგურში ჩართულია როგორც გრძივი, ასევე განივი დამატებითი ე.მ. ძალა (§7.12).

6.4.5 ორმხრივი კვების ქსელში სიმძლავრეთა განაწილების კერძო შემთხვევები

სეკ35 კვ ძაბვის ორმხრივი კვების ქსელში სიმძლავრეთა განაწილებისთვის შეიძლება ვისარგებლოთ სხვადასხვა სახის დაშვებებით, რომელთა გამოყენების შედეგად რეჟიმის პარამეტრების განგარიშებაში ცდომილებები არ აღემატება დასაშვებ მნიშვნელობებს. ამა თუ იმ დაშვების შედეგად მნიშვნელოვნად მარტივდება სიმძლავრეთა განაწილების საანგარიშო გამოსახულება და მცირდება გამოთვლების მოცულობა.

1. ერთგვაროვანი ქსელი. ერთგვაროვანი ეწოდება ქსელს, რომლის ყველა უბნისთვის რეაქტიულ და აქტიურ წინაღობათა ფარდობა პრაქტიკულად ერთნაირია

$$\frac{X_i}{R_i} = \alpha = \text{idem}, \text{ ანუ } X_i = \alpha R_i \quad (6.38)$$

თუ ამ გოლობას გავითვალისწინებთ (6.33) გამოსახულებაში, გვექნება

$$S_1 = \frac{\sum_{m=1}^n S_m Z_{m,A2}^*}{Z_{A1A2}^*} = \frac{\sum_{m=1}^n S_m (1 - j\alpha) R_{m,A2}}{(1 - j\alpha) R_{A1,A2}}$$

ანუ

$$S_1 = \frac{\sum_{m=1}^n S_m R_{m,A2}}{R_{A1A2}} = \frac{\sum_{m=1}^n S_m P_m R_{m,A2}}{R_{A1,A2}} + j \frac{\sum_{m=1}^n S_m Q_m R_{m,A2}}{R_{A1,A2}} \quad (6.39)$$

ამრიგად, ერთგვაროვან ქსელში სიმძლავრეთა განაწილება შეიძლება გამოთვალეთ ხაზების მხოლოდ აქტიური (ან რეაქტიული) წინააღობების საშუალებით.

თუ ქსელის ყოველ უბანზე სადენთა განიკვეთი ერთდამიგვივად, მაშინ ამ უბნებისთვის ერთნაირია ერთეულოვანი სიგრძის ხაზის აქტიური წინააღობა r_0 და შესაბამისად (6.39) გამოსახულება მიიღებს სახეს

$$S_1 = \frac{\sum_{m=1}^n P_m r_0 \ell_{m,A2}}{r_0 \ell_{A1A2}} + j \frac{\sum_{m=1}^n Q_m r_0 \ell_{m,A2}}{r_0 \ell_{A1,A2}}$$

ანუ

$$S_1 = \frac{\sum_{m=1}^n P_m \ell_{m,A2}}{\ell_{A1,A2}} + j \frac{\sum_{m=1}^n Q_m \ell_{m,A2}}{\ell_{A1,A2}} \quad (6.40)$$

მამასადამე, როცა ერთგვაროვანი ქსელის ყველა უბანი შესრულებულია ერთდამიგვივად განიკვეთის სადენებით, მაშინ სიმძლავრეთა განაწილება შეიძლება გამოთვალეთ უბანთა სიგრძეების საშუალებით. მიღებული გამოსახულებები გვიჩვენებენ, რომ ერთგვაროვან ქსელებში აქტიურ და რეაქტიულ სიმძლავრეთა განაწილება ერთმანეთზე დამოკიდებული არ არის. თითქოსდა საქმე გვაქვს ორ დამოუკიდებელ ქსელთან, რომელთაგანაც ერთი დაგვირთულია მხოლოდ აქტიური ტვირთებით, ხოლო მეორე კი რეაქტიული ტვირთებით. ასეთი მიდგომა მნიშვნელოვნად ამარტივებს გამოთვლებს, რადგანაც ფაქტიურად საქმე გვაქვს ნამდვილ და არა კომპლექსურ სიდიდეებთან.

თუ ყველა კვანძის დაგვირთვას გააჩნია სიმძლავრის ერთდამიგვივად კოეფიციენტი $\cos \varphi = 1$, მაშინ განსაზღვრავენ მხოლოდ აქტიურ სიმძლავრეთა განაწილებას და შემდეგ დავადგენთ რეაქტიულ სიმძლავრეთა განაწილებასაც

$$Q_i = P_i \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

და, შესაბამისად, 1-ურ უბანზე გამავალი სრული სიმძლავრე

$$\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1.$$

2. უბნების რეაქტიული წინაღობები შედარებით მცირეა. საშუალო და დაბალი ძაბვის ქსელებში (განსაკუთრებით საკაბელო ქსელებში), სადაც გამოიყენება შედარებით მცირე განიკვეთის სადენები, უბანთა აქტიური წინაღობები მეტია, ვიდრე რეაქტიული. ამიტომ შეიძლება სიმძლავრეთა განაწილება გამოვთვალოთ რეაქტიულ წინაღობათა გათვალისწინების გარეშე. ამ შემთხვევაში (6.33) გამოსახულება, რომელშიც გაითვალისწინებთ $X=0$, მიიღებს შემდეგ სახეს

$$\underline{S}_1 = \frac{\sum_{m=1}^n \underline{S}_m R_{m, A2}}{R_{A1, A2}} = \frac{\sum_{m=1}^n P_m R_{m, A2}}{R_{A1, A2}} + j \frac{\sum_{m=1}^n Q_m R_{m, A2}}{R_{A1, A2}} \quad (6.41)$$

(6.39) და (6.41) გამოსახულებათა შედარებით ეასკენით, თუ ქსელის უბანთა რეაქტიულ წინაღობებს მხედველობაში არ მივიღებთ, ასეთი ქსელი შეიძლება განვიხილოთ როგორც ერთგვაროვანი.

6.5 რთული შეკრული ქსელის რეჟიმების გაანგარიშება კონტურულ განგოლებათა მეთოდით

6.5.1 კონტურულ განგოლებათა სისტემა

რთული შეკრული ქსელებისთვის დაწერილ კონტურულ განგოლებათა სისტემაში შემავალი განგოლებების რაოდენობა დამოუკიდებელ კონტურთა რაოდენობის გოლია, რომელიც შეიძლება დადგენილი იქნეს ჩანაცვლების სქემის კვანძებისა და შგოების რაოდენობის მიხედვით. ჩანაცვლების სქემაში კვანძს ეწოდებენ გენერაციისა და დაგვირთვის მიერთების წერტილებს, ქსელის განმგოების წერტილს და, ასევე წერტილს, სადაც გვსურს ძაბვის კონტროლი. შგო ეწოდება უბანს, რომელიც ერთმანეთთან აერთებს ორ რომელიმე კვანძს. ვიცით რა ქსელის კვანძებისა და შგოების რაოდენობა, დამოუკიდებელ კონტურთა რაოდენობა შეიძლება განვსაზღვროთ ფორმულით

$$n_{\text{კონგ}} = n_{\text{შგო}} - n_{\text{კვ}} + n_{\text{მაბ.კვ}},$$

სადაც: $n_{\text{კონგ}}$ - ჩანაცვლების ქსელში დამოუკიდებელ კონტურთა რიცხვი; $n_{\text{შგო}}$ - შგოების რაოდენობა სქემაში; $n_{\text{კვ}}$ - კვანძების საერთო რაოდენობა; $n_{\text{მაბ.კვ}}$ - მახალანსებელი კვანძების რაოდენობა.

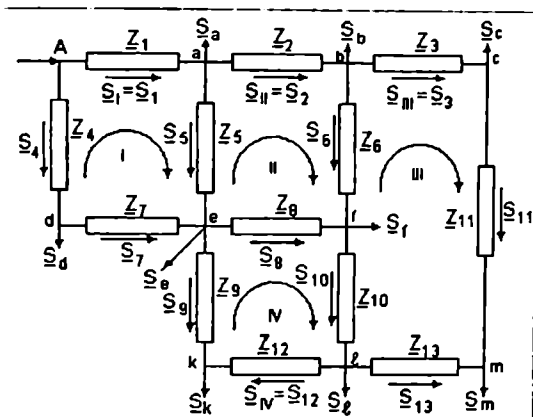
6.12 ნახაზზე ნაჩვენებ ქსელში გვაქვს ერთი მახალანსებული კვანძი და დატვირთვის ცხრა კვანძი, ანუ $n_{კვ}=10$ და $n_{გაბ.კვ.}=1$, მტოვების რაოდენობა - $n_{გტო}=13$. მამასადამე დამოუკიდებელ კონტურთა რაოდენობაა

$$n_{კონტ} = 13 - 10 + 1 = 4.$$

იმისათვის, რომ კონტურულ განტოლებათა სისტემაში მიიღოს კანონიკური ფორმა, საჭიროა შევასრულოთ შემდეგი მოთხოვნები: 1) კონტურთა შემოვლის მიმართულებები იყოს ერთიდაიგივე; 2) თითოეულ კონტურში საძიებელი კონტურული სიმძლავრე მოვნიშნოთ ამ კონტურის რომელიმე საკუთარ უბანზე (უბანი, რომელიც არ ეკუთვნის სხვა კონტურს); 3) კონტურული სიმძლავრის მიმართულება ემთხვეოდეს კონტურის შემოვლის მიმართულებას (ნახ.6.12).

დანარჩენ უბნებზე გამაჟალ სიმძლავრეთა მიმართულებები ავიღოთ ნებისმიერად და მათი მნიშვნელობები გამოვსახოთ საძიებელი და დატვირთვის სიმძლავრეების მიხედვით კირხჰოფის I კანონის საფუძველზე დაწერილი განტოლებიდან. ამ ოპერაციათა შესრულების შემდეგ განსახილველი ელექტრული ქსელის უბნებისთვის ვწერთ:

$$\left. \begin{aligned} \underline{S}_1 &= \underline{S}_I; \\ \underline{S}_2 &= \underline{S}_{II}; \\ \underline{S}_3 &= \underline{S}_{III}; \\ \underline{S}_4 &= \underline{S}_A + \underline{S}_B + \underline{S}_C + \underline{S}_D + \underline{S}_E + \underline{S}_F + \underline{S}_K + \underline{S}_I + \underline{S}_M - \underline{S}_I; \\ \underline{S}_5 &= \underline{S}_I - \underline{S}_{II} - \underline{S}_A; \\ \underline{S}_6 &= \underline{S}_{II} - \underline{S}_{III} - \underline{S}_B; \\ \underline{S}_7 &= \underline{S}_A + \underline{S}_B + \underline{S}_C + \underline{S}_E + \underline{S}_I + \underline{S}_K + \underline{S}_I + \underline{S}_M - \underline{S}_I; \\ \underline{S}_8 &= \underline{S}_B + \underline{S}_C + \underline{S}_F + \underline{S}_I + \underline{S}_M - \underline{S}_{II} + \underline{S}_{IV}; \\ \underline{S}_9 &= \underline{S}_K - \underline{S}_{IV}; \\ \underline{S}_{10} &= \underline{S}_I + \underline{S}_C + \underline{S}_M - \underline{S}_{III} + \underline{S}_{IV}; \\ \underline{S}_{11} &= \underline{S}_{III} - \underline{S}_C; \\ \underline{S}_{12} &= \underline{S}_{IV}; \\ \underline{S}_{13} &= \underline{S}_C + \underline{S}_M - \underline{S}_{III}; \end{aligned} \right\} \quad (6.42)$$



ნახ. 6.12 რთული შეკრული ქსელი

განსახილველი ქსელის არცერთ კონტურში არ არის ჩართული გრძივი ელექტრომაგნიტური ძალა და ამიტომ დანაკარგების გათვალისწინების გარეშე, (6.29) გამოსახულების ანალოგიურად, კირხჰოფის II კანონის საფუძველზე შედგენილი განტოლებები თითოეული კონტურისთვის ჩაიწერება სახეში

$$\left. \begin{aligned} S_1 Z_1 + S_2 Z_2 - S_7 Z_7 - S_4 Z_4 &= 0, \\ S_2 Z_2 + S_6 Z_6 - S_8 Z_8 - S_5 Z_5 &= 0, \\ S_2 Z_2 + S_{11} Z_{11} - S_{13} Z_{13} - S_6 Z_6 &= 0, \\ S_6 Z_6 + S_{10} Z_{10} + S_{12} Z_{12} - S_9 Z_9 &= 0. \end{aligned} \right\}$$

განტოლებათა ამ სისტემაში შევიტანოთ უბნებზე გამავალი სიმძლავრეთა მნიშვნელობები, განსაზღვრული (6.42) გამოსახულებებით. გარდაქმნების შემდეგ ვღებულობთ:

$$\left. \begin{aligned} S_1(Z_1 + Z_2 + Z_7 + Z_4) - S_2 Z_2 - S_4(Z_1 + Z_2 + Z_7) - S_4(Z_1 + Z_7) - \\ - S_4(Z_2 + Z_7) - S_4 \cdot Z_4 - S_5(Z_1 + Z_7) - S_5(Z_2 + Z_7) - S_5(Z_4 + Z_7) - \\ - S_5(Z_4 + Z_7) - S_5(Z_4 + Z_7) &= 0, \\ -S_1 \cdot Z_2 + S_{11}(Z_2 + Z_6 + Z_4 + Z_7) - S_{13} Z_{13} + S_6 Z_6 - \\ - S_6(Z_2 + Z_6) - S_6 Z_4 - S_6 Z_7 - S_6 Z_4 - S_{10} Z_{10} &= 0, \\ -S_2 \cdot Z_6 + S_{10}(Z_2 + Z_{11} + Z_{13} + Z_{10} + Z_4) - S_{12} Z_{12} + S_9 Z_9 - \\ - S_9(Z_{10} + Z_{13} + Z_{11}) - S_9 Z_{10} - S_{12}(Z_{10} + Z_{13}) &= 0, \\ -S_{11} \cdot Z_6 - S_{11} Z_{10} + S_{12}(Z_{12} + Z_6 + Z_4 + Z_{10}) + S_9 Z_9 + S_9(Z_6 + Z_{10}) + \\ + S_9 Z_4 - S_9 Z_9 + S_9(Z_4 + Z_{10}) + S_{12}(Z_4 + Z_{10}) &= 0 \end{aligned} \right\}$$

შემოვიღოთ აღნიშვნები:

$Z_I + Z_2 + Z_7 + Z_4 = Z_{I,II}$ - პირველი კონტურის საკუთარი წინალობა, რომელიც წარმოადგენს ამ კონტურის უბანთა წინალობების ჯამს;
 $Z_2 + Z_6 + Z_4 + Z_5 = Z_{II,II}$ - მეორე კონტურის საკუთარი წინალობა.

ასევე:

$Z_{III,III} = Z_3 + Z_{II,1} + Z_{II,3} + Z_{II,10} + Z_6$ - მესამე კონტურის საკუთარი წინალობა;

$Z_{IV,IV} = Z_{II,2} + Z_9 + Z_4 + Z_{II,10}$ - მეოთხე კონტურის საკუთარი წინალობა;

$Z_{I,II} = Z_{II,I}$ - პირველი და მეორე კონტურების ურთიერთ წინალობა, რომელიც წარმოადგენს ამ კონტურთა საერთო წინალობას (საზღვრის წინალობა). ჩვენს შემთხვევაში

$$Z_{I,II} = Z_{II,I} = Z_5;$$

$Z_{II,III} = Z_{III,II}$ - პირველი და მესამე კონტურების ურთიერთ წინალობა, რომელიც განსახილველ შემთხვევაში ნულის ტოლია

$$Z_{II,III} = Z_{III,II} = 0,$$

რადგანაც I და III კონტურებს არ გააჩნიათ საერთო საზღვარი.

ასევე:

$$Z_{I,IV} = Z_{IV,I} = 0;$$

$$Z_{II,III} = Z_{III,II} = Z_6;$$

$$Z_{II,IV} = Z_{IV,II} = Z_8;$$

$$Z_{III,IV} = Z_{IV,III} = Z_{II,10}.$$

ამრიგად, კონტურულ განტოლებათა სისტემას აქვს სახე

$$\left. \begin{aligned} & S_I Z_I - S_{II} Z_{II} - S_{III} Z_{III} - S_{IV} Z_{IV} - S_4 (Z_4' + Z_7' + Z_5') - \\ & - S_5 (Z_4' + Z_7') - S_6 (Z_4' + Z_7') - S_4 Z_4' - S_5 (Z_4' + Z_7') - \\ & - S_5 (Z_4' + Z_7') - S_6 (Z_4' + Z_7') - S_4 (Z_4' + Z_7') - S_5 (Z_4' + Z_7') = 0; \\ & - S_I Z_{II,1} + S_{II} Z_{II,II} - S_{III} Z_{III,III} - S_{IV} Z_{IV,IV} + S_4 Z_4' - S_5 (Z_4' + Z_5') - \\ & - S_6 Z_6' - S_7 Z_7' - S_8 Z_8' - S_9 Z_9' = 0; \\ & - S_I Z_{III,1} - S_{II} Z_{II,II} + S_{III} Z_{III,III} - S_{IV} Z_{IV,IV} + S_6 Z_6' - \\ & - S_7 (Z_{II,10} + Z_{II,13} + Z_{II,11}) - S_8 Z_{II,10} - S_9 (Z_{II,10} + Z_{II,13}) = 0; \\ & - S_I Z_{IV,1} - S_{II} Z_{II,II} - S_{III} Z_{III,III} + S_{IV} Z_{IV,IV} + S_6 Z_6' + S_7 (Z_7' + Z_{II,10}) + \\ & + S_8 Z_8' - S_9 Z_9' + S_{10} (Z_9' + Z_{II,10}) + S_{11} (Z_9' + Z_{II,10}) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (6.43)$$

მიღებულ კონტურულ განცოლებათა სისტემის კანონიკური ფორმის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ შეკრული ქსელისთვის აღნიშნულ განცოლებათა სისტემის ჩაწერა შეიძლება ყოველგვარი მათემატიკური გარდაქმნების გარეშე, თუ ქსელის დამოუკიდებელ კონტურებში კონტურულ სიმძლავრეთა წინასწარი მონიშვნა მოხდება ამ პარაგრაფში აღნიშნული მოთხოვნების დაცვით. ამ შემთხვევაში კონტურულ განცოლებათა სისტემის კანონიკურ ფორმას აქვს შემდეგი სტრუქტურა: 1) განცოლებათა სისტემაში პირველი კონტურის განცოლებას უჭირავს პირველი სტრიქონი. მეორე კონტურის განცოლებას მეორე სტრიქონი და ა.შ. 2) განცოლებათა სისტემის პირველ სვეტში ჩაიწერება პირველი კონტურის კონტურული სიმძლავრე Σ_1 , მეორე სვეტში მეორე კონტურის კონტურული სიმძლავრე Σ_2 და ა.შ. ამრიგად, თითოეული კონტურის კონტურული სიმძლავრე ჩაწერილია განცოლებათა სისტემის დიაგონალზე; 3) კონტურის განცოლებაში კონტურული სიმძლავრე მრავლდება ამავე კონტურის საკუთარ შეუღლებულ წინაღობაზე და ნამრავლი აიღება „+“ ნიშნით, ხოლო სხვა კონტურთა კონტურული სიმძლავრე მრავლდება შესაბამის ურთიერთ შეუღლებულ წინააღობაზე და ნამრავლი აიღება „-“ ნიშნით; 4) ცალკეულ კვანძურ დატვირთვებს „ეკრძალებათ“ გაიაროს იმ უბნებზე, რომლებზედაც მონიშნულია კონტურული სიმძლავრეები; 5) თითოეული კონტურის კონტურული განცოლებების თავისუფალი წევრი წარმოადგენს პოლინომს, რომლის წევრებია თითოეული კვანძური დატვირთვები ცალ-ცალკე გამრავლებული ამავე კონტურის იმ უბნების შეუღლებულ წინააღობათა ჯამზე, რომლებსაც გაივლის მოცემული კვანძური დატვირთვა მახალანსებელი კვანძიდან მისი მოდების კვანძამდე „აკრძალვის“ გათვალისწინებით. ამასთან, ამ წევრს აქვს „+“ ნიშანი, თუ აღნიშნულ უბნებში გამავალი კვანძური დატვირთვის მიმართულება ემთხვევა კონტურის შემოვლის მიმართულებას და პირიქით.

6.5.2 კონტურულ განცოლებათა სისტემის ამოხსნა

კონტურულ განცოლებათა სისტემა (6.43) წარმოადგენს წრფივ განცოლებათა სისტემას, რომლის ამოხსნისთვის შეიძლება გამოვიყენოთ წრფივ განცოლებათა სისტემის ამოხსნის ესა თუ ის მეთოდი. მათ შორის გაუსის მეთოდი.

რადგანაც საქმე გვაქვს კომპლექსურ ცვლადებიან და კომპლექსურ კოეფიციენტებიან განცოლებათა სისტემასთან, ამოხსნის პროცედურა საკმარისად ბევრ გამოთვლით ოპერაციებს მოითხოვს.

ამოხსნის პროცედურა შესაძლებელია რამდენადმე გამარტივდეს თუ კომპლექსურ სიდიდეებს შევცვლით შესაბამისი ნამდვილი და წარმოსახვითი შემდგენებით. ამ შემთხვევაში n -განგოლებიანი სისტემის ნაცულად მივიღებთ $2n$ -განგოლებიან სისტემას $2n$ საძიებელი ცვლადებით P_I, Q_I, P_{II}, Q_{II} და ა.შ. სადაც საქმე გვაქვს მხოლოდ ნამდვილ სიდიდეებთან, სადაც: A'_i - i -ური განგოლების თავისუფალი წევრის ნამდვილი ნაწილი; A''_i - იმავე წევრის წარმოსახვითი ნაწილი.

როცა დამოუკიდებელ კონგურთა რაოდენობა აღემატება 4-ს, მაშინ გამოთვლები საკმარისად რთულდება, რაც ბევრ შრომასა და დროს მოითხოვს. ამ შემთხვევაში სარგებლობენ კონგურულ განგოლებათა სისტემის მიახლოებითი ამოხსნის მეთოდით [11; 16], რომელიც შედარებით მარტივ გამოთვლებს მოითხოვს.

$$\begin{aligned}
 & P_I R_{I,I} + Q_I X_{I,I} - P_{II} R_{I,II} - Q_{II} X_{I,II} \dots \dots \dots + A'_I = 0 \\
 & -P_I X_{I,I} + Q_I R_{I,I} + P_{II} X_{I,II} - Q_{II} R_{I,II} \dots \dots \dots + A''_I = 0 \\
 & -P_I R_{II,I} - Q_I X_{II,I} + P_{II} R_{II,II} + Q_{II} X_{II,II} \dots \dots \dots + A'_II = 0 \\
 & P_I X_{II,I} - Q_I R_{II,I} - P_{II} X_{II,II} + Q_{II} R_{II,II} \dots \dots \dots + A''_{II} = 0 \\
 \hline
 & -P_I R_{I,II} + Q_I X_{I,II} - P_{II} R_{II,II} + Q_{II} X_{II,II} \dots \dots \dots + A'_I = 0 \\
 & +P_I X_{I,II} - Q_I R_{I,II} + P_{II} X_{II,II} - Q_{II} R_{II,II} \dots \dots \dots + A''_I = 0 \\
 \hline
 & -P_I R_{II,II} + Q_I X_{II,II} - P_{II} R_{II,II} + Q_{II} X_{II,II} \dots \dots \dots + A'_II = 0 \\
 & P_I X_{II,II} - Q_I R_{II,II} + P_{II} X_{II,II} - Q_{II} R_{II,II} \dots \dots \dots + A''_{II} = 0
 \end{aligned}$$

n დამოუკიდებელი კონგურის მქონე შეკრული ქსელისთვის კონგურულ განგოლებათა სისტემა ჩაეწეროს ზოგად სახეში:

$$\begin{aligned}
 & \underline{S}_I \underline{Z}'_{I,I} - \underline{S}_{II} \underline{Z}'_{I,II} - \underline{S}_{III} \underline{Z}'_{I,III} - \dots \dots \dots - \underline{S}_n \underline{Z}'_{I,n} + \underline{A}_I = 0 \\
 & -\underline{S}_I \underline{Z}'_{II,I} + \underline{S}_{II} \underline{Z}'_{II,II} - \underline{S}_{III} \underline{Z}'_{II,III} - \dots \dots \dots - \underline{S}_n \underline{Z}'_{II,n} + \underline{A}_{II} = 0 \\
 & \hline
 & -\underline{S}_I \underline{Z}'_{n,I} - \underline{S}_{II} \underline{Z}'_{n,II} - \underline{S}_{III} \underline{Z}'_{n,III} - \dots \dots \dots + \underline{S}_n \underline{Z}'_{n,n} + \underline{A}_n = 0
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \underline{S}_I \underline{Z}'_{I,I} - \underline{S}_{II} \underline{Z}'_{I,II} - \underline{S}_{III} \underline{Z}'_{I,III} - \dots \dots \dots - \underline{S}_n \underline{Z}'_{I,n} + \underline{A}_I = 0 \\ -\underline{S}_I \underline{Z}'_{II,I} + \underline{S}_{II} \underline{Z}'_{II,II} - \underline{S}_{III} \underline{Z}'_{II,III} - \dots \dots \dots - \underline{S}_n \underline{Z}'_{II,n} + \underline{A}_{II} = 0 \\ \hline -\underline{S}_I \underline{Z}'_{n,I} - \underline{S}_{II} \underline{Z}'_{n,II} - \underline{S}_{III} \underline{Z}'_{n,III} - \dots \dots \dots + \underline{S}_n \underline{Z}'_{n,n} + \underline{A}_n = 0 \end{aligned}} \right\} (6.44)$$

სადაც $\underline{A}_i = A_i' + jA_i''$ - 1-ური განტოლების თავისუფალი წევრი.

საძიებელ სიდიდეთა ამონახსნი შეიძლება მივიღოთ ერთიდა-იგივე მიმდევრობის გამოთვლების მრავალჯერადი შესრულების შედეგად. გამოთვლების ასეთ პროცედურას იტერაციული პროცესი ეწოდება. ამოხსნის პირდაპირი მეთოდებისაგან განსხვავებით აქ შესაძლებელია ამონახსნი მივიღოთ წინასწარ შერჩეული სიზუსტით. ამასთან გაანგარიშებებისადმი ამაღლებული სიზუსტის მოთხოვნა მოითხოვს იტერაციითა რაოდენობის გაზრდას.

(6.44) განტოლებათა სისტემის პირველი განტოლებიდან განვსაზღვროთ $\underline{S}_i$, მეორედან - $\underline{S}_{II}$ და ა.შ.

$$\left. \begin{aligned} \underline{S}_I &= \frac{-\underline{A}_I}{\underline{Z}_{I,I}} + \frac{\underline{Z}_{I,II}}{\underline{Z}_{I,I}} \underline{S}_{II} + \frac{\underline{Z}_{I,III}}{\underline{Z}_{I,I}} \underline{S}_{III} + \dots + \frac{\underline{Z}_{I,n}}{\underline{Z}_{I,I}} \underline{S}_n; \\ \underline{S}_{II} &= \frac{-\underline{A}_{II}}{\underline{Z}_{II,II}} + \frac{\underline{Z}_{II,I}}{\underline{Z}_{II,II}} \underline{S}_I + \frac{\underline{Z}_{II,III}}{\underline{Z}_{II,II}} \underline{S}_{III} + \dots + \frac{\underline{Z}_{II,n}}{\underline{Z}_{II,II}} \underline{S}_n; \\ &\dots\dots\dots \\ \underline{S}_n &= \frac{-\underline{A}_n}{\underline{Z}_{n,n}} + \frac{\underline{Z}_{n,I}}{\underline{Z}_{n,n}} \underline{S}_I + \frac{\underline{Z}_{n,II}}{\underline{Z}_{n,n}} \underline{S}_{II} + \dots + \frac{\underline{Z}_{n,n-1}}{\underline{Z}_{n,n}} \underline{S}_{n-1} \end{aligned} \right\} (6.45)$$

საძიებელ სიდიდეთა დადგენა შეიძლება შევასრულოთ მარტივი იტერაციული მეთოდით ან ზეიდელის მეთოდით.

მარტივი იტერაციული მეთოდით (6.45) განტოლებათა სისტემა ამოიხსნება შემდეგნაირად:

1) საძიებელ სიდიდეებს მივცეთ ნებისმიერი რიცხვითი მნიშვნელობები (იტერაციის პირველ ბიჯზე ავიღოთ $\underline{S}_I = \underline{S}_{II} = \dots = \underline{S}_n = 0$) - ნულოვანი მიახლოება;

2) ეს მნიშვნელობები ჩავსვათ (6.45) განტოლებათა სისტემის მარჯვენა მხარეებში და გამოვთვალოთ საძიებელ სიდიდეთა პირველი მიახლოება;

3) საძიებელ სიდიდეთა პირველი მიახლოების იმავე განტოლებათა სისტემაში ჩასმით მივიღებთ მეორე მიახლოებას და ა.შ.

ამრიგად, იტერაციული პროცესის k -ურ ბიჯზე (6.45) განტოლებათა სისტემა ჩაიწერება შემდეგ სახეში

$$\left. \begin{aligned} \underline{S}_I^{(K)} &= \frac{-\underline{A}_I}{\underline{Z}_{LI}} + \frac{\underline{Z}_{LI}}{\underline{Z}_{LI}} \underline{S}_I^{(K-1)} + \frac{\underline{Z}_{LI}}{\underline{Z}_{LI}} \underline{S}_{II}^{(K-1)} + \dots + \frac{\underline{Z}_{LI}}{\underline{Z}_{LI}} \underline{S}_n^{(K-1)}, \\ \underline{S}_{II}^{(K)} &= \frac{-\underline{A}_{II}}{\underline{Z}_{LII}} + \frac{\underline{Z}_{LII}}{\underline{Z}_{LII}} \underline{S}_I^{(K-1)} + \frac{\underline{Z}_{LII}}{\underline{Z}_{LII}} \underline{S}_{II}^{(K-1)} + \dots + \frac{\underline{Z}_{LII}}{\underline{Z}_{LII}} \underline{S}_n^{(K-1)}, \\ \dots\dots\dots \\ \underline{S}_n^{(K)} &= \frac{-\underline{A}_n}{\underline{Z}_{Ln}} + \frac{\underline{Z}_{Ln}}{\underline{Z}_{Ln}} \underline{S}_I^{(K-1)} + \frac{\underline{Z}_{Ln}}{\underline{Z}_{Ln}} \underline{S}_{II}^{(K-1)} + \dots + \frac{\underline{Z}_{Ln}}{\underline{Z}_{Ln}} \underline{S}_{n-1}^{(K-1)} \end{aligned} \right\} \quad (6.46)$$

იგერაციული პროცესი გაგრძელდება მანამ, სანამ ნებისმიერი საძიებელი სიდიდისთვის ბოლო ორი იგერაციით მიღებულ მნიშვნელობებს შორის სხვაობა არ აღმოჩნდება წინასწარ შერჩეულ მცირე მნიშვნელობაზე ნაკლები

$$|\underline{S}_i^{(K+1)} - \underline{S}_i^{(K)}| < \varepsilon, \quad i = I, II, \dots, n \quad (6.47)$$

ანუ

$$\lim_{K \rightarrow \infty} \underline{S}_i^{(K)} = \underline{S}_i \quad (6.48)$$

სადაც $\underline{S}_i$ - საძიებელი სიდიდის ზუსტი მნიშვნელობა.

თუ ყველა საძიებელი სიდიდისთვის (6.48) პირობა სრულდება, მაშინ იგერაციულ პროცესს უწოდებენ კრებადს, წინააღმდეგ შემთხვევაში გვაქვს განშლადი იგერაციული პროცესი.

ზეილელის იგერაციული მეთოდი მარტივი მეთოდისაგან იმით განსხვავდება, რომ იგერაციული პროცესის k ბიჯზე ნებისმიერი l -ური საძიებელი ცვლადის გამოსათვლელად ვსარგებლობთ $j \geq l$ საძიებელ ცვლადთა მნიშვნელობებით, რომლებიც გამოთვლილია იგერაციის $k-1$ ბიჯზე და მიმდინარე k -ბიჯზე გამოთვლილი $j < l$ ცვლადთა მნიშვნელობებით. ამ შემთხვევაში (6.46) განტოლებათა სისტემა იგერაციული პროცესის k ბიჯზე ჩაიწერება შემდეგ სახეში

$$\left. \begin{aligned}
 \underline{S}_I^{(K)} &= \frac{-\underline{A}_I}{\underline{Z}_{I,I}} + \frac{\underline{Z}_{I,II}^*}{\underline{Z}_{I,I}} \underline{S}_{II}^{(K-1)} + \frac{\underline{Z}_{I,III}^*}{\underline{Z}_{I,I}} \underline{S}_{III}^{(K-1)} + \dots + \frac{\underline{Z}_{I,n}^*}{\underline{Z}_{I,I}} \underline{S}_n^{(K-1)}, \\
 \underline{S}_{II}^{(K)} &= \frac{-\underline{A}_{II}}{\underline{Z}_{II,II}} + \frac{\underline{Z}_{II,I}^*}{\underline{Z}_{II,II}} \underline{S}_I^{(K)} + \frac{\underline{Z}_{II,III}^*}{\underline{Z}_{II,II}} \underline{S}_{III}^{(K-1)} + \dots + \frac{\underline{Z}_{II,n}^*}{\underline{Z}_{II,II}} \underline{S}_n^{(K-1)}, \\
 \dots\dots\dots \\
 \underline{S}_n^{(K)} &= \frac{-\underline{A}_n}{\underline{Z}_{n,n}} + \frac{\underline{Z}_{n,I}^*}{\underline{Z}_{n,n}} \underline{S}_I^{(K)} + \frac{\underline{Z}_{n,II}^*}{\underline{Z}_{n,n}} \underline{S}_{II}^{(K)} + \dots + \frac{\underline{Z}_{n,n-1}^*}{\underline{Z}_{n,n}} \underline{S}_{n-1}^{(K)}
 \end{aligned} \right\} (6.49)$$

უნდა აღინიშნოს, რომ იგერაციული პროცესი ზეიდელის მეთოდით უფრო სწრაფად კრებადი, ვიდრე მარტივი იგერაციული პროცესი. ე.ი. ზეიდელის მეთოდის გამოყენებისას იმავე შედეგის მისაღწევად გვჭირდება იგერაციათა ნაკლები რაოდენობა.

კონტურულ განტოლებათა სისტემის ამოხსნა შესაძლებელია, აგრეთვე, თანდათანობითი მიახლოების (იგერაციული პროცესი) მეთოდით, რომლის დროსაც ესარგებლობთ კონტურთა ე.წ. „გაუწონასწორებული ე.მ. ძალის“ პროპორციული სიდიდეებით.

შეკრულ ქსელში სიმძლავრეთა განაწილებისას $\underline{S}_I$, $\underline{S}_{II}$, $\underline{S}_{III}$ და ა.შ. საძიებელ კონტურულ სიმძლავრეთა ნაცელად შევირჩიოთ მათი რიყხვითი მნიშვნელობები $\underline{S}_I^{(0)}$, $\underline{S}_{II}^{(0)}$, $\underline{S}_{III}^{(0)}$ და ა.შ. ისე, რომ ქსელის ყველა კვანძისთვის სრულდებოდეს კინრხპოფის I კანონი. კონტურულ სიმძლავრეთა ეს მნიშვნელობები ნულოვან მიახლოებას წარმოადგენენ, რადგანაც ისინი განსხვავდებიან ზუსტი მნიშვნელობებისგან. კირხპოფის II კანონის მიხედვით კონტურთა შემოვლისას თითოეული კონტურისთვის მივიღებთ გაუწონასწორებელ ე.მ. ძალის პროპორციულ სიდიდეს:

$$\left. \begin{aligned}
 \underline{S}_I^{(0)} \underline{Z}_{I,I}^* - \underline{S}_{II}^{(0)} \underline{Z}_{I,II}^* - \underline{S}_{III}^{(0)} \underline{Z}_{I,III}^* \dots \underline{S}_n^{(0)} \underline{Z}_{I,n}^* + \underline{A}_I &= \underline{\Delta E}_I; \\
 -\underline{S}_I^{(0)} \underline{Z}_{II,I}^* + \underline{S}_{II}^{(0)} \underline{Z}_{II,II}^* - \underline{S}_{III}^{(0)} \underline{Z}_{II,III}^* \dots \underline{S}_n^{(0)} \underline{Z}_{II,n}^* + \underline{A}_{II} &= \underline{\Delta E}_2; \\
 \dots\dots\dots \\
 -\underline{S}_I^{(0)} \underline{Z}_{n,I}^* - \underline{S}_{II}^{(0)} \underline{Z}_{n,II}^* - \underline{S}_{III}^{(0)} \underline{Z}_{n,III}^* \dots + \underline{S}_n^{(0)} \underline{Z}_{n,n}^* + \underline{A}_n &= \underline{\Delta E}_n;
 \end{aligned} \right\} (6.50)$$

(6.50)-ს გამოვაკლოთ (6.44), მივიღებთ

$$\Delta S_{III}^{(1)} = \frac{\Delta E_3}{Z_{3,3}} + \frac{Z_{2,1}}{Z_{3,3}} \Delta S_I^{(1)} + \frac{Z_{2,2}}{Z_{3,3}} \Delta S_{II}^{(1)}$$

და ა.შ.

$$\Delta S_n^{(1)} = \frac{\Delta E_n}{Z_{n,n}} + \frac{Z_{n,1}}{Z_{n,n}} \Delta S_I^{(1)} + \dots + \frac{Z_{n,n-1}}{Z_{n,n}} \Delta S_{n-1}^{(1)}.$$

შემასწორებელ სიმძლავრეთა პირველი მიახლოების მნიშვნელობები შევიგანოთ (6.52) განტოლებათა სისტემის პირველ განტოლებაში. მივიღებთ ΔS_I -ის მეორე მიახლოებას

$$\Delta S_I^{(2)} = \frac{\Delta E_1}{Z_{1,1}} + \frac{Z_{1,2}}{Z_{1,1}} \Delta S_{II}^{(1)} + \frac{Z_{1,3}}{Z_{1,1}} \Delta S_{III}^{(1)} + \dots + \frac{Z_{1,n}}{Z_{1,1}} \Delta S_n^{(1)}.$$

ანალოგიური გამოთვლებით დავადგენთ დანარჩენ შემასწორებელ სიმძლავრეთა მეორე მიახლოებას და ა.შ.

გამოთვლები გაგრძელდება მანამ, სანამ ყველა კონტურისთვის შემასწორებელ სიმძლავრეთა ბოლო ორი მიახლოების მნიშვნელობებს შორის სხვაობა არ დააკმაყოფილებს პირობას

$$|\Delta S_k^{(m)} - \Delta S_k^{(m-1)}| < \varepsilon,$$

სადაც ε - გამოთვლების სიზუსტე, რომელიც წინასწარ იქნება შერჩეული. უნდა აღინიშნოს აქ გვიღელის მეთოდის გამოყენება კიდევ უფრო დააჩქარებს იტერაციულ პროცესს.

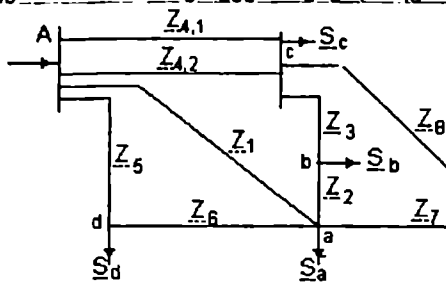
6.5.3 რთულ შეკრულ ქსელებში სიმძლავრეთა განაწილების გამარტივების ხერხები

რთულ შეკრულ ქსელში სიმძლავრეთა განაწილებისთვის, მათემატიკურ ოპერაციათა მოცულობის შემცირების მიზნით, რიგ შემთხვევებში, უფრო ეფექტურია ვისარგებლოთ სხვადასხვა სახის გამარტივებებით. მათ რიცხვს მიეკუთვნება: ქსელის წარმოდგენითი გაჭრა მახალანსებელი კვების ცენტრში; დატვირთვათა გადაგანა; უბნების პარალელურ-მიმდევრობითი შეკრება; სამკუთხედის გარდაქმნა ვარსკვლავად, ან პირიქით.

6.13 ნახაზზე წარმოდგენილია ოთხი დამოუკიდებელი კონტურის შემცველი ქსელი.

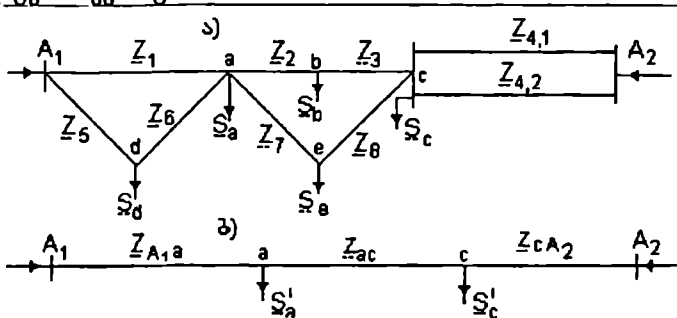
აღნიშნულ ქსელში სიმძლავრეთა განაწილებისთვის უნდა ამოიხსნას კომპლექსური ცვლადებისა და კომპლექსური კოეფიციენტების შემცველი ოთხგანტოლებიანი სისტემა. გამარტივების ხერ-

ხების გამოყენებით განსაზღვრული რთული შეკრული ქსელი შეიძლება დაიყვანოს ორმხრივი კვების ქსელამდე.



ნახ. 6.13 რთული შეკრული ქსელის შეერთების სქემა

მოცემული ქსელი წარმოდგენით გაეჭრათ კვების ცენტრში. მივიღებთ ორმხრივი კვების ქსელს, რომელიც თავის მხრივ შეიძლება კიდევ დამოუკიდებელ კონტურებს (ნახ.6.14). ამ ნახაზიდან ჩანს, რომ ქსელის A_1 და a პუნქტებს შორის არის ელექტრული ენერგიის გადაცემის ორი გზა, რომელთაგანც ერთ გზაზე არის შუალედური კვანძური დატვირთვა S_d , a და c პუნქტებს შორის არის ასევე ორი გზა და ორივე გზაზეა შუალედური კვანძური დატვირთვები S_b და S_e . c და A_2 პუნქტებს შორის გვაქვს ენერგიის გადაცემის ორი გზა, რომლებიც თავისუფალნი არიან შუალედური კვანძური დატვირთვებისგან.



ნახ. 6.14 ორმხრივი კვების ქსელი: ა) გამარტივებამდე; ბ) გამარტივების შემდეგ

ასეთი ქსელის გაანგარიშება შედარებით რთულია. ჩასაგარე ბელ სამუშაოთა საერთო მოცულობის შემცირების მიზნით შევასრულოთ ქსელის სქემის შესაძლო გამარტივება.

გამარტივების ერთერთი ხერხი ეს არის უბანთა პარალელური შეკრება. ამ ხერხის გამოყენება შესაძლებელია ქსელის იმ პარალელური უბნების მიმართ, რომლებიც თავისუფალნი არიან შუალედური კვანძური დატვირთვებისგან. კერძოდ cA_2 უბანი, რომლის ეკვივალენტური წინაღობა, პარალელური შეკრების წესის თანახმად, იქნება

$$\underline{Z}_{cA_2} = \frac{\underline{Z}_{4,1} \cdot \underline{Z}_{4,2}}{\underline{Z}_{4,1} + \underline{Z}_{4,2}}, \quad (6.53)$$

უბნების წინააღობათა ასეთი პარალელური შეკრება შეიძლება შევასრულოთ A_1 და a (ასევე a და c) პუნქტებს შორის, მაგრამ ამას ხელს უშლის შუალედური კვანძური დატვირთვები. იმისთვის, რომ შეგვეძლოს პარალელური შეკრების ხერხის გამოყენება, საჭიროა წინასწარ გამოვიყენოთ გამარტივების ის ხერხი, რომელსაც დატვირთვების გადატანის ხერხს უწოდებენ. ამ ხერხის იდეა მდგომარეობს შემდეგში: უბნის შუალედური დატვირთვა გადავიტანოთ მის ბოლოებში ისე, რომ ამ ბოლო კვანძებში ძაბვათა მნიშვნელობები დატვირთვის გადატანამდე და გადატანის შემდეგ უცვლელი დარჩეს.

ეთქვან, $\underline{S}_d$ დატვირთვის გადატანამდე A_1d უბანში გადის $\underline{S}_z$ სიმძლავრე, ხოლო გადატანის შემდეგ კი $\underline{S}'_z$. ორივე ამ შემთხვევითის გამოთვალათ ძაბვის ვარდნა A_1da უბანზე (გამოსახულება 6.29):

გადატანამდე

$$\Delta U_{A_1da} = \frac{1}{U_\phi} (\underline{S}'_z \underline{Z}_z + (\underline{S}_z - \underline{S}'_z) \underline{Z}_\phi)$$

გადატანის შემდეგ

$$\Delta U_{A_1da} = \frac{1}{U_\phi} \underline{S}'_z \cdot (\underline{Z}_z + \underline{Z}_\phi)$$

ამ გოლობათა მარჯვენა მხარეების გატოლების შემდეგ ვღებულობთ

$$\underline{S}_{d \rightarrow A_1} = \underline{S}_z - \underline{S}'_z = \underline{S}_d \cdot \frac{\underline{Z}'_\phi}{\underline{Z}'_z + \underline{Z}_\phi} \quad (6.54)$$

სადაც $\underline{S}_{d \rightarrow A_1}$ - ეს ის სიმძლავრეა, რომელიც d პუნქტიდან გადის A_1 პუნქტში. შესაბამისად

$$\underline{S}_{d \rightarrow a} = \underline{S}_d - \underline{S}_{d \rightarrow A_1} = \underline{S}_d \cdot \frac{\underline{Z}'_z}{\underline{Z}'_z + \underline{Z}_\phi}. \quad (6.55)$$

ამრიგად, უბნის შუალედური კვანძიდან მის ბოლოებში დატვირთვის გადატანა უნდა შესრულდეს უბნის შემადგენელი ნაწილების შეუღლებულ წინალობათა უკუპროპორციულად.

მა დატვირთვის გადატანის შემდეგ ჩაებატარებთ მიმდევრობით-პარალელურ წინალობათა შეკრებას.

ანალოგიურად გავამარტივებთ a და c პუნქტებს შორის არსებულ ქსელს.

ჩატარებული გამარტივებები შემდეგ მოცემული ორმხრივი კვების ქსელი მიიღებს 6.14ბ ნახაზზე ნაჩვენებ სახეს, სადაც:

$$\underline{Z}_{A1a} = \frac{\underline{Z}_1 \cdot (\underline{Z}_5 + \underline{Z}_6)}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_5 + \underline{Z}_6}; \quad \underline{Z}_{bc} = \frac{(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3)(\underline{Z}_7 + \underline{Z}_8)}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \underline{Z}_7 + \underline{Z}_8};$$

$$\underline{S}'_a = \underline{S}_a + \underline{S}_{d \rightarrow a} + \underline{S}_{b \rightarrow a} + \underline{S}_{c \rightarrow a}; \quad \underline{S}'_c = \underline{S}_c + \underline{S}_{b \rightarrow c} + \underline{S}_{e \rightarrow c}.$$

თავის მხრივ

$$\underline{S}_{b \rightarrow a} = \underline{S}_b \cdot \frac{\underline{Z}'_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}; \quad \underline{S}_{e \rightarrow a} = \underline{S}_e \cdot \frac{\underline{Z}'_8}{\underline{Z}_7 + \underline{Z}_8};$$

$$\underline{S}_{b \rightarrow c} = \underline{S}_b \cdot \frac{\underline{Z}'_2}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}; \quad \underline{S}_{e \rightarrow c} = \underline{S}_e \cdot \frac{\underline{Z}'_7}{\underline{Z}_7 + \underline{Z}_8}.$$

(6.33) ფორმულის გამოყენებით დავადგენთ მიღებული ორმხრივი ქსელის უბნებში გამავალ სიმძლავრეთა მნიშვნელობებს $\underline{S}_{A1a, a\Delta}, \underline{S}_{a\Delta, a}, \underline{S}_{A2c, c\Delta}, \underline{S}_{c\Delta, c}$, რომელთაც გადავანაწილებთ შესაბამის პარალელურ მტოებს შორის მათი შეუღლებული წინალობების უკუპროპორციულად (ნახ.6.15):

$$\underline{S}'_{A1a} = \underline{S}_{A1a, a\Delta} = \frac{\underline{Z}'_5 + \underline{Z}'_6}{\underline{Z}'_1 + \underline{Z}'_5 + \underline{Z}'_6}; \quad \underline{S}''_{A1a} = \underline{S}_{A1a, a\Delta} \cdot \frac{\underline{Z}'_1}{\underline{Z}'_1 + \underline{Z}'_5 + \underline{Z}'_6};$$

$$\underline{S}_{bc} = \underline{S}_{c\Delta, c} \cdot \frac{\underline{Z}'_7 + \underline{Z}'_8}{\underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_3 + \underline{Z}'_7 + \underline{Z}'_8}; \quad \underline{S}''_{bc} = \underline{S}_{c\Delta, c} \cdot \frac{\underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_3}{\underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_3 + \underline{Z}'_7 + \underline{Z}'_8};$$

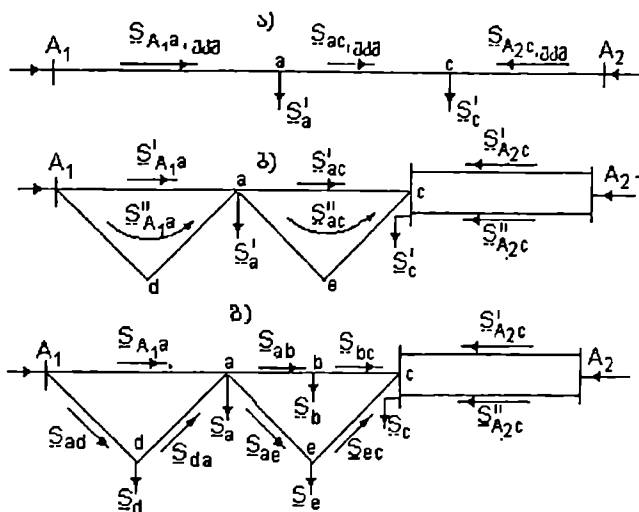
ამ ოპერაციათა ჩატარების შემდეგ საჭიროა გადატანილი დატვირთვები დავებრუნოთ თავიანთ კვანძებში და მივიღებთ საწყისი სქემის უბნებზე გამავალ სიმძლავრეებს (ნახ. 6.15გ).

გადატანილ დატვირთვათა თავიანთ კვანძებში დაბრუნების შემდეგ უბნებში გამავალი სიმძლავრეები იქნება:

$$\underline{S}_{A1a} = \underline{S}'_{A1a}; \quad \underline{S}_{A1d} = \underline{S}''_{A1a} + \underline{S}_{d \rightarrow A1}; \quad \underline{S}_{da} = \underline{S}''_{A1a} - \underline{S}_{d \rightarrow a};$$

$$\underline{S}_{ab} = \underline{S}'_{bc} + \underline{S}_{b \rightarrow a}; \quad \underline{S}_{bc} = \underline{S}'_{bc} - \underline{S}_{b \rightarrow c}; \quad \underline{S}_{ac} = \underline{S}''_{bc} + \underline{S}_{c \rightarrow a};$$

$$\underline{S}_{ec} = \underline{S}''_{bc} - \underline{S}_{c \rightarrow c}.$$



ნახ. 6.15 სიმძლავრეთა განაწილება ორმხრივი კვების ქსელში:

ა,ბ – გამარტივებული სქემები; გ) საწყისი სქემა

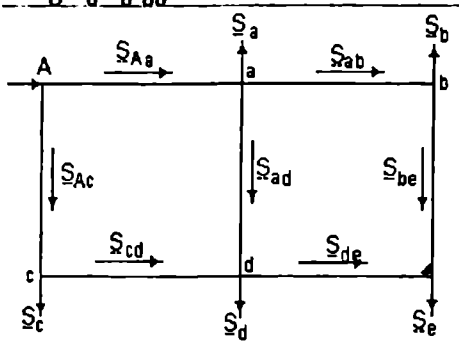
რთული შეკრული ქსელების გასამარტივებლად შეიძლება გამოვიყენოთ აგრეთვე, ელექტროტექნიკიდან კარგად ცნობილი მეთოდი – სამკუთხედის გარდაქმნა ვარსკვლავად, ან პირიქით.

გარდა აღნიშნულისა, შეიძლება ვისარგებლოთ ქსელის ერთგვაროვნობის პირობით (თუ ეს პირობა სრულდება), რომლის დროსაც ქსელში აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების განაწილება შესაძლებელია დავადგინოთ ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად ქსელის უბანთა მხოლოდ აქტიური წინააღობების გათვალისწინებით. ასევე, თუ ქსელის ყველა უბანი მესრულებულია ერთიდაიგივე განიკვეთის სადენებით, მაშინ სიმძლავრეთა განაწილების კონტურულ განგოლებათა სისტემაში უბანთა წინააღობების ნაცვლად შეგვიძლია ჩავსვათ მათი სიგრძეები (§6.4.5).

6.5.4 რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება კონტურული სიმძლავრეების მიხედვით

რთულ შეკრულ ქსელში რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება გარდება იმავე პრინციპით, როგორც ორმხრივი კვების ქსელში (§6.4.3). კერძოდ, სიმძლავრეთა განაწილებისა და დგინდება დენ-გამყოფი კვანძი, რომელთა რაოდენობა რთულ შეკრულ ქსელში

შეიძლება რამდენიმე იყოს. არ არის გამორიცხული, რომ აქტიური სიმძლავრის გამყოფი კვანძი არ დაემთხვეს რეაქტიული სიმძლავრის გამყოფ კვანძს.



ნახ. 6.16 შეკრულ ქსელში რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშებისთვის

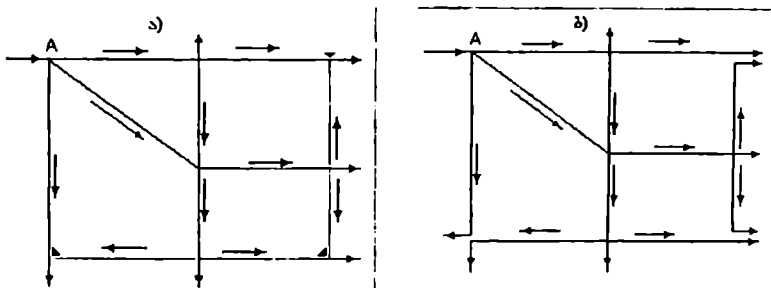
განვიხილოთ რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშების მიმდევრობა ქვემოთ ნაჩვენები შეკრული ქსელი მაგალითზე (ნახ. 6.16).

როგორც ნახაზიდან ჩანს ღენგამყოფი კვანძია e , რომელშიც ქსელის გაჭრის შემდეგ მივიღებთ ორ ღია ქსელს abe და de . მათ ბოლოებში მიერთებული დატვირთვები უნდა აკმაყოფილებდეს პირობას $\underline{S}_{e1} + \underline{S}_{e2} = \underline{S}_e$ ამასთან $\underline{S}_{e1} = \underline{S}_{be}'' = \underline{S}_{be}$ და $\underline{S}_{e2} = \underline{S}_{de}'' = \underline{S}_{de}$.

თუ რეჟიმი პარამეტრების გაანგარიშებას ვატარებთ „თავის მონაცემებით“ (ცნობილია ძაბვა U_A), მაშინ ნომინალური ძაბვის მიხედვით განისაზღვრება მხოლოდ სიმძლავრის დანაკარგები უბნებში მიმდევრობით ბოლოდან თავისკენ (ჩვენს შემთხვევაში a და d კვანძებისკენ).

იმ შემთხვევაში, როცა გაანგარიშებებს ვატარებთ „ბოლოს მონაცემებით“, მაშინ ღენგამყოფ კვანძში ვირჩევთ ძაბვის მუშა მნიშვნელობას და განესაზღვრავთ ღია ქსელების უბნებში სიმძლავრისა და ძაბვის დანაკარგებს მიმდევრობით ბოლოდან (ღენგამყოფი კვანძიდან) თავისკენ.

შეკრული ქსელის რეჟიმების გაანგარიშებების სპეციფიურობა გამოიხატება მასში, რომ ქსელის ღია ნაწილის თავი კვანძი კვების ცენტრთან დაკავშირებულია მინიმუმ ორი გზით.



**6.17 რთული შეკრული ქსელის სქემა რამდენიმე
დენგამყოფი კვანძით:**

ა) საწყისი; ბ) დენგამყოფი კვანძებში გაყოფის შემდეგ

მას შემდეგ, რაც პირობით ღია ქსელებში დადგენილი იქნება რეჟიმის პარამეტრები, შეკრულ ნაწილში რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშების შემდგომი გაგრძელება უნდა შევასრულოთ ამ ნაწილის დენგამყოფი კვანძიდან. ამასთან ამ კვანძში შემომაველ სიმძლავრეებს, პროპორციული განაწილების პრინციპით, უნდა დაემატოს სიმძლავრის დანაკარგები ქსელის იმ ღია ნაწილში, რომელიც ამ კვანძთანაა მიერთებული. ჩვენს შემთხვევაში ასეთი კვანძია d . აქაც მოვახდენთ ქსელის პირობით გაჭრას და მივიღებთ ორ ღია ქსელს: Acd და ad . გაანგარიშების შემდგომი მიმდევრობა ღია ქსელების რეჟიმების გაანგარიშების ანალოგიურია.

იმ შემთხვევაში, როცა შეკრულ ქსელში სიმძლავრეთა განაწილებისას მივიღებთ რამდენიმე დენგამყოფი კვანძს (ნახ.6.17ა), მაშინ ამ კვანძებში ქსელის გაჭრისას გვექნება ღია მაგისტრალურ-განშტოებული ქსელიც (ნახ.6.17ბ), რომლისთვისაც რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება ჩატარდება 62 პარაგრაფში ჩამოყალიბებული მიმდევრობით.

6.6 რთული შეკრული ქსელის რეჟიმის გაანგარიშება კვანძური ძაბვების მეთოდით

6.6.1 კვანძური ძაბვების განგოლებათა სისტემა

კონკურულ განგოლებათა მეთოდის გამოყენებისას ვნახეთ, რომ ქსელის რეჟიმის პარამეტრების დასადგენად გაანგარიშებები ტარდება ორ ეტაპად. კერძოდ, პირველ ეტაპზე წარმოებს ქსელის უბნებში გამავალ სიმძლავრეთა დადგენა სიმძლავრისა და ძაბვის

დანაკარგების მხედველობაში მიღების გარეშე და მეორე ეტაპზე ხდება სიმძლავრისა და ძაბვის დანაკარგების გაანგარიშება უბნებზე გამავალ სიმძლავრეთა შემდგომი დაზუსტებით.

გარდა ამისა, კომპიუტერული ტექნიკის გამოყენების პირობებში კონკრულ განგოლებათა მეთოდმა ფართო გავრცელება ვერ ჰპოვა სხვადასხვა მიზეზით. კერძოდ: დამოუკიდებელ კონკურთა გამოყოფის პროცედურის სირთულე და არაცალსახობა; რეეიმული შემღდეებისა და გრანსფორმაგორთა გრანსფორმაციის კოეფიციენტის ცვლილების გათვალისწინების სირთულე; გაანგარიშებებისას ქსელის კონფიგურაციის მოსალოდნელ ცვლილებასთან დაკავშირებული სიძნელები.

ჩვეულებრივ ელექტრულ ქსელში უბანთა რაოდენობა (m) კვანძების რაოდენობაზე (n) მეტია. ამის გამო m რაოდენობის უბნების შემცველი ქსელისთვის კირხჰოფის I და II კანონების საფუძველზე შედგენილ განგოლებათა სისტემის ამოხსნასა და რეეიმის პარამეტრების შემდგომ გაანგარიშებასთან შედარებით უფრო ეფექტური აღმოჩნდა n<m რაოდენობის კვანძებისთვის ომისა და კირხჰოფის I კანონის საფუძველზე დაწერილი კვანძური ძაბვების განგოლებათა სისტემის ამოხსნა და რეეიმის პარამეტრების შემდგომი გაანგარიშება.

ცნობილი კვანძური ძაბვების მიხედვით ჩატარებული შესაბამისი გამოთვლების საშუალებით შეგვიძლია დავადგინოთ ცალკეული უბნებისა და, მთლიანად, ქსელის რეეიმის პარამეტრები, სადაც უკვე გათვალისწინებული იქნება სიმძლავრისა და ძაბვის დანაკარგებიც.

დავუშვათ, რომ ელექტრული ქსელი შეიცავს $f=0,1,2,...,n$ კვანძს. მათ შორის $f=0$ კვანძი მიჩნეულია მბაბლანსებელ კვანძად და ამავე კვანძის ძაბვა U_0 აღებულია საყრდენ ძაბვად (ე.ი. მბაბლანსებელი და საყრდენი ძაბვის კვანძები შეთავსებულია). დანარჩენი კვანძების ძაბვები წარმოადგენენ საძიებელ სიდიდეებს.

კვანძური ძაბვების განგოლებათა სისტემის შედგენისას;

1) კვანძებს შორის ელექტრულ კავშირს მათემატიკურ მოდელში წარმოადგენენ გრძივი გამტარობის სახით, რომელიც უბნის გრძივი წინაღობის შებრუნებული სიდიდეა

$$Y_{ij} = Z_{ij}^{-1} \quad (656)$$

და მას ამ კვანძების ურთიერთგამტარობას უწოდებენ.

2) კვანძში არსებული გრანსფორმაგორების Γ-სებრი ჩანაცვლების სქემისა და კვანძთა მიერთებული ელექტროგადაცემის ხა-

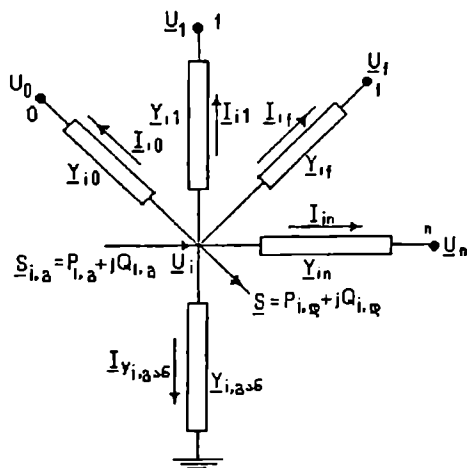
ზების Π -სებრი ჩანაცვლების სიმეტრიული სქემის შესაბამისად კვანძში გვაქვს განივი გამტარობა

$$\underline{Y}_{\text{კვანძი}} = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n \underline{Y}_{i,\text{კვანძი}} + \underline{Y}_{\text{კვანძი,გან}} \quad (6.57)$$

3) კვანძის სიმძლავრე განიხილება როგორც კვანძში არსებული გენერაციისა და დატვირთვის სხვაობა

$$\underline{S}_i = \underline{S}_{i,\text{გ}} - \underline{S}_{i,\text{დ}} \quad (6.58)$$

ჩავთვალოთ, რომ ქსელის ყველა კვანძი ერთმანეთთან ურთიერთპირდაპირ ელექტრულ კავშირშია (ნახ. 6.18) და ქსელის l -ური კვანძისთვის დაწვეროთ კირხჰოფის I კანონი.



ნახ. 6.18 კვანძური ძაბვების განტოლებათა სისტემის შედგენისთვის

ღენების დადებით მიმართულებად ავიღოთ l კვანძიდან გამავალი მიმართულება და გვექნება

$$\sum_{i=0}^n \underline{I}_i + \underline{I}_{i,\text{გან}} = \underline{I}_l, \quad f \neq l, \quad l = 1, 2, \dots, n, \quad (6.59)$$

სადაც: $\underline{I}_l$ — l უბანში გამავალი ღენი

$$\underline{I}_l = \frac{1}{\sqrt{3}} (\underline{U}_l - \underline{U}_f) \cdot \underline{Y}_l \quad \text{კა}; \quad (6.60)$$

$$\underline{I}_{i,\text{გან}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \underline{U}_l \cdot \underline{Y}_{i,\text{გან}} \quad \text{კა}; \quad (6.61)$$

რომ თუ რომელიმე f და 1 კვანძებს შორის პირდაპირი ელექტრული კავშირი არ არის, მაშინ $\underline{Y}_n = 0$.

აღნიშნულ განგოლებათა სისტემა შეიძლება შემოკლებით ჩაეწეროს მაგრიცულ ფორმაში

$$|\underline{Y}_n| \cdot |\underline{U}_i| = \left| \frac{\underline{S}_i}{\underline{U}_i} \right| + |\underline{Y}_n| U_0.$$

სადაც: $|\underline{Y}_n|$ - ქსელის კვანძების საკუთარ და ურთიერთგამგარობათა მაგრიცა $\underline{Y}_n$ ელემენტებით; $|\underline{U}_i|$ - კვანძების ხაზური ძაბვების სვეტი-მაგრიცა; $\left| \frac{\underline{S}_i}{\underline{U}_i} \right|$ - კვანძების ფაზური დენების სვეტი-მაგრიცა გად-

ღებული $\sqrt{3}$ -ჯერ; $|\underline{Y}_n|$ - ქსელის 1 -ური კვანძისა და მახალანსებელი კვანძის ურთიერთგამგარობათა სვეტი-მაგრიცა; U_0 - მახალანსებელი კვანძის ძაბვა (საყრდენი ძაბვა).

კვანძების საკუთარ და ურთიერთ გამგარობათა მაგრიცა $|\underline{Y}_n|$ - მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ელექტრული სისტემის დამყარებული რეჟიმების გაანგარიშებებში, რომლის საწყის მონაცემებს, როგორც წესი, წარმოადგენს ქსელის მტოების (უბნების) გრძივი წინაღობები, განივი გამგარობები და, აგრეთვე, სქემის გოპოლოგია. ამ მაგრიცის ელემენტების გამოთვლა მაგრიცა კომპიუტერის დახმარებით. ეს მაგრიცა სიმეტრიული მაგრიცაა $\underline{Y}_n = \underline{Y}_n$. მისი მნიშვნელოვანი თვისებაა ის, რომ იგი პრაქტიკულად შეიცავს ძალიან ბევრ ნულოვან ელემენტებს. ანუ მაგრიცა არასრულად შეესებული მაგრიცაა. კერძოდ, მაგრიცის რომელიმე 1 -ური სტრიქონი შეიცავს იმდენ არადიაგონალურ ელემენტს, რამდენ კვანძთანაც პირდაპირ ელექტრულ კავშირშია 1 კვანძი. მაგალითად, თუ ქსელის კვანძების საერთო რაოდენობაა 100 და 1 კვანძს პირდაპირი ელექტრული კავშირი აქვს მხოლოდ 10 კვანძთან, მაშინ 1 -ურ განგოლებაში დიაგონალური წვერი იქნება 1 , არადიაგონალური არანულოვანი წვერების რაოდენობა იქნება 10 , ხოლო დანარჩენი 89 არადიაგონალური წვერი იქნება ნულის გოლი.

ანუ, ზოგადად

$$\underline{U}_i = \frac{1}{\underline{Y}_n} \left(\frac{\underline{S}_i}{\underline{U}_i} + \sum_{r=0}^i \underline{U}_r \underline{Y}_r \right) \quad f \neq 1 \quad (6.68)$$

(6.67) განგოლებათა სისტემის მარჯვენა მხარეში შემავალ კვანძურ ძაბვებს მიეცეთ საწყისი მნიშვნელობები $U_1^{(0)}, U_2^{(0)} \dots U_n^{(0)}$ და გამოვთვალოთ ამავე ძაბვების პირველი მიახლოება $U_1^{(1)}, U_2^{(1)}, U_3^{(1)} \dots U_n^{(1)}$. ეს სიდიდეები ისევე ჩავსვათ იმავე სისტემის მარჯვენა მხარეში და გამოვთვალოთ იმავე ძაბვების მეორე მიახლოება $U_1^{(2)}, U_2^{(2)}, U_3^{(2)} \dots U_n^{(2)}$. ეს იტერაციული პროცესი გაეაგრძელოთ მანამ, სანამ არ შესრულდება (6.66) პირობა.

ზეიდელის მეთოდი. ზეიდელის იტერაციული მეთოდი წარმოადგენს მარტივი იტერაციის გარკვეულ მოდიფიკაციას, რომლის იდეა გულისხმობს მას, რომ იტერაციის k ბიჯზე $\underline{U}_i$ ცვლადის გამოსათვლელად გამოიყენება $f > 1$ ცვლადთა მნიშვნელობები, რომლებიც გამოთვლილია იტერაციის $k-1$ ბიჯზე და $f \leq 1$ ცვლადთა მნიშვნელობები, რომლებიც გამოთვლილია მიმდინარე k ბიჯზე. ამრიგად, გვაქვს:

$$\underline{U}_i^{(k)} = \frac{1}{\underline{Y}_n} \left(\frac{\underline{S}_i}{(\underline{U}_i)^{k-1}} + \sum_{r=0}^{f-1} \underline{U}_r^{(k)} \underline{Y}_r + \sum_{r=f,1}^n \underline{U}_r^{(k-1)} \underline{Y}_r \right) \quad (6.69)$$

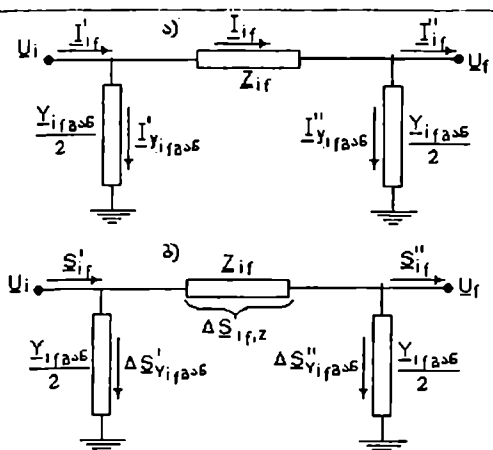
კვანძური ძაბვების განგოლებათა სისტემის ამოხსნისას საჭიროა მათემატიკური გამოთვლების მაღალი სიზუსტე (10^{-5} - 10^{-6} რიგის), ამიტომ აუცილებელია გამოთვლები ჩატარდეს კომპიუტერული ტექნიკის გამოყენებით.

უნდა აღნიშნოს, რომ ზეიდელის მეთოდის უარყოფითი მხარეა იტერაციული პროცესის ნელა კრებადობა, ან ზოგჯერ განმტკიცება კი იმ შემთხვევაში: როცა ელექტრულ ქსელში გვაქვს გრძივი კომპენსაციის მოწყობილობა; სამგრაგნილა ტრანსფორმატორები, რომელთა სამუშაო ძაბვის გრადიენტის წინააღმდეგობა ძალიან მცირეა; აგრეთვე, დამძიმებული და მდგრადობის მღვართან მიახლოებული რეჟიმების გაანგარიშებისას.

6.6.3 რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება კვანძური ძაბვებით

კვანძური ძაბვების მეთოდით რთული შეკრული ქსელების დამყარებული რეჟიმების გაანგარიშება მოიცავს თვითონ კვანძების

ძაბვების განსაზღვრას ისეთი მათემატიკური მოდელით, რომელიც ამ ძაბვების დადგენასთან ერთად აღგენს ქსელის ცალკეულ უბნებზე და, მთლიანად ქსელში, ღენებისა და სიმძლავრეების ნაკადებს და სიმძლავრისა და ძაბვების მოსალოდნელ დანაკარგებს. ამ თვალსაზრისით, შეიძლება ითქვას, რომ კვანძური ძაბვების მეთოდი ქსელის რეჟიმის გაანგარიშების უნივერსალური მეთოდია. გაანგარიშების ეს პროცედურა განვიხილოთ 6.19 ნახაზის მაგალითზე.



ნახ. 6.19 ღენების (ა) და სიმძლავრეთა (ბ) ნაკადების განსაზღვრა შტოებში

ღენებისა და სიმძლავრეთა ნაკადების განსაზღვრა უზნის ბოლოების ცნობილი ძაბვების მიხედვით. ხაზის გრძივ წინააღობაში გამავალი ჭაბური დენი I_{if} , ომის კანონის თანახმად, განისაზღვრება (6.60) გამოსახულებით. I'_{if} (ნახ.6.19ა), რომელიც 1 კვანძიდან შედის 1f ხაზში, კირხჰოფის I კანონის მიხედვით იქნება

$$I'_{if} = I_{if} + I'_{ifგან} = \frac{1}{\sqrt{3}}(U_i - U_f)Y_{if} + \frac{1}{2\sqrt{3}}U_i Y_{ifგან}, \quad (6.70)$$

ხოლო დენი I''_{if} , რომელიც 1f ხაზიდან შედის f კვანძში

$$I''_{if} = I_{if} - I''_{ifგან} = \frac{1}{\sqrt{3}}(U_i - U_f)Y_{if} - \frac{1}{2\sqrt{3}}U_f Y_{ifგან}, \quad (6.71)$$

სადაც: $\underline{U}_i, \underline{U}_r$ - i და r კვანძების ხაზური ძაბვები, რომელთა მნიშვნელობები დადგენილი იქნება გაანგარიშების პირველ ეტაპზე: $\underline{Y}_r = \frac{1}{Z_r}$ - r ხაზის გრძივი გამტარობა; $\underline{Z}_r = R_r + jX_r$ - ხაზის გრძივი წინაღობა; $\underline{Y}_{r,გა}$ - ხაზის განივი გამტარობა.

1 კვანძიდან r ხაზში შემავეალი სამუშაო სიმძლავრე, ანუ სიმძლავრე ხაზის თავში (ნახ.6.19ბ)

$$\underline{S}'_r = \sqrt{3} \underline{U}_r (\underline{I}'_r)^* = \underline{U}'_r \underline{Y}'_r - \underline{U}_i \underline{U}'_r \underline{Y}'_r + \frac{1}{2} \underline{U}'_r \underline{Y}'_{r,გა},$$

ანუ

$$\underline{S}'_r = (\underline{U}'_r - \underline{U}_i \underline{U}'_r) \underline{Y}'_r + \frac{1}{2} \underline{U}'_r \underline{Y}'_{r,გა} \quad (6.72)$$

1 r ხაზიდან r კვანძში შემავეალი სამუშაო სიმძლავრე, ანუ სიმძლავრე ხაზის ბოლოში

$$\underline{S}''_r = \sqrt{3} \underline{U}_r (\underline{I}''_r)^* = \underline{U}'_r \underline{U}_r \underline{Y}'_r - \underline{U}'_r \underline{Y}'_r - \frac{1}{2} \underline{U}'_r \underline{Y}'_{r,გა}. \quad (6.73)$$

ანუ

$$\underline{S}''_r = (\underline{U}'_r \underline{U}_r - \underline{U}'_r) \underline{Y}'_r - \frac{1}{2} \underline{U}'_r \underline{Y}'_{r,გა}. \quad (6.74)$$

სიმძლავრის დანაკარგი ხაზში, რომელიც წარმოადგენს ხაზის თავსა და ბოლოში გამავალ სიმძლავრეთა სხვაობას

$$\Delta \underline{S}_r = \underline{S}'_r - \underline{S}''_r \quad (6.75)$$

შეიყუეს დანაკარგებს როგორც ხაზის გრძივ წინაღობაში, ასევე მის განივ გამტარობაში. (6.72) და (6.74) გამოსახულებათა მიხედვით, გვაქვს

$$\Delta \underline{S}_r = (\underline{U}'_r - \underline{U}_i \underline{U}'_r - \underline{U}'_r \underline{U}_r + \underline{U}'_r) \underline{Y}'_r + \frac{1}{2} (\underline{U}'_r + \underline{U}'_r) \underline{Y}'_{r,გა}. \quad (6.76)$$

მათ შორის, დანაკარგები ხაზის გრძივ წინაღობაში

$$\Delta \underline{S}_r = (\underline{U}'_r - \underline{U}_i \underline{U}'_r - \underline{U}'_r \underline{U}_r + \underline{U}'_r) \underline{Y}'_r \quad (6.77)$$

და განივ გამტარობაში

$$\Delta \underline{S}_{r,გა} = \frac{1}{2} (\underline{U}'_r + \underline{U}'_r) \underline{Y}'_{r,გა}. \quad (6.78)$$

თუ (6.77) გამოსახულებათა შედეგებს ავჯამავთ სისტემის ყველა r უბნისთვის, მივიღებთ ქსელის ელექტროგადაცემის ხაზებში სიმძლავრეთა ჯამურ დანაკარგებს.

კვანძებში სიმძლავრეთა ბალანსის თვალსაზრისით გამოთვლილი უნდა იქნეს ამ კვანძებში მიერთებული ტრანსფორმატორების (რეაქტორების) განივ პარამეტრებშიც დანაკარგებიც

$$\underline{\Delta S}_{\text{IYგრ.გან}} = U_i^2 \cdot \underline{Y}_{\text{გრ.გან}} \quad (6.79)$$

6.6.4 კვანძური ძაბვების განგოლებათა სისტემა გრანსფორმატორული უბნების შემთხვევაში

6.6.1 პარაგრაფში მიღებული კვანძური ძაბვების განგოლებათა სისტემა შედგენილია და ჩაწერილია (გამოსახულება 6.6.5) იმ ქსელისთვის, რომელსაც გააჩნია ნომინალური ძაბვის მხოლოდ ერთი საფეხური (ან მისი ყოველი ელემენტის ელექტრული პარამეტრები მიყვანილია ერთი ნომინალური ძაბვის საფეხურზე). პრაქტიკულად, ელექტრული ქსელი შეიცავს რამდენიმე ნომინალური ძაბვის უბნებს, რომლებიც ერთმანეთს უკავშირდებიან გრანსფორმატორებითა და ავტოგრანსფორმატორებით.

გრანსფორმატორების ელექტრული პარამეტრები, როგორც წესი, მიყვანილია მისი მაღალი ნომინალური ძაბვის საფეხურზე (§3.8.2; 3.8.3). გრანსფორმატორთა ერთერთი მნიშვნელოვანი მახასიათებელი პარამეტრია გრანსფორმაციის კოეფიციენტი, რომელსაც დაბალი ძაბვის მაღალ ძაბვასთან ფარდობის სახით წარმოადგენენ

$$K_{ij} = \frac{U_j}{U_i} < 1,$$

სადაც: 1 და j, შესაბამისად, ქსელის მაღალი და დაბალი ძაბვის კვანძები, რომელთაც ერთმანეთთან აკავშირებს გრანსფორმატორი ან ავტოგრანსფორმატორი; U_i - მაღალი ძაბვა; U_j - დაბალი ძაბვა.

გრანსფორმატორული უბანი ქსელის ჩანაცვლების საანგარიშო სქემაში ჩართულია Γ -სებრი ჩანაცვლები სქემით და მისი განივი გამტარობა მიერთებულია მაღალი ძაბვის კვანძთან (ნახ.3.2.1).

შეეადგინოთ 6.20 ნახაზზე ნაჩვენები ელექტრული ქსელისთვის კვანძური ძაბვების განგოლებათა სისტემა.

ამ ქსელის გრანსფორმატორული უბნებისთვის გვაქვს:

$$K_{13} = \frac{U_3}{U_1} \quad \text{და} \quad K_{24} = \frac{U_4}{U_2}.$$

ელექტროგადაცემის ხაზების Π -სებრი ჩანაცვლების სქემის შესაბამისად კვანძებში ჩართული ჯამური განივი გამტარობები იქნება:

$$\underline{Y}_{1,გან} = \frac{1}{2}(\underline{Y}_{01,გან} + \underline{Y}_{12,გან}) + \underline{Y}_{61,გან};$$

$$\underline{Y}_{2,გან} = \frac{1}{2}(\underline{Y}_{02,გან} + \underline{Y}_{12,გან}) + \underline{Y}_{62,გან};$$

$$\underline{Y}_{3,გან} = \underline{Y}_{4,გან} = \frac{1}{2}\underline{Y}_{34,გან}.$$

შევირჩიოთ უბნებში გამავალი ღენების მიმართულებები და კვანძებისთვის შევადგინოთ კირხჰოფის I კანონი:

კვანძი „1“ $\underline{I}_{01} - \underline{I}_{12} - \underline{I}_{13} - \underline{I}_{1,გან} = \underline{I}_1;$

კვანძი „2“ $\underline{I}_{02} + \underline{I}_{12} - \underline{I}_{24} - \underline{I}_{2,გან} = \underline{I}_2;$

კვანძი „3“ $\frac{\underline{I}_{13}}{K_{13}} - \underline{I}_{34} - \underline{I}_{3,გან} = \underline{I}_3;$

კვანძი „4“ $\frac{\underline{I}_{24}}{K_{24}} + \underline{I}_{34} - \underline{I}_{4,გან} = \underline{I}_4.$

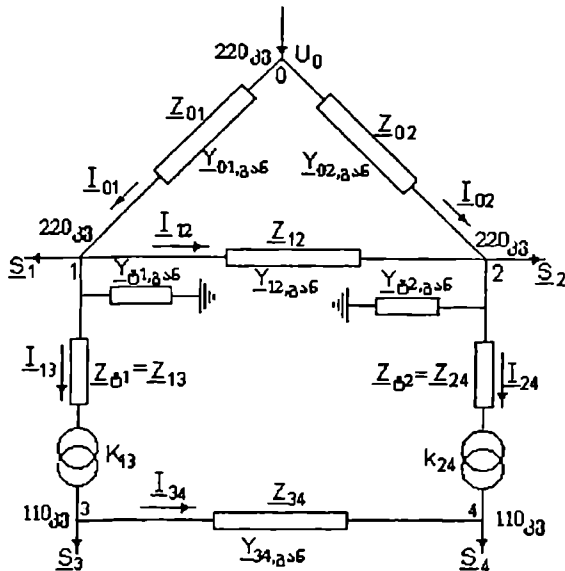
ანუ

$$\frac{\underline{U}_0 - \underline{U}_1}{\sqrt{3}\underline{Z}_{01}} - \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_2}{\sqrt{3}\underline{Z}_{12}} - \frac{\underline{U}_1 - \frac{\underline{U}_3}{K_{13}}}{\sqrt{3}\underline{Z}_{13}} - \frac{\underline{U}_1}{\sqrt{3}} \cdot \underline{Y}_{1,გან} = \frac{\underline{S}_1^*}{\sqrt{3}\underline{U}_1^*},$$

$$\frac{\underline{U}_0 - \underline{U}_2}{\sqrt{3}\underline{Z}_{02}} + \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_2}{\sqrt{3}\underline{Z}_{12}} - \frac{\underline{U}_2 - \frac{\underline{U}_4}{K_{24}}}{\sqrt{3}\underline{Z}_{24}} - \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}} \cdot \underline{Y}_{2,გან} = \frac{\underline{S}_2^*}{\sqrt{3}\underline{U}_2^*},$$

$$\frac{1}{K_{13}} \cdot \frac{\underline{U}_1 - \frac{\underline{U}_3}{K_{13}}}{\sqrt{3}\underline{Z}_{13}} - \frac{\underline{U}_3 - \underline{U}_4}{\sqrt{3}\underline{Z}_{34}} - \frac{\underline{U}_3}{\sqrt{3}} \underline{Y}_{3,გან} = \frac{\underline{S}_3^*}{\sqrt{3}\underline{U}_3^*};$$

$$\frac{1}{K_{24}} \cdot \frac{\underline{U}_2 - \frac{\underline{U}_4}{K_{24}}}{\sqrt{3}\underline{Z}_{24}} + \frac{\underline{U}_3 - \underline{U}_4}{\sqrt{3}\underline{Z}_{34}} - \frac{\underline{U}_4}{\sqrt{3}} \underline{Y}_{4,გან} = \frac{\underline{S}_4^*}{\sqrt{3}\underline{U}_4^*}$$



ნახ. 6.20 სხვადასხვა ნომინალური ძაბვის ქსელის ჩანაცვლების სქემა

გარდაქმნების შემდეგ ვღებულობთ კვანძური ძაბვების განგოლებათა სისტემას (6.80), სადაც გათვალისწინებულია ქსელის გრანსფორმაგორული უბნების არსებობა.

ამ განგოლებათა სისტემის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ განგოლებებში გრანსფორმაგორული უბნები შეყვანილი უნდა იქნეს შემდეგი პრინციპით:

1. გრანსფორმაგორული უბნის თავი და ბოლო კვანძების ურთიერთგამგარობა გამგარობათა მაგრიცაში ჩაიწერება როგორც გრანსფორმაგორის გრძივი გამგარობა შემცირებული გრანსფორმაგორის გრანსფორმაიის კოეფიციენტჯერ. ჩვენ შემთხვევაში

$$\underline{Y}_{13} = \underline{Y}_{31} = \frac{\underline{Y}_{13,გრძ}}{K_{13}} \quad \text{და} \quad \underline{Y}_{24} = \underline{Y}_{42} = \frac{\underline{Y}_{24,გრძ}}{K_{24}};$$

2. თუ კვანძთან გრანსფორმაგორი მიერთებულია მაღალი ძაბვის მხრიდან, მაშინ კვანძის საკუთარი გამგარობის საანგარიშო გამოსახულებაში (6.64) გრანსფორმაგორის გრძივი გამგარობა შედის უცვლელად. ჩვენ შემთხვევაში

$$\underline{Y}_{11} = \underline{Y}_{01,გრძ} + \underline{Y}_{12,გრძ} + \underline{Y}_{13,გრძ} + \underline{Y}_{1,გა6}$$

და

$$\underline{Y}_{22} = \underline{Y}_{02,გრძ} + \underline{Y}_{12,გრძ} + \underline{Y}_{24,გრძ} + \underline{Y}_{2,გან};$$

3. თუ კვანძთან ტრანსფორმატორი მიერთებულია დაბალი ძაბვის მხრიდან, მაშინ კვანძის საკუთარი გამგარობის საანგარიშო გამოსახულებაში ტრანსფორმატორის გრძივი გამგარობა შედის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის კვადრატულ შემცირებული. ჩვენ შემთხვევაში

$$\left. \begin{aligned} & \underline{U}_1 (\underline{Y}_{01,გრძ} + \underline{Y}_{12,გრძ} + \underline{Y}_{13,გრძ} + \underline{Y}_{1,გან}) - \underline{U}_2 \underline{Y}_{12,გრძ} - \frac{1}{K_{13}} \underline{U}_3 \underline{Y}_{13,გრძ} = \\ & = -\frac{\underline{S}_1^*}{\underline{U}_1} + \underline{U}_0 \underline{Y}_{01,გრძ}; \\ & -\underline{U}_1 \underline{Y}_{12,გრძ} + \underline{U}_2 (\underline{Y}_{02,გრძ} + \underline{Y}_{12,გრძ} + \underline{Y}_{24,გრძ} + \underline{Y}_{2,გან}) - \frac{1}{K_{24}} \underline{U}_4 \underline{Y}_{24,გრძ} = -\frac{\underline{S}_2^*}{\underline{U}_2} + \underline{U}_0 \underline{Y}_{02,გრძ}; \\ & -\frac{1}{K_{13}} \underline{U}_1 \underline{Y}_{13,გრძ} + \underline{U}_3 \left(\frac{1}{K_{13}^2} \underline{Y}_{13,გრძ} + \underline{Y}_{34,გრძ} + \underline{Y}_{3,გან} \right) - \underline{U}_4 \underline{Y}_{34,გრძ} = -\frac{\underline{S}_3^*}{\underline{U}_3}; \\ & -\frac{1}{K_{24}} \underline{U}_2 \underline{Y}_{24,გრძ} - \underline{U}_3 \underline{Y}_{34,გრძ} + \underline{U}_4 \left(\frac{1}{K_{24}^2} \underline{Y}_{24,გრძ} + \underline{Y}_{34,გრძ} + \underline{Y}_{4,გან} \right) = -\frac{\underline{S}_4^*}{\underline{U}_4} \end{aligned} \right\} (6.80)$$

$$\underline{Y}_{33} = \frac{1}{K_{13}^2} \underline{Y}_{13,გრძ} + \underline{Y}_{34,გრძ} + \underline{Y}_{3,გან}$$

და

$$\underline{Y}_{44} = \frac{1}{K_{24}^2} \underline{Y}_{24,გრძ} + \underline{Y}_{34,გრძ} + \underline{Y}_{4,გან}$$

6.7 მე-6 თავის რიგხვითი მაგალითები

მაგალითი 6.1 განვსაზღვროთ 621 ნახაზზე მოცემული ელექტრული ქსელის რეჟიმის პარამეტრები (§62)

ვიპოვოთ ქსელის უბანთა გრძივი ელექტრული პარამეტრები ფორმულებით

$$R = \frac{32}{F} \ell; \quad X = 0,4 \cdot \ell.$$

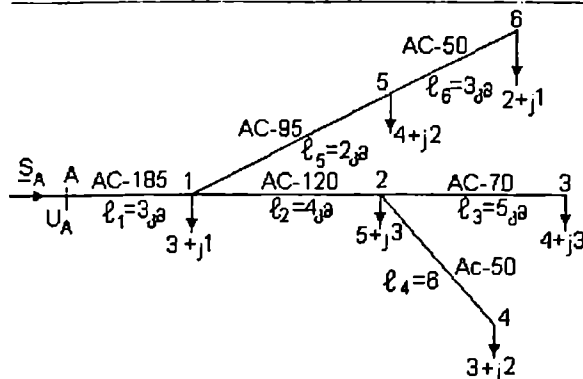
გვაქვს:

$$\underline{Z}_1 = 0,52 + j1,2; \quad \underline{Z}_2 = 1,07 + j1,6$$

$$\underline{Z}_3 = 2,29 + j2,0; \quad \underline{Z}_4 = 3,84 + j2,4$$

$$\underline{Z}_5 = 0,67 + j0,80 \quad \underline{Z}_6 = 1,92 + j0,6$$

ცნობილია კვების ცენტრის ძაბვა $U_A = 36$ კვ.



ნახ. 6.21

რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება ჩაებაგაროთ ორ ეტაპად. პირველ ეტაპზე განვსაზღვროთ სიმძლავრეთა დანაკარგები უბნებზე ნომინალური ძაბვის მიხედვით და დაებადგინოთ სიმძლავრეთა ნაკადები.

დავიწყოთ ნებისმიერი ბოლო უბნიდან. ვთქვათ 2-3 უბანი:

$$\underline{S}_{23}'' = 4 + j3;$$

$$\underline{\Delta S}_{23} = \frac{4^2 + 3^2}{35^2} (2,29 + j2,0) = 0,05 + j0,04;$$

$$\underline{S}_{23}' = 4,05 + j3,04.$$

უბანი 2-4

$$\underline{S}_{24}'' = 3 + j2;$$

$$\underline{\Delta S}_{24} = \frac{3^2 + 2^2}{35^2} (3,84 + j2,4) = 0,04 + j0,03;$$

$$\underline{S}_{24}' = 3,04 + j2,03.$$

მე-2 კვანძისთვის დაეწეროთ კირხჰოფის პირველი კანონი და განვსაზღვროთ $\underline{S}_{12}''$, გვაქვს

$$\underline{S}_{12}'' = 5 + j3 + 4,05 + j3,04 + 3,04 + j2,03 = 12,09 + j8,07$$

$$\underline{\Delta S}_{12} = \frac{12,09^2 + 8,07^2}{35^2} (1,07 + j1,6) = 0,18 + j0,28$$

$$\underline{S}_{12}' = 12,27 + j8,35$$

უბანი 5-6

$$\underline{S}_{56}'' = 2 + j1$$

$$\underline{\Delta S}_{56} = \frac{2^2 + 1^2}{35^2} (1,92 + j0,6) = 0,01 + j0,0$$

$$\underline{S}_{56}' = 2,01 + j1,0$$

მე-5 კვანძისთვის დაწერილი კირხჰოფის პირველი კანონის მიხედვით გვაქვს:

$$\underline{S}_{15}'' = 6,01 + j3,0.$$

შესაბამისად

$$\underline{\Delta S}_{15} = \frac{6,01^2 + 3^2}{35^2} (0,67 + j0,8) = 0,02 + j0,03$$

და

$$\underline{S}_{15}' = 6,03 + j3,03$$

A-1 უბნისთვის:

$$\underline{S}_{A1}'' = 3 + j1 + 12,27 + j8,35 + 6,03 + j3,03 = 21,3 + j12,38;$$

$$\underline{\Delta S}_{A1} = \frac{21,3^2 + 12,38^2}{35^2} (0,52 + j1,2) = 0,26 + j0,59;$$

$$\underline{S}_A = \underline{S}_{A1}' = 21,56 + j12,97$$

მეორე ეტაპზე, კვების ცენტრის ცნობილი ძაბვის მიხედვით $U_A=36$ კე, დავაღდგინოთ ძაბვები კვანძებში. გამოეთვალათ მხოლოდ ძაბვის ვარდნის გრძივი შემდგენი

$$\Delta U_{A1} = \frac{21,56 \cdot 0,52 + 12,97 \cdot 1,2}{36} = 0,72 \text{ კვ};$$

$$U_1 = 36 - 0,72 = 35,28 \text{ კვ};$$

$$\Delta U_{12} = \frac{12,27 \cdot 1,07 + 8,35 \cdot 1,6}{35,28} = 0,75 \text{ კვ};$$

$$U_2 = 35,28 - 0,75 = 34,53 \text{ კვ};$$

$$\Delta U_{23} = \frac{4,05 \cdot 2,29 + 3,04 \cdot 2}{34,53} = 0,44 \text{ კვ;}$$

$$U_3 = 34,53 - 0,44 = 34,09 \text{ კვ;}$$

$$\Delta U_{24} = \frac{3,04 \cdot 3,84 + 2,03 \cdot 2,6}{34,53} = 0,48 \text{ კვ;}$$

$$U_4 = 34,53 - 0,48 = 34,05 \text{ კვ;}$$

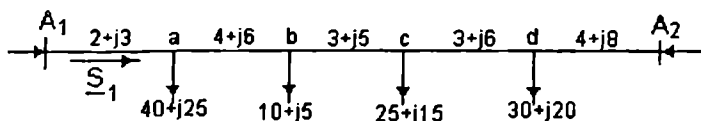
$$\Delta U_{15} = \frac{6,03 \cdot 0,67 + 3,03 \cdot 0,8}{35,28} = 0,18 \text{ კვ;}$$

$$U_5 = 35,28 - 0,18 = 35,10 \text{ კვ;}$$

$$\Delta U_{56} = \frac{2,01 \cdot 1,92 + 1 \cdot 0,6}{35,1} = 0,13 \text{ კვ;}$$

$$U_6 = 35,10 - 0,13 = 34,97 \text{ კვ.}$$

მაგალითი 6.2 განესაზღვროთ 6.22 ნახაზზე წარმოდგენილი ორ-მხრივი კეების ქსელის რეჟიმის პარამეტრები.



ნახ. 6.22

A_1, a სათავე უბანზე გამავალი სიმძლავრე (გამოსახულება 6.33)

$$\begin{aligned} \underline{S}_1 &= \frac{1}{\underline{Z}_{A_1 A_2}} \sum_{m=1}^n \underline{S}_m \underline{Z}_{m A_2} = \frac{1}{16 - j28} [(40 + j25)(14 - j25) + (10 + j5) + \\ &+ (10 - j19) + (25 + j15)(7 - j14) + (30 + j20)(4 - j8)] = \\ &= 63,63 + j36,67 \text{ მვტა} \end{aligned}$$

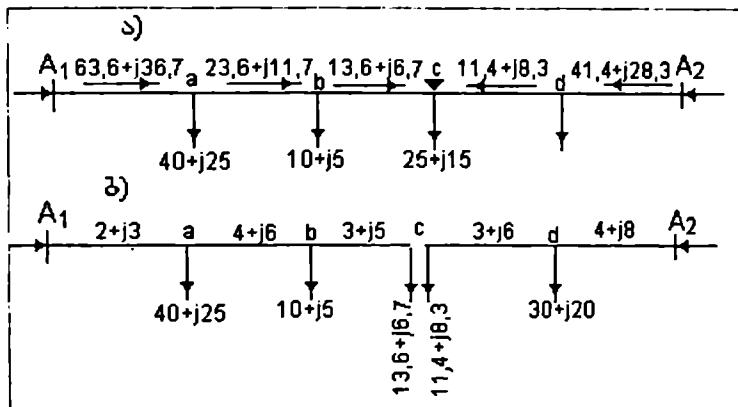
ქსელში სიმძლავრეთა განაწილება ნაჩვენებია 6.22ა ნახაზზე

როგორც ვხედავთ სიმძლავრეთა გამყოფი კვანძია c . გაუხსნათ ქსელი ამ კვანძში. მივიღებთ ორ ღია ქსელს (ნახ.6.22ბ), რომლის ბოლოებში დატვირთვა შესაბამისად იქნება

$$\underline{S}_{c1} = \underline{S}_{bc} = 13,63 + j6,67$$

და

$$\underline{S}_{c2} = \underline{S}_{dc} = 11,37 + j8,33$$



ნახ. 6.23

შევირჩიოთ ძაბვა c კვანძში - $U_c = 110$ კვ და რევიმის პარამეტრების გაანგარიშება ჩავატაროთ „ბოლოს მონაცემებით“. სიმძლავრე bc უბნის ბოლოში

$$\underline{S}_{bc}'' = \underline{S}_{c1} = 13,63 + j6,67 \text{ მგვა.}$$

სიმძლავრის დანაკარგები ამ უბანში

$$\Delta \underline{S}_{bc} = \frac{13,63^2 + 6,67^2}{110^2} (3 + j5) = 0,06 + j0,1 \text{ მგვა.}$$

ძაბვის ვარდნა ამავე უბანში

$$\Delta U_{bc} = \frac{13,63 \cdot 3 + 6,67 \cdot 5}{110} + j \frac{13,63 \cdot 5 - 6,67 \cdot 3}{110} = 0,67 + j0,44 \text{ კვ.}$$

სიმძლავრე bc უბნის ბოლოში

$$\underline{S}_{bc}' = 13,63 + j6,67 + 0,06 + j0,1 = 13,69 + j6,77.$$

ძაბვა b კვანძში

$$\underline{U}_b = 110 + 0,67 + j0,44 = 110,67 + j0,44$$

ანუ ძაბვის მოდული (გამოსახულება 6.10)

$$U_b = \sqrt{110,67^2 + 0,44^2} = 110,67 + \frac{0,44^2}{2 \cdot 110,67} = 110,67 \text{ კვ}$$

სიმძლავრე ab უბნის ბოლოში

$$\underline{S}_{ab}'' = \underline{S}_b + \underline{S}_{bc}' = 23,69 + j11,77 \text{ მგვა.}$$

სიმძლავრის დანაკარგები ამ უბანში

$$\underline{\Delta S}_a = \frac{23,69^2 + 11,77^2}{110,67^2} (4 + j6) = 0,23 + j0,34 \text{ მგვა} \cdot$$

ძაბვის ვარდნა ამავე უბანში

$$\underline{\Delta U}_a = \frac{23,69 \cdot 4 + 11,77 \cdot 6}{110,67} + j \frac{23,69 \cdot 6 - 11,77 \cdot 4}{110,67} = 1,49 + j0,86 \text{ კვ}$$

ძაბვა a კვანძში

$$\underline{U}_a = 110,67 + 1,49 + j0,86 = 112,16 + j0,86$$

ძაბვის მოდული

$$U_a = \sqrt{112,16^2 + 0,86^2} = 112,16 + \frac{0,86^2}{2 \cdot 112,86} = 112,16 \text{ კვ}$$

სიმძლავრე ab უბნის თავში

$$\underline{S}'_{ab} = 23,69 + j11,77 + 0,23 + j0,34 = 13,92 + j12,1 \text{ მგვა}$$

სიმძლავრე A_1 a უბნის ბოლოში

$$\underline{S}'_{A_1a} = 23,92 + j12,11 + 40 + j25 = 63,92 + j37,11 \cdot$$

სიმძლავრის დანაკარგები ამ უბანში

$$\underline{\Delta S}_{A_1a} = \frac{63,92^2 + 37,11^2}{112,16^2} (2 + j3) = 0,87 + j1,30 \text{ მგვა} \cdot$$

ძაბვის ვარდნა ამავე უბანში

$$\underline{\Delta U}_{A_1a} = \frac{63,92 \cdot 2 + 37,11 \cdot 3}{112,16} + j \frac{63,92 \cdot 3 - 37,11 \cdot 2}{112,16} = 2,13 + j1,05 \text{ კვ} \cdot$$

სიმძლავრე A_1a უბნის თავში

$$\underline{S}'_{A_1a} = 63,92 + j37,11 + 0,87 + j1,30 = 64,79 + j38,41 \text{ მგვა} \cdot$$

ძაბვა A_1 კვების ცენტრში

$$\underline{U}_{A_1} = 112,16 + 1,13 + j2,13 + j1,05 = 114,29 + j1,05 \text{ კვ}$$

ძაბვის მოდული

$$U_{A_1} = \sqrt{114,29^2 + 1,05^2} = 114,29 + \frac{1,05^2}{2 \cdot 114,29} = 114,29 \text{ კვ}$$

ვიანგარიშით მარჯვენა ღია ქსელის (ნახ.6.23ბ) რეჟიმის პარამეტრები. სიმძლავრე dc უბნის ბოლოში

$$\underline{S}''_{dc} = \underline{S}_{c2} = 11,37 + j8,33 \text{ მგვა}$$

სიმძლავრის დანაკარგები ამ უბანში

$$\underline{\Delta S}_{dc} = \frac{11,37^2 + 8,33^2}{110^2} (3 + j6) = 0,05 + j0,10 \text{ მგვა}$$

ძაბვის ვარდნა ამავე უბანში

$$\Delta U_{\Sigma} = \frac{11,37 \cdot 3 + 8,33 \cdot 6}{110} + j \frac{11,37 \cdot 6 - 8,33 \cdot 3}{110} = 0,76 + j0,39 \text{ კვ}$$

სიმძლავრე dc უბნის თავში

$$\underline{S}'_{\Sigma} = 11,37 + j8,33 + 0,05 + j0,1 = 11,42 + j8,43 \text{ მგვა}$$

ძაბვა d კეანდში

$$\underline{U}_d = 110 + 0,76 + j0,39 = 110,76 + j0,09$$

ძაბვის მოდული

$$U_d = \sqrt{110,76^2 + 0,39^2} = 110,76 \text{ კვ}$$

სიმძლავრე A_{2d} უბნის ბოლოში

$$\underline{S}''_{A_{2d}} = 11,42 + j8,43 + 30 + j20 = 41,42 + j28,43 \text{ მგვა}$$

სიმძლავრე დანაკარგი ამ უბანში

$$\Delta S_{A_{2d}} = \frac{41,42^2 + 28,43^2}{110,76^2} (4 + j8) = 0,82 + j1,65 \text{ მგვა}$$

ძაბვის ვარდნა ამავე უბანში

$$\Delta U_{A_{2d}} = \frac{41,42 \cdot 4 + 28,43 \cdot 8}{110,76} + j \frac{41,42 \cdot 8 - 28,43 \cdot 4}{110,76} = 3,55 + j1,97 \text{ კვ}$$

სიმძლავრე A_{1d} უბნის თავში

$$\underline{S}'_{A_{2d}} = 41,42 + j28,43 + 0,82 + j1,65 = 42,24 + j30,08 \text{ მგვა}$$

ძაბვა A_2 კეების ცენტრში

$$\underline{U}_{A_2} = 110,76 + 3,55 + j1,97 = 114,31 + j1,97 \text{ კვ}$$

ძაბვის მოდული

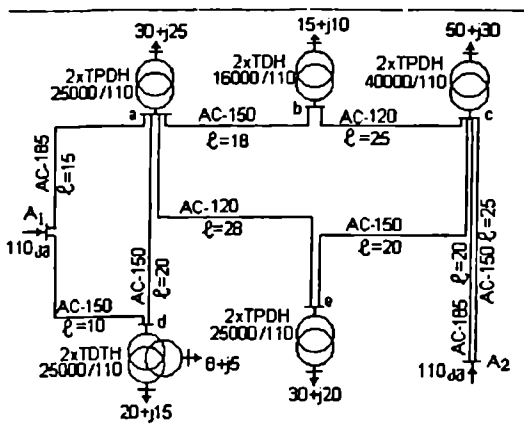
$$U_{A_2} = \sqrt{114,31^2 + 1,97^2} = 114,31 + \frac{1,97^2}{2 \cdot 114,91} = 114,33 \text{ კვ}$$

მაგალითი 6.3. 6.24 ნახაზზე მოცემული 110 კვ ძაბვის ორმხრივი კეების ქსელისთვის შევადგინოთ ჩანაცვლების საანგარიშო სქემა.

1. განვსაზღვროთ ქსელის ელემენტთა ელექტრული პარამეტრები:

ა) **ელექტროგადაცემის ხაზები.** დ-2 ცხრილიდან სადენის მარკის მიხედვით ამოვიწეროთ 1კმ სიგრძის ხაზის ელექტრული პარამეტრები r_0, x_0, b_0 და გამოვთვალოთ თითოეული ხაზის აქტიური და რეაქტიული წინაღობები და ხაზის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე შემდეგი ფორმულებით: $R = r_0 \cdot \ell; X = x_0 \ell; \Delta Q_c = U_c^2 b_0 \ell$. გამოთვლების შედეგი წარმოვადგინოთ ცხრილის სახით (იხილეთ ქვემოთ).

ბ) ტრანსფორმატორები. დ-5.2 და დ-6.1 ცხრილებიდან ამოვიწეროთ ტრანსფორმატორთა ელექტრული პარამეტრები და გამოეთვალოთ პარალელურად ჩართული ტრანსფორმატორების ეკვივალენტური პარამეტრები თითოეული ქვესადგურის მიხედვით. გამოთვლების შედეგი წარმოვადგინოთ ცხრილის სახით (იხილეთ ქვემოთ).



ნახ. 6.24

განესაზღვროთ ქვესადგურთა საანგარიშო დატვირთვები, რისთვისაც პირველ რიგში გამოეთვალოთ ქვესადგურის ტრანსფორმატორებში სიმძლავრის დანაკარგები ნომინალური ძაბვის მიხედვით (გამოსახულება (6.1) – (6.3)).

ქვესადგური a

$$\Delta P = 0,054 + \frac{30^2 + 25^2}{110^2} \cdot 1,27 = 0,21 \text{ მგვტ}$$

$$\Delta Q = 0,35 + \frac{30^2 + 25^2}{110^2} \cdot 28,0 = 3,88 \text{ მგვარ}$$

$$\underline{S}_{\text{საანგ.ქვეს. a}} = 30 + j25 + 0,21 + j3,88 = 30,21 + j28,88 \text{ მგვა}$$

ქვესადგური b

$$\Delta P = 0,038 + \frac{15^2 + 10^2}{110^2} \cdot 2,19 = 0,1 \text{ მგვტ}$$

$$\Delta Q = 0,224 + \frac{15^2 + 10^2}{110^2} \cdot 43,4 = 1,39 \text{ მგვარ}$$

$$\underline{S}_{\text{საანგ.ქვეს. b}} = 15 + j10 + 0,1 + j1,39 = 15,1 + j1,39 \text{ მგვა}$$

ქვესადგური c

$$\Delta P = 0,072 + \frac{50^2 + 30^2}{110^2} \cdot 0,7 = 0,27 \text{ მგვბ}$$

$$\Delta Q = 0,52 + \frac{50^2 + 30^2}{110^2} \cdot 17,4 = 5,41 \text{ მგვარ}$$

$$\underline{S}_{\text{საანგ.ქვეს.c}} = 50 + j30 + 0,27 + j5,41 = 50,27 + j35,41 \text{ მგვა}$$

ქვესადგური d

$$\Delta P = 0,072 + \frac{28^2 + 20^2}{110^2} \cdot 0,75 + \frac{8^2 + 5^2}{110^2} \cdot 0,75 + \frac{20^2 + 15^2}{110^2} \cdot 0,75 = 0,19 \text{ მგვბ}$$

$$\Delta Q = 0,5 + \frac{28^2 + 20^2}{110^2} \cdot 27 + \frac{8^2 + 5^2}{110^2} \cdot 0 + \frac{20^2 + 15^2}{110^2} \cdot 16,5 = 3,99 \text{ მგვარ}$$

$$\underline{S}_{\text{საანგ.ქვეს.d}} = 28 + j20 + 0,9 + j3,99 = 28,19 + j23,99 \text{ მგვა}$$

ქვესადგური e

$$\Delta P = 0,054 + \frac{30^2 + 20^2}{110^2} \cdot 1,27 = 0,19 \text{ მგვბ}$$

$$\Delta Q = 0,35 + \frac{30^2 + 20^2}{110^2} \cdot 28 = 3,36 \text{ მგვარ}$$

$$\underline{S}_{\text{საანგ.ქვეს.e}} = 30 + j20 + 0,19 + j3,36 = 30,19 + j23,36 \text{ მგვა}$$

გამოთვალათ კვანძების საანგარიშო დაგვირგეწები (გამოსახულება 6.7).

კვანძი A₁

$$\underline{S}_{\text{საანგ.კვ. A}_1} = -j \frac{1}{2} (0,52 + 0,34) = -j0,43$$

კვანძი a

$$\underline{S}_{\text{საანგ.კვ.a}} = 30,21 + j28,88 - j \frac{1}{2} (0,52 + 0,68 + 0,61 + 0,93) = 30,21 + j27,51$$

კვანძი b

$$\underline{S}_{\text{საანგ.კვ.b}} = 15,1 + j13,9 - j \frac{1}{2} (0,61 + 0,83) = 15,1 + j12,67$$

კვანძი c

$$\underline{S}_{\text{საანგ.კვ.c}} = 50,27 + j35,41 - j \frac{1}{2} (0,83 + 0,68 + 0,69 + 0,84) = 50,27 + j33,89$$

კვანძი d

$$\underline{S}_{\text{სანგ.კვ1}} = 2819 + j2399 - j\frac{1}{2}(0,34+0,68) = 2819 + j2348$$

კვანძი c

$$\underline{S}_{\text{სანგ.კვ2}} = 3019 + j2336 - j\frac{1}{2}(0,93+0,68) = 3019 + j2256$$

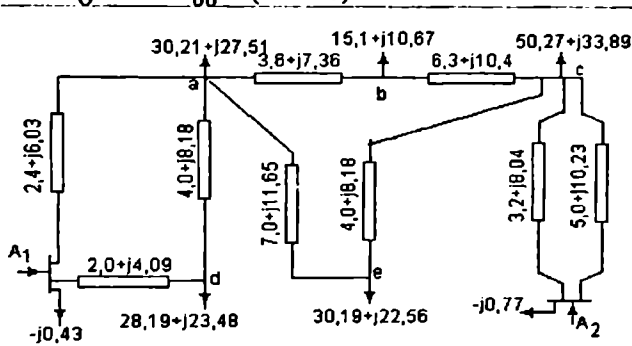
კვანძი A₂

$$\underline{S}_{\text{სანგ.კვA2}} = -j\frac{1}{2}(0,69+0,84) = -j0,77 \text{ მგვარ.}$$

ხაზის დასახელება	სადენის მძრვა	ხაზის სიგრძე კმ	1კმ სიგრძის ხაზის პარამეტრები, როცა $D_{\text{საშ.გ.}} = 4,58$			ხაზის პარამეტრები		
			r_0 ომ/კმ	x_0 ომ/კმ	$b_0 \cdot 10^6$ სიმ/კმ	R ომი	X ომი	ΔQ_c მგვარ
A ₁ a	AC-185	15	0,16	0,402	2,84	2,4	6,03	0,52
A ₁ d	AC-150	10	0,2	0,409	2,79	2,0	4,09	0,34
da	AC-150	20	0,2	0,409	2,79	4,0	8,18	0,68
ab	AC-150	18	0,2	0,409	2,79	3,6	7,36	0,61
ac	AC-120	28	0,25	0,416	2,74	7,0	11,65	0,93
bc	AC-120	25	0,25	0,416	2,74	6,3	10,4	0,83
ec	AC-150	20	0,2	0,409	2,79	4,0	8,18	0,68
(A ₂ c) ₁	AC-185	20	0,16	0,402	2,84	3,2	8,04	0,69
(A ₂ c) ₂	AC-150	25	0,2	0,409	2,79	5,0	10,23	0,84

ქვესადგური	ტრის რაოდ. და ტიპი	ერთი ტრ-ის ელემენტრუ- ლი პარამეტრები				ექვივალენტური პარამეტრები			
		R, ომი	X, ომი	ΔP უხ. კვტ	$\Delta Q_{\text{უხ.}}$ კვარ	R, ომი	X, ომი	ΔP უხ. კვტ	ΔQ უხ. კვარ
a	2ХТРДН- 25000/110	2,54	55,9	27	175	1,27	28,0	54	350
b	2ХТДН- 16000/110	4,38	86,7	19	112	2,19	43,4	38	224
c	2ХТРДН- 40000/110	1,4	34,7	36	260	0,7	17,4	72	520
d	2ХТДТН- 25000/110	1,5	54	36	250	0,75	27	72	500
		1,5	0			0,75	0		
		1,5	33			0,75	16,5		
e	2ХТРДН- 25000/110	2,54	55,9	27	175	1,27	28,0	54	350

ჩატარებული გამოთვლების საფუძველზე შევადგინოთ ჩანაცვლების საანგარიშო სქემა (ნახ.6.25)



ნახ. 6.25

მაგალითი 6.4. 6.25 ნახაზზე ნაჩვენებ ორმხრივი კეების ქსელში განესაზღვროთ სიმძლავრეთა განაწილება გამარტივების ხერხების გამოყენებით.

მოეახდინოთ პარალელური უბნების შუალედური კვანძური დატვირთვების გადაგანა უბნის ბოლოებში (გამოსახულება 6.54; 6.55)

$$\underline{S}_{d \rightarrow A1} = (28,19 + j23,48) \cdot \frac{4,0 - j8,18}{6,0 - j12,27} = 19,46 + j15,65;$$

$$\underline{S}_{d \rightarrow a} = (28,19 + j23,48) - (19,46 + j15,65) = 8,71 + j7,83;$$

$$\underline{S}_{b \rightarrow a} = (15,1 + j10,67) \cdot \frac{6,3 - j10,4}{9,9 - j17,77} = 9,24 + j6,32;$$

$$\underline{S}_{b \rightarrow c} = (15,1 + j10,67) - (9,24 + j6,32) = 5,86 + j4,35;$$

$$\underline{S}_{c \rightarrow a} = (30,19 + j22,56) \cdot \frac{4,0 - j8,18}{11,0 - j19,83} = 11,64 + j9,67;$$

$$\underline{S}_{c \rightarrow e} = (30,19 + j22,56) - (11,64 + j9,67) = 18,55 + j12,89.$$

რეზულტიური დატვირთვები დარჩენილ კვანძებში:

$$\underline{S}_{A1, \text{რეზ}} = 19,46 + j15,65 - j0,43 = 19,46 + j15,22;$$

$$\underline{S}_{a, \text{რეზ}} = (30,21 + j27,51) + (8,71 + j7,83) + (9,24 + j6,32) + (11,64 + j9,67) = 59,8 + j51,33;$$

$$\underline{S}_{c, \text{რეზ}} = (50,27 + j33,89) + (5,86 + j4,35) + (18,55 + j12,89) = 74,68 + j51,13;$$

$$\underline{S}_{A2, \text{რგ}} = -j0,77.$$

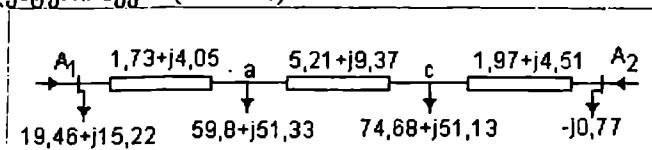
გამოთვალეთ პარალელური უბნების ეკვივალენტური წინა-
ლობები:

$$\underline{Z}_{A1, \text{ეკ}} = \frac{(2,4 + j6,03)(6,0 + j12,27)}{8,4 + j18,30} = 1,73 + j4,05;$$

$$\underline{Z}_{\infty, \text{ეკ}} = \frac{(9,9 + j17,76)(11,0 + j19,83)}{20,9 + j37,59} = 5,21 + j9,37;$$

$$\underline{Z}_{cA2, \text{ეკ}} = \frac{(3,2 + j8,04)(5,0 + j10,23)}{8,2 + j18,27} = 1,97 + j4,51.$$

გამარტივების შემდეგ გვაქვს შემდეგი სახის ჩანაცვლების ე-
კვივალენტური სქემა (ნახ. 6.26).

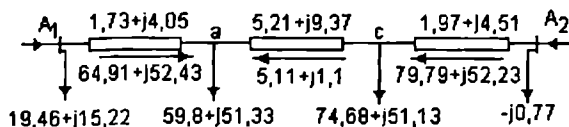


ნახ. 6.26

ამ ქსელის მარცხენა სათავე უბანზე გამავალი სიმძლავრე (გა-
მოსახულება 6.33)

$$\begin{aligned} \underline{S}_{A1a} &= \frac{1}{8,91 - j17,93} [(59,8 + j51,33)(7,18 - j13,88) + \\ &+ (74,68 + j51,13)(1,97 - j4,51)] = 64,91 + j52,43 \text{ მგვა} \end{aligned}$$

მაშასადამე, ეკვივალენტურ ჩანაცვლების სქემაზე სიმძლავრე-
თა განაწილებას აქვს შემდეგი სახე (ნახ. 6.27)



ნახ. 6.27

ეკვივალენტურ უბნებში გამავალი სიმძლავრე გავანაწილოთ
შესაბამისი პარალელური შტოების შეუღლებულ წინალობათა უკუპ-
როპორციულად:

$$\underline{S}'_{A1a} = (64,91 + j52,43) \cdot \frac{6,0 - j12,27}{8,4 - j18,30} = 43,15 + j36,63;$$

$$\underline{S}'_{A1d} = (64,91 + j52,43) - (43,15 + j36,63) = 21,76 + j15,8;$$

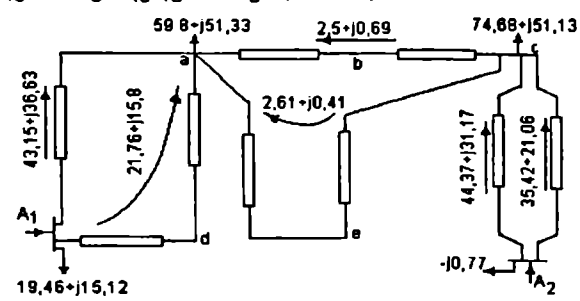
$$\underline{S}'_{\Sigma} = (5,11 + j1,1) \cdot \frac{(11,0 - j19,83)}{20,9 - j37,59} = 2,5 + j0,69;$$

$$\underline{S}'_{\Sigma} = (5,11 + j1,1) - (2,5 + j0,69) = 2,61 + j0,41;$$

$$\underline{S}_{(A2c)_1} = (79,79 + j52,23) \cdot \frac{5,0 - j10,23}{8,2 - j18,27} = 44,37 + j31,17;$$

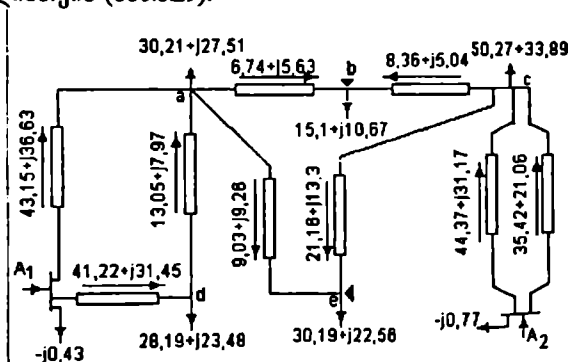
$$\underline{S}_{(A2c)_2} = (79,79 + j52,23) - (44,37 + j31,17) = 35,42 + j21,06.$$

ამ გამოთვლების საფუძველზე ვლებულობთ სიმძლავრეთა განაწილების შუალედურ სახეს (ნახ.628).



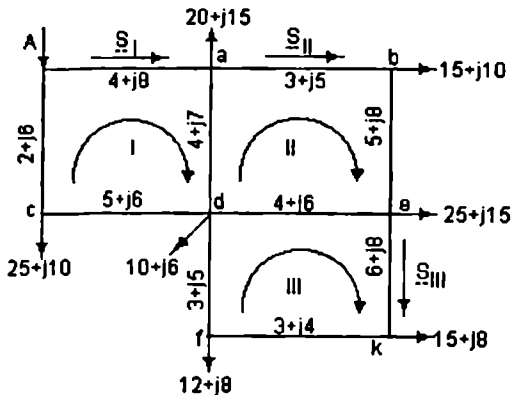
ნახ. 628

შუალედური კვანძებიდან გადგანილი დატვირთვების უკან დაბრუნების შემდეგ მივიღებთ სიმძლავრეთა განაწილებას საწყისი ქსელისთვის (ნახ.629).



ნახ. 629.

მაგალითი 6.5. განესაზღვროთ სიმძლავრეთა განაწილება 110 კვ ძაბვის მეკრულ ქსელში (ნახ.630). კვანძური დატვირთვები მოცემულია მეგავოლტამპერებში, ხოლო უბანთა წინაღობები ომებში.



ნახ. 6.30

ამოცანა ამოცხსნათ ორი გზით, კონტურულ განტოლებათა სისტემის გამოყენებით და ჩანაცვლების სქემის გამარტივების ხერხების გამოყენებით.

კონტურულ განტოლებათა სისტემის ამოცხსნა. კონტურულ განტოლებათა სისტემა შევადგინოთ 6.5.1 პარაგრაფში ჩამოყალიბებული სქემის მიხედვით. დამოუკიდებელ კონტურებში მოვნიშნოთ კონტურული სიმბლავრეები (ნახ.6.30) და გვაქვს:

$$\begin{aligned}
 & \underline{S}_I(15-j27) - \underline{S}_{II}(4-j7) - (25+j10)(2-j6) - (10+j6)(7-j12) - \\
 & - (20+j15)(11-j19) - (12+j8)(7-j12) - (15+j8)(7-j12) - \\
 & - (25+j15)(7-j12) - (15+j10)(7-j12) = 0; \\
 & - \underline{S}_I(4-j7) + \underline{S}_{II}(16-j26) - \underline{S}_{III}(4-j6) + (20+j15)(4-j7) - \\
 & - (25+j15)(4-j6) - (15+j10)(9-j14) = 0; \\
 & - \underline{S}_{II}(4-j6) + \underline{S}_{III}(16-j23) - (12+j8)(3-j5) - (15+j8)(6-j9) + \\
 & + (25+j15)(4-j6) + (15+j10)(4-j6) = 0.
 \end{aligned}$$

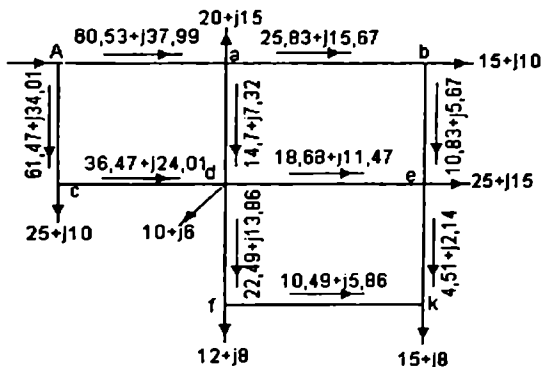
ანუ

$$\left. \begin{aligned}
 & \underline{S}_I(15-j27) - \underline{S}_{II}(4-j7) - 1718 + j940 = 0 \\
 & - \underline{S}_I(4-j7) + \underline{S}_{II}(16-j26) - \underline{S}_{III}(4-j6) - 280 + j130 = 0 \\
 & - \underline{S}_{II}(4-j6) + \underline{S}_{III}(16-j23) + 72 - j17 = 0
 \end{aligned} \right\} (6.81)$$

ამ განტოლებათა სისტემის პირდაპირი ამოცხსნით ვღებულობთ

$$\underline{S}_I = 60,53 + j37,99 \quad \underline{S}_{II} = 25,83 + j15,67 \quad \underline{S}_{III} = 4,51 + j2,14$$

ამრიგად, სიმპლავრეთა განაწილებას აქვს 6.31 ნახაზზე ნაჩვენები სახე.



ნახ. 6.31

გეიდელის მეთოდის გამოყენებისას (6.81) კონტურულ განტოლებათა სისტემა ჩაიწერება შემდეგ სახეში

$$\begin{aligned} \underline{S}_I &= \frac{1718 - j940}{15 - j27} + \frac{4 - j7}{15 - j27} \underline{S}_{II}, \\ \underline{S}_{II} &= \frac{280 - j130}{16 - j26} + \frac{4 - j7}{16 - j26} \underline{S}_I + \frac{4 - j6}{16 - j26} \underline{S}_{III}, \\ \underline{S}_{III} &= \frac{-72 + j17}{16 - j23} + \frac{4 - j6}{16 - j23} \underline{S}_{II}. \end{aligned}$$

ნულოვან მიახლოებად ავიღოთ $\underline{S}_{II} = \underline{S}_{III} = 0$, მაშინ პირველ ბიჯზე

$$\underline{S}_I^{(1)} = 53,62 + j33,84;$$

$$\underline{S}_{II}^{(1)} = 8,43 + j5,58 + (0,26 + j0,002)(53,62 + j33,84) = 22,52 + j14,40;$$

$$\underline{S}_{III}^{(1)} = -1,97 - j1,76 + (0,257 - j0,005)(23,04 + j14,4) = 3,02 + j1,82.$$

მეორე ბიჯზე

$$\underline{S}_I^{(2)} = 53,62 + j33,84 + (0,261 + j0,003)(22,52 + j14,41) = 59,49 + j37,67$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_{II}^{(2)} &= 8,43 + j5,58 + (0,264 + j0,002)(59,49 + j37,67) + \\ &+ (0,236 + j0,009) \cdot (3,02 + j1,82) = 24,84 + j16,10 \end{aligned}$$

$$\underline{S}_{III}^{(2)} = -1,97 - j1,76 + (0,257 - j0,005)(24,4 + j16,10) = 4,33 + j2,26.$$

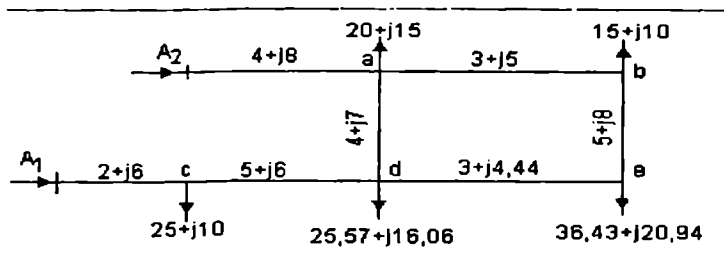
მესამე ბიჯზე მივიღეთ

$$\underline{S}_I^{(3)} = 60,05 + j38,12; \quad \underline{S}_{II}^{(3)} = 25,2 + j16,33; \quad \underline{S}_{III}^{(3)} = 4,59 + j2,31$$

მეოთხე ბიჯზე კი

$$\underline{S}_I^{(4)} = 60,15 + j38,18 \quad \underline{S}_{II}^{(4)} = 25,29 + j16,37 \quad \underline{S}_{III}^{(4)} = 4,61 + j2,32$$

ჩანაცვლების სქემის გამარტივება. გავკრათ ქსელი კვების A ცენტრში (ნახ.6.32).



ნახ. 6.32

f და k კვანძების დატვირთვები გადავიტანოთ d და e კვანძებში (გამოსახულება 6.54; 6.55):

$$\underline{S}_{f \rightarrow d} = (12 + j8) \cdot \frac{9 - j12}{12 - j17} = 8,48 + j6,01$$

$$\underline{S}_{f \rightarrow e} = (12 + j8) - (8,48 + j6,01) = 3,52 + j1,99$$

$$\underline{S}_{k \rightarrow d} = (15 + j8) \cdot \frac{6 - j8}{12 - j17} = 7,09 + j4,05$$

$$\underline{S}_{k \rightarrow e} = (15 + j8) - (7,09 + j4,05) = 7,91 + j3,95$$

შევკრიბოთ პარალელურად dfke და de უბანთა წინაღობები

$$\underline{Z}_{de,კვ} = \frac{(12 + j17)(4 + j6)}{16 + j23} = 3,0 + j4,44$$

ამ გამარტივები შემდეგ ჩანაცვლების სქემას ექნება 6.33 ნახაზზე ნაჩვენები სახე.

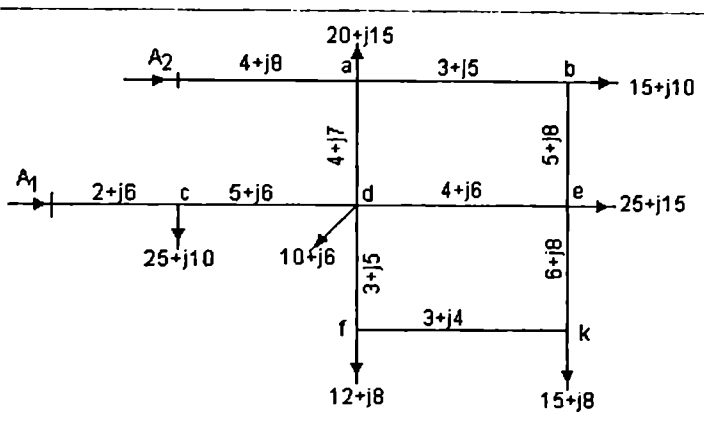
e და b კვანძების დატვირთვები გადავიტანოთ d და a კვანძებში

$$\underline{S}_{e \rightarrow d} = (36,43 + j20,94) \cdot \frac{8 - j13}{11 - j17,44} = 27,16 + j15,14$$

$$\underline{S}_{e \rightarrow a} = (36,43 + j20,94) - (27,16 + j15,14) = 9,27 + j5,80$$

$$\underline{S}_{b \rightarrow d} = (15 + j10) \cdot \frac{3 - j5}{11 - j17,44} = 4,3 + j2,73$$

$$\underline{S}_{b \rightarrow a} = (15 + j10) - (4,3 + j2,73) = 10,7 + j7,27$$

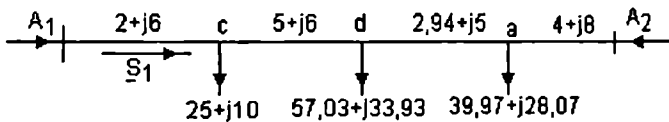


ნახ. 6.33

პარალელურად შეეკრიბოთ de და da უბნების წინააღობები

$$Z_{d,de} = \frac{(4 + j7)(11 + j17,44)}{15 + j24,44} = 2,94 + j5,0$$

გამარტივებული ჩანაცვლების სქემა მიიღებს სახეს (6.34)



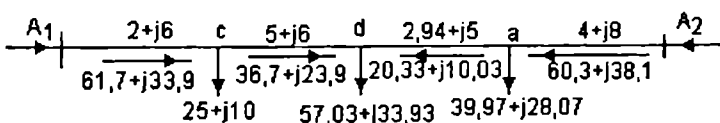
ნახ. 6.34

განვსაზღვროთ A_1 -სათავე უბანში გამავალი სიმძლავრე (გამოსახულება 6.33)

$$S_1 = \frac{1}{13,94 - j25} \left[(25 + j10)(11,94 - j19) + (57,03 + j33,93) \cdot \left[(6,94 - j13) + (39,97 + j28,07)(4 - j8) \right] \right] =$$

$$= 61,70 + j33,90$$

სიმძლავრეთა განაწილებას აქვს სახე (6.35)



ნახ. 6.35

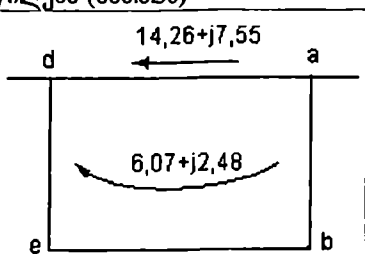
განაგარიშების შემდეგი ეტაპი ითვალისწინებს ჩანაცვლების სქემის საწყის სახეში დაბრუნებას, რაც უნდა განხორციელდეს გამარტივების პროცესის უკუ მიმდევრობით.

მოცემულ სქემაზე (ნახ.6.35) ეკვივალენტირებულია მხოლოდ ad უბანი, რომელშიც გადის $\underline{S}_{ad, ეკვ} = 20,33 + j10,03$ მგვა. ეს სიმძლავრე გადავანაწილოთ $\underline{Z}_{ad}^* = 4 - j7$ და $\underline{Z}_{abcd}^* = 11 - j17,44$ შეუღლებულ წინააღობათა უკუპროპორციულად

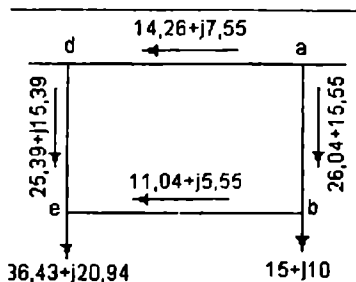
$$\underline{S}_{ad} = (20,33 + j10,03) \frac{11 - j17,44}{15 - j24,44} = 14,26 + j7,55$$

$$\underline{S}_{abcd} = (20,33 + j10,03) - 14,26 + j7,55 = 6,07 + j2,48$$

a და d პუნქტებს შორის მივიღეთ სიმძლავრეთა შემდეგი განაწილება (ნახ.6.36)



ნახ. 6.36



ნახ. 6.37

e და b კვანძებიდან გადატანილი სიმძლავრეები დავაბრუნოთ უკან. მივიღებთ (ნახ.6.37):

$$\underline{S}_{de} = (27,16 + j15,14) + (4,3 + j2,73) - (6,07 + j2,48) = 25,39 + j15,39$$

6.37 ნახაზზე ეკვივალენტირებულია de უბანი, რომელშიც გადის $\underline{S}_{de, ეკვ} = 25,39 + j15,39$ სიმძლავრე. იგი უნდა გადავანაწილოთ

$\underline{Z}_{de}^* = 4 - j6$ და $\underline{Z}_{dne}^* = 12 - j17$ შეუღლებული წინააღობების უკუპროპორციულად

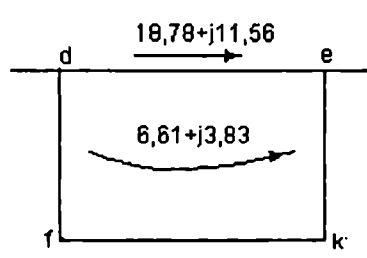
$$\underline{S}_{de} = (25,39 + j15,39) \cdot \frac{12 - j17}{16 - j23} = 18,78 + j11,56$$

$$\underline{S}_{dne} = (25,39 + j15,39) - (18,78 + j11,56) = 6,61 + j3,83$$

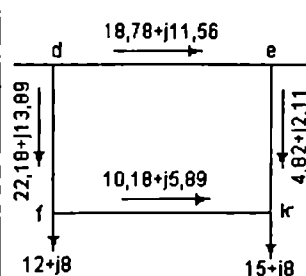
d და e პუნქტებს შორის მივიღეთ სიმძლავრეთა შემდეგი განაწილება (ნახ.6.38)

f და k კვანძებიდან გადატანილი სიმძლავრეები დაეაბრუნოთ უკან (ნახ.6.39):

$$\underline{S}_{ar} = (8,48 + j6,01) + (7,09 + j4,05) + (6,61 + j3,83) = 22,18 + j13,89$$

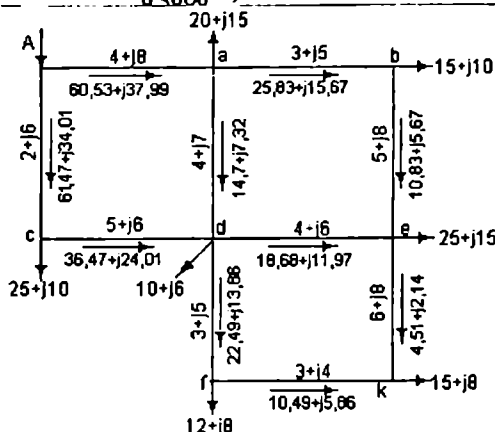


ნახ. 6.38



ნახ. 6.39

განსახილველ ქსელში სიმძლავრეთა განაწილების საბოლოო სახე ნაჩვენებია 6.40 ნახაზზე (კონტურულ განტოლებათა სისტემის პირდაპირი ამოხსნის შედეგები).



ნახ.6.40

ჩატარებული გაანგარიშებების შედეგები წარმოვადგინოთ ცხრილის სახით. როგორც ამ ცხრილის მონაცემების ანალიზი გვიჩვენებს სამივე მეთოდით მიღებული შედეგები არაპრაქტიკულად ერთნაირია.

631 ნახაზზე წარმოდგენილ შეკრულ ქსელში სიმბლავრეთა განაწილების შედარებითი ცხრილი.

უბნის დასახელება	განგაბრების მეთოდი		
	კონტურულ განგაბრებათა სისტემის პირდაპირი ამოხსნა	კონტურულ განგაბრებათა სისტემის ამოხსნა შეიღვლის მეთოდით (მეთოხე მაახლოება)	ჩანაცვლების სქემის გამარტივების ხერხების გამოყენება
Aa	60,53+j37,99	60,15+j38,18	60,30+j38,10
Ac	61,47+j34,01	61,86+j33,83	61,70+j33,90
ab	25,83+j15,67	25,29+j16,37	26,04+j15,55
ad	14,7+j7,32	14,86+j6,80	14,26+j7,55
bc	10,83+j5,67	10,29+j6,37	11,04+j5,55
cd	36,47+j24,01	36,86+j23,83	36,70+j23,90
de	18,68+j11,97	19,33+j10,95	18,78+j11,56
df	22,49+j13,86	22,39+j13,68	22,18+j13,89
ek	4,51+j2,14	4,61+j2,32	4,82+j2,11
fk	10,49+j5,86	10,39+j5,68	10,18+j5,83

მაგალითი 6ნ. განესაზღვროთ 6ა მაგალითში წარმოდგენილი ქსელის რეკიშის პარამეტრები, როცა ცნობილია კვების ცენტრის ძაფა - $U_A=118$ კვ.

სიმბლავრეთა განაწილების შედეგად დადგინდა, რომ ქსელში დენგაზოფი კვანძია k (ნახ.6.40). ამ კვანძში ქსელის გატრით მიუღებთ ek და dk ღია ქსელებს.

გამოეთვალთ სიმბლავრის დანაკარგები ek უბანში

$$S'_{ek} = 4,51 + j2,14$$

$$\Delta S_{ek} = \frac{4,51^2 + 2,14^2}{110^2} \cdot (6 + j8) = 0,01 + j0,02$$

$$S_{ek} = 4,51 + j2,14 + j0,01 + j0,02 = 4,52 + j2,16.$$

რადგანაც e კვანძში სიმბლავრე შემოდის ორი მხრიდან (de და be უბნები), ამიტომ ek უბანზე სიმბლავრის დანაკარგები

$\Delta S_{ek} = 0,01 + j0,02$ გადაენაწილთ S_{de} და S_{be} სიმბლავრეთა პროპორციულად (მაახლოებით): აქედან გამოზდინარე

$$S'_{ek} = 10,83 + j5,67 + 0,00 + j0,01 = 10,83 + j5,68$$

ღა

$$\underline{S}_{de}'' = 18,68 + j11,47 + 0,01 + j0,01 = 18,69 + j11,48.$$

განვსაზღვროთ სიმძლავრის დანაკარგები dfk მაგისტრალში .

$$\underline{S}_{fk}'' = 10,49 + j5,86$$

$$\underline{\Delta S}_{fk} = \frac{10,49^2 + 5,86^2}{110^2} (3 + j4) = 0,04 + j0,05$$

$$\underline{S}_{fk}' = 10,49 + j5,86 + 0,04 + j0,05 = 10,53 + j5,91$$

$$\underline{S}_{df}' = 12 + j8 + 10,53 + j5,91 = 22,53 + j13,91$$

$$\underline{\Delta S}_{df} = \frac{22,53^2 + 13,91^2}{110^2} \cdot (3 + j5) = 0,17 + j0,29$$

$$\underline{S}_{df}' = 22,53 + j13,91 + 0,17 + j0,29 = 20,70 + j14,20$$

ამ გამოთვლების ჩატარების შემდეგ ქსელის დენგამყოფ კვანძად განიხილება e კვანძი. გამოვთვალოთ სიმძლავრის დანაკარგები abe და de უბნებში:

$$\underline{\Delta S}_{be} = \frac{10,83^2 + 5,68^2}{110^2} \cdot (5 + j8) = 0,06 + j0,10$$

$$\underline{S}_{be}' = 10,83 + j5,68 + 0,06 + j0,10 = 10,89 + j5,78$$

სიმძლავრე ab უბნის ბოლოში

$$\underline{S}_{ab}'' = 15 + j10 + 10,89 + j5,78 = 25,89 + j15,78$$

$$\underline{\Delta S}_{ab} = \frac{25,89^2 + 15,78^2}{110^2} \cdot (3 + j5) = 0,23 + j0,38$$

$$\underline{S}_{ab}' = 25,89 + j15,78 + 0,23 + j0,38 = 26,12 + j16,16$$

სიმძლავრის დანაკარგი de უბანში

$$\underline{\Delta S}_{de} = \frac{18,69^2 + 11,48^2}{110^2} \cdot (4 + j6) = 0,16 + j0,24$$

$$\underline{S}_{de}' = 18,69 + j11,48 + 0,16 + j0,24 = 18,85 + j11,72$$

ამ გამოთვლების ჩატარების შემდეგ დენგამყოფ კვანძად განიხილება d კვანძი. ამ კვანძში სიმძლავრე შემოდის ორი მხრიდან (cd და ad უბნები). ამიგომ de და dfk უბნებზე სიმძლავრის ჯამური დანაკარგები $0,16+j0,24+0,17+j0,29+0,04+j0,05=0,37+j0,58$ გადავანაწილოთ $\underline{S}_{cd}$ და $\underline{S}_{df}$ სიმძლავრეთა პროპორციულად (მიახლოებით). ამ სიმძლავრეთა მიახლოებითი თანაფარდობა გვიჩვენებს, რომ გადავანაწილება შეიძლება ჩაეგაროთ 3:1 თანაფარდობით:

$$\underline{S}_{\text{ad}}'' = 36,47 + j24,01 + 0,27 + j0,44 = 36,74 + j24,45$$

$$\underline{S}_{\text{ad}}'' = 14,7 + j7,32 + 0,09 + j0,14 = 14,79 + j7,46$$

გამოთვალათ სიმძლავრის დანაკარგები Δc_d უბნებში:

$$\underline{\Delta S}_{\text{ad}} = \frac{36,74^2 + 24,45^2}{110^2} \cdot (5 + j6) = 0,81 + j0,97$$

$$\underline{S}_{\text{ad}}' = 36,74 + j24,45 + 0,81 + j0,97 = 37,55 + j25,42$$

სიმძლავრე Δc უბნის ბოლოში

$$\underline{S}_{\Delta c}'' = 25 + j10 + 37,55 + j25,42 = 62,55 + j35,42$$

$$\underline{\Delta S}_{\Delta c} = \frac{62,55^2 + 35,42^2}{110^2} \cdot (2 + j6) = 0,86 + j2,58$$

$$\underline{S}_{\Delta c}' = 62,55 + j35,42 + 0,86 + j2,58 = 63,41 + j38,00$$

სიმძლავრის დანაკარგები Δd უბანში

$$\underline{\Delta S}_{\Delta d} = \frac{14,79^2 + 7,46^2}{110^2} \cdot (4 + j7) = 0,09 + j0,16$$

$$\underline{S}_{\Delta d}' = 14,79 + j7,46 + 0,09 + j0,16 = 14,88 + j7,62$$

სიმძლავრე Δa უბნის ბოლოში

$$\underline{S}_{\Delta a}'' = 20 + j15 + 26,12 + j16,16 + 14,88 + j7,62 = 61,0 + j38,78$$

$$\underline{\Delta S}_{\Delta a} = \frac{61,0^2 + 38,78^2}{110^2} \cdot (4 + j8) = 1,73 + j3,46$$

$$\underline{S}_{\Delta a}' = 61 + j38,78 + 1,73 + j3,46 = 62,73 + j42,24$$

გამოთვალათ მუშა ძაბვათა მნიშვნელობები კვანძებში ცნობილი $U_A = 118$ კვ ძაბვის დროს.

ძაბვის ვარდნა Δc უბანში

$$\underline{\Delta U} = \frac{63,41 \cdot 2 + 38,00 \cdot 6}{118} + j \frac{63,41 \cdot 6 - 38,00 \cdot 2}{118} = 3,03 + j2,58$$

ძაბვა c კვანძში (გამოსახულება 6.16)

$$U_c = 118 - 3,03 + \frac{2,58^2}{2(118 - 3,03)} = 115,00$$

როგორც ამ გამოთვლების ანალიზი გვიჩვენებს ძაბვის ვარდნის გრძივი შემდგენი შეიძლება მხედველობაში არ მივიღოთ. ძაბვის დანაკარგი Δd უბანში

$$\Delta U = \frac{37,55 \cdot 5 + 25,42 \cdot 6}{115,00} = 2,96$$

ძაბვა d კვანძში

$$U_d = 115,00 - 2,96 = 112,04$$

ძაბვის ღანაკარგი df უბანში

$$\Delta U_{df} = \frac{20,70 \cdot 3 + 14,20 \cdot 5}{112,04} = 1,19$$

ძაბვა f კვანძში

$$U_f = 112,04 - 1,19 = 110,85$$

ძაბვის ღანაკარგი fk უბანში

$$\Delta U_{fk} = \frac{10,53 \cdot 3 + 5,91 \cdot 4}{110,85} = 0,50$$

ძაბვა k კვანძში

$$U_k = 110,85 - 0,5 = 110,35$$

ძაბვის ღანაკარგი Aa უბანში

$$\Delta U_{Aa} = \frac{62,73 \cdot 4 + 42,24 \cdot 8}{118} = 4,99$$

ძაბვა a კვანძში

$$U_a = 118 - 4,99 = 113,01$$

ძაბვის ღანაკარგი ab უბანში

$$\Delta U_{ab} = \frac{26,12 \cdot 3 + 16,16 \cdot 5}{113,01} = 1,42$$

ძაბვა b კვანძში

$$U_b = 113,01 - 1,41 = 111,60$$

ძაბვის ღანაკარგი be უბანში

$$\Delta U_{be} = \frac{10,89 \cdot 5 + 5,78 \cdot 8}{111,60} = 0,90$$

ძაბვა e კვანძში

$$U_e = 111,6 - 0,90 = 110,7$$

ძაბვის ღანაკარგი ek უბანში

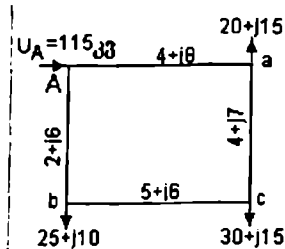
$$\Delta U_{ek} = \frac{4,52 \cdot 6 + 2,14 \cdot 8}{110,7} = 0,40$$

ძაბვა k კვანძში

$$U_k = 110,7 - 0,40 = 110,4.$$

ორი სხვადასხვა მხრიდან (Acdfx და Aabek) გაანგარიშების შედეგად ძაბვა k კვანძში, პრაქტიკულად, ერთიადიგივეა. ეს მიუთითებს მასზე, რომ კონტურულ განტოლებათა სისტემის პირდაპირი ამოხსნის რემულგაციები სარწმუნოა.

მაგალითი 6.7. კვანძური ძაბვების განტოლებათა სისტემის ამოხსნის ბეიდელის მეთოდით განესაზღვროთ 6.41 ნახაზზე ნაჩვენები ელექტრულ ქსელში რეჟიმის პარამეტრები. მოცემულია მახალანსებელი კვანძის ძაბვა $U_A = U_0$ (კე), სამომხმარებლო კვანძების დატვირთვები (მგვა) და უბნების წინაღობები (ომი).



ნახ. 6.41

განესაზღვროთ კვანძების საკუთარი და ურთიერთ გამგრობები (გამოსახულებები 6.64 და 6.56)

$$\underline{Y}_{Aa} = \frac{1}{4 + j8} = 0,05 - j0,1$$

$$\underline{Y}_{ac} = \frac{1}{4 + j7} = 0,061538 - j0,107692$$

$$\underline{Y}_{bc} = \frac{1}{5 + j6} = 0,081967 - j0,098361$$

$$\underline{Y}_{Ab} = \frac{1}{2 + j6} = 0,05 - j0,15$$

$$\underline{Y}_{aa} = 0,111538 - j0,207692$$

$$\underline{Y}_{bb} = 0,131967 - j0,248361$$

$$\underline{Y}_{cc} = 0,143505 - j0,206053$$

იგერაციული მეთოდის შესაბამისად ჩავწეროთ კვანძურ ძაბათა საანგარიშო გამოსახულებები (გამოსახულება 6.68)

$$\underline{U}_a = \frac{1}{0,111538 - j0,207692} \left[\frac{-20 + j15}{\underline{U}_a} + 115(0,05 - j0,1) + \underline{U}_c(0,061538 - j0,107692) \right]$$

$$\begin{aligned}
 U_b &= \frac{1}{0,131967 - j0,248361} \left[\frac{-25 + j101}{U_b^*} + 115(0,05 - j0,15) + \right. \\
 &\quad \left. + U_c(0,081967 - j0,098361) \right] \\
 U_c &= \frac{1}{0,143505 - j0,206053} \left[\frac{-30 + j15}{U_c^*} + U_a(0,061538 - j0,107692) + \right. \\
 &\quad \left. + U_b(0,081967 - j0,098361) \right] \text{ ანუ} \\
 U_a &= (2,006924 + j3,737040) \left[\frac{-20 + j15}{U_a^*} + 5,75 - j11,5 + \right. \\
 &\quad \left. + U_c(0,061538 - j0,107692) \right] \\
 U_b &= (1,668392 + j3,139903) \left[\frac{-25 + j10}{U_b^*} + 5,75 - j17,25 + \right. \\
 &\quad \left. + U_c(0,081967 - j0,098361) \right] \\
 U_c &= (2,276000 + j3,268016) \left[\frac{-30 + j15}{U_c^*} + U_a(0,061538 - j0,107692) + \right. \\
 &\quad \left. + U_b(0,081967 - j0,098361) \right]
 \end{aligned}$$

შევირჩიოთ საძიებელ სიდიდეთა საწყისი მნიშვნელობები (ნულოვანი მიახლოება)

$$U_a^{(0)} = U_b^{(0)} = U_c^{(0)} = 110 \text{ კვ.}$$

შეეასრულოთ პირველი, მეორე და ა.შ. მიახლოებების გამოთვლა შეიძელის მეთოდით (გამოსახულება 6.69) და გაანგარიშებების შედეგები წარმოვადგინოთ ცხრილის სახით.

გამოვთვალოთ სიმძლავრეთა მნიშვნელობები უბნების თავსა და ბოლოში (გამოსახულება 6.72 და 6.74):

უბანი Aa

$$\begin{aligned}
 S'_{Aa} &= (U_A^2 - U_A U_a^*) Y_{Aa}^* = (115^2 - 115(112,4473 + j1,6159)) \cdot \\
 &\quad \cdot (0,05 + j01) = 33,2609 + j20,0646 \\
 S''_{Aa} &= (U_A^* \cdot U_a - U_a^2) Y_{Aa} = (115 \cdot (112,4473 - j1,6159) - 112,4589^2) \cdot \\
 &\quad \cdot (0,05 + j0,1) = 32,8047 + j19,1521
 \end{aligned}$$

ანალოგიურად, დანარჩენ უბნებზე გვაქვს:

$$S'_{\text{Ab}} = 42,7979 + j22,2370$$

$$S''_{\text{Ab}} = 42,4457 + j21,1805$$

$$S'_{\text{bc}} = 12,7942 + j4,116$$

$$S''_{\text{bc}} = 12,7364 + j4,0147$$

$$S'_{\text{bc}} = 17,4290 + j11,1497$$

$$S''_{\text{bc}} = 17,2609 + j11,0070$$

თუ კვანძებში შევამოწმებთ სიმძლავრეთა ბალანსს, შევამოწმებთ, რომ აღგილი აქვს გარკვეულ უბალანსობას. ეს მიუთითებს მასზე, რომ ჩვენს მიერ გამოყენებული იგერაციითაა რაოდენობა (9 იგერაცია) არასაკმარისია.

ძაბვები კვანძებში (მაგ.6.7)

იგერაციის ნომერი	კვანძების დასახელება			
	A	a	b	c
0	115	110	110	110
1	115	111,4959-j0,4750	112,1076-j1,0283	110,7649-j1,3101
2	115	111,9835-j1,1474	112,5777-j1,5239	111,2256-j1,8460
-	-	-	-	-
7	115	112,4296-j1,6136	113,0801-j1,8469	111,7199-j2,2543
8	115	112,4451-j1,6157	113,0936-j1,8463	111,7238-j2,2549
9	115	112,4473-j1,6159	113,0955-j1,8462	111,7268-j2,2556
ძაბვის მოდული	115	112,4589	113,1106	111,7496

თავი 7. ელექტრული ენერგიის ხარისხი და მისი უმრუნველყოფა

7.1 ელექტრული ენერგიის ხარისხის მაჩვენებლები და მათი გაყვანა ელექტრომომხმარებელთა მუშაობაზე

ტექნიკური და ეკონომიკური თვალსაზრისით ელექტრომომხმარებელთა მუშაობა მიზანშეწონილია შესაბამისი ნომინალური პარამეტრების პირობებში ($U_{\epsilon}, I_{\epsilon}, f_{\epsilon}$). ელექტროენერგეტიკის განვითარების პირველ ეტაპზე ელექტროენერგიის ხარისხის მაჩვენებლებად განიხილებოდა სიხშირე ქსელში და ძაბვის დონე ქსელის კვანძებში. მას შემდეგ, რაც ელექტრომომხმარებელთა შორის გაჩნდა არასიმეტრიული, არასინუსოიდალური და მკვეთრად ცვალებადი დატვირთვების მქონე მომხმარებლები, გამართული დანადგარები, ელექტროფიცირებული რკინიგზა, საჭირო გახდა ელექტროენერგიის ხარისხის შეფასებისას მხედველობაში მივიღოთ დამატებითი მაჩვენებლები. კერძოდ, ძაბვითა სამუშაო სისტემის არასიმეტრიულობა, ძაბვის არასინუსოიდულობა და ძაბვისა და სიხშირის რხევა.

დამყარებულ რეჟიმში დროის მოცემულ მომენტში მთლიანად სისტემაში სიხშირე ერთნაირია, რადგანაც იგი განისაზღვრება სინქრონულად მბრუნავი გენერატორების ბრუნვის სიხშირით. აქედან გამომდინარე სიხშირე ელექტროენერგიის ხარისხის საერთო სასისტემო მაჩვენებელია. ძაბვა კი ქსელის სხვადასხვა წერტილში მოგადად სხვადასხვაა და, აქედან გამომდინარე, იგი უფრო ლოკალური ხასიათის მაჩვენებელია.

ქსელში სიხშირის შეფასებისას სარგებლობენ მისი ნომინალურიდან გადახრის მნიშვნელობით

$$\Delta f = f - f_{\epsilon}. \quad (7.1)$$

თანამედროვე მძლავრ ენერგოსისტემაში, რომლებიც ალჭურვილია სიხშირის ავტომატური რეგულირების მოწყობილობებით, სიხშირის გადახრა დასაშვებია ± 0.1 პერცის ფარგლებში. ხანმოკლე დროით დასაშვებია ენერგოსისტემის მუშაობა სიხშირის ± 0.2 პერცით გადახრის ფარგლებში [11; 67].

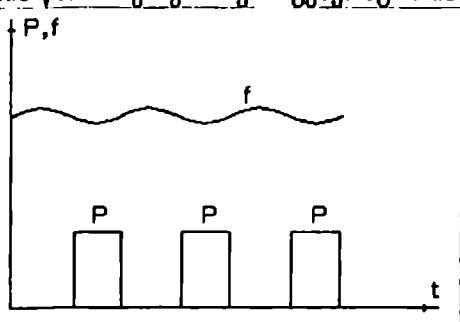
დასაშვები გადახრის ასეთი მცირე ფარგლები აიხსნება იმით, რომ სიხშირის შეცვლა მნიშვნელოვნად მოქმედებს ელექტრომომხმარებლების მუშაობის ეკონომიკურ მაჩვენებლებზე. გარდა ამისა სიხშირე მთელ სისტემაში რეგულირდება ერთდროულად და რეგულირების თანამედროვე მოწყობილობა საშუალებას გვაძლევს ვარეგულიროთ იგი ნომინალურიდან მცირე გადახრის ფარგლებში.

სიხშირის სწრაფი ცვლილებისას ($0,1\%/წმ$ და მეტი სიჩქარით) განიხილავენ სიხშირის რხევის ცნებას, რომელიც რაოდენობრივად განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$\Delta f_{\text{რ}} \% = \frac{f_{\text{მაქ}} - f_{\text{მინ}}}{f_0} \cdot 100.$$

სიხშირის რხევის წარმოქმნის ერთ-ერთ მიზეზს წარმოადგენს დიდი შემოთხულებები ელექტროსისტემაში, რაც დაკავშირებულია მოკლე შერთვებით გამოწვეულ მიმდინარე გარდამავალ პროცესებთან. ეს რხევები შედარებით იშვიათია და იგი ელექტრომიმღებთან საერთო მუშაობაზე არსებით გავლენას თითქმის ვერ ახდენს.

ელექტრომიმღებების მუშაობაზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს სიხშირის პერიოდული რხევა, რომელიც გამოწვეულია დიდი სიმძლავრის მომხმარებლის პერიოდული ჩართვა-გამორთვით. ასეთ მომხმარებლებს წარმოადგენს საგლინაფი ჩარხები, რომელიც მოძრაობაში მოდის მძლავრი სინქრონული ძრავების საშუალებით. ამ ძრავების დატვირთვის მკვეთრი და თითქმის პერიოდული ცვლილება იწვევს მათი ბრუნვის სიხშირის პერიოდულ ცვლილებას (ნახ. 7.1). თუ აღნიშნული ძრავის სიმძლავრე სისტემის გენერატორის თანაზომადია, მაშინ წარმოიქმნება თვით გენერატორის რყევა [46].



ნახ. 7.1 მსხვილი მომხმარებლის ჩართვა-გამორთვისას სიხშირის ცვლილების გრაფიკი

ქსელში მიერთებული სხვა მომხმარებელთან ელექტრული ძრავების რყევები მოსალოდნელია მაშინ, თუ ისინი ელექტრულად ახლოსა იმ სინქრონულ მანქანასთან, რომელსაც გააჩნია ბრუნვის ცვლადი სიხშირე. ამის მიზეზია ის, რომ ეს ძრავები იმყოფებიან კვების ორი წყაროს ზემოქმედების ქვეშ, რომელთაგანაც ერთს გააჩნია ბრუნვის მუდმივი, ხოლო მეორეს კი ცვლადი სიხშირე. პირ-

ველს წარმოადგენს სისტემის ეკვივალენტური გენერატორი, მეორეს კი სინქრონული ძრავა ბრუნვის ცელადი სიჩქარით [46]. ელექტრულად რაც უფრო ახლოსაა ცელადი სიჩქარით მბრუნავ მანქანასთან სხვა მომხმარებელთა ძრავები, მით უფრო ჩქარა და შესაძლებლად გამოვლინდება მათი ბრუნვის რხევა.

სიხშირის რხევა ნორმირებულია და იგი არ უნდა აღემატებოდეს ± 0.2 პერცს. სიხშირის რხევა წარმოადგენს ელექტროენერგიის ხარისხის ადგილობრივ მაჩვენებელს. აქედან გამომდინარე ადგილობრივი იქნება ის ღონისძიება, რომლის მიზანია ამ რხევების შემცირება-ჩაქრობა. კერძოდ, დადგენილია, რომ რხევა მნიშვნელოვნად მცირდება ცელადი დატვირთვის სინქრონული მანქანის აგზნების დენის ავტომატური რეგულირების გზით.

სიხშირის შემცირებისას მნიშვნელოვნად მცირდება ელექტრული ძრავების ბრუნვის სიჩქარე და, შესაბამისად, მასთან მიერთებული მექანიზმის მწარმოებლობა.

სიხშირის ავარიული გადახრა იმლუდება, როგორც თვითონ ელექტროსადგურების ძირითადი და დამხმარე მოწყობილობათა მუშაობის პირობებით, ასევე მთელი რიგი მომხმარებლის შესაბამისი მოთხოვნებით.

სიხშირის შემცირებისას ეცემა ელექტროსადგურების საკუთარი მოხმარების მექანიზმების მწარმოებლობა. გარდა ამისა, სიხშირის ღრმა და ხანგრძლივი შემცირება საშიშია ტურბინის ფრთებისთვის რეზონანსული მოვლენების წარმოქმნის შედეგად მათი მოსალოდნელი დაზიანების გამო.

სიხშირის შემცირებისას ადგილი აქვს დატვირთვის რეაქტიული სიმძლავრის გაზრდას, რაც იწვევს ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის ნაკადების ზრდას. შედეგად ერთი მხრივ იზრდება აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები ქსელში, რაც ელექტროსადგურებზე პირველადი ენერგორესურსის არაწარმოო ხარჯებს ზრდის დაბეზორობის მხრივ, მცირდება ძაბვა სამომხმარებლო კვანძებში, რამაც თავის მხრივ შეიძლება გამოიწვიოს მომხმარებელთა მასიური გამორთვები.

ელექტრული სისტემის დამყარებულ რეჟიმში მომხმარებელთა დატვირთვა ნელა და მდორედ იცვლება და შედეგად, ასევე, ნელა და მდორედ იცვლება ძაბვის სიდიდე ქსელის საკვანძო წერტილებში. ძაბვის გადახრას გამოსახავენ პროცენტობით ნომინალურის მიმართ:

$$V, \% = \frac{U_i - U_s}{U_s} \cdot 100, \quad (72)$$

სადაც, U_i – ძაბვა ქსელის i კვანძში, ხოლო U_0 – ამავე კვანძის ნომინალური ძაბვა.

ელექტრომიმღებთა მუშაობის ეფექტურობის თვალსაზრისით სახელმწიფო სტანდარტის (სასტის) მიხედვით დადგენილია ძაბვის გადახრის ტექნიკურად დასაშვები მნიშვნელობები [11]:

ა) სამრეწველო საწარმოებში და საზოგადოებრივ შენობებში დაყენებული განათების ხელსაწყოთა მომჭერებზე და გარე განათების პროექტორულ განათებებში $(-2,5 + +5)\%$ -ის ფარგლებში;

ბ) ელექტრული ძრავების, მათი გაშვებისა და მართვის აპარატის მომჭერებზე $(-5 + +10)\%$ -ის ფარგლებში;

გ) დანარჩენ ელექტრომიმღებების მომჭერებზე $\pm 5\%$ -ის ფარგლებში;

დ) ავარიისშემდგომ რეჟიმში დასაშვებია ძაბვის შემდგომი შემცირება კიდევ 5% -ით.

უნდა აღინიშნოს, რომ დასაშვებ ფარგლებს გარეთ ძაბვის გადახრისას ელექტრომიმღებები აგრძელებენ მუშაობას, მაგრამ ამ დროს წარმოიქმნება მათი მუშაობის არანორმალური პირობები და აღგილი აქვს მუშაობის ეფექტურობის შემცირებას. ამრიგად, ძაბვის გადახრის ტექნიკურად დასაშვები მნიშვნელობები განისაზღვრება მომხმარებელთა მუშაობის ეკონომიკურობით.

პრაქტიკაში ყოველთვის არ ხერხდება ელექტრომიმღებთა მომჭერებზე უზრუნველყოთ ძაბვის სათანადო მნიშვნელობა და ზოგჯერ მცირე ჯგუფის მომხმარებლებს უწევთ ტექნიკურად დასაშვებზე მეტად გადახრილი ძაბვის პირობებში მუშაობა.

ასეთი არანორმალური ძაბვის რეჟიმი სასტის მიხედვით დასაშვებია, მაგრამ ამ რეჟიმში ელექტრომომხმარებლის მიერ მოხმარებული ელექტროენერგია არ უნდა აღემატებოდეს საერთოდ მოხმარებული ენერგიის 5% -ს.

ძაბვის ზღვრული გადახრის მნიშვნელობები ნორმირებულია აგრეთვე თვით ელექტროდანადგარებისთვისაც:

ა) გრანსფორმატორებისა და ავტოტრანსფორმატორების შემყვან მომჭერებზე ძაბვის გადახრა დასაშვებია მათი მუშა მარეგულირებელი გამომყვანის ნომინალური ძაბვის არაუმეტეს 5% -ისა;

ბ) გენერატორებსა და სინქრონულ კომპენსატორებს შეუძლიათ განავითარონ ნომინალური სიმძლავრე ძაბვის ნომინალურისაგან $\pm 5\%$ -ით გადახრის პირობებში. ქონებული სიმძლავრის შემცირებისას დასაშვებია ძაბვის კიდევ უფრო მეტად გადახრა, მაგრამ არაუმეტეს ნომინალურის 10% -ისა;

ბ) ელექტრული იზოლაციის ნორმალური მუშაობის პირობების უზრუნველყოფის თვალსაზრისით ნორმირებულია ძაბვის ნომინალურიდან ამაღლების დასაშვები მნიშვნელობები: 20 კე-მდე ნომინალური ძაბვისას არაუმეტეს 20%-ისა; 35+220 კე ძაბვისა 15%-მდე; 330 კე ძაბვისას 10%-მდე; 500 კე და მეტი ძაბვისას 5%-მდე.

ძაბვის ხშირი გადახრისას (1%/წმ და მეტი სიჩქარით) განიხილავენ ძაბვის რხევის ცნებას, რომელიც წარმოადგენს ძაბვის უდრეს და უმცირეს სიდიდეთა შორის სხვაობას პროცენტებში:

$$V_r \% = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_6} \cdot 100.$$

ძაბვის რხევა უფრო ხშირად გამოწვეულია ელექტრული ბრახეების გაშვებით, შემდგომი აპარატის მუშაობით, წვეის ცვლადი დატვირთვით და ა.შ. ძაბვის რხევა ყველაზე უფრო მეტ გავლენას ახდენს განათების ქსელის ელექტრომიმღებებზე, სადაც ადგილი აქვს ნათურების სინათლის ნაკადის მკვეთრ ცვლილებას, რაც უარყოფითად მოქმედებს ადამიანთა მხედველობით აღქმაზე. ამის გამო ძაბვის რხევა ნორმირდება მხოლოდ განათების დანადგარებისთვის და რადიოხელსაწყოებისთვის, რომელიც განისაზღვრება შემდეგი თანაფარდობით:

$$V_r \% = 1 + \frac{6}{n} = 1 + \frac{\Delta r}{10},$$

სადაც: n – რხევების რიცხვი ერთ საათში; Δr – ერთ საათში ყოველ მომდევნო რხევებს შორის საშუალო ინტერვალი, (წთ).

ელექტრულ ქსელში ძაბვის ცვლილება არასასურველ მოვლენებს იწვევს. კერძოდ, ძაბვის შემცირებისას მცირდება ვარეარების ნათურების სინათლის ნაკადი და შესაბამისად მათი მ.ქ.კ. გაზრდისას კი მცირდება მათი სამსახურის ვადა. ასევე, ძაბვის შემცირებისას უარესდება ასინქრონული ძრავების მუშაობის პირობები, მცირდება მ.ქ.კ. და გრაგნილში გამავალი დატვირთვის ღირის გაზრდის გამო მიმდინარეობს იზოლაციის დაძველების პროცესი. ძაბვის გაზრდისას მნიშვნელოვნად იზრდება ასინქრონული ძრავების დამაგნიტების ღირი, რაც ხშირად იწვევს სტატორის გრაგნილის გადატვირთვას. იმავდროულად შეიძლება მნიშვნელოვნად გაიზარდოს ძრავის მიერ მოხმარებული რეაქტიული სიმძლავრე. ძაბვის შემცირებით ელექტროსაცხოვრება დანადგარებში იზრდება ტექნოლოგიური პროცესის ხანგრძლივობა და შესაბამისად მცირდება მწარმოებლობა.

გრანსფორმატორებისთვის უფრო სახიფათოა ძაბვის ამაღლება. ამ დროს მნიშვნელოვნად იზრდება დამაგნიტების ღირი, რაც

გრანსფორმატორის დამაგნიტების არაწრფივ უბანზე მუშაობით აიხსნება. შედეგად მახინჯდება დამაგნიტების ღენის მრუდი და წარმოიქმნება მაღალი რიგის პარმონიკები, რაც გამოიწვევს გრაგნილის დამატებით გახურებას და აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების მრდას.

ძაბვათა სამფაზა სისტემის არასიმეტრიულობას ადგილი აქვს მაშინ, როცა ელექტრულ ქსელში ძაბვათა პირდაპირი მიმდევრობის სისტემასთან ერთად შეიმჩნევა უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის ძაბვათა სისტემის არსებობა, რომელთა მნიშვნელობები შედარებით მცირეა, ვიდრე პირდაპირი მიმდევრობის ძაბვა.

ძაბვათა არასიმეტრიულობა ხასიათდება უკუ და ნულოვანი მიმდევრობის ძაბვათა პროცენტული მნიშვნელობით ნომინალური ძაბვის მიმართ:

$$U_2 \% = \frac{U_2}{U_g} \cdot 100; \quad U_0 \% = \frac{U_0}{U_g} \cdot 100; \quad (7.3)$$

სადაც, $U_2 = \sqrt{3}(\underline{U}_A + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_B + \underline{a} \cdot \underline{U}_C)$ - უკუ მიმდევრობის ძაბვა.

$U_0 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C)$ - ნულოვანი მიმდევრობის ძაბვა.

$\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ - ფაზის ცვლილების ოპერატორი.

$\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ - A, B, C, ფაზების ძაბვების კომპლექსური მნიშვნელობები.

არასიმეტრიის დასაშვები მნიშვნელობები არ უნდა აღემატებოდეს $(2+3)\%$ -ს.

ქსელში არასიმეტრიის წარმოქმნის ძირითად მიზეზს წარმოადგენს არასიმეტრიული დატვირთვის მქონე ელექტრომიმღებების არსებობა (განსაკუთრებით მძლავრი ერთფაზა მომხმარებლები) და რიგ შემთხვევაში, თვითონ ქსელის ელემენტების პარამეტრთა არასიმეტრიულობა (გრძელი ხაზი სადენთა ტრანსპოზიციის გარეშე ან ტრანსპოზიციის გრძელი ციკლით).

ყველა სამფაზა მოწყობილობა - დანადგარებისთვის ნორმალური რეჟიმი გულისხმობს მის მომჭერებზე მიყვანილი სამფაზა ძაბვის სიმეტრიულობას. სიმეტრიის დარღვევა აუარესებს მომხმარებლის მუშაობის ტექნიკურ-ეკონომიკურ მაჩვენებლებს.

სამფაზა ასინქრონული და სინქრონული ძრავების მუშა პროცესი დაკავშირებულია სტაგორის გრაგნილში გამავალი ღენების მიერ შექმნილი მბრუნავი მაგნიტური ველის არსებობასთან. ამ ღენების არასიმეტრიის დროს მაგნიტური ველი განიხილება, როგორც

ორი სხვადასხვა მიმართულებით მბრუნავი ელემენტების ჯამი, რომელთაგანაც ერთი მოძრაობს როტორის ბრუნვის მიმართულებით (პირდაპირი მიმდევრობის ველი), ხოლო მეორე მოძრაობს იმავე სიჩქარით, ოღონდ როტორის ბრუნვის საწინააღმდეგო მიმართულებით (უკუ მიმდევრობის ველი), ეს მეორე მდგენელი სიმეტრიულ რეჟიმში არ არსებობს.

უკუ მიმდევრობის მაგნიტური ველი წარმოადგენს ძრავების მუშაობის მახასიათებლის ცელილების მიზეზს. კერძოდ, რამდენადმე იცვლება მანქანის მბრუნავი მომენტი, ადგილი აქვს გრაგნილისა და როტორის ფოლადის დამატებით გახურებას, რაც შემთხვევაში წარმოიქმნება ვიბრაცია. ყველაზე მნიშვნელოვანს წარმოადგენს დამატებითი გახურება, რაც აჩქარებს იზოლაციის დაძველებას. დამატებითი გახურება აიხსნება იმით, რომ უკუ მიმდევრობის მაგნიტური ველი როტორის მიმართ ბრუნავს თითქმის ორმაგი სინქრონული სიჩქარით და, შესაბამისად, შეკრულ კონტურებში (გრაგნილი და როტორის ფოლადი) აღიძვრება ცელადი დენები, რომლებსაც გააჩნიათ თითქმის ორმაგი ნომინალური სიხშირე.

არასიმეტრიულ რეჟიმში მოსალოდნელია აგრეთვე ტრანსფორმატორების დამატებითი გახურება და, შესაბამისად, ტრანსფორმატორის გრაგნილების შემწვობით სიმძლავრის გადაცემის შესაძლებლობა მცირდება.

ძაბვის არასინუსოიდულობა ნიშნავს, რომ მუშა ძაბვა ძირითადი სიხშირის ($f_1 = 50$ ჰერცი) შემდგენის გარდა შეიცავს აგრეთვე უფრო მაღალი (ძირითადი სიხშირის ჯერადი) სიხშირის შემდგენებსაც. ძაბვის და დენის არასინუსოიდულობის მიზეზს წარმოადგენს ქსელში ცალკეული არაწრფივი ელემენტების არსებობა, რომელთა შორის ყველაზე მეტი გაელენით ხასიათდება ვენტილური მოწყობილობები — გამმართელები.

სამუშაო ქსელებში ჩვეულებრივ წარმოიქმნება კენტი რიგის ჰარმონიკები, რომელთაგანაც თავისი მოქმედი სიდიდით მნიშვნელოვანი შეიძლება იყოს $\gamma = 3 \div 13$ რიგის ჰარმონიკები [1]:

დღეისთვის ძაბვის არასინუსოიდულობის ნორმირებული დასაშვები მნიშვნელობა არ არსებობს, მაგრამ მიახლოებით იგი შეიძლება შეფასებული იქნეს პირობით [1]:

$$K_{\text{არს.}} \% = \frac{\sqrt{\sum_{r=1}^{\infty} U_r^2}}{U_1} \cdot 100 \leq 5. \quad (7.4)$$

მომხმარებელბთან ძაბვის მაღალი რიგის ჰარმონიკები იწვევს ძაბვის დამატებით გადახრას, რაც, ზოგადად, სხვადასხვა ფაზი-

სათვის სხვადასხვაა და ამიტომ მისი რეგულირება ჩვეულებრივი მეთოდებით არ ხერხდება.

ელექტროძრავებში აღნიშნული პარამონიკები იწვევს როტორის მასიური ნაწილის დამატებით გახურებას და შესაბამისად, გვაქვს აქტიური სიმძლავრის დამატებითი კარგვები.

საერთოდ, ძაბვისა და დენის მაღალი რიგის პარამონიკები აუარესებს ელექტრომომარაგების სისტემის მუშაობის გენიკურ-ეკონომიკურ მაჩვენებლებს. როგორც ელექტრომიმღებებში, ასევე ელექტრულ ქსელებში იზრდება აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები.

7.2. გურბინის ბრუნვის სიხშირის რეგულატორი

ელექტროსისტემაში ცვლადი დენის სიხშირე დამოკიდებულია გენერატორის ბრუნვის სიხშირეზე:

$$f = \frac{N \cdot n}{60}, \quad (7.5)$$

სადაც: N – გენერატორის წყვილპოლუსთა რიცხვი, n – ბრუნვის სიხშირე (ბრ/წთ).

მუშაობისას გენერატორზე გურბინის მხრიდან მოქმედებს მბრუნავი მამოძრავებელი მომენტი M_g , ხოლო ელექტრული დატვირთვის მხრიდან კი მამუხრუჭებელი მომენტი M_e დამყარებულ რეჟიმში, როცა სრულდება აქტიური სიმძლავრის ბალანსი $P_g = P_e$ ადგილი აქვს გოლობა $M_g = M_e$ ამ პირობებში მუდმივია აგრეგატის ბრუნვის სიჩქარე და, შესაბამისად, მუდმივია სიხშირე სისტემაში.

ნორმალურ რეჟიმში დატვირთვა P_e მდორედ, მაგრამ მაინც იცვლება, რაც განპირობებულია მომხმარებელთა მუშაობის რეჟიმით. იმისთვის, რომ სისტემაში მომუშავე გენერატორების სინქრონული ბრუნთა რიცხვი შეესაბამებოდეს სიხშირის ნომინალურ მნიშვნელობას, აუცილებელია ჯამური P_e დატვირთვის შეცვლასთან ერთად შეთანხმებულად იცვლებოდეს გენერატორების მიერ გენერირებული ჯამური აქტიური სიმძლავრეც. წინააღმდეგ შემთხვევაში ადგილი ექნება სიხშირის გადახრას ნომინალურიდან. მაგალითად, აქტიური დატვირთვის გაზრდისას გაიზრდება აგრეგატზე მოქმედი მამუხრუჭებელი მომენტი და იმავე გენერატორის პირობებში (უცვლელი მამოძრავებელი მომენტი) შეუძლებელი იქნება შევინარჩუნოთ ბრუნვის ადრინდელი სიჩქარე და გენერატორები დაიწყებენ დამუხრუჭებას, რაც გამოიწვევს სიხშირის შემცირებას.

72 ნახაზზე ნაჩვენებია დაგვირთვის შეცვლისას სისტემაში სიხშირის ცვლილების დიაპაზონი არარეგულირებადი (წირი 1) და რეგულირებადი (წირი 2) ტურბინის შემთხვევაში.

დამყარებულ რეჟიმში, როცა $P_g = P_{g0}$ სისტემაში გვაქვს ნომინალური სიხშირე. თუ არარეგულირებადი ტურბინის შემთხვევაში დაგვირთვა შეიცვლება $\pm \Delta P_i$ ფარგლებში, მაშინ სიხშირე შეიცვლება $f_1 + f_2$ ფარგლებში.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ (§3.11) დაგვირთვის სტატიკური მახასიათებლის დახრილობის კოეფიციენტი აღწევს (1-3)-ს, ანუ დაგვირთვის (1-3)%-იანი ცვლილებისას სიხშირე შეიცვლება 1%-ით. მაგალითად, $P_{g0} = 2000$ მგვტ და $\Delta P_g = \pm 200$ მგვტ შემთხვევაში, თუ $K_g = 2$, ვღებულობთ (გამოსახულება 393) $\Delta f = \pm 2.5$ ჰერცი. სიხშირის ასეთი ღრმა გადახრა დაუშვებელია და ამიტომ ქსელში დაგვირთვის შეცვლისას საჭიროა შეთანხმებულად შეიცვალოს ტურბინაში მიწოდებული პირველადი ენერგორესურსის ხარჯი, რასაც მოჰყვება გენერატორის მიერ გენერირებული აქტიური სიმძლავრის შეცვლა. ეს შესაძლებელი იქნება თუ ტურბინა აღჭურვილია საეციალური მოწყობილობით, რომელიც სისტემაში სიხშირის შეცვლისას უზრუნველყოფს პირველადი ენერგორესურსის ხარჯის შეცვლას (რეგულირებადი ტურბინა). ასეთ მოწყობილობას ტურბინის ბრუნვის სიჩქარის რეგულატორს უწოდებენ.

რეგულატორის მოქმედების პრინციპი ისეთი უნდა იყოს, რომ სიხშირის ამაღლებისას იგი ამცირებდეს ტურბინაში მიწოდებული ენერგომეცველის ხარჯს, ხოლო შემცირებისას კი პირიქით ბრდიდეს. ამ დამოკიდებულებას რეგულატორის სტატიკურ მახასიათებელს უწოდებენ (ნახ. 72 წირი 2).

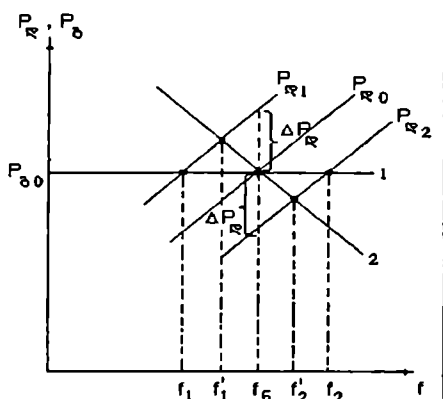
იმისთვის, რომ სისტემაში წარმოქმნილი უბალანსობისას სიხშირე იცვლებოდეს რაც შეიძლება ვიწრო ფარგლებში, საჭიროა რეგულატორის სტატიკური მახასიათებლის დახრილობა იყოს საკმარისად დიდი. 72 ნახაზიდან ჩანს, რომ რაც უფრო დახრილია სტატიკური მახასიათებელი (წირი 2), მით უფრო ვიწროა $f_1 + f_2$ შუალედი.

ამავე ნახაზიდან ჩანს, რომ დამყარებულ რეჟიმებში ნებისმიერი სიხშირისას გენერატორის მიერ გენერირებული სიმძლავრე მომხმარებელთა დაგვირთვის გოლია. ამასთან დაბალი სიხშირე მიუთითებს მას, რომ სისტემაში ადგილი აქვს აქტიური სიმძლავრის დეფიციტს, ხოლო მაღალი სიხშირე კი მიუთითებს გენერაციის სიჭარბეს. აქედან გამომდინარე სიხშირის გადახრას სისტემაში ადგილი შეიძლება ჰქონდეს, როცა:

ა) ელექტრომომხმარებელთა უცვლელი შემადგენლობისას იცვლება ელექტროსადგურების ჯამური გენერაცია;

ბ) უცვლელი გენერაციის პირობებში იცვლება მომხმარებელთა ჯამური დატვირთვა;

გ) გენერაცია და დატვირთვა იცვლება არამეთანხმებულად.



ნახ. 72. სისტემაში სიხშირის ცვლილების ფარგლებში აწარმოებული (1) და რეგულირებადი (2) ტურბინის პირობებში

ტურბინის ბრუნვის სიჩქარის რეგულატორის პრინციპული სქემა მოცემულია 73 ნახაზზე [65], სადაც პირველადი ენერგორესურსის წყაროს წარმოადგენს წყლის სადაწნეო რეზერვუარი 1, რომელიც მილსადენით 2 დაკავშირებულია ტურბინასთან 3. თბოსადგურებზე პირველადი ენერგორესურსის წყაროს წარმოადგენს ორთქლის ქვაბი, რომელიც იმავე ფუნქციას ასრულებს, რასაც სადაწნეო რეზერვუარი. ტურბინას ბრუნვით მოძრაობაში მოქცავს გენერატორი 4 და გადაცემის 5 საშუალებით ტურბინის სიჩქარის რეგულატორის მქნევარა 6. მქნევარა წარმოადგენს სახსრულად შეერთებულ ოთხგვერდას, რომლის ზედა ბოლო ლილვის მიმართ უძრავია. ქვედა ბოლოზე დამაგრებულია ლილვზე თავისუფლად მოძრავი ქურო 7, ხოლო გვერდით წვეროებზე მიმაგრებულია გვირგვინი. მქნევარას ლილვის ბრუნვის სიჩქარე ტურბინის ბრუნვის სიჩქარის პროპორციულია. ქუროს 7 მდებარეობა განისაზღვრება, ერთის მხრივ, მქნევარას მოძრავ ელემენტებზე მოქმედი სიმძიმისა და ცენტრიდანული ძალებით და მეორე მხრივ, გამბარის 8 შეკუმშულობით. მანქანის ბრუნვის სიჩქარის ყოველ მნიშვნელობას შეესაბამე-

ბა ქუროს გარკვეული განსაზღვრული მდებარეობა. ამ დროს მკვეთარას 10 მიერ სერვოდრავთან 11 მიერთებული მილსადენები გადაკეტილია და სერვოდრავი უძრავ მდგომარეობაშია, რადგანაც მის ღვეშეში ორივე მხრიდან მოქმედებს ზეთი ერთნაირი წნევით.

ტურბინის ბრუნვის სიხშირის შეცვლისას შეიცვლება მქნევარას მოძრავ ელემენტებზე მოქმედი ცენტრიდანული ძალები და შედეგად ქურო 7 შეიცვლის მდებარეობას, რასაც მოჰყვება მკვეთარას ფანჯრების გაღება. ზეთი წნევით შევა ზედა ფანჯრიდან (სიხშირის შემცირებისას) სერვოდრავის ზედა კამერაში ან ქვედა ფანჯრიდან (სიხშირის ამაღლებისას) ქვედა კამერაში, რაც გამოიწვევს ღვეშის შესაბამის გადაადგილებას. შესაბამისად შეიცვლება მარეგულირებელი სარქველის 12 მდებარეობა და ტურბინაში მიწოდებული პირველადი ენერგორესურსის ხარჯი.

პირველადი ენერგორესურსის ხარჯის შეცვლით შეიცვლება სიმძლავრე და შესაბამისად აგრეგატის ბრუნვის სიჩქარე პირვანდელი ცვლილების საწინააღმდეგოდ. ეს ცვლილება გაგრძელდება მანამ, სანამ მკვეთარა არ დაუბრუნდება თავის საწყის მდგომარეობას, რომლის დროსაც სერვოდრავთან მიერთებული მილსადენების ფანჯრები ისევ გადაიკეცება. შედეგად სერვოდრავის ღვეშის მოძრაობა შეწყდება და დაიკაეებს შეცვლილ პოზიციას. რადგანაც *ბ* წერტილი იმავე მდგომარეობაშია და *ა-ს* კი შეცვლილი მდგომარეობა უჭირავს, ამიტომ ქურო 7 არ დაუბრუნდა საწყის მდგომარეობას და შესაბამისად, გენერატორის ბრუნვის სიხშირე განსხვავებული იქნება პირვანდელი მნიშვნელობიდან.

ამრიგად, სისტემაში აქტიური სიმძლავრის ნებისმიერი სახის უბალანსობისას (დეფიციტი, სიჭარბე), ტურბინის ბრუნვის სიჩქარის რეგულატორი თავისი მოქმედებით ხელს უწყობს ამ უბალანსობის აღმოფხვრას. კერძოდ, სიმძლავრის დეფიციტისას, რომლის დროსაც სისტემაში იწყება სიხშირის შემცირება, რეგულატორის მოქმედებით გენერატორის მიერ გენერირებული აქტიური სიმძლავრე იზრდება სიხშირის შემცირების პროპორციულად, ხოლო სიჭარბისას, რომლის დროსაც იწყება სიხშირის ზრდა, იმავე რეგულატორის მოქმედებით გენერირებული აქტიური სიმძლავრე მცირდება. მაშასადამე რეგულატორის მოქმედება აკმაყოფილებს იმ მოთხოვნას, რაც აღინიშნა 7.2 ნახაზის მიხედვით ჩატარებული ანალიზის საფუძველზე ამ რეგულატორის სტატიკური მახასიათებელი ხასიათდება დახრილობის კოეფიციენტით, რომელიც წარმოადგენს გენერატორის მიერ გენერირებული აქტიური სიმძლავრის ცვლილების ფარდობითი მნიშვნელობის ფარდობას სიხშირის ცვლილების ფარდობით მნიშვნელობასთან:

$$K_{\delta} = -\frac{\Delta P_{\delta} / P_{\delta}}{\Delta f / f_{\delta}}, \quad (7.6)$$

სადაც: P_{δ} – გენერატორის ნომინალური სიმძლავრე. აქ „მინუსი“ მიუთითებს მას, რომ როცა $\Delta f > 0$, მაშინ $\Delta P_{\delta} < 0$ და პირიქით.

7.6-დან

$$\Delta P_{\delta} = -K_{\delta} \cdot P_{\delta} \cdot \frac{\Delta f}{f_{\delta}}. \quad (7.7)$$

ამ გამოსახულებიდან ჩანს, რომ სიხშირის შეცვლისას, რაც გამოწვეულია აქტიური სიმძლავრის უბალანსობით, მოცემული გენერატორი ამ უბალანსობის აღმოფხვრაში მით უფრო აქტიურ მონაწილეობას მიიღებს, რაც მეტია, ერთი მხრივ, მისი ნომინალური სიმძლავრე და, მეორე მხრივ, რეგულატორის სტატიკური მახასიათებლის დახრილობის კოეფიციენტი.

მახასიათებლის დახრილობის კოეფიციენტის სიდიდე დამოკიდებულია, ერთი მხრივ, ქუროს 7 მიმართ φ მხრეულის მხრების ურთიერთთანაფარდობაზე და, მეორე მხრივ, მარეგულირებელი სარქველის 12 მხრეულის მხრების ურთიერთთანაფარდობაზე საყრდენის წერტილის მიმართ (ნახ. 7.3). გუროგენერატორებისთვის $K_{\delta} = 15 + 20$, ხოლო ჰიდროგენერატორებისათვის $K_{\delta} = 25 + 50$ [26].

მახასიათებლის დახრილობის კოეფიციენტის შებრუნებულ მნიშვნელობას პროცენტებში რეგულატორის სტატიკურ უწოდებენ

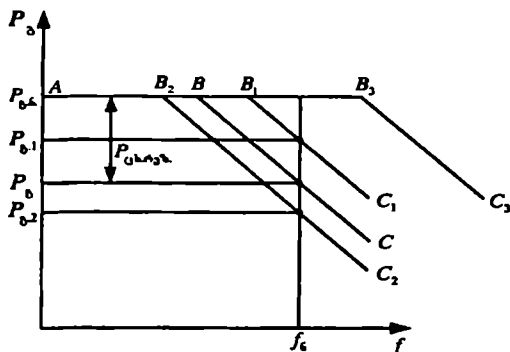
$$S_{\delta} \% = \frac{100}{K_{\delta}}. \quad (7.8)$$

მამასადამე, სტატიკური გუროგენერატორებისთვის (5-6)%-ის, ხოლო ჰიდროგენერატორებისთვის (2-4)%-ის გოლია.

გენერატორმა სიხშირის რეგულირებაში მონაწილეობის მიღება რომ შეძლოს, აუცილებელია იგი მუშაობდეს სტატიკური მახასიათებლის დახრილ BC უბანზე (ნახ. 7.4).

ამ დროს გენერატორს გააჩნია სიმძლავრის ცხელი რეზერვი და მას შესაძლებლობა აქვს შეცვალოს გენერირებული სიმძლავრე ორივე მიმართულებით (გაზრდა ან შემცირება). თუ გენერატორი მაქსიმალურადა დატვირთული $P_{\delta} = P_{\delta\epsilon}$ და არ გააჩნია სიმძლავრის ცხელი რეზერვი, მაშინ იგი სიმძლავრის დეფიციტის აღმოფხვრაში მონაწილეობას ვერ მიიღებს. ამ დროს გენერატორი მუშაობს სტატიკური მახასიათებლის პორიზონტალურ უბანზე (უბანი AB_1), სადაც $K_{\delta} = 0$. ამ შემთხვევაში გურობინა არარეგულირებადია.

სიხშირის დაურეგულირებელი ნაწილის დარეგულირება. მახასიათებლის წანაცვლება ხდება ან ავტომატურად, ან ხელით მორიგე პრესონალის მიერ. სიხშირის რეგულირების ამ პროცესს სიხშირის მუდმივი რეგულირება ეწოდება.



ნახ. 7.4. რეგულირებადი ტურბინის ბრუნვის სიჩქარის სტატიკური მახასიათებელი

როცა სისტემაში პარალელურად მუშაობს n რაოდენობის სხვადასხვა ნომინალური სიმძლავრის გენერატორი, რომელთაც გააჩნიათ სტატიკური მახასიათებლის დახრილობის სხვადასხვა კოეფიციენტი, მაშინ სისტემაში სიხშირის გადახრისას თითოეული გენერატორი შეცვლის თავის გენერაციას (7.7) გამოსახულების შესაბამისად

$$\Delta P_{0,1} = -K_{0,1} \cdot P_{0,1} \cdot \frac{\Delta f}{f_0}, \quad \Delta P_{0,2} = -K_{0,2} \cdot P_{0,2} \cdot \frac{\Delta f}{f_0} \quad \text{და ა.შ.}$$

დამატებითი ჯამური გენერაცია:

$$\Delta P_0 = \Delta P_{0,1} + \Delta P_{0,2} + \dots = -\left(\sum_{i=1}^n K_{0,i} \cdot P_{0,i}\right) \cdot \frac{\Delta f}{f_0}$$

ანუ

$$\Delta P_0 = -K_{0,0} \cdot P_{0,0} \cdot \frac{\Delta f}{f_0} \quad (7.9)$$

სადაც:

$$P_{0,0} = \sum_{i=1}^n P_{0,i} \quad (7.10)$$

სისტემაში პარალელურად მომუშავე გენერატორების ნომინალურ სიმძლავრეთა ჯამი:

$$K_{\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{\Sigma i} \cdot P_{\Sigma i}}{\sum_{i=1}^n P_{\Sigma i}} \quad (7.11)$$

სტატიკური მახასიათებლის დახრილობის საშუალო შეწონილი კოეფიციენტი მთელი სისტემისთვის.

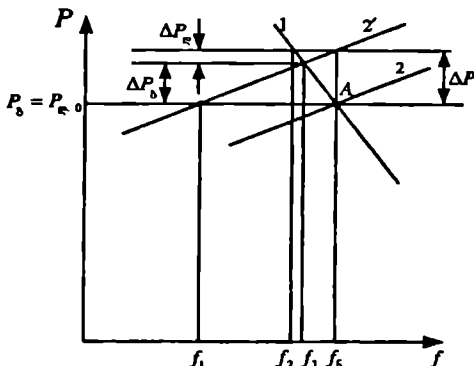
7.3. სიხშირის პირველადი რეგულირება

ენერგოსისტემაში რეჟიმის მართვის ამოცანათა შორის სიხშირის რეგულირება ერთერთი ყველაზე საპასუხისმგებლო და მნიშვნელოვანი ამოცანაა. ნორმალურ დამყარებულ რეჟიმში, სადაც გენერაცია და მოხმარება ურთიერთდაბალანსებულია, სიხშირე სისტემაში ნორმალურის ტოლია. ამ წონასწოროვლ მდგომარეობას P, f სიბრტყეზე შეესაბამება A წერტილი (ნახ. 7.5).

ამ ნახაზზე წირი 1 წარმოადგენს სისტემის ყველა გენერატორის ტურბინის ბრუნვის სიჩქარის რეგულატორების საშუალოშეწონილ სტატიკურ მახასიათებელს, ხოლო წირი 2 სისტემის ჯამური დატვირთვის სტატიკურ მახასიათებელს. დაეუშვათ, რომ მოცემულ რეჟიმში ჯამური დატვირთვა გაიზარდა ΔP სიდიდით, მაშინ სისტემის ახალი ჯამური დატვირთვის სტატიკური მახასიათებელი დაიკავებს 2' მდებარეობს.

თუ ჩავთვლით, რომ სისტემის არც ერთ გენერატორს არ გააჩნია სიჩქარის რეგულატორი, მაშინ სიხშირე სისტემაში შემცირდება f_1 მნიშვნელობამდე. ხოლო, თუ მივიჩნევთ, რომ დატვირთვა არ არის დამოკიდებული სიხშირეზე (ვარვარების ნათურები, ელექტროლუმენები), მაშინ სიხშირე შემცირდება f_2 მნიშვნელობამდე სინამდვილეში კი არსებობს ორივე სტატიკური მახასიათებელი და ამიტომ სიხშირე სისტემაში ფაქტურად შემცირდება f_3 მნიშვნელობამდე. ამ შემთხვევაში ΔP უბალანსოების აღმოფხვრა ხორციელდება გენერატორების მიერ ჯამური გენერაციის ΔP_g სიდიდით გაზრდისა და დატვირთვის ΔP_e სიდიდით შემცირების ხარჯზე

$$\Delta P = \Delta P_g - \Delta P_e \quad (7.12)$$



ნახ. 7.5. ენერგოსისტემაში სიხშირის პირველადი რეგულირების გრაფიკული გამოსახვა

ამ გამოსახულების მაჯვენა მხარის მეორე წევრის წინ ნიშანი „მინუსი“ შემოყვანილია იმიტომ, რომ როცა $\Delta f < 0$, მაშინ $\Delta P > 0$ და $\Delta P < 0$.

ანალიზის გამარტივების მიზნით ჩავთვალოთ, რომ ტურბინის სიჩქარის რეგულატორს, როგორც ფიზიკურ მექანიზმს, ინერცია არ გააჩნია. ე.ი. სისტემაში სიხშირის გადახრისთანავე იგი მოდის მოქმედებაში და პირველადი ენერგორესურსის ხარჯი იცელება რეგულატორის სტატიკური მახასიათებლის შესაბამისად.

(3.92) და (7.9) გამოსახულებათა გათვალისწინებით (7.12) ჩაიწერება ასე:

$$\Delta P = -(K_{\phi} \cdot P_{\phi} + K_e \cdot P_e) \cdot \frac{\Delta f}{f_e} \quad (7.13)$$

ამ გამოსახულებაში P_e -ს ქვეშ იგულისხმება სისტემის ახალი ჯამური დატვირთვა

$$P_e = P_{e0} + \Delta P.$$

შემოვიღოთ სიმბლავრის რეზერვის კოეფიციენტი:

$$\rho = \frac{P_{\phi}}{P_e}, \quad (7.14)$$

მაშინ (7.13) მიიღებს სახეს:

$$\Delta P = -(\rho \cdot K_{\phi} \cdot P_{\phi} + K_e) \cdot P_e \cdot \frac{\Delta f}{f_e}$$

აქედან

$$\Delta f = -\frac{\Delta P}{P_q} \cdot \frac{f_s}{\rho \cdot K_{\mu} + K_q} \quad (7.15)$$

ანუ

$$\frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta P}{P_q(\rho \cdot K_{\mu} + K_q)} = 0 \quad (7.16)$$

ამრიგად, სისტემაში სიმძლავრის უბალანსოებისას სიხშირის გადახრა მით მეტია, რაც მეტია უბალანსოების ფარდობითი მნიშვნელობა და რაც ნაკლებია სიმძლავრის რეგულირებისა და სტაბილური მასასიათებლების დახრილობის კოეფიციენტი. (7.16) გამოსახულებას სიხშირის სტაბილური რეგულირების კანონს უწოდებენ.

როცა მუშაობაში ჩართული გენერატორები დატვირთული არიან თავიანთ ზღვრულ მნიშვნელობამდე, მაშინ თითოეული მათგანისთვის $K_{\mu}=0$ და, აქედან გამომდინარე, $K_{\mu}=0$. ამ შემთხვევაში სიმძლავრის დეფიციტისას სიხშირის გადახრა განისაზღვრება მხოლოდ დატვირთვის მახასიათებლის დახრილობის კოეფიციენტის მიხედვით:

$$\Delta f = -\frac{\Delta P}{P_q} \cdot \frac{f_s}{K_q}, \quad (7.17)$$

ხოლო სიმძლავრის სიჭარბისას კი (7.15) გამოსახულებით, სადაც $K_{\mu} \neq 0$.

მაშასადამე K_{μ} კოეფიციენტის სიდიდე დამოკიდებულია ΔP დამატებითი დატვირთვის ნიშანზე ანუ სიხშირის ცვლილების ნიშანზე. დატვირთვის შემცირებისას (ანუ სიხშირის გაზრდისას) K_{μ} მნიშვნელოვნად დიდია და სიხშირის მნიშვნელოვანი ამაღლება ნაკლებად მოსალოდნელია, რადგანაც ამას ეწინააღმდეგება სისტემის ყველა გენერატორი ერთდროულად (თუ მათი სიჩქარის რეგულატორები მოქმედებაშია). დატვირთვის გაზრდისას (ანუ სიხშირის შემცირებისას) K_{μ} მცირეა და იგი მით უფრო მცირე ხდება, რაც უფრო მეტი გენერატორები ამოწურავს თავისი გენერაციის გაზრდის შესაძლებლობას სიხშირის რეგულირების პროცესში (ცხელი რეგულირების უკმარისობა).

7.4. ენერგოსისტემაში სიხშირის პირველადი რეგულირება სიმძლავრის ცხელი (მბრუნავი) რეგულირების დეფიციტის პირობებში

ენერგოსისტემაში სიხშირის პირველადი რეგულირება მიმდინარეობს სტაბილური რეგულირების კანონით (7.16) და ამასთან გენერატორებს მორის სიმძლავრის დეფიციტის გადანაწილება წარ-

მოებს მათი ნომინალური სიმძლავრისა და რეგულატორის მახასიათებლის დახრილობის კოეფიციენტის ნამრავლის პროპორციულად (გამოსახულება 7.7). ამ გამოსახულების თანახმად i -ური გენერატორის ცხელი რეზერვი ამოიწურება სიხშირის Δf_i სიდიდით შემცირებისას:

$$\Delta f_i = - \frac{P_{\text{გ.სტ.რეზ.}} \cdot f_{\text{ს}}}{K_{\text{გ.}} \cdot P_{\text{გ.ს.}}} \quad (7.18)$$

იმ შემთხვევაში, როცა გენერატორებს გააჩნიათ მცირე სიდიდის ცხელი რეზერვი, სიმძლავრის დეფიციტის გაზრდასთან ერთად, ისინი თანმიმდევრობით ამოწურავენ თავიანთ შესაძლებლობებს და ერთმანეთის მიყოლებით გამოეთიშებიან სიხშირის პირველადი რეგულირების პროცესს. ეს, (7.11)-ის თანახმად, გამოიწვევს $K_{\text{გ.ს.}}$ კოეფიციენტის შემცირებას ანუ ენერგოსისტემის ეკვივალენტური რეგულატორის სტატიკური მახასიათებლის შემობრუნებას საათის ისრის მოძრაობის საწინააღმდეგო მიმართულებით.

დავუშვათ, რომ სისტემაში არის ოთხი გენერატორი, რომელთა ცხელი რეზერვი ამოწურვის მღევარზეა. ამ შემთხვევაში სისტემის ეკვივალენტური სტატიკური მახასიათებელი იქნება $OO_1O_2O_3O_4$ ტეხილი წირის სახით (ნახ. 7.6), რაღვანაც დაგვირთვის $P_{\text{გ.1}}$ მნიშვნელობამდე გაზრდისას ამოიწურება გ1 გენერატორის ცხელი რეზერვი, $P_{\text{გ.2}}$ მნიშვნელობამდე გაზრდისას ამოიწურება გ2 გენერატორის ცხელი რეზერვი და ა.შ.

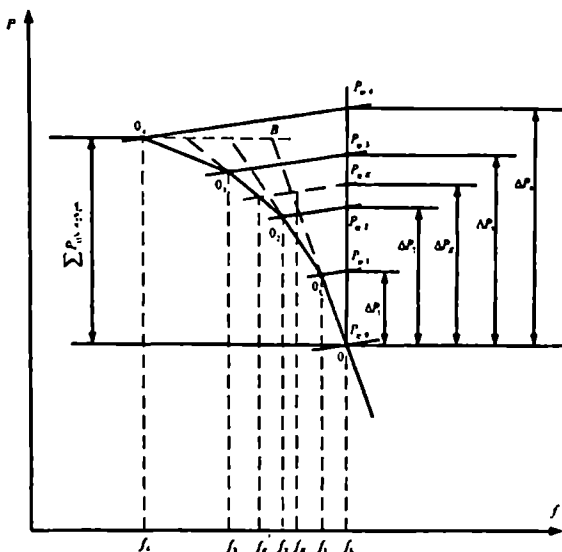
თუ გენერატორებს შორის სისტემის ჯამურ ცხელ რეზერვს გაევანაწილებთ ისე, რომ სიხშირის შემცირებისას ყველა გენერატორის ცხელი რეზერვი ერთდროულად ამოიწურება, მაშინ ჯამური ცხელი რეზერვის ამოწურვამდე, ეკვივალენტური მახასიათებელი შეინარჩუნებს თავდაპირველ დახრილობას და რეჟიმი სისტემაში დამყარდება უფრო მაღალ სიხშირეზე (წრფეწირი OO_1B). რეზერვის უკმარისობისას კი სიხშირის შემდგომი გადახრა გააგრძელდება BO_4 წირის გასწვრივ (ნახ. 7.6).

ყველა გენერატორის ცხელი რეზერვის ერთდროულად ამოწურვის პირობაა:

$$\Delta f_{\text{გ.}} = \text{idem},$$

ანუ (7.9) და (7.18)-ის თანახმად ვღებულობთ:

$$P_{\text{გ.სტ.რეზ.}} = \frac{\sum P_{\text{ცხ.რეზ.}}}{K_{\text{გ.ს.}} \sum P_{\text{გ.ს.}}} \cdot K_{\text{გ.}} \cdot P_{\text{გ.ს.}} \quad (7.19)$$



ნახ. 7.6. სისხმირის პირველადი რეგულირების პროცესი ცხელი რეზერვის დეფიციტის პირობებში

ე.ი. სისტემის ჯამური ცხელი რეზერვი ($\Sigma P_{\text{სხმირ.}}$) გენერატორებს შორის უნდა განაწილდეს მათი ნომინალური სიმძლავრისა და რეგულატორის მახასიათებლის დახრილობის კოეფიციენტის ნამრაველთა პროპორციულად. წინააღმდეგ შემთხვევაში ცხელი რეზერვის ფარგლებში სიმძლავრის ნებისმიერი დეფიციტისას, პირველი გენერატორის ცხელი რეზერვის ამოწურვის შემდეგ, რეჟიმის დამყარება მოხდება ყოველთვის უფრო დაბალ სისხმირზე ($f_K' < f_K$).

თუ ამ შემცირებულ სისხმირზე იმოქმედებს სისტემის რომელიმე გენერატორის ტექნოლოგიური დაცვა, მაშინ დეფიციტი კიდევ უფრო გაღრმავდება და შეიძლება სისტემა ნაწილობრივ (გაყოფის შემდეგ) ან მთლიანად ჩაქრეს.

ამრიგად, ენერგოსისტემაში სიმძლავრის ცხელი რეზერვის უკმარისობის პირობებში ავარიის განვითარების ლიკვიდაციის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ღონისძიებას წარმოადგენს სისტემის გენერატორებს შორის ჯამური ცხელი რეზერვის (7.19) პროპორციით განაწილება.

7.5. სიხშირის მეორეული რეგულირება

სიხშირის პირველადი რეგულირების ეფექტურობა დამოკიდებულია რეგულატორის მახასიათებლის დახრილობის კოეფიციენტზე. რეალურ სისტემაში გურბინის სიჩქარის რეგულატორებს არ შეუძლია აღადგინონ სიხშირის საწყისი (ნომინალური) მნიშვნელობა გადახრის დასაშვები სიზუსტის ფარგლებში. ეს დასკვნა ამჟამად ჩანს (7.15) განტოლებიდან, სადაც თუ $P_{\text{გ}} \neq \infty$, მაშინ $\Delta f \neq 0$.

სიხშირის პირველადი რეგულირების შემდეგ ყოველთვის საჭირო ხდება სიხშირის დამატებითი კორექტირება, რომელსაც სიხშირის მეორეულ რეგულირებას უწოდებენ.

სიხშირის მეორეული რეგულირება ითვალისწინებს სიმძლავრის მიღწეული ბალანსის (რაც მიღწეული იქნა პირველადი რეგულირებისას) შესაბამისი ღოზით დარღვევას სასურველი მიმართულებით. ეს გულისხმობს გენერატორის მიერ განვითარებული სიმძლავრის შეცვლას, რაც განხორციელდება რეგულატორის მასგაბილიზებული მოწყობილობით (9 და 13 7.3 ნახაზზე).

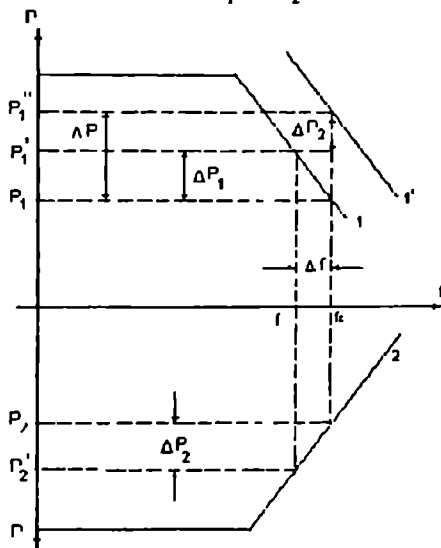
სიხშირის მეორეულ რეგულირებაში სისტემის ყველა გენერატორის ერთდროული მონაწილეობა არ იძლევა სასურველ შედეგს, რადგანაც არამეთანხმებული მოქმედების გამო ხშირად ადგილი აქვს გადარეგულირების შემთხვევებს. შეუთანხმებელი მოქმედების თავიდან აცილების მიზნით სისტემაში გამოყოფენ სიხშირის მარეგულირებელ სადგურს, რომელსაც სიხშირის წამყვან სადგურს უწოდებენ. მაშინ სისტემის დანარჩენი სადგურები განიხილება როგორც მიმყოფი სადგურები. სიხშირის წამყვანი სადგურის (გენერატორის) სიჩქარის რეგულატორის მასგაბილიზებული მოწყობილობა შეყვანილია მოქმედებაში, ხოლო მიმყოფი თვებაკეუმთ (გენერატორების) კი – გამოყვანილი. აღნიშნულიდან გამომდინარე სიხშირის პირველად რეგულირებაში მონაწილეობას მიიღებს სისტემის ყველა გენერატორი, თუ მათი ბრუნვის სიჩქარის რეგულატორები გამართულ მდგომარეობაშია, ხოლო მეორეულ რეგულირებას კი ახდენს სიხშირის წამყვანი სადგური, რომელიც თავისთავზე აიღებს სიმძლავრის იმ უბალანსობას, რომელმაც გამოიწვია სიხშირის შეცვლა. მეორეული რეგულირებისას სისტემის დანარჩენი სადგურები, რომელთაც პირველადი რეგულირებისას საჭიროების მიხედვით შეეცალეს თავიანთი გენერაცია, დაუბრუნდებიან საწყის რეჟიმს.

სისტემაში სიხშირის პირველადი და მეორეული რეგულირების პრინციპი სქემატურად ნაჩვენებია 7.7 ნახაზზე.

აქ სიხშირის წამყვანი სადგური (გენერატორი) წარმოდგენილია სტატიკური მახასიათებლით 1, ხოლო მიმყოლი სადგურები ეკვივალენტური მახასიათებლით 2.

ნორმალურ რეჟიმში, როცა სისტემაში სიხშირე ნომინალურია, სადგურების დატვირთვაა შესაბამისად P_1 და P_2 . დაეუშვათ, რომ გაიზარდა სისტემის დატვირთვა რაიმე ΔP სიდიდით, რასაც მოჰყვება სიხშირის შემცირება f მნიშვნელობამდე და ყველა გენერატორი თავიანთი მახასიათებლის დახრილობის მიხედვით დამატებით აიღებენ ΔP_1 და ΔP_2 დატვირთვას (ნახ. 7.7)

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2.$$



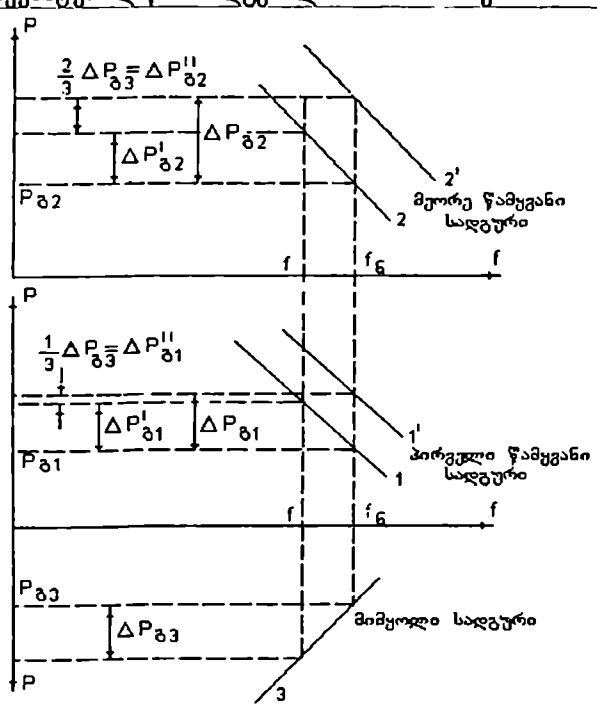
ნახ. 7.7. სიხშირის მეორეული რეგულირება ერთი წამყვანი სადგურის შემთხვევაში

ეს ეტაპი არის სიხშირის პირველადი რეგულირება. ამის შემდეგ სიხშირის წამყვანი სადგური 1 დააფიქსირებს, რა სიხშირის გადახრას, ავტომატურად ან მორიგე პერსონალის მიერ ხელით, მოქმედებაში მოვა სიხშირის რეგულატორის დამატებითი მოწყობილობა და ამ სადგურის დატვირთვა იწვევს ზრდას, მანამ, სანამ სიხშირე სისტემაში არ დაუბრუნდება თავის ნომინალურ მნიშვნელობას (ტურბინის ბრუნვის სიჩქარის რეგულატორის სტატიკური მახასიათებელი გადადის 1' მდებარეობაში). ამ დროს მიმყოლი სადგურების მიერ სიხშირის პირველადი რეგულირებისას აღებული დამატე

ბითი დატვირთვა მთლიანად გადაწილდება წამყვან სადგურებზე. ამ პროცესის შემდეგ აღსდგება ნომინალური სიხშირე. წამყვანი სადგურის მიერ მთლიანად აღებული იქნება ის უბალანსობა, რამაც გამოიწვია სიხშირის შეცვლა და მისი დატვირთვა გახდება:

$$P_1'' = P_1 + \Delta P_1 + \Delta P_2 = P_1 + \Delta P$$

იმ შემთხვევაში, როცა სიხშირის წამყვანი სადგურის გენერატორის რეგულირების დიაპაზონი უფრო ნაკლებია, ვიდრე მოსალოდნელი უბალანსობა (დეფიციტი), მაშინ სიხშირის მეორეული რეგულირებისთვის მზადყოფნაში იქნება კიდევ ერთი სადგური (გუნერატორი). ამ პირობებში სისტემაში სიხშირის რეგულირების პრინციპი სქემატურად წარმოდგენილია 7.8 ნახაზზე.



ნახ. 7.8. სიხშირის მეორეული რეგულირება ორი წამყვანი სადგურის შემთხვევაში

სიმბლავრის ბალანსის დარღვევამდე სისტემის დატვირთვა:

$$P_{\Sigma} = P_{\delta 1} + P_{\delta 2} + P_{\delta 3}$$

ბალანსის დარღვევის შემდეგ სისტემის დატვირთვა გახდა $P'_{\Sigma} = P_{\Sigma} + \Delta P$, რამაც გამოიწვია სიხშირის შემცირება f მნიშვნელობამდე.

7.8 ნახაზიდან ჩანს, რომ სიხშირის პირველად რეგულირებაში მონაწილეობს ყველა ელექტროსადგური (გენერატორი), რომლებიც (7.7) გამოსახულების თანახმად თავიანთ თავზე იღებენ სიმძლავრის დეფიციტის გარკვეულ სიდიდეს:

$$\Delta P = P'_{g1} + P'_{g2} + \Delta P_{გ3}$$

სიხშირის მეორეულ რეგულირებაში მონაწილეობს მხოლოდ წამყვანი სადგურები (გენერატორები), რომელთა სტატიკური მახასიათებლები ხელით ან ავტომატურად გადაადგილდებიან თავისი თავის პარალელურად ისე, რომ სისტემაში სიხშირე გახდეს ნომინალური.

ნახაზზე წარმოდგენილ კონკრეტულ შემთხვევაში

$$(K_{g1} \cdot P_{გ1}) + (K_{გ2} \cdot P_{გ2}) = 12$$

და ამიტომ მიმყოფი სადგურების (გენერატორების) მიერ აღებული $\Delta P_{გ3}$ დამატებითი დატვირთვა სიხშირის წამყვან სადგურებს შორის გადანაწილდება აღნიშნული პროპორციით:

$$\Delta P'_{g1} = \frac{1}{3} \cdot \Delta P_{გ3}, \quad \Delta P'_{გ2} = \frac{2}{3} \cdot \Delta P_{გ3}$$

წამყვანი სადგურების (გენერატორების) ჯამური დამატებითი დატვირთვა იქნება:

$$\Delta P_{გ3} = \Delta P'_{g1} + \Delta P'_{გ2} = \Delta P'_{g1} + \frac{1}{3} \cdot \Delta P_{გ3}$$

და

$$\Delta P_{გ2} = \Delta P'_{გ2} + \Delta P'_{გ2} = \Delta P'_{გ2} + \frac{2}{3} \cdot \Delta P_{გ3}$$

ანუ

$$\Delta P_{გ1,2} = \Delta P'_{g1} + \Delta P'_{გ2} = \Delta P'_{გ2} + \Delta P_{გ3} = \Delta P$$

შედეგად მიმყოფი სადგურები (გენერატორები) დაუბრუნდებიან საწყის რეჟიმს.

7.6. სიხშირული ავტომატური განტვირთვა

ენერგოსისტემის ჯამური სიმძლავრის ზრდასთან ერთად მცირდება სიხშირის ღრმა შემცირების ალბათობა, მაშინაც კი როცა აუარიულად ამოირთვება ყველაზე უფრო მძლავრი ენერგობლოკი.

დიდი ენერგოგაერთიანებები წარმოიქმნება შედარებით მცირე ენერგოსისტემების ბაზაზე სისტემათაშორისი დამაკავშირებელი ელექტროგადაცემის ხაზების საშუალებით. ასეთი ხაზის ავარიული გამორთვისას არ გამოირიცხება სიმძლავრის ღრმა ადგილობრივი დეფიციტი რომელიმე ერთ-ერთ შედარებით ნაკლებად მძლავრ სისტემაში. ასეთივე შედეგი შეიძლება გამოიწვიოს ენერგოსისტემის მიგა სასისტემო ხაზის გამორთვამ, რომლის გამოც სისტემა გაიყოფა არასინქრონულად მომუშავე ნაწილებად. ეს მდგომარეობა კიდევ უფრო მძიმდება, როცა ადგილი აქვს მნიშვნელოვნად დატვირთული ხაზის ავარიულ ამორთვას.

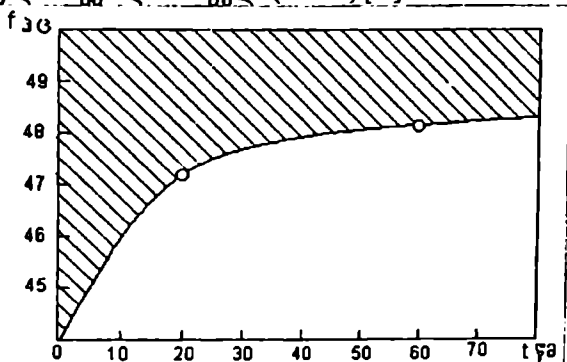
ენერგოსისტემაში სიმძლავრის დეფიციტის წარმოქმნის ადგილისა და მისი ფარდობითი მნიშვნელობის განსაზღვრა, აგრეთვე რეზერვის მობილიზაციის შესაძლებლობის დადგენა საკმარისად რთული და მრავალფარიანტიანი ამოცანაა. ასევე რთულ ხასიათს ატარებს სისტემაში მიმდინარე გარდამავალი პროცესი ქსელის კონფიგურაციისა და გენერაცია-მომხარების ურთიერთგანლაგებისგან დამოკიდებულებაში. თუ პროცესის ლოკალიზება სწრაფად არ მოხერხდა, შეიძლება მან გამოიწვიოს გაუთვალისწინებელი დამატებითი ავარიული სიტუაციები (გადატვირთვისგან რომელიმე ხაზის ამორთვა, ასინქრონული რეჟიმი, აგრეგატის სიმძლავრის შემცირება და ა.შ.), რაც კიდევ უფრო გააღრმავებს ავარიის სიმძიმეს და ხელს შეუწყობს მის განვითარებას.

ენერგოსისტემაში სიხშირის დაცემის შედეგად წარმოქმნილი ავარიული სიტუაციებისა და მისი განვითარების თავისებურებათა გათვალისწინებით ელექტროსადგურებისა და მომხმარებელთა მუშაობის პირობების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ავარიის წარმატებული ლიკვიდაციის მიზნით საჭიროა სისტემაში განხორციელდეს მოწყობილობა, რომელიც უზრუნველყოფს ნაწილი დატვირთვის გამოორთვას გარდამავალი პროცესის მიმდინარეობის დაყოვნებისა და, საბოლოო შედეგში, შეწყვეტის მიზნით. ასეთ მოწყობილობას სიხშირული ავარიული განტვირთვის (საგი) მოწყობილობას უწოდებენ.

საგის მოქმედება ორიენტირებული უნდა იყოს ავარიის წარმოქმნისა და მისი განვითარების ალბათურ ხასიათზე. მისი დანაყენი, მოცულობა და ქსელში განლაგება არ უნდა იყოს ენერგოსისტემის ისეთი პარამეტრების ფუნქცია, როგორიცაა მექანიკური ინერციის მუდმივა და დატვირთვის მარეგულირებელი ეფექტი. ორივე ეს პარამეტრი დამოკიდებულია დატვირთვისა და ენერგოაგრეგატების შემადგენლობაზე და ღრძში სისტემის რეჟიმის მიხედვით იცვლება. საგმა უნდა შეძლოს ავარიის წარმატებული ლიკვი-

დაცია ამ პარამეტრების სხვადასხვა მოსალოდნელი მნიშვნელობების შემთხვევაშიც.

სიხშირის შემცირების შედეგად ცალკეული აგრეგატების, კეანბების და მთლიანად ენერგოსისტემის რეაქცია ელინდება არა მყისურად, არამედ გარკვეული დროის შემდეგ. საგის მოქმედება ორიენტირებული უნდა იყოს მასზე, რომ ავარიისას არ უნდა მოხდეს სიხშირის გარკვეულ მნიშვნელობაზე დაბლა დაცემა იმ დროზე მტად, რაც დასაშვებად მიჩნეული (ნახ. 79) [52].



ნახ. 79. ენერგომიმლების მუშაობის ზღვრული დასაშვები სიხშირულ-დროითი ზონა

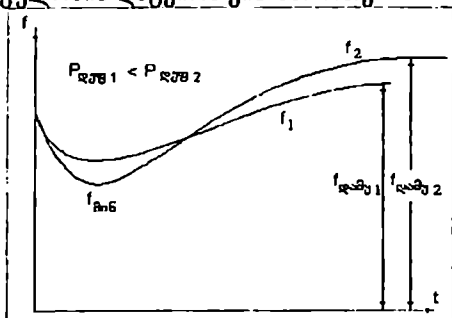
ამ ნახაზიდან ჩანს, რომ დაუშვებელია ხანმოკლე მუშაობაც კი 45 ჰერცზე უფრო დაბალ სიხშირისას, 47 ჰერცზე უფრო დაბალი სიხშირით მუშაობის ხანგრძლივობა არ უნდა აღემატებოდეს 20 წამს, ხოლო 48 ჰერცზე უფრო დაბალი სიხშირით მუშაობა კი – 60 წამს.

როგორც ცნობილია სიხშირის დაცემისას თბოსადგურების ცხელი რეზერვი საკმარისად სწრაფად რეალიზდება. ამიგომ საგის მოქმედებას ადგილი უნდა ჰქონდეს მას შემდეგ, როცა მთლიანად თუ არა, ნაწილობრივ მაინც რეალიზებული იქნება თბოსადგურების რეზერვი. ეს საშუალებას მოგვცემს შევამციროთ საგის მიერ ამორთული მომხმარებლების რაოდენობა და გავზარდოთ ენერგოსისტემის ნორმალური ფუნქციონირების მასშტაბები. იმ შემთხვევაში, როცა არ გვაქვს სიმძლავრის ცხელი რეზერვი, ან არ ხერხდება მისი მობილიზაცია, მაშინ საგის მიერ ამორთული მომხმარებლების საერთო მოცულობა არ უნდა აღემატებოდეს ღეფიცის. ამასთან ამორთვის შედეგად ენერგიის მიუწოდებლობით გამოშვებული ზარა-

ლი უნდა იყოს მინიმალური. ეს კი შესაძლებელია, თუ პირველ რიგში ამოერთავთ ნაკლებად საპასუხისმგებლო მომხმარებელს.

თბოსადგურების ცხელი რეზერვი, პრაქტიკულად არ აღემატება 50%-ს, ან უმრავლეს შემთხვევაში მასზე ნაკლებია. ორთქლის ტურბინის ბრუნთა რიცხვის რეგულატორის სტატიზმი (4+5)%-ის ფარგლებშია. აქედან გამომდინარე სიხშირის 2%-ით შემცირებისას ანუ, როცა სიხშირე შემცირდება 49 პერცამდე, თბოაგრეგატს უკვე ამოწურული აქვს მისი ცხელი რეზერვი. მამასადამე საგის პირველი საფეხურების მოქმედება მიზანშეწონილია მაშინ, როცა სიხშირე დაეცემა 49 პერცამდე და უფრო დაბლა.

საგის მოქმედების ძირითადი პრინციპია საფეხურების დიდი რაოდენობა სიხშირის დანაყენების პატარა ინტერვალებით (0.1 პერცე ან უფრო მცირე). ამ შემთხვევაში განგვირთვის სისტემა მოქმედებს უფრო მოქნილად და უახლოვდება ავტომატური რეგულირების პრინციპს, რაც გარკვეულ წილად უზრუნველყოფს დეფიციტის შესაბამისი მოცულობის დაგვირთვის ამორთვას.



ნახ. 7.10. სისტემაში სიხშირის ცვლილება საგის მოწყობილობის მოქმედების პროცესში

უნდა აღინიშნოს, რომ სიხშირული განგვირთვის მთელი სისტემა (საგის მოწყობილობა და ამომრთველი) გარკვეული ხარისხით ინერციულია. ამიტომ დაგვირთვის ფაქტიური ამორთვა ხდება სიგნალის გაგზავნიდან გარკვეული დროის შემდეგ. თუ ამ შუალედში დეფიციტი ჯერ კიდევ არ არის აღმოფხვრილი, მაშინ სიხშირე განაგრძობს დაცემას და საგის შემდგომი საფეხურების შესაბამისად კიდევ გამოირთვება ნაწილი მომხმარებლებისა.

ამრიგად დაგვირთვის ფაქტიური ამორთვის დაყოვნება განაპირობებს ჭარბ ამორთვებს და შედეგად სისტემაში სიხშირის ცვლილების ხასიათს აქვს 7.10 ნახაზზე ნაჩვენები სახე. რაც უფრო

დიდია დეფიციტი, მით უფრო მაღალი დამყარებული სიხშირეა მოსალოდნელი.

7.7. დინამიური პროცესი და სიხშირის მართვა

სიხშირის რეგულირების პროცესის განხილვისას მიჩნეული იყო, რომ სიმძლავრის დეფიციტის წარმოქმნისთანავე მოქმედებაში მოდის ტურბინის ბრუნვის სიჩქარის რეგულატორი. რეალურად იმ მომენტამდე, როცა მოქმედებას დაიწყებს სიჩქარის რეგულატორი (0.2-0.3 წმ), სიხშირის ცვლილება თითქმის არ არის დამოკიდებული სისტემის მბრუნავ (ცხელ) რეზერვზე და იგი ძირითადად განისაზღვრება სიმძლავრის დეფიციტითა და ენერგოსისტემაში მბრუნავი ელემენტების (გენერატორები, ტურბინები, ძრავები) ინერციულობით [52]. ამასთან ანალიზისას გათვალისწინებული იყო რეგულირების მარტივი სისტემა. პრაქტიკაში გამოყენებული რეგულირების სისტემები მნიშვნელოვნად რთულია. კერძოდ, პიდროაგრეგატებზე რეგულირების სისტემაში გამოიყენება მოქნილი უარყოფითი უკუკავშირი (იზოდრომული მექანიზმი), რომელიც გარდამავალ პროცესებში რხევების ჩაქრობას უწყობს ხელს. შუალედური გადახრების თანამედროვე მძლავრ ორთქლის ტურბინებში რეზერვის რეალიზაცია უფრო რთულად მიმდინარეობს [52].

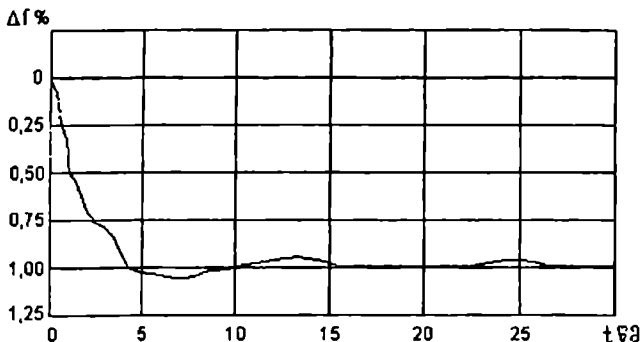
სიმძლავრის მბრუნავი რეზერვის პირობებში სიხშირის ცვლილების ოსცილოგრამა (ნატურალური ექსპერიმენტი) მოცემულია 7.11 ნახაზზე [52]. როგორც ნახაზიდან ჩანს, სიხშირის სწრაფად დაცემის შემდეგ რამდენიმე წამში, როცა მთლიანად ამოქმედდება აგრეგატთა სიჩქარის რეგულატორები, დამყარდება რეჟიმი შემცირებული სიხშირეზე.

სისტემაში მიმდინარე დინამიური პროცესის ხასიათი მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული სისტემის ჯამური დატვირთვის სიდიდეზე. მაგალითად, ენერგოსისტემაში, რომლის ჯამური დატვირთვა შეადგენს 20000 მგვტ-ს სიხშირის რეგულირების ეფექტით $K_{\Sigma}=2$, ერთი 300 მგვტ-იანი დატვირთვის მქონე აგრეგატის ავარიული ამორთვა, იმ პირობებშიც კი, როცა არ გვაქვს სიჩქარის რეგულატორები ($K_{\Sigma}=0$), იწვევს სიხშირის შემცირებას სიდიდით (გამოსახულება 7.15)

$$\Delta f = \frac{-300 \cdot 50}{20000 \cdot 2} = -0.375 \text{ პერცი,}$$

ხოლო იმავე ავარიისას 1500 მგეგ ჯამური დატვირთვის მქონე სისტემაში კი სიხშირე შემცირდება სიდიდით:

$$\Delta f = \frac{-300 \cdot 50}{1500 \cdot 2} = -5.05 \text{ პერცი}$$



ნახ. 7.11. სიხშირის ცვლილების ოსცილოგრამა (ნატურალური ექსპერიმენტი)

ზოგადად უბალანსობისას სიხშირის რეგულირების შესაძლებლობა და მისი ეფექტი ბევრადაა დამოკიდებული უბალანსობის სიდიდეზე. სიხშირის ვარდნის სიჩქარე აიწერება დიფერენციალური განტოლებით

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\delta} - M_{\epsilon} \quad (720)$$

სადაც, M_{δ} – ტურბინის ბრუნვის მომენტი; M_{ϵ} – დატვირთვის წინაღობის მომენტი; ω – ტურბინის ბრუნვის კუთხური სიჩქარე; J – მთელი სისტემის მბრუნავი მასის ინერციის მომენტი.

გარდამავალ პროცესში სიხშირის დროზე დამოკიდებულება შეიძლება მივიღოთ (720) დიფერენციალური განტოლების ამოხსნით, თუ კი მასში M_{δ} და M_{ϵ} მომენტებს გამოვსახავთ, როგორც სიხშირის ფუნქციას. ამ დამოკიდებულების გამარტივებულ ფორმაში წარმოდგენისას, თუ არ გავითვალისწინებთ ტურბინის რეგულატორის მოქმედებას, ვღებულობთ [52].

$$f = f_0 \left[1 - \frac{\Delta P}{P_{\epsilon 0} \cdot K_{\epsilon}} \cdot (1 - e^{-t/\tau_f}) \right] \quad (721)$$

სადაც, τ_f წარმოადგენს სიხშირის ცვლილების დროის მუდმივას.

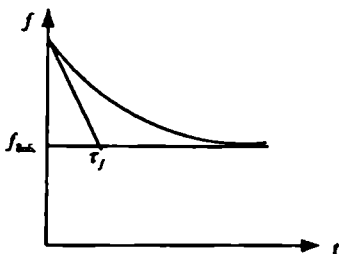
ამ გამოსახულების თანახმად დამყარებულ რეჟიმში ($t \rightarrow \infty$) სიხშირე იქნება:

$$K_{\text{ზა}} = f_0 \cdot \left(1 - \frac{\Delta P}{P_{\text{გო}} \cdot K_{\text{კ}}} \right)$$

ანუ

$$K_{\text{ზა}} = f_0 \cdot \left(1 - \frac{\Delta P}{K_{\text{კ}}} \right) \quad (7.22)$$

სადაც, $\Delta P_{\text{კ}}$ – სიმძლავრის დეფიციტის ფარდობითი მნიშვნელობა $P_{\text{დო}}$ -ს მიმართ.



ნახ. 7.12. სიხშირის მიხედვით სისტემის დინამიური მახასიათებელი, როცა არ არსებობს სიმძლავრის მბრუნავი რეჟირვი

(7.21) წარმოადგენს ენერგოსისტემის დინამიკურ მახასიათებელს სიხშირის მიხედვით (ნახ. 7.12). ამ ნახაზის მიხედვით შეიძლება დავადგინოთ სიხშირის ცვლილების დროის მუდმივას ფიზიკური არსი. იგი დროის იმ შუალედის გოლია, რომლის განმავლობაშიც სიხშირე შემცირდება მინიმალურ მნიშვნელობამდე, თუ დატვირთვის წინაღობა მუდმივი სიდიდეა, ანუ დატვირთვა არ არის სიხშირეზე დამოკიდებული.

თუ უბალანსობის წარმოქმნის შემდეგ მიმდინარე პროცესი-სას ადგილი აქვს ნაწილი მომხმარებლის ავტომატურ ამორთვისას ($\Delta P_{\text{გომხ}}$), მაშინ

$$\tau_f = \tau_f \cdot 1 - \frac{P_{\text{გო}} - \Delta P}{(P_{\text{გო}} \cdot \Delta P_{\text{გომხ}}) \cdot K_{\text{კ}}} \quad (7.23)$$

სადაც, τ_f – სისტემის (ტურბინა-გენერატორი-დატვირთვა) მექანიკური ინერციის მუდმივაა

$$\tau_j = \tau_{\text{გ.გ.}} + \tau_{\text{ღ.}}^{\text{დ.}}$$

აქ პირველი წევრი $\tau_{\text{გ.გ.}}$ (ტურბინა-გენერატორის მექანიკური ინერციის მუდმივა) ჩვეულებრივ საგრძნობლად მეტია, ვიდრე მეორე $\tau_{\text{ღ.}}^{\text{დ.}}$ (დატვირთვის მექანიკური ინერციის მუდმივა) წევრი.

სიხშირული ავტომატური განტვირთვის (საგი) მოწყობილობის შემდეგ დამყარებული სიხშირის მნიშვნელობა უფრო მაღალია

$$f_{\text{ზ.ზ.}} = f_0 \cdot \left(1 - \frac{\Delta P - P_{\text{ზ.ზ.}}}{(P_{\text{დ.}} \cdot \Delta P_{\text{ზ.ზ.}}) \cdot K_{\text{გ.}}} \right) \quad (7.24)$$

ანუ

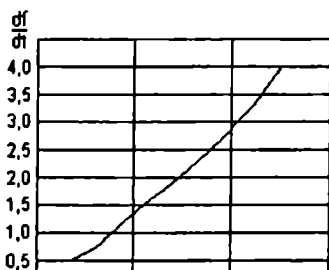
$$f_{\text{ზ.ზ.}} = f_0 \cdot \left(1 - \frac{\Delta P_{\text{გ.}} - \Delta P_{\text{ზ.ზ.}}}{(1 - \Delta P_{\text{ზ.ზ.}}) \cdot K_{\text{გ.}}} \right) \quad (7.25)$$

სადაც $\Delta P_{\text{ზ.ზ.}}$ - საგის მიერ ამორთული მომხმარებელთა დატვირთვის ფარდობითი მნიშვნელობები სისტემის ჯამური დატვირთვის $P_{\text{დ.}}$ -ს მიმართ.

როცა გარდამავალი პროცესის მიმდინარეობისას სიჩქარის რეგულატორის მოქმედებით გენერატორი იღებს დამატებით სიმძლავრეს $\Delta P_{\text{გ.}}$, მაშინ დამყარებული სიხშირე:

$$f_{\text{ზ.ზ.}} = f_0 \cdot \left(1 - \frac{\Delta P_{\text{გ.}} - \Delta P_{\text{გ.}} - \Delta P_{\text{ზ.ზ.}}}{(\Delta P_{\text{გ.}} - \Delta P_{\text{ზ.ზ.}}) \cdot K_{\text{გ.}}} \right) \quad (7.26)$$

სიმძლავრის დიდი დეფიციტისას ($\Delta P_{\text{გ.}} > 0.25 + 0.30$) სიხშირე სწრაფად (≈ 1.5 პერც/წმ და მეტი სიჩქარით) ეცემა (ნახ. 7.13).



ნახ. 7.13. სიხშირის დაცემის სიჩქარე დეფიციტისგან დამოკიდებულებაში (კერძო რიცხვითი მაგალითი)

ამ შემთხვევაში სიჩქარის რეგულატორების ან საგის მოწყობილობების მოქმედებათა შედეგებამდე სიხშირე ისეთ მნიშვნელობამდე დაეცემა, რომ მოსალოდნელია გენერატორების პარალელუ-

რი მუშაობის პირობების დარღვევა (განვითარდება ასინქრონული სულა) და სისტემა დაიშლება. სისტემის დაშლის თავიდან ასაცილებლად აუცილებელია განხორციელდეს სპეციალური საგი, რომელიც იმოქმედებს სისტემაში სიხშირის დაცემის სიჩქარის მიხედვით.

7.8. ელექტრულ ქსელში ძაბვის რეგულირების პრინციპები და საშუალებები

ელექტრულ ქსელში ძაბვის რეგულირება ენერგოსისტემის მართვის მნიშვნელოვან ამოცანას წარმოადგენს. სიხშირისგან განსხვავებით ძაბვის რეგულირების ამოცანა რთულდება ელექტრული ქსელის სტრუქტურისა და კონფიგურაციის გართულებასთან ერთად.

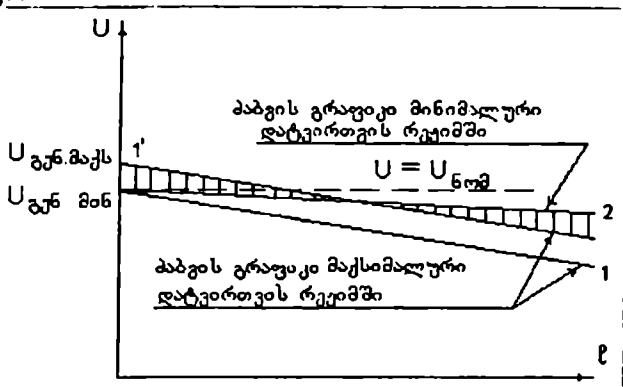
ძაბვის რეგულირების რაციონალური დაგეგმვის მიზნით ქსელის საკონგროლო კვანძებისთვის წინასწარ დადგენილი უნდა იქნეს ძაბვის ქვედა და ზედა ზღვრული (დასაშვები) მნიშვნელობები.

სისტემის საკვანძო წერტილებიდან მანაწილებელი ქსელის საშუალებით კვებას ღებულობს მრავალრიცხოვანი მომხმარებლები, რომლებიც ერთმანეთისაგან განსხვავებიან როგორც ელექტრული დამორებით კვების ცენტრებიდან, ასევე მოთხოვნილი სიმძლავრითა და დატვირთვის დღეღამური გრაფიკებით. მათ ძაბვის სადმი სხვადასხვაგვარი მოთხოვნები გააჩნიათ.

მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში ძაბვის დანაკარგი მნიშვნელოვნად მეტია (წირი 1. ნახ. 7.14), ვიდრე მინიმალური დატვირთვის რეჟიმში (წირი 2. ნახ. 7.14). ეს განსხვავება მით მეტია, რაც მეტია მომხმარებლის ელექტრული დამორება საკვანძო წერტილიდან (კვების ცენტრიდან) და მისი დატვირთვის სიმძლავრე.

აღნიშნულიდან გამომდინარე, ქსელის დატვირთვის ერთი რეჟიმიდან მეორეში გადასვლისას შორეულ მომხმარებლებთან მუშა ძაბვა შეიძლება იცვლებოდეს საკმარისად დიდ ფარგლებში, რაც ქსელისადმი წაყენებული მოთხოვნების შესაბამისად (მომხმარებლის სტაბილური და ეფექტური მუშაობის პირობების უზრუნველყოფა) არა დასაშვებია. ამ მოვლენის თავიდან აცილების მიზნით მიზანშეწონილია მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში კვების ცენტრში დაეიჭიროთ უფრო ამაღლებული ძაბვა, ვიდრე მინიმალური დატვირთვის რეჟიმში (წირი 1. ნახ. 7.14). ამ შემთხვევაში მომხმარებელთან ნომინალურიდან ძაბვის გადახრა ნაკლები იქნება და ნაკლები იქნება აგრეთვე ძაბვის ცვლილების დიაპაზონი (დამტრისული ფართი ნახ. 7.14). ძაბვის რეგულირების ამ პრინციპს ძაბვის შემ-

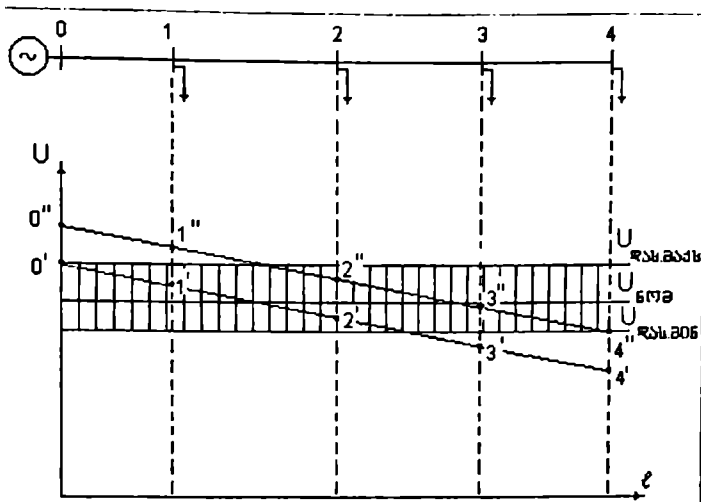
ხვედრი რეგულირება ეწოდება. ეს პრინციპი კვების მოცემული ცენტრისთვის ძაბვის ცენტრალიზებული რეგულირების პრინციპს წარმოადგენს.



ნახ. 7.14. ძაბვის ცენტრალიზებული შემთხვევრი რეგულირების პრინციპის გრაფიკები

მთელ რიგ შემთხვევაში ძაბვის ცენტრალიზებული შემთხვევრი რეგულირების პრინციპი ვერ უზრუნველყოფს მომხმარებელთან ძაბვის დასაშვებ მნიშვნელობებს. მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში ძაბვა შეიძლება დასაშვებ მნიშვნელობაზე ნაკლები აღმოჩნდეს (წირი 0' 1' 2' 3' 4'. ნახ. 7.15).

თუ ცენტრალიზებული რეგულირების პრინციპის თანახმად კვების ცენტრში მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში ძაბვას ავტომატურად ისე, რომ უშორეს მომხმარებელთან მუშა ძაბვა აკმაყოფილებდეს მისდამი წაყენებულ მოთხოვნებს, მაშინ არ არის გამორიცხული, რომ ელექტრულად ახლო მომხმარებელთან დაბ განსაკუთრებით, კვების ცენტრში ძაბვა აღმოჩნდეს მაქსიმალურ დასაშვებ მნიშვნელობაზე მეტი (წირი 0' 1' 2' 3' 4' ნახ. 7.15). ეს შემთხვევა მიუთითებს მას, რომ დიდ სისტემებში ძაბვის ცენტრალიზებული რეგულირება პრაქტიკულად შეუძლებელია. ამიტომ ასეთ სისტემებში აუცილებლობას წარმოადგენს გამოვიყენოთ ძაბვის დეცენტრალიზებული რეგულირების პრინციპი, რაც მდგომარეობს მასში, რომ უშუალოდ ელექტროენერგიის მიმღები ქვესადგურების დაბალი ძაბვის სალკებზე (მანაწილებელი ქსელის კვების ცენტრები) ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად ხორციელდება ძაბვის რეგულირება შესაბამისი საშუალებით (მეთოდით).



ნახ. 7.15. ძაბვის ცენტრალიზებული რეგულირების პრინციპის შეუთავსებლობის შემთხვევა

უმარტივესი ელექტროგადაცემის სქემის (ნახ. 7.16, ა) შესაბამისად ენერგიის მიმღები ქვესადგურის დაბალი ძაბვის სალტეზე ძაბვის მუშა მნიშვნელობა შეიძლება გამოითვალოს გამოსახულებით:

$$U_{\text{ფ}} = \left(\frac{U_{\text{დრ}}}{K_{\text{ფ}}} - \Delta U_{\text{ფ}} \right) \cdot K_{\text{ფ2}}, \quad (7.27)$$

სადაც, $\Delta U_{\text{ფ}} = \frac{PR + QX}{U_{\text{საშ}}}$ - ელექტროგადაცემაში ძაბვის ვარდნის

გრძივი შემდგენი;

$\Delta U_{\text{დრ}}$ - საგენერატორო ძაბვის სალტეზე ძაბვის მუშა მნიშვნელობა;

P, Q - გადასაცემი აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრე;

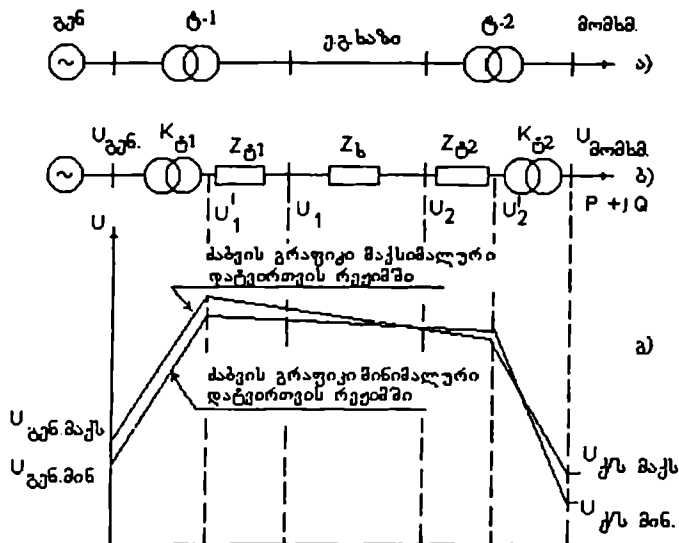
R, X - გადაცემის აქტიური და რეაქტიული წინაღობა;

$U_{\text{საშ}}$ - გადაცემის მაღალი ძაბვის საშუალო მნიშვნელობა:

$$U_{\text{საშ}} = \left(\frac{U_1' + U_2'}{2} \right);$$

$K_{\Gamma 1}, K_{\Gamma 2}$ – სამბაღლებელი და საღაბლებელი გრანსფორმატორების გრანსფორმაციის კოეფიციენტები;

U_1, U_2 – გადაცემის თავსა და ბოლოში ძაბვათა მნიშვნელობები, მიყვანილი მაღალი ძაბვის საფეხურზე.



ნახ. 7.16. უმარტივეს ელექტროგადაცემაში ძაბვის ცვლილების გრაფიკი. ა) უმარტივესი ელექტროგადაცემა; ბ) გადაცემის ჩანაცვლების სქემა; გ) ძაბვის ცვლილების გრაფიკი მაქსიმალური და მინიმალური დატვირთვის რეჟიმში

(727) გამოსახულებიდან ჩანს, რომ მოცემული P აქტიური სიმძლავრის გადაცემისას მიმღები ქვესადგურების დაბალი ძაბვის საღტეზე ძაბვის საჭირო ღონე შეიძლება უზრუნველყოფილი იქნეს სხვადასხვა საშუალებით. კერძოდ: ელექტროგენერატორის აგზნების დენის შეცვლით, რაც გამოიწვევს სადგურის საგენერატორო ძაბვის საღტეზე (კეების ცენტრში) ძაბვის სიდიდის შეცვლას; გრანსფორმატორთა გრანსფორმაციის კოეფიციენტის შეცვლით; ელექტროგადაცემის რეაქტიული წინააღობის კომპენსაციის გზით; მომხმარებლის რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის გზით; ელექტროგადაცემის აქტიური წინააღობის შემცირებით ანუ ხაზზე უფრო დიდი განიკვეთის სადენის გამოყენების გზით.

7.16 ნახაზზე ნაჩვენებია ელექტროგადაცემის ჩანაცვლების სქემა (ბ) და ძაბვის ცვლილების გრაფიკი (გ).

7.9. ძაბვის რეგულირება გენერატორის აგზნების ღენის ცვლილებით

საგენერატორო ძაბვის საღტმე ძაბვის საჭირო სიდიდის უზრუნველყოფა ხორციელდება ან სისტემის დისპეტჩერის მიერ, რომელიც სათანადო განკარგულებას აძლევს სადგურის მორიგე პერსონალს, ან სადგურის მორიგე პერსონალის მიერ, რომელსაც დაუბლებული აქვს ძაბვის კონტროლი მოცემულ საკონტროლო კვანძში. სრულყოფილი ავტომატიზაციის პირობებში საგენერატორო ძაბვის საღტმე ძაბვის რეგულირება ხორციელდება გენერატორების აგზნების ავტომატური რეგულატორების საშუალებით. ყველა ამ შემთხვევაში საგენერატორო ძაბვის საღტმე ძაბვის სიდიდის ცვლილება ხორციელდება გენერატორის აგზნების ღენის მეცვლით.

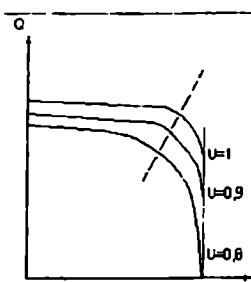
გენერატორის აგზნების ღენის მეცვლას თან სდევს გენერატორის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრის მეცვლა. დღედამის ცალკეულ საათებში ქსელის საკონტროლო კვანძებში ძაბვის სათანადო დონის შენარჩუნება შესაძლებელია სისტემის გენერატორებსა და სინქრონულ კომპენსატორებს შორის რეაქტიული სიმძლავრის გადანაწილების გზით, რომელსაც, ზოგადად, შეიძლება გააჩნდეს მრავალსახა გადაწყვეტა. სისტემის დისპეტჩერი ვალდებულია მიაღწიოს რეაქტიული სიმძლავრის ისეთ გადანაწილებას, რომელიც უზრუნველყოფს, ერთი მხრივ, საკონტროლო კვანძებში ძაბვის საჭირო დონის შენარჩუნებას და, მეორე მხრივ, აქტიური სიმძლავრის მინიმალურ დანაკარგებს მთლიანად ქსელში.

ძაბვის რეგულირების თვალსაზრისით, როგორც მთლიანად სისტემაში, ასევე მის ცალკეულ რეგიონში უნდა გაგაჩნდეს რეაქტიული სიმძლავრის რეზერვი, როგორც გაზრდის, ასევე შემცირების მიმართულებით.

ნებისმიერი გენერატორის რეაქტიული სიმძლავრის რეზერვი დამოკიდებულია ამ გენერატორის აქტიურ დატვირთვაზე და ძაბვის მუშა მნიშვნელობაზე. ნორმალურ რეჟიმში გენერატორი ანვითარებს აქტიურ და რეაქტიულ ნომინალურ სიმძლავრეს და ამ დროს აქტიური სიმძლავრის კოფიციენტი ნომინალურის ტოლია ($\cos \phi$). აგზნების ღენის შემცირებით შეიძლება შევამციროთ რეაქტიული სიმძლავრის გენერაცია. ნომინალურთან შედარებით აქტიური სიმ-

ძლავრის შემცირებისას შესაძლებელია გავზარდოთ რეაქტიული სიმძლავრის გენერაცია ნომინალურზე მეტად. გაზრდა დასაშვებია იმ ფარგლებში, რომლის საშუალებასაც მოგვეცემს სტაგორისა და როგორის ნომინალური დენების მნიშვნელობები.

7.17 ნახაზზე ნაჩვენებია გენერატორის რეაქტიული ქონებუ-
ლი სიმძლავრის დამოკიდებულება მისი აქტიური დატვირთვისგან
სხვადასხვა მუშა ძაბვის პირობებში. ეს დამოკიდებულება აგებულია
შემთხვევისთვის, როცა $\cos \varphi = 0,9$ [26]. როგორც ნახაზიდან ჩანს
აღნიშნული მახასიათებელი იყოფა ორ ზონად (გამყოფი წირი ნაჩ-
ვენებია პუნქტირით). ქვედა ზონაში რეაქტიული ქონებუ-
ლი სიმძლავრე იზღუდება სტაგორის დენის ზღვრული მნიშვნელობით, რო-
მელიც ითვალისწინებს სტაგორის გაციელების პირობებს, ხოლო ზე-
და ზონაში იგივე სიმძლავრე იზღუდება როგორის დენის ზღვრული
მნიშვნელობით, რომელიც ითვალისწინებს როგორის გაციელების პი-
რობებს. პირველი (ქვედა) ზონა შეესაბამება გენერატორის გაზ-
რდილ აქტიურ დატვირთვებს, ხოლო მეორე (ზედა) ზონა – შემცი-
რებულ აქტიურ დატვირთვებს. ზონათა საზღვარი (წყვეტილი წირი)
წარმოადგენს გენერატორის აქტიური სიმძლავრის კრიტიკულ



ნახ. 7.17. გენერატორის
ქონებუ-
ლი რეაქტიული
სიმძლავრე, როცა
 $\cos \varphi = 0,9$

მნიშვნელობას, რომლის დროსაც რო-
გორც სტაგორის, ისე როგორის დენი
მაქსიმალურია გაციელების მოცემულ
პირობებში. რაც მაღალია გენერატორის
მუშა ძაბვა, მით მეტია გენერატორის აქ-
ტიური სიმძლავრის კრიტიკული მნიშვნე-
ლობა, რომლის დროსაც როგორც სტა-
გორის, ასევე როგორის დენი აღწევს
თავის ზღვრულ მნიშვნელობას.

აქტიური დატვირთვის შემცირების
ხარჯზე რეაქტიული სიმძლავრის გაზ-
რდის შესაძლებლობა შეიძლება გამოყე-
ნებული იქნეს იმ შემთხვევაში, როცა სის-
ტემაში გვაქვს აქტიური სიმძლავრის სი-
ჭარბე (მინიმალური დატვირთვების რეჟიმი). ამ რეჟიმში გენერატო-
რი შეიძლება ვამუშაოთ სიმძლავრის შემცირებული კოეფიციენტით,
თუ მისი აქტიური დატვირთვა შემცირებულია.

რეაქტიული სიმძლავრის რეზერვი და ამ სიმძლავრის მიხედ-
ვით გენერატორის გადატვირთვის შესაძლებლობა მნიშვნელოვანია
ძაბვის ავარიული შემცირებისას. სისტემის ყველა გენერატორი აღ-
ჭურვილია აგზნების ავტომატური რეგულირების მოწყობილობით,
რომლებიც გენერატორის მომჭერებზე ძაბვის შემცირებისას ავტომა-

ტურად ზრდის აგზნების დენს და რეაქტიული სიმძლავრის გენერაციას.

უნდა აღინიშნოს, რომ სისტემის მაქსიმალური დატვირთვების რეჟიმში გენერატორის რეაქტიული სიმძლავრის გენერაციის გაზრდა აქტიურის შემცირების ხარჯზე არამიზანშეწონილია. ამ შემთხვევაში უფრო ეფექტურია რეაქტიული სიმძლავრის დამატებითი წყაროების (სინქრონული კომპენსატორები და სტატიკური კონდენსატორები) გამოყენება.

ელექტროსადგურების გენერატორები ქსელში ძაბვის რეგულირების თვალსაზრისით წარმოადგენენ მხოლოდ დამხმარე საშუალებას, რაც განპირობებულია შემდეგი ორი მიზეზით: 1. გენერატორებზე ძაბვის ცვლილების დიაპაზონი მომხმარებელთან ძაბვის ცვლილების კომპენსაციისთვის არასაკმარისია; 2. ძნელია შევათანხმოთ შორ და ახლომდებარე მომხმარებელთა მოთხოვნები ძაბვის რეჟიმის მიხედვით.

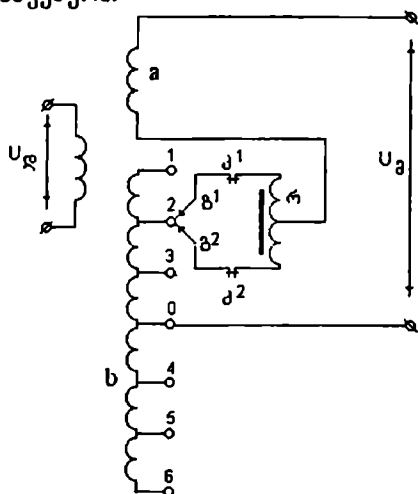
7.10. ძაბვის რეგულირება გრანსფორმატორების გრანსფორმაციის კოეფიციენტის შეცვლით

7.10.1 რეგულირების მოვალე პრინციპი

სამომხმარებლო კვების ცენტრში ძაბვის საჭირო დონის უზრუნველყოფა, სხვა საშუალებებთან ერთად, შეიძლება განხორციელდეს გრანსფორმატორთა გრანსფორმაციის კოეფიციენტის შეცვლის გზით, რომელიც ითვალისწინებს გრანსფორმატორის გრაგნილის მუშა ხვეების რაოდენობის შეცვლას. ამ მიზნით გრანსფორმატორის მაღალი ძაბვის გრაგნილს ამჟღავნებენ არარეგულირებადი (ა) და რეგულირებადი (ბ) ნაწილებისაგან (ნახ. 7.18). რეგულირებადი ნაწილი განთავსებულია მაღალი ძაბვის გრაგნილის ნეიტრალის მხარეს და მასზე გაკეთებულია რამდენიმე გამომყვანი.

გამომყვანიდან გამომყვანზე გადართვის მექანიზმის კონსტრუქციის მიხედვით გვაქვს ძაბვის რეგულირების ორი პრინციპი. პირველი, როცა გადართვა ხდება ქსელიდან გრანსფორმატორის ამორთვის პირობით და მეორე, როცა გადართვა ხდება დატვირთული გრანსფორმატორის პირობებში (დატვირთვის ქვეშ). პირველ შემთხვევაში გვაქვს ПБВ გრანსფორმატორები, ხოლო მეორე შემთხვევაში – РПН გრანსფორმატორები. ПБВ გრანსფორმატორები ძირითადად გამოიყენება ელექტროსადგურებზე და ქალაქისა და

სოფლის 6-10 კვ ძაბვის მანაწილებელ ქსელში. მათ გააჩნიათ ძაბვის რეგულირების შედარებით მცირე დიაპაზონი მცირე რაოდენობის საფეხურებით (გამომყვანი): $\pm 2 \times 2,5\%$, ან $\pm 1 \times 5\%$. РПН გრანსფორმატორები კი გამოიყენება მაღალი ძაბვის ქვესადგურებზე, რომელთა 10, 35 კვ ძაბვის სალტეები წარმოადგენენ ამავე ძაბვის მანაწილებელ ქსელის კვების ცენტრებს. ამ გრანსფორმატორებს გააჩნიათ შედარებით მღორე რეგულირების დიდი რაოდენობის საფეხური (გამომყვანი): $\pm 8 \times 1,5\%$, $\pm 9 \times 1,78\%$ ან $\pm 6 \times 2\%$ (ავტოგრანსფორმატორების შემთხვევაში). ყველა ამ ჩანაწერში პირველი რიცხვი მიუთითებს გამომყვანის რაოდენობას, მეორე კი ძაბვის რეგულირების საფეხურს.



ნახ. 7.18. ძაბვის რეგულირების პრინციპი გრანსფორმატორის შემთხვევაში

ПБВ გრანსფორმატორზე ხორციელდება ძაბვის სეგმონური რეგულირება, ხოლო РПН გრანსფორმატორებით კი ხორციელდება ძაბვის უწყვეტი რეგულირება წლის ნებისმიერ პერიოდში.

РПН გრანსფორმატორებზე გამომყვანის შეცვლა ხორციელდება წრდის გაწყვეტის გარეშე სპეციალური გადამრთველი მოწყობილობის საშუალებით (გადართვის მექანიზმი), რომელიც შედგება გ1 და გ2 გადამრთველისგან, კ1 და კ2 კონტაქტორებისა და რ რეაქტორისგან. ერთი გამომყვანიდან მეორეზე გადასასვლელად, მაგალითად მეორედან პირველზე, გამორთავენ კ1 კონტაქტორს, გ1 გადამრთველს გადართავენ პირველ გამომყვანზე და ჩართავენ კ1

კონტაქტორს. ამ მომენტში გრაგნილის 1-2 სექცია აღმოჩნდება რეაქტორზე ჩართული, რომლის რეაქტანსი ზღუდავს ამ სექციის ძაბვით განპირობებულ მათანაბრებელ ღენს. შემდეგ გამორთავენ კვ კონტაქტორს, გვ გადამრთველს გადართავენ პირველ გამომყვანზე და ჩართავენ კვ კონტაქტორს.

გადამრთველი მოწყობილობის რეაქტორი და ყველა მოძრავი თუ უძრავი კონტაქტები განთავსებულია გრანსფორმატორის ავზში, ხოლო კონტაქტორები მოთავსებულია ფოლადის ზეთიან ყუთში, რომელიც მიმაგრებულია ავზზე გარედან, რაც აადვილებს კონტაქტორების რევიზიისა და ზეთის შეცვლის პროცესს.

ყოველ ორ მომღევნო გამომყვანს შორის ხვიათა რიცხვი ΔW ერთნაირია და მისი პროცენტული მნიშვნელობა ძირითადი (არარეგულირებადი) გრაგნილის ხვიათა რიცხვის W_0 მიმართ წარმოადგენს ძაბვის რეგულირების საფეხურს

$$\alpha = \frac{\Delta W}{W_0} \cdot 100\%.$$

გამომყვანის შევცლით გრაგნილის მუშა ხვიათა რიცხვი იცვლება $n \cdot \Delta W$ სიდიდით და გრანსფორმაციის კოეფიციენტი

$$K_{\delta} = \frac{W_{\Sigma}}{W_0 + n \Delta W} = \frac{W_{\Sigma}}{W_0} \cdot \frac{1}{1 + n \alpha \% \cdot 10^{-2}}$$

ანუ

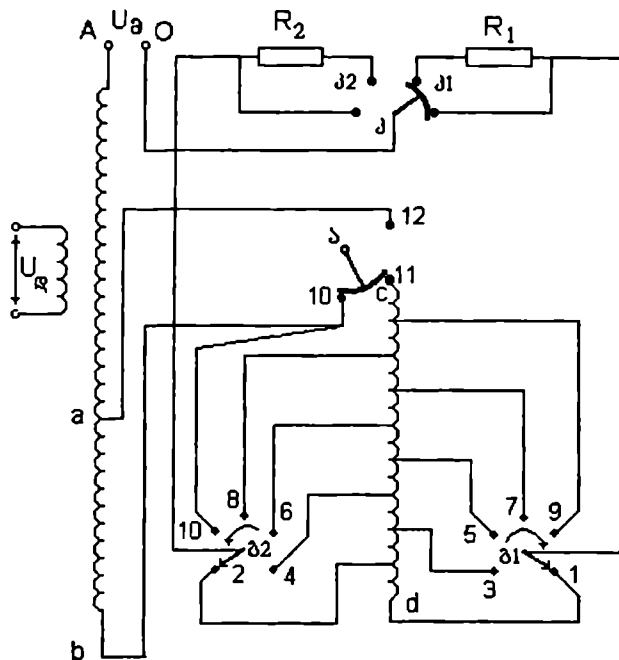
$$K_{\delta} = \frac{K_{\delta 0}}{1 + n \alpha \% \cdot 10^{-2}} \quad (728)$$

სადაც:

$$K_{\delta 0} = \frac{W_{\Sigma}}{W_0} = \frac{U_{გრ.ღა.}}{U_{გრ.ჯა.}} \quad (729)$$

წარმოადგენს გრანსფორმატორის გრანსფორმაციის ნომინალურ კოეფიციენტს; $U_{გრ.ღა.}$, $U_{გრ.ჯა.}$ - გრანსფორმატორის გრაგნილთა ნომინალური ძაბვა; n -გამომყვანის ნომერი.

გამომყვანების გადამრთველ მოწყობილობაში რეაქტორის ნაცვლად გამოიყენება აქტიური წინაღობები R_1 და R_2 (ნახ. 7.19). ენერგიის კარგეების შემცირების მიზნით ეს წინაღობები გათვლილია ხანმოკლე მუშაობაზე, რისთვისაც გადართვებისთვის გამოყენებული უნდა იქნეს მძლავრი სწრაფმოქმედი ამძრავი.



ნახ. 7.19. გამომყვანების გადართვის მექანიზმი
ორგრაგნილიანი ტრანსფორმატორებში

გამომყვანთა რიცხვის შემცირების მიზნით მაღალი ძაბვის გრაგნილი დაყოფილია არარეგულირებად (A-a), უხეში (a-b) და მუსტი (c-d) რეგულირების გრაგნილებად. უხეში და მუსტი რეგულირების გრაგნილების ხეიათა რიცხვი ერთნაირია.

სპეციალური კონსტრუქციის მქონე გადართვის გამოყენებით ძაბვის რეგულირების მთელ დიაპაზონზე მუსტი რეგულირების გრაგნილი რეგულირებაში ორჯერ იღებს მონაწილეობას.

ნახაზზე ნაჩვენებია სქემის შესაბამისად ტრანსფორმატორი მუშაობს 1 გამომყვანით. ამ შემთხვევაში მაღალი ძაბვის ყველა გრაგნილი (არარეგულირებადი+უხეში რეგულირების+მუსტი რეგულირების) მუშაობაშია.

გადამრთველი მოწყობილობა მზადაა მე-2 გამომყვანზე გადასასვლელად. იმპულსის მიღებისას კ კონტაქტორი გადადის მარცხენა (ნახაზის მიხედვით) მდგომარეობაში. გადასვლის პროცესში გაიხსნება კ1 კონტაქტები და დაგვირთვის ღენი გადის R_1 წინაღობის

ბის გავლით. შემდეგ კ1 და კ2 კონტაქტების შემოხველი (ახლომდებარე) მომჭერების შეკერის მომენტში R_1 და R_2 წინაღობები დაგვირთვის დენისთვის აღმოჩნდებიან პარალელურად ჩართულნი, ხოლო 1 და 2 გამომყვანებს შორის არსებული ხეივებისთვის კი მიმდევრობით ჩართულნი, რაც შევეთრად ამცირებს მათანაბრებელ დენს. შემდეგ კ კონტაქტორი აღმოჩნდება რა მარცხენა მდგომარეობაში ტრანსფორმატორი უკვე მუშაობს მე-2 გამომყვანზე. გ1 გადამრთველი განთავისუფლებულია დენიდან და გადადის მე-3 გამომყვანზე.

ახლა უკვე გადამრთველი მოწყობილობა მზადა მე-3 გამომყვანზე გადასასვლელად. იმპულსის მიწოდებით კ კონტაქტორი ბრუნდება მარჯვენა მდგომარეობაში და შემდეგ პროცესი მიმდინარეობს წინა შემთხვევის ანალოგიურად. პროცესის შემდგომი გაგრძელებით, როცა გ1 გადამრთველი 3, 5, 7 და 9 გამომყვანების გაულის შემდეგ დაბრუნდება ისევ 1 გამომყვანზე, ხოლო გ2 გადამრთველი კი 2, 4, 6, 8 გამომყვანების გაულის შემდეგ მივა მე-10 გამომყვანზე, მუშაობიდან გამოყვანილი აღმოჩნდება ზუსტი რეგულირების გრაგნილი და ტრანსფორმატორის კოეფიციენტი ამ შემთხვევაში თავისი ნომინალური მნიშვნელობების ტოლია.

ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის შემდგომი შეცვლა იწყება ა ამორჩევის გადართვით 10-11 მდგომარეობიდან 11-12 მდგომარეობაში. ეს ქმნის პირობას მუშაობიდან გამოვიყვანოთ გზუმ რეგულირების გრაგნილი, რაც მოხდება იმპულსის მიწოდებისას კ კონტაქტორის მარჯვენა მდგომარეობაში დაბრუნებით. ამას მოყვება გ2 გადამრთველის გადასვლა მე-10-დან მე-2 მდგომარეობაში. შემდგომი პროცესი გაგრძელდება შემოთ აღწერილი მიმდევრობით იმ განსხვავებით, რომ მუშაობიდან გამოყვანილია უხეში რეგულირების გრაგნილი.

აღწერილი სახის გადამრთველი მოწყობილობის გამოყენებისას ტრანსფორმატორის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი გამოითვლება ფორმულებით:

როცა ა ამომრჩევი 10-11 მდგომარეობაშია

$$K_{\phi} = \frac{K_{\phi 0}}{1 - (n - 10)\alpha\% \cdot 10^{-1}}; \quad (730)$$

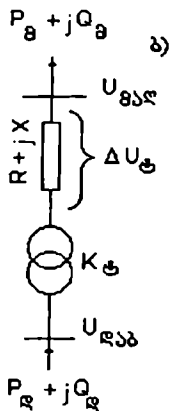
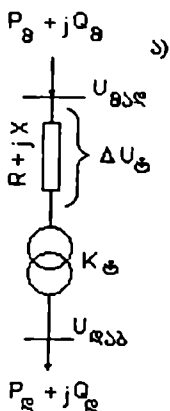
როცა ა ამომრჩევი 11-12 მდგომარეობაშია

$$K_{\phi} = \frac{K_{\phi 0}}{1 - (n - 1)\alpha\% \cdot 10^{-1}}, \quad (731)$$

სადაც $n = 1 + 10 -$ გამომყვანის ნომერი; $\alpha\%$ —რეგულირების საფეხური.

7.10.2. ძაბვის რეგულირება ორ და სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორებით

ორგრაგნილიანი სადაბლებელი ტრანსფორმატორის მუშა ძაბვებს შორის კავშირი ჩაიწერება ფორმულით (ნახ. 7.20, ა)



ნახ. 7.20. ორგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის მუშა ძაბვებს შორის კავშირის დადგენისთვის

$$U_{გაბ} = (U_{დაბ} - \Delta U_{\tau}) \cdot K_{\tau}, \quad (7.32)$$

ხოლო სამაღლებელი ტრანსფორმატორის შემთხვევაში (ნახ. 2.20, ბ)

$$U_{დაბ} = \frac{U_{გაბ}}{K_{\tau}} - \Delta U_{\tau}. \quad (7.33)$$

ორივე გამოსახულებაში

$$\Delta U_{\tau} = \frac{PR + QX}{U_{დაბ}} \quad (7.34)$$

წარმოადგენს ძაბვის დანაკარგს ტრანსფორმატორში.

(7.28)-ის გათვალისწინებით გვაქვს:

სადაბლებელი ტრანსფორმატორისთვის

$$U_{გაბ} = (U_{დაბ} - \Delta U_{\tau}) \cdot \frac{K_{\tau}}{1 + n\alpha\% \cdot 10^{-2}}; \quad (7.35)$$

სამაღლებელი ტრანსფორმატორისთვის

$$U_{დაბ} = \frac{U_{გაბ} (1 + n\alpha\% \cdot 10^{-2})}{K_{\tau}} - \Delta U_{\tau}. \quad (7.36)$$

ორივე შემთხვევაში K_{τ} განისაზღვრება (7.29) ფორმულით.

სამგრაგნილიანი სადაბლებელი ტრანსფორმატორის მუშა
ძაბეებს შორის კავშირი ჩაიწერება ფორმულით (ნახ.721, ა)

$$U_{\text{და}} = (U_{\text{ზღ}} - \Delta U_{\text{გზ}} - \Delta U_{\text{გლ}}) \cdot K_{\text{გზღ}} \quad (737)$$

და

$$U_{\text{სა}} = (U_{\text{ზღ}} - \Delta U_{\text{გზ}} - \Delta U_{\text{გლ}}) \cdot K_{\text{გსს}}, \quad (738)$$

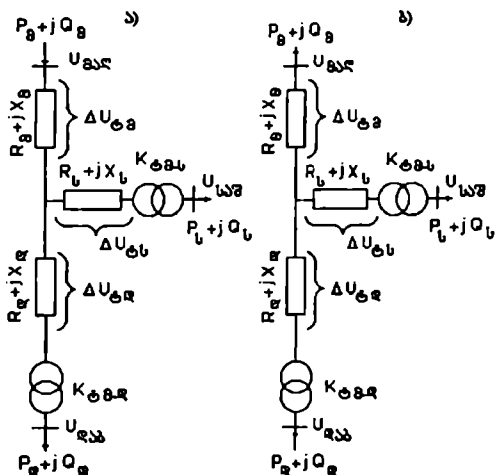
ხოლო სამაბლებელი ტრანსფორმატორის შემთხვევაში (ნახ. 721, ბ).

$$U_{\text{ზღ}} = \frac{U_{\text{და}}}{K_{\text{გზღ}}} - \Delta U_{\text{გლ}} - \Delta U_{\text{გზ}} \quad (739)$$

და

$$U_{\text{სა}} = \left(\frac{U_{\text{და}}}{K_{\text{გზღ}}} - \Delta U_{\text{გლ}} - \Delta U_{\text{გზ}} \right) \cdot K_{\text{გსს}}. \quad (740)$$

აქ $\Delta U_{\text{გზ}}$, $\Delta U_{\text{გლ}}$ და $\Delta U_{\text{გსს}}$ — ძაბვის დანაკარგი ტრანსფორმატო-
რის მაღალი, საშუალო და დაბალი ძაბვის გრაგნილში, რომლებიც
იანგარიშება (734) ფორმულის ანალოგიურად.



**ნახ. 721. სამგრაგნილიანი ტრანსფორმატორის მუშა
ძაბეებს შორის კავშირის დადგენისთვის**

მომხმარებლის მუშაობის სხვადასხვა რეჟიმში ძაბვის დანა-
კარგი ტრანსფორმატორში სხვადასხვაა. პიკური დატვირთვებისას
მაქსიმალურია, ხოლო ღამის საათებში მინიმალური. აქედან გა-
მომდინარე დღეღამის ინტერვალში აუცილებელი ხდება გამოყეა-

ნის სათანადო შეცვლა, რათა მოცემულ რეჟიმში ქვესადგურის შესაბამის სალტგზე უზრუნველყოთ ძაბვის საჭირო დონე.

პრაქტიკული ანგარიშების ჩასატარებლად უფრო მიზანშეწონილია წინასწარ დადგენილი იქნეს გამომყვანის შესაბამისი გრანსფორმაციის კოეფიციენტი, რისთვისაც, გადამრთველი მოწყობილობის ელექტრული სქემის შესაბამისად, უნდა ვისარგებლოთ (7.28) ან (7.30) და (7.31) გამოსახულებებით.

7.10.3. ძაბვის რეგულირება ავტოგრანსფორმატორებით

ავტოგრანსფორმატორებზე ძაბვის რეგულირების მოწყობილობა შეიძლება ჩამენებული იქნეს მაღალი ძაბვის გრანსფორმაციის ნეიგრალში (ნახ. 7.22, ა) ან საშუალო ძაბვის ფაზურ მხარეს (ნახ. 7.22, ბ) $\pm 12\%$ ძაბვის რეგულირების დიაპაზონით. ამასთან ნეიგრალში ჩამენებული მოწყობილობის ძაბვის რეგულირების საფეხურია 1.5% ($\pm 8 \times 1.5\%$), ხოლო საშუალო ძაბვის ფაზურ მხარეს ჩამენებული მოწყობილობისა კი 2% ($\pm 8 \times 2\%$).

7.22, ა სქემის შემთხვევაში გრანსფორმაციის კოეფიციენტები განისაზღვრება ფორმულებით:

$$K_{\text{გაზ}} = \frac{K_{\text{გაზ}} + n\alpha\% \cdot 10^{-2}}{1 + n\alpha\% \cdot 10^{-2}}; \quad (7.41)$$

$$K_{\text{გაზ}} = \frac{k_{\text{გაზ}}}{1 + n\alpha\% \cdot 10^{-2}}; \quad (7.42)$$

$$K_{\text{გაზ}} = \frac{K_{\text{გაზ}}}{K_{\text{გაზ}} + n\alpha\% \cdot 10^{-2}}. \quad (7.43)$$

7.22, ბ სქემის შემთხვევაში

$$K_{\text{გაზ}} = K_{\text{გაზ}} + n\alpha\% \cdot 10^{-2}; \quad (7.44)$$

$$K_{\text{გაზ}} = K_{\text{გაზ}} = \text{const}; \quad (7.45)$$

$$K_{\text{გაზ}} = \frac{K_{\text{გაზ}}}{K_{\text{გაზ}} + n\alpha\% \cdot 10^{-2}}. \quad (7.46)$$

ამ გამოსახულებათა ანალიზის საფუძველზე ვასკენით:

1. როცა ავტოგრანსფორმატორი მუშაობს მაღალბლბელ რეჟიმში (ენერგია მაღალ ძაბვის მხრიდან გადაეცემა საშუალო და დაბალი ძაბვის მხარეს):

ა) გამომყვანების მაღალი ძაბვის გრანსფორმაციის ნეიგრალში განთავსებისას საშუალო და დაბალი ძაბვის მხარეს ძაბვების რეგუ-

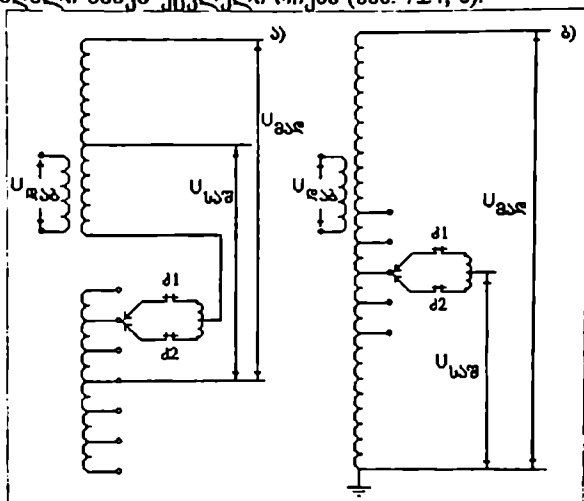
ლირება არათანხვედრილია. კერძოდ, $n > 0$ შემთხვევაში ადგილი აქვს საშუალო ძაბვის ამძაღლებს და დაბალი ძაბვის მემცირებას, ხოლო $n < 0$ შემთხვევაში კი პირიქით (ნახ. 7.23, ა).

ბ) გამომყვანების საშუალო ძაბვის ფაზურ მხარეს განთავსებისას ძაბვა დაბალი ძაბვის მხარეს უცვლელი რჩება (ნახ. 7.23, ბ).

2. როცა ავტოგრანსფორმატორი მუშაობს სამაღლებელ რეჟიმში (ენერგია დაბალი ძაბვის მხრიდან გადაეცემა საშუალო და მაღალი ძაბვის მხარეს):

ა) გამომყვანების მაღალი ძაბვის გრაგნილის ნეიტრალში განთავსებისას მაღალი და საშუალო ძაბვის მხარეს ძაბვების რეგულირება თანხვედრილია (ნახ. 7.24, ა);

ბ) გამომყვანების საშუალო ძაბვის ფაზურ მხარეს განთავსებისას მაღალი ძაბვა უცვლელი რჩება (ნახ. 7.24, ბ).



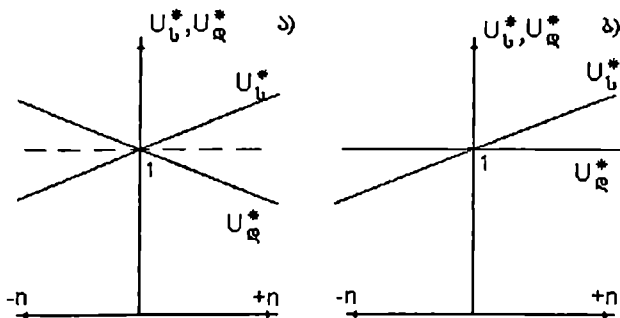
ნახ. 7.22. ავტოგრანსფორმატორებში ძაბვის რეგულირების PTH მოწყობილობის შეერთების ელექტრული სქემა.

მოწყობილობა ჩაშენებულია: ა) მაღალი ძაბვის გრაგნილის ნეიტრალში; ბ) საშუალო ძაბვის ფაზურ მხარეს.

ჩატარებული ანალიზი გვიჩვენებს, რომ თუ ავტოგრანსფორმატორი განკუთვნილია მაღაბლებელ რეჟიმში სამუშაოდ, მაშინ მიზანშეწონილია ძაბვის რეგულირების მოწყობილობა ჩაშენებული იქნეს საშუალო გრაგნილის ფაზურ მხარეს (ნახ. 7.22, ბ), ხოლო თუ ავტოგრანსფორმატორი განკუთვნილია სამაღლებელ რეჟიმში სამუ-

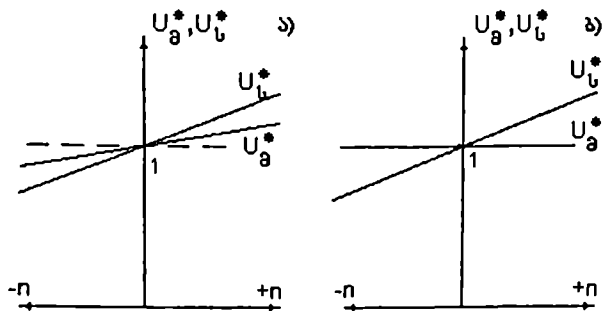
მაოდ, მაშინ ძაბვის რეგულირების მოწყობილობა უფრო მიზანშეწონილია ჩაშენებული იქნეს მაღალი ძაბვის გრაგნილის ნეიტრალში (ნახ. 722, ა).

ნეიტრალში ჩაშენებული ძაბვის რეგულირების РПН მოწყობილობის მუშაობის პრინციპი 7.19 ნახაზზე მოცემული მოწყობილობის მუშაობის პრინციპის ანალოგიურია.

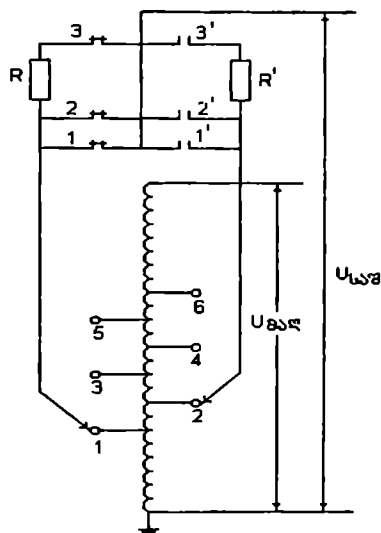


ნახ. 7.23. ძაბვის რეგულირება მაღაბლებელი ავტოტრანსფორმატორის გამოყენების შედეგით. გამოყენებულია: ა) მაღალი ძაბვის გრაგნილის ნეიტრალში; ბ) საშუალო ძაბვის ფაზურ მხარეს

საშუალო ძაბვის ფაზურ მხარეს ჩაშენებული РПН მოწყობილობით გამოყენებიდან გამოყენებზე გადასვლის პრინციპი ნაჩვენებია 7.25 ნახაზზე. გადასვლა მიმდინარეობს შემდეგი მიმდევრობით: 1 გამოყენებიდან 2 გამოყენებზე გადასვლის წინა მომენტში ჩაქეტილია 1, 2 და 3 კონტაქტები და გახსნილია 1', 2' და 3' კონტაქტები. გადასასვლელად ჯერ გაიხსნება მუშა კონტაქტი 1 და შემდეგ დამხმარე კონტაქტი 2. დაგვირთვის დენი გადის R წინააღობაში. შემდეგ შეიკრება რკალმქრობი კონტაქტი 3' და 1 და 2 გამოყენებებს შორის არსებული გრაგნილის ხეიები აღმოჩნდება R და R' წინააღობებთან ერთად მიმდევრობით ჩართული, რაც მკვეთრად ამცირებს მათანაბრებელ დენს. 3' კონტაქტის შეიკრას მოყვება 3 რკალმქრობი კონტაქტის გახსნა და დაგვირთვის დენი უკვე გადის R' წინააღობის გავლით. ამის შემდეგ შეიკრება 2' და 1' კონტაქტები და მარეგულირებელი მოწყობილობა აღმოჩნდება 2 გამოყენებზე გადაყვანილი, რომლის შემდეგ იგი მზადაა მომდევნო 3 გამოყენებზე გადასასვლელად და ა.შ.



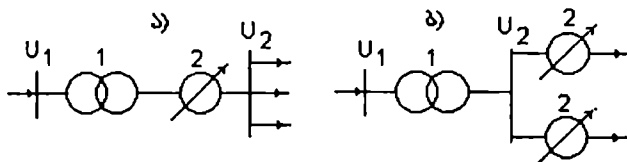
ნახ. 7.24. ძაბვის რეგულირება სამაღლებელი
 ავტოტრანსფორმატორის გამოყენების შედეგით. გამოყენა
 ჩაშენებულია: ა) მაღალი ძაბვის გრაგნილის ნეიტრალში;
 ბ) საშუალო ძაბვის ჭაზურ მხარეს



ნახ. 7.25.
 ავტოტრანსფორმატორზე
 გამოყენიდან
 გამოყენებულ გადართვის
 სქემა

7.11. ძაბვის რეგულირება სახაზო რეგულატორებით

სახაზო რეგულატორი (ვოლტსამაგი გრანსფორმატორი) ეს არის დამოუკიდებელი სტატიკური ელექტრული აპარატი, რომელიც გამოიყენება ძაბვის სარეგულირებლად: ქვესადგურზე (ნახ. 7.26, ა) მაშინ, როცა ძირითად გრანსფორმატორს არ გააჩნია დატვირთვის ქვეშ ძაბვის რეგულირების მოწყობილობა; ქვესადგურიდან გამავალ ცალკეულ ხაზებზე (ნახ. 7.26, ბ).



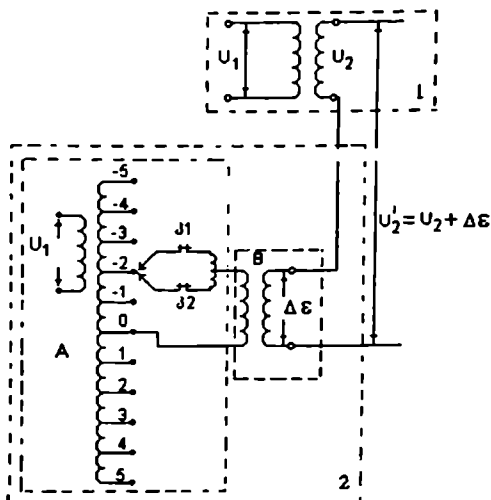
ნახ. 7.26. ვოლტსამაგი გრანსფორმატორის ჩართვის სქემები:
1 – ძირითადი ძალოვანი გრანსფორმატორი; 2 – ვოლტსამაგი გრანსფორმატორი

სახაზო რეგულატორი შეიცავს მკეებავ და მიმდევრობით გრანსფორმატორებს (ნახ. 7.27), რომლებიც მოთავსებულნი არიან მეთათ საესე ავზში. მკეებავი გრანსფორმატორის პირველადი გრავნილი იკვებება დაბალი ძაბვის ქსელიდან, ხოლო მის მეორეულ გრავნილზე განხორციელებულია მარეგულირებელი მოწყობილობა, რომელიც PTH გრანსფორმატორის მარეგულირებელი მოწყობილობის პრინციპით მუშაობს.

სახაზო რეგულატორი სამუალებას იძლევა ვარეგულიროთ ძაბეა როგორც სიდიდით, ასევე უაზით. კერძოდ, თუ მკეებავი გრანსფორმატორის პირველადი გრავნილი მიერთებულია იმავე სახელა უაზურ ძაბეაზე, მაშინ დამატებითი ელექტრომამოძრავებელი ძალა ΔE ძირითადი გრანსფორმატორის მეორეული გრავნილის ძაბვის მიმართ დაძრული იქნება 0° ან 180° -ით (ნახ. 7.28, ა), ხოლო სხვა შემთხვევაში გვექნება ძაბვის რეგულირება როგორც მოდულით, ასევე უაზით (ნახ. 7.28, ბ, გ, დ, ე, ვ).

თუ ელექტროგადაცემის ხაზი, რომელშიც ჩართულია სახაზო რეგულატორი, ჩიხურია, მაშინ სარგებლობენ ძაბვის მხოლოდ გრძივი რეგულირების სქემით. თუ ხაზი მაღალი ძაბვის შეკრული ქსელის შემადგენელ ელემენტს წარმოადგენს, მაშინ სახაზო რეგულატორის მიერ კონტურში შემოყვანილი დამატებითი ელექტრომამოძრავებელი ძალა იწვევს ამ კონტურში სიმძლავრეთა გადანაწი-

ლებას. ამასთან, ძაბვის გრძივი რეგულირება უფრო მეტად იწვევს რეაქტიული სიმძლავრის გადანაწილებას, ხოლო განივი რეგულირება კი აქტიური სიმძლავრის გადანაწილებას. ამ შემთხვევაში არაერთგვაროვან ქსელებში შეიძლება მიღწეული იქნეს სიმძლავრეთა ეკონომიკური განაწილება, რაც ქსელში აქტიური სიმძლავრის მინიმალური დანაკარგების პირობაა.



ნახ. 7.27. სახაზო რეგულატორის ჩართვის პრინციპული სქემა:

1 - ძირითადი ძალოვანი გრანსფორმატორი; 2 - სახაზო

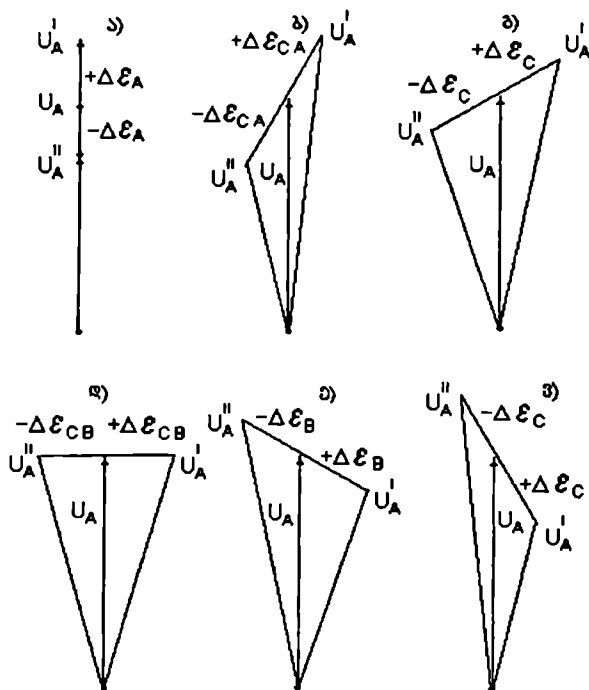
რეგულატორი; A - მკეებავე გრანსფორმატორი;

B - მიმღევრობითი გრანსფორმატორი

ამრიგად, სახაზო რეგულატორების სათანადო გამოყენებით შეგვიძლია ქსელში ვარეგულიროთ არა მარტო ძაბვა, არამედ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგებიც.

გრანსფორმატორში ძაბვის მარეგულირებელი მოწყობილობის ჩაშენება უფრო იაფია, ვიდრე თვითონ სახაზო რეგულატორი, როგორც დამოუკიდებელი ერთეული. მაგრამ ამ უკანასკნელის უპირატესობა მდგომარეობს მასში, რომ შესაძლებელია იგი გამოყენებული იქნეს ქსელის ნებისმიერ წერტილში. განსაკუთრებით იმ გრძელ ხაზებზე, რომლებიც ხასიათდება დიდი და დღეღამეში დიდ ფარგლებში ცვლადი დატვირთვით.

თანამედროვე ატოგრანსფორმატორები მზადდება საშუალო ძაბვის უაზურ მხარეს ჩაშენებული PTH მოწყობილობით იმ შემთხვევაში თუ მოითხოვება ძაბვის რეგულირება დაბალი ძაბვის მხარეს მაშინ საჭირო ხდება დაბალი ძაბვის გრანვილთან მიმდევრობით ვოლტსამატი ტრანსფორმატორის ჩართვა.



ნახ. 7.28. ძაბვების ვექტორული დიაგრამა სახაზო რეგულატორის ჩართვის სქემების მიხედვით: ა – ძაბვის გრძივი რეგულირება
ბ, ვ – ძაბვის გრძივ-განივი (გრძივი შემდგენის უპირატესობით)
რეგულირება: გ) ძაბვის განივ-გრძივი (განივი შემდგენის
უპირატესობით) რეგულირება: დ – ძაბვის განივი რეგულირება

**7.12. ძაბვის რეგულირება ელექტროგადაცემის
რეაქტიული წინაღობისა და მომხმარებლის რეაქტიული
დატვირთვის კომპენსაციით**

ელექტროგადაცემის თავში ცნობილი ძაბვის პირობებში მის
ბოლოში მუშა ძაბვა (ნახ. 7.29, ა) გამოითვლება ფორმულით

$$U_2 = U_1 - \Delta U - j\delta U, \quad (7.47)$$

სადაც

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U_1} \quad (7.48)$$

წარმოადგენს ძაბვის ვარდნის გრძივ შემდგენს, ხოლო

$$\delta U = \frac{PX - QR}{U_1} \quad (7.49)$$

წარმოადგენს ძაბვის ვარდნის განივ შემდგენს: P, Q – გადასაცემი
აქტიური და რეაქტიული ინდუქტიური სიმძლავრე; R, X – ელექ-
ტროგადაცემის აქტიური და რეაქტიული ინდუქტიური წინაღობა.

(7.47) გამოსახულების მიხედვით ავაგოთ ძაბვების დი-
აგრამა (ნახ. 7.30). აქ გადაცემის ბოლოში ძაბვა $U_2 = |\overline{OB}|$.

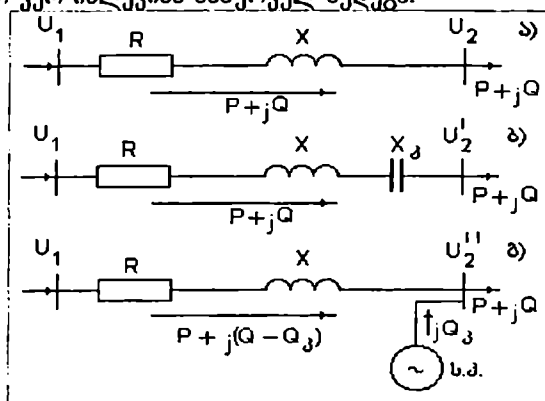
ელექტროგადაცემის რეაქტიული ინდუქტიური წინაღობის
კომპენსაციის შემთხვევაში, რაც განხორციელდება ხაზში კონდენ-
სატორთა ბატარეის მიმდევრობით ჩართვის გზით (გრძივი კომპენ-
საცია), რომელთა რეაქტიული წინაღობა X_r ტევედური ხასიათისაა
(ნახ. 7.29, ბ), ძაბვის ვარდნის გრძივი და განივი შემდგენები გამო-
ითვლება ფორმულებით:

$$(\Delta U) = \frac{PR + Q(X - X_r)}{U_1} = \frac{PR + QX}{U_1} - \frac{QX_r}{U_1}; \quad (7.50)$$

$$(\delta U) = \frac{P(X - X_r) - QR}{U_1} = \frac{PX - QR}{U_1} - \frac{PX_r}{U_1}. \quad (7.51)$$

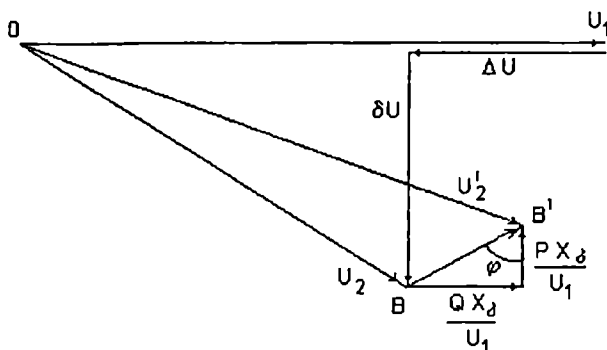
ამ გამოსახულებათა შესაბამისად U_2 ძაბვის ბოლო B წერტილი
გადაინაცვლებს B' წერტილში, ანუ ძაბვა გადაცემის ბოლოში გახ-
დება U'_2 – ის გოლი – $U'_2 > U_2$ (ნახ. 7.30). ნახაზიდან ჩანს, რომ B'
წერტილი მით უფრო მარჯვნივ იქნება, რაც უფრო დაბალია მომხმარ-
ებლის სიმძლავრის კოეფიციენტი სწოთ ϕ (როცა $\cos \phi_2 < \cos \phi_1$, მაშინ
 $\phi_2 > \phi_1$). ე.ი. ელექტროგადაცემის რეაქტიული ინდუქტიური წინა-
ღობის გრძივი კომპენსაცია მით უფრო ეფექტურია, რაც მეტი რეაქ-
ტიული სიმძლავრე გადაეცემა მოცემული ელექტროგადაცემით.

ძაბვის რეგულირება ხაზის რეაქტიული წინააღობის კომპენსაციის გზით წარმოადგენს შეუცვლელ საშუალებას იმ შემთხვევაში, როცა მომხმარებლის დატვირთვა მკვეთრად იცვლება დროის მცირე მონაკვეთში (წამი ან წამის ნაწილი). ამ შემთხვევაში ძაბვის რეგულირების სხვა საშუალებები რეგულირების პროცესის დაგვიანების გამო ვერ იძლევიან სასურველ შედეგს.



ნახ. 729. ელექტროგადაცემის სქემა:

ა) კომპენსაციამდე; ბ) რეაქტიული წინააღობის კომპენსაციით; გ) რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციით



ნახ. 730. ელექტროგადაცემის ძაბვების დიაგრამა რეაქტიული წინააღობის კომპენსაციამდე და კომპენსაციის შემდეგ

მომხმარებლის რეაქტიური დატვირთვის კომპენსაცია ხორციელდება ენერგიის მიმღებ საღებებზე მაკომპენსირებელი დანადგარის

(სინქრონული კომპენსატორი, კონდენსატორთა ბატარეა) ჩართვით (ნახ. 729, გ). ამ შემთხვევაში ძაბვის ვარდნის შემდგენები გამოითვლება ფორმულებით:

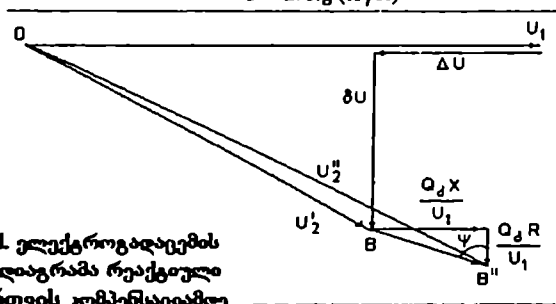
$$(\Delta U)' = \frac{PR + (Q - Q_c)X}{U_1} = \frac{PR + QX}{U_1} - \frac{Q_c X}{U_1}; \quad (7.52)$$

$$(\delta U)' = \frac{PZ - (Q - Q_c)R}{U_1} = \frac{PR - QX}{U_1} + \frac{Q_c R}{U_1}. \quad (7.53)$$

ამ გამოსახულებათა თანახმად ძაბვების ექვტორულ დიაგრამაზე U_2 ძაბვის ბოლო B წერტილი გადაინაცვლებს B'' წერტილში და ძაბვა გადაცემის ბოლოში გახდება U_2' - ის ტოლი - $U_2' > U_2$ (ნახ. 731).

ნახაზზე ნაჩვენები კუთხე Ψ წარმოადგენს ხაზის კომპლექსური წინააღობის არგუმენტს

$$\Psi = \arctg(X/R).$$



ნახ. 731. ელექტროგადაცემის ძაბვის დიაგრამა რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციამდე და კომპენსაციის შემდეგ

ამ გამოსახულების თანახმად B'' წერტილი მით უფრო მარჯვნივ იქნება, რაც მეტია ელექტროგადაცემის რეაქტიული წინააღობა. ე.ი. რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია მით უფრო ეფექტურია, რაც მეტია ელექტროგადაცემის რეაქტიული წინააღობა.

თუ მხედველობაში მივიღებთ მხოლოდ ძაბვის ვარდნის გრძივ შემდგენს მამინ (7.48) გამოსახულების (7.50) და (7.51) გამოსახულებებთან შედარებით, ვწერთ

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{საბოლოო}} - U &= \frac{Q_c \cdot X}{U_c} \\ U_{\text{საბოლოო}} - U &= \frac{Q \cdot X_c}{U_c} \end{aligned} \right\} \quad (7.53)$$

როგორც ანალიზი გვიჩვენებს ძაბვის რეგულირების აქ განხილული საშუალებები რამდენადმე ურთიერთ გამომრიცხავია. კერძოდ, თუ განხორციელდა ელექტროგადაცემის რეაქტიული წინაღობის გრძივი კომპენსაცია, მაშინ რეაქტიული დაგვირთვის კომპენსაციის ეფექტურობა ეცემა და პირიქით.

რეაქტიული წინაღობის კომპენსაცია ხორციელდება ხაზში კონდენსატორთა ბაგარეის დაყენებით და მისი საანგარიშო ხარჯები ხაზის ნომინალური ძაბვის პროპორციულია, ხოლო რეაქტიული დაგვირთვის მაკომპენსირებელ დანადგარებს აყენებენ ენერგიის მიმღები ქვესადგურის დაბალი ძაბვის სალტებზე და, ამდენად, მათი საანგარიშო ხარჯები არ არის დამოკიდებული ელექტროგადაცემის ნომინალურ ძაბვაზე.

დაბალი ძაბვის ქსელში, სადაც სადნთა აქტიური R და რეაქტიული X წინაღობები თანაზომადია ან ზოგჯერ $R > X$, ძაბვის დანაკარგი ძირითადად განპირობებულია PR შესაკრებით, ვიდრე QX -ით (გამოსახულება 7.48) და ამიტომ ამ ქსელებში ძაბვის რეგულირება რეაქტიული წინაღობის კომპენსაციით ნაკლებეფექტურია.

აღნიშნულიდან გამომდინარე ძაბვის რეგულირება ხაზის რეაქტიული წინაღობის კომპენსაციით ნაკლებად პრაქტიკულია (გარდა იმ შემთხვევისა, როცა დაგვირთვა მკვეთრად ცვალებადია დროის მოკლე მონაკვეთში), მისი განხორციელების ეფექტურობა შეფასებული უნდა იქნეს ელექტროგადაცემის გამტარუნარიანობის გაზრდის თვალსაზრისით და შეიძლება გამოყენებული იქნეს ზემოაღნიშნული ძაბვის ხაზებზე, რაც დასაბუთებული უნდა იქნეს შესაბამისი ტექნიკო-ეკონომიკური გაანგარიშების საფუძველზე.

ელექტროგადაცემის წინაღობის შეცვლა შესაძლებელია პარალელური შტოებიდან ერთერთის ამორთვის გზით. კერძოდ, მინიმალური დაგვირთვის რეჟიმში ქვესადგურზე დადგმული ორი გრანსფორმატორიდან ერთის ამორთვით გაიზრდება ძაბვის დანაკარგი ორჯერ და ქვესადგურის დაბალი ძაბვის სალტებზე ძაბვის რხევის დიაპაზონი შემცირდება. ამასთან ამ რეჟიმში ერთი გრანსფორმატორის ამორთვა შეამცირებს ელექტროენერგიის მუდმივ დანაკარგებსაც (დანაკარგები ფოლადში). ამ ღონისძიების გატარება თამამად შეიძლება, რადგანაც გრანსფორმატორი შედარებით საიმედო ელემენტია და ორიდან ერთის გამორთვით მომხმარებლის კვების საიმედოობას, პრაქტიკულად, საფრთხე არ ემუქრება.

ძაბვის რეგულირების თვალსაზრისით პარალელური ხაზებიდან ერთ-ერთის ამორთვა არამიმანშეწონილია, რადგანაც ამ დროს ელექტროენერგიის დანაკარგები იზრდება (დანაკარგები წინაღობაში) და მომხმარებლის კვების საიმედოობის ღონე მცირ-

დება ხაზის მუშაობის დაბალი საიმედოობის გამო გრანსფორმატორთან შედარებით.

7.13. ძაბვის დანაკარგის ცვლილება ხაზის აქტიური წინააღობის ცვლილებით

ელექტროგადაცემის ხაზის აქტიური წინააღობა სადენის მუშა განიკვეთის უკუპროპორციულია. ხაზებზე სადენის განიკვეთი, ზოგადად, შეირჩევა შემდეგი მოთხოვნების მიხედვით: ა) ელექტროგადაცემის ეკონომიკურობა; ბ) ნორმალურ და ავარიის შემდგომ რეჟიმებში ძაბვის დანაკარგი არ აღემატებოდეს დასაშვებს; გ) ნორმალურ და ავარიულ რეჟიმებში დენი სადენში არ აღემატებოდეს დასაშვებს; დ) ადგილი არ ჰქონდეს გვირგვინის მოუღენას; ე) შექანიკური სიმტკიცის მარაგის კოეფიციენტის იყოს ნორმით გათვალისწინებულზე არანაკლები.

ელექტროგადაცემის მთელ მაგისტრალში ძაბვის დანაკარგი ძირითადად განისაზღვრება ძაბვის ვარდნის გრძივი შემდგენით

$$\Delta U = \frac{1}{U_c} \sum P_n R_n + \frac{1}{U_c} \sum Q_n X_n = \Delta U_R + \Delta U_X, \quad (755)$$

სადაც P_n , Q_n – მაგისტრალის n -ე უბანში გამავალი აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრე; R_n , X_n – ამ უბნის აქტიური და რეაქტიული წინააღობა.

სადენის განივი კვეთის შეცვლით იცვლება მხოლოდ ΔU_R შემდგენი, რომელიც მაღალი და ზემაღალი ძაბვის ქსელებში (დიდი განივი კვეთის სადენების გამო) მნიშვნელოვნად ნაკლებია, ვიდრე ΔU_X . ამდენად, ძაბვის დანაკარგების შემცირების თვალსაზრისით ამ ქსელებში სადენთა განიკვეთის შეცვლით სასურველ შედეგს ვერ ვაღწევთ. 35 კვ და უფრო დაბალი ძაბვის ქსელებში, სადაც ΔU_R და ΔU_X თითქმის თანაზომადი სიდიდეებია (ზოგჯერ $\Delta U_R > \Delta U_X$). სადენთა განივი კვეთის შერჩევით შეიძლება მიღწეული იქნეს პირობა

$$\Delta U \leq \Delta U_{\text{კ}} \text{ ანუ } \Delta U_R \leq \Delta U_{\text{კ}} - \Delta U_X, \quad (756)$$

სადაც $\Delta U_{\text{კ}}$ – ძაბვის დასაშვები დანაკარგი, რომელიც განსახილველ ქსელში ძაბვის რეგულირების რაიმე სხვა საშუალებათა არსებობისას შეიძლება ავიღოთ: ნორმალური რეჟიმებისთვის 15%-მდე და ავარიის შემდგომი რეჟიმისათვის კი 20%-მდე. ძაბვის რეგული-

რების სხვა საშუალებათა არ არსებობისას კი, შესაბამისად, 7-8 % და 10-12%.

შესაბამისი მოთხოვნების გათვალისწინებით სადენტო განიკვეთის შერჩევა წარმოებს ქსელების პროექტირების საწყის ეტაპზე და ამიგომ ცხადია, რომ ქსელის რეეიშების მართვისას ამ მიმართულებით რაიმე ოპერატიული ღონისძიებების გატარება შეუძლებელია.

სამუალო და დაბალი ძაბვის ქსელებში სადენტო განიკვეთები განისაზღვრება ერთი მხრივ, ტექნიკო-ეკონომიკური გაანგარიშების საფუძველზე და, მეორეს მხრივ, ძაბვის დასაშვები დანაკარგის მიხედვით. საბოლოოდ კი აირჩევა ამ მნიშვნელობათა შორის უდიდესი. პრაქტიკული თვალსაზრისით აღნიშნულ ქსელებში უფრო მიზანშეწონილია სადენტო განიკვეთები შევირჩიოთ ტექნიკო-ეკონომიკური გაანგარიშების საფუძველზე და შემდეგ ჩატარდეს მათი შემოწმება ძაბვის დასაშვები დანაკარგის მიხედვით. თუ (7.55) პირობა არ სრულდება, მაშინ რეკომენდირებულია გაიზარდოს სადენტის განიკვეთი მაგისტრალური ქსელის სათავე უბანზე, ან ამავე უბანზე გადავიდეთ ორჯაჭვა ელექტროგადაცემაზე.

7.14. მე-7 თავის რიცხვითი მაგალითები

მაგალითი 7.1. იზოლირებულად მომუშავე ენერგოსისტემის ჯამური დატვირთვა $P_{\Sigma} = 804$ მგვტ. დატვირთვის სტატიკური მახასიათებლის დახრილობის კოეფიციენტი $K_{\Sigma} = 2$. მუშაობაში ჩართული გენერატორების მონაცემები ნაჩვენებია ქვემოთ ცხრილში.

გენერატორი №	ნომინალური სიმძლავრე, მგვტ	გენერატორის ფაქტიური სიმძლავრე, მგვტ	სიმძლავრის ცხელი რეზერვი, მგვტ	სტატიკური მახასიათებლის დახრილობის კოეფიციენტი
1	260	180	80	30
2	260	200	60	30
3	300	230	70	15
4	50	40	10	25
5-10	6x20	6x15	6x5	20
11-18	8x12	8x8	8x4	20
სულ	1086	804	282	—

განვსაზღვროთ მთელი სისტემის სტატიკური მახასიათებლის დახრილობის კოეფიციენტი (გამოსახულება 7.11)

$$K_{\text{სს}} = \frac{2 \times (30 \cdot 260) + 15 \cdot 300 + 25 \cdot 50 + 20 \times (6 \times 20 + 8 \times 12)}{1086} = 23,637$$

დაეუშვათ, რომ სისტემის ჯამური დატვირთვა გაიზარდა $\Delta P=100$ მგეგ-ით და გვაქვს

$$P_{\Sigma} = 804 + 100 = 904 \text{ მგეგ.}$$

სიმძლავრის რეზერვის კოეფიციენტი (გამოსახულება 7.14)

$$\rho = \frac{1086}{904} = 1,201.$$

სიხშირის გადახრა (გამოსახულება 7.15)

$$\Delta f = -\frac{100}{904} \cdot \frac{50}{1,201 \cdot 23,637 + 2} = -0,182 \text{ პერცი}$$

$$\text{ანუ } \Delta f\% = -0,364.$$

გენერატორების მიერ განვითარებული დამატებითი გენერაცია (გამოსახულება 7.7):

$$\Delta P_{\text{ბ-2}} = -30 \cdot \frac{-0,182}{50} \cdot 260 = 28,39 \text{ მგეგ (თითოეულის);}$$

$$\Delta P_{\text{გ}} = -15 \cdot \frac{-0,182}{50} \cdot 300 = 16,38 \text{ მგეგ;}$$

$$\Delta P_{\text{გ-4}} = -25 \cdot \frac{-0,182}{50} \cdot 50 = 4,55 \text{ მგეგ;}$$

$$\Delta P_{\text{გ-10}} = -20 \cdot \frac{-0,182}{50} \cdot 20 = 1,46 \text{ მგეგ (თითოეულის);}$$

$$\Delta P_{\text{გ-11-18}} = -20 \cdot \frac{-0,182}{50} \cdot 12 = 0,87 \text{ მგეგ (თითოეულის).}$$

ჯამური დატვირთვის შემცირება (გამოსახულება 3.92)

$$\Delta P_1 = 2 \cdot 904 \cdot \frac{-0,182}{50} = -6,58 \text{ მგეგ.}$$

შევაშოვოთ (7.12) გოლობა

$$\Delta P = 2 \times 28,39 + 16,38 + 4,55 + 6 \times 1,46 + 8 \times 0,87 - (-6,58) = 100,01 \text{ მგეგ.}$$

ამრიგად, სიმძლავრის დეფიციტი აღმოუჩენილია და სისტემაში დამყარდა $f=50-0,182=49,818$ პერცი სიხშირე. ამასთან არსებითი გენერატორი გადატვირთული არ არის.

ადვილად დაერწმუნებით, რომ სიხშირის პირველადი რეგულირებაში აქტიური მონაწილეობა მიიღო უფრო იმ გენერატორ-

მა, რომლისთვისაც სიდიდე $K_{\Sigma} \cdot P_{\Sigma}$ უფრო დიდია (გამოსახულება 7.7).

მაგალითი 7.2. განვიხილოთ იგივე ენერგოსისტემა (მაგალითი 7.1), როცა სიჩქარის რეგულატორები მოქმედებაშია მხოლოდ №1 და №3 გენერატორზე. ეს იმას ნიშნავს, რომ დანარჩენ გენერატორებზე სიჩქარის რეგულატორების გაუმართაობის გამო სიმძლავრის არსებული რეზერვის სრულად გამოყენება არ ხერხდება.

განესაზღვროთ K_{Σ}

$$K_{\Sigma} = \frac{30 \cdot 260 + 15 \cdot 300}{1086} = 11,326$$

სიხშირის გადახრა იგივე $\Delta P = 100$ მგვტ დეფიციტისას

$$\Delta f = -\frac{100}{904} \cdot \frac{50}{1,201 \cdot 11,326 + 2} = -0,3545 \text{ პერცი.}$$

ანუ $\Delta P\% = -0,701$.

გამოეთვალოთ გენერატორთა მიერ განეითარებული დამატებითი გენერაცია:

$$\Delta P_{\Sigma 1} = -30 \cdot \frac{-0,3545}{50} \cdot 260 = 55,3 \text{ მგვტ;}$$

$$\Delta P_{\Sigma 3} = -15 \cdot \frac{-0,3545}{50} \cdot 300 = 31,91 \text{ მგვტ;}$$

ჯამური დატვირთვის შემცირება

$$\Delta P_1 = 2 \cdot 904 \frac{-0,3545}{50} = -12,82 \text{ მგვტ.}$$

შევაბოწმოთ (7.12) გოლობა

$$\Delta P = 55,3 + 31,91 - (-12,82) = 100,03 \text{ მგვტ.}$$

ამრიგად, სიმძლავრის დეფიციტი აღმოფხვრილია და სისტემაში დამყარდა $f = 50 - 0,3545 = 49,65$ პერცი სიხშირე. იმის გამო, რომ სიხშირის პირველად რეგულირებაში მონაწილეობა არ მიიღო სისტემის ყველა გენერატორმა სიხშირის გადახრა უფრო დიდია.

მაგალითი 7.3. ვისარგებლოთ 7.1 რიცხვითი მაგალითით და დაეუშვათ, რომ აღნიშნულ ენერგოსისტემაში ავარიულად გამოირთო გ3 გენერატორი, რომლის ნომინალური სიმძლავრეა 300 მგვტ, ხოლო დატვირთვა კი 230 მგვტ. ამ შემთხვევაში გვაქვს შემდეგი სიტუაცია:

სისტემის	ჯამური	ნომინალური	სიმძლავრე
ΣP_{Σ}	$= 1086 - 300 = 786$ მგვტ;	ჯამური	ცხელი რეზერვი

$\Sigma P_{\text{ტრეზ}} = 282 - 70 = 212$ მგვტ; ჯამური დატვირთვა $P_r = 804$ მგვტ;

სიმძლავრის დეფიციტი $\Delta P = 230$ მგვტ.

სისტემის ეკვივალენტური რეგულატორის სტატიკური მახასიათებლის დახრილობის კოეფიციენტი გამოვთვალოთ მუშაობაში დარჩენილი გენერატორების გათვალისწინებით

$$K_{\text{კ}} = \frac{2 \times (30 \cdot 260) + 25 \cdot 50 + 6 \times (20 \cdot 20) + 8 \times (20 \cdot 12)}{786} = 26,9338$$

სიმძლავრის რეზერვის კოეფიციენტი

$$\rho = \frac{786}{804} = 0,9776.$$

(7.18) გამოსახულების მიხედვით განესაზღვროთ სიხშირის რა სიდიდით შემცირებისას ამოიწურება ამა თუ იმ გენერატორის საკუთარი ცხელი რეზერვი, გვაქვს:

$$\Delta f_{\text{კ}} = -\frac{80 \cdot 50}{30 \cdot 260} = -0,5128 \text{ ჰერცი};$$

$$\Delta f_{\text{კ}} = -\frac{60 \cdot 50}{30 \cdot 260} = -0,3846;$$

$$\Delta f_{\text{კ}} = -\frac{10 \cdot 50}{25 \cdot 50} = -0,4;$$

$$\Delta f_{\text{კ-10}} = -\frac{5 \cdot 50}{20 \cdot 20} = -0,625;$$

$$\Delta f_{\text{კ-18}} = -\frac{4 \cdot 50}{20 \cdot 12} = -0,8333.$$

მიღებული შედეგების მიხედვით ვასკენით, რომ პირველი თავის რეზერვს ამოწურავს გ2 გენერატორი, შემდეგ – გ4 და ა.შ. სიხშირის პირველადი რეგულირების მიმდინარეობის პროცესი წარმოდგენილია ქვემოთ ცხრილის სახით. ამ ცხრილიდან ჩანს, რომ სისტემაში სიხშირე შემცირდა 49,29 ჰერცამდე, რის გამოც მომხმარებელთა ჯამური დატვირთვა შემცირდა 22,79 მგვტ-ით და ამასთან ცხელი რეზერვი მთლიანად არ არის გამოყენებული (გ11-18 გენერატორებზე ჯამში დარჩა 4,8 მგვტ ცხელი რეზერვი). ანგარიშის შედეგები იხილეთ ქვემოთ ცხრილში.

დასახელება		სიხშირის გადახრის ეტაპები				
		1	2	3	4	5
სიხშირის გადახრა, პერცენტი		-0,3846	-0,4	-0,5128	-0,625	-0,7096
ხმერთა რაოდენობა		გამოყენებული ცხელი რეზერვი				
ჯამური რაოდენობა	ბ-1	60	62,4	80	80	80
	ბ-2	60	60	60	60	60
	ბ-4	9,615	10	10	10	10
	ბ-5-10	6x3,077	6x3,20	6x4,102	6x5	6x5
	ბ-11-18	8x1,846	8x1,92	8x2,461	8x3,0	8x3,4
ჯამური დატვირთვის ცვლილება, მგ/მ		-12,369	-12,864	-16,492	-20,10	-22,789
აღმოფხვრილი დეფიციტი, მგ/მ		175,214	179,824	210,796	224,10	230,0
დატვირთული დეფიციტი, მგ/მ		54,786	50,176	19,204	5,90	0
დატვირთული ჯამური ცხელი რეზერვი, მგ/მ		49,155	45,04	17,696	8,0	4,8
სისტემის ჯამური დატვირთვა, მგ/მ		791,631	791,136	787,508	783,9	781,2
სისტემის ჯამური ბენეფიცი, მგ/მ		736,845	740,96	768,304	778,0	781,2
სიხშირე ბისტრეფი, პერცენტი		49,615	49,60	49,487	49,375	49,29

მაგალითი 7.4. გავეანალიზოთ სიხშირის პირველადი რეგულირების პროცესი, თუ 73 მაგალითში ნაჩვენებ გენერატორებს შორის სისტემის ჯამური ცხელი რეზერვი (7.19) პროპორციით იქნება განაწილებული.

ამ შემთხვევაში თითოეული გენერატორის ცხელი რემერვი იქნება:

$$P_{\text{გ.1-2-ბრ.}} = \frac{282}{23,637 \cdot 1086} \cdot 30 \cdot 260 = 85,688 \text{ მგვტ (თითოეულის);}$$

$$P_{\text{გ.3-ბრ.}} = \frac{282}{23,637 \cdot 1086} \cdot 15 \cdot 300 = 49,436 \text{ მგვტ;}$$

$$P_{\text{გ.4-ბრ.}} = \frac{282}{23,637 \cdot 1086} \cdot 25 \cdot 50 = 13,732 \text{ მგვტ;}$$

$$P_{\text{გ.5-10-ბრ.}} = \frac{282}{23,637 \cdot 1086} \cdot 20 \cdot 20 = 4,394 \text{ მგვტ (თითოეულის);}$$

$$P_{\text{გ.11-18-ბრ.}} = \frac{282}{23,637 \cdot 1086} \cdot 20 \cdot 12 = 2,637 \text{ მგვტ (თითოეულის).}$$

ცხელი რემერვის სრულ ამოწურვამდე ყველა გენერატორი მონაწილეობს სიხშირის პირველად რეგულირებაში და ამიტომ გზ გენერატორის ამორთვის შემთხვევაში გააქვს:

$$\Sigma P_{\text{გ.ბრ.}} = 232,564 \text{ მგვტ; } \Delta P = 230 \text{ მგვტ; } P_{\text{გ}} = 804 \text{ მგვტ;}$$

$$\rho = 786/804 = 0,9776; \quad K_{\text{გ}} = 26,9338,$$

მაშინ

$$\Delta f = \frac{-230 \cdot 50}{2 \cdot 804 + 26,9338 \cdot 786} = -0,5049 \text{ ჰერცი,}$$

$$\text{ანუ } f = 50 - 0,5049 = 49,495 \text{ ჰერცი.}$$

გენერატორების მიერ განვითარებული დამატებითი გენერაცია:

$$\Delta P_{\text{გ.1,2}} = -30 \cdot 260 \cdot \frac{-0,5049}{50} = 78,76 \text{ მგვტ (თითოეულის);}$$

$$\Delta P_{\text{გ.4}} = -25 \cdot 500 \cdot \frac{-0,5049}{50} = 12,62 \text{ მგვტ;}$$

$$\Delta P_{\text{გ.5-10}} = -20 \cdot 20 \cdot \frac{-0,5049}{50} = 4,04 \text{ მგვტ (თითოეულის);}$$

$$\Delta P_{\text{გ.11-18}} = -20 \cdot 12 \cdot \frac{-0,5049}{50} = 2,42 \text{ მგვტ (თითოეულის).}$$

მომხმარებელთა ჯამური დატვირთვა შემცირდა

$$\Delta P_{\text{გ}} = 2 \cdot 804 \cdot \frac{-0,5049}{50} = -16,24 \text{ მგვტ.}$$

ამრიგად, გენერატორებს შორის ცხელი რეზერვის რაციონალური განაწილების შემთხვევაში ავარიისშემდგომი რეეიმი დამყარდა უკეთესი მაჩვენებლებით (იხ. ქვემოთ ცხრილი).

სისტემის ჯამური ცხელი რეზერვი გენერატორებს შორის განაწილებულია	დამყარებული სიხშირე, პერცი	უზრუნველყოფილია ჯამური დატვირთვა, მგვტ	დაჩენილი ცხელი რეზერვი, მგვტ
ნებისმიერად	49,29	781,2	4,8
(7.19) პროპორციით	49,50	787,76	18,8

შევამოწმოთ რამდენად უფრო მძიმე ავარია იქნება გ₁ გენერატორის ავარიულად გამორთვისას. ამ შემთხვევაში გვაქვს:

$$\sum P_{\text{გაგ}} = 202 \text{ მგვტ}; \quad \Delta P = 180 \text{ მგვტ}; \quad P_{\text{გ}} = 804 \text{ მგვტ};$$

$$\rho = 826/804 = 1,0274; \quad K_{\text{გ}} = 21,634.$$

ამ პირობებში

$$\Delta f = \frac{-180 \cdot 50}{804(2 + 21,634 \cdot 1,0274)} = -0,462 \text{ პერცი}$$

$$\text{ანუ } f = 50 - 0,462 = 49,538$$

გენერატორების მიერ განვითარებული დამატებითი გენერაცია:

$$\Delta P_{\text{გ},2} = -30 \cdot 260 \cdot \frac{-0,462}{50} = 72,07 \text{ მგვტ};$$

$$\Delta P_{\text{გ},3} = -15 \cdot 300 \cdot \frac{-0,462}{50} = 41,58 \text{ მგვტ};$$

$$\Delta P_{\text{გ},4} = -25 \cdot 50 \cdot \frac{-0,462}{50} = 11,55 \text{ მგვტ};$$

$$\Delta P_{\text{გ},5-10} = -20 \cdot 20 \cdot \frac{-0,462}{50} = 3,70 \text{ მგვტ (თითოეულის);}$$

$$\Delta P_{\text{გ},11-18} = -20 \cdot 12 \cdot \frac{-0,462}{50} = 2,22 \text{ მგვტ (თითოეულის).}$$

მომხმარებელთა ჯამური დატვირთვის შემცირება

$$\Delta P_{\text{გ}} = 2 \cdot 804 \cdot \frac{-0,462}{50} = -14,86 \text{ მგვტ.}$$

ეს ავარიული შემთხვევა უფრო ნაკლებად მძიმე არის, ვიდრე წინა, რადგანაც სისტემაში დამყარდა უფრო მაღალი სიხშირე (49,538 პერცი) და ცხელი რეზერვიც უფრო მეტი დარჩა (36,88 მგვტ).

მაგალითი 7.5. დავეშვათ, რომ 7.1 მაგალითში წარმოდგენილი ენერგოსისტემა პარალელურ მუშაობაშია მძლავრ შემოხველ ენერგოსისტემასთან, საიდანაც შემოედინება 300 მგვტ სიმძლავრე და განსახილველი ენერგოსისტემის ჯამური დატვირთვა შეადგენს 1104 მგვტ-ს. მუშაობაში ჩართული გენერატორების მონაცემები იგივეა, რაც 7.1 მაგალითში.

განვიხილოთ შემოხველ სისტემასთან კავშირის ავარიულად გამორთვის შემთხვევა. ამ შემთხვევაში:

სისტემის გენერატორების ჯამური ნომინალური სიმძლავრე $\Sigma P_{\text{გ}} = 1086$ მგვტ; ჯამური ცხელი რეზერვი $\Sigma P_{\text{რ}} = 282$ მგვტ; ჯამური დატვირთვა $P_{\text{დ}} = 1104$ მგვტ; სიმძლავრის დეფიციტი $\Delta P = 300$ მგვტ. ეკვივალენტური სტატიკური მახასიათებლის დახრილობის კოეფიციენტი $K_{\text{კ}} = 23,637$ (მაგალითი 7-1); სიმძლავრის რეზერვის კოეფიციენტი $\rho = 1086/1104 = 0,9837$

ჯამური ცხელი რეზერვი გენერატორებს შორის განაწილებულია (7.19) პროპორციით. მათი რიცხვითი მნიშვნელობები მოცემულია 7.4 მაგალითში.

განვსაზღვროთ სიხშირის შემცირების სიდიდე

$$\Delta f = \frac{-300 \cdot 50}{1104(0,9837 \cdot 23,637 + 2)} = -0,5381.$$

თითოეული გენერატორის მიერ განვითარებული დამატებითი სიმძლავრე:

$$\Delta P_{\text{გ},1,2} = -30 \cdot 230 \cdot \frac{-0,5381}{50} = 83,94 \text{ მგვტ (თითოეულის);}$$

$$\Delta P_{\text{გ},3} = -15 \cdot 300 \cdot \frac{-0,5381}{50} = 48,43 \text{ მგვტ;}$$

$$\Delta P_{\text{გ},4} = -25 \cdot 50 \cdot \frac{-0,5381}{50} = 13,45 \text{ მგვტ;}$$

$$\Delta P_{\text{გ},5-10} = -20 \cdot 20 \cdot \frac{-0,5381}{50} = 4,305 \text{ მგვტ (თითოეულის);}$$

$$\Delta P_{\text{გ},11-18} = -20 \cdot 12 \cdot \frac{-0,5381}{50} = 2,583 \text{ მგვტ (თითოეულის).}$$

დატვირთვის შემცირება

$$\Delta P_{\xi} = 2 \cdot 1104 \frac{-0,5381}{50} = -23,76 \text{ მგვტ.}$$

შეუამოწმეთ (7.12) პირობა:

$$\Delta P = \sum \Delta P_{\xi_i} - \Delta P_{\xi} = 300,7 \text{ მგვტ.}$$

სისტემაში დარჩენილი ცხელი რეზერვი შეადგენს

$$\sum_{\text{ცხ. რეზ.}} = 282 - 300,7 + 23,76 = 5,06 \text{ მგვტ.}$$

მაგალითი 7.6. ქვესადგურზე ღვას $2 \times \text{ТРДН-40000/110}$ ტიპის გრანსფორმატორი, რომლის პარამეტრებია $U_{\text{გრ.ღვ.}} = 10,5$ კვ; $U_{\text{გრ.მალ.}} = 115$ კვ; $n \times \alpha \% = \pm 9 \times 1,78 \%$; $R_g = 1,4$ ომი; $X_g = 34,7$ ომი. ქვესადგურის დატვირთვა: მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში $P_{\text{ჯამ.}} + jQ_{\text{ჯამ.}} = 65 + j40$ მგვა; მინიმალური დატვირთვის რეჟიმში $P_{\text{მინ.}} + jQ_{\text{მინ.}} = 40 + j30$ მგვა. ქვესადგურის მაღალი ძაბვის სალტზე მუშა ძაბვა: მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში $U_{\text{მა.ჯ.}} = 108$ კვ; მინიმალური დატვირთვის რეჟიმში $U_{\text{მინ.}} = 117$ კვ.

დავადგინოთ გამომყვანის შესაბამისი ნომერი ორივე რეჟიმში, თუ ქვესადგურის დაბალი ძაბვის სალტზე საჭიროა უზრუნველყოთ მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში $U_{\text{დაბ.მა.ჯ.}} = 10,7$ კვ., მინიმალური დატვირთვის რეჟიმში $U_{\text{დაბ.მინ.}} = 10,4$ კვ.

1. ვიპოვოთ ძაბვის ვარდნის გრძივი შემდგენი (გამოსახულება 7.34)

$$\Delta U_{\text{გ.მა.ჯ.}} = \frac{1}{2} \frac{65 \cdot 1,4 + 40 \cdot 34,7}{108} = 6,85 \text{ კვ.}$$

$$\Delta U_{\text{გ.მინ.}} = \frac{1}{2} \frac{40 \cdot 1,4 + 30 \cdot 34,7}{117} = 4,69 \text{ კვ.}$$

2. განვსაზღვროთ გრანსფორმაციის კოეფიციენტები ყველა გამომყვანისთვის (გამოსახულებები 7.28; 7.30 და 7.31).

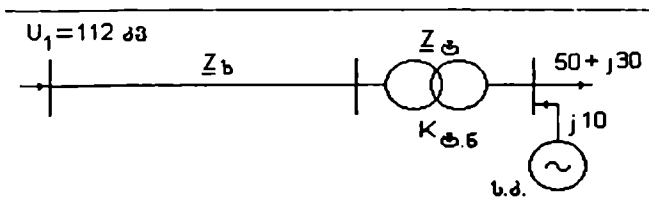
3. ვიპოვოთ $U_{\text{ღვ.}}$ (გამოსახულება 7.32).

ანგარიშის შედეგები წარმოვიდგინოთ ქვემოთ ცხრილის სახით.

ფაქტორული მონაცემები 728				ფაქტორული მონაცემები 730				ფაქტორული მონაცემები 731			
n	K _ფ	პრად. კმ		n	K _ფ	პრად. კმ		n	K _ფ	პრად. კმ	
		აქლ.	აბგ.			აქლ.	აბგ.			აქლ.	აბგ.
9	0,0787	7,98	8,84	1	0,0787	7,98	8,84	1	0,0913	9,23	10,25
8	0,0799	8,08	8,97	2	0,0799	8,08	8,97	2	0,0920	9,41	10,44
7	0,0812	8,21	9,12	3	0,0812	8,21	9,12	3	0,0847	9,58	10,64
6	0,0825	8,34	9,27	4	0,0825	8,34	9,27	4	0,0905	9,76	10,84
5	0,0838	8,48	9,41	5	0,0838	8,48	9,41	5	0,0983	9,94	11,04
4	0,0852	8,62	9,57	6	0,0852	8,62	9,57	6	0,1002	10,14	11,25
3	0,0867	8,77	9,74	7	0,0867	8,77	9,74	7	0,1022	10,34	11,48
2	0,0882	8,92	9,91	8	0,0882	8,92	9,91	8	0,1043	10,55	11,71
1	0,0897	9,07	10,07	9	0,0897	9,07	10,07	9	0,1065	10,77	11,96
0	0,0913	9,23	10,25	10	0,0913	9,23	10,25	10	0,1087	11,0	12,21
-1	0,0930	9,41	10,44								
-2	0,0947	9,58	10,64								
-3	0,0965	9,75	10,84								
-4	0,0983	9,94	11,04								
-5	0,1002	10,14	11,25								
-6	0,1022	10,34	11,48								
-7	0,1043	10,55	11,71								
-8	0,1065	10,77	11,96								
-9	0,1087	11,0	12,21								

ანგარიშის შედეგები გვიჩვენებს, რომ ქვესადგურის დაბალი ძაბვის სალტებზე ძაბვის მოთხოვნილი დონის უზრუნველსაყოფად საჭიროა ტრანსფორმატორის გამოყენება დაეყენოთ: 7.18 ნახაზზე ნაჩვენები გადამრთველი მექანიზმის ელექტრული სქემის შემთხვევაში $n=8$ (მაქსიმალური რეჟიმი) და $n=-1$ (მინიმალური რეჟიმი) მდგომარეობაში: 7.19 ნახაზზე ნაჩვენები გადამრთველი მექანიზმის ელექტრული სქემის შემთხვევაში $n=9$ (მაქსიმალური რეჟიმი) და $n=2$ (მინიმალური რეჟიმი) მდგომარეობაში და ამასთან ა ამოზრჩევი (ნახ. 7.22) დგას 11-12 მდგომარეობაში.

მაგალითი 7.7. განესაზღვროთ მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში მომხმარებლის სალტებზე ძაბვის ამაღლება 7.32 ნახაზზე წარმოდგენილი ქსელში $Q_c = 10$ მგვარ მაკომპენსირებელი დანადგარის დაყენების შემდეგ თუ: $U_1 = 112$ კვ; $P_c + jQ_c = 50 + j30$ მგვა; $Z_b = 3 + j20$ ომი; $Z_g = 0,5 + j40$ ომი; $K_{ტ.6} = 10,5/115 = 0,0913$. იგულისხმება, რომ ძაბვის დამწვევ ტრანსფორმატორს ტრანსფორ-მაციის კოეფიციენტის შეცვლის საშუალება არ გააჩნია.



ნახ. 7.32

განესაზღვროთ ძაბვის ეარდნის გრძივი და განივი შემდგენი კომპენსაციამდე (გამოსახულება 7.48 და 7.49)

$$\Delta U = \frac{50 \cdot (3 + 0,5) + 30(20 + 40)}{112} = 17,63 \text{ კვ.}$$

$$\delta U = \frac{50(20 + 40) - 30(3 + 0,5)}{112} = 25,85 \text{ კვ.}$$

ძაბვა მომხმარებლის სალტებზე კომპენსაციამდე

$$U = 0,0913 \sqrt{(112 - 17,63)^2 + 25,85^2} = 8,93 \text{ კვ.}$$

ძაბვის ეარდნის შემდგენები კომპენსაციის შემდეგ (გამოსახულება 7.52 და 7.53)

$$(\Delta U) = 17,63 - \frac{10 \cdot (20 + 40)}{112} = 12,27 \text{ კვ.}$$

$$(\delta U) = 25,85 + \frac{10 \cdot (3 + 0,5)}{112} = 26,16 \text{ კვ.}$$

ძაბვა მომხმარებლის სალტეზე კომპენსაციის შემდეგ

$$U' = 0,0913 \sqrt{(112 - 12,27)^2 + 26,16^2} = 9,41 \text{ კვ.}$$

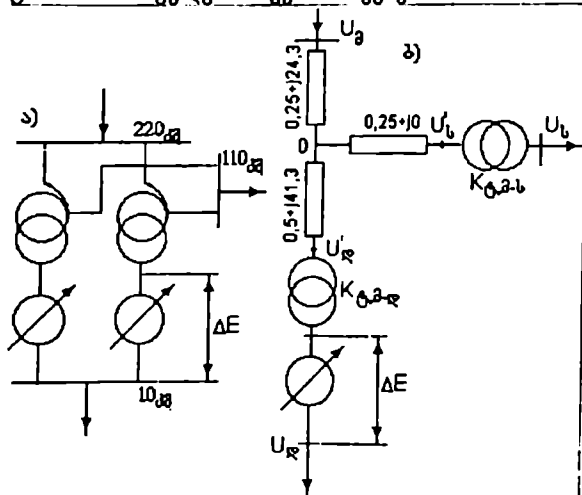
მომხმარებლის სალტეზე ძაბვის გადახრა ნომინალურიდან:

$$\text{კომპენსაციამდე } \frac{8,93 - 10}{10} \cdot 100 = -10,7\%; \text{ კომპენსაციის შემდეგ}$$

$$\frac{9,41 - 10}{10} \cdot 100 = -5,9\% . \text{ ე.ი. რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციით}$$

მომხმარებლის სალტეებზე ძაბვა ამაღლდა 4,8%-ით.

მაგალითი 7.8 დამწვევ ქვესადგურზე ღვას ორი ავტოტრანსფორმატორი АТДЦН-12500/230/121/11 ტიპის. ავტოტრანსფორმატორის საშუალო ძაბვის ფაზურ მხარეს არის РПН მოწყობილობა $12 \pm 6X2\%$ რეგულირების ფარგლებით. გარდა ამისა, დაბალი ძაბვის გრავნილთან მიმდევრობით ჩართულია ვოლტსამაგი ტრანსფორმატორი $11 \pm 10x1\%$ რეგულირების ფარგლებით (ნახ.7.33ა). ავტოტრანსფორმატორთა ჩანაცვლების სქემა ნაჩვენებია 7.33ბ. ნახაზზე.



ნახ. 7.33

მაქსიმალური დატვირთვების რეჟიმში მაღალი ძაბვის მხარეს ძაბვა $U_{\Sigma}=215$ კვ, ხოლო მომხმარებელთა დატვირთვები 110 და 10 კვ ძაბვის სალტეებზე შესაბამისად შეადგენს

$$\underline{S}_{\Sigma, \text{მაქ}}=90+j50 \text{ და } \underline{S}_{\Sigma, \text{ლ.მაქ}}=40+j25 \text{ მგვა.}$$

მინიმალური დატვირთვების რეჟიმში გვაქვს: $U_{\Sigma}=225$ კვ; $\underline{S}_{\Sigma, \text{მინ}}=50+j30$ და $\underline{S}_{\Sigma, \text{ლ.მინ}}=25+j15$ მგვა.

საჭიროა შეუარჩიოთ ავტოტრანსფორმატორისა და ეოლტსა-მატი ტრანსფორმატორის გამოყენებით ისე, რომ 110 და 10 კვ ძაბვის მხარეს განხორციელდეს ძაბვის შემხვედრი რეგულირება. კერძოდ, მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში სასურველია იყოს, შესაბამისად, 115 და 10,5 კვ, ხოლო მინიმალური დატვირთვების რეჟიმში კი 110 და 10 კვ.

ამოხსნა. ნომინალური ძაბვის მიხედვით განვსაზღვროთ სიმძლავრეთა დანაკარგები გრაფიკებში და შესაბამისად $\underline{S}'_{\Sigma}$, $\underline{S}'_{\Sigma, \text{ლ.}}$ და $\underline{S}'_{\Sigma, \text{ლ.}}$.

გაანგარიშების საფუძველზე მივიღეთ:
მაქსიმალური დატვირთვების რეჟიმში

$$\underline{S}'_{\Sigma, \text{მაქ}} = 40,02 + j26,90, \quad \underline{S}'_{\Sigma, \text{ლ.მაქ}} = 90,05 + j50,$$

$$\underline{S}'_{\Sigma, \text{ლ.მაქ}} = 130,19 + j88,36 \text{ მგვა.}$$

მინიმალური დატვირთვების რეჟიმში

$$\underline{S}'_{\Sigma, \text{მინ}} = 25,01 + j15,73, \quad \underline{S}'_{\Sigma, \text{ლ.მინ}} = 50,02 + j30,$$

$$\underline{S}'_{\Sigma, \text{ლ.მინ}} = 75,07 + j49,61 \text{ მგვა}$$

ორივე რეჟიმში გამოთვალეთ დაყვანილი ძაბვები U'_{Σ} და $U'_{\Sigma, \text{ლ.}}$. ჯერ განვსაზღვროთ ძაბვა ჩანაცვლების სქემის 0 წერტილში

$$U_{0, \text{მაქ}} = 215 - \frac{130,19 \cdot 0,25 + 88,36 \cdot 24,3}{215} = 204,9 \text{ კვ.}$$

შესაბამისად,

$$\underline{U}'_{\Sigma, \text{მაქ}} = 204,9 - \frac{90,05 \cdot 0,25 + 50 \cdot 0}{204,9} = 204,8 \text{ კვ,}$$

$$\underline{U}'_{\Sigma, \text{ლ.მაქ}} = 204,9 - \frac{40,02 \cdot 0,5 + 26,9 \cdot 41,3}{204,9} = 199,38 \text{ კვ}$$

ანალოგიურად,

$$U_{0, \text{მა}} = 225 - \frac{75,07 \cdot 0,25 + 49,61 \cdot 24,3}{225} = 219,6 \text{ კვ}$$

$$U'_{\text{ს,მა}} = 219,6 - \frac{50,02 \cdot 0,25 + 30 \cdot 0}{219,6} = 219,5 \text{ კვ}$$

$$U'_{\text{ლ,მა}} = 219,6 - \frac{25,01 \cdot 0,5 + 15,73 \cdot 41,3}{219,6} = 216,6 \text{ კვ}$$

განესაზღვროთ ვოლტსამაგი ტრანსფორმატორის ე.მ.ძალა, რომელიც საჭიროა 10კვ ძაბვის სალტებზე ძაბვის შემხვედრი რეგულირებისთვის:

მაქსიმალური დატვირთვების რეჟიმში

$$U_{\text{დაბ.სასურ.}} = 10,5 = 199,38 \cdot \frac{11}{230} + \Delta E = 9,54 + \Delta E.$$

აქედან

$$\Delta E = 0,96 \text{ კვ,}$$

ანუ

$$\Delta E\% = \frac{0,96}{11} \cdot 100 = 8,7\%.$$

შევარჩიოთ +9 გამომყვანი და ძაბვა

$$U_{\text{ლ.მაქ.}} = 9,54 + \frac{11 \cdot 9}{100} = 10,53 \text{ კვ.}$$

მინიმალური დატვირთვების რეჟიმში

$$U_{\text{დაბ.სასურ.}} = 10 = 216,6 \cdot \frac{11}{230} + \Delta E = 10,33 + \Delta E,$$

აქედან

$$\Delta E = -0,33 \text{ კვ,}$$

ანუ

$$\Delta E\% = \frac{-0,33}{11} \cdot 100 = -3\%.$$

შევარჩიოთ -3 გამომყვანი და ძაბვა

$$U_{\text{ლ.მა}} = 10,33 + \frac{11 \cdot (-3)}{100} = 10 \text{ კვ.}$$

დავადგინოთ ავტოტრანსფორმატორის გამომყვანის ნომერი, რომელიც 110 კვ ძაბვის სალტებზე უზრუნველყოფს ძაბვის შემხვედრ რეგულირებას:

მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში

$$U_{\text{სამასურე}} = 115 = 204,8 \cdot \frac{121 \left(1 + \frac{n \cdot 2}{100} \right)}{230},$$

აქედან

$$n = 3,37$$

შევირჩიოთ $n=3$ გამომყვანი და ძაბვა

$$U_{\text{სამასურე}} = 204,8 \cdot \frac{121 \left(1 + \frac{3 \cdot 2}{100} \right)}{230} = 114,21 \text{ კვ.}$$

მინიმალური დატვირთვის რეჟიმში

$$U_{\text{სამასურე}} = 110 = 219,5 \cdot \frac{121 \left(1 + \frac{n \cdot 2}{100} \right)}{230},$$

აქედან

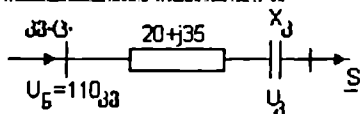
$$n = -2,37$$

შევირჩიოთ $n=-2$ გამომყვანი და ძაბვა

$$U_{\text{სამასურე}} = 219,5 \cdot \frac{121 \left(1 - \frac{2 \cdot 2}{100} \right)}{230} = 110,86 \text{ კვ.}$$

მაგალითი 7.9 რაიონული დამწვევი ქვესადგური კვების ცენტრთან დაკავშირებულია 110კვ ძაბვის ელექტროგადაცემის ხაზით, რომლის გრძივი წინაღობა $Z=20+j35$ ომი. კვების ცენტრის ძაბვა $U_1=115$ კვ. ქვესადგურის საანგარიშო დატვირთვა $S=30+j18$ მგვა. მომხმარებლის მუშაობის პირობიდან გამომდინარე დატვირთვის ამ რეჟიმში ქვესადგურის მაღალი ძაბვის სალტებზე მოითხოვება $U_2=107$ კვ.

ხაზში ძაბვის დანაკარგის შესამცირებლად გათვალისწინებულია ამ ხაზში მიმდევრობით ჩაირთოს KC2A-0,66-40 ტიპის ერთფაზა სტანდარტული კონდენსატორები, რომელთა ძაბვა $U_j=0,66$ კვ და სიმძლავრე 40კვარ (ნახ.7.34).



ნახ. 7.34

გამოეთვალთ ერთ ფაზაში ჩართულ კონდენსატორთა საერთო რაოდენობა.

ამოხსნა. ხაზში ძაბვის დანაკარგი კონდენსატორთა ბაგარის ჩართვამდე

$$\Delta U = \frac{30 \cdot 20 + 18 \cdot 35}{107} = 11,49 \text{ კვ}$$

მომხმარებლის მოთხოვნის თანახმად ხაზში ძაბვის დასაშვები დანაკარგი

$$\Delta U_{\text{დს}} = 115 - 107 = 8 \text{ კვ.}$$

განესაზღვროთ კონდენსატორთა ბაგარის წინაღობა, რომელიც ძაბვის დანაკარგს შეამცირებს 8 კვ-მდე

$$8 = \frac{30 \cdot 20 + 18(35 - X_j)}{107},$$

აქედან

$$X_j = 20,78 \text{ ომი.}$$

დენი ხაზში (ფაზური)

$$I_b = \frac{\sqrt{30^2 + 20^2}}{\sqrt{3} \cdot 110} \cdot 10^3 = 189,5 \text{ ა.}$$

KC2A-0,66-40 კონდენსატორის ნომინალური დენი

$$I_{\text{კნომ}} = \frac{40000}{660} = 60,6 \text{ ა.}$$

ფარდობა

$$\frac{189,5}{60,6} = 3,13$$

გვიჩვენებს, რომ ერთ ფაზაში პარალელურად ჩართული უნდა იქნეს $m > 3,13$ კონდენსატორი. შევირჩიოთ $m = 4$ კონდენსატორი.

ერთი კონდენსატორის წინაღობა

$$X_{\text{კნომ}} = \frac{660}{60,6} = 10,9 \text{ ომი}$$

მიმდევრობით ჩართული კონდენსატორების რაოდენობა გამოითვლება შემდეგი გამოსახულებით

$$\frac{X_{\text{კნომ}} \cdot n}{m} = X_j$$

ანუ

$$\frac{10,9 \cdot n}{4} = 20,78$$

აქედან

$$n=8$$

კონდენსატორთა საერთო რაოდენობა $3 \cdot n \cdot m = 96$;

კონდენსატორთა ბაგარეის დადგმული სიმძლავრე

$$Q_{\text{დადგ}} = 96 \cdot 40 \cdot 10^{-3} = 3,84 \text{ მგვარ;}$$

ნომინალური დენი

$$I_{\text{ანო}} = 60,6 \cdot 4 = 242,4 \text{ ა;}$$

ექვივალენტური წინაღობა

$$X_g = \frac{10,9 \cdot 8}{4} = 21,8 \text{ ომი.}$$

ხაზში ძაბვის დანაკარგი კონტენსატორთა ბაგარეის ჩართვის შემდეგ

$$\Delta U = \frac{30 \cdot 20 + 18(35 - 21,8)}{107} = 7,83 \text{ კვ,}$$

რაც დასაშვებზე ნაკლებია.

მაგალითი 7.10 რაიონული დამწვევი ქვესადგური, სადაც ღვას ორი 40 მგვა სიმძლავრის გრანსფორმატორი ძაბვის მარეგულირებელი მოწყობილობის გარეშე, იკვებება 110 კვ ძაბვის ორჯაჭვა ხაზით. გრანსფორმატორების გრანსფორმაციის კოეფიციენტი $K_g = 10,5/115 = 0,0913$; ხაზის რეაქტიული წინაღობა $X_g = 15$, ხოლო გრანსფორმატორებისა $X_g = 20$ ომი.

ქვესადგურის დაბალი ძაბვის სალტეზე ძაბვა, მიყვანილი მაღალი ძაბვის საფეხურზე, მაქსიმალური და მინიმალური დატვირთვების რეჟიმებში შესაბამისად უნდა იყოს $U'_{\text{მაქ}} = 105$ კვ და

$$U'_{\text{მინ}} = 115 \text{ კვ.}$$

განესაზღვროთ სინქრონული კომპენსატორის მინიმალური სიმძლავრე, რომელიც ქვესადგურის დაბალი ძაბვის სალტეებზე უზრუნველყოფს ძაბვის შემხვედრ რეგულირებას.

არასრული აგზნების რეჟიმში კომპენსატორს შეუძლია იმუშაოს ნომინალური სიმძლავრის არაუმეტეს 50%-იანი დატვირთვით.

ამოხსნა. ძაბვის შემხვედრი რეგულირების თანახმად ქვესადგურის დაბალი ძაბვის სალტეზე უნდა იყოს $U_{\text{დაბ.მაქ}} = 10,7$ კვ და $U_{\text{დაბ.მინ}} = 10,3$ კვ. ანუ მიყვანილი მნიშვნელობები $U'_{\text{სას.უმაქ}} = 117,2$ და

$$U'_{\text{სას.უმინ}} = 112,8 \text{ ს.}$$

მაშასადამე, ელექტროგადაცემაში ძაბვის დანაკარგი მაკომპენსირებული დანადგარის დაყენებით უნდა შემცირდეს: მაქსიმალური დატვირთვების რეჟიმში

$$U'_{\text{სასურმატ}} - U'_{\text{მატ}} = 117,2 - 105 = 12,2 \text{ კე};$$

მინიმალური დატვირთვების რეჟიმში

$$U'_{\text{სასურმატ}} - U'_{\text{მინ}} = 112,8 - 115 = -2,2 \text{ კე}.$$

ელექტროგადაცემის ჯამური რეაქტიული წინაღობა

$$X = X_b + X_g = 15 + 20 = 35 \text{ ომი}.$$

რეაქტიული დატვირთვის მაკომპენსირებული დანადგარის სიმძლავრე გამოეთვალათ (753) გამოსახულებით;

მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში

$$12,2 = \frac{Q_j \cdot 35}{110}$$

აქედან

$$Q_j = 38,3 \text{ მგვარ};$$

მინიმალური დატვირთვების რეჟიმში

$$-2,2 = \frac{Q_j \cdot 35}{110},$$

აქედან

$$Q_j = -6,9 \text{ მგვარ}$$

მაქსიმალური დატვირთვების რეჟიმის მიხედვით შევირჩიოთ ორი სინქრონული კომპენსატორი KC-25000-11 ტიპის, რომელთა ნომინალური სიმძლავრეა 25 მგვარ თითოეულის. აქედან გამოვძინარე, მინიმალური დატვირთვების რეჟიმში დასაშვებია მუშაობაში ჩართული იქნეს მხოლოდ ერთი კომპენსატორი.

თავი 8. ელექტრული ენერგიის დანაკარგები და მათი შემცირების ღონისძიებები

8.1. შესავალი

ენერგოსისტემის მუშაობის ძირითად ამოცანას წარმოადგენს მინიმალური დანახარჯების პირობებში მომხმარებელთა საიმედო მომარაგება მაღალი ხარისხის ელექტრული ენერგიით. დანახარჯების ერთერთი ძირითადი შემადგენელი ნაწილია აქტიური ენერგიის დანაკარგები ელექტრულ ქსელში. ანალიზისთვის მიღებულია განვიხილოთ დანაკარგების შემდეგი სახეები [22]:

- საანგარიშსწორებო დანაკარგები, რომელიც წარმოადგენს ყველა სახის წყაროდან (სისტემის საკუთარი ელექტროსადგურები, სხვა უწყების ელექტროსადგურები და მეზობელი ენერგოსისტემები) განსახილველ სისტემაში შემოსული და მომხმარებელთა მიერ მოხმარებული (რეალიზებული) ელექტროენერგიების რაოდენობათა შორის სხვაობას. რიგ შემთხვევაში, რეალიზებული ელექტრული ენერგიის მოცულობა დგინდება მომხმარებლის მიერ დახარჯული ენერგიის საფასურის გადახდის მიხედვით;

ტექნიკური დანაკარგები, რომელიც განისაზღვრება ქსელის მუშაობის რეჟიმების მიხედვით და წარმოადგენს ელექტროენერგიის იმ მოცულობას, რაც იხარჯება ქსელის ელემენტების ღენგამგარი ნაწილების გახურებაზე, ელექტრომაგნიტური ველების შექმნაზე და სხვა ფაქტორებზე;

კომერციული დანაკარგები, რომელიც წარმოადგენს საანგარიშსწორებო და ტექნიკურ დანაკარგებს შორის სხვაობას. ამ სახის დანაკარგები განპირობებულია, ერთი მხრივ, ტექნიკური დანაკარგების გაანგარიშებებში დაშვებული უზუსტობით და, მეორე მხრივ, ელექტროენერგიის აღრიცხვის მექანიზმების არასრულყოფილებით. კერძოდ: ელექტრომრიცხველების ჩვენებების არაერთდროული და არაზუსტი აღრიცხვა; აღრიცხვისთვის გამოყენებული ხელსაწყოების ცდომილება; მოხმარებული ენერგიის საფასურის გადახდის არაერთდროულობა; აურიცხავი ელექტროენერგია; ენერგიის დატაცება და სხვა.

უნდა აღინიშნოს, რომ კომერციული დანაკარგების გარკვეული ნაწილი ტექნიკურად გარდაუვალია, რადგანაც ელექტრომრი-

ცხველების ჩვენებების ერთდროული და აბსოლუტური სიმუცით ალება პრაქტიკულად შეუძლებელია და ამასთან, მათ (მრიცხველებს) გააჩნიათ საკუთარი ცდომილება.

ელექტრულ ქსელებში ელექტროენერგიის დანაკარგების შემცირების ამოცანა ენერგოსისტემის მუშაობის ეკონომიკურობის ამაღლების ზოგადი ამოცანის შემადგენელი ნაწილია.

დანაკარგების შესამცირებლად არსებობს სხვადასხვა სახის ღონისძიება, რომლებიც პირობითად შეიძლება დავეყთ ორ მთავარ ჯგუფად – ორგანიზაციული და ტექნიკური.

დანაკარგების შემცირების ორგანიზაციული ღონისძიება პრაქტიკულად არ მოითხოვს დამატებით კაპიტალურ ხარჯებს. აქ განიხილება ელექტრული ქსელის საექსპლუატაციო მომსახურების სრულყოფა, მუშა სქემებისა და მუშაობის რეჟიმების ოპტიმიზაცია, მოხმარებული (რეალიზებული) ენერგიის აღრიცხვის მექანიზმის სრულყოფა, ენერგიის დატაცების საწინააღმდეგო ღონისძიებები და ა.შ.

ტექნიკური ღონისძიებები მოითხოვს დამატებით კაპიტალურ ხარჯს, რომელიც გარკვეულ ნორმატიულ ვადაში მთლიანად გამოსყიდული უნდა იქნეს დანაკარგების შემცირების შედეგად საექსპლუატაციო ხარჯებში მიღებული ეკონომიით.

8.2 ელექტრული ენერგიის ტექნიკური დანაკარგების გაანგარიშების მეთოდები

ელექტრულ ქსელში ენერგიის დანაკარგები, ზოგადად, შეიძლება დავეყთ ორ ჯგუფად: დანაკარგები ქსელის ელემენტთა განივ G გამტარობაში და დანაკარგები ამავე ელემენტთა გრძივ R წინააღობაში.

დატვირთვის რეჟიმის მიხედვით ქსელის ელემენტზე მოდებული ძაბვა გარკვეულ ფარგლებში იცვლება. ასევე იცვლება ქსელის ელემენტის აქტიური წინააღობა, რომელზედაც გავლენას ახდენს როგორც თვით ამ ელემენტის დატვირთულობა (მისი გახურება), ასევე გარემოს ტემპერატურა. ამ პარამეტრთა აღნიშნული ცვალებადობის გათვალისწინება საკმარისად რთულია და ამიტომ, რიგ შემთხვევებში, ენერგიის დანაკარგების გაანგარიშებისას ვიღებთ მათ გასაშუალოებულ მნიშვნელობებს.

განივ გამტარობაში დანაკარგები დამოკიდებულია მხოლოდ ელემენტზე მოდებული მუშა ძაბვის მნიშვნელობაზე, რომლის გასაშუალოებული მნიშვნელობა დროის განსახილველ პერიოდში შეიძ-

ლება ჩაითვალოს ნომინალურის ტოლად. ამ შემთხვევაში ენერგიის დანაკარგების საანგარიშო გამოსახულებას აქვს სახე

$$\Delta \Theta_G = \Delta P_G \cdot T_0, \quad (8.1)$$

სადაც: ΔP_G - სიმძლავრის დანაკარგი ელემენტის G გამტარობაში ნომინალური ძაბვის დროს; T_0 - ამ ელემენტის ჩართული მდგომარეობის ხანგრძლივობა.

თუ ქსელის ელემენტი დროის განსახილველ t ინტერვალში მუშაობს მუდმივი $S(t)=const$ დატვირთვის რეჟიმში, მაშინ სიმძლავრის დანაკარგები მუდმივია $\Delta P_R = const$ და დაკარგული ენერგია ინგარიშება (8.1) ფორმულის ანალოგიურად

$$\Delta \Theta_R = \Delta P_R \cdot t. \quad (8.2)$$

პრაქტიკულად ქსელის ელემენტების დატვირთულობა წლის განმავლობაში საკმარისად ღირ ფარგლებში იცელება და, შესაბამისად, მათ გრძივ წინააღმდეგობაში ელექტრული ენერგიის დანაკარგების გაანგარიშებას საკმარისად გართულებულია. ასეთ პირობებში სარგებლობენ გაანგარიშების სხვადასხვა მეთოდით.

ყველაზე უფრო მარტივი და ზუსტი მეთოდია დანაკარგების გაანგარიშება დატვირთვის გრაფიკის მიხედვით, რომელსაც ხშირად გრაფიკული ინტეგრირების მეთოდ უწოდებენ [11; 16; 22; 46; 48; 51]. ამ მეთოდით ენერგიის დანაკარგების გაანგარიშება ტარდება ყოველი საათისთვის, რომლის განმავლობაშიც იგულისხმება, რომ ელექტრული დატვირთვა სიდიდით მუდმივია.

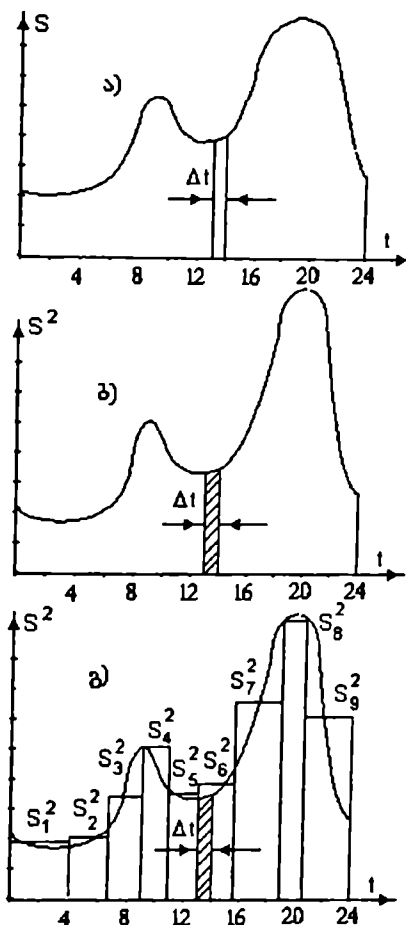
განვიხილოთ დატვირთვის დღელაბური გრაფიკი, რომელსაც გააჩნია $S=S(t)$ მრუდი წირის ფორმა (ნახ.8.1ა). დროის რაიმე მცირე Δt ინტერვალში ქსელის ელემენტის R წინააღმდეგობაში მოცემული დატვირთვით გამოწვეული დანაკარგები

$$\Delta(\Delta \Theta_R) = \frac{(S(t))^2}{U_\phi^2} R \cdot \Delta t,$$

ანუ საანგარიშო T_0 დროის შუალედში

$$\Delta \Theta_R = \frac{R}{U_\phi^2} \int_0^{T_0} (S(t))^2 dt. \quad (8.3)$$

როგორც ვიხილეთ $S=S(t)$ დატვირთვა ანალიზური სახით არ არსებობს, იგი მოიცემა მხოლოდ გრაფიკის ან ცხრილის სახით. აქედან გამომდინარე, ზემოთ აღნიშნული ინტეგრირების ჩატარება ანალიზური გზით არ მოხერხდება. იგი შეიძლება გამოეთვალიერებინათ გრაფიკული ინტეგრირების მეთოდით.



ნახ. 8.1 ენერგიის დანაკარგების გაანგარიშებისთვის: ა-დატვირთვის დღელდამური გრაფიკი; ბ-დატვირთვის კვადრატული გრაფიკი; გ-საფეხუროვანი გრაფიკი

ამ მიზნით მოცემულ გრაფიკს დაყოფენ n რაოდენობის მცირე Δt , ინტერვალებად და ააგებენ ე.წ. დატვირთვის კვადრატულ გრაფიკს (ნახ.8.1ბ). დროის 1 -ურ ინტერვალში ვიპოვით ენერგიის დანაკარგები (ნახაზზე დამრიგული წერტილი)

$$\Delta(\Delta\Theta_R)_i = \frac{(S_i(t))^2}{U_6^2} R \cdot \Delta t_i,$$

მაშინ საანგარიშო პერიოდისთვის გვექნება

$$\Delta\Theta_R = \sum_{i=1}^n \frac{(S_i(t))^2}{U_6^2} R \Delta t_i,$$

ანუ

$$\Delta\Theta_R = \frac{R}{U_6^2} \sum_{i=1}^n (S_i(t))^2 \Delta t_i. \quad (8.4)$$

რაც უფრო მცირეა Δt_i , ანუ რაც უფრო დიდია n , მით უფრო ზუსტია (8.4) გამოსახულებით მიღებული შედეგები.

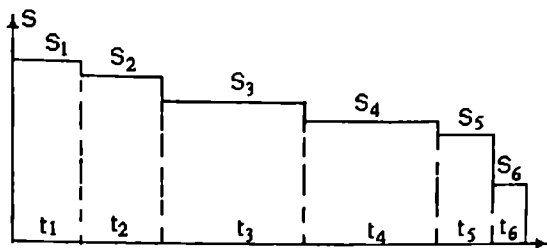
აღნიშნული მეთოდი მარტივია, მაგრამ შრომატევადია. მისი გამარტივების მიზნით დატვირთვის კვადრატული გრაფიკი დაფოტო ისეთ Δt_i ინტერვალებად, რომლის შუალედში დატვირთვის კვადრატის ცვლილების ხასიათი უახლოვდება წრფეწირს. ამ გზით დროის ცალკეული ინტერვალისთვის მივიღებთ დატვირთვის კვადრატის ტრაპეციულ გრაფიკს. ეს, რიგ შემთხვევაში, საშუალებას გვაძლევს შევამციროთ ინტერვალთა n რაოდენობა და, შესაბამისად, გაანგარიშების შრომატევადობა. გაანგარიშების შრომატევადობა კიდევ უფრო შემცირდება, თუ ყოველი მიღებული ტრაპეციისთვის წინასწარ დავადგენთ დატვირთვის კვადრატის საშუალო მნიშვნელობას $S_1^2, S_2^2 \dots$ (ნახ.8.1გ)

აღნიშნული მეთოდით ადვილად შეგვიძლია გამოვთვალოთ ელექტრული ენერგიის წლიური დანაკარგები, თუ მოცემულია წლიური დატვირთვის გრაფიკი ხანგრძლივობის მიხედვით (ნახ.8.2).

ელექტრული ენერგიის წლიური დანაკარგების შეფასების მიზნით პრაქტიკაში ფართოდ გამოიყენება მნიშვნელოვნად მარტივი, მაგრამ, უფრო დაბალი სიზუსტის მქონე მეთოდი, რომელსაც მაქსიმალური დანაკარგების დროის მეთოდს უწოდებენ

$$\Delta\Theta_R = \Delta P_{R, \text{მაქს}} \cdot \tau = \frac{S_{\text{მაქს}}^2}{U_6^2} R \cdot \tau, \quad (8.5)$$

სადაც: $\Delta P_{R, \text{მაქს}}$ - ქსელის ელემენტის R წინააღობაში აქტიური სიმბლავრის დანაკარგები წლის იმ მომენტში, როცა მოცემული ელემენტი დატვირთული არის მაქსიმალურად ($S_{\text{მაქს}}$); τ - მაქსიმალური დანაკარგის დრო.

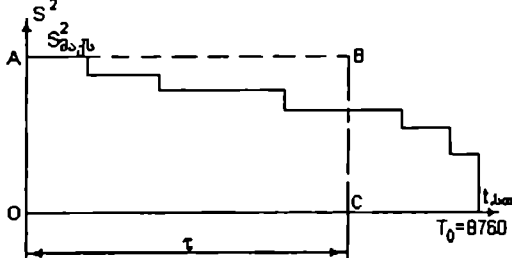


ნახ. 8.2 წლიური დაგვირთვის გრაფიკი
ხანგრძლივობის მიხედვით

მაქსიმალური დანაკარგების დრო τ , დროის ის მუდღეობა, რომლის განმავლობაში მომხმარებელი თუ იმუშავებდა მაქსიმალური დაგვირთვით, ქსელში გვექნებოდა იგივე დანაკარგები, რაც რეალური გრაფიკით მუშაობისას. (8.3) და (8.5) გამოსახულებათა შედარებით ვღებულობთ

$$\tau = \frac{1}{S_{\text{მაქ}}^2} \int_0^{t_{\text{კ}}} [S(t)]^2 dt$$

τ - ს გრაფიკული წარმოდგენა ნაჩვენებია 8.3 ნახაზზე. აქ OABC მართკუთხედის ფართობი დაგვირთვის კვადრატული გრაფიკით შემოსაზღვრული ფართის ტოლია.



ნახ. 8.3 მაქსიმალური დანაკარგების დროის (τ) გრაფიკული განსაზღვრება

მაქსიმალური დანაკარგების დროის მეთოდი გულისხმობს, რომ აქტიური და რეაქტიული დაგვირთვების წლიური გრაფიკები ერთმანეთის მსგავსია ანუ რეაქტიული დაგვირთვის კოეფიციენტი $\cos \phi$ და, შესაბამისად, აქტიური სიმძლავრის კოეფიციენტი $\cos \phi$, წლის განმავლობაში მცირე ფარგლებში მერყეობს.

მაქსიმალური დანაკარგების დრო დამოკიდებულია მაქსიმალური დატვირთვის გამოყენების ხანგრძლივობაზე ($T_{\text{მაქ}}$) და აქტიური სიმძლავრის კოეფიციენტზე ($\cos \varphi$). მისი მნიშვნელობა შეიძლება დაეადგინოთ: 1) შესაბამისი მრუდეების საშუალებით (ნახ.8.4); 2) ემპირული ფორმულით, როცა $\cos \varphi = 0,80 \pm 0,05$

$$\tau = (0,124 + T_{\text{მაქ}} \cdot 10^{-4})^2 \cdot 8760; \quad (8.6)$$

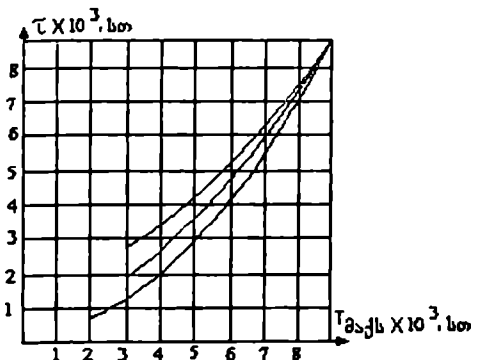
3) წლიური გრაფიკის მოხაზულობის გათვალისწინებით [56].

$$\tau = 2T_{\text{მაქ}} - 8760 + \frac{8760 - T_{\text{მაქ}}}{1 + \frac{T_{\text{მაქ}}}{8760} - 2 \frac{P_{\text{მინ}}}{P_{\text{მაქ}}}} \left(1 - \frac{P_{\text{მინ}}}{P_{\text{მაქ}}} \right)^2 \quad (8.7)$$

ამრიგად, ქსელის ნებისმიერ ელემენტში ენერგიის ჯამური წლიური დანაკარგები შეიძლება ჩავწეროთ შემდეგ სახეში

$$\Delta \Theta = \Delta \Theta_G + \Delta \Theta_R,$$

ანუ (8.1) და (8.5) გამოსახულებათა გათვალისწინებით გვაქვს



ნახ. 8.4 $\tau = \tau(T_{\text{მაქ}}, \cos \varphi)$ ფუნქციონალური დამოკიდებულება

$$\Delta \Theta = \Delta P_G \cdot T_0 + \Delta P_{R, \text{მაქ}} \cdot \tau. \quad (8.8)$$

მიღებული გამოსახულება ელექტროგადაცემის ხაზებისთვის მიიღებს სახეს

$$\Delta \Theta_{\text{ხაზ}} = \Delta P_{\text{გვ}} \cdot T_0 + \Delta P_{R, \text{მაქ}} \cdot \tau. \quad (8.9)$$

ანალოგიურად, ორგრაგნილა ტრანსფორმატორებისთვის გვაქვს

$$\Delta\Theta_{\text{გრ}} = \Delta P_{\text{კლ}} \cdot T_0 + \Delta P_{\text{გგ}} \left(\frac{S_{\text{აქტ}}}{S_{\text{გ}}} \right)^2 \cdot \tau, \quad (8.10)$$

ხოლო სამგრაგნილა ტრანსფორმატორებისთვის და ავტოტრანსფორმატორებისთვის კი

$$\begin{aligned} \Delta\Theta_{\text{გრ}} = & \Delta P_{\text{კლ}} \cdot T_0 + \Delta P_{\text{გგ(გ)}} \left(\frac{S_{\text{აქტ(გ)}}}{S_{\text{გ}}} \right)^2 \tau_{\text{გ}} + \Delta P_{\text{გგ(ს)}} \left(\frac{S_{\text{აქტ(ს)}}}{S_{\text{გ}}} \right)^2 \tau_{\text{ს}} + \\ & + \Delta P_{\text{გგ(ლ)}} \left(\frac{S_{\text{აქტ(ლ)}}}{S_{\text{გ}}} \right)^2 \tau_{\text{ლ}}. \end{aligned} \quad (8.11)$$

როცა მოცემულ ელემენტში გადის $P_1, P_2, \dots$ სხვადასხვა დატვირთვა, რომლებიც ხასიათდებიან მაქსიმალური დატვირთვის გამოყენების T_1, T_2 სხვადასხვა ხანგრძლივობებითა და აქტიური სიმძლავრის სხვადასხვა კოეფიციენტებით $\cos \varphi_1, \cos \varphi_2 \rightarrow$ მაშინ საჭიროა მოცემული ელემენტისთვის წინასწარ დადგენილი იქნეს მაქსიმალური დატვირთვის საშუალომეწონილი ხანგრძლივობა

$$T_{\text{საშ.გეფ}} = \sum P_i T_i / \sum P_i \quad (8.12)$$

და აქტიური სიმძლავრის კოეფიციენტის საშუალო მეწონილი მნიშვნელობა

$$\cos \varphi_{\text{საშ.გეფ}} = \sum P_i / \sum (P_i / \cos \varphi_i) \quad (8.13)$$

შემდეგ (8.6) ან (8.7) გამოსახულებებით ან 8.4 ნახაზზე ნაჩვენები მრუდეების დახმარებით განესაზღვრათ მაქსიმალური დანაკარგების დროს τ .

მთლიანად ენერგოსისტემაში ენერგიის წლიური დანაკარგები განისაზღვრება ცალკეულ ელემენტში ენერგიის წლიური დანაკარგების აჯამების გზით

$$\Delta\Theta_{\text{სისტ}} = \sum_{j=1}^m \left(\Delta P_{\text{გ}} T_{0j} + \Delta P_{\text{გგ,აქტ}} \cdot \tau_j \right),$$

სადაც m – ელემენტთა საერთო რაოდენობა სისტემაში.

ამ გამოსახულების გამოყენება გარკვეულწილად მოუხერხებელია სისტემის საწყის ინფორმაციათა დიდი რაოდენობისა და ამ ინფორმაციათა მოპოვების სირთულის გამო.

ამიტომ სარგებლობენ უფრო გამარტივებული გამოსახულებით

$$\Delta\mathcal{E}_{\text{სისტ}} = \left(\sum_{j=1}^n \Delta P_{Gj} \right) \cdot 8760 + \Delta P_{R, \text{მაქს}} \cdot \tau, \quad (8.14)$$

სადაც: $\sum_{j=1}^n \Delta P_{Gj}$ - სისტემის ყველა ელემენტის განივ აქტიურ გამტარობაში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები (თითქმის მუდმივი სიდიდის დანაკარგები გრანსფორმატორების ფოლადში, რეაქტორებში, გვირგვინის მოვლენაზე და სხვა); 8760 - საათების რაოდენობა წელიწადში; $\Delta P_{R, \text{მაქს}}$ - ელექტრული ქსელის ყველა ელემენტის აქტიურ წინაღობებში აქტიური სიმძლავრის ჯამური დანაკარგები სისტემის მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში; τ - მაქსიმალური დანაკარგების დრო მთელი სისტემისთვის, რომელიც გამოითვლება (8.6) ან (8.7) გამოსახულებებით ან 8.4 ნახაზზე წარმოდგენილი მრუდების დახმარებით, რისთვისაც წინასწარ უნდა დაეადგინოთ სისტემის მაქსიმალური დატვირთვის გამოყენების ხანგრძლივობის საშუალო-მეწონილი მნიშვნელობა

$$T_{\text{საშუა}} = \mathcal{E}_{\text{წლ}} / P_{\text{მაქს}}, \quad (8.15)$$

და საშუალომეწონილი სიმძლავრის კოეფიციენტი

$$\cos \varphi_{\text{საშუა}} = P_{\text{მაქს}} / \sqrt{P_{\text{მაქს}}^2 + Q_{\text{მაქს}}^2} \quad (8.16)$$

ამ გამოსახულებებში: $\mathcal{E}_{\text{წლ}}$ - სისტემის მიერ მოხმარებული წლიური ენერგია; $P_{\text{მაქს}}$, $Q_{\text{მაქს}}$ - სისტემის მაქსიმალური დატვირთვის რეჟიმში აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრე.

დანაკარგების გაანგარიშების τ -ს მეთოდი მნიშვნელოვან ცდომილებას იძლევა, განსაკუთრებით იმ შემთხვევაში, როცა რეაქტიული დატვირთვის კოეფიციენტი (tgφ) შედარებით ფართო დიაპაზონში იცვლება. ცდომილების შემცირების მიზნით სარგებლობენ 2τ -ს მეთოდით. ამ შემთხვევაში ქსელში აქტიური სიმძლავრის მაქსიმალური დანაკარგები განიხილება როგორც დანაკარგების ჯამი, გამოწვეული ცალცალკე აქტიური და რეაქტიული დატვირთვებით

$$\Delta P_{\text{მაქს}} = \frac{P_{\text{მაქს}}^2 + Q_{\text{მაქს}}^2}{U^2} R = \frac{P_{\text{მაქს}}^2}{U^2} R + \frac{Q_{\text{მაქს}}^2}{U^2} R = \Delta P_{P, \text{მაქს}} + \Delta P_{Q, \text{მაქს}}$$

შესაბამისად, მაქსიმალური დანაკარგების დროს წარმოადგენენ τ_P და τ_Q სიდიდეებით

$$\tau_P = \frac{1}{P_{\text{მაქს}}^2} \int_0^{\tau_0} [P(t)]^2 dt$$

და

$$\tau_Q = \frac{1}{Q_{\text{მაჟ}}^2} \int_0^{\infty} [Q(t)]^2 dt.$$

ამ პირობებში დანაკარგების საანგარიშო გამოსახულება მიიღებს სახეს

$$\Delta \mathfrak{D}_R = \Delta P_{P, \text{მაჟ}} \cdot \tau_P + \Delta P_{Q, \text{მაჟ}} \cdot \tau_Q. \quad (8.17)$$

2 π -ს მეთოდი ამყარებს ცდომილებას, მაგრამ მოითხოვს დამატებით ინფორმაციას რეაქტიული დატვირთვის გრაფიკის შესახებ, რაც როგორც წესი ნაკლები სიმუსტითაა მოცემული ან საერთოდ არ გაგვაჩნია.

8.3 ელექტრული ენერგიის დანაკარგების შემცირების ღონისძიებები

ქსელის ელემენტში ენერგიის დანაკარგების საანგარიშო გამოსახულება (8.8), ამ დანაკარგების შეფასების მიზნით, შეიძლება გადაეწეროს შემდეგ სახეში

$$\Delta \mathfrak{D} = \sum \left(U^2 G T_0 + \frac{P_{\text{მაჟ}}^2 + Q_{\text{მაჟ}}^2}{U^2} \cdot \frac{\rho \ell}{F} \cdot \tau \right) \text{მგვსთ}, \quad (8.18)$$

სადაც: U – ელემენტზე მოდებული ძაბვის მუშა მნიშვნელობა, კვ;

G – ამ ელემენტის განივი გამტარობა, სიმ;

T_0 – ელემენტის ჩართული მდგომარეობის ხანგრძლივობა, სთ;

$P_{\text{მაჟ}}$, $Q_{\text{მაჟ}}$ – ელემენტის მაქსიმალური დატვირთულობა წლის ინტერვალში, მგვტ, მგვარ;

ρ – დენგამტარი სადენის კუთრი გამტარობა, $\frac{\text{ომი.მმ}^2}{\text{კმ}}$;

F – ამავე სადენის განივი კვეთი, მმ²;

ℓ – გადაცემის სიგრძე, კმ;

τ – მაქსიმალური დანაკარგების დრო, სთ.

ქსელში ენერგიის დანაკარგების აბსოლუტური მნიშვნელობა ჯერ კიდევ არ განსაზღვრავს ქსელის მუშაობის ეფექტურობის დონეს. ამიტომ უფრო მიზანშეწონილია განვიხილოთ ენერგიის დანაკარგების ფარდობითი მნიშვნელობა

$$\Delta\mathfrak{E} = \frac{\Delta\mathfrak{E}}{\mathfrak{E}_{\text{მოხმ}}} = \frac{1}{P_{\text{მაქს}} \cdot T_{\text{მაქს}}} \sum \left[U^2 G T_0 + \frac{P_{\text{მაქს}}^2 + Q_{\text{მაქს}}^2}{U^2} \rho \frac{\ell}{F} \tau \right]$$

ანუ

$$\Delta\mathfrak{E} = \sum \left(\frac{U^2 G T_0}{P_{\text{მაქს}} \cdot T_{\text{მაქს}}} + \frac{P_{\text{მაქს}}(1 + \text{tg}^2 \varphi_{\text{მაქს}})}{U^2} \cdot \frac{\rho \ell}{F} \cdot \frac{\tau}{T_{\text{მაქს}}} \right) \quad (8.19)$$

მიღებული გამოსახულებიდან ჩანს, რომ ქსელში აქტიური ენერგიის დანაკარგების ფარდობითი (პროცენტული) მნიშვნელობა მით დაბალია, რაც უფრო დიდია ელექტრომიმდებთა დადგმული სიმძლავრის გამოყენების ხანგრძლივობა ($T_{\text{მაქს}}$).

აღნიშნული გამოსახულების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ენერგიის დანაკარგების შემცირების ღონისძიებებად შეიძლება განვიხილოთ:

- მინიმუმამდე იქნეს დაყვანილი ქსელის ცალკეული ელემენტის დაუგეირთავ რეჟიმში (უქმი სელა) მუშაობა – T_0 (ორგანიზაციული ღონისძიება);

- უზრუნველყოთ ქსელის ცალკეულ კვანძებში მუშა ძაბვის ოპტიმალური მნიშვნელობა – U (ორგანიზაციული და ტექნიკური ღონისძიება);

- შესაძლებლობის ფარგლებში შევამციროთ ქსელის ელემენტთა განივი გამტარობა – G (ორგანიზაციული და ტექნიკური ღონისძიება);

- მომხმარებელთან ენერგიის გადაცემა განხორციელდეს უმოკლესი გზით – ℓ (ტექნიკური და ორგანიზაციული ღონისძიება);

- სადენის მუშა განაკვეთის ოპტიმალური შერჩევა – F (ტექნიკური ღონისძიება).

- ელექტროსადგურებს შორის აქტიურ და რეაქტიულ სიმძლავრეთა ოპტიმალური განაწილება (ორგანიზაციული ღონისძიება);

- რაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაცია (ტექნიკური ღონისძიება).

ქსელის რეჟიმების ოპტიმიზაცია რეაქტიული სიმძლავრის განაწილების, კვანძებში მუშა ძაბვისა და გრანსფორმატორთა გრანსფორმაციის კოეფიციენტების მიხედვით წარმოადგენს ელექტროენერგიის დანაკარგების შემცირების ერთერთ ძირითად ორგანიზაციულ ღონისძიებას. ამ ამოცანის გადაწყვეტისას: მოცემულია ელექტროსადგურთა აქტიური დატვირთვები P_{Σ} , (გარდა მახალანსებლი-

სა) და მომხმარებელთა აქტიური და რეაქტიული დატვირთვები $P_{\text{აქ}}, Q_{\text{აქ}}$; გათვალისწინებულია რეეიმიული პარამეტრების ამა თუ იმ სახის შემდგომები; მიზნის ფუნქციად განიხილება ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები.

ხშირ შემთხვევაში აღნიშნული სახის ამოცანის სრული მოცულობით გადაწყვეტა ვერ ხერხდება რეეიმის რეგულირებისა და მართვის შესაბამისი მოწყობილობების უკმარისობის გამო. კერძოდ: არ გვაქვს რეაქტიული სიმძლავრის საკმარისი რეზერვი; ცალკეულ ქვესადგურებში არ გვაქვს ან არასაკმარისია ძაბვის რეგულირების საშუალებები (გრანსფორმატორებზე PTH მოწყობილობის მუშაობა არასაიმედოა და ავტომატური მართვის რეეიმში ერიდებიან მის გამოყენებას). ამ და სხვა სახის მიზეზების გამო ოპტიმიზაციის ზემოთ აღნიშნული კომპლექსური ამოცანა დისპეტჩერული იერარქიული საფეხურების მიხედვით შეიძლება დაიყოს კერძო ამოცანებად: 1) ძაბვის რეგულირება მთლიანად ქსელში ან მის ცალკეულ ნაწილებში; 2) არაერთგვაროვანი ქსელის შეკრულ კონტურებში სიმძლავრეთა ნაკადების მართვა გრანსფორმატორთა გრანსფორმაციის კომპლექსური კოეფიციენტის რეგულირებით; 3) შეკრული ქსელის გახსნა; 4) წყაროებს შორის რეაქტიული სიმძლავრის ოპტიმალური განაწილება.

ამ კერძო ამოცანათა ამოხსნების შედეგების ურთიერთშეთანხმების პირობებში მოხდება გააწყვეტილებათა კორექტირება იმ შემდგომების გათვალისწინებით, რასაც შეიძლება ადგილი ჰქონდეს მთლიანად ქსელში ან მის ცალკეულ ნაწილში.

გარდა ზემოთ აღნიშნულისა, მკვებაე ქსელებში შეიძლება განხორციელდეს კიდევ სხვა ორგანიზაციული ღონისძიებები, კერძოდ:

- ელექტროსადგურების გენერატორების სინქრონული კომპენსატორების რეეიმში გამოყენების მიზანშეწონილობა დროის იმ შუალედებში, როცა ეს გენერატორები განტვირთულია აქტიური დატვირთვისგან. როგორც წესი, ეს გენერატორები ან დაბალეკონომიკური აგრეგატებია, რომლებიც ღვეირთვის სეზონური შემცირების პერიოდში გამოორთულია, ან მუშაობენ დეფიციტურ საწვავზე. ასეთ რეეიმში მუშაობისას გენერატორები ქსელიდან მოითხოვენ გაკეული სიდიდის აქტიურ სიმძლავრეს, მაგრამ გენერირებენ რეაქტიულს, რაც იწვევს ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების შემცირებას;

- ელექტროსისტემის ძირითადი მოწყობილობების რემონტის ხანგრძლივობის შემცირება. ეს განსაკუთრებით ეხება სატრანზიტო

ხაზებისა და კაემირის ავტოტრანსფორმატორების რემონტს, რომელთა რემონტში ჩაყენება იწვევს შეკრულ კონტურებში სიმძლავრეთა გადანაწილებას და შედეგად, უმრავლეს შემთხვევაში, იზრდება დანაკარგები ქსელში. რემონტის ხანგრძლივობის შემცირება მიიღწევა სარემონტო სამუშაოთა ჩატარების ორგანიზაციის გაუმჯობესების, მიმდევრობით ჩართული ელემენტების რემონტის დამთხვევის, ძაბვის მოუხსნელად რემონტის ჩატარების გზით და ა.შ.

• ქვესადგურის საკუთარ მოხმარებაზე ელექტროენერგიის ხარჯის შემცირება, რაც მიიღწევა საკუთარი მოხმარების მოწყობილობათა მუშაობის რაციონალური რეჟიმის უზრუნველყოფით და ენერგოდამზოგი ტექნოლოგიების დანერგვით (ვარვარების ნათურების შეცვლა ლუმინისცენსური ნათურებით და სხვა).

8.4 აქტიური სიმძლავრის კოეფიციენტის ამაღლება

ელექტროგადაცემაში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგებს იწვევს როგორც აქტიური, ასევე რეაქტიული სიმძლავრის ნაკადი

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R = \frac{P^2(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)}{U^2} R = \frac{P^2}{U^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot R. \quad (8.20)$$

ამ გამოსახულებიდან ჩანს, რომ თუ სიმძლავრის ნაკადის ცვლილებისას სიმძლავრის კოეფიციენტი უცვლელი რჩება ($\operatorname{tg} \varphi = \text{const}$ ანუ $\cos \varphi = \text{const}$), მაშინ დანაკარგები იცვლება სიმძლავრის კვადრატის პროპორციულად. უცვლელი აქტიური სიმძლავრის გადაცემისას კი დანაკარგები მით ნაკლებია, რაც ნაკლებია რეაქტიული სიმძლავრის კოეფიციენტი $\operatorname{tg} \varphi$, ანუ რაც მაღალია აქტიური სიმძლავრის კოეფიციენტი $\cos \varphi$.

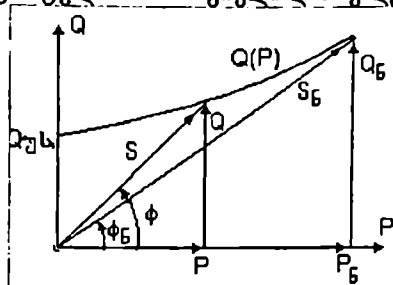
ელექტრულ ქსელში რეაქტიული სიმძლავრის ძირითად მომხმარებელს წარმოადგენს სამრეწველო საწარმოთა ასინქრონული ძრავები. მათი უქმი სელის რეაქტიული სიმძლავრე ნომინალური რაქტიული სიმძლავრის თითქმის 60–70%-ს შეადგენს [16]. მათ მიერ ქსელიდან მოთხოვნილი რეაქტიული სიმძლავრე დამოკიდებულია მათ აქტიურ დატვირთვაზე, რაც საკმარისი სიზუსტით შეიძლება განესაზღვროთ ფორმულით [16; 26]

$$Q = Q_{\Sigma} + (Q_{\Sigma} - Q_{\Sigma}) \left(\frac{P}{P_{\Sigma}} \right)^2, \quad (8.21)$$

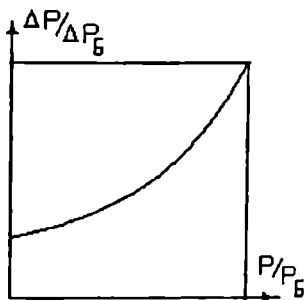
სადაც: P_6 და Q_6 – ასინქრონული ძრავის აქტიური და რეაქტიული ნომინალური სიმძლავრე;

ღუკ. – მისი უქმი სელის რეაქტიული სიმძლავრე.

როგორც ამ გამოსახულებიდან ჩანს, ძრავების მიერ ქსელიდან მოთხოვნილი რაქტიული სიმძლავრე არ მცირდება მოთხოვნილი აქტიური სიმძლავრის შემცირების პროპორციულად (ნახ. 8.5) და, შესაბამისად, აქტიური დატვირთვის შემცირებისას იზრდება რეაქტიული სიმძლავრის კოეფიციენტი (ცფ). აღნიშნულიდან გამომდინარე დანაკარგებსა და დატვირთვის სიმძლავრეს შორის კვაღტრაგულ-პროპორციული დამოკიდებულება ირღვევა (ნახ. 8.6)

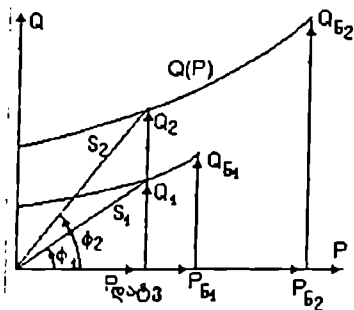


ნახ. 8.5 ასინქრონული ძრავის მიერ ქსელიდან მოთხოვნილი სიმძლავრის (P, Q) ღიაგრამა



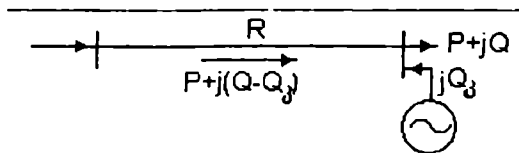
ნახ. 8.6 ასინქრონული ძრავების მკეებაე ქსელში სიმძლავრის დანაკარგები ძრავების დატვირთვისაგან დამოკიდებულებაში

აღნიშნული გარემოება მიუთითებს, რომ სამრეწველო საწარმოებში ასინქრონული ძრავების ნომინალური სიმძლავრე მერჩეული უნდა იქნეს რაციონალურად. კერძოდ, ძრავის ნომინალური სიმძლავრე უნდა შეესაბამებოდეს მოსალოდნელ მაქსიმალურ დატვირთვას, რაც მნიშვნელოვნად შეამცირებს რეაქტიული დატვირთვის კოეფიციენტს (ნახ. 8.7, $\text{ცფ}_1 < \text{ცფ}_2$).



ნახ. 8.7 სამრეწველო საწარმოში ასინქრონული ძრავის ნომინალური სიმძლავრის შერჩევის ილუსტრაცია

აქტიური სიმძლავრის კოეფიციენტის ამაღლების ერთერთ მნიშვნელოვან ტექნიკურ ღონისძიებას წარმოადგენს მოხმარების კვანძებში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია (ნახ.8.8).



ნახ. 8.8 ელექტროგადამცემის უბნის დატვირთვის რეჟიმში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის შემდეგ

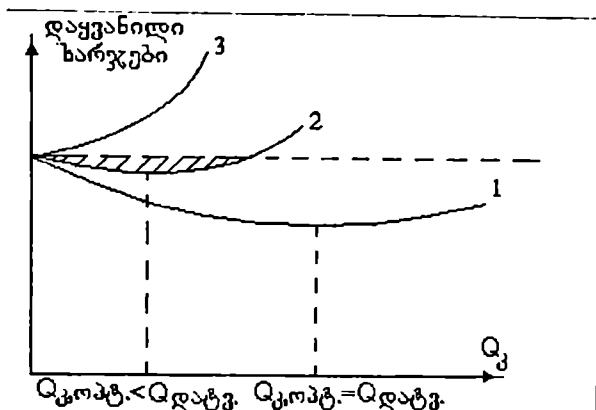
ამ შემთხვევაში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები

$$\Delta P = \frac{P^2 + (Q - Q_c)^2}{U^2} R, \quad (8.22)$$

სადაც Q_c – მაკომპენსირებული დანადგარის სიმძლავრე.

ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების შემცირების თვალსაზრისით მაქსიმალურად ეფექტურია რეაქტიული დატვირთვის სრული კომპენსაცია. ჭარბი კომპენსაცია იწვევს დანაკარგების ისევ გაზრდას (ნახ. 8.9, მრუდი 1).

თუ გავითვალისწინებთ, რომ რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია ხორციელდება სპეციალური მაკომპენსირებელი დანადგარების საშუალებით, რაც დამატებით კაპიტალურ ხარჯებს მოითხოვს, დავინახეთ რომ რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ეფექტურობის ზონა გარკვეულწილად შევიწროვდება (ნახ. 8.9 დამატრისხული ფართი) და კომპენსაციის ოპტიმალური ღონე $Q_{კომპ} < Q_{დატვ}$ არ არის გამოირიცხული, რომ ქსელის მოცემულ კვანძში კომპენსაცია არაეკონომიკური აღმოჩნდეს (ნახ. 8.9, მრუდი 3).



ნახ. 8.9 ქსელის ევანძში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალურობის გრაფიკული წარმოდგენა: 1-მაკომპენსირებული დანადგარის კაპიტალური ხარჯები $K=0$; 2,3 - $K \neq 0$.

დასმულ ამოცანაში მიზნის ფუნქციას წარმოადგენს მეურნეობის დაყვანილი ხარჯები [32; 46]

$$3 = (E_6 + \alpha_j) K_{0j} \cdot Q_j + \Delta P_j \% \cdot 10^{-2} T_0 C_0 Q_j + \frac{P^2 + (Q - Q_j)^2}{U_6^2} R \cdot \pi C_0 \quad (8.23)$$

სადაც: E_6 - კაპიტალური ხარჯების გამოსყიდვის ეფექტურობის ნორმატიული კოეფიციენტი; α_j - მაკომპენსირებული დანადგარის საექსპლუატაციო ხარჯების ფარდობითი მნიშვნელობა; K_{0j} - ამავე დანადგარის ხვედრითი ღირებულება; $\Delta P_j \%$ - ამავე დანადგარში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები; T_0 - მისი ჩართული მდგომარეობის ხანგრძლივობა წლის განმავლობაში; C_0 - ელექტროენერგიის გარიფი; π - მაქსიმალური დანაკარგების დრო.

(8.23) გამოსახულების მინიმიზაციის პირობიდან

$$\frac{\partial 3}{\partial Q_j} = 0$$

განვსაზღვრავთ რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის სიდიდეს

$$Q_j = Q + \frac{a U_6^2}{2R}, \quad (8.24)$$

სადაც

$$a = - \frac{(E_g + \alpha_j) K_{0,j} + \Delta P_j \% \cdot 10^{-2} T_0 C_0}{\tau C_0} \quad (8.25)$$

წარმოადგენს ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი ნაზარდის ოპტიმალურ მნიშვნელობას [32], რომლის რიცხვითი მნიშვნელობა შეიძლება იცვლებოდეს $-(2+5) \cdot 10^{-2}$ ფარგლებში.

8.5 რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაცია მაგისტრალურ და რადიალურ ელექტრულ ქსელებში

სამუქლო და დაბალი (6+35 კვ) მომხმარებელთა კვების ელექტრულ ქსელებში ფართოდ გავრცელებულია მაგისტრალური (ნახ. 8.10 ა) და რადიალური (ნახ. 8.10 ბ) შეერთების სქემები.

მაგისტრალურ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ოპტიმიზაციის ამოცანის ამოხსნის შედეგად ელვებულობთ, რომ მაგისტრალის 1-ურ კვანძში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია ეკონომიკურად მიზანშეწონილია თუ ამ კვანძის მიმართ სრულდება პირობა

$$\sum_{j=1}^l R'_j Q_j + \frac{a U_g^2}{2} > 0, \quad (8.26)$$

სადაც

$$R'_j = \sum_{k=1}^l R_k \quad (8.27)$$

უბნების წინალობათა ჯამი კვების ცენტრიდან j -ურ კვანძამდე; $R_k - k$ - ური უბნის აქტიური წინალობა.

(8.26) პირობის შესრულების შემთხვევაში $j > 1$ კვანძებისთვის $Q_{j, \text{კაბ}} = Q_g$ და $j < 1$ კვანძებისთვის $Q_{j, \text{კაბ}} = 0$, ხოლო თვითონ 1 კვანძისთვის

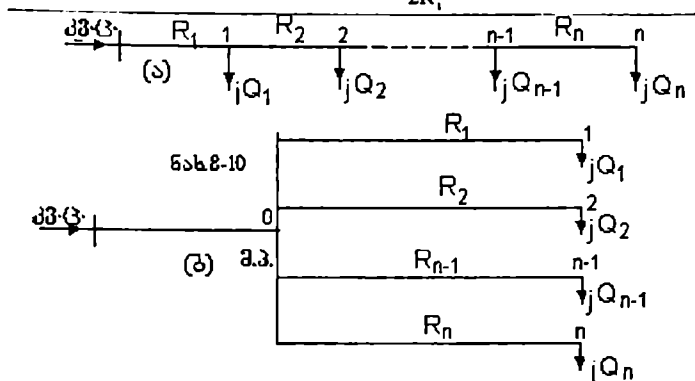
$$Q_{1, \text{კაბ}} = \frac{1}{\sum_{k=1}^l R_k} \cdot \left(\sum_{j=1}^l Q_j R'_j + \frac{a U_g^2}{2} \right). \quad (8.28)$$

რადიალურ ქსელში (ნახ. 8.10 ბ) რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციის ოპტიმიზაციის ამოცანის განგოლებათა სისტემას აქვს შემდეგი ზოგადი სახე

$$R_0 \sum_{i=1}^n Q_i + Q_n R_1 = R_0 \sum_{i=1}^n Q_i + Q_i R_1 + \frac{\alpha U_0^2}{2}, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (8.29)$$

კერძო შემთხვევაში, როცა $R_0=0$, ვღებულობთ

$$Q_n = Q_i + \frac{\alpha U_0^2}{2R_i} \quad (8.30)$$



ნახ. 8.10 მაგისტრალური (ა) და რადიალური (ბ) ქსელების შეერთების სქემები: კვ.ც-კვების ცენტრი; მ.პ.-მანაწილებელი პუნქტი ინდექსით „0“

თუ ამ ფორმულით მიღებული სიდიდე უარყოფითია, ეს ნიშნავს მას, რომ განსახილველ კეანძში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია არაუკონომიკურია.

8.6 აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების შემცირება ძაბვის დონის აწევით

აქტიური სიმძლავრისა და ენერგიის დანაკარგები ხაზების აქტიურ წინააღობაში და გრანსფორმატორთა გრაგნილებში გამოითვლება ფორმულებით:

$$\Delta P_R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R \quad \text{და} \quad \Delta \Theta_R = \frac{P_{\text{აქ}}^2 + Q_{\text{აქ}}^2}{U^2} R \cdot \tau.$$

მთელ ქსელში საშუალოდ ძაბვის დონის $\alpha\%$ -ით გაზრდისას დანაკარგები გრძივ წინააღობაში მცირდება

$$\Delta P'_R = \frac{P^2 + Q^2}{\left(U + \frac{\alpha\%}{100} U \right)^2} R \cdot$$

ანუ დანაკარგების ფარდობითი მნიშვნელობა

$$\Delta P_R^* = \Delta P'_R / \Delta P_R = \frac{1}{1 + \frac{2\alpha\%}{100} + \left(\frac{\alpha\%}{100} \right)^2} \cdot$$

თუ უგულებელვყოფთ მეორე რიგის უსასრულო მცირეს, გვექნება

$$\Delta P_R^* = \frac{1}{1 + \frac{2\alpha\%}{100}} \approx 1 - 2 \frac{\alpha\%}{100} = 1 - 2\alpha, \quad (8.31)$$

სადაც $\alpha = \alpha\% / 100$ - ძაბვის ცვლილების ფარდობითი მნიშვნელობა.

ანალოგიურად შეიძლება გამოვთვალოთ ქსელის ელემენტების აქტიურ გამტარობაში აქტიური სიმძლავრის ფარდობითი დანაკარგების ცვლილება ძაბვის ფარდობითი ცვლილებისგან დამოკიდებულებაში

$$\Delta P_G^* \approx 1 + 2\alpha. \quad (8.32)$$

თუ მხედველობაში მივიღებთ მას, რომ ქსელის ელემენტების გრძივ წინაღობაში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები მთელ ქსელში ჯამური დანაკარგების თითქმის 80%-ს შეადგენს [16; 17]. ქსელში ძაბვის დონის $\alpha\%$ -ით ამალღებისას, მივიღებთ

$$\Delta P = \Delta P_R (1 - 2\alpha) + \Delta P_G (1 + 2\alpha) = 0,8\Delta P (1 - 2\alpha) + 0,2\Delta P (1 + 2\alpha)$$

ანუ

$$\Delta P^* = 1 - 1,2\alpha \quad (8.33)$$

110 კვ და მეტი ძაბვის ხაზებში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგებზე ძაბვის დონის ცვლილების გაულების სრული შეფასებისთვის, საჭიროა მხედველობაში მივიღოთ დანაკარგები გვირგვინის მოვლენაზე, რაც განსაკუთრებით აუცილებელია 330 კვ და უფრო მაღალი ძაბვის ხაზების შემთხვევაში.

ძაბვის დონის ამალღება იწვევს, ერთი მხრივ, ხაზების მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრის ზრდას და, მეორე მხრივ, ინდუქტივობაში რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგების შემცირებას, რაც, შედეგად, ხელს უწყობს ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგის შემცირებას.

ტრანსფორმატორების ფოლადში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები პირველადი გრაგნილის ხვიაზე მოსული ძაბვის კვადრატის

პროპორციულია. აქედან გამომდინარე, თუ ქსელში ძაბვას შეეცვლით $\alpha\%$ -ით და სადაბლებელი გრანსფორმატორის ხვიათა რიცხვსაც შეეცვლით ამავე $\alpha\%$ -ით, მაშინ გრანსფორმატორის ფოლადში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები არ შეიცვლება.

როცა გრანსფორმატორის გამომყვანის ძაბვა ქსელის ძაბვიდან განსხვავდება $\alpha\%$ -ით, მაშინ გრანსფორმატორის ფოლადში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების ფარდობითი მნიშვნელობა, საკმარისი სიზუსტით, შეიძლება გამოვთვალოთ ფრომულით

$$\Delta P_{\text{ფლ}}^* = (1 \pm \alpha). \quad (8.34)$$

გრანსფორმატორზე მოდებული ძაბვის შეცვლით გრანსფორმატორის დამამაგნიტებელი რეაქტიული სიმძლავრე შეკეთრად იცვლება. თუ ძაბვის ცვლილება 10% -ის ფარგლებშია, მაშინ დამამაგნიტებელი სიმძლავრე ძაბვის ცვლილების მეხუთე ხარისხის პროპორციულია [16]

$$\Delta Q_{\text{ფლ}}^* = (1 + \alpha)^5 \quad (8.35)$$

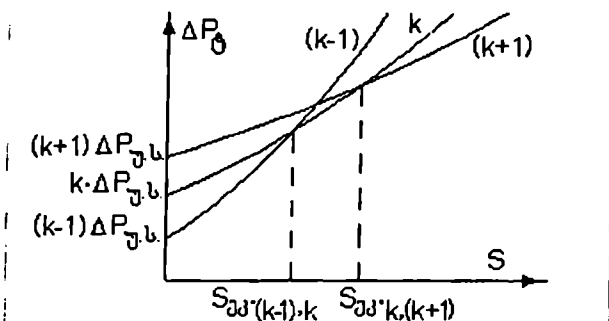
ქსელში ძაბვის ცვლილებისას გრანსფორმატორში ენერგიის დანაკარგები თითქმის უცვლელია თუ გამომყვანების შესაბამის გადაადგილებას მოხადდნით, ხოლო გამომყვანის მუდმივ მდგომარეობაში ყოფნისას დანაკარგები შესამჩნევად იცვლება და ამ ცვლილების სიდიდე დამოკიდებულია გრანსფორმატორის დადგმული სიმძლავრის გამოყენების ხანგრძლივობაზე [16; 20].

8.7 პარალელურად ჩართული გრანსფორმატორების მუშაობის ეკონომიკური რეჟიმები

პარალელურად ჩართულ k რაოდენობის გრანსფორმატორებში აქტიური სიმძლავრის ჯამური დანაკარგები განისაზღვრება გამოსახულებით (§4.8)

$$\Delta P_{\text{ჯკ}} = k \cdot \Delta P_{\text{კ}} + \frac{1}{k} \Delta P_{\text{გ}} \left(\frac{S}{S_g} \right)^2 \quad (8.36)$$

როგორც ამ გამოსახულებიდან ჩანს, სიმძლავრის დანაკარგები დამოკიდებულია ქვესადგურის S დატვირთვაზე და გრანსფორმატორთა k რაოდენობაზე. კერძოდ, დატვირთვის გაზრდით დანაკარგები იზრდება, ხოლო გრანსფორმატორთა რაოდენობის გაზრდით დანაკარგები ფოლადში იზრდება და სპილენძში მცირდება (ნახ.8.11).



ნახ. 8.11 დანაკარგების ცვლილება ტრანსფორმატორთა დატვირთვისა და რაოდენობასთან დამოკიდებულებაში

როგორც ნახაზიდან ჩანს, ქვესადგურის დატვირთვის შემცირებისას უფრო ეკონომიკურია პარალელურად ჩართული. ტრანსფორმატორების რაოდენობის შემცირება და პირიქით. 8.11 ნახაზის შესაბამისად k რაოდენობის ტრანსფორმატორთა პარალელური მუშაობა ეკონომიკურია, თუ ქვესადგურის დატვირთვა მოთავსებულია $[S_{პკ, k-1, k} + S_{პკ, k, k+1}]$ შუალედში ანუ

$$S_{პკ, k-1, k} \leq S \leq S_{პკ, k, k+1} \quad (8.37)$$

$S_{პკ, k-1, k}$ და $S_{პკ, k, k+1}$ დატვირთვისას ადგილი აქვს შემდეგ ტოლობებს

$$\Delta P_{\delta, k-1} = \Delta P_{\delta, k}, \text{ როცა } S = S_{პკ, k-1, k}$$

და

$$\Delta P_{\delta, k} = \Delta P_{\delta, k+1}, \text{ როცა } S = S_{პკ, k, k+1},$$

ანუ (8.36)-ის თანახმად, გვაქვს

$$\begin{aligned} (k-1)\Delta P_{უკ} + \frac{1}{k-1}\Delta P_{აგ} \left(\frac{S_{პკ, k-1, k}}{S_{\delta}} \right)^2 = \\ = k \cdot \Delta P_{უკ} + \frac{1}{k}\Delta P_{აგ} \left(\frac{S_{პკ, k, k+1}}{S_{\delta}} \right)^2 \end{aligned}$$

და

$$k\Delta P_{უკ} + \frac{1}{k}\Delta P_{აგ} \left(\frac{S_{პკ, k, k+1}}{S_{\delta}} \right)^2 = (k+1)\Delta P_{უკ} + \frac{1}{k+1}\Delta P_{აგ} \left(\frac{S_{პკ, k+1, k+2}}{S_{\delta}} \right)^2.$$

ამ გამოსახულებიდან ვღებულობთ

$$S_{\text{არ}^{k-1,k}} = S_6 \sqrt{\frac{(k-1)k\Delta P_{\text{კ}}}{\Delta P_{\text{გ}}}}$$

და

$$S_{\text{არ}^{k,k+1}} = S_6 \sqrt{\frac{k(k+1)\Delta P_{\text{კ}}}{\Delta P_{\text{გ}}}}$$

მამასადამე, (8.37) გამოსახულების შესაბამისად ვლუბულობთ ქუესადგურის ღატეირთუის იმ ინტერვალს, რომლის ღროსაც ეკონომიკურად მიზანშეწონილია მუშაობაში ჩართული იქნეს k რაოდენობის გრანსფორმატორი

$$S_6 \sqrt{\frac{(k-1)k\Delta P_{\text{კ}}}{\Delta P_{\text{გ}}}} \leq S \leq S_6 \sqrt{\frac{k(k+1)\Delta P_{\text{კ}}}{\Delta P_{\text{გ}}}}. \quad (8.38)$$

როცა ქუესადგურზე ღგას ორი გრანსფორმატორი, მამინ (8.38)-დან გამომდინარე, ქუესადგურის ღატეირთუის ის მნიშვნელობა, რომლის ღროსაც მიზანშეწონილია გადავიღეთ ერთგრანსფორმატორიანი სქემიდან ორგრანსფორმატორიან სქემაზე ან პირიქით, განისაზღვრება ფორმულით

$$S_{\text{არ}^{1,2}} = S_6 \sqrt{\frac{2\Delta P_{\text{კ}}}{\Delta P_{\text{გ}}}} \quad (8.39)$$

ანალოგიურად მივიღებთ

$$S_{\text{არ}^{2,3}} = S_6 \sqrt{\frac{6\Delta P_{\text{კ}}}{\Delta P_{\text{გ}}}}. \quad (8.40)$$

როცა ქუესადგურზე ღგას k რაოდენობის სხვადასხვა გიპის გრანსფორმატორი, მამინ ქუესადგურის ღატეირთუის შემყირებისას ამა თუ იმ გრანსფორმატორის ამორთუის ეკონომიკური მიზანშეწონილობა ღადგენილი უნდა იქნეს თითოეული გრანსფორმატორის მორიგეობითი ამორთუის შემდეგ ღარჩენილ გრანსფორმატორებში ღანაკარგების შეფასების საფუძველზე.

გრანსფორმატორის ამორთუის ეკონომიკური მიზანშეწონილობის ამოყანა, როგორც წესი, განიხილება ღატეირთუის ღღელაზური ღა წლიური გრაფიკების მინიმუმისას. ამასთან, თუ ქუესადგურიდან იკუებება I კატეგორიის მომხმარებელი, აუცილებელია გათვალისწინებული იქნეს რეზერვის ავტომატური ჩართვა.

8.8 შეკრულ ქსელში დატვირთვის ეკონომიკური განაწილება

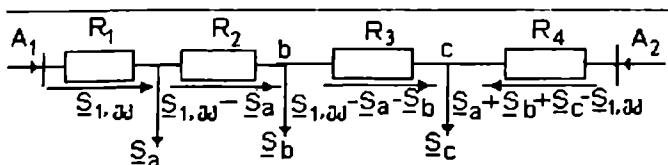
შეკრული ქსელის უბნებზე გამავალი სიმძლავრის სიდიდე დაბოკიდებულია ქსელის უბანთა გრძივ ელექტრულ პარამეტრებზე და კანძების დატვირთვებზე (გამოსახულება (6.43)). მაშასადამე, ექსპლუატაციის პერსონალის მიერ შეკრული ქსელის ცალკეული უბნის მუშაობის რეჟიმის რეგულირება შეუძლებელია. სიმძლავრეთა განაწილებას, რომელიც თავისთავად დამყარდება შეკრულ ქსელში გარედან ჩარევის გარეშე, სიმძლავრეთა ბუნებრივ განაწილებას უწოდებენ, რომლის დროს ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები, ზოგადად, არ არის მინიმალური. ქსელის მუშაობის რეჟიმზე გარედან ზემოქმედების შემდეგ მივიღებთ სიმძლავრეთა იძულებით განაწილებას. თუ ეს განაწილება უზრუნველყოფს ქსელში აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების მინიმუმს, მაშინ ასეთ იძულებით განაწილებას სიმძლავრეთა ეკონომიკურ განაწილებას უწოდებენ.

ბუნებრივ განაწილებისას ორმხრივი კვების ქსელის სათავე უბანზე გამავალი სიმძლავრე (§6.4.2)

$$S_{1,a} = \frac{\sum_{m=1}^n S_m Z_{m,A2}^*}{Z_{A1,A2}^*}. \quad (8.41)$$

დავუშვათ, რომ ორმხრივი კვების ქსელში (ნახ.8.12) ადგილი აქვს სიმძლავრეთა ეკონომიკურ განაწილებას, მაშინ ცხადია, რომ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები იქნება მინიმალური, რომლის საანგარიშო გამოსახულებას აქვს სახე

$$\Delta P = \frac{1}{U_g^2} \{ (P_{1,a}^2 + Q_{1,a}^2) R_1 + [(P_{1,a} - P_a)^2 + (Q_{1,a} - Q_a)^2] R_2 + \\ + [(P_{1,a} - P_a - P_b)^2 + (Q_{1,a} - Q_a - Q_b)^2] R_3 + [(P_a + P_b + P_c - P_{1,a})^2 + \\ + (Q_a + Q_b + Q_c - Q_{1,a})^2] R_4 \} = \min.$$



ნახ. 8.12 ორმხრივი კვების ქსელში სიმძლავრეთა ეკონომიკური განაწილებისთვის

$\underline{S}_{i,j} = P_{i,j} + jQ_{i,j}$ სიმბლავრის დასადგენად საჭიროა განვიხილოთ განტოლებათა სისტემა

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial P_{i,j}} = 0 \quad \text{და} \quad \frac{\partial \Delta P}{\partial Q_{i,j}} = 0,$$

ანუ

$$P_{i,j}R_1 + (P_{i,j} - P_a)R_2 + (P_{i,j} - P_a - P_b)R_3 + (P_{i,j} - P_a - P_b - P_c)R_4 = 0$$

და

$$Q_{i,j}R_1 + (Q_{i,j} - Q_a)R_2 + (Q_{i,j} - Q_a - Q_b)R_3 + (Q_{i,j} - Q_a - Q_b - Q_c)R_4 = 0.$$

აქედან

$$P_{i,j} = \frac{\sum_{m=1}^4 P_m R_{m,i,j}}{R_{A1,A2}}$$

და

$$Q_{i,j} = \frac{\sum_{m=1}^4 Q_m R_{m,i,j}}{R_{A1,A2}}.$$

ანუ, ზოგადად, კომპლექსურ სახეში

$$\underline{S}_{i,j} = \frac{\sum_{m=1}^4 \underline{S}_m R_{m,i,j}}{R_{A1,A2}}. \quad (8.42)$$

(6.39) და (8.42) გამოსახულებათა შედარება გვიჩვენებს, რომ შეკრულ ქსელში სიმბლავრეთა ეკონომიკური განაწილება დამყარდება მაშინ, თუ ქსელი ერთგვაროვანია.

ამრიგად, შეკრულ ქსელებში სიმბლავრის დანაკარგების მინიმუმი მიიღწევა:

1. ქსელის გაერთვაროვნებით;

2. ქსელში სიმბლავრეთა იძულებითი განაწილებით, რომელიც დაემთხვევა ეკონომიკურ განაწილებას.

მაღალი ძაბვის ქსელი პრაქტიკულად არაერთგვაროვანია. განსაკუთრებით არაერთგვაროვანია სხვადასხვა ნომინალური ძაბვის შეკრული ქსელი, რადგანაც კაპიტრის გრანსფორმატორებს (ავტოტრანსფორმატორებს) გააჩნიათ დიდი რეაქტიული წინაღობა აქტიურთან შედარებით.

ერთი ნომინალური ძაბვის შეკრული ქსელის გაერთვაროვნება მოითხოვს ხაზში (ან ხაზებში) კონდენსატორთა ბაგარეის მიმდევრობით ჩართვას (გრძივი კომპენსაცია), რომლის სიმბლავრე გათვლილი იქნება მოცემული ხაზის მოსალოდნელ სრულ დატვირ-

თვაზე. მისი დახმარებით შეიძლება ხაზების რეაქტიულ და აქტიურ წინააღმდეგობათა ფარდობის კორექტირება ისე, რომ მივიღოთ ერთგვაროვანი ქსელი.

დავუშვათ, რომ საჭიროა აღნიშნული სახის კორექტირება იმ კონტურისთვის, სადაც ერთი ხაზისთვის $\frac{X_1}{R_1}$ ფარდობა მნიშვნელოვ-

ნად ჭარბობს ანალოგიურ ფარდობას დანარჩენი ხაზებისთვის

$$\frac{X_1}{R_1} > \frac{X_2}{R_2} \approx \frac{X_3}{R_3} \approx \dots \approx \frac{X_n}{R_n}.$$

ამ შემთხვევაში საჭიროა პირველ ხაზში მიმდევრობით ჩაირთოს კონდენსატორი, რომლის X_c წინააღმდეგობა განისაზღვრება პირობიდან

$$\frac{X_1 - X_c}{R_1} = \frac{X_2}{R_2},$$

აქედან

$$X_c = X_1 - \frac{R_1}{R_2} \cdot X_2. \quad (8.43)$$

გრძივი კომპენსაცია საკმარისად ძვირადღირებული ღონისძიებაა და ამიტომ მას ნაკლებად მიმართავენ.

შეკრულ ქსელში სიმძლავრეთა იძულებითი განაწილება შესაძლებელია შეკრული კონტურის გახსნის ან ამ კონტურში ვოლტსამაგი გრანსფორმატორების (ესტ) ჩართვის გზით.

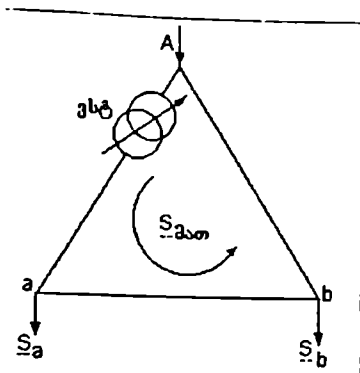
ორი ნომინალური ძაბვის მქონე ქსელში დანაკარგების შემცირების მიზნით, ძირითადად, გამოიყენება დაბალი ძაბვის ქსელის გახსნის ხერხი, სადაც წინასწარ დაადგენენ დენგამყოფ კვანძს სიმძლავრეთა ეკონომიკური განაწილების პირობით (გამოსახულება (8.42)) და ქსელს გახსნიან ამ კვანძში. ამით მივიღებთ სიმძლავრეთა იძულებით განაწილებას, რომელიც უფრო ახლოსაა ეკონომიკურთან და დანაკარგების შედარებით უფრო ნაკლები იქნება, ვიდრე სიმძლავრეთა ბუნებრივი განაწილებისას.

შეკრულ კონტურში ვოლტსამაგი გრანსფორმატორის ჩართვის ხერხი გულისხმობს კონტურში იმ დამატებით გრძივი ელექტრომამომძრავებელი ძალის ჩართვას (ნახ. 8.13), რომელიც წარმოქმნის მათანაბრებელ სიმძლავრეს და სიმძლავრეთა ბუნებრივი განაწილება გაუტოლდება ეკონომიკურს

$$\underline{S}_a + \underline{S}_{\text{გო.}} = \underline{S}_{\text{კ.}}$$

აქედან

$$\underline{S}_{\text{გო.}} = \underline{S}_{\text{კ.}} - \underline{S}_a \quad (8.44)$$



ნახ. 8.13 ვოლტსამაგი
გრანსფორმატორის
ჩართვის სქემა

მათანაბრებელი სიმძლავრის დასადგენად საჭიროა განესაზღვროთ კონტურის სათავე უბანზე გამავალი ეკონომიკური სიმძლავრე (8.42) გამოსახულებით და ბუნებრივი სიმძლავრე (8.41) გამოსახულებით, რომლის შემდეგ გამოვიყენებთ (8.44) გამოსახულებას.

ეიყით $S_{\text{მათ}}$, შეგვიძლია განესაზღვროთ მათანაბრებელი ღენი

$$I_{\text{მათ}} = \frac{S_{\text{მათ}}}{\sqrt{3}U_{\text{c}}}, \quad (8.45)$$

რომლის საფუძველზე დაეადგენთ საჭირო სიდიდის მათანაბრებელ ელექტრომამოძრავებელ ძალის ხაზურ მნიშვნელობას

$$E_{\text{მათ}} = \sqrt{3}I_{\text{მათ}} \cdot Z_{\text{კონგ}}. \quad (8.46)$$

დამატებითი გრძივი ელექტრომამოძრავებელი ძალა, ზოგადად, შეიცავს გრძივ და განივ შემდგენს

$$E_{\text{მათ}} = E'_{\text{მათ}} + jE''_{\text{მათ}}.$$

კონტურში ჩართული ვოლტსამაგი გრანსფორმატორი შეიძლება აღჭურვილი იყოს ძაბვის გრძივი ან განივი რეგულირებით, ან ორივე ერთად.

(8.45) და (8.46) გამოსახულებათა საფუძველზე ეწერეთ

$$S_{\text{მათ}} = \sqrt{3}U_{\text{c}} \frac{E'_{\text{მათ}}}{\sqrt{3}Z_{\text{კონგ}}} = \frac{U_{\text{c}} E'_{\text{მათ}}}{Z_{\text{კონგ}}} \quad (8.47)$$

მაღალი ძაბვის ქსელში უბნების რეაქტიული წინააღობა მნიშვნელოვნად მეტია, ვიდრე აქტიური

$$R_{\text{კონგ}} \ll X_{\text{კონგ}} \quad (8.48)$$

ამიტომ გვაქვს

$$\underline{S}_{\text{მათ}} = U_{\text{ფ}} \cdot \frac{\underline{E}'_{\text{მათ}}}{-jX_{\text{კონგ}}} = \frac{U_{\text{ფ}} \cdot \underline{E}''_{\text{მათ}}}{X_{\text{კონგ}}} + j \frac{U_{\text{ფ}} \underline{E}'_{\text{მათ}}}{X_{\text{კონგ}}}.$$

მივიღეთ, რომ

$$P_{\text{მათ}} = \frac{U_{\text{ფ}} E''_{\text{მათ}}}{X_{\text{კონგ}}} \quad \text{და} \quad Q_{\text{მათ}} = \frac{U_{\text{ფ}} E'_{\text{მათ}}}{X_{\text{კონგ}}}. \quad (8.49)$$

მამასადამე, მაღალი ძაბვის შეკრულ კონტურში ჩართული გრძივი რეგულირების შეკონე ვოლტსამატი ტრანსფორმატორი ამ კონტურში გამოიწვევს რეაქტიული სიმძლავრის გადანაწილებას, ხოლო განივი რეგულირების ვოლტსამატი ტრანსფორმატორი კი – აქტიური სიმძლავრის გადანაწილებას.

თუ ორი ნომინალური ძაბვის შეკრულ კონტურში (ნახ. 6.11), კაემირის ტრანსფორმატორთა ტრანსფორმაციის კოეფიციენტები სხვადასხვაა, მაშინ მივიღებთ გრძივი რეგულირების ვოლტსამატი ტრანსფორმატორის ეფექტს და, (6.36) და (8.48) გამოსახულებათა გათვალისწინებით, კონტურში გამავალი მათანაბრებელი რეაქტიული სიმძლავრე იქნება

$$Q_{\text{მათ}} = \frac{U_{\text{ნომლ}}^2}{X_{\text{კონგ}}} \left(1 - \frac{K_{\phi^2}}{K_{\phi 1}} \right) \quad (8.50)$$

რომელიც მიედინება ტ1 ტრანსფორმატორის დაბალი ძაბვის კვანძიდან ტ2 ტრანსფორმატორის დაბალი ძაბვის კვანძისკენ.

8.9 მე-8 თავის რიცხვითი მაგალითები

მაგალითი 8.1 განესაზღვროთ ენერგიის წლიური დანაკარგები ხაზში, რომლის ნომინალური ძაბვაა 35 კვ, სიგრძე 20 კმ და გამოყენებული სადენის მარკა AC-70/11. ხაზი კვებავენ მომხმარებელს, რომლის მაქსიმალური დატვირთვა $P=5$ მგვტ და დატვირთვის კოეფიციენტის საშუალო მნიშვნელობა $\cos \varphi=0,85$. დატვირთვის წლიური გრაფიკი მოცემულია 8.14 ნახაზზე.

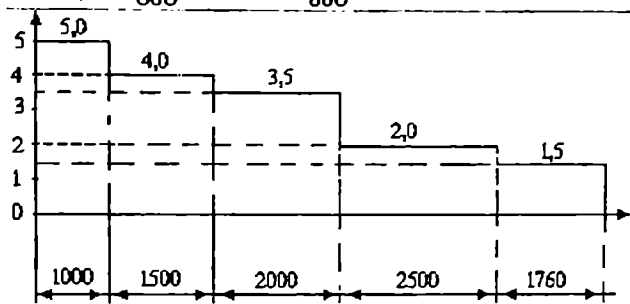
განესაზღვროთ ხაზის აქტიური წინაღობა. დ-2 ცხრილის მიხედვით $r_0=0,42$ ომი/კმ და $R = r_0 \ell = 0,428 \cdot 20 = 8,56$ ომი. სიმძლავრის მაქსიმალური დანაკარგები (გამოსახულება 8.20.)

$$\Delta P_{\text{მატ}} = \frac{P_{\text{მატ}}^2}{U_{\text{ფ}}^2 \cdot \cos^2 \varphi} \cdot R = \frac{5^2}{35^2 \cdot 0,85^2} \cdot 8,56 = 0,242 \text{ მგვტ}$$

(8.4) გამოსახულების მიხედვით (გრაფიკული ინტეგრირების მეთოდი)

$$\Delta \Xi = \frac{8,56}{35^2 \cdot 0,85^2} \left(5^2 \cdot 1000 + 4^2 \cdot 1500 + 3,5^2 \cdot 2000 + 2^2 \cdot 2500 + 1,5^2 \cdot 1760 \right) =$$

$$= 845,88 \text{ მგეგსთ} = 845881 \text{ კეგსთ.}$$



ნახ. 8.14

ენერგიის დანაკარგები გამოთვალეთ τ -ს მეთოდით. ამისთვის ჯერ გამოთვალეთ მაქსიმალური დატვირთვის გამოყენების ხანგრძლივობა (გამოსახულება (8.15))

$$T = \frac{\Xi_{\text{მომ}}}{P_{\text{გაფ}}} = \frac{5 \cdot 1000 + 4 \cdot 1500 + 3,5 \cdot 2000 + 2 \cdot 2500 + 1,5 \cdot 1760}{5} =$$

$$= 5128 \text{ სთ.}$$

შესაბამისად (8.6) გამოსახულების მიხედვით

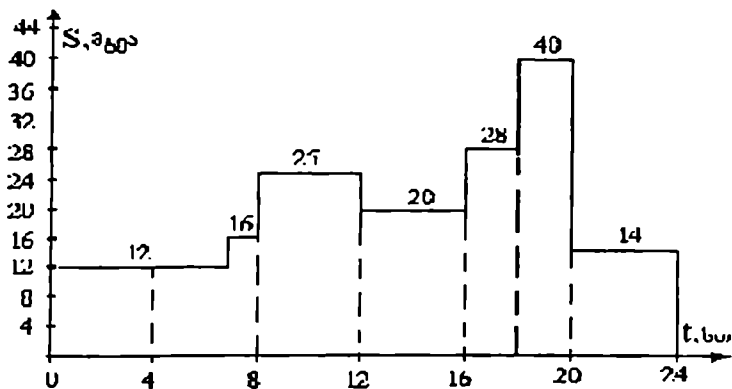
$$\tau = (0,124 + 5128 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 8760 = 3552 \text{ სთ}$$

და (8.5)-ის თანახმად

$$\Delta \Xi = 0,242 \cdot 3552 = 859,658 \text{ მგეგსთ} = 859658 \text{ კეგსთ.}$$

ორივე მეთოდით მიღებულ შედეგებს შორის განსხვავება აღწევს 1,6%-ს.

მაგალითი 8.2. გამოთვალეთ ენერგიის დღეღამური დანაკარგები ქვესადგურში, სადაც დგას 2XTP/ДН-25000/110 ტიპის გრანსფორმატორი. ქვესადგურის დატვირთვის დღეღამური გრაფიკი მოცემულია 8.15 ნახაზზე. აქტიური დატვირთვის კოეფიციენტი $\cos \varphi = 0,8$.



ნახ. 8.15

გრანსფორმატორების საპასპორტო მონაცემებია (ცხრ.დ-5.2)

$$\Delta P_{\text{კ}} = 27 \text{ კვტ}, \quad \Delta P_{\text{გ}} = 120 \text{ კვტ}.$$

(8.39) გამოსახულების მიხედვით განესაზღვროთ ორიდან ერთ გრანსფორმატორზე გადასვლის ეკონომიკური ღატვირთვის მნიშვნელობა

$$S_{\text{კ-12}} = 25 \sqrt{\frac{2 \cdot 27}{120}} = 16,8 \text{ მგვა}.$$

ამრიგად, ქვესაღერი ერთგრანსფორმატორიან რეეიმში იმუშავენს 0+8 და 22+24 საათების ინტერვალში. დანარჩენ საათებში კი იმუშავენს ორგრანსფორმატორიან რეეიმში.

ენერგიის დანაკარგები გრანსფორმატორთა ფოლადში (გამოსახულება (8.1))

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{გ}} = 1 \cdot 27 \cdot 10 + 2 \cdot 27 \cdot 14 = 1026 \text{ კვტსთ}.$$

ენერგიის დანაკარგები გრანსფორმატორებში (გრანსფორმატორული მეთოდი)

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{E}_{\text{რ}} = & 120 \left(\frac{12}{25} \right)^2 \cdot 7 + 120 \left(\frac{16}{25} \right)^2 \cdot 1 + \frac{1}{2} \cdot 120 \left(\frac{25}{25} \right)^2 \cdot 4 + \frac{1}{2} \cdot 120 \left(\frac{20}{25} \right)^2 \cdot 4 + \\ & + \frac{1}{2} \cdot 120 \left(\frac{28}{25} \right)^2 \cdot 2 + \frac{1}{2} \cdot 120 \left(\frac{40}{25} \right)^2 \cdot 4 + 120 \cdot \left(\frac{14}{25} \right)^2 \cdot 2 = 147648 \text{ კვტსთ} \end{aligned}$$

გრანსფორმატორებში ენერგიის ჯამური დანაკარგები

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{E}_{\text{გ}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{რ}} = 2502,48 \text{ კვტსთ}.$$

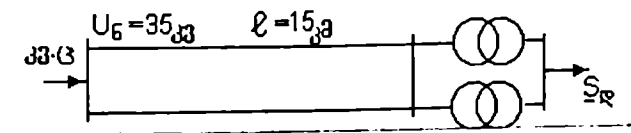
დღელამეში მომხმარებლის მიერ მოხმარებული ენერგია

$$\begin{aligned}\mathfrak{Q}_{\text{ზოგ}} &= (12 \cdot 7 + 16 \cdot 1 + 25 \cdot 4 + 20 \cdot 4 + 28 \cdot 2 + 40 \cdot 4 + 14 \cdot 2) \cdot 0,8 = \\ &= 419,2 \text{ მგვტს} = 419200 \text{ კვტს}\end{aligned}$$

გრანსფორმატორებში ენერგიის დანაკარგების პროცენტული მნიშვნელობა

$$\Delta\% = \frac{\Delta\mathfrak{Q}}{\mathfrak{Q}_{\text{ზოგ}}} \cdot 100 = \frac{2502,48 \cdot 100}{419200} = 0,6\%$$

მაგალითი 8.3. 8.16 ნახაზზე წარმოდგენილ ელექტრულ ქსელში გამოთვალეთ აქტიური სიმძლავრის მაქსიმალური დანაკარგები და ენერგიის წლიური დანაკარგები აქტიური სიმძლავრის კოეფიციენტის ორი სხვადასხვა მნიშვნელობისას $\cos\varphi=0,7$ და $\cos\varphi=0,9$.



ნახ. 8.16

ელექტროგადაცემის ხაზის მონაცემები: ძაბვა $U_ნ=35$ კვ; ჯაჭვთა რიცხვი $n=2$; სიგრძე $\ell = 15$ კმ; $r_0=0,28$ ომი/კმ;

გრანსფორმატორების მონაცემები: $S_ნ=2 \times 10000$ კვა; $\Delta P_{\text{კ}}=12,5$ კვტ; $\Delta P_{\text{გ}}=60$ კვტ.

მომხმარებლის დატვირთვის წლიური გრაფიკი ხანგრძლივობის მიხედვით მოცემულია 8.17 ნახაზზე.

გამოთვალეთ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები გრანსფორმატორებში, როცა $\cos\varphi=0,7$ (გამოსახულება 4.88)

$$\Delta P_{\text{გ}} = 2 \cdot 12,5 + \frac{1}{2} \cdot 60 \left(\frac{12}{0,7 \cdot 10} \right)^2 = 113 \text{ კვტ}$$

აქტიური სიმძლავრის დანაკარგი ელექტროგადაცემის ხაზში (გამოსახულება 8.20)

$$\Delta P_{\text{ხ}} = \frac{12^2}{0,7^2 \cdot 35^2} \cdot \frac{0,28 \cdot 15}{2} = 0,504 \text{ მგვტ} = 504 \text{ კვტ}$$

სიმძლავრის ჯამური დანაკარგი ქსელში, როცა $\cos\varphi=0,7$

$$\Delta P_{\Sigma} = 113 + 504 = 617 \text{ კვტ} \text{ ან } \Delta P_{\Sigma} \% = 5,14$$

ჩაეატაროთ იგივე გამოთვლები, როცა $\cos\varphi=0,9$, გვაქვს

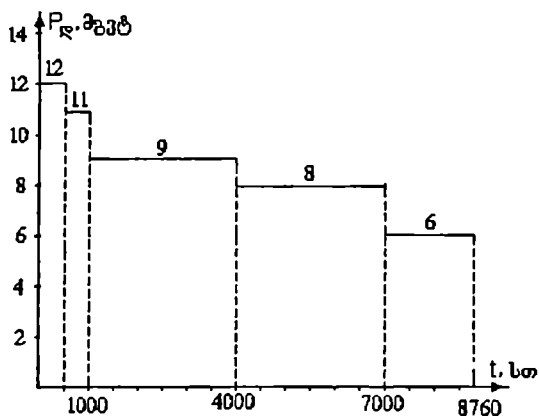
$$\Delta P_6 = 2 \cdot 12,5 + \frac{1}{2} \cdot 60 \left(\frac{12}{0,9 \cdot 10} \right)^2 = 68 \text{ კვტ}$$

$$\Delta P_6 = \frac{12^2}{0,9^2 \cdot 35^2} \cdot \frac{0,28 \cdot 15}{2} = 305 \text{ კვტ}$$

ჯამური დანაკარგები

$$\Delta P_{\Sigma} = 68 + 305 = 373 \text{ კვტ ანუ } \Delta P_{\Sigma} \% = 3,11.$$

ე.ი. აქტიური სიმძლავრის კოეფიციენტის ამაღლებით დანაკარგები ქსელში შემცირდა 5,14-3,11=2,03 პროცენტით



ნახ. 8.17

გამოთვალეთ ენერგიის წლიური დანაკარგები, როცა $\cos \varphi = 0,7$

$$\Delta E = 2 \cdot 12,5 \cdot 8760 + \left(\frac{0,28 \cdot 15}{2 \cdot 0,7^2 \cdot 35^2} + \frac{1}{2} \cdot 60 \cdot \frac{1}{0,7^2 \cdot 10^2} \right) (12^2 \cdot 500 + 11^2 \cdot 500 + 9^2 \cdot 3000 + 8^2 \cdot 3000 + 6^2 \cdot 1760) \cdot 10^3 = 2019000 + 2593620 = 2812620 \text{ კვტსთ}$$

ენერგიის წლიური მოხმარება

$$E_{\text{წლ}} = (12 \cdot 500 + 11 \cdot 500 + 9 \cdot 3000 + 8 \cdot 3000 + 6 \cdot 1760) \cdot 10^3 = 73060000 \text{ კვტსთ}$$

ანუ, როცა $\cos \varphi = 0,7$

$$\Delta\varnothing\% = \frac{2812620}{73060000} \cdot 100 = 3,85.$$

გამოთვალათ ენერგიის წლიური დანაკარგები, როცა $\cos\varphi=0,9$

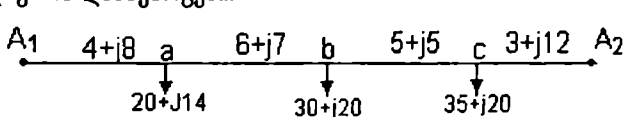
$$\Delta\varnothing = 219000 + 2593620 \cdot \frac{0,7^2}{0,9^2} = 1787980 \text{ კვტს}$$

ანუ

$$\Delta\varnothing\% = \frac{1787980}{73060000} \cdot 100 = 2,45.$$

მივიღეთ, რომ $\cos\varphi$ -ს ამაღლებით ქსელში ენერგიის წლიური დანაკარგები შემცირდა $3,85-2,45=1,4\%$ -ით.

მაგალითი 8.4. 8.18 ნახაზზე ნაჩვენებ ქსელში სიმძლავრეთა ბუნებრივი და ეკონომიკური განაწილებისას გამოთვალათ აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები.



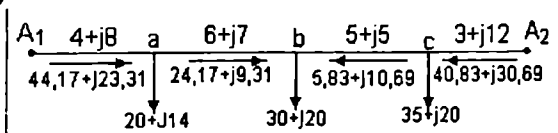
ნახ. 8.18

დავადგინოთ სიმძლავრეთა ბუნებრივი განაწილება (გამოსახულება (6.33))

$$\underline{S}_{A1a,b,c} = \frac{(20+j14)(14-j24) + (30+j20)(8-j17) + (35+j20)(3-j12)}{18-j32} =$$

$$= 44,17 + j23,31$$

მაშასადამე, სიმძლავრეთა ბუნებრივი განაწილებას აქვს სახე (ნახ.8.19)



ნახ. 8.19

აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები

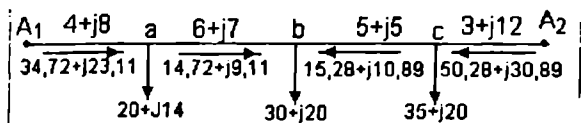
$$\Delta P_{\Sigma} = [(44,17^2 + 23,31^2) \cdot 4 + (24,17^2 + 9,31^2) \cdot 6 + (5,83^2 + 10,69^2) \cdot 5 + (40,83^2 + 30,69^2) \cdot 3] \cdot 110^2 = 1,87 \text{ მგვტ.}$$

დაუვადგინოთ სიმძლავრეთა ეკონომიკური განაწილება (გამოსახულება (8.42))

$$S_{\Sigma} = \frac{(20 + j14) \cdot 4 + (30 + j20) \cdot 8 + (35 + j20) \cdot 3}{18} =$$

$$= 34,72 + j23,11$$

მამასადამე, სიმძლავრეთა ეკონომიკურ განაწილებას აქვს სახე (ნახ.8.20)



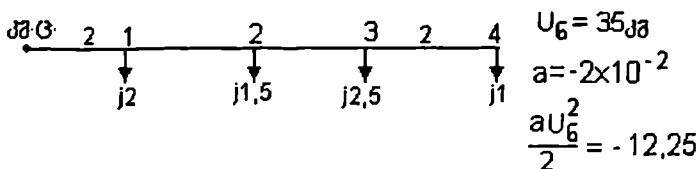
ნახ. 8.20

აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები

$$\Delta P_{\Sigma} = [(34,72^2 + 23,11^2) \cdot 4 + (14,72^2 + 9,11^2) \cdot 6 + (15,28^2 + 10,89^2) \cdot 5 + (50,28^2 + 30,89^2) \cdot 3] \cdot 100^2 = 1,73 \text{ მგვტ.}$$

ე.ი. სიმძლავრეთა ეკონომიკური განაწილებისას დანაკარგები შემცირდა 140 კვტ-ით.

მაგალითი 8.5. ამოვხსნათ რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანა 8.21 ნახაზზე ნაჩვენები მაგისტრალური ქსელისთვის. უბნების აქტიური წინაღობები მოცემულია ომებში, ხოლო კვანძების რეაქტიული დატვირთვები – მგვარ-ებში.



ნახ. 8.21

ამოხსნა. მივიღოთ, რომ $a = -2 \cdot 10^{-2}$ (§8.4, გამოსახულება (8.25)), მაშინ

$$\frac{aU_6^2}{2} = \frac{-2 \cdot 10^{-2} \cdot 35^2}{2} = -12,25$$

ქსელის თითოეული კვანძისთვის შევაფასოთ (8.26) უტოლობა:

$$i=1 \quad 2 \cdot 2 - 12,25 = -8,25 < 0 \Rightarrow Q_{j1} = 0;$$

$$i=2 \quad 2 \cdot 2 + 3 \cdot 1,5 - 12,25 = -3,75 < 0 \Rightarrow Q_{j2} = 0;$$

$$i=3 \quad 2 \cdot 2 + 3 \cdot 1,5 + 4 \cdot 2,5 - 12,25 = 6,25 > 0 \Rightarrow Q_{j3} > 0.$$

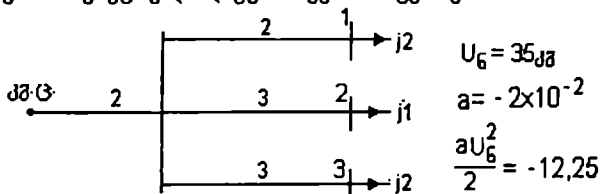
გამოვთვალოთ Q_{j3} (გამოსახულება (8.28))

$$Q_{j3} = \frac{1}{\sum_{k=1}^3 R_k} \left(\sum_{j=1}^3 Q_j R'_j + \frac{aU_6^2}{2} \right) = \frac{1}{4} (2 \cdot 2 + 3 \cdot 1,5 +$$

$$+ 4 \cdot 2,5 - 12,25) = 1,563 \text{ მგეარ.}$$

შესაბამისად, $Q_{j4} = Q_4 = 1$ მგეარ.

მაგალითი 8.6. ამოვხსნათ რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის ამოცანა 8.22 ნახაზზე ნაჩვენები რადიალური ქსელისთვის. უბანთა აქტიური წინააღობები მოცემულია ომებში, კვანძების რეაქტიული დატვირთვები – მგეარებში.



ნახ. 8.22

(8.29) გამოსახულების შესაბამისად შევადგინოთ განტოლებათა სისტემა

$$i=1$$

$$2(Q_{j1} + Q_{j2} + Q_{j3}) + 2 \cdot Q_{j1} = 2 \cdot 5 + 2 \cdot 2 - 12,25;$$

$$i=2$$

$$2(Q_{j1} + Q_{j2} + Q_{j3}) + 3 \cdot Q_{j2} = 2 \cdot 5 + 3 \cdot 1 - 12,25;$$

$$l = 3$$

$$2(Q_{j1} + Q_{j2} + Q_{j3}) + 3 \cdot Q_{j3} = 2 \cdot 5 + 3 \cdot 2 - 12,25.$$

ანუ გვაქვს

$$\left. \begin{aligned} 4Q_{j1} + 2Q_{j2} + 2Q_{j3} &= 1,75 \\ 2Q_{j1} + 5Q_{j2} + 2Q_{j3} &= 0,75 \\ 2Q_{j1} + 2Q_{j2} + 5Q_{j3} &= 3,75 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} Q_{j1} &= 0,5 \\ Q_{j2} &= -0,225 \\ Q_{j3} &= 0,775 \end{aligned}$$

როგორც ვხედავთ მე-2 კვანძში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია ეკონომიკურად არა მიზანშეწონილია. ამიტომ ვღებულობთ $Q_{j2} = 0$ და (8.29) სახის განტოლებათა სისტემა ჩაიწერება მხოლოდ „1“ და „3“ კვანძებისთვის

$$\left. \begin{aligned} l = 1 \quad 4Q_{j1} + 2Q_{j3} &= 1,75 \\ l = 3 \quad 2Q_{j1} + 5Q_{j3} &= 3,75 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} Q_{j1} &= 0,078 \\ Q_{j3} &= 0,719 \end{aligned} \right\}$$

მამასადამე, მივიღეთ $Q_{j1} = 0,078$ მგვარ და $Q_{j3} = 0,719$ მგვარ.

დანართები

ცხრილი დ-1. სადენტო კონსტრუქციული და საანგარიშო პარამეტრები

ნომინალური განიკვეთი	საანგარიშო ნგანი- კვეთი მმ		სადენტის დიამეტრი, მმ	გამწვანები ძალა, კე	სადენტის მასა, კგ/მ	დრეკადობის მოდული, 10 ³ ნ/მმ ²	წაგრძელების ტემპერატურული კოეფიციენტი, 10 ⁻⁶ -1
	ალუ- მინი	ფო- სფატი					
50/8	48.2	8.04	9.6	16.32	194	82.5	19.20
70/11	68.0	11.3	11.4	22.98	274	82.5	19.20
70/72	68.4	72.2	15.4	93.25	755	133.26	14.54
95/16	95.4	15.9	13.5	31.85	384	82.5	19.20
95/141	91.2	141	19.8	174.82	1357	146.03	14.10
120/19	118	18.8	15.2	40.64	471	81.82	19.30
120/27	116	26.6	15.5	48.85	528	88.56	18.40
150/19	148	18.8	16.8	45.00	554	78.45	19.84
150/24	149	24.2	17.1	51.08	600	82.13	19.27
150/34	147	34.3	17.5	60.86	675	88.9	18.34
185/24	187	24.2	18.9	57.35	705	78.68	19.81
185/29	181	29.0	18.8	60.81	728	81.92	19.27
185/43	185	43.1	19.6	75.52	846	88.9	18.34
185/128	187	128	23.1	176.48	1525	118.69	15.47
240/32	244	31.7	21.6	74.09	921	78.76	19.80
240/39	236	38.6	21.6	80.13	952	82.27	19.28
240/56	241	56.3	22.4	97.78	1106	88.50	18.34
300/39	301	38.6	24.0	89.35	1132	78.47	19.81
300/48	295	47.8	24.1	99.69	1186	82.13	19.27
300/66	288	65.8	24.5	121.91	1313	88.46	18.38
300/204	298	204	29.2	273.98	2428	118.69	15.47
330/27	325	26.6	24.4	84.37	1106	73.36	20.74
330/43	332	43.1	25.2	100.78	1255	78.76	19.80
400/22	394	22.0	26.6	89.10	1261	70.21	21.36
400/51	394	51.1	27.5	117.66	1490	78.76	19.80
400/64	390	63.5	27.7	127.83	1572	82.19	19.28
400/93	406	93.2	29.1	167.67	1851	88.56	18.40
450/56	434	56.3	28.8	129.62	1640	78.66	19.80
500/27	481	26.6	29.4	108.49	1537	70.21	21.36
500/64	490	63.5	30.6	146.28	1852	78.72	19.80
500/336	490	336	37.5	451.12	4005	118.69	15.47
550/71	549	71.2	32.4	163.95	2076	78.66	19.80
600/72	580	72.2	33.2	177.32	2170	78.17	19.89

**ცხრილი დ-2. 35-110 კვ ძაბვის საპაერო ხაზების
საანგარიშო ელექტრული პარამეტრები**

სადენის მარკა	სადენის $\rho_{0, \text{ომ/კმ}}$ +20 °C ტემპერატურაზე	ხაზის ნომინალური ძაბვა, კვ			
		35		110	
		$\chi_{0, \text{ომ/კმ}}$	$b_0 \times 10^{-6}, \text{სიმ/კმ}$	$\chi_{0, \text{ომ/კმ}}$	$b_0 \times 10^{-6}, \text{სიმ/კმ}$
AC-35/6,2	0,79	0,438	-	-	-
AC-50/8,0	0,603	0,427	-	-	-
AC-70/11	0,428	0,417	2,73	0,433	2,62
AC-95/16	0,306	0,405	2,81	0,422	2,69
AC-120/19	0,249	0,400	2,85	0,416	2,74
AC-150/24	0,198	0,398	2,90	0,409	2,79
AC-185/24	0,162	0,386	2,96	0,402	2,84
AC-240/39	0,120	0,378	3,02	0,394	2,89

**ცხრილი დ-3. 220-500 კვ ძაბვის საპაერო ხაზების
საანგარიშო ელექტრული პარამეტრები**

სადენის მარკა	სადენის რაოდენობა ფაზაში	$\rho_{0, \text{ომ/კმ}}$ +20 °C ტემპერატურაზე	ხაზის ნომინალური ძაბვა, კვ					
			220		330		500	
			$\chi_{0, \text{ომ/კმ}}$	$b_0 \times 10^{-6}, \text{სიმ/კმ}$	$\chi_{0, \text{ომ/კმ}}$	$b_0 \times 10^{-6}, \text{სიმ/კმ}$	$\chi_{0, \text{ომ/კმ}}$	$b_0 \times 10^{-6}, \text{სიმ/კმ}$
AC-240/32	1	0,121	0,435	2,60	-	-	-	-
	2	0,060	-	-	0,331	3,38	-	-
AC-300/39	1	0,098	0,429	2,64	-	-	-	-
	2	0,048	-	-	0,328	3,41	-	-
AC-300/66	3	0,034	-	-	-	-	0,310	3,97
AC-330/43	3	0,029	-	-	-	-	0,308	3,60
AC-400/51	1	0,075	0,420	2,70	-	-	-	-
	2	0,038	-	-	-	3,46	-	-
	3	0,025	-	-	-	-	0,306	3,62
AC-500/64	1	0,060	0,413	2,74	-	-	-	-
	2	0,030	-	-	0,320	3,50	-	-
	3	0,020	-	-	-	-	0,304	3,64

ცხრილი №4. სამუაზა კაბელების საანგარიშო ელექტრული პარამეტრები

დენგამტარი ნაწილის ნომინალურ განიკვეთი, მმ ²	აქტიური წინააღობა: +20°C ტემპურატურა - რაზგა ომი/კმ		რეაქტიული წინააღობა, ომი/კმ					ტევადური გამტარობა, 10 ⁻⁶ სიმი/კმ				
	აღუ მინი	სპი დენი	კაბელის ნომინალური ძაბვა, კვ									
			1	6	10	20	35	6	10	20	35	
4	7,74	4,6	0,095	-	-	-	-	-	-	-	-	
6	5,17	3,07	0,090	-	-	-	-	-	-	-	-	
10	3,10	1,84	0,073	0,11	0,122	-	-	62,8	-	-	-	
16	1,94	1,15	0,0675	0,102	0,113	-	-	72,2	-	-	-	
25	1,24	0,74	0,0662	0,091	0,099	0,135	-	88,0	72,2	53,5	-	
35	0,89	0,52	0,0637	0,087	0,095	0,129	-	97,2	85,0	60,0	-	
50	0,62	0,37	0,0625	0,083	0,090	0,119	-	114	91,0	66,0	-	
70	0,443	0,26	0,0612	0,080	0,086	0,116	0,137	127	97,5	75,5	56,6	
95	0,326	0,194	0,0602	0,078	0,083	0,110	0,126	134	110	81,5	63,0	
120	0,258	0,153	0,0599	0,076	0,081	0,107	0,120	146	116	100	75,5	
150	0,206	0,122	0,0596	0,074	0,079	0,104	0,116	162	138	110	81,5	
185	0,167	0,099	0,0591	0,073	0,077	0,101	0,113	169	141	119	88,0	
240	0,129	0,077	0,0587	0,071	0,075	-	-	185	144	132	97,3	

ცხრილი №51.35 გვ. ძაბვის სამუშაოა ორგარგანიდა ტრანსფორმატორები

ტრანსფორმატორის ტიპი	ნომინალური სიმძლავრე S _ნ , მვ	ძაბვის რეგულირების საზღვრები ±α x α %	კატალოგური მონაცემები						საანგარიშო მონაცემები		
			ბრუნვის ძაბვა U _ბ , კვ		U _{გვ} , %	ΔP _{გვ} , კვტ	I _{უ.ბ.} , %	R _{ტ.} , ომი	X _{ტ.} , ომი	ΔQ _{ტ.} , კვარტ	
			მ.ა.	დ.ბ.							
			მ.ა.	დ.ბ.							
TMH-1000/35	1,0	6x1,5	35	6,3;11	6,5	16,5	3,6	1,4	7,9	49,8	22,4
TM-1000/35	1,0	2x2,5	35	6,3;11	6,5	18	3,6	1,4	8,6	49,8	22,4
TMH-1600/35	1,6	6x1,5	35	6,3;11	6,5	23,5	5,1	1,1	11,2	49,2	17,6
TM-1600/35	1,6	2x2,5	35	6,3;11	6,5	26	5,1	1,1	12,4	49,2	17,6
TMH-2500/35	2,5	6x1,5	35	6,3;11	6,5	23,5	5,1	1,1	4,6	31,9	27,5
TM-2500/35	2,5	2x2,5	35	6,3;11	6,5	26	5,1	1,1	5,1	31,9	27,5
TMH-4000/35	4,0	6x1,5	35	6,3;11	7,5	33,5	6,7	1,0	2,6	23	40,0
TM-4000/35	4,0	2x2,5	35	6,3;11	7,5	33,5	6,7	1,0	2,6	23	40,0
TMH-6300/35	6,3	6x1,5	35	6,3;11	7,5	46,5	9,2	0,9	1,4	14,6	56,7
TM-6300/35	6,3	2x2,5	35	6,3;11	7,5	46,5	9,2	0,9	1,4	14,6	56,7
TD-10000/35	10,0	2x2,5	38,5	6,3;10,5	7,5	65	14,5	0,8	0,96	11,1	80
TMH-10000/35	10,0	9x1,3	36,75	6,3;10,5	7,5	65	14,5	0,8	0,88	10,1	80
TD-16000/35	16	2x2,5	38,5	6,3;10,5	8,0	90	21,0	0,6	0,52	7,4	96
TPDHC-16000/35	16	8x1,5	36,75	6,3	10,0	85	18,0	0,55	0,45	8,4	88
TPDHC-25000/35	25	8x1,5	36,75	6,3;10,5	9,5	115	25,0	0,5	0,25	5,1	125
TPDHC-32000/35	32	8x1,5	36,75	6,3;10,5	11,5	145	30,0	0,45	0,19	4,8	144
TPDHC-40000/35	40	8x1,5	36,75	6,3;10,5	11,5	170	36,0	0,4	0,14	3,9	160
TPDHC-63000/35	63	8x1,5	36,75	6,3;10,5	11,5	250	50,0	0,3	0,1	2,5	220

ცხრილი №61 110 და 220 კვ ძაბვის სამფაზა სამტრედიო ტრანსფორმატორები

ტრანსფორმატორის ტიპი	მწკვ. კვ. წ/წ	ტრანსფორმაციის სიზღვრე ±0 x α %	ტრანსფორმაციის მონაცემები									
			ტრანსფორმაციის მონაცემები									
			ტრანსფორმაციის მონაცემები					ტრანსფორმაციის მონაცემები				
			მ	ს	დ	მ	ს	დ	მ	ს	დ	პკვ. %
TMTH-6300/35	6,3	±8x1,5	35	10,5	6,6	100	100	100	7,5	7,5	16,5	
TMTH-10000/35	10	±8x1,5	36,75	10,5	6,6	100	100	100	8,0	16,5	7,2	
TMTH-16000/35	16	±8x1,5	36,75	13,8	6,6	100	100	100	8,0	17	7,5	
TDTH-10000/110	10	±9x1,78	115	38,5	11	100	100	100	10,5	17,8	6,0	
TDTH-16000/110	16	±9x1,78	115	38,5	11	100	100	100	10,5	17	6,0	
TDTH-25000/110	25	±9x1,78	115	38,5	11	100	100	100	10,5	17	6,0	
TDTH-40000/110	40	±9x1,78	115	38,5	11	100	100	100	10,5	17	6,0	
TDTH-63000/110	63	±9x1,78	115	38,5	11	100	100	100	10,5	17	6,0	
TDLTH-80000/110	80	±9x1,78	115	38,5	11	100	100	100	10,5	17	6,0	
TDTH-25000/220	25	±8x1,5	230	38,5	11	100	100	100	12,5	20	6,5	
TDTH-40000/220	40	±8x1,5	230	38,5	11	100	100	100	12,5	22	9,5	
TDLTH-63000/220	63	±8x1,5	230	38,5	11	100	100	100	12,5	24	10,5	

ცხრილი დ-1 (ტაბრიკულება)

ტრანსფორმატორის ტიპი	კატალოგური მონაცემები		საანბარი შო მონაცემები												
			ΔP _{კ.ვ.} კვტ		I _{კ.ს.} %		ΔP _{კ.ს.} კვტ		R _{კომი}			X _{კომი}			ΔG _{კ.ს.} კვარ
									გ	ბ	დ	გ	ბ	დ	
TMTH-6300/35	55	0,85	0,94	0,94	0,94	0	17	17,8	53,5						
TMTH-10000/35	75	0,85	0,51	0,51	0,51	11,7	0	10,6	85						
TMTH-16000/35	115	0,65	0,3	0,3	0,3	7,5	0	7,0	104						
TDTH-10000/110	60	1,10	5,3	5,3	5,3	142	0	82	110						
TDTH-16000/110	80	1,09	2,7	2,7	2,7	88	0	52	168						
TDTH-25000/110	140	0,7	1,5	1,5	1,5	54	0	33	175						
TDTH-40000/110	230	0,90	0,95	0,95	0,95	35,4	0	20,6	360						
TDTH-63000/110	310	0,85	0,52	0,52	0,52	22,6	0	13,1	536						
TDLTH-60000/110	390	0,80	0,4	0,4	0,4	17,7	0	10,3	640						
TDTH-25000/220	135	1,2	5,72	5,72	5,72	276	0	148	300						
TDTH-40000/220	240	1,1	3,97	3,97	3,97	165	0	126	440						
TDLTH-63000/220	320	1,0	2,13	2,13	2,13	109	0	92,5	630						

ცხრილი №-62 220 და 500 კვ ძაბვის ხაზგაყვანა და ერთფაზა ავტომატური მოწყობის

ავტომატური მოწყობის ტიპი	მ. კვ. წ. / მ. კვ. წ.	თერმული მოცულობის საზღვრები ±0 x α %	კონსტრუქციის მონაცემები									
			ტრანსმისიონალური მოცულობის მონაცემები									
			მ	ნ	დ	მ	ნ	დ	მ	ნ	დ	მ, ნ
ATDTH-32000/220/110	32	±6x2	230	121	11	100	100	50	11	34	21	21
ATDTH-63000/220/110	63	±6x2	230	121	11	100	100	50	11	35	22	22
ATDLTH-100000/220/110	100	±6x2	230	121	11	100	100	50	11	31	19	19
ATDLTH-125000/220/110	125	±6x2	230	121	11	100	100	50	11	31	19	19
AODLTH 167000/500/220	167	±6x2,1	500/13	230/13	11	100	100	30, 50	11	35	21,5	21,5
AODLTH 267000/500/220	267	±8x1,4	500/13	230/13	11	100	100	25, 45	11,5	37	23	23

ცხრილი №-62 (ხაზგაყვანა)

ავტომატური მოწყობის ტიპი	კონსტრუქციის მონაცემები			საანგარიშო მონაცემები									
	ΔP _{გვ.} მმ	I _{ა.ს.} %	ΔP _{ა.ს.} მმ	R _{კმ}			X _{კმ}			ΔQ _{კმ.ს.} კვადრ.			
				მ	ს	დ	მ	ს	დ	მ	ს	დ	
ATDTH-32000/220/110	145	0,6	32	3,74	3,74	7,5	198	0	364	192	192	192	
ATDTH-63000/220/110	215	0,5	45	1,43	1,43	2,9	100	0	193	315	315	315	
ATDLTH-100000/220/110	260	0,5	75	0,69	0,69	1,38	60,8	0	103	500	500	500	
ATDLTH-125000/220/110	290	0,5	85	0,5	0,5	1,0	48,6	0	82,5	625	625	625	
AODLTH 167000/500/220	325	0,4	125	0,58	0,39	2,9	61,0	0	113,5	2004	2004	2004	
AODLTH 267000/500/220	490	0,35	150	0,28	0,28	0,6	39,8	0	126,4	3204	3204	3204	

**ცხრილი დ-7.1 არაიზოლირებული სადენებისთვის
გახურებაზე დასაშვები ღენი, ამპერი**

საილენბის სადენი		ალუმინის სადენი		ფოლად-ალუმინის სადენი	
ხადენის მატკა	დასაშვები ღენი	ხადენის მატკა	დასაშვები ღენი	ხადენის მატკა	დასაშვები ღენი
M-6	70	A-16	105	AC-35/6,2	175
M-10	95	A-24	135	AC-50/8	210
M-16	130	A-35	170	AC-70/11	265
M-25	180	A-50	215	AC-95/16	330
M-35	220	A-70	265	AC-120/19	380
M-50	270	A-95	320	AC-150/24	445
M-70	340	A-120	375	AC-185/29	510
M-95	415	A-150	440	AC-240/39	610
M-120	485	A-185	500	AC-300/48	690
M-150	570	A-240	590	AC-330/43	705
M-185	640			AC-400/51	710
				AC-500/64	945

**ცხრილი დ-7.2 მიწაში გაყვანილი 1-10 კვ ძაბვის კაბლებისთვის
გახურებაზე ხანგრძლივად დასაშვები ღენი
(მიწის ტემპერატურა +15°C), ამპერი**

კაბელის ფენგამტარი ნაწილის ხანგრძლივობა, მმ2	ხანგრძლივად დასაშვები ღენი, ა						ოთხსადენი- ნი კაბელი	
	სამხადენიანი კაბელი						1 კაბელი	
	3კვ		6კვ		10კვ		1კვ	
	ბ/წ/მმ	ა/წ/მმ	ბ/წ/მმ	ა/წ/მმ	ბ/წ/მმ	ა/წ/მმ	ბ/წ/მმ	ა/წ/მმ
	მმ	მმ	მმ	მმ	მმ	მმ	მმ	მმ
2,5	40	21	-	-	-	-	-	-
4	55	32	-	-	-	-	50	38
6	70	55	-	-	-	-	60	46
10	95	75	80	60	-	-	85	65
16	120	90	105	80	95	75	115	90
25	160	125	135	105	120	90	150	115
35	190	145	160	125	150	115	175	135
50	235	180	200	155	180	140	215	165
70	285	220	245	190	215	165	265	200
95	340	260	295	225	265	205	310	240
120	390	300	340	260	310	240	350	270
150	435	335	390	300	355	275	395	305
185	490	380	440	340	400	310	450	345
240	570	440	510	390	460	355	-	-
კაბელის დასაშვები ტემპერატურა	+80 °C		+65 °C		+60 °C		+80 °C	

ცხრილი დ-73 1-10 კვ ძაბვის ღია სივრცეში გაკიდებული
კაბლებისთვის გახურებაზე ხანგრძლივად დასაშვები ტემპერატურა (პაერის
ტემპერატურა $+25^{\circ}\text{C}$), ამპერი

კაბელის დენობითი ნაწილის ხანგრძლივობა, მმ 2	ხანგრძლივად დასაშვები ტემპი, ა							
	სამსადენიანი კაბელი						ოთხსადენი- ანი კაბელი	
	3კვ		6კვ		10კვ			
	სპილენძი	ალუმინი	სპილენძი	ალუმინი	სპილენძი	ალუმინი	1 კვ	
							სპილენძი	ალუმინი
2,5	28	22					-	-
4	37	29					35	27
6	45	35		-			45	35
10	60	46	55	42	-	-	60	45
16	80	60	65	50	60	46	80	60
25	105	80	90	70	85	65	100	75
35	125	95	110	85	105	80	120	95
50	155	120	145	110	135	105	145	110
70	200	155	175	135	165	130	185	140
95	245	190	215	165	200	155	215	165
120	285	220	250	190	240	185	260	200
150	330	255	290	225	270	210	300	230
185	376	290	325	250	305	235	340	260
240	430	330	375	290	350	270	-	-
კაბელის დასაშვები ტემპერატურა	+80 °C		+65 °C		+60 °C		+80 °C	

ცხრილი დ-7.4 20 და 35 კვ ძაბვის სამფაზა კაბელებისთვის
გახურებაზე ხანგრძლივად დასაშვები დენი, ამპერი

კაბელის განიკვეთი, მმ ²	20 კვ				35 კვ			
	მიწაში გაყვანილი $t=+15^{\circ}\text{C}$		ღია სივრცეში გაყიდებული $t=+25^{\circ}\text{C}$		მიწაში გაყვანილი $t=+15^{\circ}\text{C}$		ღია სივრცეში გაყიდებული $t=+25^{\circ}\text{C}$	
	სპილენძი	ალუმინი	სპილენძი	ალუმინი	სპილენძი	ალუმინი	სპილენძი	ალუმინი
25	110	85	85	65				-
35	135	105	100	75				
50	165	125	120	90				
70	200	155	150	115	195	150	145	110
95	240	185	180	140	235	180	180	140
120	275	210	205	160	270	210	205	160
150	315	240	230	175	310	240	230	175
185	355	275	265	205				

შენიშვნა: ცხრილში ნაჩვენებია ხანგრძლივად დასაშვები დენური
დატვირთვები შეესაბამება კაბელის გახურების ტემპერატურას $+50^{\circ}\text{C}$

ცხრილი დ-8. სადენებისა და კაბელებისთვის გახურებაზე
ხანგრძლივად დასამუშავი ღენის შემასწორებელი კოეფიციენტები
გარემოს სხვადასხვა ტემპერატურისას

გარემოს ზღვრული ნორმირებული ტემპერატურა, °C		გარემოს ტემპერატურა, °C											
დენგამტარი ნაწილის ნორმი რებული ტემპერატურა, °C		-5	0	+5	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40	+45	+50
15	80	1,14	1,11	1,08	1,04	1,00	0,96	0,92	0,88	0,83	0,78	0,73	0,68
25		1,24	1,20	1,17	1,13	1,09	1,04	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,74
25	70	1,29	1,24	1,20	1,15	1,11	1,05	1,00	0,94	0,88	0,81	0,74	0,67
15		1,18	1,14	1,10	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84	0,77	0,71	0,63	0,55
25	60	1,32	1,27	1,22	1,17	1,12	1,05	1,00	0,94	0,87	0,79	0,71	0,62
15		1,20	1,15	1,12	1,06	1,00	0,94	0,88	0,82	0,75	0,67	0,57	0,47
25	55	1,35	1,31	1,25	1,20	1,12	1,07	1,00	0,93	0,85	0,76	0,66	0,54
15		1,22	1,17	1,12	1,07	1,00	0,93	0,86	0,79	0,71	0,61	0,50	0,36
25	50	1,41	1,35	1,29	1,23	1,15	1,08	1,00	0,91	0,82	0,71	0,58	0,41
15		1,25	1,20	1,14	1,07	1,00	0,93	0,84	0,76	0,66	0,54	0,37	—
25		1,48	1,41	1,34	1,26	1,18	1,09	1,00	0,89	0,78	0,63	0,45	—

ცხრილი დ-9 მიწაში ერთმანეთის გვერდით განლაგებული
კაბელებისთვის გახურებაზე დასამუშავი ღენის შემასწორებელი
კოეფიციენტები

კაბელებს შორის მანძილი, მმ	კაბელების საერთო რაოდენობა					
	1	2	3	4	5	6
100	1	0,9	0,85	0,80	0,78	0,75
200	1	0,92	0,87	0,84	0,82	0,81
300	1	0,93	0,90	0,87	0,86	0,85

1. Автоматизация управления энергообъединениями. Под ред. С. А. Совалова, М., Энергия, 1979, 416 с.
2. Александров Г. Н. Воздушные линии электропередачи повышенной пропускной способности, «Электричество», 1981, №7.
3. Александров Г. Н. Коронный разряд на линиях электропередачи, М- Л. Энергия, 1964, 228 с.
4. Анисимова Н. Д. и др. Расчеты и анализ режимов работы сетей. Под ред. В. А. Веникова, М. Энергия, 1974. 336 с.
5. Баринов В. А., Совалов С. А. Режимы энергосистем: Методы анализа и управления, М. Энергоатомиздат, 1990, 440 с.
6. Бернас С., Цёк З. Математические модели элементов электроэнергетических систем. М., Энергоатомиздат, 1982, 312 с.
7. Блок В. М. Электрические сети и системы, М., Высшая школа, 1986, 430 с.
8. Богданов В. А. Веников В. А. и др. Электрические системы. Автоматизированные системы управления режимами энергосистем. М., Высшая школа, 1979, 448 с.
9. Боровиков В. А., Косарев В. К., Ходот Г. А. Электрические сети энергетических систем. Л., Энергия, 1977, 391 с.
10. Брацлавской С. Х., Генценгорн А. И., Лосев С. Б. Специальные расчеты электропередач сверхвысокого напряжения, М., Энергоатомиздат, 1985, 312 с.
11. Веников В. А., Глазунов А. А., Жуков Л. С., Солдаткина Л. А. Электрические системы, т.2. Электрические сети. Под ред. В. А. Веникова. В., Высшая школа, 1971, 440 с.
12. Веников В. А. Дальние электропередачи. М., 1960, 311 с.
13. Веников В. А., Журавлов В. Г., Филишова Т. А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. М., Энергоатомиздат, 1981, 464 с.
14. Веников В. А., Рижов Ю. П. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока. М., Энергоатомиздат, 1985.
15. Веников В. А., Худяков В. В., Анисимова Н. Д. Электрические системы, т.3. Передача энергии переменным и постоянным током высокого напряжения. Под ред. В. А. Веникова. М., Высшая школа, 1972, 368 с.
16. Глазунов А. А., Глазунов А. А. Электрические сети и системы, М-Л., ГЭИ, 1960, 368 с.

17. Грудинский П. Г. О потерях энергии и затратах цветного металла в энергосистемах, «Электричество», 1946, №6.
18. Димо П. Модели РЕИ и параметры режима. Перевод с румынского, М., Энергоатомиздат, 1987, 390 с.
19. Жуков Л. А., Страган И. П. Установившейся режимы сложных электрических сетей и систем. Методы расчета, М., Энергия, 1979, 416 с.
20. Идельчик В. И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. М., Энергоатомиздат, 1988, 288 с.
21. Идельчик В. И. Расчеты установившихся режимов электрических систем. Под ред. В. А. Веникова. М., Энергия, 1977, 192 с.
22. Идельчик В. И. Электрические системы и сети, М., Энергоатомиздат, 1989, 592 с.
23. Казанцев В. Н. Методы расчета и пути снижения потерь энергии в электрических сетях. Сведловск, изд. УПИ, 1983, 89 с.
24. Кощев Л. А., Руденко Ю. Н. и др. Режимная управляемость систем энергетики. Новосибирск, наука, Сиб. Отделение, 1988, 234 с.
25. Литвак Л. В. Повышение коэффициента мощности на промышленных предприятиях, М., ГЭИ, 1957.
26. Маркович И. М. Режимы энергетических систем. М., «Энергия», 1969, 352 с.
27. მახარაძე გ., გოცირიძე მ. საპაერო ელექტროგადამცემის ხაზის მდგომარეობის განგოლების ამოხსნის შესახებ. თბ. სამეცნიერო გეჟნიკური ჟურნალი „ენერგია“, 3(19) 2001.
28. მახარაძე გ., ბაბუნაშვილი ზ., ბეგიაშვილი ე., ღარჩია ბ. საპაერო ელექტროგადამცემის ხაზები. კონსტრუქციული შესრულება, მუშაობის რეჟიმები, ექსპლუატაცია-რემონტი. თბ. „უნივერსალი“, 2005, 234 გვ.
29. მახარაძე გ., ბაბუნაშვილი ბ., მეგრეველი ე., თხელიძე თ. ძალოვანი გრანსფორმაგორები. კონსტრუქციული შესრულება, ექსპლუატაცია, რემონტი. „საქენერგო“, თბ. 2002, 192 გვ.
30. Махарадзе Г. Т., Буадзе В. В. К вопросу симметрирования параметров режима электрических сетей. Тезисы докладов XXIII республиканской научно-технической конференции ГПИ им. В. И. Ленина, 1981.
31. Махарадзе Г. Т., Буадзе В. В. Компенсация реактивной мощности в локальных электрических сетях, ელექტროენერგეტიკული პროცესები და დანადგარები, სამეცნიერო შრომები, № 11(367), თბ. 1990.

32. მახარაძე გ. ენერგოსისტემების რეჟიმების მართვა და ოპტიმიზაცია. თბ. „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 2005, 288 გვ.
33. მახარაძე გ. ელექტრული ქსელების დაპროექტება. თბ. „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 1993, 48 გვ.
34. მახარაძე გ. ელექტროსისტემაში სიხშირის პირველადი რეგულირება სიმძლავრის ცხელი რემერვის დეფიციტის პირობებში. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი „ენერგია“, 4 (32). 2004.
35. მახარაძე გ. ენერგიის გადაცემა და განაწილება. „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, თბ. 1993. 66 გვ.
36. მახარაძე გ., კიკალიშვილი მ. ელექტრულ ქსელში რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაცია ეკვივალენტობის პრინციპით. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი „ენერგია“, 4(12), 1999.
37. მახარაძე გ., კიკალიშვილი მ. რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაცია მაგისტრალურ და რადიალურ ელექტრულ ქსელებში. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი „ენერგია“ 4(16), 2000.
38. მახარაძე გ. ქურციკიძე გ. ელექტრული ენერგიის გადაცემა და განაწილება, საკურსო და სადიპლომო გეგმარება. „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, თბ. 2001, 66 გვ.
39. მახარაძე გ., კიკალიშვილი მ. რეგიონალ მანაწილებელ ქსელებში რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაციის მათემატიკური მოდელი. სტუ-ს შრომები №2 (452), თბ. 2004.
40. მახარაძე გ., სულაძე მ., გოცირიძე მ. საპაერო ელექტროგადაცემის ხაზების მუშაობის მექანიკური და ელექტრული რეჟიმები. თბ. „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 2004, 314 გვ.
41. მახარაძე გ., ხომერიკი მ. ელექტრული ქსელის მუშაობის რეჟიმების გაანგარიშება და ანალიზი, თბ. 1987. 94 გვ.
42. მახარაძე გ., ხომერიკი მ. ფიცხელაური ა. ელექტროგადაცემის ხაზების მექანიკური ნაწილი. თბ. 1987, 48 გვ.
43. Махарадзе Г. Т. Региональная компенсация реактивной мощности в электрических сетях. Вклад ученых ВУЗ-а в ускорение научно-технического прогресса. Сборник статей ГПИ, Тб. 1989.
44. Мельников Н. А. Расчеты режимов сетей электрических систем. ГЭИ, 1950.
45. Мельников Н. А., Рокотян С. С., Шеренцис А. Н. Проектирование электрической части воздушных линий электропередачи 330-500 кв. М., Энергия, 1974. 472 с.

46. Мельников Н. А. Электрические сети и системы, М. Энергия 1975, 464 с.
47. Новые средства передачи электроэнергии в энергосистемах. Под ред. Г. Н. Александрова, Л. Изд. Ленинградского Университета, 1987. 232 с.
48. Поспелов Г. Е., Сыч Н. Д. Потери мощности и энергии в электрических сетях. Под ред. Г. Е. Поспелова, М. Энергоатомиздат, 1981.
49. Поспелов Г. Е., Федин В. И. Энергетические системы, Минск, Высшая школа, 1974, 272 с.
50. Поспелов Г. Е., Федин В. И. Проектирование электрических сетей и систем, Высшая школа, 1978, 302 с.
51. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем. Под ред. В. Н. Казаниева. М. Энергоатомиздат, 1983.
52. Рабинович Р. С. Автоматическая частотная разгрузка энергосистем. М., Энергоатомиздат, 1989, 352 с.
53. Рене Пелисье, Энергетические системы, Перевод с французского, Высшая школа, 1982, 568 с.
54. Розанов М. Н. Надежность электроэнергетических систем. М., Энергоатомиздат, 1984, 200 с.
55. Савалов С. А. Режимы электропередачи 400-500 кв, М. Энергия, 1980, 304 с.
56. Справочник по проектированию электроэнергетических систем. Под ред. С. С. Рокотьяна и И. М. Шапиро. М., Энергоатомиздат, 1985, 352 с.
57. საქართველოს ენერგეტიკული სტრატეგია. ავტორთა კოლექტივი დ. მირცხულავას ხელმძღვანელობით. თბ. 2004, 298 გვ.
58. Технический прогресс энергетики СССР. Под ред. П. С. Непорожного, М., Энергоатомиздат, 1986, 224 с.
59. ქერდიანი ი., ქერციკიძე გ. ელექტრული ქსელები და სისტემები. თბ. განათლება, 1972.
60. ჩოგოვაძე გ., ჩიხლაძე ნ., ყიასაშვილი გ. საქართველოს ელექტროენერგეტიკის ისტორია, თბ. 1998, 634 გვ.
61. Холмский В. Т. Расчет и оптимизация режимов элетрических систем. М., высшая школа, 1975, 280 с.
62. Экспериментальные исследования режимов энергосистем. Под ред. С. А. Савалова, М., Энергоатомиздат, 1985, 448 с.
63. Электрическая часть электростанций. Под ред. С. В. Усова Л. «Энергия», 1977, 566 с.

64. Электрические системы. Математические задачи электро-энергетики. Под ред., В. А. Веникова, М., Высшая школа, 1981, 288 с.
65. Электрические системы. Режимы работы электрических систем и сетей. Под ред. В. А. Веникова, М., Высшая школа 1975, 344 с.
66. Электрические системы. Электрические расчеты, программирование и оптимизация режимов. Под ред. В. А. Веникова. М., Высшая школа, 1973. 318 с.
67. Электротехнический справочник Т. 3 Кн. 1 Производство и распределение электрической энергии. Под общ. ред. Профессоров МЭИ, М., Энергоатомиздат, 1988, 880 с.

წინათქმა	3
თავი 1. ელექტრული სისტემის ზოგადი დახასიათება	8
1.1 ელექტრული ენერგიის გადაცემის პრინციპული სქემა	8
1.2 ელექტრული ქსელების დანიშნულება. აღნიშვნები. ტერმინოლოგია	11
1.3 ელექტროგადაცემის ნომინალური ძაბვა	14
1.4 ნომინალურ ძაბვათა გამოყენების ფარგლები	16
1.5 ელექტრული ქსელების კლასიფიკაცია	17
1.6 ელექტრული ქსელის რეჟიმების გაანგარიშების ამოცანები	23
თავი 2. ელექტრული ქსელის ძირითადი ელემენტები	28
2.1 საპაერო ხაზები. ზოგადი ცნობები	28
2.2 საპაერო ხაზების სადენები	31
2.3 საპაერო ხაზების საყრდენები	38
2.4 საპაერო ხაზების იზოლატორები და სახაზო არმატურა	46
2.5 კაბელები და საკაბელო ნაგებობები	54
2.6 ტრანსფორმატორები და ავტოტრანსფორმატორები	64
2.6.1 ზოგადი ცნობები	64
2.6.2 ტრანსფორმატორების გაცივების სისტემები	72
2.6.3 ნეიტრალის ჩამიწება ტრანსფორმატორებში	77
2.6.4 ტრანსფორმატორთა პარალელური მუშაობა	81
2.7 საკომუტაციო აპარატები	83
2.8 რეაქტიული სიმძლავრის მაკომპენსირებელი დანადგარები	85
2.9 სახაზო რეგულატორები (ვოლტსამეტი ტრანსფორმატორები)	90
თავი 3. ელექტრული ქსელის ელემენტების მახასიათებელი პარამეტრები	91
3.1 გვირგვინული განმუხტვები ელექტროგადაცემის ხაზებზე	91
3.2 სიმძლავრისა და ენერგიის დანაკარგები გვირგვინზე	98
3.3 საპაერო ელექტროგადაცემის ხაზების ელექტრული პარამეტრები	105

3.3.1 აქტიური წინაღობა	105
3.3.2 რეაქტიული წინაღობა	108
3.3.3 აქტიური გამგარობა	112
3.3.4 რეაქტიული გამგარობა	113
3.4 საკაბელო ხაზების ელექტრული პარამეტრები	114
3.5 ხაზის მიერ გენერირებული რეაქტიული სიმძლავრე	115
3.6 ხაზის ნატურალური სიმძლავრე	117
3.7 ხაზის ჩანაცვლების სქემა	120
3.8 გრანსფორმატორებისა და ავტოგრანსფორმატორების ელექტრული პარამეტრები	123
3.8.1 გრანსფორმატორებისა და ავტოგრანსფორმატორების საპასპორტო მონაცემები	123
3.8.2 ორგრაგნილიანი გრანსფორმატორების ჩანაცვლების სქემა და ელექტრული პარამეტრები	129
3.8.3 სამგრაგნილიანი გრანსფორმატორებისა და ავტოგრანსფორმატორების ჩანაცვლების სქემები და ელექტრული პარამეტრები	131
3.9 სადენებისა და კაბელების თხური მახასიათებლები	135
3.10 სისტემის დატვირთვის გრაფიკები	138
3.11 დატვირთვის სტატიკური მახასიათებლები	144
3.12 დატვირთვის წარმოადგენა საანგარიშო სქემებზე	149
3.13 სინქრონული გენერატორის წარმოადგენა დამყარებული რეჟიმების გაანგარიშებისას	154
3.14 მე-3 თავის რიცხვითი მაგალითები	156
თავი 4. ელექტროგადაცემის უბნის რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება	168
4.1 ელექტროგადაცემის ხაზი როგორც ოთხპოლუსა	168
4.2 ხაზის რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშების ამოცანები	173
4.3 ელექტროგადაცემის რეჟიმის გაანგარიშება დატვირთვის დენის მიხედვით	174
4.4 ელექტროგადაცემის რეჟიმის გაანგარიშება დატვირთვის სიმძლავრის მიხედვით	179
4.5 ელექტროგადაცემის რეჟიმის გაანგარიშება გადასაცემი სიმძლავრის მიხედვით	184
4.6 ელექტროგადაცემის რეჟიმის გაანგარიშება იტერაქციული მეთოდის გამოყენებით	186
4.7 თანაბარგანაწილებული დატვირთვის მქონე უბნის რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება	187

4.8 გრანსფორმატორული უბნის რეეიმის პარამეტრების გაანგარიშება	190
4.9 მე-4 თავის რიცხვითი მაგალითები	195
თავი 5. შორეული ელექტროგადაცემა	201
5.1 შორ მანძილზე ენერგიის გადაცემის თავისებურებანი	201
5.2 გრძელი ელექტროგადაცემის განგოლებები	203
5.3 ენერგიის გადაცემის გაღლური პროცესების სახასიათო პარამეტრების ფიზიკური არსი	208
5.4 უღანაკარგო ხაზის განგოლებები	212
5.5 უღანაკარგო ხაზის გასწვრივ ძაბვის ცვლილების ხასიათი	214
5.6 ელექტროგადაცემისწრიული დიაგრამები და კუთხური მახასიათებლები	217
5.7 რეალურ ხაზში ძაბვისა და დენის ცვლილება მოცემული U_1 და U_2 ძაბვების დროს	220
5.8 ხაზის რეეიმის პარამეტრების ურთიერთდამოკიდუ- ლება	222
5.9 გრძელი ელექტროგადაცემის ხაზის ზღვრული სიმძლავრე და გადაცემის მარაგის კოეფიციენტი	224
5.10 რეაქტიული სიმძლავრე ხაზის თავსა და ბოლოში	227
5.11 გრძელი ელექტროგადაცემის ხაზის პარამეტრების კომპენსაცია	229
5.12 გრძელი ელექტროგადაცემის ხაზის დამყარებული რეეიმის პარამეტრების გაანგარიშება	231
5.13 გრძელი ხაზის რეეიმის პარამეტრების გაანგარი- შების გამარტივებული მეთოდები	234
5.14 მე-5 თავის რიცხვითი მაგალითები	237
თავი 6. ელექტრული ქსელის რეეიმების პარამეტრების გაანგარიშება	245
6.1 ქსელის ჩანაცვლების საანგარიშო სქემები	245
6.2 ღია ქსელის რეეიმის პარამეტრების გაანგარიშება	249
6.3 მანაწილებელი ქსელების რეეიმების გაანგარიშების კერძო შემთხვევები	253
6.4 მარტივი შეკრული ქსელების რეეიმების პარამეტ- რების გაანგარიშება	257
6.4.1 შესავალი	257

6.4.2	სიმძლავრეთა განაწილება ორმხრივი კვების ქსელში	258
6.4.3	რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება ორმხრივი კვების ქსელში	260
6.4.4	სხვადასხვა ნომინალური ძაბვის მარგივი შეკრული ქსელის რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება	262
6.4.5	ორმხრივი კვების ქსელში სიმძლავრეთა განაწილების კერძო შემთხვევები	265
6.5	რთული შეკრული ქსელის რეჟიმების გაანგარიშება კონტურულ განგოლებათა მეთოდით	267
6.5.1	კონტურულ განგოლებათა სისტემა	267
6.5.2	კონტურულ განგოლებათა სისტემის ამოხსნა	271
6.5.3	რთულ შეკრულ ქსელებში სიმძლავრეთა განაწილების გამარტივების ხერხები	277
6.5.4	რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება კონტურული სიმძლავრეების მიხედვით	281
6.6	რთული შეკრული ქსელის რეჟიმის გაანგარიშება კვანძური ძაბვების მეთოდით	283
6.6.1	კვანძური ძაბვების განგოლებათა სისტემა	283
6.6.2	კვანძური ძაბვების განგოლებათა სისტემის ამოხსნა	288
6.6.3	რეჟიმის პარამეტრების გაანგარიშება კვანძური ძაბვებით	289
6.6.4	კვანძური ძაბვების განგოლებათა სისტემა გრანსფორმატორული უბნების შემთხვევაში	292
6.7	მე-6 თავის რიცხვითი მაგალითები:	295
თავის 7. ელექტრული ენერგიის ხარისხი და მისი უზრუნველყოფა		
		321
7.1	ელექტრული ენერგიის ხარისხის მაჩვენებლები და მათი გაელენა ელექტრომომხმარებელთა მუშაობაზე	321
7.2	ტურბინის ბრუნვის სიხშირის რეგულატორი	328
7.3	სიხშირის პირველადი რეგულირება	335
7.4	ენერგოსისტემაში სიხშირის პირველადი რეგულირება სიმძლავრის ცხელი რეზერვის დეფიციტის პირობებში	337
7.5	სიხშირის მეორეული რეგულირება	340
7.6	სიხშირული ავტომატური განგვირთვა	343
7.7	დინამიკური პროცესი და სიხშირის მართვა	347

7.8 ელექტრულ ქსელში ძაბვის რეგულირების პრინციპები და საშუალებები	351
7.9 ძაბვის რეგულირება გენერატორის აგზნების ღენის ცვლილებით	355
7.10 ძაბვის რეგულირება გრანსფორმატორების გრანსფორმაციის კოეფიციენტის შეცვლით	357
7.10.1 რეგულირების ზოგადი პრინციპი	357
7.10.2 ძაბვის რეგულირება ორ და სამგრადილიანი გრანსფორმატორებით	362
7.10.3 ძაბვის რეგულირება ავტოგრანსფორმატორებით	364
7.11 ძაბვის რეგულირება სახაზო რეგულატორებით	368
7.12 ძაბვის რეგულირება ელექტროგადაცემის რეაქტიული წინაღობისა და მომხმარებლის რეაქტიული დატვირთვის კომპენსაციით	371
7.13 ძაბვის დანაკარგის ცვლილება ხაზის აქტიური წინაღობის ცვლილებით	375
7.14მე-7 თავის რიცხვითი მაგალითები	376
თავი 8. ელექტრული ენერგიის დანაკარგები და მათი შემცირების ღონისძიებები	394
8.1 შესავალი	394
8.2 ელექტრული ენერგიის გეჟნიკური დანაკარგების გაანგარიშების მეთოდები	395
8.3 ელექტრული ენერგიის დანაკარგების შემცირების ღონისძიებები	403
8.4 აქტიური სიმძლავრის კოეფიციენტის ამაღლება	406
8.5 რეაქტიული დატვირთვის ოპტიმალური კომპენსაცია მაგისტრალურ და რადიალურ ელექტრულ ქსელებში	410
8.6 აქტიური სიმძლავრის დანაკარგების შემცირება ძაბვის ღონის აწევით	411
8.7 პარალელურად ჩართული გრანსფორმატორების მუშაობის ეკონომიკური რეჟიმები	413
8.8 შეკრულ ქსელში დატვირთვის ეკონომიკური განაწილება	416
8.9 მე-8 თავის რიცხვითი მაგალითები	420
დანართები	429
ლიტერატურა	441

გ. მახარაძე, ვ. ბეგიაშვილი, ბ. ღარჩია

**ელექტრული ენერგიის გადაცემა და განაწილება.
2006. – 451 გვ.**

**კორექტორი *ეთერ ხორაეა*
კომპიუტერული
უმრუნველყოფა *თინათინ ბერბერაშვილი***