

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

გალინა ქადაგიშვილი

ენერგეტიკული დანიშნულების მაღალტემპერატურული (77კ)

ზეგამტარული გადამრთველის-კრიოტრონის კვლევა

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა: „ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“

შიფრი: 0405

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

ივლისი, 2018 წელი

საავტორო უფლება © 2018 წელი, გალინა ქადაგიშვილი

თბილისი

2018 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით გალინა ქადაგიშვილის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ენერგეტიკული დანიშნულების მაღალტემპერატურული (77კ) ზეგამტარული გადამრთველის-კრიოტრონის კვლევა“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

ივლისი, 2018

ხელმძღვანელი ----- პროფესორი თ. კობრეიძე

რეცენზენტი -----

რეცენზენტი -----

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
2018 წელი

ავტორი: გალინა ქადაგიშვილი

თემის დასახელება: ენერგეტიკული დანიშნულების
მაღალტემპერატურული (77კ) ზეგამტარული გადამრთველის-კრიოტრონის
კვლევა.

ფაკულტეტი: ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

ხარისხი: აკადემიური დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: ივლისი, 2018

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

ავტორის ხელმოწერა

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

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

რეზიუმე

ცნობილია, რომ მაგნიტურ ველის, ელექტრული დენის ან ტემპერატურის ზემოქმედებით ელექტრული წინაღობა ზეგამტარული მასალის, იცვლება ნულიდან გარკვეულ საბოლოო მნიშვნელობამდე. თავდაპირველად მარტივ ფორმაში კრიოტრონი წარმოდგენილი იყო ზეგამტარული მავთულით, რომელიც შეიძლება გადაართულიყო ნულოვანი წინააღობიდან ნორმალურ მდგომარეობაში, მაგნიტური ველის საშუალებით, შექმნილი ელექტრული დენით, გავლილი სხვა ზეგამტარში. მავთული რომელიც გადაირთვება ნორმალური მდგომარეობიდან ზეგამტარულში და პირიქით, ეწოდება ვენტისური სადენი.

1954 წელს დ.ა. ბაკმა გამოიგონა მავთულიანი გადამრთველი-კრიოტრონი ზეგამტარული ნიობიუმი – ტანტალის, გამომთვლელი მოწყობილობის შექმნისათვის. მოგვიანებით, 1956 წელს ი.ს. კანმა დაამუშავა მავთულიანი ტყვია-კალის კრიოტრონი. უპირატესობა აღნიშნული კრიოტრონის, შედარებით პირველთან, წარმოადგენდა: სიმარტივეს მასიური წარმოებისათვის; დამზადების დროს გამოყენებული მასალების ნაკლები ღირებულებით. ყოველივე ამან ბიძგი მისცა იმ დროისათვის დაემზადებინათ ექსპერიმენტული მაკეტები და ჩაეტარებინათ კვლევები კრიოტრონების: გამომთვლელი, გამზომი და საკომუტაციო მოწყობილობებისათვის.

ნაშრომის პირველ თავში წარმოდგენილია ენერგეტიკული დანიშნულების კრიოტრონული გარდამქმნელის მახასიათებლები. განხილულია კრიოტრონული გადამრთველების ლიტერატურული კრიტიკული მიმოხილვა, კრიოტრონების პარამეტრები. გამოვლინდა, რომ არსებული კრიოტრონების გადამრთველი ელემენტების დიდი მოცულობასთან დაკავშირებით, მათი სწრაფქმედება იყო დაბალი.

დამუშავებულია ენერგეტიკული დანიშნულების მაღალტემპერატურული (77კ) ზეგამტარული გადამრთველი-კრიოტრონი, რომლის მახასიათებლების გაუმჯობესება, შეიძლება ამაღლდეს მაღალტემპერატურული მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენების გამოყენებით.

კრიოტრონი შეიცავს სამ გრაგნილს: მუშა გრაგნილი, რომელიც წარმოადგენს გადამრთველ ელემენტს; მართვის გრაგნილი, რომელიც აღებს კრიოტრონს; ჩამკეტი გრაგნილი, სუსტი მაგნიტური კავშირით მართვის გრაგნილთან. მუშა გრაგნილი შესრულებულია ლოკალიზირებული მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენით, რომლის შევსების კოეფიციენტი გაცილებით ნაკლებია ერთზე. მართვის გრაგნილი წარმოადგენს ჩამკეტ გრაგნილს, რომელშიც ჩამკეტი დენი აჭარბებს გადამრთველი ელემენტის კრიტიკულ დენს და შესრულებულია მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენების საფუძველზე. ჩამკეტი გრაგნილი იმართება მართკუთხა ფორმის დენის იმპულსით. იმპულსის დროის ინტერვალში კრიოტრონი გაღებულია, დანარჩენ დროში კრიოტრონი ჩაკეტილია. აგებულია კრიოტრონის ვოლტამპერული

მახასიათებელი, რომლისგანაც განისაზღვრება ძაბვის ვარდნა და დანაკარგები ჩაკეტილ მდგომარეობაში.

კრიოტრონი წარმოადგენს სრულად მართვადი სიმეტრიულ გადამრთველს ორმხრივი გამტარობით და ხასიათდება:

- ღია მდგომარეობაში ძაბვის ვარდნის არ არსებობით;
- ღია მდგომარეობაში ორმხრივი გამტარობით;
- ჩაკეტილ მდგომარეობაში ორმხრივი ჩაკეტვით;
- ჩართვა და გამორთვა დენის მიმართულებისა და ძაბვის პოლარობისაგან დამოუკიდებლად;

კრიოტრონის ძირითად ნაკლოვანებას წარმოადგენს:

- შეზღუდული სწრაფქმედება;
- ჩაკეტილ მდგომარეობაში დანაკარგების არსებობა;
- მართვის დიდი დენები.
- აღნიშნული ნაკლოვანებობის აცილებისათვის აუცილებელია გადამრთველი ელემენტის გრაფნილის დამზადება ლოკალიზირებული მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენისაგან, ძარღვის არამაღალი შევსების კოეფიციენტით და ძარღვში დენების მაქსიმალური სიმკვრივით.

განხილულია ერთფაზა კრიოტრონული გარდამქმნელი, რომელიც წარმოადგენს ორკონტურიან ელექტრულ წრედს შეერთებული ერთი კრიოტრონით. შესწავლილია მასში კომუტაციური გარდამავალი პროცესები.

ნაშრომის მეორე თავში განხილულია ელექტრომაგნიტური პროცესები სამფაზა ბოგირულ კრიოტრონულ გარდამქმნელში. დამუშავებულია სამფაზა ბოგირული კრიოტრონული გარდამქმნელის სქემა ნახევრადგამტარული მართვით და შესწავლილია ელექტრომაგნიტური პროცესები სამფაზა ბოგირულ ტირისტორულ გარდამქმნელში, როგორც მართვის სისტემა კრიოტრონული გარდამქმნელისთვის.

განხილულია გამმართველის და ინვერტორის რეჟიმები.

მართვადი გამმართველებისთვის გარე მახასიათებლის ცვლილების კანონზომიერება დამოკიდებულია რეგულირების კუთხის სიდიდეზე და თითოეულ ტირისტორში დენის გატარების ხანგრძლივობაზე, რომელიც თავის მხრივ განისაზღვრება ვენტილების რიცხვით, რომლებიც ერთდროულად ატარებენ დენს. კომუტაციის კუთხის შესაბამისად, ტირისტორში დენის გატარების ხანგრძლივობის კუთხე იცვლება დატვირთვაში დენის ცვლილების დროს.

როცა დატვირთვის დენი ახლოსაა ნომინალურ მნიშვნელობასთან კომუტაციის კუთხე ნაკლებია სამოც გრადუსზე და ტირისტორში დენის გატარების ხანგრძლივობა ნაკლებია ასოთხმოცი გრადუსზე. აღნიშნულ რეჟიმში, სქემაში ერთდროულად, მონაცვლეობით ატარებს დენს ორი ან სამი ტირისტორი.

დენის გაზრდით, ერთდროულად მომუშავე ოთხი ტირისტორის ინტერვალი ფართოვდება, და მოკლე შერთვის დროს სქემაში ნებისმიერ მომენტში ერთდროულად ატარებს დენს ოთხი ვენტილი. ამ შემთხვევაში

კომუტაციის კუთხე ნაკლებია სამოც გრადუსზე და ტირისტორში დენის გატარების ხანგრძლივობის კუთხე ტოლია ორასორმოცი გრადუსის. თითოეული სამი რეჟიმიდან სქემის მუშაობა ხასიათდება გარკვეული კანონზომიერებით, გარე მახასიათებლების ცვლილებით. სამუშაოში განხილულია აღნიშნული რეჟიმები ცალკე, ხოლო შემდეგ ჩატარებულია მიღებული გარე მახასიათებლის უბნების შეუღლება.

ნაშრომის მესამე თავში მოცემულია სამფაზა ბოგირული კრიოტრონული გარდამქმნელის ზეგამტარული სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში.

ნაჩვენებია, რომ ენერგეტიკული დანიშნულების კრიოტრონული გარდამქმნელების დამუშავება და შექმნა მოითხოვს ზეგამტარული სადენების გამოყენებას მაღალი დენგამტარუნარიანობით და დაბალი დანაკარგებით. დადგენილია, რომ აღნიშნული მიზნის მიღწევა შესაძლებელია მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენებით ლოკალიზებული მაგნიტური ველით, რომელშიც ურთიერთ გავლენა ცალკეული ძარღვების მაგნიტური ველების დაყვანილია მინიმუმამდე. გრაგნილების ასეთი შესრულებით დენგამტარუნარიანობა თითოეული ზეგამტარული ძარღვის განისაზღვრება საკუთარი მაგნიტური ველით და საკუთარი პარამეტრებით. მიღებულია ძირითადი თანაფარდობები ზეგამტარული სადენების დენგამტარუნარიანობის და დანაკარგების ანგარიშისათვის ცვლად მაგნიტურ ველში. მოცემულია თხევადი კრიოგენული პროდუქტებთან მიმოქცევის უსაფრთხოების სპეციალური საკითხები.

Summary

It's known that under influence of magnetic field, electric current or temperature an electric resistance of superconductive material changes from zero to certain finite value. Initially cryotron in simple form was represented by superconductive wire, which could be switched from zero resistance to normal condition by means of magnetic field generated by electric current passed through other superconductor. The wire, which switches from normal state to superconductive one and inversely, is called a gate.

In 1954 D.A. Back has invented superconductive switch – a wired niobium-tantalum cryotron for creation of computing devices. Later, in 1956 I.S. Kahn's developed a wired lead-tin cryotron. Advantage of the mentioned cryotron compared with the former was: a simplicity of large-volume production, lower cost of materials used for manufacturing. All this gave at that time a boost to prepare experimental mock-ups and to carry out studies on cryotrons: computing, measuring and switching devices.

In the first chapter of the work are represented characteristics of cryotronic converters intended for energy purposes. There's considered critical analysis of available literature on cryotronic switches and parameters of cryotrons. Due to large volume of available switching elements of cryotrons their response speed was low.

High-temperature (77K) superconductive switch – cryotron for energy purposes is elaborated, which characteristics can be improved with the use of high-temperature multi-core superconductive wires.

Cryotron contains three windings: operating winding, which represents switching element; control winding, which opens cryotron; closing coil with weak magnetic link with control winding. Operating winding is made from localized multi-core cables, which coefficient of fullness is much less than 1. Control winding is represented by closing coil, closing current of which exceeds critical current of switching element and is made on the basis of multi-core superconductive wires. Closing coil is controlled by current impulse of rectangular shape. Within impulse time cryotron is open, while at all other times cryotron is closed. Volt-ampere characteristic of cryotron is constructed that makes possible determination of voltage drop and losses in closed state.

Cryotron is a completely controlled symmetric switch with two-way conductivity and is characterized by:

- non-existence of drop in voltage in open state;
- two-way conductivity in open state;
- two-way closing in closed state;
- power down and up irrespective of current direction and voltage polarity.

Main disadvantages of cryotron are:

- limited response speed;
- loss presence in closed state;
- high control currents.

In order to get rid of the mentioned disadvantages is necessary to manufacture the winding of switching element from localized multi-core superconductive wires, with not high coefficient of fullness and maximum current density in the core.

There's considered one-phase cryotronic converter, which represents double-circuit electric circuit connected by one cryotron. Commutation transient processes occurring in it are studied.

In the second chapter of the work are considered electromagnetic processes in three-phase bridge-type cryotronic converter. There's elaborated diagram of three-phase bridge-type cryotronic converter with semiconductive control and there're studied electromagnetic processes in three-phase bridge-type thyristor converters, as a control system for cryotronic converter. Rectifying and inverter modes are considered. Regularities of external characteristic's change for controlled rectifier are depended on control angle magnitude and current-flow interval in each thyristor, which in its turn is determined by number of valves, which simultaneously conduct current. According to commutating angle, the angle of current-flow interval in thyristor changes during current change in the load. When load current is close to nominal value, commutating angle is less than 60° and angle of current-flow interval in thyristor is less than 180° . In the mentioned mode, two or three thyristors simultaneously and alternately conducts current in the circuit.

With increase in current, the interval of simultaneously operating four thyristors is getting larger and during short circuit four valves simultaneously conduct current at any time. In this case commutating angle is less than 60° and angle of current-flow interval in thyristor is equal to 60° . In all three modes, circuit operation is characterized by certain regularities and change of external characteristics. The mentioned modes are considered separately in the work, and afterwards there's made a conjugation of sections of obtained external characteristics.

In the third chapter of the work is given a current conductivity of superconductive wires of three-phase bridge-type cryotronic converters and its losses in variable magnetic field. There's shown that developing and manufacturing of cryotronic converters for energy purposes requires use of superconductive wires with high current conductivity and low losses. It's established that achievement of this goal is possible by magnetic field localized by multi-core superconductive wires, in which mutual influence of magnetic fields of separate cores is reduced to a minimum. Current conductivity of each superconductive core in case of such execution of windings is determined by own magnetic field and own parameters. There're obtained basic ratios for calculation of current conductivity of superconductive wires and its losses in variable magnetic field. Special issues of safety are given.

შინაარსი

შესავალი	16
ლიტერატურული მიმოხილვა.....	20
შედეგები და მათი განსჯა	25
თავი I. ენერგეტიკული დანიშნულების კრიოტრონული გარდამქმნელის მახასიათებლები	25
1.1. კრიოტრონული გადამრთველები	25
1.2. კრიოტრონის პარამეტრები.....	34
1.3. ენერგეტიკული დანიშნულების მაღალტემპერატურული	38
(77 კ) ზეგამტარული გადამრთველი-კრიოტრონი.....	38
1.4. ზეგამტარული გარდამქმნელები ენერგეტიკული კრიოტრონების ბაზაზე.....	42
1.5. მაღალტემპერატურული სამფაზა კრიოტრონული გამმართველი ნახევრადგამტარული მართვით	54
თავი II. ელექტრომაგნიტური პროცესები სამფაზა ბოგირულ კრიოტრონულ გარდამქმნელში.	58
2.1. სამფაზა ბოგირული კრიოტრონული გარდამქმნელი ნახევრადგამტარული მართვით	58
2.2. ელექტრომაგნიტური პროცესები სამფაზა ბოგირულ ტირისტორულ გარდამქმნელში, როგორც მართვის სისტემა კრიოტრონული გარდამქმნელისთვის.	61
2.2.1. გამმართველის რეჟიმი.....	61
2.2.2 ინვერტორის რეჟიმი.....	71
თავი III. სამფაზა ბოგირული კრიოტრონული გარდამქმნელის ზეგამტარული სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში	73
3.1. ერთძარღვიანი ზეგამტარული სადენის დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში.....	73
3.2. მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში.....	83

3.3. მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენი ლოკალიზებული მაგნიტური ველით.....	86
3.4. უსაფრთხოების სპეციალური საკითხები	91
3.4.1. თხევადი კრიოგენული პროდუქტებთან მიმოქცევის საერთო წესები	92
3.4.2. თხევადი აზოტთან და ჰელიუმთან მიმართვის განსაკუთრებულობა.....	95
3.4.3. ფეთქებადსაშიში მინარევების შემადგენლობის კონტროლი	96
3.4.4. უსაფრთხოების უზრუნველყოფის ორგანიზაციული საფუძვლები	97
დასკვნები.....	98
გამოყენებული ლიტერატურა	100

ცხრილების ნუსხა

	83
ცხრილი 1.1.....	53

ნახაზების ნუსხა

	83
ნახ.1.1. კრიოტრონული გადამრთველი მოწყობილობა	26
ნახ.1.2. კრიოტრონი გადაჯვარედინებული აფსკით	28
ნახ.1.3. კონტური არა მილევადი დენებით დროის საწყის მომენტში ..	30
ნახ.1.4. კონტურზე მოდებული დენის იმპულსის ფორმა	30
ნახ.1.5. დროის t მომენტში კონტური არა მილევადი დენებით	33
ნახ.1.6. იმპულსის შეწყვეტის მომენტში კონტური არა მილევადი დენებით	33
ნახ.1.7. იმპულსის შეწყვეტის შემდეგ რამოდენიმე დროის გავლის შემდეგ კონტური არა მილევადი დენებით	34
ნახ.1.8. კრიოტრონის ვენტის წინაღობის დამოკიდებულება მართვადი გრაგნილში დენისაგან, როცა $T = 3,6$ კ., $R_H = 10^{-4}$ ომი და ვენტის გავლით დენის მნიშვნელობა 1-0,6; 2-0,35 ა.	35
ნახ.1.9. ბაკის მავთულიანი კრიოტრონი	39
ნახ.1.10. კრიოტრონის სქემა (ა) და მუშაობის პრინციპი (ბ)	39
ნახ.1.11. კრიოტრონის ვოლტამპერული მახასიათებელი	40
ნახ.1.12. სამფაზა კრიოტრონული გამმართველის პრინციპული სქემა: 1-პირველადი გრაგნილი; 2- მეორადი გრაგნილი; 3- კრიოტრონის გადამრთველი ელემენტის გრაგნილი; 4-კრიოტრონის შემაგნიტების გრაგნილი; 5- კრიოტრონის მართვის გრაგნილი; 6 - ტირისტორი	56
ნახ.1.13. სამფაზა კრიოტრონული გამმართველის მართვის ახსნა-განმარტებითი მახასიათებლები.....	57
ნახ.2.1. სამფაზა კრიოტრონული გამმართველის პრინციპული სქემა .	59
ნახ.2.2. სამფაზა კრიოტრონული გამმართველის მართვის ახსნა-განმარტებითი მახასიათებლები	60
ნახ.2.3. სამფაზა ბოგირული ტირისტორული გარდამქმნელი, როგორც მართვის სისტემა კრიოტრონული გარდამქმნელისთვის.....	62

ნახ.2.4. სამფაზა ბოგირული ტირისტორული გარდამქმნელი, გამმართველის რეჟიმში მუშაობის დროს:

ა) რეჟიმის პარამეტრების დროის დიაგრამები, როცა $\gamma < \frac{\pi}{3}$;

ბ) ეკვივალენტური სქემა63

ნახ.2.5. რეჟიმის პარამეტრების დროის დიაგრამები, სამფაზა ბოგირული ტირისტორული გამმართველისთვის, როცა $\gamma = \frac{\pi}{3}$ 67

ნახ.2.6. რეჟიმის პარამეტრების დროის დიაგრამები, სამფაზა ბოგირული ტირისტორული გამმართველისთვის, როცა $\gamma > \frac{\pi}{3}$ 69

ნახ.2.7. სამფაზა ბოგირული ტირისტორული გარდამქმნელისთვის გარე მახასიათებლები70

ნახ.2.8. რეჟიმის პარამეტრების დროის დიაგრამები, რომლებიც აჩვენებენ სამფაზა ბოგირული ტირისტორული ინვერტორის მუშაობას72

ნახ.3.1. სქემები და ვექტორული დიაგრამები74

ნახ.3.2. მატრიცის წინალობის გავლენის განსაზღვრა დანაკარგებზე ...82

ნახ.3.3. ერთფენიანი ლოკალიზებული მრავალძარვიანი ზეგამტარული სადენი87

ნახ.3.4. მრავალძარვიანი ზეგამტარული სადენი ლოკალიზებული მაგნიტური ველით89

ძირითადი აღნიშვნები

$\rho_{\mathcal{E}}$ - სადენის ხვედრითი წინაღობა ნორმალურ მდგომარეობაში

S - სადენის კვეთი

ℓ - სადენის სიგრძე

j - დენის სიმკვრივე

$V_{\text{გე}}$ - კრიოტრონის გადამრთველი ელემენტის მოცულობა

$i_{\gamma c}$ - მართვის დენის მნიშვნელობა

$i_{\gamma \infty}$ - მართვის წრედში დამყარებული დენის ზღვრული მნიშვნელობა;

L_{γ} - მართვის წრედის ეკვივალენტური ინდუქციურობა

H_c - კრიოტრონის სარქველის კრიტიკული მაგნიტური ველის დაძაბულობა

B_c - კრიოტრონის სარქველის კრიტიკული მაგნიტური ველის ინდუქცია

γ - ტირისტორის კომუტაციის კუთხე

λ - ტირისტორში დენის გატარების ხანგრძლივობა

B_o - სადენის ზედაპირზე მაგნიტური ინდუქცია

I_j - დენის კრიტიკული მნიშვნელობა

$i_{\mathcal{E}}$ - დენის აქტიური მდგენელი, ან დენი გამოწვეული ნორმალური ელექტრონებისაგან

$i_{\mathcal{E}g}$ - დენის ზეგამტარული მდგენელი

$n_{\mathcal{E}}$ - ერთეულ მოცულობაში ნორმალური ელექტრონების რიცხვი

n_o - ერთეულ მოცულობაში საერთო ელექტრონების რიცხვი

$R_{\mathcal{E}o}$ - ნორმალურ მდგომარეობაში ზეგამტარული სადენის წინაღობა

L_j - კინეტიკური ინდუქციურობა

ℓ_{jo} - ხვედრითი კინეტიკური ინდუქციურობა

m - ელექტრონების მასა

e - ელექტრონების მუხტის მნიშვნელობა

λ_o - დენის შეღწევადობის სიღრმე

ω - კუთხური სიხშირე

I_{θ}^* - მაქსიმალური დენის ფარდობითი მნიშვნელობა

d_{σ} - ზეგამტარული ძარღვის დიამეტრი

β_{ρ} - მაგნიტური ინდუქციის კრიტიკული მნიშვნელობა

β_s - მაგნიტური ინდუქცია სადენის ზედაპირზე

D_s - სადენის დიამეტრი

$R_{\text{ნო}}$ - გრაგნილის წინაღობა ნორმალურ მდგომარეობაში

$\Delta P_{\text{გრიგ.}}$ - გრიგალური დანაკარგები

$\Delta P_{\text{ჰისტ.}}$ - ჰისტერეზისული დანაკარგები

\bar{B}_0 - ზეგამტარული ძარღვის ჯამური მაგნიტური ველი

$\bar{B}_{0\perp}$ - მაგნიტური ინდუქციის განივი მდგენელი

$\bar{B}_{0\parallel}$ - მაგნიტური ინდუქციის პარალელური მდგენელი

N - ძარღვების რიცხვი

d - ზეგამტარულ სადენში მოთავსებული ძარღვის დიამეტრი

$K_{\text{შევს.}}$ - შევსების კოეფიციენტი

τ - ზეგამტარული ძარღვების განლაგების ბიჯი

შესავალი

ცნობილია, რომ მაგნიტური ველის, ელექტრული დენის ან ტემპერატურის ზემოქმედებით ელექტრული წინაღობა ზეგამტარული მასალის, იცვლება ნულიდან გარკვეულ საბოლოო მნიშვნელობამდე. თავდაპირველად მარტივ ფორმაში კრიოტრონი წარმოდგენილი იყო ზეგამტარული მავთულით, რომელიც შეიძლებოდა გადართულიყო ნულოვანი წინაღობიდან ნორმალურ მდგომარეობაში, მაგნიტური ველის საშუალებით, შექმნილი ელექტრული დენით, გავლილი სხვა ზეგამტარში. მავთული რომელიც გადაირთვება ნორმალური მდგომარეობიდან ზეგამტარულში და პირიქით, ეწოდება ვენტილური სადენი.

1954 წელს დ.ა. ბაკმა გამოიგონა მავთულიანი გადამრთველი-კრიოტრონი ზეგამტარული ნიობიუმი – ტანტალის [1], გამომთვლელი მოწყობილობის შექმნისათვის. მოგვიანებით, 1956 წელს ი.ს. კანმა დაამუშავა მავთულიანი ტყვია-კალის კრიოტრონი [2]. უპირატესობა აღნიშნული კრიოტრონის, შედარებით [1]-თან, წარმოადგენდა: სიმარტივეს მასიური წარმოებისათვის; დამზადების დროს გამოყენებული მასალების ნაკლები ღირებულებით. ყოველივე ამან ბიძგი მისცა იმ დროისათვის დაემზადებინათ ექსპერიმენტული მაკეტები და ჩატარებინათ კვლევები კრიოტრონების: გამომთვლელი, გამზომი და საკომუტაციო მოწყობილობებისათვის [3].

ბოლო დროს სპეციალისტები ელექტროენერგეტიკის დარგში დიდ ყურადღებას აქცევენ პრობლემას ზეგამტარული მოვლენის გამოყენებისა მრეწველობაში, კერძოდ შეიქმნას ზეგამტარული გადამრთველი ელემენტი და კომუტაციის მოწყობილობები, რომლებსაც პირველ რიგში მიეკუთვნება კრიოტრონები და მათ ბაზაზე გარდამქნელები. აქედან გამომდინარე, სადისერტაციო ნაშრომში ჩატარებული ენერგეტიკული დანიშნულების მაღალტემპერატურული ზეგამტარული გადამრთველის-კრიოტრონის

კვლევა - დამუშავება და მათ ბაზაზე კრიოტრონული გარდამქმნელების შექმნა მეტად აქტუალურია.

სადისერტაციო ნაშრომში, ენერგეტიკული დანიშნულების მაღალტემპერატურული ზეგამტარული გადამრთველის - კრიოტრონის კვლევა, მოიცავს შემდეგ საკითხებს: ენერგეტიკული დანიშნულების კრიოტრონული გარდამქმნელების მახასიათებლების შესწავლა, კრიოტრონული გადამრთველების კლასიფიკაცია და მათი პარამეტრები, ენერგეტიკული დანიშნულების მაღალტემპერატურული ზეგამტარული გადამრთველი - კრიოტრონის დამუშავება, ზეგამტარული გარდამქმნელები ენერგეტიკული კრიოტრონების ბაზაზე; მაღალტემპერატურული სამფაზა კრიოტრონული გამმართველი ნახევრადგამტარული მართვით; ელექტრომაგნიტური პროცესები სამფაზა ბოგირულ ტირისტორულ გარდამქმნელში, როგორც მართვის საისტემა კრიოტრონული გარდამქმნელისთვის; სამფაზა ბოგირული კრიოტრონული გარდამქმნელის ერთძარღვიანი და მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენების დენგამტარუნარიანობის და დანაკარგების ანგარიშის მეთოდის დამუშავება ცვლად მაგნიტურ ველში. თხევადი კრიოგენული პროდუქტებთან მიმოქცევის უსაფრთხოების სპეციალური საკითხების დამუშავება კვლევების პროცესში გამოყენებული იქნა ინდუქციურად დაკავშირებული წრედების თეორია და მათემატიკური მოდელირების მეთოდები.

ნაშრომის სამეცნიერო სიახლე:

1. დამუშავებულია ენერგეტიკული დანიშნულების მაღალტემპერატურული ზეგამტარული გადამრთველი - კრიოტრონის პრინციპული სქემა, რომელიც შეიცავს სამ გრაგნილს: მუშა გრაგნილი, რომელიც წარმოადგენს გადამრთველ ელემენტს და შესრულებულია ლოკალიზირებული მრავალძარღვა ზეგამტარული სადენით, შევსების კოეფიციენტით $K_{შვ} \ll 1$; მართვის გრაგნილი, რომელიც აღება კრიოტრონს; ჩამკეტი გრაგნილი სუსტი მაგნიტური კავშირით მართვის გრაგნილთან, იმართება მართკუთხა ფორმის დენის იმპულსით და შესრულებულია

მრავალძარღვა ზეგამტარული სადენით შევსების კოეფიციენტით $K_{შვ} \approx 1$. იმპულსის დროის ინტერვალში კრიოტრონი გაღებულია, დანარჩენ დროში კრიოტრონი ჩაკეტილია. აგებულია კრიოტრონის ვოლტამპერული მახასიათებელი, რომლისგანაც განისაზღვრება კრიოტრონის დენი, ძაბვის ვარდნა და დანაკარგები ჩაკეტილ მდგომარეობაში.

2. დამუშავებულია პრინციპული სქემა მაღალტემპერატურული სამფაზა კრიოტრონული გამმართველის ნახევრადგამტარული მართვით. მოწყობილობა შეიცავს პირველად გრაგნილს, შესრულებული ჩვეულებრივი სადენისაგან; მეორად გრაგნილს, შესრულებული მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენისაგან. სამფაზა კრიოტრონულ გამმართველს, რომელიც შეიცავს კრიოტრონებს, რომლის გადამრთველი ელემენტის გრაგნილი შესრულებულია მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენებით. შემაგნიტების გრაგნილი და მართვის გრაგნილი შესრულებულია ჩვეულებრივი ზეგამტარული სადენისაგან. კრიოტრონული გამმართველის მართვა ხორციელდება ტირისტორებით გაღების α კუთხის ცვლილების გზით.

3. შესწავლილია ელექტრომაგნიტური პროცესები სამფაზა ბოგირულ ტირისტორულ გარდამქმნელში, როგორც მართვის სისტემა კრიოტრონული გარდამქმნელისთვის.

განხილულია გამმართველის და ინვერტორის რეჟიმები. მართვადი გამმართველებისთვის გარე მახასიათებლების ცვლილების კანონზომიერება დამოკიდებულია რეგულირების კუთხის სიდიდეზე და თითოეულ ტირისტორში დენის გატარების ხანგრძლივობაზე, რომელიც თავის მხრივ განისაზღვრება ვენტილების რიცხვით, რომლებიც ერთდროულად ატარებენ დენს.

4. დამუშავებულია სამფაზა ბოგირული კრიოტრონული გარდამქმნელის ზეგამტარული სადენების დენგამტარუნარიანობის და დანაკარგების საანგარიშო მეთოდი ცვლად მაგნიტურ ველში. ნაჩვენებია, რომ ენერგეტიკული დანიშნულების კრიოტრონული გარდამქმნელების

დამუშავება და შექმნა მოითხოვს ზეგამტარული სადენების გამოყენებას მაღალი დენგამტარუნარიანობით და დაბალი დანაკარგებით. დადგენილია, რომ აღნიშნული მიზნის მიღწევა შესაძლებელია მრავალპარაღვანი ზეგამტარული სადენებით ლოკალიზებული მაგნიტური ველით, რომელშიც ურთიერთ გავლენა ცალკეული პარაღვების მაგნიტური ველების დაყვანილია მინიმუმამდე. მიღებულია ძირითადი თანაფარდობები ზეგამტარული სადენების დენგამტარუნარიანობის და დანაკარგების ანგარიშისთვის ცვლად მაგნიტურ ველში. მოცემულია თხევადი კრიოგენული პროდუქტებთან მიმოქცევის უსაფრთხოების სპეციალური საკითხები.

სადისერტაციო სამუშაოში მიღებული შედეგები შეიძლება გამოყენებული იქნეს ენერგეტიკული დანიშნულების მაღალტემპერატურული ზეგამტარული გადამრთველის-კრიოტრონის და კრიოტრონული გარდამქმნელების დაგეგმარების და დამზადების დროს.

სადისერტაციო სამუშაოს ძირითადი შედეგები მოხსენებული იქნა: აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტში IV საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე - "ენერგეტიკა: რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები", (2016 წ.) და სტუ-ის სტუდენტური კონფერენციაზე (2016 წ.). ასევე, ელექტროტექნიკისა და ელექტრონიკის დეპარტამენტში I, II და III კოლოქვიუმებზე.

ლიტერატურული მიმოხილვა

ცნობილია, რომ მაგნიტურ ველის, ელექტრული დენის ან ტემპერატურის ზემოქმედებით ელექტრული წინაღობა ზეგამტარული მასალის, იცვლება ნულიდან გარკვეულ საბოლოო მნიშვნელობამდე. თავდაპირველად მარტივ ფორმაში კრიოტრონი წარმოადგენილი იყო ზეგამტარული მავთულით, რომელიც შეიძლებოდა გადართულიყო ნულოვანი წინაღობიდან ნორმალურ მდგომარეობაში, მაგნიტური ველის საშუალებით, შექმნილი ელექტრული დენით, გავლილი სხვა ზეგამტარში. მავთული რომელიც გადაირთვება ნორმალური მდგომარეობიდან ზეგამტარულში და პირიქით, ეწოდება ვენტილური სადენი.

1954 წელს დ.ა. ბაკმა გამოიგონა მავთულიანი გადამრთველი-კრიოტრონი ზეგამტარული ნიობიუმი – ტანტალის [1], გამომთვლელი მოწყობილობის შექმნისათვის. მოგვიანებით, 1956 წელს ი.ს. კანმა დაამუშავა მავთულიანი ტყვია-კალის კრიოტრონი [2]. უპირატესობა აღნიშნული კრიოტრონის, შედარებით [1]-თან, წარმოადგენდა: სიმარტივეს მასიური წარმოებისათვის; დამზადების დროს გამოყენებული მასალების ნაკლები ღირებულებით. ყოველივე ამან ბიძგი მისცა იმ დროისათვის დაემზადებინათ ექსპერიმენტული მაკეტები და ჩაეტარებინათ კვლევები კრიოტრონების: გამომთვლელი, გამზომი და საკომპუტაციო მოწყობილობებისათვის [3].

პირველი კრიოტრონი, შემოთავაზებული ბაკის მიერ წარმოადგენდა ზეგამტარულ სადენს, რომელიც იცვლიდა ფაზურ მდგომარეობას მაგნიტური ველის სიდიდისაგან დამოკიდებულებაში, შექმნილი მართვის გრაგნილით მართვის დენის არ არსებობის დროს ზგ სადენი იმყოფებოდა ზეგამტარული ფაზურ მდგომარეობაში წინააღობით $R=0$, ხოლო მართვის დენის არსებობის დროს ზგ სადენი გადადიოდა ნორმალურ ფაზურ მდგომარეობაში წინააღობით.

ბაკის კრიოტრონში, გადამრთველი ელემენტის (გე) დიდი მოცულობასთან დაკავშირებით, რომელსაც წარმოადგენს ზგ სადენი, მისი სწრაფქმედება იყო დაბალი.

კრიოტრონის მახასიათებლების შედარებით გაუმჯობესება იყო მიღწეული გე-ის ზომების შემცირების გზით, რომელშიც გე-ად გამოყენებული იყო თხელი ფირი, რომელიც იყო განხორციელებული აფსკური კრიოტრონების კონსტრუქციაში. ენერგეტიკული დანიშნულების კრიოტრონის ეფექტურობა, შეიძლება ამაღლდეს მაღალტემპერატურული (77კ) მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენების (მძზგს) გამოყენებით.

კრიოტრონი წარმოადგენს დენის ზეგამტარული გადამრთველს. კრიოტრონის მუშაობის პრინციპი დაფუძნებულია ზეგამტარის ფაზური მდგომარეობის ცვლილებაზე მაგნიტური ველის სიდიდისაგან დამოკიდებულებაში. კრიოტრონი წარმოადგენს სრულად მართვადი სიმეტრიულ გადამრთველს ორმხრივი გამტარობით და ხასიათდება:

- ღია მდგომარეობაში ძაბვის ვარდნის არ არსებობით;
- ღია მდგომარეობაში ორმხრივი გამტარობით;
- ჩაკეტილ მდგომარეობაში ორმხრივი ჩაკეტვით;
- ჩართვა და გამორთვა დენის მიმართულებისა და ძაბვის პოლარობისაგან დამოუკიდებლად;

კრიოტრონის ძირითად ნაკლოვანებას წარმოადგენს:

- შეზღუდული სწრაფქმედება;
- ჩაკეტილ მდგომარეობაში დანაკარგების არსებობა;
- მართვის დიდი დენები.

აღნიშნული ნაკლოვანებობის აცილებისათვის აუცილებელია გადამრთველი ელემენტის მოცულობის შემცირება, რის მიღწევა შეიძლება გადამრთველი ელემენტის გრაგნილის დამზადება ლოკალიზირებული მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენისაგან, ძარღვის არამაღალი შევსების კოეფიციენტით და ძარღვში დენების მაქსიმალური სიმკვრივით.

კრიოტრონების პროექტირების დროს მნიშვნელოვან მახასიათებელს წარმოადგენს ზღვრული დენის მნიშვნელობა კრიოტრონის ვენტილურ ელემენტში და დენი მართვად კოჭაში, რომლითაც მართვის ჯამური მაგნიტური ველი აღწევს კრიტიკულ მნიშვნელობას როგორც ვენტილური ელემენტის ზედაპირზე, ისე მისი მოცულობის ყველა წერტილში გადართვის შემდეგ. შესაბამისად გადართვის პროცესი შეიძლება დაიყოს სამ ეტაპად.

პირველი ეტაპი განსაზღვრავს დროის მნიშვნელობას, რომელიც აუცილებელია დაიხარჯოს ვენტილური ელემენტის ზედაპირზე მართვის მაგნიტური ველის კრიტიკული მნიშვნელობის შექმნისათვის.

მეორე ეტაპი - განსაზღვრავს ვენტილური ელემენტის მთელი მოცულობის გადართვა ზეგამტარული მდგომარეობიდან ნორმალურ მდგომარეობაში.

მესამე ეტაპი დაკავშირებულია კომუტაციური პროცესებთან ვენტილური ელემენტის ელექტრულ წრედში, რომელიც შეესაბამება აქტიური წინაღობის შეყვანასთან, როცა სარქველი გადადის რეზისტორულ მდგომარეობაში.

კრიოტრონის ბაზაზე მაღალტემპერატურული სამფაზა კრიოტრონული გამმართველის დამუშავება ნახევრადგამტარული მართვით წარმოადგენს მეტად აქტუალურ პრობლემას. ცვლადი სიდიდეების გარდაქმნა მუდმივში კრიოტრონული გამმართველით დაფუძნებულია ზეგამტარების თვისებაზე, რომ ის ხდება ერთის მხრივ ზეგამტარი, როცა მაგნიტური ველი ნაკლებია კრიტიკულზე, და გააჩნია მინიმალური წინაღობა, მეორე მხრივ მეტად დიდი წინაღობა, როცა მაგნიტური ველი მეტია კრიტიკულზე.

ბოლო დროს სპეციალისტები ელექტრონერგეტიკის დარგში დიდ ყურადღებას აქცევენ პრობლემას ზეგამტარული მოვლენის გამოყენებისა მრეწველობაში, კერძოდ შეიქმნას ზეგამტარული გადამრთველი ელემენტი და კომუტაციის მოწყობილობები, რომლებსაც პირველ რიგში მიეკუთვნება

კრიოტრიონები და მათ ბაზაზე გარდამქმნელები. ზეგამტარული მასალები დენის მაღალი კრიტიკული სიმკვრივით იძლევიან დიდ პერსპექტივას ახალი მოწყობილობების შექმნისა.

გე-ის დენის სიმკვრივის გაზრდა მიიღწევა ლმმზგს-ის გამოყენებით, რომლებიც შეიცავს მარღვების მინიმალურ რაოდენობას. გე-ის მოცულობის შემცირება აგრეთვე დაკავშირებულია მაღალი ხვედრითი წინაღობის ორ სადენების გამოყენებასთან, რაც შეიძლება განხორციელდეს ლმმზგს-ის საშუალებით მაღალტემპერატურული (77კ) ზეგამტარებით.

ელექტრომაგნიტური პროცესების შესწავლა სამფაზა ბოგირულ ტირისტორულ გარდამქმნელში, როგორც მართვის სისტემა კრიოტრონული გარდამქმნელისთვის მეტად მნიშვნელოვანია მისი საიმედო მუშაობისთვის.

ენერგეტიკული დანიშნულების კრიოტრონული გარდამქმნელების დამუშავება და შექმნა მოითხოვს ზეგამტარული (ზგ) სადენების გამოყენებას მაღალი დენგამტარუნარიანობით და დაბალი დანაკარგებით. აღნიშნული მიზნის მიღწევა შესაძლებელია მრავალმარღვიანი ზეგამტარული სადენებით ლოკალიზებული მაგნიტური ველით (მმზგსლ), რომელშიც ურთიერთ გავლენა ცალკეული მარღვების მაგნიტური ველების დაყვანილია მინიმუმამდე. გრაგნილების ასეთი შესრულებით დენგამტარუნარიანობა თითოეული ზგ მარღვის განისაზღვრება საკუთარი მაგნიტური ველით და საკუთარი პარამეტრებით.

სამფაზა ბოგირული კრიოტრონული გარდამქმნელის ენერგეტიკული მახასიათებლების დადგენისათვის მეტად მნიშვნელოვანია ცვლად მაგნიტურ ველში ზეგამტარული სადენების დენგამტარუნარიანობის და დანაკარგების ანგარიშის მეთოდის დამუშავება.

მეტად აქტუალურია თხევადი კრიოგენულ პროდუქტებთან მიმოქცევის უსაფრთხოების სპეციალური საკითხების დადგენა.

კრიოგენული სისტემებში გამოიყენება თხევადი აზოტი (დუღილის ტემპერატურა 77 კ) და თხევადი ჰელიუმი (4,2 კ), თხევადი ჟანგბადი (90,2 კ), თხევადი წყალბადი (20,3 კ).

უსაფრთხოების უზრუნველყოფისათვის ძირითად წესდებას წარმოადგენს - „უსაფრთხოების წესები, რომლებიც განკუთვნილია ჭურჭლების უსაფრთხო ექსპლუატაციასთან, რომლებიც მუშაობენ წნევის ქვეშ.

ძირითადი მოთხოვნა, უზრუნველვყოთ ფეთქებად უსაფრთხო მუშაობა კრიოგენული დანადგარების, წარმოადგენს არ დაუშვათ საშიში მინარევების ზღვრული შემადგენლობის ამაღლება.

შედეგები და მათი განსჯა

თავი I. ენერგეტიკული დანიშნულების კრიოტრონული გარდამქმნელის მახასიათებლები

1.1. კრიოტრონული გადამრთველები

სოლენოიდური კრიოტრონი.

თავის საწყის და გამარტივებულ ფორმაში კრიოტრონი წარმოდგენილი იყო ზეგამტარული მავთულით, რომელიც შეიძლებოდა გადართულიყო ნულოვანი წინააღობის მდგომარეობიდან ნორმალურ მდგომარეობაში მაგნიტური ველის საშუალებით, შექმნილი ელექტრული დენით, გავლილი სხვა ზეგამტარით. მავთულს, გადამრთველი ნორმალური მდგომარეობიდან ზეგამტარულ მდგომარეობაში და პირიქით უწოდებენ ვენტილურ მავთულს. ნახ. 1.1 ნაჩვენებია სქემა გადამრთველი მოწყობილობის. ვენტილური მავთული დამზადებულია ტანტალისაგან, რომლის კრიტიკული ტემპერატურა ტოლია 4,2კ [4]. მეორე მავთული, მოცემულ შემთხვევაში შესრულებულია ნიობიუმიდან ($T_{კრ} = 8,0კ$), ეწოდება მართვადი და დახვეულია სოლენოიდის სახით ვენტილური მავთულის ირგვლივ. მაგნიტური ველის დამაბულობა, სოლენოიდში შეიქმნება დენის გავლის შედეგად. გადართვის მომენტში მაგნიტური ველის დამაბულობა უნდა იყოს მეტი ვენტილური მავთულის კრიტიკული მაგნიტური ველის დამაბულობაზე. მეორე მხრივ ის არ უნდა აჭარბებდეს დამაბულობის კრიტიკულ მნიშვნელობას მართვადი მავთულის მასალის, რადგანაც წინააღმდეგ შემთხვევაში ეს მასალა გადავა ნორმალურ მდგომარეობაში და მავთულში აღიძვრება, მნიშვნელოვანი ენერჯის დანაკარგები. ამიტომ ვენტილური და მართვადი მავთული მზადდება სხვადასხვა მასალისაგან.

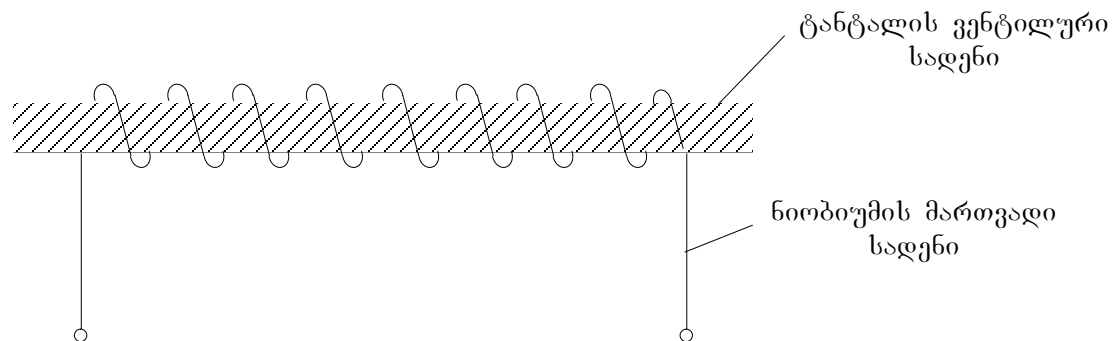
კრიოტრონულ გადამრთველში მნიშვნელოვან ინტერესს წარმოადგენს დენის ორი მნიშვნელობა: პირველი, ვენტილის კრიტიკული დენი $I_{კ.კრ.}$ ე.ი. მაქსიმალური დენი, რომელსაც შეუძლია გაიაროს ვენტილურ მავთულში, არ გამოიწვიოს ვენტილის გადართვა ზეგამტარული მდგომარეობიდან ნორმალურში (ამ შემთხვევაში მართვად წრედში გამორიცხულია მაგნიტური ველის არსებობა).

მეორე, მართვადი დენი $I_{მ.რ.}$, აუცილებელი ვენტილის გადართვისათვის, როცა ვენტილში დენი გამორიცხულია. დენი $I_{"მ.რ."}$ შეიძლება შევამციროდ, სოლენოიდის ხვიათა რიცხვის გაზრდით.

აღნიშნული დენების ფარდობას ეწოდება გაძლიერების კოეფიციენტი დენის მიხედვით

$$G = \frac{I_{კ.კრ.}}{I_{მ.რ.}}$$

ნახ. 1.1. ნაჩვენებია კრიოტრონული გადამრთველის მოწყობილობის სქემა.



ნახ. 1.1. კრიოტრონული გადამრთველი მოწყობილობა

თუ, როგორც ხშირად გვხვდება, ერთი კრიოტრონის ვენტილი ემსახურება მეორე კრიოტრონის მართვადი წრედის კვებას, მაშინ აუცილებელია პირველი კრიოტრონის კრიტიკული ვენტილური დენი იყოს მეტი მეორე კრიოტრონის მართვად დენზე. რამოდენიმე კრიოტრონების მიმდევრობითი შეერთების დროს ისინი ქმნიან გაძლიერებას დენის მიხედვით. მეორე მხრივ გაძლიერება დენის მიხედვით რაღაც გარკვეულ

სიდიდემდე შეზღუდულია, რადგანაც ეს იწვევს კრიოტრონის გადართვის დროის გაზრდას. ფაქტიურად კრიოტრონის მოქმედების დრო პროპორციულია G^2 -ის, გაძლიერების კოეფიციენტის სიდიდე დენის მიხედვით შეადგენს დაახლოებით 2-ს [5].

როგორც ნებისმიერი სწრაფმოქმედი გადამრთველი, კრიოტრონი შეიძლება გამოყენებული იქნეს ლოგიკურ წრედებში. ჩვენ განვიხილეთ მარტივი სოლენოიდური კრიოტრონი. ქვემოთ განხილული იქნება თხელაფსკური კრიოტრონი.

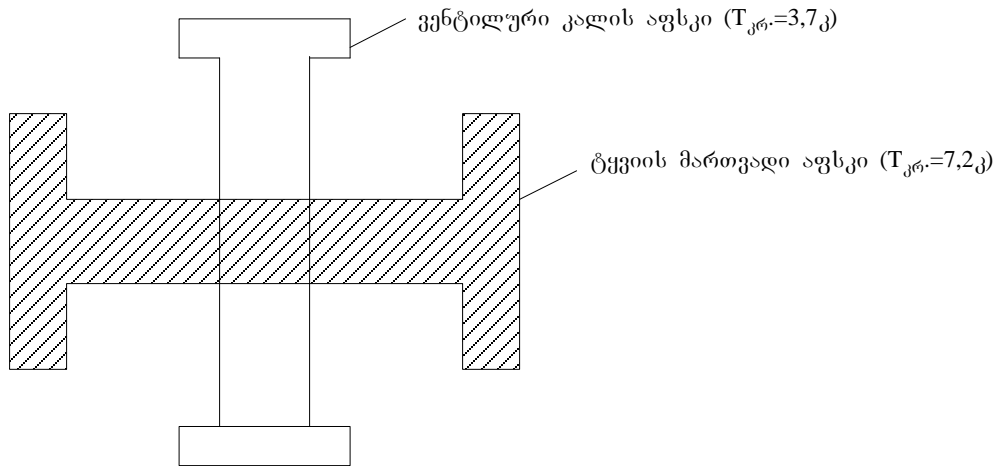
კრიოტრონის ვენტილი, როგორც წესი, ხასიათდება ან ნულოვანი, ან რამოდენიმე სასრული წინაღობით. ამიტომ ვენტის მართვისათვის მის პარალელურად ჩვეულებრივ რთავენ ამა თუ იმ სხვა ზეგამტრულ წრედს, რომ დენი არასდროს გავიდეს რეზისტორულ წრედში და სითბოს გამოყოფა საგრძნობლად შემცირდეს.

- თხელაფსკური გადაჯვარედინებული კრიოტრონი

გადამრთველი აფსკური კრიოტრონი შეიძლება მივიღოთ, თუ შევცვლით ვენტილურ და მართვად სადენს თხელი აფსკით (მილიმეტრი სიგანის და მიკრომეტრი სისქის). ასეთი ტიპის კრიოტრონი მოხერხებულია დიდი მატრიცის დამზადებისთვის და მაღალი სიმჭიდროვით შეფუთვისათვის. გარდა ამისა, ინდუქციურობის ფარდობა აფსკის წინააღობასთან, როგორც წესი, მნიშვნელოვნად დაბალია, ვიდრე სოლენოიდური კრიოტრონისა, ხოლო მოწყობილობის სწრაფქმედება გადაჯვარედინებული აფსკით გაცილებით მაღალია.

ნახ. 1.2. წარმოდგენილია გამარტივებული სახით კრიოტრონი გადაჯვარედინებული აფსკით. ორი მეტალის აფსკი (დენის გაზრდისათვის მათ ამზადებენ სხვადასხვა სიგანით) გაყოფილი დიელექტრიკის ფენით, მოთავსებულია ფუძე შრეზე მინის ტიპის მასალაზე. ფართო ვენტილური აფსკი უზრუნველყოფს ვენტის კრიტიკული დენის დიდ სიდიდეს $I_{3,კრ}$, ხოლო ვიწრო მართვადი აფსკი უზრუნველყოფს მართვადი დენის სიდიდის შემცირებას I_a . იგულისხმება, რომ ზეგამტარის ნიმუშს გააჩნია ან ნულოვანი

წინალობა, ან (ნორმალურ მდგომარეობაში) წინალობა, დამოკიდებული მასალისაგან, ზომებისა და ნიმუშის ფორმისაგან. გადართვა წინალობის ნულოვანი მნიშვნელობიდან მაქსიმალურზე მიმდინარეობს მაგნიტური ველის დამაბულობის გაზრდით კრიტიკული მნიშვნელობამდე.



ნახ. 1.2. კრიოტრონი გადაჯვარედინებული აფსკით

პროცესები კრიოტრონში, განსაკუთრებით გადაჯვარედინებული აფსკებით, ძალიან რთულია, რადგანაც მაგნიტური ველი, შექმნილი აფსკში მართვის დენით, ზემოქმედებს ვენტილურ აფსკში, რომელიც დევს მართვადი აფსკის ქვეშ. ვენტილის ეს არე გადადის ნორმალურ მდგომარეობაში, ხოლო დანარჩენი მისი ნაწილი რჩება ზეგამტარულ მდგომარეობაში. ვენტილის წინალობა იზრდება ნულიდან რამოდენიმე სასრულ მნიშვნელობამდე, რადგანაც ნორმალური არე იკავებს მთლიან სიგანეს ვენტილური ზოლის და ამიტომ არ შუნტირდება პარალელურად ზეგამტარული მატერიალის უბანზე.

თუ მართვად დენს გავზრდით, მაშინ ნორმალური არე ვენტილური აფსკის იზრდება სიგრძის მიხედვით და ვენტილის წინალობა კიდევ უფრო იზრდება. მრუდზე ვენტილის წინალობის დამოკიდებულება მართვად დენზე შეიმჩნევა ზღურბლი, რომლის დროსაც წინალობა გაჩნდება პირველად, შემდეგ მოყვება არე, სადაც წინალობა მართვადი დენის

გაზრდით მდოვრედ იზრდება. ვენტილის ნულოვანი დენის დროს ვენტილური აფსკი არ გადადის ნორმალურ მდგომარეობაში მის მთელ სიგრძეზე.

აღწერილი დამოკიდებულება არსებითად იცვლება ორი ფაქტორის გავლენის გამო: პირველი, გახურების შედეგად ჯოულის სითბოს გამოყოფით, რომელიც შეიძლება მეტად არსებითი იყოს ნებისმიერ კრიოტრონში, მეორე, ზეგამტარული ფურცლის გამოყენების დროს დამიწებისათვის ეკრანირებულ კრიოტრონში გადაჯვრედინებული აფსკებით.

ზეგამტარული ჩამიწებული ეკრანი სრულად გამორიცხავს ნებისმიერ მოქმედებას გარე მაგნიტური ველის, რადგანაც მის ზედაპირზე აღიმკვრება დენები, რომლებიც მიისწრაფიან გარე ველის განეიტრალებისაკენ.

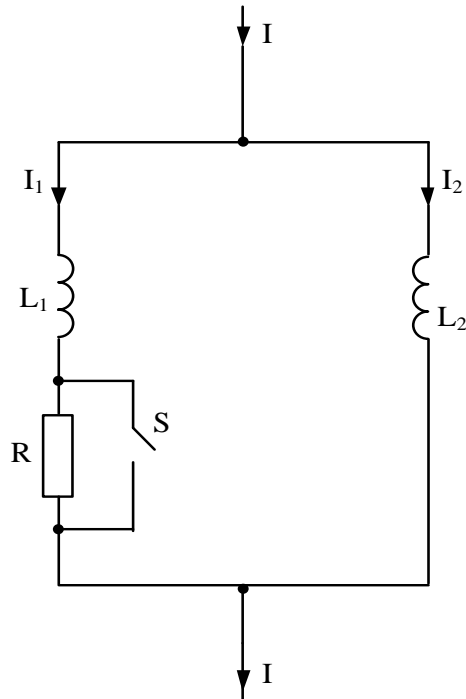
- ზეგამტარული პერსისტორი

წინა პარაგრაფებში ჩვენ განვიხილეთ ზეგამტარული გადამრთველები-კრიოტრონები. ეხლა შევჩერდეთ სხვა ვარიანტზე აღნიშნული იდეის გამოყენებაზე და რამოდენიმე უფრო რთული მუშაობის განსაკუთრებულობაზე ანალოგიური მოწყობილობის.

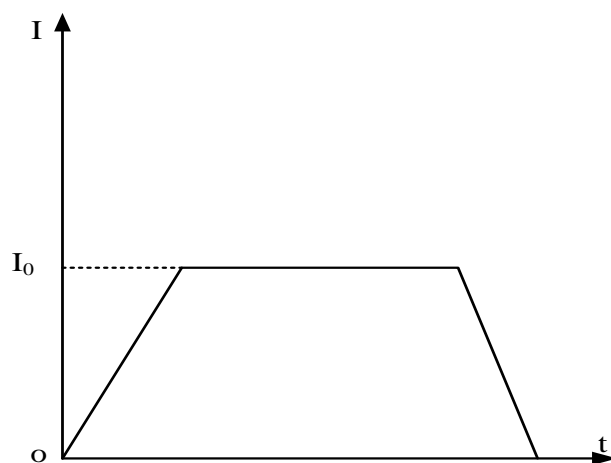
განვიხილოდ კონტური ნახ. 1.3, რომელშიც წინალობა მარცხენა შტოში შეიძლება სურვილის მიხედვით ჩავრთოდ ან გამოვრთოდ. აღნიშნულ კონტურში პარალელურად ჩართულია ორი სხვადასხვა ზეგამტარი. მარჯვენა მუდმივად ინარჩუნებს ზეგამტარულ მდგომარეობას, ხოლო მარცხენა გადაირთვება ნორმალური მდგომარეობიდან ზეგამტარულ მდგომარეობაში ჩვენი სურვილის მიხედვით გვექონდეს თუ არ გვექონდეს წინალობა.

ვაჩვენოთ, რომ დენის იმპულსი ქმნის აღნიშნულ კონტურში მუდმივად ცირკულირებად დენს, რომელიც აგრძელებს არსებობას გარე იმპულსის შეწყვეტის შემდეგ, თუ R წინალობას ჩავრთავთ და გამოვრთავთ დროის გარკვეულ მომენტში. ასეთ პრინციპზეა დაფუძნებული მუშაობა

პერსისტორის – დამამახსოვრებელი ელემენტი კომპიუტერისათვის, რომელშიც გამოიყენება არამილევადი დენი.



ნახ. 1.3. კონტური არა მილევადი დენებით დროის საწყის მომენტში



ნახ. 1.4. კონტურზე მოდებული დენის იმპულსის ფორმა

I დენის გარე იმპულსს გააჩნა ფორმა, ნაჩვენები ნახ. 1.4.

დაუშვათ საწყის მდგომარეობაში $R=0$; მოვლოთ დენის იმპულსი. დროის ნებისმიერ მომენტში დენი კონტურში გამოისახება ორი მდგენელისაგან:

$$I = I_1 + I_2,$$

როცა $R = 0$ სრულდება თანაფარდობა

$$L_1 \frac{dI_1}{dt} = L_2 \frac{dI_2}{dt},$$

მაშინ

$$I_1 = \frac{L_2}{L_1 + L_2} I$$

დროის მომენტში, როცა იმპულსი აღწევს დამყარებულ მაქსიმალურ მნიშვნელობას, I_1 დენი ტოლია

$$I_1 = \frac{L_2}{L_1 + L_2} I_0$$

ეხლა ვარაუდობთ, რომ I_1 და I_2 დენების დამყარებული მნიშვნელობის დროს კონტურში შემოდის R წინააღობა, მაშინ

$$L_1 \frac{dI_1}{dt} + RI_1 = L_2 \frac{dI_2}{dt},$$

$$I = I_1 + I_2,$$

შესაბამისად

$$\frac{dI}{dt} = \frac{dI_1}{dt} + \frac{dI_2}{dt},$$

I_2 გამორიცხვით, მივიღებთ

$$L_1 \frac{dI_1}{dt} + RI_1 = L_2 \frac{dI}{dt} - \frac{dI_1}{dt},$$

$$RI_1 + (L_1 + L_2) \frac{dI_1}{dt} = L_2 \frac{dI}{dt}$$

განსახილველ დროის მომენტში I დენი აღწევს თავის დამყარებულ მნიშვნელობას I_0 და, შესაბამისად, $dI/dt = 0$. აქედან

$$RI_1 + (L_1 + L_2) \frac{dI_1}{dt} = 0$$

$$I_1 = I_{10} e^{-\frac{R}{L_1+L_2}t}$$

სადაც $I_{10} - I_1$ დენის მნიშვნელობა R წინაღობის ჩართვის მომენტში, ის განისაზღვრება ფორმულით.

$$I_{10} = \frac{L_2}{L_1 + L_2} I_0$$

ამგვარად, თუ R ჩავრთავთ კონტურში, მაშინ I_1 დენი მცირდება ნულამდე, ხოლო I_2 დენი იზრდება I_0 მნიშვნელობამდე.

დაუშვათ, რომ t დროის გავლის შემდეგ დენი I_1 შემცირდა I_{1t} მნიშვნელობამდე, რის შემდეგ R წინაღობა გამოირთვება კონტურიდან. მაშინ I_1 დენის შემცირება შეწყდება, ის ინარჩუნებს I_{1t} მნიშვნელობას. ანალოგიურად I_2 დენი აღნიშნულ დროში აღწევს მნიშვნელობას ($I_0 - I_{1t}$), წყვეტს გაზრდას. აღიძვრება სიტუაცია, რომელიც ნაჩვენებია ნახ. 1.5.

დაუშვათ, რომ დენის იმპულსი გამორთულია, ე.ი. დენის სიდიდე დაეცა I_0 -დან ნულამდე. ეს ეკვივალენტურია ჩავრთოდ დენის იმპულსი სიდიდით - I_0 . ნახ. 1.6. წარმოდგენილია როგორც I_0 დენი, შედის კონტურის ქვედა წერტილში.

შეიძლება ვაჩვენოთ (ისეთი გზით, როგორც ჩვენ ვაჩვენეთ ზემოდ), რომ ამ შემთხვევაში მარცხენა შტოში ზემო მიმართულებით გადის I_{10} , ხოლო მარჯვენა შტოში ზემო მიმართულებით – დენი ($I_0 - I_{10}$).

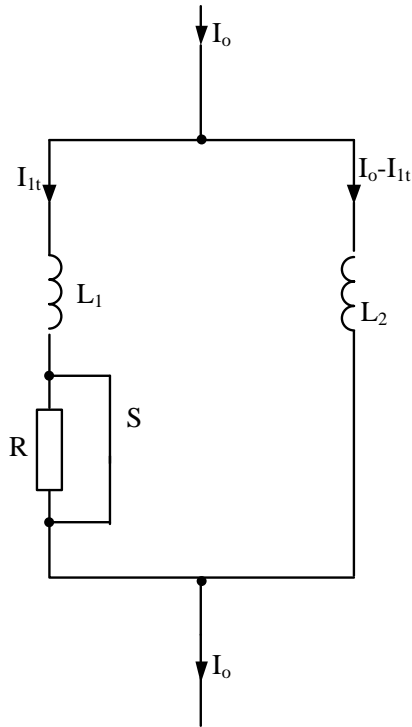
სრული დენი (განუშტოებელ წრედში; ნახ. 1.7) ეხლა ტოლია ნულის. თუმცა არსებობს მაცირკულირებელი დენი ($I_{10} - I_{1t}$), თანაც

$$I_{10} = \frac{L_2}{L_1 + L_2} I_0$$

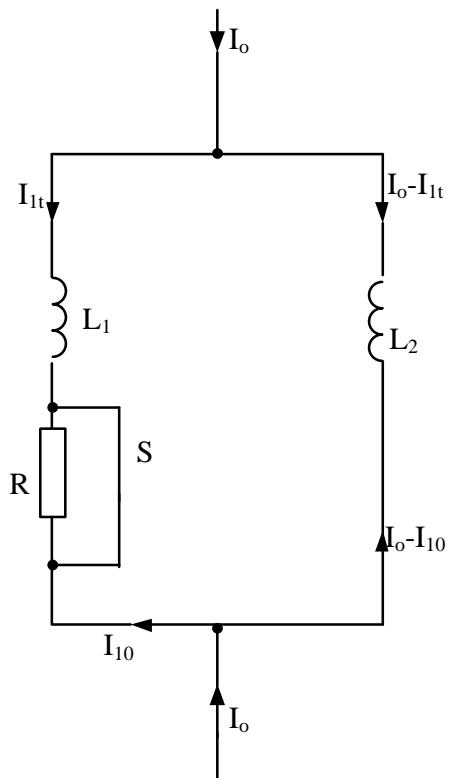
ამგვარად კონტურში ცირკულირებს არა მილევადი დენი

$$I_{a.m.} = \frac{L_2}{L_1 + L_2} I_0 - I_{1t}$$

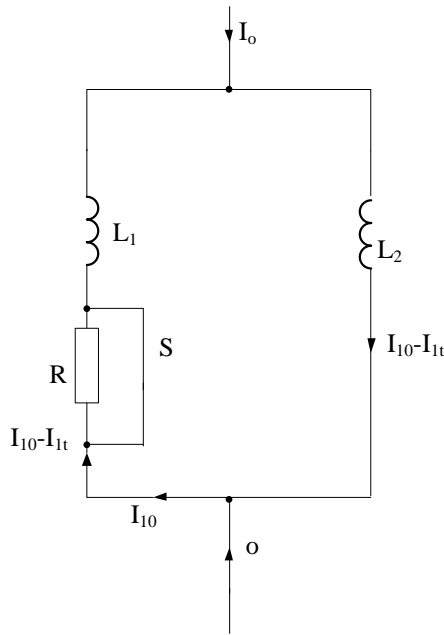
არა მილევადი დენის სიდიდე იქნება მაქსიმალური, თუ R წინაღობა დარჩება კონტურში მანამდე, სანამ მთელი დენი არ გადავა მარჯვენა მხარეში, ე.ი. სანამ I_{1t} დენი არ გახდება ნულის ტოლი.



ნახ. 1.5. დროის t მომენტში კონტური არამილევადი დენებით



ნახ. 1.6 . იმპულსის შეწყვეტის მომენტში კონტური არა მილევადი დენებით



ნახ. 1.7. იმპულსის შეწყვეტის შემდეგ რამოდენიმე დროის გავლის შემდეგ კონტური არა მიღევადი დენებით

1.2. კრიოტრონის პარამეტრები [6]

როგორც აღნიშნული იყო კრიოტრონის ვენტილი წარმოადგენს კალის მავთულს – დიამეტრით $2 \cdot 10^{-4}$ მ, სიგრძით $7 \cdot 10^{-3}$ მ, რომელზეც დახვეულია მართვადი გრაგნილი სიგრძით $5 \cdot 10^{-3}$ მმ იზოლირებული ტყვიის მავთულით დიამეტრით 10^{-4} მ, შესრულებული 40 ხვიათი. კრიოტრონები ერთმანეთს შორის შეერთებულია მირჩილვით. მირჩილვის მასალად გამოიყენება ПОС-61. თუ ასეთი ელემენტი გაცივებულია 0,05. . . 0,1 კ, ვენტლისათვის T_3 -ზე ქვემოდ, მაშინ წინაღობა იქნება ნულის ტოლი მანმადე, სანამ ის არ აღმოჩნდება მაგნიტურ ველში (შექმნილი ვენტლის დენით და მართვადი გრაგნილის დენით) მეტი, ვიდრე H_3 მოცემული ტემპერატურისთვის. მაშინ მისი წინაღობა ნახტომისებურად გაიზრდება რამოდენიმე სასრულ მნიშვნელობამდე (ნახ. 1.8, მრუდი 1). აღნიშნული

ველის მოხსნით ვენტილი თავიდან უბრუნდება ზეგამტარულ მდგომარეობას.

კრიოტრონის ძირითად პარამეტრებს წარმოადგენს: R_H -კრიოტრონის ვენტის წინაღობა რეზისტულ მდგომარეობაში; α – გაძლიერების სტატიკური კოეფიციენტი დენის მიხედვით; L -მართვადი გრაგნილის ინდუქციურობა; τ -დროის მუდმივა ერთი კრიოტრონული კონტურის. განსახილველი კრიოტრონისთვის: $R_H=10^{-4}$ ომი; $\alpha=3...4$; $L=10^{-7}$ ჰნ.

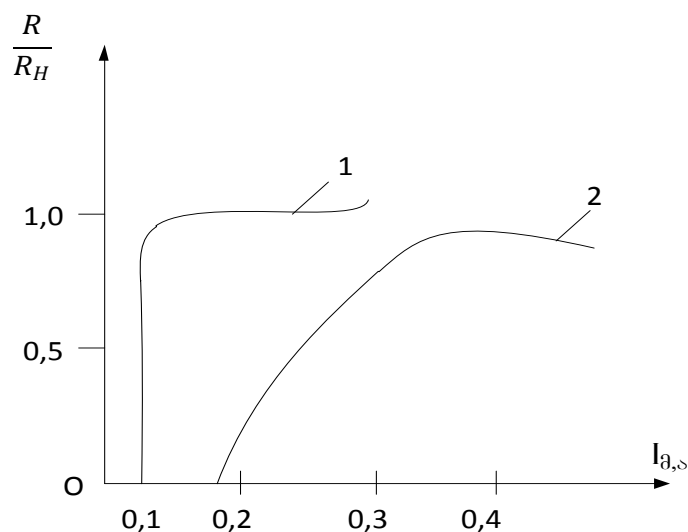
$\tau = 10^{-3}$ წმ. შემთხვევისთვის, როცა კრიოტრონის ვენტილი დამზადებულია შენაერთისთვის $S_n+1\%S_b$ გვექნება: $R_H=2 \cdot 10^{-3}$ ომი; $\tau=5 \cdot 10^{-5}$ წმ.

მუშა ტემპერატურის 3,6 კ დროს მართვადი და მკვებავი დენი იმყოფება დიაპაზონში 0,15 . . 0,5 ა.

$R_H=10^{-4}$ ომი და ვენტის გავლით დენის მნიშვნელობა

1-0,6; 2-0,35 ა.

კრიოტრონი შეიძლება გამოყენებული იქნეს ფართო კლასის ელემენტებისათვის: ლოგიკური, დამამახსოვრებელი, მაძლიერებელი. იყო დამუშავებული სრული ნაკრები ელემენტების და სქემების, აუცილებელი კრიოტრონული გამომრთველი მოწყობილობისათვის. მათ ბაზაზე შექმნილი იყო მაკეტი პროგრამული მართვით.



ნახ. 1.8. კრიოტრონის ვენტის წინაღობის დამოკიდებულება მართვადი გრაფილში დენისაგან, როცა $T=3,6$ კ

კვლევის შედეგებმა აჩვენა, რომ კრიოტრონების გამოყენებამ სხვადასხვა მოწყობილობების დამუშავებაში აჩვენა მაღალი დონე.

კრიოტრონული მოწყობილობების გამოკვლევისა და გამოყენების დროს აღიძვრება პრობლემა მათი შერწყმისა გარე მოწყობილობებთან, რომლებიც მუშაობენ ოთახის ტემპერატურაზე. ვინაიდან კრიოტრონის ვენტის წინაღობა რეზისტულ მდგომარეობაში მცირეა (10^{-3} . . . 10^{-4} ომი), მაშინ დენების კომუტაცია მას შეუძლია მხოლოდ ზეგამტარულ წრედში. გარდა ამისა, ამ შემთხვევაში აღძრული ვენტის პოტენციალთა სხვაობა შეადგენს 10^{-5} ვ და მისი გაზომვა რთულია ჩვეულებრივი ელექტრონული მოწყობილობებით. ერთ-ერთი გზა აღნიშნული პრობლემის გადაწყვეტისა წარმოადგენს, გამოყენებული იქნეს მაგნიტურმართვადი კონტაქტები (მმკ) ზეგამტარული აგზნების გრაფილით, ჩართული პარალელურად გამოსავალი კრიოტრონის ვენტისთან. ქვემოთ მოცემულია დამუშავებული და გამოკვლეული მოწყობილობები მაგნიტურ-მართვადი კონტაქტების ბაზაზე: მოწყობილობა დენების კომუტაციისათვის; დროის რელე; იმპულსების გენერატორი. მოწყობილობა დენების კომუტაციისათვის დანიშნულია 0,5 ა დენის კომუტაციისათვის, როცა ძაბვა 30 ვ-ის ტოლია, რომელიც იმყოფება ჰელიუმის ტემპერატურაზე. ის მოიცავს მოქმედების დროს 0,1...0,1 წმ და უძლევს 10^7 გადართვას. გამოიყენება სიგნალების გამოყვანისათვის ზეგამტარული წრედებიდან და ელექტრომექანიკური შემსრულებელი მოწყობილობების მართვისათვის, რომლებიც იმყოფებიან კრიოსტატის გარეთ. დროის რელეს გააჩნია დროის დაყოვნების დიაპაზონი (10 . . . 22)· 10^3 წმ როცა დაყოვნების არასტაბილურობა შეადგენს 1%; გამოიყენება ავტომატური მართვისა და კონტროლის მოწყობილობაში, რომელიც შეიცავს ზეგამტარულ ელემენტებს. იმპულსების გენერატორი იძლევა დენის მართკუთხა იმპულსებს დატვირთვაზე ინდუქციურობით. $5 \cdot 10^{-4}$ ჰკ და აქტიური წინაღობით 1 ომი სიხშირის დიაპაზონში 0,1...1,2 ჰკ. ის გამოიყენება

მართვადი იმპულსების წყაროდ კრიოტრონული მოწყობილობის გამოკვლევისათვის.

მახასიათებელზე (ნახ. 1.8, მრუდი 2) წრფივი ნაწილის არსებობა $R(I_a)$ და მნიშვნელოვანი დამრეცობა აღნიშნული მახასიათებლის ($dR/dI_a=3 \cdot 10^{-3}$) ომი/ა მოგვიწოდებს ავადგოთ კრიოტრონების ბაზაზე გამზომი და მაძლიერებელი მოწყობილობები, რომლებიც მუშაობენ თხევად ჰელიუმში: რელაქსაციური რხევის კრიოტრონული გენერატორი; ბოგირული კრიოტრონული მაძლიერებელი; დაბალმიანი წინაღობის მაღაზია; მოწყობილობა მუდმივ დენზე ზეგამტარული კონტურის ინდუქციურობის გაზომვისათვის.

რელაქსაციური რხევის კრიოტრონული გენერატორის გამოყენება თერმომეტრის სახით, ტემპერატურის ინტერვალში 3.7 . . . 2,3 კ მგრძნობიარობით $2 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^3$ ჰც/კ; ზეგამტარული ამპერმეტრი მგრძნობიარობით 10^4 ჰც/ა; გარდამქმნელი მცირე მუდმივი ძაბვით. 10^{-5} ვ ცვლადში (10^{-2} ვ); სუსტი მაგნიტური ველების (0,01 ერსტედი) მგრძნობიარობით 10^{-3} ერსტედი.

კრიოსტატში თხევადი ჰელიუმის დონის ინდიკატორი მგრძნობიარობით $5 \cdot 10^{-3}$ ნ; ზეგამტარული ინდიკატორი. მაგნიტომართვადი კონტაქტები გამოიყენება მცირე მუდმივი დენების გაძლიერებისათვის (10^{-5} ა) მცირე წინაღობის 10^{-6} - 10^{-8} ომი წრედებში. გაძლიერების კოეფიციენტი დენის მიხედვით 7. მგრძნობიარობა ძაბვის მიხედვით 10^{-11} ვ. როცა შესავალი ინდუქციურობა 10^{-7} ჰც, მოქმედების დრო 10 წმ.

დაბალმიანი წინაღობის მაღაზია გამოიყენება წინაღობის გაზომვისათვის 10^{-7} დან 10^{-10} ომამდე, წრედებში, რომლებიც იმყოფება თხევად ჰელიუმში.

მოწყობილობა ინდუქციურობის გაზომვისათვის, ზეგამტარული კონტურების მუდმივ დენზე გამოიყენება ინდუქციურობების 10^{-6} . . 10^{-7} ჰნ ფარგლებში ცდომილებით 5%.

ბოლოს შეიძლება აღინიშნოს, რომ კრიოტრონული გამზომი მოწყობილობა გამოიყენება ფიზიკური კვლევებისათვის ჰელიუმის ტემპერატურაზე.

1.3. ენერგეტიკული დანიშნულების მაღალტემპერატურული (77 კ) ზეგამტარული გადამრთველი-კრიოტრონი

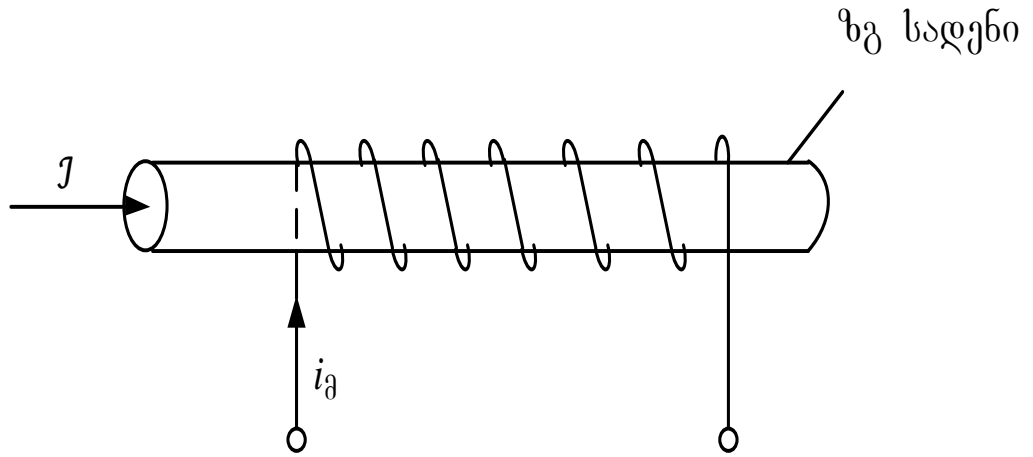
კრიოტრონი წარმოადგენს დენის ზეგამტარული (ზგ) გადამრთველს. კრიოტრონის მუშაობის პრინციპი დაფუძნებულია ზეგამტარის ფაზური მდგომარეობის ცვლილებაზე მაგნიტური ველის სიდიდისაგან დამოკიდებულებაში.

პირველი კრიოტრონი, შემოთავაზებული ბაკის მიერ წარმოადგენდა ზეგამტარულ სადენს, რომელიც იცვლიდა ფაზურ მდგომარეობას მაგნიტური ველის სიდიდისაგან დამოკიდებულებაში, შექმნილი მართვის გრაგნილით (ნახ. 1.9[7]). მართვის დენის არ არსებობის დროს ზგ სადენი იმყოფებოდა ზეგამტარული ფაზურ მდგომარეობაში წინააღმდეგობით $R = 0$, ხოლო მართვის დენის არსებობის დროს ზგ სადენი გადადიოდა ნორმალურ ფაზურ მდგომარეობაში წინააღმდეგობით, ნორმალურ (არაზეგამტარულ) $R = R_N$.

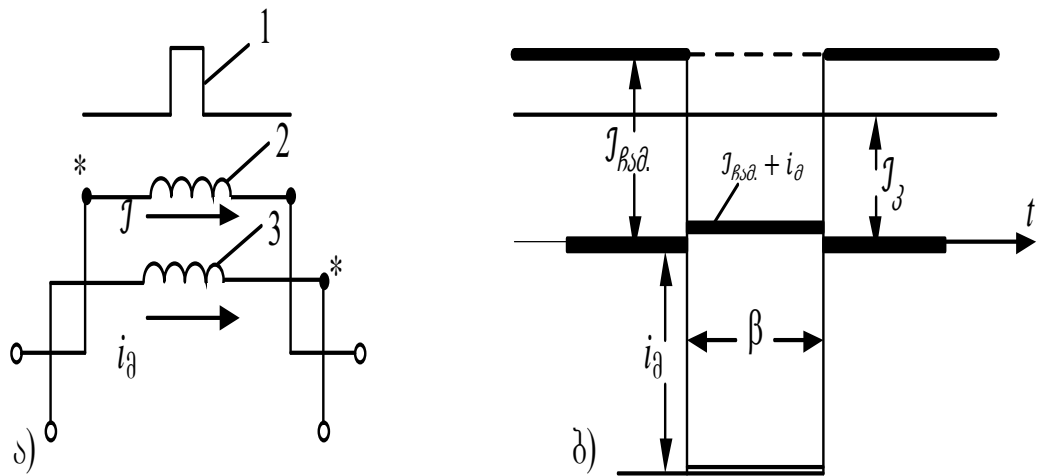
გადამრთველი ელემენტის (გე) დიდი მოცულობასთან დაკავშირებით, ბაკის კრიოტრონში, რომელიც წარმოადგენს ზგ სადენი, სწრაფქმედება კრიოტრონის იყო არამაღალი.

კრიოტრონის მახასიათებლების გაუმჯობესება იყო მიღწეული გე-ის ზომების შემცირების გზით, რომელშიც გე-ად გამოყენებული იყო თხელი ფირი, რომელიც იყო განხორციელებული აფსკური კრიოტრონების კონსტრუქციაში [7]. ენერგეტიკული დანიშნულების კრიოტრონის ეფექტურობა, შეიძლება ამალდეს მაღალტემპერატურული (77კ)

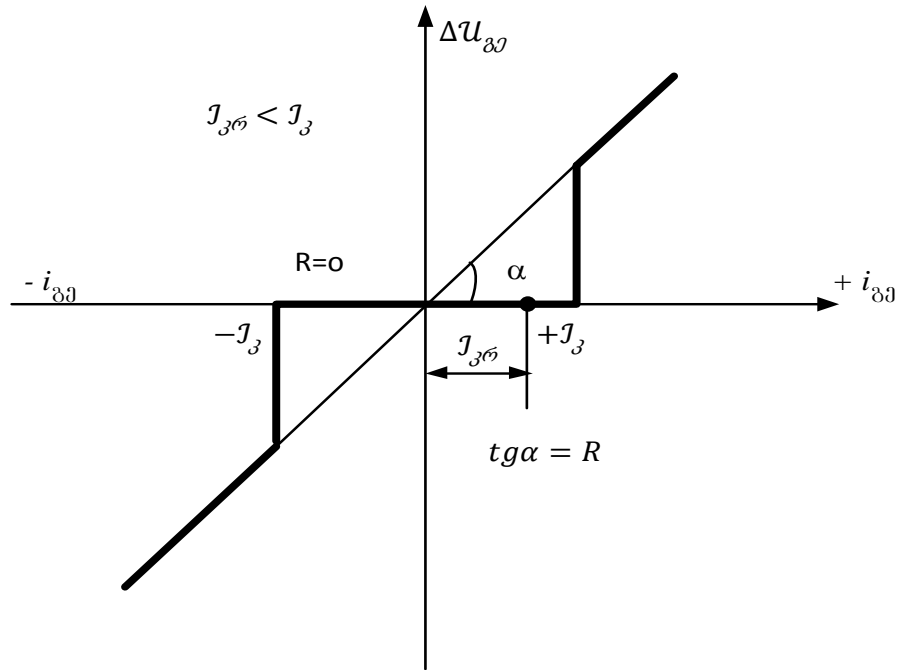
მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენების (მძზგს) გამოყენებით. კრიოტრონის სქემა და მისი მუშაობის პრინციპი ნაჩვენებია ნახ. 1.10.



ნახ. 1.9. ზგის მავთულიანი კრიოტრონი



ნახ.1.10. კრიოტრონის სქემა (ა) და მუშაობის პრინციპი (ბ)



ნახ. 1.11. კრიოტრონის ვოლტამპერული მახასიათებელი

კრიოტრონი შეიცავს სამ გრაგნილს: მუშა გრაგნილი -1(მგ), წარმოადგენს გადამრთველ ელემენტს (გე). მართვის გრაგნილი - 2(მგ), რომელიც ადებს კრიოტრონს; ჩამკეტი გრაგნილი - 3(ჩგ) სუსტი მაგნიტური კავშირით მართვის გრაგნილთან.

მუშა გრაგნილი წარმოადგენს გე-ს და შესრულებულია ლოკალიზირებული მძზგს (ლმძზგს) შევსების კოეფიციენტით $K_{Sev} \ll 1$. მართვის გრაგნილი წარმოადგენს ჩამკეტ გრაგნილს, რომელშიც ჩამკეტი დენი აჭარბებს კრიტიკულ დენს გე-ის ($K_{Cam} > J_{კ}$, და შესრულებულია მძზგს-ის საფუძველზე).

ჩამკეტი გრაგნილი იმართება მართკუთხა ფორმის β სიგანის დენის იმპულსით და შესრულებულია მძზგს-ით შევსების კოეფიციენტით $K_{Sev} \approx 1$. იმპულსის β დროის ინტერვალში კრიოტრონი გაღებულია, $R_{ge} = 0$. დანარჩენ დროში კრიოტრონი ჩაკეტილია $R_{ge} < R_n$.

კრიოტრონის ვოლტამპერული მახასიათებელი ნაჩვენებია ნახ.1.11.

ვოლტამპერული მახასიათებლიდან განისაზღვრება კრიოტრონის დენი $J_{kr} < J_k$, ძაბვის ვარდნა და დანაკარგები ჩაკეტილ მდგომარეობაში.

კრიოტრონში დანაკარგები ΔP შეადგენს:

$$\Delta P = \frac{U^2}{R_n} = \frac{U^2}{\rho_n \ell} S = \frac{U^2 J}{\rho_n j \ell},$$

სადაც ρ_n -სადენის ხვედრითი წინაღობა ნორმალურ მდგომარეობაში, S და ℓ - მისი კვეთი და სიგრძე, U -ძაბვა, J -კრიოტრონის დენი, j - დენის სიმკვრივე.

ფარდობითი დანაკარგები

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{U}{\rho_n j \ell}$$

აღნიშნული გამოსახულებიდან გამომდინარეობს, რომ ρ_n -ის დაბალი მნიშვნელობის დროს დანაკარგების შეზღუდვისათვის აუცილებელია U ძაბვის დადაბლება.

კრიოტრონი წარმოადგენს სრულად მართვად სიმეტრიულ გადამრთველს ორმხრივი გამტარობით და ხასიათდება

- 1) ღია მდგომარეობაში ძაბვის ვარდნის არ არსებობით ($R = 0, \Delta U = 0$);
- 2) ღია მდგომარეობაში ორმხრივი გამტარობით;
- 3) ჩაკეტილ მდგომარეობაში ორმხრივი ჩაკეტვით $-J_j \leq i \leq J_j$;
- 4) დენის მიმართულებისა და ძაბვის პოლარობისაგან დამოუკიდებლად ჩართვა და გამორთვა.

კრიოტრონის ძირითად ნაკლოვანებას წარმოადგენს:

- 1) შეზღუდული სწრაფქმედება;
- 2) ჩაკეტილ მდგომარეობაში დანაკარგების არსებობა;
- 3) მართვის დიდი დენები.

აღნიშნული ნაკლოვანებობის აცილებისათვის აუცილებელია გე-ის მოცულობის შემცირება, რის მიღწევა შეიძლება გე-ის გრაგნილის დამზადება ლმძზგს-ისაგან ძარღვის არამაღალი შევსების კოეფიციენტით და ძარღვში დენების მაქსიმალური სიმკვრივით.

გე-ის მოცულობა:

$$V_{ge} = s \ell \quad (1.1)$$

გავითვალისწინოთ, რომ

$$R_n = \rho_n \frac{\ell}{S} \text{ და } \ell = \frac{R_n}{\rho_H} S$$

(1) გამოსახულებიდან გამომდინარეობს:

$$V_{ge} = \frac{R_n}{\rho_n} S^2, \quad (1.2)$$

სადაც სადენის კვეთი

$$S = \frac{I}{j} \quad (1.3)$$

(2) და (3) განტოლებიდან მივიღებთ

$$V_{ge} = \frac{1}{\rho_n j^2} R_n I^2 \quad (1.4)$$

მოცემული დენის დროს, როგორც გამომდინარეობს (1.3) და (1.4) გამოსახულებიდან, გე-ის სადენების კვეთი და მოცულობა მცირდება დენის სიმკვრივის კვადრატის შრდით.

გე-ის დენის სიმკვრივის გაზრდა მიიღწევა ლმძზგს-ის გამოყენებით, რომლებიც შეიცავს ძარღვების მინიმალურ რაოდენობას. გე-ის მოცულობის შემცირება აგრეთვე დაკავშირებულია მაღალი ხვედრითი წინაღობის ρ_n სადენების გამოყენებასთან, რაც შეიძლება განხორციელდეს ლმძზგს-ის საშუალებით მაღალტემპერატურული (77კ) ზეგამტარებით.

1.4. ზეგამტარული გარდამქნელები ენერგეტიკული კრიოტრონების ბაზაზე

ბოლო დროს სპეციალისტები ელექტროენერგეტიკის დარგში დიდ ყურადღებას აქცევენ პრობლემას ზეგამტარული მოვლენის გამოყენებისა მრეწველობაში, კერძოდ შეიქმნას ზეგამტარული გადამრთველი ელემენტი და კომუტაციის მოწყობილობები, რომლებსაც პირველ რიგში მიეკუთვნება კრიოტრონები და მათ ბაზაზე გარდამქმნელები. ზეგამტარული მასალები

დენის მაღალი კრიტიკული სიმკვრივით იძლევიან დიდ პერსპექტივას ახალი მოწყობილობების შექმნისა.

კრიოტრონების პროექტირების დროს მნიშვნელოვან მახასიათებელს წარმოადგენს ზღვრული დენის მნიშვნელობა კროტრონის ვენტილურ ელემენტში (სარქველი) და დენი მართვად კოჭაში, რომლითაც მართვის ჯამური მაგნიტური ველი აღწევს კრიტიკულ მნიშვნელობას როგორც სარქველის ზედაპირზე, ისე მისი მოცულობის ყველა წერტილში გადართვის შემდეგ. შესაბამისად გადართვის პროცესი შეიძლება დაიყოს სამ ეტაპად.

პირველი ეტაპი განსაზღვრავს τ_1 დროის მნიშვნელობას, რომელიც აუცილებელია დაიხარჯოს სარქველის ზედაპირზე მართვის მაგნიტური ველის კრიტიკული მნიშვნელობის შექმნისათვის. ეს დრო დაკავშირებულია მართვის სისტემის ტიპის შერჩევასთან, მის სქემასთან და პარამეტრებზე.

მეორე ეტაპი – სარქველის მთელი მოცულობის გადართვა ზეგამტარული მდგომარეობიდან ნორმალურ მდგომარეობაში. τ_2 დრო აუცილებელია აღნიშნული ეტაპის რეალიზაციისთვის, დაკავშირებულია სარქველის მოცულობის სიდიდესთან და სარქველის ზეგამტარული მასალის მახასიათებლების პარამეტრებზე, შესაბამისად სარქველის გავლით გადაცემული სიმძლავრეზე.

მესამე ეტაპი დაკავშირებულია კომუტაციური პროცესებთან სარქველის ელექტრულ წრედში, რომელიც შეესაბამება აქტიური წინაღობის შეყვანასთან, როცა სარქველი გადადის რეზისტორულ მდგომარეობაში.

მართვის სისტემის ტიპები, რომელიც აუცილებელია გავითვალისწინოთ პირველ ეტაპში კრიოტრონის გადართვის დროს, შეიძლება აიგოს ელექტრომექანიკური სისტემის საფუძველზე, მექანიკური გადაადგილებით მაგნიტური ველის წყაროს ან ელექტრომაგნიტური ეკრანები, აგრეთვე სტატიკური ელექტრომაგნიტური სისტემები, რომელშიც თავის მხრივ, შეიძლება გამოყენებული იქნეს, როგორც რთული

რეზონანსური კონტური ელექტრომაგნიტური ძალის (ემძ) კომუტაციით, ასევე მარტივი ინდუქციურობის კოჭა, ჩართული ძაბვის წყაროზე.

ზოგად შემთხვევაში მართვის კოჭას გააჩნია ელექტრომაგნიტური კავშირი რამოდენიმე მოკლედშერთული კონტურებთან (დამცავი ეკრანები, საკონტაქტო რგოლი დენის მოხსნისთვის და ა.შ.).

მართვის კოჭას ჩართვის გარდამავალი პროცესი შეიძლება განვიხილოდ, როგორც მუდმივი ძაბვის ჩართვა სისტემაში, რომელსაც გააჩნია რამოდენიმე შერეული კონტურები, თანაც აუცილებელია ჯერ განისაზღვროს თვითინდუქციის კოეფიციენტები L_{kk} თითოეული კონტურის ცალკე, აგრეთვე ურთიერთინდუქციის კოეფიციენტები ყველა კონტურების. ამ შემთხვევაში აუცილებელია ამოიხსნას განტოლება, რომლის რიგი შეესაბამება მართვის სისტემის განსახილველი კონტურების რიცხვს. ამოხსნის ასეთი გზა ყოველთვის არაა მოხერხებული. აღნიშნული პროცესი შეიძლება განვიხილოდ სხვაგვარად. გავითვალისწინოთ, რომ უმრავლეს შემთხვევაში განსახილველი კონსტრუქციაში ზეგამტარული კონტური, დაკავშირებული ელექტრომაგნიტურად მართვის კოჭასთან, არ გააჩნია აქტიური წინაღობა, შეიძლება განვიხილოდ გარდამავალი პროცესი ერთკონტურიან ეკვივალენტურ მართვის სისტემაში; მაშინ კრიოტრონის გადართვის პირველი ეტაპის ხანგრძლივობა მიიღება მარტივი ანალიზური დამოკიდებულების სახით:

$$\tau_1 = \frac{L_y}{r} \ln \left(\frac{1}{1 - i_{yc}/i_{y\infty}} \right) \quad (1.5)$$

სადაც $i_{y\infty} = U/r$ -მართვის წრედში დამყარებული დენის ზღვრული მნიშვნელობა; i_{yc} - მართვის დენის მნიშვნელობა, რომლის დროსაც მართვის ველის დამაბულობა აღწევს კრიტიკულ მნიშვნელობას სარქველის ზედაპირზე; L_y -მართვის წრედის ეკვივალენტური ინდუქციურობა.

i_{yc}, L_y - პარამეტრების საანგარიშო მნიშვნელობა შეიძლება მივიღოთ ერთი ზოგადი ამოცანის ამოხსნით – მოცემული კონსტრუქციის

კრიოტრონის მართვის მაგნიტური ველის სივრცითი განაწილება. ამოცანის ამოხსნა დადის ცნობილ მეთოდზე [11]. დენების სიმკვრივის განაწილების ანგარიში შეკრულ ზეგამტარულ ეკრანში მოცემული კონფიგურაციით მიმდინარეობს პირობიდან, რომ მაგნიტური ველის ვექტორ-პოტენციალიდან ინტეგრალი ეკრანის ზეგამტარული შეკრული კონტურის მიხედვით უცვლელია და კერძო შემთხვევაში ტოლია ნულის:

$$\oint_{\ell} \bar{A}(Q) d\bar{\ell} = 0, \quad (1.6)$$

სადაც $A(Q)$ -მართვის მაგნიტური ველის ვექტორ-პოტენციალი, შექმნილი Q წერტილში განსახილველ ℓ კონტურში მართვის კოჭა დენით i_k და ზეგამტარული ეკრანის დენებით i_3 .

კრიოტრონებისათვის ღერძისმეტრიული კონსტრუქციით გარე შეკრული ზეგამტარული ეკრანით, რომელიც მოიცავს მართვის მთელ კოჭას, (6) განტოლების ამოხსნა შეიძლება არსებითად გამარტივდეს [12]:

$$A_K(Q) + A_3(Q) = 0 \quad (1.7)$$

სიდიდეები $A_K(Q)$ და $A_3(Q) = 0$ ცნობილი ფორმულების საშუალებით შეიძლება მარტივად გამოისახოს კოჭაში ცნობილი დენების სიმკვრივის საშუალებით და საძიებო დენების სიმკვრივის სიდიდით ეკრანის კვეთაში. მაგალითად, მართვის კოჭასათვის, რომელსაც გააჩნია S კვეთი დაკავებული დენით,

$$A_K(Q) = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_S^- j(M) \sqrt{\frac{\rho_M}{\rho_Q}} f(K) dS_M, \quad (1.8)$$

სადაც ρ_Q - Q წერტილის რადიუსი, რომელშიც გამოითვლება მაგნიტური ველი; ρ_M - M წერტილის რადიუსი, რომელშიც მოთავსებულია dS_M კვეთი, დაკავებული დენით, სიმკვრივით $j(M)$;

$$f(K) = \left(\frac{2}{K} - K \right) K(K) - \frac{2}{K} E(K);$$

$$K^2 = \frac{4\rho_Q\rho_M}{(\rho_Q + \rho_M)^2 + (Z_Q - Z_M)^2},$$

სადაც $Z_Q, Z_M - Z$ ღერძის მიხედვით კოორდინატები Q და M წერტილების; $K(k), E(k)$ -სრული ელიფსური ინტეგრალი შესაბამისად

პირველი და მეორე რიგის k მოდულის ფუნქციის მაგნიტური ველის ვექტორ-პოტენციალის გამოსახულების ჩაწერა საძიებო დენებით ეკრანში $A_3(Q)$ ანალოგიურია (1.8) განტოლების. დავყოთ მართვის კოჭა და ეკრანი ერთნაირი კონტურების რიცხვით, შეიძლება განისაზღვროს მიღებული განტოლებათა სისტემიდან საძიებო დენების სიმკვრივის მნიშვნელობა ეკრანში, აგრეთვე მაგნიტური ველის მნიშვნელობა კრიოტრონის სარქველის ზედაპირზე და მართვის კოჭა ინდუქციურობა L_y .

კრიოტრონის გადართვის მეორე ეტაპის ხანგრძლივობის τ_2 შეფასებისათვის, დაკავშირებული სარქველის მთელი მოცულობის გადართვასთან ზეგამტარული მდგომარეობიდან ნორმალურ მდგომარეობაში, შეიძლება ჩავატაროთ გარკვეული მსჯელობა. გამოვყოთ იმ სრული მოცულობიდან, რომელიც დაკავებულია კრიოტრონის ვენტილური ელემენტით (სარქველი), ელემენტარული მოცულობა $\Delta V = \Delta S \Delta \ell$, კვეთით ΔS და სიგრძით $\Delta \ell$. მართვის ელექტრომაგნიტური ველის ენერგია, რომელიც აუცილებელია თავმოყრილი იქნეს გამოყოფილ ელემენტარულ მოცულობაში ΔV კრიოტრონის სარქველის გადართვისათვის ზეგამტარული მდგომარეობიდან ნორმალურ მდგომარეობაში, შეიძლება განისაზღვროს ცნობილი თანაფარდობიდან:

$$\Delta W_y = 0,5 H_c B_c \Delta V \quad (1.9)$$

ან არესთვის მუდმივი მაგნიტური შეღწევადობით μ

$$\Delta W_y = 0,5 \mu H_c^2 \Delta V \quad (1.10)$$

სადაც H_c, B_c -კრიოტრონის სარქველის მასალის კრიტიკული მნიშვნელობა მართვადი მაგნიტური ველის დამაბულობის და ინდუქციის.

ელექტრული დანაკარგების სიმძლავრე გაბნეული ΔV ელემენტარულ მოცულობაში, სარქველზე მოდებულია უკუ ძაბვა $U_{\text{ოფ}}$ „არაგამტარ“ მდგომარეობაში; კომუტაციის პერიოდის ნაწილში აგრეთვე შეიძლება განისაზღვროს ცნობილი თანაფარდობიდან:

$$\Delta P_\sigma = (\Delta U_{\text{ოფ}})^2 \Delta S / \rho \Delta \ell \quad (1.11)$$

სადაც ρ - სარქველის ზეგამტარული მასალის ხვედრითი წინაღობა, რომელიც იმყოფება რეზისტულ მდგომარეობაში მოცემულ მუშა ტემპერატურაზე. ზღვრული სიმძლავრე, რომელიც შეიძლება გადაეცეს დატვირთვაში ელემენტარული ΔV მოცულობით, როცა სარქველზე მოდებულია „პირდაპირი“ ძაბვა U კომუტაციის პერიოდის ნაწილში და სარქველი იმყოფება ზეგამტარულ მდგომარეობაში, შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი სახეში

$$\Delta P = \Delta U j_c \Delta S, \quad (1.12)$$

სადაც j_c -სარქველის ზეგამტარული მასალისათვის დენის სიმკვრივის კრიტიკული მნიშვნელობა.

როგორც წესი, თანაფარდობა „პირდაპირი“ U და „უკუ“ $U_{\text{ოდპ}}$ ძაბვები უცვლელია გარდამქმნელის თავიდან შერჩეული სქემებისთვის, და კავშირი ამ სიდიდეებს შორის შეიძლება დავადგინოთ სქემის მუდმივი კოეფიციენტით K_{cx} :

$$\Delta U_{\text{ოდპ}} = K_{cx} \Delta U \quad (1.13)$$

(1.11)-(1.13) ფორმულების გათვალისწინებით და გარდამქმნელის მ.ქ.კ. სიდიდის შემოყვანით $\eta = 1 - P_\sigma/P$, შეიძლება განისაზღვროს სარქველის ელემენტარული მოცულობა ΔV პარამეტრების საშუალებით, რომელიც ხასიათდება სარქველის ზეგამტარული მასალის თვისებებით და გადაცემული დატვირთვაში ელემენტარული ΔV მოცულობის გზით ΔP სიმძლავრე:

$$\Delta V = \Delta P / (K_{cx}^2 (1 - \eta) \rho j_c^2) \quad (1.14)$$

(1.14)-დან ჩანს, რომ ρj_c^2 პარამეტრის გაზრდით წრფივად მცირდება ელემენტარული მოცულობის ΔV სიდიდე მოცემული გადასაცემი სიმძლავრის დროს.

განსახილველ ელემენტარულ მოცულობაში ΔV მართვის ელექტრომაგნიტური ველის ენერგია შეიძლება აგრეთვე გამოვსახოთ მართვის სიმძლავრის P_y გზით და τ დრო, რომლის დროსაც მართვის

ელექტრომაგნიტური ველის დაძაბულობა აღწევს კრიტიკულ H_c მნიშვნელობას მთლიან ელემენტარულ მოცულობაში ΔV :

$$\Delta W_y = \Delta P_y \tau \quad (1.15)$$

(1.10), (1.14), (1.15) განტოლებების ერთობლივი ამოხსნით და მუდმივი სიდიდეების k_{cx}, η გაერთიანებით ერთ პროპორციულობის კოეფიციენტში K , შეიძლება მივიღოთ შემდეგი გამოსახულება გადართვის დროისათვის

$$\tau = k \frac{\Delta P}{\Delta P_y} - \frac{\mu H_c^2}{\rho j_c^2} \quad (1.16)$$

ელემენტარული მოცულობიდან ΔV გადასვლით სარქველის სრულ მოცულობაზე, შეიძლება მივიღოთ კრიოტრონის გადართვის მეორე ეტაპის ხანგრძლივობა τ_2 , როგორც ფუნქცია τ_M პარამეტრის და სქემის პარამეტრების

$$\tau_2 = f(k_{cx}, \eta, P_y/P, \tau_M),$$

სადაც

$$\tau_M = \frac{\mu H_c^2}{\rho j_c^2} \quad (1.17)$$

კერძო შემთხვევაში, როცა თანაფარდობა მართვის სიმძლავრის და გადასაცემი სიმძლავრის შენარჩუნებულია უცვლელი, არჩეული სქემისთვის მეორე ეტაპის ხანგრძლივობა

$$\tau_2 = k(P/P_y)\tau_M \quad (1.18)$$

τ_M პარამეტრი, განსაზღვრული (1.17) ფორმულით, შეიძლება გამოყენებული იქნეს როგორც სიდიდე, რომლითაც ხასიათდება კრიოტრონის ვენტილური ელემენტის მუშაობის სპეციფიკა, რომელიც მდგომარეობს იმაში, რომ ასეთი ელემენტის მასალას უნდა ქონდეს მაღალი კრიტიკული დენის სიმკვრივე, კრიტიკული მაგნიტური ველი და მაღალი ხვედრითი წინაღობა რეზისტორულ მდგომარეობაში.

ლიტერატურული მიმოხილვიდან ჩანს, რომ კრიოტრონის სარქველის ზეგამტარული მასალის შეფასების კრიტერიუმად ძირითადად მიღებულია ორი პარამეტრი:

მუშა ტემპერატურაზე რეზისტორულ მდგომარეობაში მასალის ხვედრითი წინაღობის ნამრავლი მის კრიტიკულ დენის სიმკვრივეზე.

ხვედრითი წინაღობის ნამრავლი კრიტიკული დენის სიმკვრივის კვადრატზე ρj_c^2 , აგრეთვე აღნიშნული პარამეტრების წრფივ კომბინაციაზე. ნამრავლს ρj_c^2 გააჩნია განზომილება ვტ/მმ და შეუძლია დაახასიათოს ხვედრითი სიმძლავრე ზეგამტარული გარდამქმნელის კრიოტრონის სარქველის მოცულობაში. არსებითად ასეთი დაახასიათება საკომუტაციო მასალის, შეიძლება გამოყენებული იქნეს არა მხოლოდ ზეგამტარებისთვის, არამედ მაგალითად ნახევრადგამტარული მასალებისთვის ლიტერატურული მიმოხილვიდან ჩანს, რომ თუ იქნება დამუშავებული ახალი ზეგამტარული მასალები პარამეტრების სიდიდით $\rho j_c^2 > 10^{15}$ ვტ/მმ, მაშინ შესაძლებელი გახდება შეიქმნას კრიოტრონული გარდამქმნელი, რომელიც თავისი ტექნიკურ-ეკონომიკური პარამეტრებით გადააჭარბებს თანამედროვე ნახევრადგამტარულ გარდამქმნელებს.

უხლა გადავიდეთ კომუტაციური პროცესის მესამე ეტაპზე. შეიძლება ითქვას რომ ΔW ენერგია, განზნეული კრიოტრონის სარქველის აქტიურ წინაღობაში კომუტაციის პროცესში, დამოკიდებულია სარქველში საწყისი დენის i_{10} მნიშვნელობაზე, სარქველის აქტიური წინაღობის სიდიდეზე r_k , აგრეთვე არსებითად დამოკიდებულია სქემის სხვა პარამეტრებზე. უფრო ზუსტად, თეორიულად გაზნეული ენერგიის სიდიდე შეიძლება განისაზღვროს რეალური კრიოტრონული გარდამქმნელის სქემაში, გარდამავალი პროცესების ანალიზით. ამისათვის საკმარისია მივიღოთ ფუნქციონალური დამოკიდებულება დენის მნიშვნელობისა დროში იმ წრედისათვის, სადაც ჩაირთვება კრიოტრონის სარქველის აქტიური წინაღობა r_k , შემდეგ გამოითვლება განზნეული ენერგია ცნობილი ფორმულით:

$$\Delta W = \int_0^T i^2 r_k dt \quad (1.19)$$

შეიძლება გამოვიყენოთ ელექტრული წრედების ანალიზისათვის მატრიცული მეთოდი [9], რომელიც იძლევა საშუალებას ყველა განხილული დროის ინტერვალისათვის მივიღოთ კონტურული დენების მატრიცა

$$I_k = Z_k^{-1} \Gamma (E - Z_B j) \quad (1.20)$$

$$\text{სადაც } Z_k^{-1} = \Delta_{ik}^t |Z_k|,$$

I_k და E – მატრიცები კონტურული დენების და შტოების ელექტრომაგნიტური ძალები (ემძ), j -დენის წყაროების მატრიცა; Γ -კონტურული მატრიცა მიმართული ჩანაცვლების სქემის გრაფთან; Z_k -კონტურული ოპერატორული წინაღობების მატრიცა; Z_B -შტოების წინაღობების მატრიცა; $|Z_k| - Z_k$ მატრიცის მსაზღვრელი; Δ_{ik}^t -ტრანსპორტირებული მატრიცა $|Z_k|$ მატრიცის მსაზღვრელის ალგებრული დამატების.

(1.20) გამოსახულება საშუალებას იძლევა გავიანგარიშოდ კომუტაციური გარდამავალი პროცესები ნებისმიერად არჩეული კრიოტრონული გარდამქმნელის სქემებისათვის და ნებისმიერი ფორმის მკვებავი ძაბვისათვის. (1.20) გამოსახულების გამოყენებით ჩატარებული იქნა ანალიზი ორკონტურული ელექტრული წრედისათვის შეერთებული ერთი კრიოტრონით.

სქემის მიმართული გრაფის პარამეტრების ჩაწერა მატრიცულ სახეში გააჩნია შემდეგი სახე:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}; E = 0; j = \begin{bmatrix} i_{10} \\ i_{10} \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$Z_B = \begin{bmatrix} Z_1 & 00 \\ 0 & Z_2 0 \\ 0 & 0Z_3 \end{bmatrix}$$

კონტურული დენების მატრიცას ოპერატორულ ფორმაში კრიოტრონის სარქველის აქტიური წინაღობის r_k ჩართვის შემთხვევაში გააჩნია შემდეგი სახე:

$$I_k = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \frac{i_{10} P}{|Z_k|} \begin{bmatrix} Z_1 + Z_3 - Z_1 & L_1 + L_2 \\ -Z_1 & Z_1 + Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 + L_2 \\ L_1 \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

შესაბამისად, მაგალითად მე-6 სქემისათვის წარმოდგენილ ცხრილში, ანალიზური გამოსახულება i_1 დენისთვის ოპერატორულ ფორმაში, როცა ჩართულია წრედის პირველ კონტურში აქტიური წინაღობა r_k ექნება შემდეგი სახე:

$$i_1(P) = \frac{i_{10} P [P(L_1 L_2 + L_1 L_H + L_2 L_H) + R(L_1 + L_2)]}{P^2(L_1 L_2 + L_1 L_H + L_2 L_H) + P[R(L_1 + L_2) + r_k(L_1 + L_H)] + R r_k} \quad (1.22)$$

(1.22)-დან გამოსახულების ორიგინალის ჩასმის გზით (1.19)-ში შესაძლებელია ვიპოვოთ განზნევი ენერჯის დანაკარგები კრიოტრონის სარქველის წინაღობაზე:

$$\Delta W = \frac{i_{10}^2}{2} \left(L_2 + \frac{L_1 [R(L_1 + L_2) + r_k L_H]}{r_k (L_1 + L_H) + R(L_1 + L_2)} \right) \quad (1.23)$$

კრიოტრონის სარქველის აქტიურ წინაღობაში დანაკარგების ანალიზური გამოსახულებისთვის სხვადასხვა ვარიანტებისათვის განსახილველი ორკონტურიანი ელექტრული სქემები ნაჩვენებია ცხრილში, რომლის ანალიზი გვადლევს შევავასოდ პარამეტრების გავლენა სქემაზე კრიოტრონის ეფექტურ მუშაობაზე, აგრეთვე ზოგიერთი მოთხოვნები, რომლებიც შეიძლება წაუყენოთ თვითონ კრიოტრონის პარამეტრებს გარე სქემის სხვადასხვა პარამეტრებისათვის. ამგვარად ცხრილიდან ჩანს, რომ თუ კრიოტრონის საშუალებით ხორციელდება გადასვლა ელექტრომაგნიტური ენერჯის ერთი ზეგამტარული ინდუქციურობიდან მეორეში (1 და 2 სქემები), მაშინ განზნევის ენერჯის მნიშვნელობა არ არის დამოკიდებული კრიოტრონის სარქველის აქტიური წინაღობის r_k სიდიდეზე. პირიქით, ენერჯის განმუხტვის დროს, დაგროვილი ინდუქციურ მაგროვებელში, აქტიურ წინაღობაზე (სქემა 3) დანაკარგების სიდიდე ΔW არსებითად დამოკიდებულია r_k მნიშვნელობაზე.

ეხლა შეიძლება შევჩერდეთ დასაშვები ძაბვის U შერჩევის საკითხზე კრიოტრონული გარდამქმნელის გამოსავალზე. საორიენტაციო შეფასება დასაშვები ძაბვის შეიძლება შესრულდეს ზეგამტარული მასალების თვისებების საფუძველზე. შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ გარდამქმნელის შექმნა ცივ ზონაში იქნება ეკონომიურად არამიზანშეწონილი, თუ დანაკარგების მნიშვნელობა მასში გადააჭარბებს თბომილების სიდიდეს ცივ ზონაში. ცნობილია, რომ ხვედრითი თბომილება ოპტიმალურად დაპროექტებული დენშემყვანების, გაცივებული თხევადი ჰელიუმით [14,15], შეიძლება მივიღოთ ტოლი $\Delta P_T \approx 10^{-3}$ ვტ/ა, მაშინ

თბომილების სიმძლავრე ცივ ზონაში დატვირთვის დენის (I) დროს განისაზღვრება თანაფარდობით:

$$P_T = \Delta P_1 I = 10^{-3} I.$$

თუ მხედველობაში არ მივიღებთ უმნიშვნელო თბომილებას ზეგამტარული გარდამქმნელის დენშემყვანში და ვიგულისხმებთ, რომ ძირითადი დანაკარგები ცივ ზონაში განისაზღვრება ომური დანაკარგებით კრიოტრონის სარქველის წინააღობით, მივიღებთ სიმძლავრის დანაკარგების მნიშვნელობას ცივ ზონაში ზეგამტარული გარდამქმნელისათვის:

$$P_k = \frac{U_2}{r_k} = \frac{U^2 I}{\rho \ell j_2},$$

სადაც ℓ - კრიოტრონის სარქველის სიგრძე;

U-ძაბვა ზეგამტარული გარდამქმნელის გამოსასვლელზე;

I – დატვირთვის (სარქველის) დენი.

ბუნებრივია, რომ ზეგამტარული გარდამქმნელის გამოყენება პირდაპირი დენების შემყვანებთან ერთად, იქნება გამართლებული როცა $P_T > P_k$ აქედან შეიძლება განისაზღვროს დასაშვები ძაბვის მნიშვნელობა გარდამქმნელის გამოსასვლელზე, რომელიც დამოკიდებულია კრიოტრონის სარქველის პარამეტრებზე

$$U < \sqrt{10^{-3} \ell \rho j_c}$$

კრიოტრონის სარქველის დასაშვები სიგრძე შეიძლება შეფასდეს იმ ვარაუდით, რომ სიმძლავრე დამატებითი დანაკარგების კრიოტრონის სარქველის მასალის შემაგნიტებაზე P_r არ უნდა აჭარბებდეს 10%-ს დანაკარგების სარქველის წინააღობაში „უკუ დენი“-დან, ე.ი. $P_r < 0,1 P_k$ ან $P_r < 0,1 P_T$. ჩვეულებრივ მიღებულია დანაკარგები მიეკუთვნოს შემაგნიტებაზე ზეგამტარის ერთეულ ზედაპირზე. თუ მივიღებთ აღნიშნული დანაკარგების საშუალო მნიშვნელობას, მოსული სარქველის მასალის ზედაპირის ერთეულ ფართზე.

ცხრილი 1.1.

სქემის №	შეერთების სქემა	კრიოტრონში დანაკარგების ანალიზური გამოსახულება
1		$\Delta W = \frac{W_1}{1 + L_1/L_H}$ <p>სადაც $W_1 = L_1 \frac{i_{10}^2}{2}$</p>
2		$\Delta W = \frac{W_1}{1 + L_1/L_H} + L_2 \frac{i_{10}^2}{2}$ <p>სადაც $W_1 = L_1 \frac{i_{10}^2}{2}$</p>
3		$\Delta W = \frac{W_1}{1 + r_k/R_H}$ <p>სადაც $W_1 = L_1 \frac{i_{10}^2}{2}$</p>
4		$\Delta W = \frac{W_1}{1 + r_k L_1 / R_H (L_1 + L_2)} + L_2 \frac{i_{10}^2}{2}$ <p>სადაც $W_1 = L_1 \frac{i_{10}^2}{2}$</p>
5		$\Delta W = \frac{W_1}{1 + r_k L_1 / (R_H L_1 + r_k L_H)}$ <p>სადაც $W_1 = L_1 \frac{i_{10}^2}{2}$</p>
6		$\Delta W = \frac{W_1}{1 + r_k L_1 / [R_H (L_2 + L_1) + r_k L_H]} + L_2 \frac{i_{10}^2}{2}$ <p>სადაც $W_1 = L_1 \frac{i_{10}^2}{2}$</p>

$\Delta P_r = 10^{-2}$ ვტ/მ², მაშინ მივიღებთ სიმძლავრის დანაკარგებს შემაგნიტებაზე, გამოსახული კრიოტრონის სარქველის პარამეტრებით:

$P_r = \Delta P_r S = 10^{-2} \ell \frac{I}{j_c(\ell)}$, სადაც I -გარდამქმნელის დატვირთვის დენი; $j_c(\ell)$ -სარქველის მასალისთვის წრფივი დენის სიმკვრივე, რომელიც არ აჭარბებს ცნობილი მასალებისთვის 10^5 ა/მ. როცა დასაშვები სიგრძე სარქველის ℓ არ აჭარბებს 10^3 მ. გარდა ამისა რთული წარმოსადგენია რეალური ტექნოლოგია დამზადებისა კრიოტრონების დიდი სიგრძის სარქველით. ზემოდ ნათქვამის გათვალისწინებით მივიღებთ მაქსიმალურად შესაძლო ძაბვის მნიშვნელობას ზეგამტარული გარდამქმნელის გამოსასვლელზე, გამოსახული კრიოტრონის სარქველის მასალის პარამეტრებით:

$$U_M < \sqrt{\rho j_c}$$

1.5. მაღალტემპერატურული სამფაზა კრიოტრონული გამმართველი ნახევრადგამტარული მართვით

დამუშავებულია მაღალტემპერატურული სამფაზა კრიოტრონული გამმართველი ნახევრადგამტარული მართვით ნახ.1,12. მოწყობილობა შეიცავს პირველად 1 გრაგნილს, შესრულებული ჩვეულებრივი სადენისაგან; მეორედ გრაგნილს 2, შესრულებული მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენისაგან. სამფაზა კრიოტრონულ გამმართველს, რომელიც შეიცავს კრიოტრონებს, რომლის გადამრთველი ელემენტის გრაგნილი 3 შესრულებულია მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენებით, შემაგნიტების გრაგნილი 4 და მართვის გრაგნილი 5 შესრულებულია ჩვეულებრივი ზეგამტარული სადენისაგან [16].

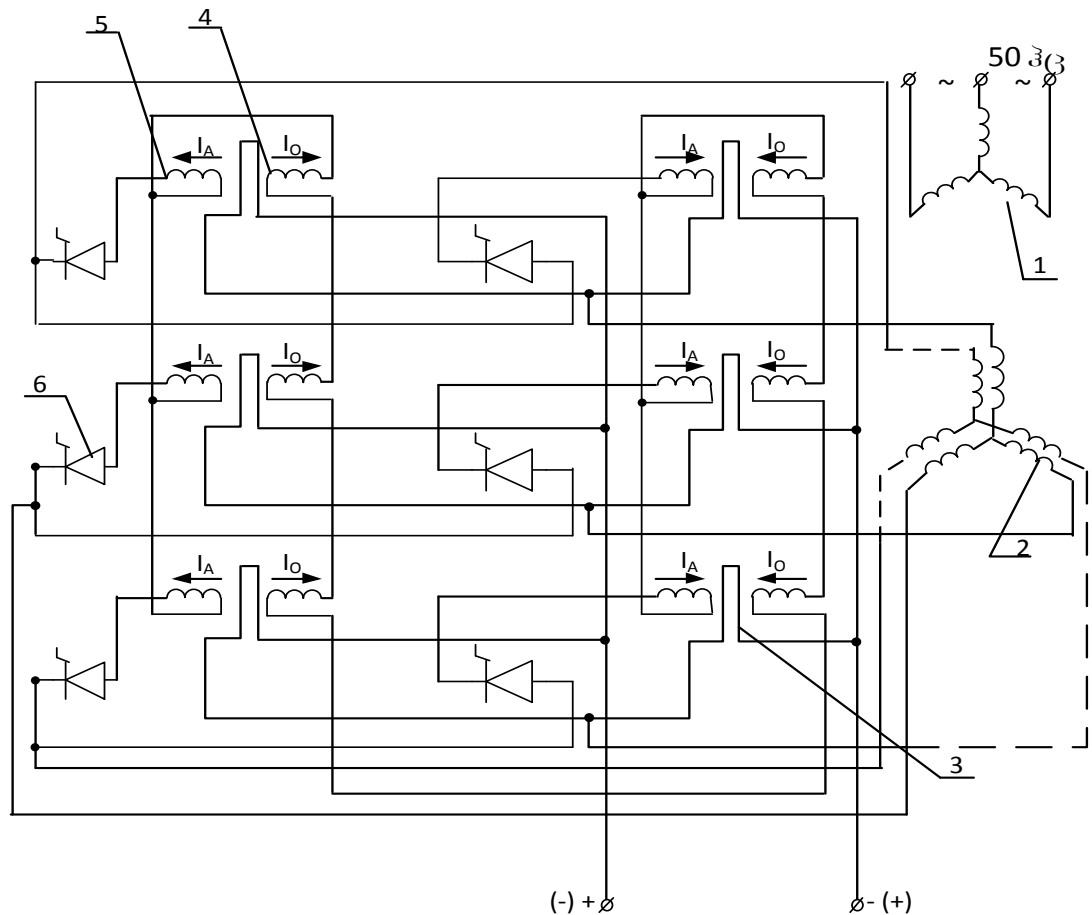
კრიოტრონული გამმართველის მართვა ხორციელდება ტირისტორებით გაღების α კუთხის ცვლილების გზით.

სამფაზა კრიოტრონული გამმართველი მუშაობს შემდეგი სახით [17]. პირველადი 1 გრაგნილის ჩართვით სამფაზა ცვლადი დენის ქსელში, მასში გაივლის ცვლადი დენი და სივრცეში პირველად 1 და მეორად 2 გრაგნილებში წარმოიქმნება მბრუნავი მაგნიტური ველი, რომელიც მეორადი გრაგნილის 2 ფაზებში აღძრავს ცვლად ემდ და დენებს. აღნიშნული დენები კრიოტრონული გამმართველის საშუალებით გარდაიქმნება მუდმივ დენში.

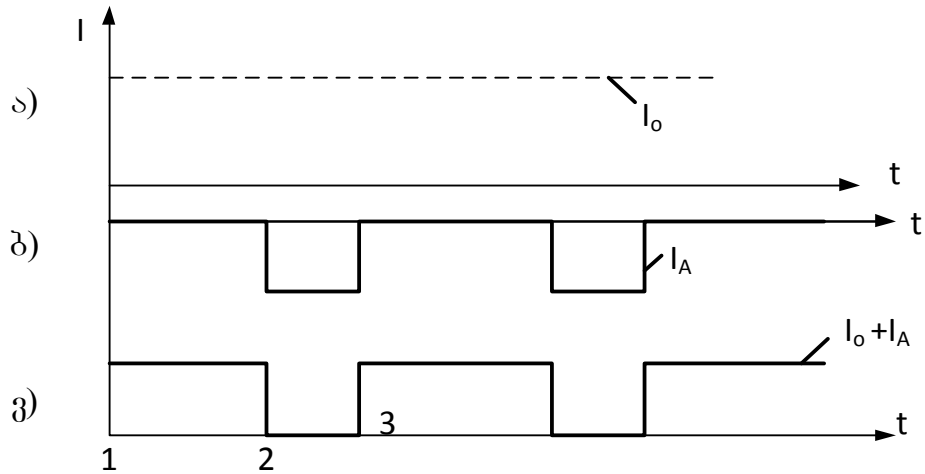
ცვლადი სიდიდეების გარდაქმნა მუდმივში კრიოტრონული გამმართველით დაფუძნებულია ზეგამტარების თვისებაზე, რომ ის ხდება ერთის მხრივ ზეგამტარი, როცა მაგნიტური ველი ნაკლებია კრიტიკულზე, და გააჩნია მინიმალური წინაღობა, მეორე მხრივ მეტად დიდი წინაღობა, როცა მაგნიტური ველი მეტია კრიტიკულზე. კრიოტრონის გადამრთველი ელემენტის გრაგნილი 3 მოთავსებულია მუშა არეში თანაღერძულად განლაგებული შემაგნიტების 4 და მართვის 5 გრაგნილების, განივად გრძივი ველების მიმართ შექმნილი 4 და 5 გრაგნილებით. 4 და 5 გრაგნილები შესრულებულია ერთნაირი ხვიათა რიცხვით, ხოლო მათი დამამაგნიტებელი ძალები მოქმედებენ საწინააღმდეგო მიმართულებით. ამგვარად მუშა არეში ველი შეიქმნება 4 და 5 გრაგნილების ჯამური ამპერხვებით.

ნახ.1.13 ნაჩვენებია სამფაზა კრიოტრონული გამმართველის მართვის ახსნა-განმარტებითი მახასიათებლები. ყველა კრიოტრონების შემაგნიტების გრაგნილები შეერთებულია მიმდევრობით და ჩართულია ტირისტორული გამმართველის (ნახ.1.12) გამოსასვლელზე. ამიტომ მასში გადის მუდმივი დენი I_0 (ნახ.1.13, ა). თითოეული კრიოტრონის მართვის 5 გრაგნილი შეერთებულია მიმდევრობით ტირისტორებთან და მათი გავლით გადის ტირისტორის ანოდის I_A დენი (ნახ.1.13, ბ). ამიტომ ჯამური ამპერხვების მრუდი, რომელიც ქმნის ველს მუშა არეში, გააჩნია სახე, წარმოდგენილი ნახ.1.13, ვ.

უბანზე 1-2 (ნახ.1.13), მუშა არეში ველი, მეტია კრიტიკულზე, კრიოტრონი არ ატარებს დენს, რადგანაც მისი გადამრთველი ელემენტის გრაგნილი გადადის ნორმალურ მდგომარეობაში ელექტრული წინაღობის დიდი მნიშვნელობით. უბანზე 2-3 (ნახ.1.13) შემაგნიტების და მართვის გრაგნილების ამპერხვიები აკომპენსირებენ ერთმანეთს და ველი მუშა არეში ახლოსაა ნულთან, ამ შემთხვევაში კრიოტრონი იმყოფება ზეგამტარულ მდგომარეობაში, ე.ი. ატარებს მაქსიმალურ დენს. ტირისტორის ჩართვას მიმდევრობით კრიოტრონის მართვის 5 გრაგნილთან პრაქტიკულად მყისად გადაჰყავს კრიოტრონი



ნახ.1.12. სამფაზა კრიოტრონული გამმართველის პრინციპული სქემა: 1- პირველადი გრაგნილი; 2-მეორადი გრაგნილი; 3-კრიოტრონის გადამრთველი ელემენტის გრაგნილი; 4-კრიოტრონის შემაგნიტების გრაგნილი; 5-კრიოტრონის მართვის გრაგნილი; 6-ტირისტორი



ნახ.1.13. სამფაზა კრიოტრონული გამმართველის მართვის ახსნა-განმარტებითი მახასიათებლები.

ზეგამტარულ მდგომარეობაში, ამაღლებს კრიოტრონის სწრაფქმედებას და საგრძნობლად ამარტივებს მართვის სქემას კრიოტრონული გამმართველის, განსაკუთრებით მრავალფაზა სისტემის შემთხვევაში.

ამჟამად კრიოტრონების კონკურენცია ნახევრადგამტარული გადამრთველებთან გართულებულია ორი მიზეზის გამო.

- კრიოტრონები შეიძლება შესრულდეს მხოლოდ დაბალი სიხშირეზე. სიხშირის დიაპაზონის გაზრდისათვის აუცილებელია დამუშავდეს სწრაფმოქმედი მართვის სისტემა, მართვის იმპულსების ციცაბო ფრონტით.

- კრიოტრონები შეიძლება შესრულდეს მხოლოდ დაბალ ძაბვაზე. ძაბვის გაზრდით მქკ კრიოტრონის არსებითად მცირდება. აღნიშნული ნაკლოვანების აღმოფხვრისათვის აუცილებელია შეიქმნას ზგ სადენები დიდი ხვედრითი წინაღობით ნორმალურ მდგომარეობაში.

წარმატებები შექმნისა, ახალი თაობის ზეგამტარული მასალების, გაუმჯობესებელი მახასიათებლებით [18] იძლევა პერსპექტივას სამუშაოს შემდგომი ჩატარებისა როგორც ძალოვანი კრიოტრონების დამუშავებისა, ისე მათ საფუძველზე გარდამქმნელი მოწყობილობებისა.

თავი II. ელექტრომაგნიტური პროცესები სამფაზა ბოგირულ კრიოტრონულ გარდამქმნელში

2.1. სამფაზა ბოგირული კრიოტრონული გარდამქმნელი ნახევრადგამტარული მართვით

დამუშავებულია მაღალტემპერატურული სამფაზა კრიოტრონული გამმართველი ნახევრადგამტარული მართვით ნახ.2.1. მოწყობილობა შეიცავს პირველად 1 გრაგნილს, შესრულებული ჩვეულებრივი სადენისაგან; მეორად გრაგნილს 2, შესრულებული მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენისაგან. სამფაზა კრიოტრონულ გამმართველს, რომელიც შეიცავს კრიოტრონებს, რომლის გადამრთველი ელემენტის გრაგნილი 3 შესრულებულია მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენებით, შემაგნიტების გრაგნილი 4 და მართვის გრაგნილი 5 შესრულებულია ჩვეულებრივი ზეგამტარული სადენისაგან [19,26].

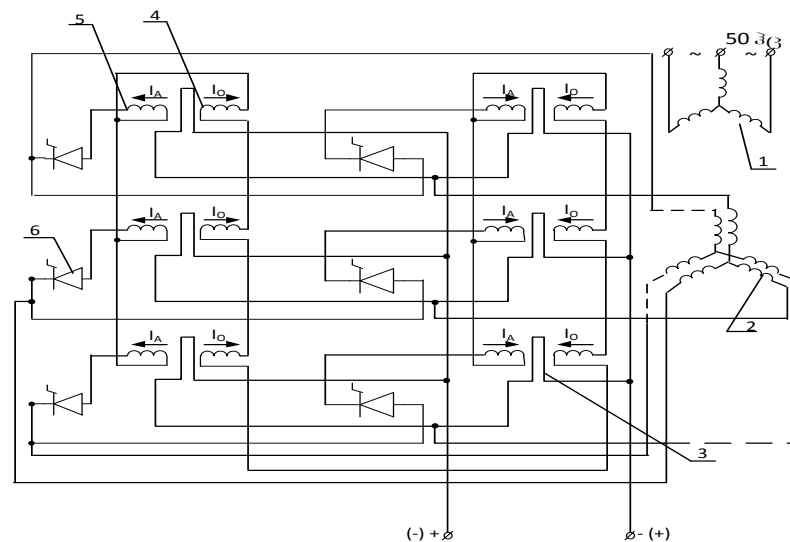
კრიოტრონული გამმართველის მართვა ხორციელდება ტირისტორებით გაღების α კუთხის ცვლილების გზით.

სამფაზა კრიოტრონული გამმართველი მუშაობს შემდეგი სახით [17]. პირველადი 1 გრაგნილის ჩართვით სამფაზა ცვლადი დენის ქსელში, მასში გაივლის ცვლადი დენი და სივრცეში პირველად 1 და მეორად 2 გრაგნილებში წარმოიქმნება მბრუნავი მაგნიტური ველი, რომელიც მეორადი გრაგნილის 2 ფაზებში აღძრავს ცვლად ემმ და დენებს. აღნიშნული დენები კრიოტრონული გამმართველის საშუალებით გარდაიქმნება მუდმივ დენში.

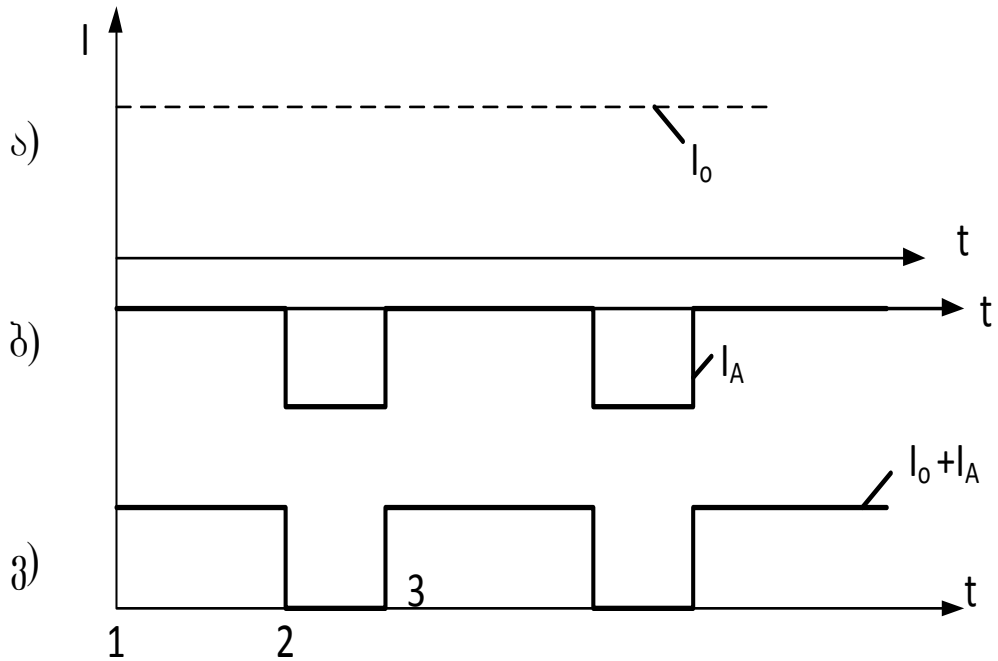
ცვლადი სიდიდეების გარდაქმნა მუდმივში კრიოტრონული გამმართველით დაფუძნებულია ზეგამტარების თვისებაზე, რომ ის ხდება ერთის მხრივ ზეგამტარი, როცა მაგნიტური ველი ნაკლებია კრიტიკულზე, და გააჩნია მინიმალური წინაღობა, მეორე მხრივ მეტად დიდი წინაღობა, როცა მაგნიტური ველი მეტია კრიტიკულზე.

კრიოტრონის გადამრთველი ელემენტის გრაგნილი 3 მოთავსებულია მუშა არეში თანალერძულად განლაგებული შემაგნიტების 4 და მართვის 5 გრაგნილების, განივად გრძივი ველების მიმართ შექმნილი 4 და 5 გრაგნილებით. 4 და 5 გრაგნილები შესრულებულია ერთნაირი ხვიათა რიცხვით, ხოლო მათი დამამაგნიტებელი ძალები მოქმედებენ საწინააღმდეგო მიმართულებით. ამგვარად მუშა არეში ველი შეიქმნება 4 და 5 გრაგნილების ჯამური ამპერხვებით.

ნახ. 2.2 ნაჩვენებია სამფაზა კრიოტრონული გამმართველის მართვის ახსნა-განმარტებითი მახასიათებლები. ყველა კრიოტრონების შემაგნიტების გრაგნილები შეერთებულია მიმდევრობით და ჩართულია ტირისტორული გამმართველის (ნახ.2.1) გამოსასვლელზე. ამიტომ მასში გადის მუდმივი დენი I_0 (ნახ.2.2, ა). თითოეული კრიოტრონის მართვის 5 გრაგნილი შეერთებულია მიმდევრობით ტირისტორებთან და მათი გავლით გადის ტირისტორის ანოდის I_A დენი (ნახ.2.2, ბ). ამიტომ ჯამური ამპერხვების მრუდი, რომელიც ქმნის ველს მუშა არეში, გააჩნია სახე, წარმოდგენილი ნახ.2.2, ვ.



ნახ.2.1. სამფაზა კრიოტრონული გამმართველის პრინციპული სქემა: 1- პირველადი გრაგნილი; 2-მეორადი გრაგნილი; 3-კრიოტრონის გადამრთველი ელემენტის გრაგნილი; 4-კრიოტრონის შემაგნიტების გრაგნილი; 5-კრიოტრონის მართვის გრაგნილი; 6-ტირისტორი



ნახ.2.2. სამფაზა კრიოტრონული გამმართველის მართვის ახსნა-განმარტებითი მახასიათებლები

უბანზე 1-2 (ნახ.2.2), მუშა არეში ველი, მეტია კრიტიკულზე, კრიოტრონი არ ატარებს დენს, რადგანაც მისი გადამრთველი ელემენტის გრაგნილი გადადის ნორმალურ მდგომარეობაში ელექტრული წინაღობის დიდი მნიშვნელობით. უბანზე 2-3 (ნახ.2.2) შემაგნიტების და მართვის გრაგნილების ამპერხვიები აკომპენსირებენ ერთმანეთს და ველი მუშა არეში ახლოსაა ნულთან, ამ შემთხვევაში კრიოტრონი იმყოფება ზეგამტარულ მდგომარეობაში, ე.ი. ატარებს მაქსიმალურ დენს. ტირისტორის ჩართვას მიმდევრობით კრიოტრონის მართვის 5 გრაგნილთან პრაქტიკულად მყისად გადაჰყავს კრიოტრონი ზეგამტარულ მდგომარეობაში, ამალეებს კრიოტრონის სწრაფქმედებას და საგრძნობლად ამარტივებს მართვის სქემას კრიოტრონული გამმართველის, განსაკუთრებით მრავალფაზა სისტემის შემთხვევაში.

**2.2. ელექტრომაგნიტური პროცესები სამფაზა ბოგირულ ტირისტორულ
გარდამქმნელში, როგორც მართვის სისტემა კრიოტრონული
გარდამქმნელისთვის [27]**

2.2.1. გამმართველის რეჟიმი.

ნახ.2.3. მოცემულია სამფაზა ბოგირული ტირისტორული გარდამქმნელი, როგორც მართვის სისტემა კრიოტრონული გარდამქმნელისთვის.

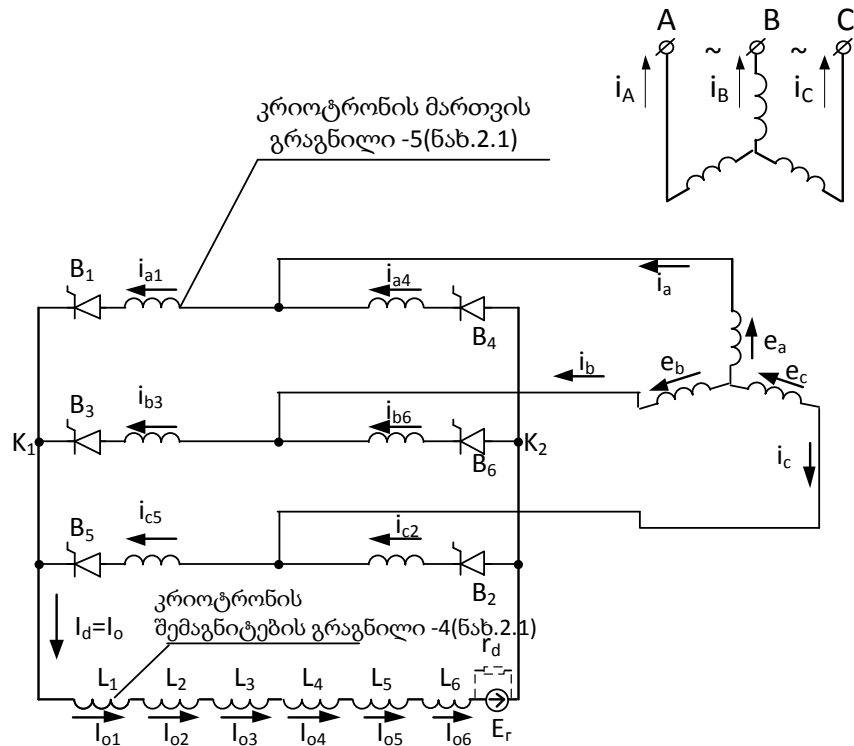
$$\left. \begin{aligned} i_{a1} = i_{b3} = i_{cs} = i_{a4} = i_{b6} = i_{c2} = I_A \\ I_{01} = I_{02} = I_{03} = I_{04} = I_{05} = I_{06} = I_d = I_o \\ L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 = L_d \end{aligned} \right\} \quad (2.1.)$$

განვიხილოდ ელექტრომაგნიტური პროცესები სამფაზა ბოგირულ ტირისტორულ გარდამქმნელში, როგორც მართვის სისტემა კრიოტრონული გარდამქმნელისთვის.

მართვადი გამმართველებისთვის გარე მახასიათებლის ცვლილების კანონზომიერება დამოკიდებულია რეგულირების α კუთხის სიდიდეზე. ამიტომ ასეთი გამმართველებისთვის ჩვეულებრივ აგებენ გარე მახასიათებლის სიმრავლეს, რეგულირების α კუთხის სხვადასხვა მნიშვნელობისთვის.

აღნიშნული დამოკიდებულების მიღების დროს სამფაზა ბოგირული ტირისტორული გამმართველისთვის აქტიურ-ინდუქციური r_d, L_d დატვირთვით, უგულვებელყოფთ დანაკარგებს ტირისტორებში და ტრანსფორმატორის გრაგნილებში, ვითვალისწინებთ მხოლოდ ტრანსფორმატორის გრაგნილის განზნევის ინდუქციურობას L_a , აგრეთვე უშვებთ, რომ დატვირთვის წრედში ინდუქციურობის სიდიდე $L_d = \infty$.

ასეთი გამართვების პროცესში დატვირთვის წრედში დენი მიიღება იდეალურად გამართული და უცვლელი თავისი სიდიდით, ხოლო კომუტაციის დენი დამოკიდებულია განზნევის ინდუქციურობის L_a სიდიდეზე და ტრანსფორმატორის გრაგნილის ელექტრომაგნიტური ძალის (ემძ) ცვლილების კანონზომიერებაზე კომუტაციის კონტურში. გამმართველის გარე მახასიათებლის ცვლილების კანონზომიერება დამოკიდებულია თითოეულ ტირისტორში დენის გატარების ხანგრძლივობაზე $\lambda = \frac{2\pi}{3} + \gamma$ (ნახ.2.4, ა).



ნახ.2.3. სამფაზა ბოგირული ტირისტორული გარდამქმნელი, როგორც მართვის სისტემა კრიოტრონული გარდამქმნელისთვის

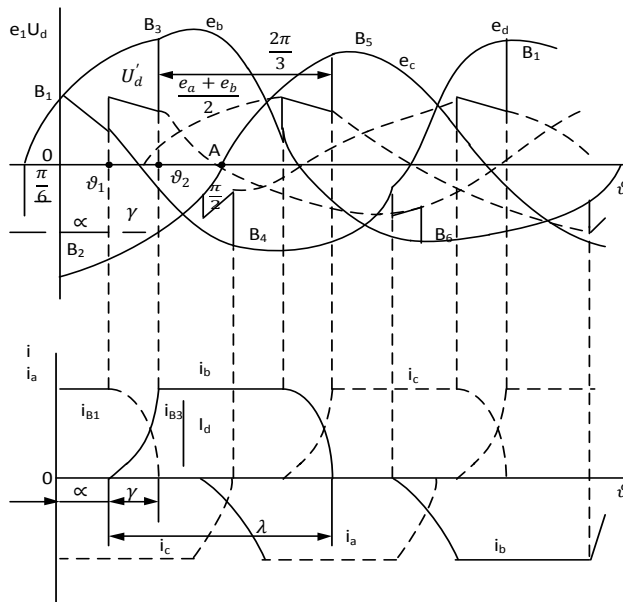
რომელიც თავის მხრივ განისაზღვრება ვენტილების რიცხვით, რომლებიც ერთდროულად ატარებენ დენს. კომუტაციის γ კუთხის, შესაბამისად, λ კუთხე იცვლება დატვირთვაში დენის ცვლილების დროს. როცა დატვირთვის დენი I_d , ახლოსაა ნომინალურ მნიშვნელობასთან, $\gamma < \frac{\pi}{3}$ და $\lambda < \pi$. აღნიშნულ რეჟიმში, სქემაში ერთდროულად, მონაცვლეობით ატარებს დენს ორი ან სამი ტირისტორი.

I_d დენის გაზრდით, ერთდროულად მომუშავე ოთხი ტირისტორის ინტერვალი ფართოვდება, და მოკლე შერთვის დროს სქემაში ნებისმიერ მომენტში ერთდროულად ატარებს დენს ოთხო ვენტილი; ამ შემთხვევაში $\gamma < \frac{\pi}{3}$ და $\lambda = \frac{4\pi}{3}$.

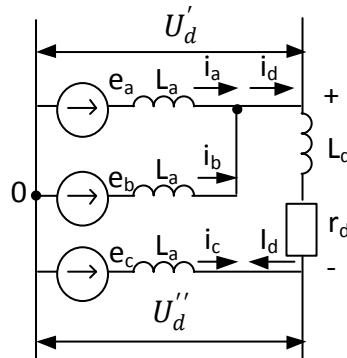
თითოეული სამი რეჟიმიდან სქემის მუშაობა ხასიათდება გარკვეული კანონზომიერებით, გარე მახასიათებლების ცვლილებით, ამიტომ განხილული უნდა იქნეს აღნიშნული რეჟიმები ცალკე, ხოლო შემდეგ უნდა ჩავატაროდ მიღებული გარე მახასიათებლის უბნების შეუღლება.

$$\gamma < \frac{\pi}{3} \text{ რეჟიმი.}$$

ნახ.2.4, ა ნაჩვენებია დენების და ძაბვების დროის დიაგრამები აღნიშნული რეჟიმისათვის. ორი ტირისტორის ერთდროულად მომუშავე ინტერვალში (მაგალითად, B_1 და B_2) გამართული ძაბვის მყისი მნიშვნელობა განისაზღვრება $e_a - e_c$ ემძ-ის სხვაობით, ხოლო ტირისტორებში დენების მისი მნიშვნელობა განისაზღვრება გამართული დენის I_d მუდმივი მნიშვნელობით.



ა)



ბ)

ნახ.2.4. სამფაზა ბოგირული ტირისტორული გარდამქმნელი, გამართველის რეჟიმში მუშაობის დროს:

- ა) რეჟიმის პარამეტრების დროის დიაგრამები, როცა $\gamma < \frac{\pi}{3}$;
- ბ) ეკვივალენტური სქემა

ტირისტორებში დენების და გამართული ძაბვის ცვლილების კანონზომიერების განსაზღვრისათვის, სამი ტირისტორის ერთდროული მუშაობის პერიოდში (მაგალითად, B_1, B_2 და B_3) უნდა განვიხილოდ ეკვივალენტური სქემა აღნიშნული რეჟიმისთვის, რომელიც ნაჩვენებია ნახ.2.4, ბ). ემმ-ის მყისი მნიშვნელობა ეკვივალენტურ სქემაში განისაზღვრება, დროის დიაგრამების თანახმად ნახ.2.4, ა:

$$\left. \begin{aligned} e_a &= E_{2m} \sin\left(\vartheta + \frac{5\pi}{6}\right), \\ e_b &= E_{2m} \sin\left(\vartheta + \frac{\pi}{6}\right), \\ e_c &= -E_{2m} \cos\vartheta \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

დაუშვათ, რომ მოცემული რეგულირების α კუთხის მნიშვნელობა ნაკლებია $\frac{\pi}{6}$, კომუტაციის დასაწყისში ტირისტორისთვის B_3 ათვლას ვიღებთ ϑ_1 -დან (ნახ.2.4, ა).

კომუტაციის პერიოდში B_1 და B_3 ტირისტორები აღმოჩნდებიან მოკლე ჩართული ტრანსფორმატორის გრაგნილებზე ემმ-ით e_a და e_b , ამიტომ აღნიშნული ინტერვალის განმავლობაში B_3 ტირისტორში დენი ტოლია მეორადი გრაგნილის დენის i_b , ხოლო დენი B_1 ტირისტორში მეორადი გრაგნილის i_a დენის. B_2 ტირისტორის კათოდურ ჯგუფში დენი ტოლია I_d . ამგვარად, ეკვივალენტური სქემის ნახ.2.4, ბ თანახმად,

$$\left. \begin{aligned} e_a - e_b &= X_a \left(\frac{di_a}{d\vartheta} - \frac{di_b}{d\vartheta} \right), \\ i_a + i_b &= I_d \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

რადგანაც $\frac{di_b}{d\vartheta} = -\frac{di_a}{d\vartheta}$, (1.3)-დან გვექნება:

$$e_a - e_b = 2X_a \frac{di_a}{d\vartheta}. \quad (2.4)$$

გავითვალისწინოთ, რომ $e_a - e_b = -\sqrt{3}E_{2m}\sin\vartheta$, მივიღებთ

$$-\sqrt{3}E_{2m}\sin\vartheta = 2X_a \frac{di_a}{d\vartheta} \quad (2.5)$$

(2.5) განტოლების ინტეგრირებით და ქვედა ზღვრის გათვალისწინებით $\vartheta = \alpha, i_a = I_d$, განვსაზღვრავთ i_a და i_b დენების ცვლილების კანონზომიერებას კომუტაციის პერიოდში:

$$i_a = I_d - \frac{\sqrt{3}E_{2m}}{2X_a} (\cos\alpha - \cos\vartheta), \quad (2.6)$$

$$i_b = \frac{\sqrt{3}E_{2m}}{2X_a} (\cos\alpha - \cos\vartheta), \quad (2.7)$$

როცა $\vartheta = \alpha + \gamma$ (კომუტაციის ბოლო $i_b = I_d$, ამიტომ

$$I_d = \frac{\sqrt{3}E_{2m}}{2X_a} [\cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma)] \quad (2.8)$$

ან

$$[\cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma)] = \frac{2X_a I_d}{\sqrt{3}E_{2m}} \quad (2.9)$$

(2.9)-დან გამომდინარეობს, რომ დატვირთვის დენის I_d გაზრდით, როცა რეგულირების კუთხის α სიდიდე უცვლელია, კომუტაციის γ კუთხე აგრეთვე იზრდება.

ეკვივალენტური სქემის ნახ. 2.4, ბ გამოყენებით განვსაზღვრავთ გამართული ძაბვის საშუალო მნიშვნელობას.

გამართული ძაბვის მრუდის სიმეტრიისა აბსციზის ღერძის მიმართ, აგრეთვე მისი განმეორების კანონზომიერებისა, თითოეული მესამედი პერიოდის გავლით, საშუალო გამართული ძაბვის მნიშვნელობა ზოგად სახეში ტოლია

$$U_d = \frac{2}{2\frac{\pi}{3}} \int_a^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} U'_d d\vartheta, \quad (2.10)$$

სადაც U'_d -ძაბვის მყისი მნიშვნელობა ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილის ნულოვან წერტილსა და დატვირთვის დადებით პოლუსს შორის.

U'_d სიდიდის განსაზღვრის დროს პერიოდის მესამედზე უნდა განვასხვავოდ ორი დამახასიათებელი ინტერვალი. კომუტაციის ინტერვალისთვის ეკვივალენტური სქემის თანახმად

$$U'_d = e_a - X_a \frac{di_a}{d\vartheta}. \quad (2.11)$$

მაგრამ (2.4)-დან გამომდინარეობს, რომ

$$\frac{di_a}{d\vartheta} = \frac{e_a - e_b}{2X_a}.$$

ამიტომ დენი B_1 და B_3 ტირისტორებში კომუტაციის პერიოდში

$$U_d = \frac{e_a + e_b}{2} = \frac{1}{2} E_{2m} \cos\vartheta \quad (2.12)$$

კომუტაციის დასრულების შემდეგ B_3 ტირისტორში გამართული ძაბვის მყისი მნიშვნელობა

$$U'_d = e_b \quad (2.13)$$

ამგვარად, გამართული ძაბვის საშუალო მნიშვნელობა

$$U_d = \frac{3}{\pi} \left[\int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \left(\frac{e_a + e_b}{2} \right) d\vartheta + \int_{\alpha+\gamma}^{\alpha+\frac{2\pi}{3}} e_b d\vartheta \right] \quad (2.14)$$

(2.14)-ში ემპ-ის მყისი მნიშვნელობის ჩასმით, მივიღებთ

$$U_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_{2m} \frac{\cos\alpha + \cos(\alpha+\gamma)}{2} \quad (2.15)$$

(2.15)-ში შევცვალოდ $\cos(\alpha + \gamma)$ მნიშვნელობა გამოსახულებით (2.9)-დან, მივიღებთ გარე მახასიათებლის განტოლებას $\gamma < \frac{\pi}{3}$ რეჟიმისთვის

$$U_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_{2m} \left(\cos\alpha - \frac{X_{a1d}}{\sqrt{3}E_{2m}} \right) \quad (2.16)$$

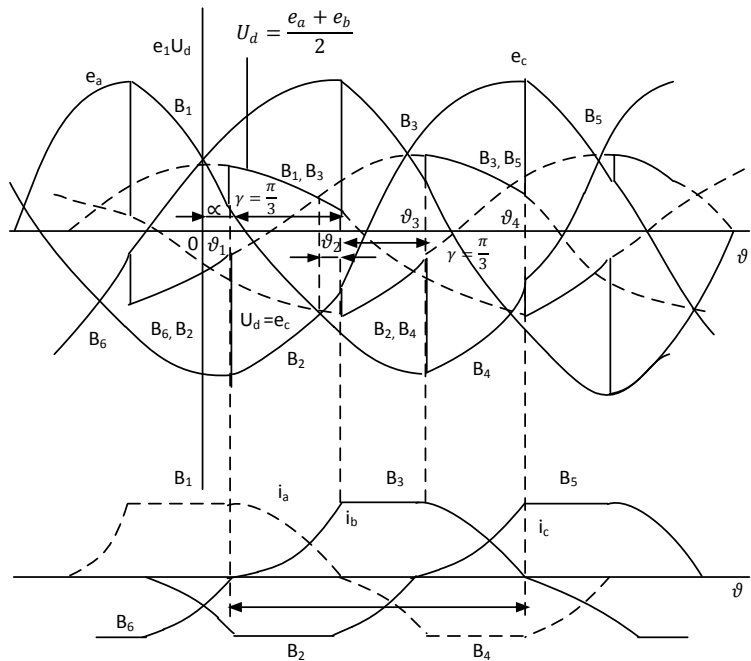
(2.16)-ის კანონზომიერება, სხვადასხვა რეგულირების α კუთხის მნიშვნელობის დროს წარმოადგენს სიმრავლეს წრფივი ხაზებით, ერთმანეთისაგან პარალელურს.

$$\gamma = \frac{\pi}{3} \text{ რეჟიმი}$$

ასეთი რეჟიმი დგება, როგორც კი ინტერვალი, რომლის განმავლობაში ერთდროულად დენს ატარებს ორი ტირისტორი, γ კუთხე ხდება ნულის ტოლი და სქემაში დროის ნებისმიერ მომენტში ერთდროულად ატარებს დენს სამი ვენტილი. შემდგომი გაზრდა დატვირთვის დენის, იმ შემთხვევაში, თუ $\alpha < \frac{\pi}{6}$, კომუტაციის კუთხე აგრძელებს დარჩეს უცვლელი, ტოლი $\frac{\pi}{3}$. ეს აიხსნება იმით, რომ დატვირთვის დენის გაზრდის დროს სქემაში კვლავინდებურად ერთდროულად ატარებს დენს მხოლოდ სამი ტირისტორი, რადგანაც მეოთხე ტირისტორისთვის არ იქნება პირობები, რომლის დროსაც ის შესძლებს დაიწყოს დენის გატარება. ასე, მაგალითად, თუ დენს ატარებენ B_1, B_2, B_3 ტირისტორები, მაშინ მორიგი ტირისტორს B_4 არ შეუძლია შეუდგეს მუშაობას, რადგანაც მისი ანოდის პოტენციალი, განსაზღვრული დატვირთვის უარყოფითი პოტენციალით, ტოლია B_2 მუშა

ტირისტორის კათოდის პოტენციალის (ან ემმ e_c), იქნება კათოდის პოტენციალის ქვემოთ, განსაზღვრული დატვირთვის დადებითი პოტენციალით, რომელიც ტოლია კომუტაციის მოკლე ჩართულ კონტურში ემმ-ის ნახევარ ჯამისა $\frac{e_a + e_b}{2}$.

ასეთი რეჟიმი გაგრძელდება მანამდე, სანამ ჯამური კუთხე $\alpha + \gamma$ არ გახდება ტოლი $\frac{\pi}{2}$ (წერტილი A ნახ.2.5).



ნახ.2.5. რეჟიმის პარამეტრების დროის დიაგრამები, სამფაზა ბოგირული ტირისტორული გამმართველისთვის, როცა $\gamma = \frac{\pi}{3}$.

მეორე რეჟიმში რეგულირების α კუთხე დატვირთვის დენის ზრდასთან ერთად ავტომატურად იზრდება, ხოლო γ კუთხე რჩება უცვლელი, ტოლი $\frac{\pi}{3}$. შედეგად გამართული ძაბვის საშუალო მნიშვნელობა დატვირთვის დენის გაზრდით მცირდება.

მეორე რეჟიმისთვის გარე მახასიათებლის ცვლილების კანონზომიერება, შეიძლება განისაზღვროს (2.19) და (2.15) განტოლებებიდან, თუ გავითვალისწინებთ, რომ $\gamma = \frac{\pi}{3}$;

$$\frac{2X_a I_d}{\sqrt{3} E_{2m}} = \cos \alpha - \cos \left(\alpha + \frac{\pi}{3} \right), \quad (2.17)$$

$$\frac{2\pi U_d}{3\sqrt{3} E_{2m}} = \cos \alpha + \cos \left(\alpha + \frac{\pi}{3} \right), \quad (2.18)$$

კოსინუსების კუთხეების სხვაობისა და ჯამის გარდაქმნის შედეგად, მივიღებთ:

$$\frac{2X_d I_d}{\sqrt{3}E_{2m}} = \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right), \quad (2.19)$$

$$\frac{2\pi U_d}{3\sqrt{9}E_{2m}} = \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right), \quad (2.20)$$

(2.19) და (2.20) განტოლებების კვადრატში აყვანით და შეჯამებით მივიღებთ მეორე რეჟიმისათვის გარე მახასიათებლების განტოლებას:

$$\frac{4X_d^2 I_d^2}{3E_{2m}^2} + \frac{4\pi^2 U_d^2}{81E_{2m}^2} = 1 \quad (2.21)$$

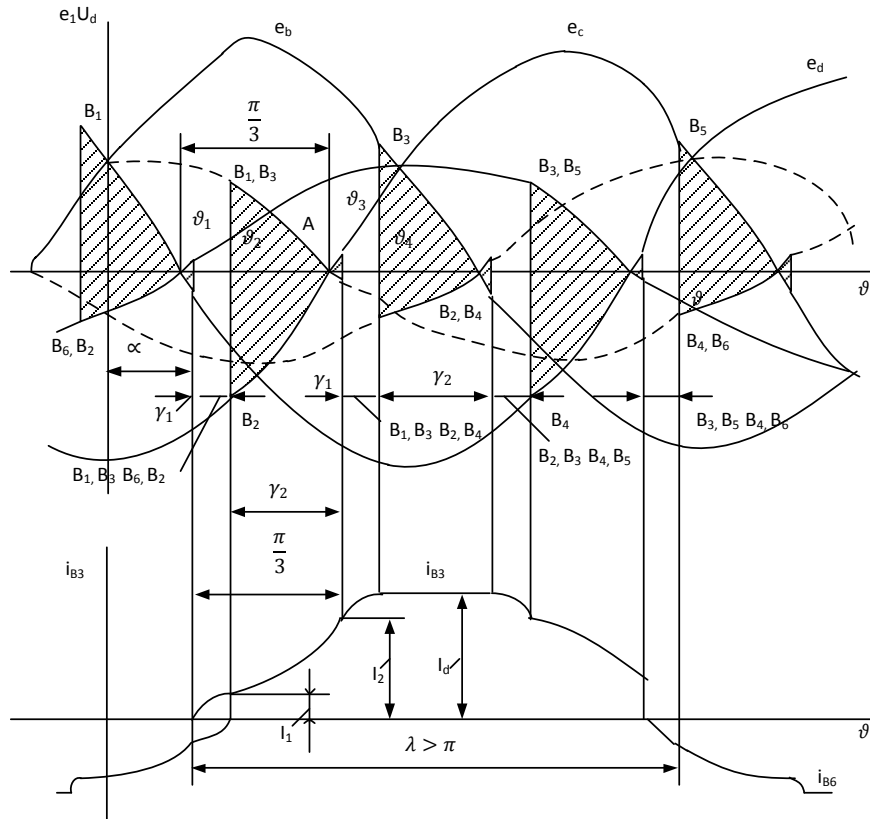
(2.21) გამოსახულება არის ელიფსის განტოლება, რომლის ღერძები ემთხვევა U_d და I_d კორდინატების ღერძებს.

$$\gamma > \frac{\pi}{3} \text{ რეჟიმი}$$

მესამე რეჟიმი, შეიძლება დაიწყოს მომენტიდან, რომელიც შეესაბამება A წერტილს ნახ.2.5, რომლისთვისაც $\alpha + \gamma = \frac{\pi}{2}$. ამ მომენტიდან სქემაში ერთდროულად ატარებს დენს ოთხო ტირისტორი, რადგანაც ანოდის პოტენციალი მორიგი მეოთხე ტირისტორისა გახდება დადებითი კათოდის პოტენციალის მიმართ. ასე, მაგალითად, მომენტში, რომელიც შეესაბამება θ_3 წერტილს (ნახ.2.6), ერთდროულად ატარებდნენ დენს სამი ვენტილი B_1, B_2, B_3 გამლები პოტენციალის მიწოდების დროს ტირისტორ B_4 -ზე, ის იწყებს მუშაობას და სქემაში ერთდროულად დროის განმავლობაში, რომელიც შეესაბამება γ_1 კუთხეს, დენს გაატარებს ოთხი ტირისტორი B_1, B_2, B_3, B_4 . ამ შემთხვევაში გამართული ძაბვა ტოლია ნულის, რადგანაც დატვირთვის წრედი დამოკლებულია B_1 და B_4 ტირისტორებით. γ_1 ინტერვალის დამთავრდება, როგორც კი B_1 ტირისტორის დენი გახდება ნულის ტოლი (წერტილი θ_4 ნახ.2.6).

აღნიშნული მომენტიდან სქემაში დროის განმავლობაში, რომელიც შეესაბამება γ_2 კუთხეს, ერთდროულად დენს ატარებს სამი ტირისტორი B_2, B_3, B_4 მანამდე, სანამ არ აღიძვრება პირობა B_5 ტირისტორის მუშაობის დაწყებისთვის და დადგება ინტერვალის B_2, B_3, B_4 და B_5 ტირისტორების ერთდროული მუშაობის, რომლის ხანგრძლივობა შეესაბამება γ_1 კუთხეს.

ამგვარად, მესამე რეჟიმისთვის დამახასიათებელია ორი ინტერვალი: γ_1 -ოთხი ვენტილების ერთდროული მუშაობის ინტერვალი და γ_3 -სამი ვენტილების ერთდროული მუშაობის ინტერვალი.



ნახ.2.6. რეჟიმის პარამეტრების დროის დიაგრამები, სამფაზა ბოგირული ტრისტორული გამმართველისთვის, როცა $\gamma > \frac{\pi}{3}$

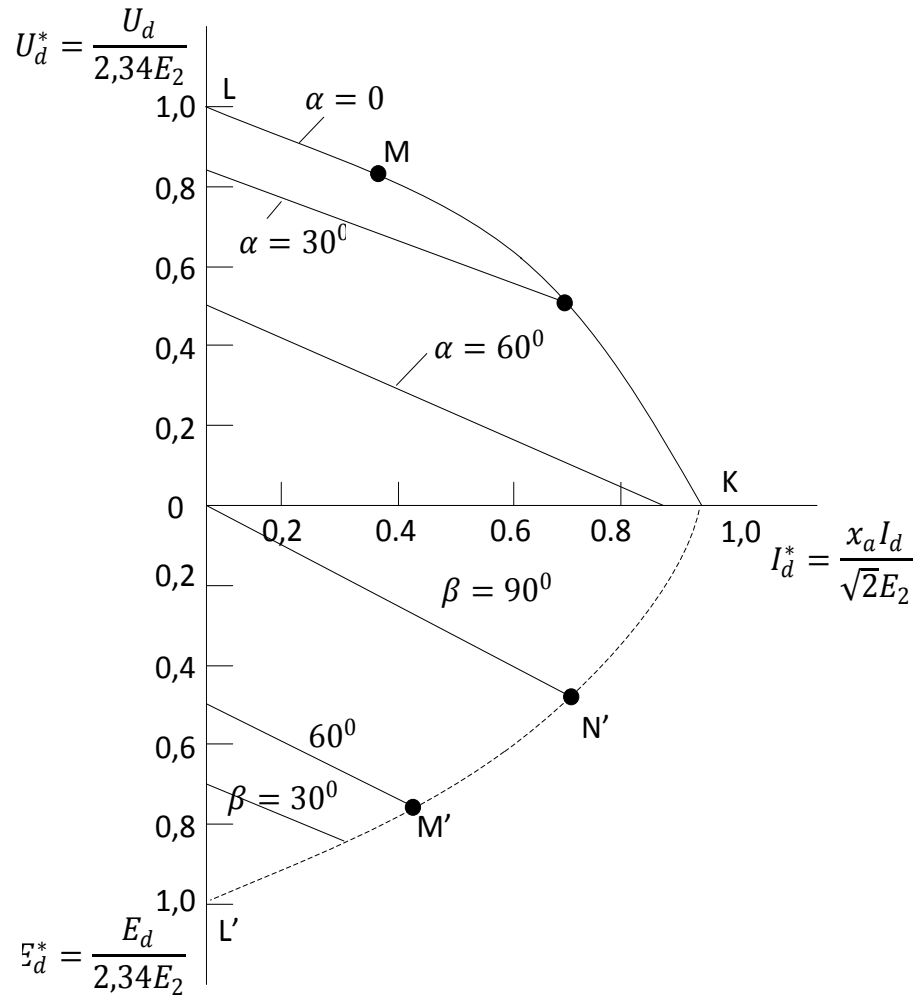
პროცესების ანალიზით, ზემოდ მოყვანილი მეთოდის გამოყენებით, შეიძლება განისაზღვროს გარე მახასიათებელი მესამე რეჟიმისთვის, ანალოგიურად, როცა $\alpha = \frac{\pi}{6}$:

$$U_d = \frac{9E_{2m}}{\pi} \left(1 - \frac{X_a I_d}{E_{2m}} \right) \quad (2.22)$$

(2.22) გამოსახულება წარმოადგენს წრფივ განტოლებას. ნახ.2.7-ის ზემო კვადრანტში წარმოდგენილია გარდამქნელის გარე მახასიათებლის სიმრავლე, გამმართველ რეჟიმში მუშაობის დროს რეგულირების α კუთხის

სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს, ფარდობით ერთეულებში. როცა $\alpha < \frac{\pi}{6}$ გარე მახასიათებელი შედგება სამი მაულლებელი უბნისგან LM, MN და NK , რომლის განტოლებები განხილულია ზემოდ, რეჟიმებისათვის

$$\gamma < \frac{\pi}{3}, \gamma = \frac{\pi}{3}, \gamma > \frac{\pi}{3}$$



ნახ.2.7. სამფაზა ბოგირული ტირისტორული გარდამქმნელისთვის გარე მახასიათებლები

როცა $\frac{\pi}{3} > \alpha > \frac{\pi}{6}$ გარე მახასიათებელზე ქრება ელიფსური MN მონაკვეთი და რჩება პირველი და მესამე წრფივი მონაკვეთები. როცა $\alpha \geq \frac{\pi}{3}$ გარე მახასიათებელი აღიწერება ერთი განტოლებით, რომელიც შეესაბამება პირველ წრფივ მონაკვეთს.

2.2.2 ინვერტორის რეჟიმი

სამფაზა ბოგირული ტირისტორული ინვერტორის მუშაობა გამოსახულია რეჟიმის პარამეტრების დროის დიაგრამებით (ნახ.2.8), სადაც U_{d1} -გამართული ძაბვა ტირისტორების კენტი ჯგუფისათვის (U_{K10}), ხოლო U_{d2} -გამართული ძაბვა ტირისტორების ლუწი ჯგუფისათვის (U_{K20}). გამართული ძაბვა ბოგირული გარდამქმნელისათვის მთლიანობაში ტოლია $U_d = U_{d1} + U_{d2}$.

მეორე მხრივ, U_d ძაბვა დროის თითოეულ მომენტში ტოლი უნდა იყოს ხაზური ძაბვის - ორი ერთდროულად მომუშავე ტრანსფორმატორის ვენტილური ფაზების ძაბვების სხაობის. ჯამდება, რატემა უნდა, აგრეთვე უკუ ემმ-ის საშუალო მნიშვნელობა

$$E_d = E_{d1} + E_{d2}$$

ინვერტორის გარე მახასიათებელს გააჩნია შემდეგი გამოსახულება

$$E_d = -U_d = \frac{3}{\pi} \sqrt{3} E_{2m} \cos \beta + \frac{3}{2\pi} X_a I_d \quad (2.23)$$

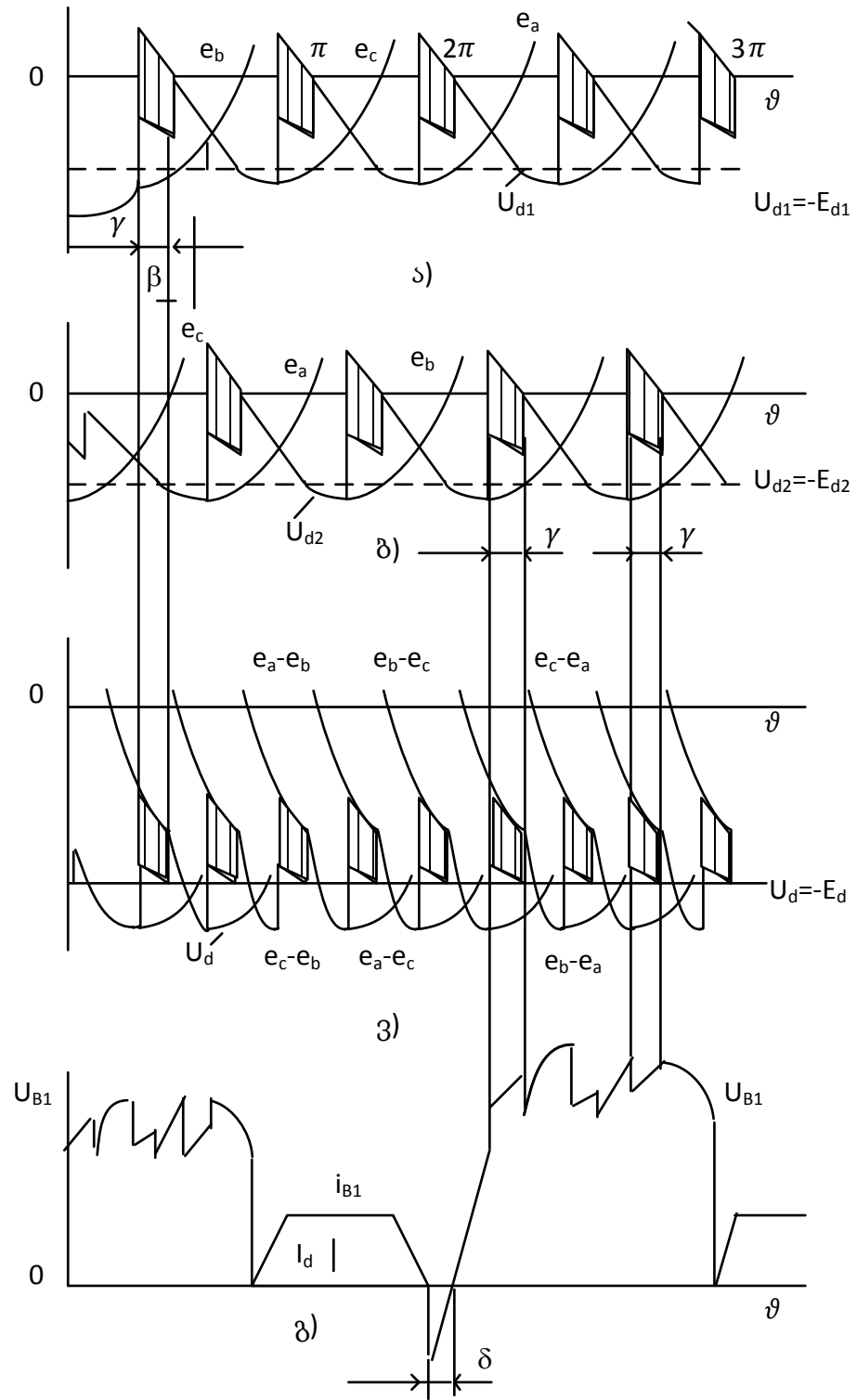
(2.23) გამოსახულება წარმოადგენს ინვერტორის გარე მახასიათებელს, რომელიც მუშაობს $\gamma = \frac{\pi}{3}$ რეჟიმში. გამართველის რეჟიმის ანალოგიურად, ინვერტორულ რეჟიმშიც აგრეთვე ადგილი აქვს სამ რეჟიმს:

- რეჟიმი I: $0 < \gamma < \frac{\pi}{3}$,
- რეჟიმი II: $\gamma = \frac{\pi}{3}$,
- რეჟიმი III: $\frac{\pi}{3} < \gamma < \frac{2\pi}{3}$

ინვერტორის გარე მახასიათებლები აღნიშნული რეჟიმებისთვის წარმოდგენილია ქვედა კვადრანტში ნახ.2.7.

ინვერტორის უკუ ემმ-ის პულსაციებს, როგორც ჩანს ნახ. 2.8, ა, ბ გააჩნია ექვსჯერადი სიხშირე შედარებით ცვლადი დენის ქსელის ემმ-თან.

ინვერტორის ტირისტორში დენს i_{B1} გააჩნია შემდეგი სახე ნახ.2.8, გ.



ნახ.2.8. რეჟიმის პარამეტრების დროის დიაგრამები, რომლებიც აჩვენებენ სამფაზა ბოვირული ტირისტორული ინვერტორის მუშაობას

თავი III. სამფაზა ბოგირული კრიოტრონული გარდამქმნელის ზეგამტარული სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში

ენერგეტიკული დანიშნულების კრიოტრონული გარდამქმნელების დამუშავება და შექმნა მოითხოვს ზეგამტარული (ზგ) სადენების გამოყენებას მაღალი დენგამტარუნარიანობით და დაბალი დანაკარგებით. აღნიშნული მიზნის მიღწევა შესაძლებელია მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენებით ლოკალიზებული მაგნიტური ველით (მმზგსლ), რომელშიც ურთიერთ გავლენა ცალკეული ძარღვების მაგნიტური ველების დაყვანილია მინიმუმამდე. გრაგნილების ასეთი შესრულებით დენგამტარუნარიანობა თითოეული ზგ ძარღვის განისაზღვრება საკუთარი მაგნიტური ველით და საკუთარი პარამეტრებით.

3.1. ერთძარღვიანი ზეგამტარული სადენის დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში

თუ ერთძარღვიანი ზგ სადენში (ნახ. 3.1, ა) გადის ცვლადი სინუსოიდური დენი

$$i = I_{\theta} \sin \omega t = i_{\theta}^* I_k \sin \omega t, \quad i_{\theta}^* = \frac{I_m}{I_j} \quad (3.1)$$

სადენის ზედაპირზე მაგნიტური ინდუქციისათვის გვექნება:

$$B_o = \mu_o \frac{i}{2\pi r_o} = i_{\theta}^* B_j; \quad B_o = \frac{B_o}{B_j} = i_{\theta}^*; \quad B_{o\theta} = i_{\theta}^* I_m; \quad B_k = \mu_o \frac{I_j}{2\pi r_o}; \quad (3.2)$$

სადაც I_k -დენის კრიტიკული მნიშვნელობა,

$$i_{\theta}^* = \frac{I_{\theta}}{I_j} - \text{მაქსიმალური დენის ფარდობითი მნიშვნელობა.}$$

ზეგამტარულ სადენში დენი შედგება ორი მდგენელისაგან (ნახ.3.1, ა)

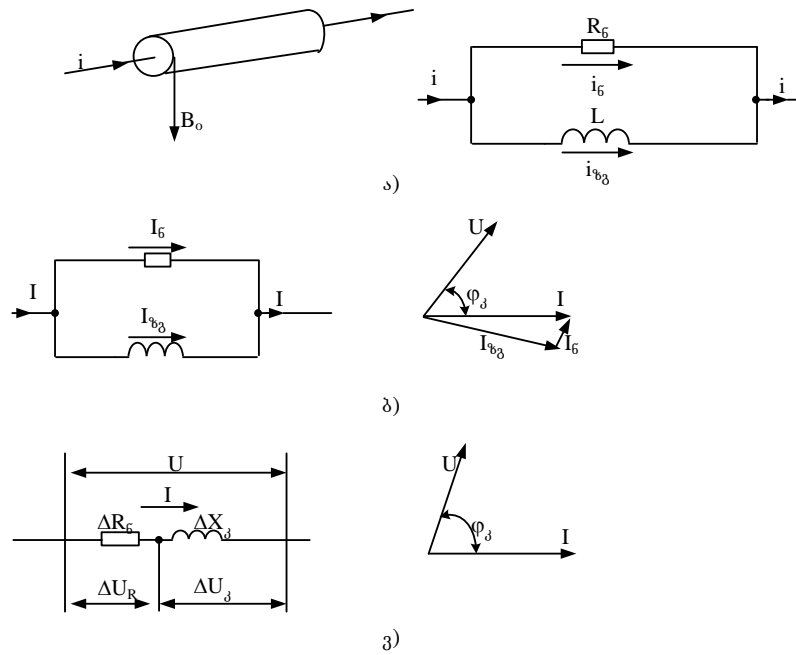
$$i = i_{\theta} + i_{\Phi} \quad (3.3)$$

სადაც i_6 -დენის აქტიური მდგენელი, ან დენი გამოწვეული ნორმალური ელექტრონებისაგან,

i_{Φ_3} - დენის ზეგამტარული მდგენელი.

სრული დენის აქტიური მდგენელი იზღუდება წინააღობით, რომლისთვისაც

$$R_n = \rho_6 \frac{\ell}{S_\lambda} = \frac{\rho_{60}}{n_6^* S_o S_\lambda^*} \ell = \frac{1}{n_6^* S_\lambda^*} R_{60}, \quad (3.4)$$



ნახ. 3.1. სქემები და ვექტორული დიაგრამები

სადაც $R_{60} = \rho_{60} \frac{\ell}{S_o}$,

ℓ - სადენის სიგრძე,

$\rho_n = \frac{\rho_{60}}{n_6^*}$ - სადენის ხვედრითი წინააღობა,

$S_\lambda^* = \frac{S_\lambda}{S_o}$ - დენით დაკავებული ფარდობითი ფართი ზგ სადენის მთლიანი

ფართის $S_o = \pi r_o^2$ ნაწილიდან,

ρ_{60} - ხვედრითი წინააღობა, როცა, $n_6^* = 1$,

$n_6^* = \frac{n_6}{n_o}$ - ნორმალური ელექტრონების სიმკვრივის ფარდობითი

მნიშვნელობა,

n_{σ} - ერთეულ მოცულობაში ნორმალური ელექტრონების რიცხვი,

n_0 - ერთეულ მოცულობაში საერთო ელექტრონების რიცხვი,

$R_{\sigma 0}$ -ნორმალურ მდგომარეობაში ზგ სადენის წინააღობა, როცა $n_{\sigma}^* = 1$.

სრული დენის ზეგამტარული მდგენელი იზღუდება კინეტიკური ინდუქციურობით

$$L_{\sigma} = \ell_{\sigma} \frac{\ell}{s_{\lambda}} = \frac{\ell_{\sigma}}{n_{\sigma}} \frac{\ell}{s_{\lambda}^* s_o} = \frac{1}{n_{\sigma}^* s_{\lambda}^*} L_{\sigma 0} \quad (3.5)$$

სადაც $L_{\sigma 0} = \ell_{\sigma 0} \frac{\ell}{s_o}$; $\ell_{\sigma} = \frac{\ell_{\sigma 0}}{n_{\sigma}^*}$ - ხვედრითი კინეტიკური ინდუქციურობა;

$\ell_{\sigma 0}$ - ხვედრითი კინეტიკური ინდუქციურობა, როცა $n_{\sigma}^* = 1$; $\ell_{\sigma 0} = \frac{m}{n_0 e^2}$,

სადაც m -ელექტრონების მასა; e - ელექტრონების მუხტის მნიშვნელობა.

n_{σ}^* და n_{σ} ელექტრონების სიმკვრივის ცვლილების განსაზღვრისათვის, მაქსიმალური დენისაგან დამოკიდებულებაში გვექნება

$$n_{\sigma}^* = 1 - \gamma_{\sigma}^0 = 1 - \gamma_{I \sigma}^0; \quad n_{\sigma} = \gamma_{B 0 \sigma}^0 = \gamma_{I \sigma}^0$$

სადაც γ_{σ}^0 - უგანზომილებო კოეფიციენტი, რომელიც მიიღება ექსპერიმენტალური გზით.

დენით დაკავებული ფართი, იცვლება დენის შეღწევის სიღრმისგან

დამოკიდებულებაში:

$$s^* = \frac{s_{\lambda}}{s_o} = \frac{2\pi(r_o - \frac{\lambda}{2})\lambda}{\pi r_o^2}, \quad (3.6)$$

სადაც λ -დენის შეღწევადობის სიღრმე,

$$\lambda = \frac{\lambda_o}{\sqrt{n_{\sigma}^*}} = \frac{\lambda_o}{\sqrt{1 - \gamma_{I \sigma}^0}} \quad (3.7)$$

λ_o - დენის შეღწევადობის სიღრმე (ლონდონისებური).

ზგ სადენის მაქსიმალური დენგამტარიანობა განისაზღვრება დენის შევსებით, რომლის დროსაც დენის ზეგამტარული მდგენელი მიაღწევს მაქსიმუმს. $\lambda = r_o$ პირობის დროს დენის შევსებისთვის მივიღებთ:

$$J_{\sigma}^{\text{შვს.}} = \gamma_{\sigma}^0 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_o}{r_o}\right)^2} \quad (3.8)$$

დენების მომქმედი მნიშვნელობების განსაზღვრისთვის, გვექნება (ნახ.3.1, ბ).

$$I^* = I_{\bar{\delta}}^* + I_{\Phi\delta}^*, \quad (3.9)$$

სადაც $I_{\bar{\delta}}^* = \frac{\bar{U}^*}{R_{\bar{\delta}}}$; $I_{\Phi\delta}^* = \frac{\bar{U}^*}{jX_{\delta}}$; $X_{\delta} = \omega L_{\delta}$

დენი იწვევს სადენში ძაბვის ვარდნას (ნახ. 3.1, ვ):

$$\bar{U}^* = \Delta Z I^* = (\Delta R_{\bar{\delta}} + j\Delta X_{\delta}) I^*, \quad (3.10)$$

სადაც $\Delta Z = \frac{jX_{\delta}R_{\bar{\delta}}}{R_{\bar{\delta}} + jX_{\delta}} = \Delta R_{\bar{\delta}} + j\Delta X_{\delta} = |\Delta Z| e^{j\varphi_{\delta}}$,

$$\Delta R_{\bar{\delta}} = \frac{R_{\bar{\delta}}X_{\delta}^2}{R_{\bar{\delta}}^2 + X_{\delta}^2},$$

$$\Delta X_{\delta} = \frac{X_{\delta}R_{\bar{\delta}}^2}{R_{\bar{\delta}}^2 + X_{\delta}^2},$$

$$\varphi_{\delta} = \arctg \frac{\Delta X_{\delta}}{\Delta R_{\bar{\delta}}},$$

$$|\Delta Z| = \frac{R_{\bar{\delta}}X_{\delta}}{\sqrt{R_{\bar{\delta}}^2 + X_{\delta}^2}}.$$

სრული დენის მდგენელებისთვის გვექნება:

$$I_{\bar{\delta}} = \frac{\Delta Z}{R_{\bar{\delta}}} I = \frac{X_{\delta}}{\sqrt{R_{\bar{\delta}}^2 + X_{\delta}^2}} I, \quad (3.11)$$

$$I_{\Phi\delta} = \frac{\Delta Z}{X_{\delta}} I = \frac{R_{\bar{\delta}}}{\sqrt{R_{\bar{\delta}}^2 + X_{\delta}^2}} I, \quad (3.12)$$

ფარდობითი ფართი სადენის დენით შევსებამდე ტოლია:

$$s^* = \frac{\lambda}{r_o} \left(2 - \frac{\lambda}{r_o} \right) = \frac{\lambda_o}{r_o \sqrt{1 - \gamma_o^*}} \left(2 - \frac{\lambda_o}{r_o \sqrt{1 - \gamma_o^*}} \right) \quad (3.13)$$

$0 < I_{\bar{\delta}}^* < I_{\bar{\delta}}^{*შევს.}$, სადენის დენით შევსების შემდეგ $s^* = 1$

ΔR წინააღობაში აქტიური დანაკარგების განსაზღვრისათვის გვექნება

$$\Delta P = I_{\bar{\delta}}^2 R_{\bar{\delta}} = I^2 \Delta R = \frac{R_{\bar{\delta}} X_{\delta}^2}{R_{\bar{\delta}}^2 + X_{\delta}^2} I^2 \quad (3.14)$$

სადენის კვეთის დენით შევსებით, კინეტიკური ინდუქციური წინააღობა

იზრდება უსასრულოდამდე, დენი აღწევს კრიტიკულ მნიშვნელობას:

$$I = I_{\delta} = I_{\bar{\delta}}; I_{\Phi\delta} = 0; \Delta P = R_{\bar{\delta}} I^2 \quad (3.15)$$

სადენი სრულად გადადის ნორმალურ მდგომარეობაში.

კრიოტრონული გარდამქნელის ზეგამტარულ გრაგნილებში დანაკარგების განსაზღვრისათვის აუცილებელია ვიცოდეთ დანაკარგების ცალკეული სახეების სიდიდე სადენის ზგ ძარღვებში, გამოწვეული ძარღვების საკუთარი დენებით, სახელდობრ: ელექტრული დანაკარგები ძარღვის დენისგან გამოწვეული; გრიგალური და ჰისტერეზისული დანაკარგები მაგნიტური ველის მიერ გამოწვეული, შექმნილი ძარღვების დენების მიერ; ელექტრული დანაკარგები ზგ სადენის მატრიცაში, მატრიცის დენისგან გამოწვეული; გრიგალური დანაკარგები მატრიცაში ძარღვების მაგნიტური ველისგან გამოწვეული.

დაუშვათ, რომ ზგ ძარღვში გადის სინუსოიდური დენი

$$i = I_{\theta} \sin \omega t,$$

სადაც I_{θ} მაქსიმალური დენის მნიშვნელობა ზგ ძარღვებში

ω – კუთხური სიხშირე, $\omega = 314$ რ/წმ.

i დენი შეიძლება წარმოვიდგინოთ შემდეგი სახით:

$$i = I_{\theta}^* I_{\theta} \sin \omega t,$$

სადაც i - დენის მყისი მნიშვნელობა, ზგ ძარღვში

$$I_{\theta}^* = \frac{I_{\theta}}{I_{\theta}}; 0 < I_{\theta}^* < 1,$$

სადაც I_{θ}^* - მაქსიმალური დენის ფარდობითი მნიშვნელობა.

როცა $I_{\theta}^* = 1$ ძარღვი გადადის ნორმალურ მდგომარეობაში, იკარგება ზეგამტარობა. ძარღვების დენი მის ზედაპირზე ქმნის ველს

$$B_{od} = \mu_0 \frac{i}{\pi d_{\theta}},$$

სადაც d_{θ} – ზგ ძარღვის დიამეტრი, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ ჰ/მ

B_{od} მაგნიტური ინდუქციის მნიშვნელობას, I_{θ} კრიტიკული დენის საშუალებით ექნება შემდეგი სახე:

$$B_{od} = \mu_0 \frac{I_{\theta}^* I_m}{\pi d_{\theta}} \sin \omega t$$

მაგნიტური ინდუქციის კრიტიკული მნიშვნელობა

$$B_{\theta} = \mu_0 \frac{I_{\theta}}{\pi d_{\theta}},$$

*

შესაბამისად $B_{o\partial} = B_j I_{\partial} \sin \omega t$

მაქსიმალური მაგნიტური ინდუქციის ფარდობითი მნიშვნელობა:

$$*_{B_{o\partial}} = \frac{B_{o\partial}}{B_j} = *_{I_{\partial}}$$

თუ სადენი შეიცავს N ზგ ძარღვს, მაშინ მაგნიტური ინდუქცია სადენის ზედაპირზე

$$B_b = \mu_o \frac{N \cdot i}{\pi D_b},$$

სადაც D_b - სადენის დიამეტრი.

თუ სადენი შესრულებულია მჭიდროდ შევსებული ზგ ძარღვებით, მაშინ

$$D_{\partial} \cong \sqrt{N} d_{\partial}$$

ამ შემთხვევაში სადენის ზედაპირზე მაგნიტური ინდუქცია

$$B_b = \mu_o \frac{N \cdot i}{\pi \sqrt{N} d_{\partial}} = B_{o\partial} \sqrt{N},$$

ე.ი. B_b აჭარბებს $B_{o\partial}$ სიდიდეს \sqrt{N} -ჯერ, და როცა $B_b = B_j$ დენგამტარუნარიანობა სადენის მცირდება \sqrt{N} -ჯერ, შედარებით ერთი ძარღვის დენგამტარუნარიანობასთან.

სადენის B_b ინდუქციის შენარჩუნებისთვის ერთი ძარღვის $B_{o\partial}$ დონეზე აუცილებელია:

- გაიზარდოს სადენის დიამეტრი \sqrt{N} -ჯერ, ზგ ძარღვების რიცხვის შენარჩუნებით და მათი თანაბარი განლაგებით სადენის კვეთის მიხედვით; მაშინ სადენის დენგამტარუნარიანობა იქნება გაზრდილი \sqrt{N} -ჯერ.
- შემცირდეს \sqrt{N} -ჯერ, ზგ ძარღვის რიცხვი სადენში, მისი დიამეტრის შენარჩუნების დროს; დენგამტარუნარიანობა ამ შემთხვევაში არ იქნება შეცვლილი, მაგრამ ზგ ძარღვის მოცულობა სადენში შემცირდება \sqrt{N} -ჯერ. ორივე შემთხვევაში, ყველა ზგ ძარღვები სადენში იმყოფება საკუთარ მაგნიტურ ველში.

ამასთან დაკავშირებით, დანაკარგების განსაზღვრის დროს, ვგულისხმობთ, რომ ზგ სადენი თავისუფალია გარე მაგნიტური ველებისაგან.

ელექტრული დანაკარგები ზეგამტარის ΔR წინააღობაში

$$\Delta P_{\text{ელ.ზგ.}} = I^2 \Delta R = \frac{1}{2} I_{\theta}^{*2} I_3^2 \Delta R, \text{ რადგან } I = \frac{I_{\theta}^*}{\sqrt{2}}$$

აქტიური ΔR წინააღობისთვის გვექნება:

$$\Delta R = \frac{X_3^2}{R_{\text{გ}}^2 + X_3^2} R_{\text{გ}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{R_{\text{გ}}}{X_3}\right)^2} R_{\text{გ}}$$

სადაც $R_{\text{გ}}$ - წინააღობა, რომელიც ზღუდავს დენს, შექმნილი ნორმალური ელექტრონების მოძრაობით.

$$R_{\text{გ}} = \frac{1}{I_{\theta}^* \gamma_0} R_{\text{გ}0}$$

$$R_{\text{გ}0} = \frac{\ell}{s} \rho_{\text{გ}0},$$

სადაც $R_{\text{გ}0}$ - გრაგნილის წინააღობა ნორმალურ მდგომარეობაში, როცა $I_{\theta}^* \gamma_0 = 1$; $\rho_{\text{გ}0}$ - ზეგამტარის ხვდრითი წინააღობა ნორმალურ მდგომარეობაში.

კინეტიკური ინდუქციური წინააღობა X_3 , რომელიც ზღუდავს ზეგამტარულ დენს ტოლია

$$X_3 = X_{30} \frac{1}{1 - I_{\theta}^* \gamma_0}$$

$$X_{30} = \ell_{30} \frac{\ell}{s}$$

სადაც X_{30} -გრაგნილის კინეტიკური ინდუქციური წინააღობა, როცა $I_{\theta}^* \gamma_0 = 0$

ΔR -ის რიცხობრივი შეფასება, როცა $\rho_{\text{გ}0} = 4 \cdot 10^{-7}$ ომი. მ, $\ell_{30} = 10^{-22}$

ომი, მ, როცა $I_{\theta}^* \gamma_0 = 0,5$, $\Delta R = 10^{-22} R_{\text{გ}0}$, ე.ი. ელექტრული დანაკარგები

მეტად მცირეა და ისინი მხედველობაში არ მიიღება.

გრიგალური დანაკარგების განსაზღვრისთვის, განვიხილოთ ელემენტარული dx ფენა, რომელიც იმყოფება x მანძილზე ზგ ძარღვის

ზედაპირიდან. ეს ელემენტარული dx ფენა შებმულია ϕ_x მაგნიტურ ნაკადთან

$$\phi_x = \ell B_o X = \ell B_j B_o^* X = \ell_{I_\theta}^* I_j X$$

$$\text{სადაც } B_o^* = \frac{B_o}{B_j}$$

მაგნიტური ნაკადი წარმოიქმნება ზეგამტარული დენის მდგენელით. დაუშვათ, რომ მაგნიტური ინდუქცია სადენის შიგნით ინარჩუნებს თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას $B_{o\theta}$ სადაც $-B_{o\theta}$ მაგნიტური ინდუქცია სადენის ზედაპირზე. ე.მ.ძ-ის მაქსიმალური მნიშვნელობა, წარმოქმნილი მაგნიტური ნაკადის ცვლილებით, ტოლია

$$E_\theta = \omega \ell x I_\theta I_j^*$$

R_x წინაღობა ელემენტარული dx ფენის ტოლია

$$R_x = \rho_\theta \frac{\ell}{S_x}$$

სადაც S_x -განივი კვეთის ფართი, $S_x = 2\pi(r-x)dx$ ელემენტარულ dx ფენაში დანაკარგები დამოკიდებულია მაგნიტური ველის შეღწევადობის სიღრმეზე λ და ტოლია:

$$\Delta P_x = \frac{E_\theta^2 x}{R_x} = \frac{\omega^2}{\rho_\theta} 2\pi \ell x^2 (r-x)_{I_\theta}^{*2} I_j^2 dx$$

გრიგალური დანაკარგების განსაზღვრისთვის აუცილებელია გაინტეგრირება ΔP_x , როცა x იცვლება 0-დან λ -მდე:

$$\Delta P_{\text{გრიგ.}} = \frac{1}{2} \int_0^\lambda \Delta P_x dx = \frac{1}{2} \int_0^\lambda \frac{\omega^2}{\rho_\theta} 2\pi \ell_{I_\theta}^{*2} I_j^2 X^2 (r-x) dx$$

გაინტეგრირებისას, მივიღებთ:

$$\Delta P_{\text{გრიგ.}} = \frac{\omega^2}{3\rho_\theta} I_\theta^{*2} I_j^2 \ell r \lambda^3 \left(1 - \frac{3}{4} \cdot \frac{\lambda}{r}\right) \pi$$

ჩავსვათ ρ_θ და λ -ის მნიშვნელობები

$$\rho_\theta = \frac{\rho_{\theta 0}}{\gamma_\theta^*}, \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \gamma_\theta^*}}$$

გრიგალური დანაკარგებისთვის მივიღებთ გამოსახულებას

$$\Delta P_{გრიგ.} = \frac{1}{3} \frac{\omega^2}{\rho_{60}} \ell r \pi I_{\theta}^{*2} I_{\beta}^2 \lambda^3 \frac{1}{(1 - I_{\theta}^{*r0})^{\frac{3}{2}}} \left(1 - \frac{3}{4} \frac{\lambda_0}{r \sqrt{1 - I_{\theta}^{*r0}}} \right)$$

I_{θ}^{*2} -ის გაზრდით დანაკარგები იზრდება, როცა $I_{\theta}^{*2} = I_{აშვს.}^* \approx 1, \lambda = r$

მიიღწევა მაქსიმალური მნიშვნელობა.

$$\Delta P_{გრიგ.დ.} = \frac{\omega^2}{3\rho_{60}} I_{\beta}^2 \ell r \pi \frac{1}{4}$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ ზგ ძარღვის მოცულობა $V = \pi r^2 \ell$, მაშინ

$$\Delta P_{გრიგ.დ} = \frac{1}{12\rho_6} \omega^2 r^2 V I_{\beta}^2$$

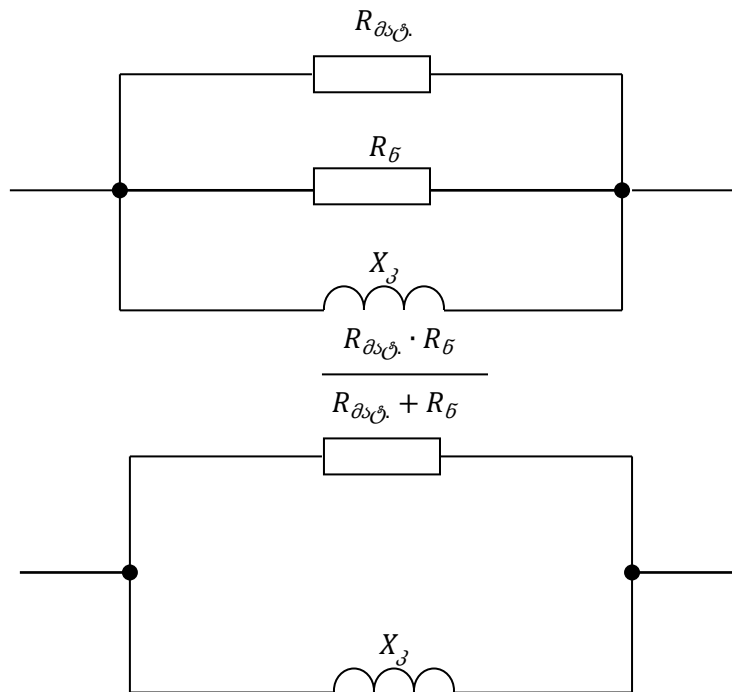
მატრიცაში გრიგალური დანაკარგებისთვის ანალოგიურად, შეიძლება მივიღოთ გამოსახულება

$$\Delta P_{გრიგ.მატ.} = \frac{\omega^2}{3\rho_{მატ.}} I_{\beta}^{*2} \ell b^4 \pi \frac{1}{4},$$

სადაც $\rho_{მატ.}$ - მატრიცის ხვედრითი წინალობა; b - მატრიცის სიგანე; ℓ - ძარღვის სიგრძე; λ - მაგნიტური ველის შეღწევის სიღრმე; r_{θ} ზეგამტარული ძარღვის რადიუსი.

მატრიცაში გრიგალური დანაკარგების გარდა, მიღებულია შეფასდეს ზგ ძარღვის წინალობის გავლენით ელექტრული დანაკარგები. მატრიცის წინალობა $R_{მატ.}$ შეერთებულია პარალელურად R_{β} წინალობასთან (ნახ.3.2) $R_{მატ.}, R_{\beta}$ წინალობების შეცვლით ერთი ეკვივალენტური წინალობით $R_{კვვ.}$, მივიღებთ წრედს, რომელშიც კინეტიკური ინდუქციური წინალობა X_{β} შეერთებულია პარალელურად ეკვივალენტური წინალობასთან

$$R_{კვვ.} = \frac{R_{\beta} \cdot R_{მატ.}}{R_{\beta} + R_{მატ.}},$$



ნახ. 3.2. მატრიცის წინაღობის გავლენის განსაზღვრა დანაკარგებზე

რაც ახდენს გავლენას ΔR წინააღობაზე, რომელიც განისაზღვრება გამოსახულებით

$$\Delta R = \frac{R_{გატ.} X_{\zeta}^2}{R_{გატ.} + X_{\zeta}^2}$$

ჰისტერეზისული დანაკარგები $\Delta P_{ჰისტ.}$ გამოწვეული საკუთარი მაგნიტური ველით განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით [20,21]:

$$\Delta P_{ჰისტ.} = \frac{\mu_0}{\pi} I_{\zeta}^2 \ell f \frac{1}{6} \left(\frac{\Delta I}{2I_{\zeta}} \right)^3$$

ვითვალისწინებთ, რა

$$\frac{\Delta I}{2I_{\zeta}} = \frac{2I_{\theta}}{2I_{\zeta}} = I_{\theta}^*$$

მივიღებთ:

$$\Delta P_{ჰისტ.} = \frac{\mu_0}{6\pi} f \ell I_{\zeta}^2 I_{\theta}^{*3}$$

გამოსახულება მიღებულია იმ შემთხვევისათვის, როცა კრიტიკული დენის სიმკვრივე I_j არაა დამოკიდებული B_0 მაგნიტურ ველზე. გამოვსახოთ კრიტიკული დენი I_j მისი სიმკვრივის j_j -ის საშუალებით:

$$I_j = \pi r^2 j_j$$

და გავითვალისწინოთ, რომ ზეგამტარის მოცულობა

$$V = \pi r^2 \ell,$$

მაშინ ჰისტერეზისული დანაკარგებისთვის გამოსახულებას ექნება შემდეგი სახე:

$$\Delta P_{ჰისტ.} = \frac{\mu_0}{6\pi} f \ell (\pi r^2)^2 j_j^2 \frac{*3}{I_\theta} = \frac{\mu_0}{6\pi} f \pi r^2 j_j^2 \frac{*3}{I_\theta} V,$$

$$\Delta P_{ჰისტ.} = \frac{1}{6} \mu_0 f r^2 j_j^2 V \frac{*3}{I_\theta}$$

ჰისტერეზისული დანაკარგები ერთეულ მოცულობაში გამოითვლება ფორმულით

$$\frac{\Delta P_{ჰისტ.}}{V} = \frac{1}{24} \mu_0 f d_j^2 j_j^2 \frac{*3}{I_\theta}$$

სრული დანაკარგები ერთ ზეგატარულ ძარღვში ტოლია:

$$\Delta P_\theta = \Delta P_{ელ.ზგ.} + \Delta P_{ელ.მატ.} + \Delta P_{გრიგ.მატ.} + \Delta P_{გრიგ.ზგ.} + \Delta P_{ჰისტ.ზგ.}$$

3.2. მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში

იმ შემთხვევაში, როცა საჭიროა შეიქმნას ძლიერი მაგნიტური ველი ან გავზარდოთ სადენების დენგამტარუნარიანობა ე.ი. დავამზადოთ მძლავრი ელექტრომოწყობილობები, ჩვენს შემთხვევაში კრიოტრონული გარდამქმნელები, გამოიყენება მრავალძარღვიანო ზეგამტარული სადენები (მძზგს).

მძზგს შედგება ზეგამტარული ძარღვების სიმრავლისგან, რომლის დიამეტრი, მნიშვნელოვნად ნაკლებია ზეგამტარული სადენების დიამეტრზე.

მძზგს მუშაობის პირობა არსებითად განსხვავდება ერთძარღვიანი ზგ სადენის მუშაობის პირობისაგან. ზგ ძარღვი მძზგს-ში იმყოფება მძზგს-ის სხვა ძარღვების გარე მაგნიტურ ველში.

გარდა ამისა გარე მაგნიტური ველი ზგ ძარღვის შეიქმნება, აგრეთვე ზგ ძარღვებით, შემავალი ზეგამტარული გრაგნილების სხვა მძზგს-ში.

ზგ ძარღვის ჯამური მაგნიტური ველი \bar{B}_o ხასიათდება ზგ ძარღვის ზედაპირზე მაგნიტური ინდუქციის ორი მდგენელით: მაგნიტური ინდუქციის განივი მდგენელი $\bar{B}_{o\perp}$ და პარალელური მდგენელი - $\bar{B}_{o\parallel}$

$$\bar{B}_o = \bar{B}_{o\perp} + \bar{B}_{o\parallel} \quad (3.16)$$

მაგნიტური ველი ზგ ძარღვებში აღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას

$$B_{o\perp} = \mu_o \frac{I}{\pi D}, \quad (3.17)$$

სადაც I ზგ სადენის დენი; D - ზგ სადენის დიამეტრი. თუ ზგ სადენში მოთავსებულია ძარღვები d დიამეტრით, შევსების კოეფიციენტი $K_{შევს.} = 1$, ძარღვების რიცხვი N ტოლია,

$$N \cong \left(\frac{D}{d}\right)^2 \quad (3.18)$$

ზგ ძარღვში, როცა $i_o = i_j$, ზგ სადენში $I = I_j$ და ინდუქცია $B_{o\perp} = B_j$,

(3.17) განტლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$B_j = \mu_o \left(\frac{D}{d}\right)^2 \frac{i_{o\perp}^{შერ.}}{\pi D} K_{შევს.}, \quad (3.19)$$

სადაც $i_{o\perp}^{შერ.}$ -კრიტიკული დენი ზგ პერიფერიული ძარღვის ზგ სადენში.

(3.19) განტოლებიდან ძარღვის კრიტიკული დენისთვის მივიღებთ:

$$i_{o\perp}^{შერ.} = \frac{\pi D B_j}{\mu_o K_{შევს.} \left(\frac{D}{d}\right)^2} = i_{o\perp}^{განმბ.} \left(\frac{d}{DK_{შევს.}}\right), \quad (3.20)$$

სადაც $i_{o\perp}^{განმბ.}$ -ზგ სადენში განმხოლოებული ძარღვის კრიტიკული დენი.

$$i_{d.კ.}^{განმბ.} = \frac{\pi}{\mu_0} d_{\rho} B_{\rho}$$

როგორც (3.20) განტოლებიდან ჩანს, გარე ზგ მარღვის კრიტიკული დენი $\frac{d}{DK_{შევს.}}$ ჯერ ნაკლებია განმხოლოებლი მარღვის კრიტიკული დენის მნიშვნელობაზე.

$$I_{\rho} - \left(\frac{1}{K_{შევს.}} i_{d.კ.}^{განმბ.} \frac{d}{D} \right) \left(\frac{D}{d} \right)^2 K_{შევს.} = \frac{D}{d} i_{d.კ.}^{განმბ.} \quad (3.21)$$

(3.21) განტოლება გვიჩვენებს, რომ კრიტიკული დენი I_{ρ} იზრდება $\left(\frac{D}{d}\right)$ -ის პროპორციულად. დენგამტარუნარიანობა ზგ სადენის იზრდება $\frac{D}{d}$ -ჯერ ან \sqrt{N} .

ზგ სადენის დენის საშუალო სიმკვრივის შემცირება და ზეგამტარის მოცულობის გაზრდა იწვევს ზეგამტარულ გრაგნილში დანაკარგების გაზრდას. ზეგამტარულ კრიოტრონულ გარდამქნელებში გრაგნილების დანაკარგების შემცირებისთვის და დენგამტარუნარიანობის გაზრდისთვის გამოიყენება დაგრეხილი მრავალმარღვა ზეგამტარული სადენები.

გარე მაგნიტური ველი დააინდუქცირებს დენებს ზეგამტარულ მარღვებში, ქმნის ცვლად მაგნიტურ ველს და დანაკარგებს, როგორც სადენის თვით ზგ მარღვებში, ისე მის მატრიცაში. დაინდუქცირებული ე.მ.მ. მრავალმარღვა ზგ სადენში დაგრეხილი მარღვებით განისაზღვრება ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონის თანახმად წარმოქმნილი კონტურში არაერთგვაროვანი სტრუქტურით, შემდგარი ნორმალური მეტალის მატრიცისაგან და ზგ ძაფებისაგან.

დაგრეხილი სადენებში, მახვა ორი ზგ მარღვებს შორის პერიოდულად იცვლის ნიშანს, რაც ძლიერი ხარისხით ზღუდავს დენებს ზეგამტარული სადენის მატრიცაში.

დენგამტარუნარიანობის და დანაკარგების დამოკიდებულება დაგრეხვის ბიჯისგან გრძივი და განივი მაგნიტურ ველებში გამოკვლეულია შრომებში [22-24].

3.3. მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენი ლოკალიზებული მაგნიტური ველით

ლოკალიზებული მაგნიტური ველით, მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენებში მაღალი დენგამტარუნარიანობა შერწყმულია დანაკარგების დაბალ დონესთან. ისინი ხასიათდება დაბალი ინდუქციურობით და მაღალი ეფექტურობით.

იმასთან დაკავშირებით, რომ ზეგამტარული კრიოტრონული გარდამქნელების გრაგნილების წინაშე დგას ამოცანა დანაკარგების შემცირებისა და დენგამტარუნარიანობის გაზრდისა, აგრეთვე ინდუქციურობისა და გარე მაგნიტური ველების შემცირებისა, მძვინვარების საშუალებით შესაძლებელი ხდება გრაგნილის სადენების თითოეული ზგ ძარღვის კრიტიკული დენის მიყვანა მაქსიმალურ სიდიდემდე. ზეგამტარული სადენის შევსების კოეფიციენტის შერჩევით და

$$K_{შვს.} = \frac{d}{D}; N = \frac{D}{d} \quad (3.22)$$

(3.22) პირობის გათვალისწინებით (3.20) განტოლების შესაბამისად მივიღებთ

$$i_{d,კ}^{შვრ.} = i_{d,კ}^{განმბ.} \quad (3.23)$$

ე.ი. კრიტიკული დენი პერიფერიული ძარღვის იზრდება განმხოლოებული ძარღვის კრიტიკული დენამდე. (3.21) განტოლების თანახმად კრიტიკული დენისთვის, (3.22) პირობის გათვალისწინებით, მივიღებთ

$$I_{კ} = i_{d,კ}^{განმბ.} \left(\frac{D}{d} \right) \quad (3.24)$$

იმასთან დაკავშირებით, რომ ზეგამტარული ძარღვები იმყოფებიან საკუთარ ლოკალიზებულ მაგნიტურ ველებში, ლოკალიზებული მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენი არ საჭიროებს დაგრეხვას და ტრანსპორმაციას. დანაკარგები ლოკალიზებული მრავალძარღვიანი

ზეგამტარული სადენებში განისაზღვრება ცალკეული ზეგამტარული მარღვების ჯამური დანაკარგებით.

$$\Delta P_N = N \Delta P_{\rho}, \text{ სადაც } N = \frac{D}{d}$$

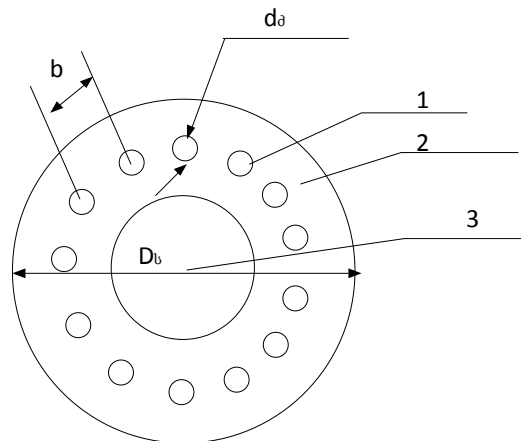
ნახ.3.3 ნაჩვენებია წრიული კვეთის ზეგამტარული სადენი განივი კვეთის ჭრილში, ცვლადი დენისთვის, ერთფენიანი კონსტრუქციის ლოკალიზებული მაგნიტური ველით [25].

ზეგამტარული მარღვები-1 განლაგებულია ერთ ფენად საშუალო დიამეტრის მიხედვით, ცილინდრული მილის განივი კვეთში -2 სტაბილიზირებული მასალისაგან დამზადებული. ზეგამტარული სადენის ცენტრალური არხი 3-ის დანიშნულებაა გაატაროს გამაცივებელი აგენტი (თხევადი აზოტი).

მანძილი მეზობელი ზეგამტარული მარღვების გრძივი ღერძებს შორის b განისაზღვრება თანაფარდობით:

$$b = \pi d_{\rho}$$

სადაც d_{ρ} - ზეგამტარული მარღვების დიამეტრი.



ნახ. 3.3. ერთფენიანი ლოკალიზებული მრავალმარღვიანი ზეგამტარული სადენი

ზეგამტარული მარღვების რიცხვი N_{ρ} სადენში:

$$N_{\rho} = \frac{\pi D_b}{b} = \frac{D_b}{d_{\rho}}, \quad (3.25)$$

სადაც D_b - ზეგამტარული სადენის დიამეტრი.

ზეგამტარული სადენის ზედაპირზე მაგნიტური ინდუქცია

$$B_b = \mu_o \frac{N_{\sigma} i_{\sigma}}{\pi D_b}, \quad (3.26)$$

სადაც: i_{σ} ზეგამტარული ძარღვების დენი.

ჩავსვათ N_{σ} -ის მნიშვნელობა (3.25) და (3.26) ფორმულებიდან, მივიღებთ

$$B_b = \mu_o \frac{i_{\sigma}}{\pi d_{\sigma}}$$

ზეგამტარულ სადენში მაგნიტური ინდუქციის B_b და ზეგამტარულ ძაფებში მაგნიტური ინდუქციის B_{σ} ტოლობის პირობებში, კრიტიკული ინდუქციისთვის B_j მივიღებთ

$$B_b = B_{\sigma} = B_j$$

$$i_{\sigma} = \frac{B_j}{\mu_o} \pi d_{\sigma}$$

ე.ი. კრიტიკული დენი ზეგამტარულ ძარღვების სადენში ტოლია გაერთიანებული ძარღვების კრიტიკული დენის.

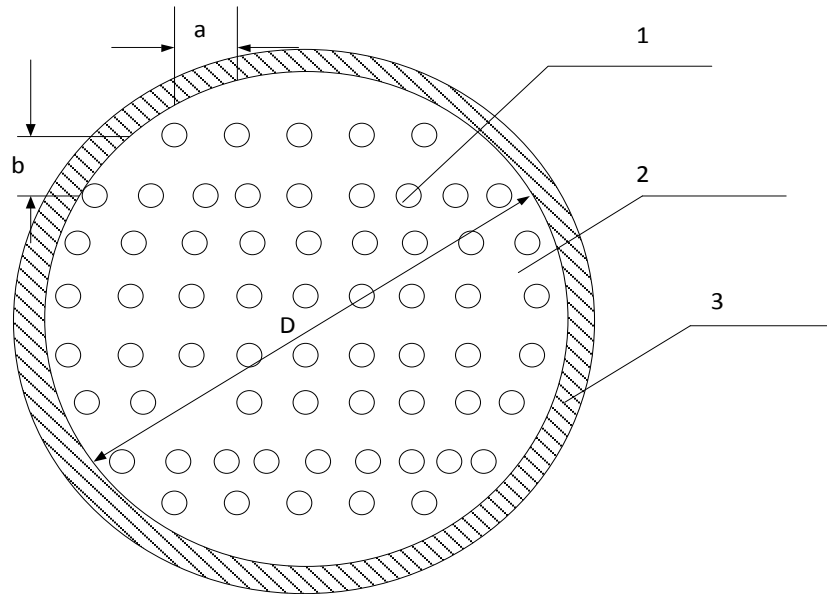
ყველა ზეგამტარული ძარღვები მრავალძარღვიან ზეგამტარულ სადენში იმყოფება ლოკალიზებულ საკუთარ მაგნიტურ ველში, რომელიც ტოლია გაერთიანებული ზეგამტარული ძარღვების მაგნიტური ველის.

აღნიშნულ შემთხვევაში კრიტიკული დენი I_j ლმძზგ სადენისთვის ტოლია კრიტიკული დენის მძზგ სადენისთვის მისი კვეთის ზეგამტარული ძარღვებით მჭიდრო შევსების შემთხვევაში

$$I_j = N_{\sigma} i_{\sigma} = \frac{D_b B_j}{d_{\sigma} \mu_o} \pi d_{\sigma} = \frac{\pi D_b B_j}{\mu_o}$$

ლმძზგ სადენში ზეგამტარული ძარღვების რაოდენობა π -ჯერ ნაკლებია ჩვეულებრივ მრავალძარღვა ზეგამტარული სადენში ძარღვების რიცხვის, მისი კვეთის მჭიდრო შევსების შემთხვევაში. აღნიშნულ შემთხვევაში ზეგამტარული სადენის დენგამტარუნარიანობა შენარჩუნებულია. ზეგამტარული მასალების რაოდენობა მცირდება სამჯერ მეტად, რაც არსებით გავლენას ახდენს მოწყობილობის ტექნიკურ-ეკონომიკურ მაჩვენებელზე.

ცვლადი დენების წრიული კვეთის ზეგამტარული მრავალძარღვიანი სადენი შეიცავს ზეგამტარულ ძარღვებს-1, მოთავსებული მატრიცაში-2, სადენის მთლიან კვეთში, დაშორებული ერთმანეთის მიმართ b მანძილით. 3-სადენის გარე იზოლირებული გარსი (ნახ.3.4)



ნახ.3.4. მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენი ლოკალიზებული მაგნიტური ველით

$$b = \sqrt{d_s D} = t d_s$$

$$t = \frac{b}{d_s}$$

სადაც: d_s - ზეგამტარული ძარღვების დიამეტრი

D - ზეგამტარული სადენის დიამეტრი

t - ზეგამტარული ძარღვების განლაგების ბიჯი

სადენში ზეგამტარული ძარღვების რიცხვი განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$N \cong \left(\frac{D}{b}\right)^2 = \left(\frac{D}{\sqrt{d_s D}}\right)^2 = \frac{D}{d_s}$$

ლმძზ სადენი ზედაპირზე მაგნიტური ინდუქციის სიდიდე:

$$B_o \frac{Ni_d}{\pi D} = \frac{D}{d_d} \frac{i_d}{\pi D}$$

რადგანაც $i_d = B_j \pi d_d$, მაშინ მისი ჩასმით B_o გამოსახულებაში, მივიღებთ:

$$B_o = B_d = B_j$$

ე.ი. მაგნიტური ინდუქციის სიდიდე ლოკალიზებული მრავალძარღვა ზეგამტარული სადენის ზედაპირზე ტოლია გაერთიანებული ზეგამტარული ძარღვების მაგნიტური ინდუქციის.

ასეთ ზეგამტარულ სადენში თითოეული ცალკე აღებული ზეგამტარული ძარღვი იმყოფება საკუთარ მაგნიტურ ველში, შექმნილი ძარღვების დენებით. კრიტიკული დენი ასეთი ზეგამტარული ძარღვების ტოლია გაერთიანებული ძარღვების კრიტიკული დენის.

კრიტიკული დენი I_j ლმმზგ სადენის, როცა შევსების კოეფიციენტი

$$K_g = \frac{d_d}{D}$$

ტოლია :

$$I_j = Ni_{d_j} = \frac{D}{\mu_o d_d} B_j \pi d_d = \frac{\pi D B_j}{\mu_o}$$

მიღებული კრიტიკული დენის, მნიშვნელობა ტოლია ჩვეულებრივი მრავალძარღვა ზეგამტარული სადენის კრიტიკული დენის მნიშვნელობისა მისი კვეთის მჭიდროდ შევსებით ზეგამტარული ძარღვებით ე.ი. როცა $K_g = 1$.

ძარღვების რიცხვი ლოკალიზებულ მრავალძარღვა ზეგამტარულ სადენში მცირდება შედარებით ჩვეულებრივი მრავალძარღვა ზეგამტარულ სადენთან $\frac{D}{d_d}$ -ჯერ, რაც შესაბამისად ამცირებს ზეგამტარული მასალის ხარჯს და აუმჯობესებს მოწყობილობის ტექნიკურ ეკონომიკურ მაჩვენებლებს.

მეორე თავის ბოლოს შეიძლება ასეთი დასკვნა გავაკეთოდ:

ზგ სადენების გამტარუნარიანობის გაზრდისათვის და მასში დანაკარგების შემცირებისათვის ზგ სადენი სრულდება მრავალძარღვიანი. იმასთან დაკავშირებით, რომ სადენის ზგ ძარღვი

მგრძობიარეა გარე მაგნიტური ველის მიმართ, მათი დენგამტარუნარიანობა მრავალძარღვიანი ზგ სადენში მნიშვნელოვნად მცირდება ძარღვების რიცხვის გაზრდით და მათ შორის მანძილის შემცირების დროს. ზგ სადენის და ზგ ძარღვის მოცემული დიამეტრის დროს სადენში ძარღვების შემცირებით, მანძილი მათ შორის იზრდება, მაგნიტური ურთიერთქმედება ძარღვებს შორის სუსტდება და დენგამტარუნარიანობა ზგ ძარღვის იზრდება. ზგ ძარღვის რაოდენობის ოპტიმალური მნიშვნელობა წრიული კვეთის ზგ მრავალძარღვა სადენში: $N_{\sigma} = \frac{D_b}{d_{\sigma}}$, აღნიშნული რაოდენობა ზგ ძარღვების შეესაბამება ზგ სადენის შევსების კოეფიციენტს: $K_{შვს} = \frac{d_{\sigma}}{D_b}$.

ასეთი გეომეტრიული თანაფარდობის დროს, თითოეული ზგ ძარღვი, ზგ სადენში პრაქტიკულად იმყოფება საკუთარ მაგნიტურ ველში, რომელიც ლოკალიზებულია მის ირგვლივ. ასეთი ლოკალიზებული მრავალძარღვიანი ზგამტარული სადენები, შეიძლება გამოყენებული იქნეს ენერგეტიკული დანიშნულების მოწყობილობების ძალოვან გრაგნილებში,

მრავალძარღვა ზგამტარული სადენის, ლოკალიზებული მაგნიტური ველის გამოყენების დროს, მცირდება სადენის ინდუქციურობა, ინდუქციური წინაღობა და ინდუქციური ძაბვის ვარდნა. გრაგნილებში ზგამტარული მასალის ხარჯი მცირდება $\frac{D_b}{d_{\sigma}}$ -ჯერ.

3.4. უსაფრთხოების სპეციალური საკითხები

კრიოგენული სისტემებში გამოიყენება თხევადი აზოტი (დუდილის ტემპერატურა 77 კ) და თხევადი ჰელიუმი (4,2 კ), თხევადი ჟანგბადი (90,2 კ), თხევადი წყალბადი (20,3 კ). კრიოგენული პროდუქტებთან მუშაობის დროს ძირითადი საშიშროება:

- კრიოგენული პროდუქტების დაბალი ტემპერატურა
- კრიოგენული პროდუქტებთან კონტაქტის დროს მოყინვა.
- კრიოგენული საგნებთან და მოწყობილობებთან შეხების დროს ღია სხეულის და თვალის სიდამწვრე, ორთქლის ჩასუნთქვის დროს ფილტვების სიდამწვრე.
- კრიოგენული პროდუქტების შენახვისა და ტრანსპორტირების დროს წნევის შესაძლო ამაღლება, თერმული დეფორმირება, მეტალის სიმყიფის გაზრდა დაბალი ტემპერატურის დროს და მოწყობილობის დანგრევა აფეთქების შედეგად.

3.4.1. თხევადი კრიოგენული პროდუქტებთან მიმოქცევის

საერთო წესები

თხევადი კრიოგენული პროდუქტების აორთქლების დროს წარმოიქმნება დიდი რაოდენობის გაზი. დახურულ მოცულობაში თხევადი კრიოგენული პროდუქტების აორთქლების დროს იქმნება საშიშროება წნევის მნიშვნელოვანი გაზრდისა. წნევის გაზრდის სიჩქარე დამოკიდებულია თბომიმლების სიდიდეზე და სითხეზე გაზური ბალიშის მოცულობაზე. ასეთი მოვლენების გამორიცხვისათვის ყველა ჭურჭელზე, რომლებიც განკუთვნილია თხევადი კრიოგენული პროდუქტებისათვის, აუცილებლად აყენებენ დამცავი სარქველებს და გამწყვეტ მემბრანებს, არაკონტროლირებადი წნევის გაზრდის აღმოსაფხვრელად. ავზები, ჭურჭლები და ვანები შეიძლება შეივსოს და გამოყენებული იქნეს მხოლოდ ისეთი კრიოგენული პროდუქტებისათვის, რომლებისთვისაც ისინი დანიშნულია დამამზადებლისაგან, რაზედაც უნდა მოწმოდეს ჭურჭლის შეღებვა და მასზე წარწერა.

თხევადი კრიოგენული პროდუქტებთან მუშაობის დროს საჭიროა დიდი სიფრთხილე, არ დაუშვათ მათი გაშხეფა და ადუღება. შემთხვევითი

სხეულის მოხვედრა ვანაში და ჭურჭელში თხევადი კრიოგენული პროდუქტებთან უნდა იყოს სრულად გამორიცხული.

თხევადი კრიოგენული პროდუქტების გადასმა ერთი ჭურჭლიდან მეორეში და მათი შევსება სატრანსპორტო ავზებიდან უნდა მიმდინარეობდეს ბეტონის ფართობიდან. კრიოპროდუქტების გადასხმის ოპერაციის ჩატარება ასფალტის ფართობიდან, კატეგორიულად აკრძალულია. კრიოგენული სითხის გადასხმისთვის გამოყენებული მეტალის შლანგი გამოყენებული უნდა იქნეს მხოლოდ განსაზღვრული პროდუქტისათვის. შლანგების გამოყენება ჯერ ერთი კრიოგენული პროდუქტისათვის, ხოლო შემდეგ მეორე კრიოგენული პროდუქტისათვის არ დაიშვება.

შლანგები, რომლებიც არ გამოიყენება, მისი ბოლოები უნდა იყოს დახურული სახშობით, რათა აცილებული იქნეს მათი დაბინძურება და წყლის მოხვედრა. შლანგების მდგომარეობა რეგულარულად უნდა შემოწმდეს.

თხევადი კრიოგენული პროდუქტებთან მუშაობის დროს აუცილებელია თვალების დაცვა დამცავი სათვალეებით, რომლებსაც გააჩნია გვერდითი ფარები. ზედა ტანსაცმელი უნდა იყოს სუფთა, არ უნდა გააჩნდეს გარე ჯიბეები, ხოლო შარვალმა უნდა გადაფაროს ფეხსაცმელი.

საშიშია ხელით შეხება საგნებთან და ჭურჭლის კედლებთან, რომლებშიც მოთავსებულია თხევადი კრიოგენული პროდუქტები.

ამასთან დაკავშირებით კრიოგენული სითხის ჩასხმის, გადასხმის და გადატანის ოპერაციის დროს სამუშაო უნდა ჩატარდეს ტყავის ან ბრეზენტის ხელთათმანებით, რომლებიც ხელზე უნდა იქნეს ჩაცმული თავისუფლად, რათა აუცილებლობის შემთხვევაში ისინი შეიძლებოდეს თავისუფლად მოვიხსნათ.

კრიოგენული სითხის მოხვედრის შემთხვევაში სხეულის დაუცველ უბანზე, აუცილებელია სწრაფად მოვიბანოდ წყლით.

შენობაში სადაც მიმდინარეობს სამუშაოები თხევადი კრიოგენული პროდუქტებთან, უნდა იყოს ორგანიზებული კარგი ვენტილაცია და მარეგულირებელი კონტროლი ჰაერში ჟანგბადის შემადგენლობაზე. მხედველობაში უნდა იქნეს მიღებული, რომ ჟანგბადი და არგონი ოთახის ტემპერატურაზე მნიშვნელოვნად მძიმეა ჰაერზე. ამიტომ შენობაში აღნიშნული გაზების გაჟონვის შემთხვევაში შეიძლება მნიშვნელოვნად მაღალი იყოს მისი შემადგენლობა შენობაში. ამით აღინიშნება აუცილებლობა ჟანგბადის შემადგენლობის კონტროლი სამუშაოს დაწყების წინ.

სამუშაოს დამთავრების შემდეგ თხევადი კრიოგენული პროდუქტებთან ან გარკვეული დროით შესვენების დროს ჭურჭლები თხევადი კრიოპროდუქტებით შენობიდან აუცილებელია გავიტანოთ გარედ, ხოლო ღია ვანის ან კრიოპროდუქტის ჭურჭლიდან უნდა გადაიღვაროს. თუ რაღაც მიზეზის გამო ჭურჭელი კრიოპროდუქტებით დარჩა დახურულ შენობაში, პერსონალის შესვლა შეიძლება დაიშვას მხოლოდ შენობაში ჟანგბადის შემადგენლობის კონტროლის შემდეგ.

კატეგორიულად აკრძალულია გადმოისხას კრიოგენული სითხე შენობის იატაკზე, ვინაიდან მისი აორთქლება იწვევს მნიშვნელოვან დაბინძურებას შენობის ატმოსფეროს, აგრეთვე გადახურული შენობის გაცივებას, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს დაზიანება.

შენობაში თხევადი ჟანგბადის დაღვრამ შეიძლება გამოიწვიოს ხანძარი ან აფეთქება.

გამოუყენებელი თხევადი კრიოგენული პროდუქტი უნდა გადაიღვაროს სპეციალურ ჭურჭელში. მათი გადაღვრამ გრუნტზე შეიძლება გამოიწვიოს ძლიერი აფეთქება, რადგანაც კრიოგენული სითხეს თანდათან იწოვს გრუნტი და შეიძლება ჩააღწიოს მნიშვნელოვან სიღრმეზე, სადაც შეიძლება იყოს ცხელი სხეული.

თხევადი კრიოგენული პროდუქტები მიეკუთვნება საშიშ ტვირთს. კლასიფიკაცია მათი საშიშროების ხარისხის მიხედვით მოცემულია

სახელმწიფო სტანდარტში ГОСТ14433-81 „საშიში ტვირთები“, ხოლო მათი ტრანსპორტირების განსაკუთრებულობა რეგლამენტირებულია საავტომობილო ტრანსპორტით გადაზიდვა ინერტული გაზების და შეკუმშული და თხევადი ჟანგბადის [28].

3.4.2. თხევადი აზოტთან და ჰელიუმთან მიმართვის განსაკუთრებულობა

ძირითადი საშიშროება, რომელიც აღიძვრება თხევადი აზოტთან მიმართვის დროს, მდგომარეობს იმაში, რომ მისი აორთქლების დროს წარმოქმნილი გაზისმაგვარი აზოტის მოხვედრის დროს შენობაში ან სუნთქვის ზონაში, შეიძლება გამოიწვიოს ჰაერში ჟანგბადის კონცენტრაციის დადაბლება (19%-დან 14%-მდე) მნიშვნელობამდე, რომლის დროსაც პირველად გამოვლინდება მეტად შესამჩნევი ნიშანი, როგორცაა სისხლში ჟანგბადის შემადგენლობის შემცირება. სუნთქვა ხდება უფრო ღრმა, პულსი იზრდება, შეიმჩნევა სისუსტე და გონების დაკარგვა.

აქედან გამომდინარე, ძირითად პირობას უზრუნველყოთ უსაფრთხო მუშაობა თხევად აზოტთან და ჰელიუმთან, წარმოადგენს ვენტილაციის ორგანიზაცია და რეგულარული კონტროლი ჰაერში ჟანგბადის შემცველობისა, რომელიც უნდა იყოს არა ნაკლები 19%-ისა. იმ შემთხვევაში, თუ ჰაერში ჟანგბადის შემცველობა ნაკლებია 19%-ის, მაშინ შენობაში სამუშაო უნდა შეჩერდეს. განახლდეს მხოლოდ, მაშინ როცა ჰაერში ჟანგბადის შემცველობა იქნება 19%-ზე მეტი.

აუცილებელია შემოწმება გაზისმაგვარი ჟანგბადის შემადგენლობა. ზღვრული უსაფრთხო შემადგენლობა ჟანგბადის სითხეში, რომელიც გამოიყენება გაცივებისთვის, შეადგენს 30%.

3.4.3. ფეთქებადსაშიში მინარევების შემადგენლობის კონტროლი

სისტემატურად უნდა განისაზღვროს მინარევების შემადგენლობის კონტროლი. სისტემატურად უნდა განისაზღვროს ფეთქებადსაშიში მინარევების შემადგენლობა, რათა შეფასდეს გაწმენდის სამუშაოების ეფექტურობა, და არ დაუშვათ ხანგრძლივი მუშაობა არანორმალური მდგომარეობის, აგრეთვე დრეოულად დადგინდეს მოახლოება საშიში პერიოდის აგრეგატის მუშაობის დროს და მივიღოთ აუცილებელი ზომები. ანალიზური კონტროლის მოცულობა, ანალიზისთვის ნიმუშის აღების ადგილი და აღების პერიოდულობა დამოკიდებულია დანადგარის განსაკუთრებულობაზე და მოყვანილია ექსპლუატაციის ინსტრუქციაში. ნიმუშში ნახშირწყალბადების შემადგენლობისა ნორმალური დონის დროს ანალიზისათვის აიღება ცვლაში ორჯერ (ყოველ 4 საათში). ანალიზი აუცილებელია ჩავატაროთ გრაფიკის მიხედვით, სადაც გათვალისწინებულია ნიმუშის თანაბარი აღება აპარატებიდან ცვლის განმავლობაში.

ძირითადი მოთხოვნა, უზრუნველყოთ ფეთქებად უსაფრთხო მუშაობა კრიოგენული დანადგარების, წარმოადგენს არ დაუშვათ საშიში მინარევების ზღვრული შემადგენლობის ამაღლება.

3.4.4. უსაფრთხოების უზრუნველყოფის ორგანიზაციული საფუძვლები

უსაფრთხოების უზრუნველყოფისათვის ძირითად წესდებას წარმოადგენს - „უსაფრთხოების წესები, რომლებიც განკუთვნილია ჭურჭლების უსაფრთხო ექსპლუატაციასთან, რომლებიც მუშაობენ წნევის ქვეშ (OCT290.004).

შრომის უსაფრთხოების ინსტრუქციები და მუშა ინსტრუქციები უნდა იმყოფებოდეს სამუშაო ადგილზე. შრომის უსაფრთხოების ინსტრუქციები უნდა გადაიხედოს ხუთ წელში ერთხელ. ტექნოლოგიური რეჟიმების ან მოწყობილობების კონსტრუქციის ცვლილების ინსტრუქციები უნდა გადაიხედოს და დამტკიცდეს ცვლილების შეტანამდე. მომზადება და ატესტაცია თანამშრომლების მიმდინარეობს ორგანიზაციის მიერ დამტკიცებული სპეციალური დებულებით. სამუშაოზე მიღებული ახალი თანამშრომლებმა უნდა გაიარონ სპეციალური სამედიცინო შემოწმება, დადგენილი ჯანმრთელობის სამინისტროს მიერ. გარდა ამისა შრომის დაცვის განყოფილებაში მათ უნდა მიიღონ ინსტრუქცია დაკავშირებული უსაფრთხოების უზრუნველყოფისათვის.

მუშა მოსამსახურეებმა წელიწადში ერთხელ უნდა გაიარონ ინსტრუქციის ცოდნის შემოწმება სპეციალურ კომისიასთან. შემოწმების შედეგები უნდა გაფორმდეს ოქმით და შეტანილი იქნეს რეგისტრაციის ჟურნალში სამუშაო ადგილზე.

თუ კომისია დაადგენს, რომ მუშა მოსამსახურე არ აკმაყოფილებს ინსტრუქციის ცოდნას, მან უნდა მიიღოს დამატებითი ინსტრუქტაჟი და არა უგვიანეს 20 დღე გაიაროს განმეორებითი შემოწმება ცოდნის. თუ განმეორებითი შემოწმების დროს აღმოჩნდება არადაამაკმაყოფილებელი ცოდნა, მაშინ ის დათხოვილი უნდა იქნეს სამუშაოდან.

მუშა - მოსამსახურის კვალიფიკაციის ამაღლება უნდა განხორციელდეს პროფესიული სწავლების სპეციალური დებულებით [29].

დასკვნები

1. დამუშავებულია ენერგეტიკული დანიშნულების მაღალტემპერატურული ზეგამტარული გადამრთველი-კრიოტრონის პრინციპული სქემა, რომელიც შეიცავს სამ გრაგნილს: მუშა გრაგნილი, რომელიც წარმოადგენს გადამრთველ ელემენტს და შესრულებულია ლოკალიზირებული მრავალძარღვა ზეგამტარული სადენით, შევსების კოეფიციენტით $K_{შვ} \ll 1$; მართვის გრაგნილი, რომელიც აღებს კრიოტრონს; ჩამკეტი გრაგნილი სუსტი მაგნიტური კავშირით მართვის გრაგნილთან, იმართება მართკუთხა ფორმის დენის იმპულსით და შესრულებულია მრავალძარღვა ზეგამტარული სადენით შევსების კოეფიციენტით $K_{შვ} \approx 1$ - იმპულსის დროის ინტერვალში კრიოტრონი გაღებულია, დანარჩენ დროში კრიოტრონი ჩაკეტილია.

2. აგებულია კრიოტრონის ვოლტამპერული მახასიათებელი, რომლისგანაც განისაზღვრება კრიოტრონის დენი, ძაბვის ვარდნა და დანაკარგები ჩაკეტილ მდგომარეობაში.

3. დამუშავებულია პრინციპული სქემა მაღალტემპერატურული სამფაზა კრიოტრონული გამმართველის ნახევრადგამტარული მართვით. მოწყობილობა შეიცავს პირველად გრაგნილს, შესრულებული ჩვეულებრივი სადენისაგან. მეორად გრაგნილს, შესრულებული მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენისაგან. სამფაზა კრიოტრონული გამმართველს, რომელიც შეიცავს კრიოტრონებს, რომლის გადამრთველი ელემენტის გრაგნილი შესრულებულია მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენებით. შემაგნიტების და მართვის გრაგნილები შესრულებულია ჩვეულებრივი ზეგამტარული სადენისაგან. კრიოტრონული გამმართველის მართვა ხორციელდება ტირისტორებით გაღების α კუთხის ცვლილების გზით.

4. შესწავლილია ელექტრომაგნიტური პროცესები სამფაზა ბოგირულ ტირისტორულ გარდამქმნელში, როგორც მართვის სისტემა კრიოტრონული

გარდამქმნელისთვის. განხილულია გამმართველის და ინვერტორის რეჟიმები. მართვადი გამმართველებისთვის გარე მახასიათებლების ცვლილების კანონზომიერება დამოკიდებულია რეგულირების კუთხის სიდიდეზე და თითოეულ ტირისტორში დენის გატარების ხანგრძლივობაზე, რომელიც თავის მხრივ განისაზღვრება ვენტილების რიცხვით, რომლებიც ერთდროულად ატარებენ დენს.

5. შესწავლილია სამფაზა ბოგირული კრიოტრონული გარდამქმნელის ზეგამტარული სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში.

ნაჩვენებია, რომ ენერგეტიკული დანიშნულების კრიოტრონული გარდამქმნელების დამუშავება და შექმნა მოითხოვს ზეგამტარული სადენების გამოყენებას მაღალი დენგამტარუნარიანობით და დაბალი დანაკარგებით.

6. დადგენილია, რომ აღნიშნული მიზნის მიღწევა შესაძლებელია მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენებით ლოკალიზებული მაგნიტური ველით, რომელშიც ურთიერთ გავლენა ცალკეული ძარღვების მაგნიტური ველების დაყვანილია მინიმუმამდე.

7. მიღებულია ძირითადი თანაფარდობები ზეგამტარული სადენების დენგამტარუნარიანობის და დანაკარგების ანგარიშისათვის ცვლად მაგნიტურ ველში.

8. მოცემულია თხევადი კრიოგენული პროდუქტებთან მიმოქცევის უსაფრთხოების სპეციალური საკითხები.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Buck D.A. The cryotron – A superconductive computer component //I.R.E. 1956, v.44, N4, p.482-493.
2. Кан Я.С., Крутько, Е.Г. Рахубовский. В.А. Элементы и схемы ЦВМ на криотронах//магнитные элементы. Киев: «Наукова думка», 1964, с. 463-476.
3. Кан Я.С., Рахубовский В.А. Использование проволочных криотронов в вычислительных и измерительных устройствах: Препринт, Харьков, ХФТИ74-29. 1974, 22 с.
4. Casimir-Jonker, De Наа, Physika, 2, 1935, 935.
5. Newhouse V.L., Applied superconductivity, wiley, New York and Chichester, 1964 (см. русский перевод: Ньюхаус В., Прикладная сверхпроводимость, М., изд-во «Мир», 1966.)
6. Рахубовский В.А. Криотронные устройства. Вопросы атомной наук и техники. 2004. №6 с.104-106.
7. Букелль В. Сверхпроводимость. М: «Мир», 1975.
8. Ferrier M. Les redresseurs supraconducteurs. – Revue de physique appliquee, 1971, vol. 6, №4.
9. Dronov A.S., Ignatov W. Ye, Misylin A.W. Performance study of inductive output cryotronic converters. – Trans. IEEE on Magnetics. 1979, Vol. 15, №1.
10. Britton R.B. Flux pumps for used at 60Hz. - Trans. IEEE on Nucl. Sci., 1971, Vol. 18, №13.
11. Тозони О.В. Метод вторичных источников в электроэнергетике. – М.: Энергия, 1975.
12. Дронов А.С., Лутидзе Ш.И., Наровлянский В.Г., Магнитное поле в криотроне с высшим экраном. – Электричество, 1979, №11.
13. Salvy C. Les progress du stockage d'energie supraconducteur. – Entropie, 1974, №56, mars-avril.
14. Fasel R., Olsen I.L. Superconducting rectifiers. – Low Temperature physics, 1970, vol.6.
15. Казовский Е.А., Карцев В.П., Шахтарин В.Н. Сверхпроводящие магнитные системы. Л.: Наука, 1967.

16. კობრეიძე თ., ქადაგიშვილი გ. ენერგეტიკული დანიშნულების მაღალტემპერატურული (77კ) ზეგამტარული გადამრთველი-კრიოტრონი. "ინტელექტუალი", 2016, №31, გვ. 194-97.

17. Кохреидзе Т. Иновационные управляемые электромеханические системы с бесконтактными двигателями постоянного тока. Тбилиси, «Технический университет», 2016, 239 с.

18. Scanlan R.M., Malozemoff A.P., Larbalestier D.C., "Superconducting materials for large scale applications". Proc IEEE, 2004, V.92, n.10, p.1639-1654.

19. კობრეიძე თ., ქადაგიშვილი გ., მაღალტემპერატურული სამფაზა კრიოტრონული გამმართველი ნახევარგატარული მართვით. IV საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია - "ენერგეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები". მოხსენებათა კრებული, ქუთაისი, საქართველო, 2016, გვ. 90-93.

20. Брехна Г. Сверхпроводящие магнитные системы. Мир, М., 1976.

21. Schiiki K., Aharak., Kudo M. A.c. loss and twisting effects in superconducting composite conductor. Japan. J. Appl. phys., 1974, V.13, №2, P.345.

22. Kwasnitza K., Horwath I. Reduction of the a. c. losses of multifilament superconductors by the use of low twist rate. J. Appl. phys., 1976, V.47, №11, P.5038.

23. Глебов И.А., Лаверик Ч., Шахтарин В.Н. Электрофизические проблемы использования сверхпроводимости. Наука Л., 1980.

24. Лутидзе Ш.И., Джафаров Э.А., и др. Сверхпроводящий провод круглого сечения для переменного тока. //А.С. СССР, №1421158, Б.И. №32, М, 1988.

25. კობრეიძე თ., ქადაგიშვილი გ. ძალოვანი ზეგამტარული გადამრთველი-კრიოტრონის ვოლტამპერული მახასიათებელი. სტუ, სტუდენტური კონფერენცია, თეზისების კრებული, თბილისი, საქართველო, 2016, გვ.1-3.

26. კობრეიძე თ., ქადაგიშვილი გ. ზეგამტარული გარდამქმნელები ენერგეტიკული კრიოტრონების ბაზაზე. "ენერგია", 2017, №4(84), გვ. 20-29.

27. კობრეიძე თ., ქადაგიშვილი გ. ელექტრომაგნიტური პროცესები სამფაზა ბოგირულ კრიოტრონულ გარდამქმნელში ნახევრადგამტარული მართვით. "ენერგია", 2018, №1(85), გვ. 21-28.

28. Файнштейн В.И. Кислород, аргон, азот-безопасность при производстве и применении. М.: “Интермет-Инжиниринг”, 2008, 192 с.

29. РД04-265-99 Положение о порядке подготовки и аттестации работников организаций, эксплуатирующих опасные производственные объекты, подконтрольные Госгортехнадзору.