

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ფიქრია კენჭოშვილი

ენერგეტიკული დანიშნულების მაღალტემპერატურული (77კ)

ზეგამტარული დენსაზღუდის 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, ფიქრია კენჭოშვილი

თბილისი

2018 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით კენჭოშვილი ფიქრიას მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ენერგეტიკული დანიშნულების მაღალტემპერატურული (77კ) ზეგამტარული დენსაზღუდის 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: ფიქრია კენჭოშვილი

თემის დასახელება: ენერგეტიკული დანიშნულების
მაღალტემპერატურული (77კ) ზეგამტარული დენსაზღუდის 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

ენერგეტიკული დანიშნულების ელექტრომოწყობილობების დაცვა მოკლე შერთვის (მშ) დენებისაგან დღემდე რჩება აქტუალური ამოცანა. ბოლო წლებში მუშავდება ძირითადად სამი კონცეფცია დენსაზღუდის (დს) დამუშავების: კომუტაციური, ნახევრადგამტარული და ზეგამტარული. კომუტაციური დენსაზღუდი წარმატებით გამოიყენება საშუალო ძაბვის ქსელებში (35 კვ. ძაბვამდე) ნომინალურ დენზე -5000ა-მდე.

ნახევრადგამტარული დენსაზღუდი ჯერ-ჯერობით იმყოფება დამუშავების სტადიაში, გამოჩნდა ლაბორატორიული მოდელები.

ზეგამტარული დენსაზღუდი (ზგდს) წარმოადგენს ეფექტურ საშუალებას მოკლე შერთვის დენების შეზღუდვისა. უკვე რამოდენიმე ათეული წლის განმავლობაში საკმაოდ ინტენსიურად მიმდინარეობს დამუშავებისა და დანერგვის სამუშაოები ელექტრულ სისტემებში ზეგამტარული მოწყობილობების, როგორცაა გენერატორები, ტრანსფორმატორები, კაბელები და აგრეთვე დენსაზღუდები.

აღნიშნული პრობლემა განსაკუთრებით აქტუალურია ზეგამტარული ელექტრომოწყობილობებისათვის, რადგანაც მათი შიდა წინაღობა შედარებით ტრადიციულ მოწყობილობებთან მნიშვნელოვნად დაბალია, რის შედეგად მშ-ის დენებმა შეიძლება მიიღოს დაუშვებლად მაღალი მნიშვნელობა. ძირითადი მოთხოვნა ზგდს-ისა მდგომარეობს იმაში, რომ ელექტრულ სისტემაში მშ-ის დენის დარტყმის და დამყარებული მნიშვნელობა არ უნდა აჭარბებდეს დასაშვებ ზღვრულ მნიშვნელობას. გარდა ამისა ზგდს-ი ნეგატიურად არ უნდა მოქმედებდეს ელექტროენერგეტიკული სისტემის პარამეტრებზე ნორმალური რეჟიმის მუშაობის დროს.

ადრე ზეგამტარული ელექტრომოწყობილობების, მათ შორის დენსაზღუდების დამუშავება დაფუძნებული იყო დაბალ-ტემპერატურული ზეგამტარებზე (დტზგ), თხევადი ჰელიუმის 4,2 კ ტემპერატურაზე, რომელიც ხასიათდებოდა სიძვირით და დიდი ზომებით.

1986 წელს მაღალტემპერატურული ზეგამტარების (მტზგ) აღმოჩენამ არსებითად შეცვალა მდგომარეობა და მათი გაცივება შესაძლებელი გახდა თხევადი აზოტის – 77 კ ტემპერატურაზე, რაც არსებითად აიაფებს მტზგ – დენსაზღუდის კონსტრუქციას და ამცირებს მის ზომებს.DE

ნაშრომის პირველ თავში წარმოდგენილია ენერგეტიკული დანიშნულების ზეგამტარული დენსაზღუდის მუშა მახასიათებლები. მოცემულია ზეგამტარული დენსაზღუდის კლასიფიკაცია. განხილულია: რეზისტორული ტიპის ზეგამტარული დენსაზღუდი, დაფუძნებული ზეგამტარის არაწრფივი ვოლტამპერული მახასიათებელზე, რომლის წინააღობა იცვლება დენის სიდიდის მიხედვით;

ზეგამტარის არაწრფივი ვოლტამპერული მახასიათებელი გამოიყენება აგრეთვე ინდუქციური ტიპის დენსაზღუდში. ის შეიძლება წარმოვიდგინოთ ტრანსფორმატორის სახეში ზეგამტარული არაწრფივი რეზისტორით მეორადი გრაგნილის დატვირთვის რიცხვში განხილულია

დენსაზღუდო გაჟღენთილი მაგნიტოგამტარით, რომელიც შეიცავს ზეგამტარულ შემაგნიტების კოჭას, დენის კოჭას და მაგნიტოგამტარს.

ჩატარებულია ანალიზი ზგდს-ის გამოყენებისა მაღალი ძაბვის ელექტრულ ქსელებში. მათ გააჩნია არსებითი სისტემური ეფექტი, დამოკიდებულია დენსაზღუდის დაყენების ადგილზე.

განხილულია ენერგეტიკული დანიშნულების მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღუდი. მაგალითის სახით განხილულია ტურბოგენერატორის დაცვა.

შესწავლილია ზეგამტარული ელექტრომოწყობილობების მოკლე შერთვის დენების შეზღუდვა ზეგამტარული დენსაზღუდით და ჩატარებულია მისი ანგარიში დროში ინტერვალების მიხედვით.

წარმოდგენილია ტრანსფორმატორული ტიპის დენსაზღუდი და მისი შექმნის პერსპექტივა ზეგამტარული გრაგნილებით.

მშ-ის დენების შეზღუდვის ეფექტურ საშუალებას წარმოადგენს სწრაფმომქმედი ზგ დენსაზღუდი მოწყობილობა, რომელიც მუშაობს არაწრფივი ვოლტამპერული მახასიათებლის საფუძველზე, როცა ზგ-ის წინაღობა იცვლება დენის სიდიდისგან დამოკიდებულებაში, რაც საშუალებას იძლევა შეზღუდოს როგორც დარტყმის, ისე დამყარებული მშ-ის დენები. სწრაფქმედება ზგ დენსაზღუდის (ზგდს) მიიღწევა იმის შედეგად, რომ იცვლება ფაზური მდგომარეობა ზგ-ის გაზრდილი მაგნიტური ველის ზემოქმედებით, წარმოქმნილი უშუალოდ თვით მშ-ის დენით, სადაც გამოირიცხულია მართვის ესა თუ ის შუალედური რგოლი. სწრაფმომქმედი ზგდს შეიძლება გამოყენებული იქნეს როგორც ცვლადი, ისე მუდმივი დენის წრედებში.

ნაშრომის მეორე თავში მოცემულია ინდუქციური ტიპის მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღუდის გავლენა ელექტროენერგეტიკული სისტემის მდგრადობაზე. ნაჩვენებია, რომ ზგდს არსებითად ამაღლებს სისტემის მდგრადობას. სისტემისთვის, სადაც თითოეული ამომრთველი ხაზში აღჭურვილია დენსაზღუდი ინდუქციური წინაღობით, მოკლე შერთვის ადგილს არა აქვს მნიშვნელობა დინამიკური მდგრადობის შენარჩუნების შესაძლებლობის თვალსაზრისით.

ნაჩვენებია, რომ სადენებზე და აპარატებზე მოკლე შერთვოს დენის ჯამური ელექტროდინამიკური და თერმული ზემოქმედების შემცირებისათვის აუცილებელია შეიზღუდოს როგორც მოკლე შერთვის დენი, დარტყმის დენის ჩათვლით, ისე მისი ხანგრძლივობა ქსელში. აღნიშნული ამოცანა სამუშაოში გადაწყვეტილია მაღალი ძაბვის ამომრთველების სწრაფქმედების ამაღლებით, მოკლე შერთვოს დენის შეზღუდვით, დაზიანებული წრედის უინერციო გაწყვეტით.

ამავე თავში განხილულია მძლავრდენისა მაღალტემპერატურული ზეგამტარული სადენების დამზადების ტექნოლოგია და ზეგამტარული დენსაზღუდისთვის ზეგამტარული სადენების დენგამტარუნარიანობის და დანაკარგების საანგარიშო თანაფარდობები ცვლად მაგნიტურ ველში.

ნაშრომის მესამე თავში განხილულია მართვადი რეაქტორის ტიპის მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღუდი მბრუნავი

მაგნიტური ველით. შესწავლილია მართვადი რეაქტორის ძირითადი თვისება და კონსტრუქციული გადაწყვეტა. მოწყობილობის განსაკუთრებულობა მდგომარეობს იმაში, რომ მისი ინდუქციური წინაღობა მდოვრედ რეგულირდება მუდმივი დენით შემაგნიტების გზით.

Summary

Protection of electric devices intended for energy purposes from short circuit (SC) currents even today remains the topical problem. Over the last years three conceptions of current limiters (CL) are elaborated: commutative, semiconductive and superconductive. Commutative current limiters are successfully used in medium voltage systems (up to 35 V voltage) at nominal current up to 5000A.

Semiconductive current limiters are still in elaboration process, and some laboratory models are emerged.

Superconductive current limiters (SCCL) are a perfect tool for limitation of short circuit currents. Over several decades there are conducted intensive works on elaboration and implementation of superconductive devices in electric systems, such as generators, transformers, cables as well as current limiters.

The mentioned problem is especially topical for superconductive electric devices, since their internal resistance is relatively low compared with traditional devices, as a result of which SC currents may reach impossibly large magnitudes. Basic requirement for SCCL is that the magnitude of SC stroke current and its steady-state value doesn't have to exceed maximum allowable values. Besides, SCCM doesn't have to negatively impact on parameters of electric energy systems when working in normal operation mode.

Before now the elaboration of superconductive electric devices, including current limiters was based on low-temperature superconductors (LTSC), at the cryogenic temperature 4,2°C, that were featured by expensiveness and large sizes.

Discovery of high-temperature superconductors (HTSC) in 1986 has essentially changed the state of the art and their cooling became possible at liquid-nitrogen temperature 77K that essentially makes design of HTSC current limiters cheaper and reduces their sizes.

In the first chapter of the work there are represented operating characteristics of superconductive current limiters intended for energy purposes. Classification of superconductive current limiters is given. There are considered: resistor-type superconductive current limiters, which are based on non-linear voltage-current characteristic and electric resistance of which is changed according to current magnitude. Non-linear voltage-current characteristic of superconductor is also used in induction-type current limiters. It may be represented in transformer's image in the form of superconductive non-linear resistor in transformer's secondary load.

Current limiter permeated with magnetic conductor includes superconductive magnetizing coil, current coil and magnetic conductor.

There is conducted the analysis of SCCL use in high-voltage electric circuits. They have substantial system defect and are depended on current limiter's installation place.

High-temperature superconductive current limiter intended for energy purposes is considered. Turbogenerator protection is considered as an example.

Limitation of short circuit currents in superconductive electric devices using superconductive current limiter is studied and its calculation is conducted according to intervals.

Transformer-type current limiters and prospects of their creation using superconductive winding are represented.

The effective mean of short circuit (SC) limiter is fast acting superconductive current-limiting circuit breaker, which works on the base of non linear voltage characteristic. When superconductive resistor changes depending on the power range, it gives a chance to limit a strike and short circuit (SC) limiter. Fast acting of superconductive current limiter achieved when changes phase condition by impact of superconductive increased magnetic field formed directly self with short circuit limiter, where is excluded intermediate spacer control. Fast acting superconductive current limiter may be used as in alternating as in direct current circuit.

In the second chapter of the work there are considered the impact of induction-type high-temperature superconductive current limiter on electric energy system stability. There is shown that SCCL substantially increases system stability.

Fault location (short circuit location) makes no matter from the viewpoint of possibility of dynamic stability preservation for such systems, where the each switch in the line is equipped with current limiting inductive resistance.

It is shown that in order to reduce total electrodynamic and thermal action of short circuit currents on wires and electric accessories is necessary to limit both short circuit current (including stroke current) and its duration in the circuit.

The mentioned problem is solved in the work through speeding (enhancement of fast response) of high-voltage switches, via limitation of short circuit currents and instantaneous trip of damaged circuit.

In the same chapter there is considered manufacturing technology of heavy-current high-temperature superconductive wires and current conductivity of superconductive wires intended for superconductive current limiters, and current losses in variable magnetic field.

In the third chapter of the work there are considered controlled reactor-type high-temperature superconductive current limiters with rotating magnetic field. Basic properties and design solution for controlled reactor is studied. The peculiarity of this device is that its inductive resistance can be smoothly controlled by direct current through magnetizing.

შინაარსი

შესავალი	16
ლიტერატურული მიმოხილვა.....	19
შედეგები და მათი განსჯა	22
თავი I. ენერგეტიკული დანიშნულების ზეგამტარული დენსაზღუდის მუშა მახასიათებლები	22
1.1. ზეგამტარული დენსაზღუდის კლასიფიკაცია.....	22
1.2. მტზგ დენსაზღუდის გამოყენება მაღალი ძაბვის ელექტრულ ქსელებში	27
1.3. ენერგეტიკული დანიშნულების მაღალტემპერატურული (77 კ) ზეგამტარული დენსაზღუდი.....	35
1.4. ზეგამტარული ელექტრომოწყობილობების მოკლე შერთვის დენების შეზღუდვა ზეგამტარული დენსაზღუდით და მისი ანგარიში დროში ინტერვალების მიხედვით	39
1.5. ტრანსფორმატორული ტიპის ზეგამტარული დენსაზღუდი	45
1.6. დენსაზღუდი მოწყობილობის შექმნის პერსპექტივა ზეგამტარული გრაგნილებით.....	53
თავი II. ინდუქციური ტიპის მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღუდის გავლენა ელექტროენერგეტიკული სისტემის მდგრადობაზე.....	56
2.1. ენერგეტიკული დანიშნულების ტრანსფორმატორული ტიპის დენსაზღუდი ზეგამტარული არაწრფივი რეზისტორით	56
2.2. დენსაზღუდის გავლენა ელექტროენერგეტიკული სისტემის მდგრადობაზე	61
2.3. ზეგამტარები ელექტროენერგეტიკისათვის.....	74
2.4. მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღუდისთვის ზეგამტარული სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში	77
თავი III. მართვადი რეაქტორის ტიპის მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღუდი მბრუნავი მაგნიტური ველით	88

3.1. მართვადი რეაქტორის ძირითადი თვისება და კონსტრუქციული გადაწყვეტა.....	88
3.2. მოკლე შერთვის დენების შეზღუდვა მართვადი რეაქტორის საშუალებით	91
3.3. მართვადი რეაქტორის რეგულირების დრო	92
დასკვნები.....	98
გამოყენებული ლიტერატურა	100

ცხრილების ნუსხა

გვ.

ცხრილი 1.1. დენსაზღუდის მონაცემები30

ცხრილი 1.2. დენსაზღუდის ვარიანტების ტექნიკურ-ეკონომიკური ანალიზის შედეგები33

ცხრილი 1.3. დენსაზღუდი მოწყობილობის ანგარიშისთვის ტექნიკური დავალების საწყისი მონაცემები48

ცხრილი 3.1. $H_{\text{სა}} = f(B_{1m})$ ფუნქციის მნიშვნელობები ფოლადებისთვის $\exists 41$ და $\exists 42$, სისქე 0,35 და 0,5 მმ, $f = 50$ ჰც.....96

ნახაზების ნუსხა

83.

ნახ.1.1. ორტრანსფორმატორიანი ქვესადგურის სქემა	22
ნახ.1.2. რეზისტორული დენსაზღუდის სქემატური კონსტრუქცია.....	23
ნახ.1.3. რეზისტორული მტზგ - მიმდევრობითი ტიპის დენსაზღუდი.....	23
ნახ.1.4. რეზისტორული მტზგ -მაშუნტებელი ტიპის დენსაზღუდი ..	24
ნახ.1.5. ინდუქციური ტიპის დენსაზღუდის სქემატური კონსტრუქცია.....	25
ნახ.1.6. ინდუქციური მტზგ - დენსაზღუდი.....	26
ნახ.1.7. დენსაზღუდი გაჟღენთილი მაგნიტოგამტარით	26
ნახ.1.8. ელექტრულ ქსელებში დენსაზღუდის გამოყენების არე	29
ნახ.1.9. მოკლე შერთვის დენების შეზღუდვისათვის ძირითადი არსებული და პერსპექტიული მოწყობილობები	31
ნახ.1.10. ტურბოგენერატორის ჩანაცვლების სქემა ზგდს-ით	37
ნახ.1.11. ზგ ტურბოგენერატორის ჩანაცვლების სქემა ზგდს-ით.....	40
ნახ.1.12. ინტერვალების მიხედვით ზგ არაწრფივი ელემენტში დენის ანგარიში.....	43
ნახ.1.13. წრედის პრინციპული სქემა	46
ნახ.1.14. ტრანსფორმატორი მიმდევრობით ჩართვით.....	46
ნახ.2.1. ტრანსფორმატორული ტიპის მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღუდი	57
ნახ.2.2. ანგარიშის შედეგები (ფარდობით ერთეულებში) გარდამავალი პროცესი მშ-ის დროს წრედში ზგდს-ის არსებობის დროს (2) და როცა ზგდს გამორიცხულია (3)	58
ნახ.2.3. მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღუდის კონსტრუქციული სქემა.....	59
ნახ.2.4. დამოკიდებულება მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღუდის, იმპედანსის - Zდენისაგან - I მუშა (პირველად) გრაგნილში	60
ნახ.2.5. ოსცილოგრამები ძაბვისა და დენის მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღუდის წრედში, დენსაზღუდის იმპედანსის გაზრდის რეჟიმში, როცა დენი იზრდება. მუშა გრაგნილში დენი - 1,8 ა; სიხშირე - 50 ჰც	60

- ნახ.2.6. „სადგური - სალტე“ სისტემის გამოსაკვლევი სქემა: ა) საწყისი; ბ) გამორთვის შემდეგ63
- ნახ.2.7. გადამცემი ხაზზე სამფაზა მოკლე შერთვის დროს ჩანაცვლების სქემა: ა- ხაზის დასაწყისში; ბ- ხაზის ბოლოში, ვ- ხაზის შუაში; გ-ნახ.2.7 ვ გარდაქმნილი სქემა64
- ნახ.2.8. გამოსაკვლევი სისტემის (ა) და მისი ჩანაცვლების სქემა მოკლე შერთვის დროს, როცა თითოეული ამომრთველი აღჭურვილია დენსაზღუდი ინდუქციური წინაღობით (ბ)....66
- ნახ.2.9. სიმძლავრის მახასიათებლები, აჩქარების ფართი, როცა მოკლე შერთვა წარმოიშვა ხაზის დასაწყისში (1-3-4-6-1), შემთხვევაში, თუ თითოეული ამომრთველი აღჭურვილია დენსაზღუდი ინდუქციური წინაღობით (1-2-5-6-1) და დამუხრუჭების ფართი (6-7-8-6)68
- ნახ.2.10. „იდეალური ტრანსფორმატორის“ სქემის ოთხპოლუსა ელემენტი69
- ნახ.2.11. დენსაზღუდის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები ზეგამტარული რგოლების სხვადასხვა რიცხვის დროს.....73
- ნახ.2.12. მტზგ $Bi - (1G)$ და Y -სისტემის $(2G)$ სადენებისთვის მაგნიტურ ველში კრიტიკული დენის სიმკვრივის შედარება.....76
- ნახ.2.13. სქემები და ვექტორული დიაგრამები78
- ნახ.2.14. მატრიცის წინაღობის გავლენის განსაზღვრა დანაკარგებზე..86
- ნახ. 3.1. მბრუნავი მაგნიტური ველით მართვადი რეაქტორის განივი ჭრილი 1-გარე უღელი; 2-შიდა უღელი 3-სამფაზა გრაგნილი; 4-მართვის გრაგნილი88
- ნახ.3.2. მართვადი რეაქტორის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები ქსელში მიმდევრობით ჩართვით. ნომინალური ძაბვა $U_{\text{ფ}} = 6,3$ კვ, ნომინალური დენი $I_{\text{ფ}} = 500$ ა, $U_{\text{ფ}}$, I - რეაქტორის ფაზური ძაბვა და დენი89
- ნახ.3.3. მართვადი რეაქტორის მოდელისთვის დამოკიდებულება $K = f(B_{1m}), \exists 41$ ტიპის ფოლადისთვის. a, b, δ - მართვადი რეაქტორის გეომეტრიული ზომები.....97

ძირითადი აღნიშვნები

R - ზგ არაწრფივი ელემენტის წინაღობა

L_R - არაწრფივი ელემენტის ინდუქციურობა

r_H - დატვირთვის წინაღობა

L_H - დატვირთვის ინდუქციურობა

L - წრფივი დროსელის ინდუქციურობა

i, i_R, i_L - დენები ზგ ტურბოგენერატორის, ზგ არაწრფივი ელემენტის და წრფივი დროსელის.

C, S, T - თბოტევადობა, გასაცივებელი ზედაპირი და ტემპერატურა ზგ არაწრფივი ელემენტის

ΔW - სითბოს გამოყოფის სიმძლავრე ეკრანში ნორმალურ მდგომარეობაში

T_N - თხევადი აზოტის ტემპერატურა

h - თბოგადაცემის კოეფიციენტი ზგ არაწრფივი ელემენტის ზედაპირიდან თხევად აზოტში T_N ტემპერატურით

ΔR - გრაგნილის რადიალური ზომა

W - ხვეების რიცხვი

I_g - დენის კრიტიკული მნიშვნელობა

i_g - დენის აქტიური მდგენელი

i_{Σ} - დენის ზეგამტარული მდგენელი

l - სადენის სიგრძე

ρ_g - სადენის ხვედრითი წინაღობა

n_g - ერთეულ მოცულობაში ნორმალური ელექტრონების რიცხვი

n_o - ერთეულ მოცულობაში საერთო ელექტრონების რიცხვი

R_{Σ} - ნორმალურ მდგომარეობაში ზგ სადენის წინაღობა

L_g - კინეტიკური ინდუქციურობა

l_g - ხვედრითი კინეტიკური ინდუქციურობა

λ - დენის შეღწევადობის სიღრმე

d_{σ} - ზგ ძარღვის დიამეტრი

β_s -სადენის ზედაპირზე მაგნიტური ინდუქცია

$\Delta P_{გრძ.}$ - გრიგალური დანაკარგები

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

H-მაგნიტური ველის დამაბულობა

B- მაგნიტური ველის ინდუქცია

A, β -მუდმივები, დამოკიდებული ფოლადის ხარისხზე და დასამაგნიტებელი უღლის ზომებზე

Λ -დასამაგნიტებელ უღელში მაგნიტური გზის საშუალო სიგრძე

$I_{\sigma 0}$ - მართვის გრაგნილში დამყარებული დენის მნიშვნელობა

შესავალი

ენერგეტიკული დანიშნულების ელექტრომოწყობილობების დაცვა მოკლე შერთვის (მშ) დენებისაგან დღემდე რჩება აქტუალური ამოცანა. ბოლო წლებში მუშავდება ძირითადად სამი კონცეფცია დენსაზღუდის (დს) დამუშავების: კომუტაციური, ნახევრადგამტარული და ზეგამტარული. კომუტაციური დენსაზღუდი წარმატებით გამოიყენება საშუალო ძაბვის ქსელებში (35 კვ. ძაბვამდე) ნომინალურ დენზე -5000ა-მდე.

ნახევრადგამტარული დენსაზღუდი ჯერ-ჯერობით იმყოფება დამუშავების სტადიაში, გამოჩნდა ლაბორატორიული მოდელები.

ზეგამტარული დენსაზღუდი (ზგდს) წარმოადგენს ეფექტურ საშუალებას მოკლე შერთვის დენების შეზღუდვისა. უკვე რამოდენიმე ათეული წლის განმავლობაში საკმაოდ ინტენსიურად მიმდინარეობს დამუშავებისა და დანერგვის სამუშაოები ელექტრულ სისტემებში ზეგამტარული მოწყობილობების, როგორცაა გენერატორები, ტრანსფორმატორები, კაბელები და აგრეთვე დენსაზღუდები.

აღნიშნული პრობლემა განსაკუთრებით აქტუალურია ზეგამტარული ელექტრომოწყობილობებისათვის, რადგანაც მათი შიდა წინაღობა შედარებით ტრადიციულ მოწყობილობებთან მნიშვნელოვნად დაბალია, რის შედეგად მშ-ის დენებმა შეიძლება მიიღოს დაუშვებლად მაღალი მნიშვნელობა. ძირითადი მოთხოვნა ზგდს-ისა მდგომარეობს იმაში, რომ ელექტრულ სისტემაში მშ-ის დენის დარტყმის და დამყარებული მნიშვნელობა არ უნდა აჭარბებდეს დასაშვებ ზღვრულ მნიშვნელობას. გარდა ამისა ზგდს-ი ნეგატიურად არ უნდა მოქმედებდეს ელექტროენერგეტიკული სისტემის პარამეტრებზე ნორმალური რეჟიმის მუშაობის დროს.

ადრე ზეგამტარული ელექტრომოწყობილობების, მათ შორის დენსაზღუდების დამუშავება დაფუძნებული იყო დაბალ-

ტემპერატურული ზეგამტარებზე (დტზგ), თხევადი ჰელიუმის 4,2 კ ტემპერატურაზე, რომელიც ხასიათდებოდა სიძვირით და დიდი ზომებით.

1986 წელს მაღალტემპერატურული ზეგამტარების (მტზგ) აღმოჩენამ არსებითად შეცვალა მდგომარეობა და მათი გაცივება შესაძლებელი გახდა თხევადი აზოტის – 77 კ ტემპერატურაზე, რაც არსებითად აიაფებს მტზგ – დენსაზღუდის კონსტრუქციას და ამცირებს მის ზომებს.

სამუშაოში განხილულია ენერგეტიკული დანიშნულების ტრანსფორმატორული ტიპის დენსაზღუდი ზეგამტარული არაწრფივი რეზისტორით. მოყვანილია ასეთი ტიპის დენსაზღუდის წრედებში ელექტრომაგნიტური პროცესების რიცხოვრივი ანგარიში. აღწერილია კონსტრუქცია დენსაზღუდის კომპოზიციური მაღალტემპერატურული ზეგამტარული სადენის გამოყენებით.

შესწავლილია დენსაზღუდის გავლენა ელექტროენერგეტიკული სისტემის მდგრადობაზე.

გამოკვლევულია მართვადი რეაქტორის ტიპის მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღუდი მბრუნავი მაგნიტური ველით.

შესწავლილია შემდეგი საკითხები, როგორცაა: მართვადი რეაქტორის ძირითადი თვისება და კონსტრუქციული გადაწყვეტა; მოკლე შერთვის დენების შეზღუდვა მართვადი რეაქტორის საშუალებით; მართვადი რეაქტორის რეგულირების დროს.

კვლევების პროცესში გამოყენებული იქნა ინდუქციურად დაკავშირებული წრედების თეორია და მათემატიკური მოდელირების მეთოდები.

ნაშრომის სამეცნიერო სიახლე:

1. შესრულებულია თეორიული ანალიზი და შეფასება პრინციპული შესაძლებლობისა მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღუდების გამოყენებისა ელექტრომომარაგების სისტემებში. ნაჩვენებია უპირატესობა

ასეთი მოწყობილობების, განსაზღვრულია ამოცანების წრე, რომლებიც შეიძლება ეფექტურად გადაწყვეტილი იქნეს ზეგამტარული დენსაზღუდების გამოყენებით ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში.

2. დამუშავებულია მათემატიკური მოდელი, რომელიც საშუალებას იძლევა შესვისწავლოდ ელექტრომაგნიტური პროცესები მოკლე შერთვის დენების შეზღუდვის დროს ზეგამტარული დენსაზღუდების საშუალებით დროის ნებისმიერ მომენტში მოწყობილობის ინერციულობის გათვალისწინებით.

3. დადგენილია, რომ ზეგამტარული დენსაზღუდების გამოყენება არსებითად აუმჯობესებს ელექტროენერგეტიკული სისტემის სტატიკურ და დინამიკურ მდგრადობას.

სადისერტაციო სამუშაოში მიღებული შედეგები შეიძლება გამოყენებული იქნეს ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში, საპროექტო და სამეცნიერო-კვლევით ორგანიზაციებში ელექტრომოწყობილობების პარამეტრების და მოკლე შერთვის დენების დონეების კოორდინაციის ამოცანების გადაწყვეტის დროს.

მოკლე შერთვის დენების კოორდინაციის პრობლემა წარმოადგენს მეტისმეტად მნიშვნელოვანს ნებისმიერ ელექტროენერგეტიკულ სისტემისთვის, რადგანაც მოკლე შერთვის დონე განსაზღვრავს მოთხოვნებს ელექტრომოწყობილობების შერჩევის დროს, შესაბამისად, განსაზღვრავს ელექტროენერგეტიკულ სისტემის ეკონომიკურობას და საიმედოობას.

სადისერტაციო სამუშაოების შედეგები გამოქვეყნებული იქნა ხუთ სამეცნიერო სტატიაში.

სადისერტაციო სამუშაოს ძირითადი შედეგები მოხსენებული იქნა: აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტში მე-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 კოლოკვიუმებზე.

ლიტერატურული მიმოხილვა

რთული ელექტროენერგეტიკული სისტემების (ეეს) განვითარება თანამედროვე ეტაპზე, მიუხედავად იმისა, რომ გამოიყენება სხვადასხვა დენსაზღვდი მოწყობილობა (დსმ), მოკლე შერთვის (მშ) დენების შეზღუდვის პრობლემა დღემდე რჩება გადაუწყვეტელი. ყველა კლასის ძაბვის ელექტრულ ქსელებში მოკლე შერთვის დენების ზრდის პრობლემა აქტუალურია, საჭიროა ახალი ეფექტური მეთოდების და მოწყობილობების დამუშავება მისი შემცირებისათვის [1,2,3].

ამასთან დაკავშირებით ბოლო დროს განვითარებულ ქვეყნებში განიხილება საკითხები ელექტროენერგეტიკის მდგრადი განვითარების უზრუნველყოფისა და ფუნქციონირების ეფექტური ამაღლება ახალი თანამედროვე ტექნოლოგიების ბაზაზე. მაღალტემპერატურული ზეგამტარული (მტზგ) მასალების დამუშავებასთან დაკავშირებით, რომელიც წარმოადგენს ერთ-ერთ პერსპექტიულ მიმართულებას ელექტროენერგეტიკაში, შეიძლება მიეკუთვნოს დამუშავება და დანერგვა სამრეწველო მასშტაბში ზეგამტარული დენსაზღვდი (ზგდს) მოწყობილობების [4,5]. მოკლე შერთვის დენების შეზღუდვის პრობლემა საჭიროა გადაწყდეს განმანაწილებელი მოწყობილობებისათვის და თბოელექტროსადგურების საგენერატორო ძაბვის ქსელში, ჰიდროელექტროსადგურების მძლავრი ბლოკების საგენერატორო ძაბვის სალტებზე, 6-10 კვ ძაბვის ქვესადგურის სალტებზე, კონდენსაციური ელექტროსადგურების და ატომური ელექტროსადგურების საკუთარი მოხმარების სისტემებში და ბოლოს მაღალი ძაბვის განმანაწილებელ მოწყობილობებში [6,78].

ზეგამტარული დენსაზღვდები სხვადასხვა კონსტრუქციული შესრულებებით თანდათანობით პოულობენ ფართო პრაქტიკულ გამოყენებას მოკლე შერთვის დენების შეზღუდვისათვის. მეორე მხრივ

ასეთი მოწყობილობების გამოყენების ეფექტურობა ელექტროენერგეტიკაში დღემდე სრულად არაა შესწავლილი.

სხვადასხვა ტიპის მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღვდი მოწყობილობების დამუშავება მიმდინარეობს გასული საუკუნის 90-იანი წლების დასაწყისიდან ყოფილი საბჭოთა კავშირის ქვეყნების მთელი რიგი ორგანიზაციებში და საზღვარგარედ, მათ შორის: ABB (შვეიცარია), VPTI Hydro-Quebec (კანადა), Central Research Institute of Electrical Power Industry (იაპონია), СибНИИЭ, ЭНИИ, Power Superconductor Applications (აშშ), ИФ СО РАН, Крас ГУ, ВНИИЭ, РИЦ „კურჩატოვის ინსტიტუტი“, General Atomic (აშშ) და სხვა მრავალი.

ზეგამტარული დენსაზღვდის გამოყენების მიზანშეწონილობა მოკლე შერთვის დენების შეზღუდვისათვის გამომდინარეობს შემდეგი მიზეზების შედეგად: მოწყობილობის არაწრფივი ვოლტამპერული მახასიათებლებით, გამორიცხულია ასეთი დენსაზღვდი მოწყობილობებისთვის მექანიკური მოძრავი ნაწილები და კონტაქტები, სიმძლავრის დანაკარგების გამორიცხვა მისი ნორმალური მუშაობის რეჟიმში შედარებით ბეტონის რეაქტორებთან, მოკლე შერთვის დენების სიდიდეების და ელექტრული ქსელის მოწყობილობების პარამეტრების კოორდინაციის მეტი ეფექტური შესაძლებლობა.

არსებითი განსაკუთრებულობას ზგდს-ის წარმოადგენს ის, რომ ისინი შეიძლება გამოყენებული იქნეს მშ-ის დენების შეზღუდვის კლასიკური მოწყობილობებთან და მეთოდებთან შერწყმით.

მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღვდი მოწყობილობის გამოყენების შესაძლებლობის შეფასებისთვის ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში საჭიროა შემდეგი ამოცანების გადაწყვეტა:

1. მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღვდი მოწყობილობის კონსტრუქციის გაუმჯობესება.

2. ზგდს-ის გამოყენების არეს ანალიზი და გამოკვლევა მშ-ის დენების შეზღუდვისათვის ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში.

3. 6-10 კვ ძაბვის ელექტრულ ქსელში ტრადიციული დენსაზღუდის (ბეტონის რეაქტორი) და ზეგამტარული დენსაზღუდის ეფექტურობის შედარებითი ანალიზი.

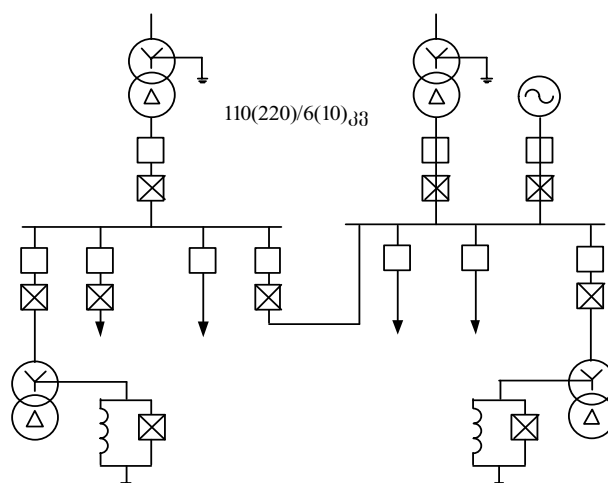
შედეგები და მათი განსჯა

თავი I. ენერგეტიკული დანიშნულების ზეგამტარული დენსაზღუდის მუშა მახასიათებლები

1.1. ზეგამტარული დენსაზღუდის კლასიფიკაცია

ამჟამად მოკლედ შერთვის დენების შეზღუდვისათვის ძირითადად გამოიყენება რეაქტორები, რომლის უარყოფით მხარეს წარმოადგენს აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების ვარდნა ნორმალური მუშაობის რეჟიმში, რაც იწვევს დიდ დანაკარგებს. რეაქტორის ალტერნატივად შეიძლება განხილული იქნეს მტზგ – დენსაზღუდი, რომელიც შეიძლება გამოყენებული იქნეს:

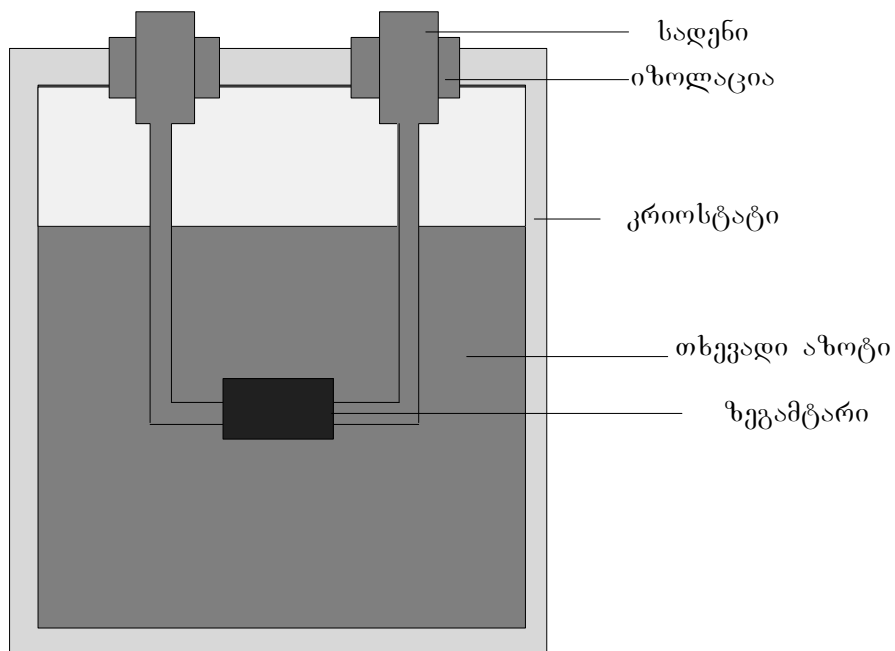
- ტრანსფორმატორის და ფიდერის დაცვა;
 - ელექტროენერჯის ახალი წყაროების ჩართვა;
 - ჩამიწება;
 - სექციონირება;
 - გამშვი დენების რეგულირება, აგრეთვე სხვა შემთხვევებში.
- სხვადასხვა კლასის ძაბვების დროს – 400 ვ-დან 500 კვ ძაბვამდე (ნახ.1.1.).



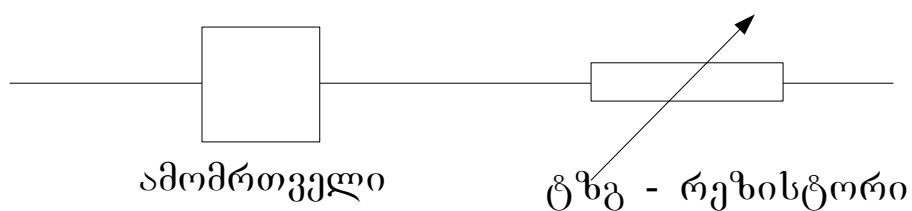
ნახ.1.1. ორტრანსფორმატორიანი ქვესადგურის სქემა:
☒ - დენსაზღუდი

მტზგ – დენსაზღუდებს შეუძლია დაიცვას ელექტრომოწყობილობა დაზიანებისაგან, გაზარდოს გამტარუნარიანობა, შეამციროს გამოყენებული მოწყობილობის ღირებულება ახალი მშენებლობის დროს, გამორიცხოს რეაქტორების გამოყენება, აამაღლოს ქსელის საიმედოობა და სტაბილურობა.

ყველაზე “მარტივი” და მცირე ზომის დენსაზღუდი წარმოგვიდგება – რეზისტორული ტიპის (ნახ. 1.2), დაფუძნებული ზეგამტარის არაწრფივი ვოლტამპერული მახასიათებელზე, რომლის წინაღობა იცვლება დენის სიდიდის მიხედვით [1].



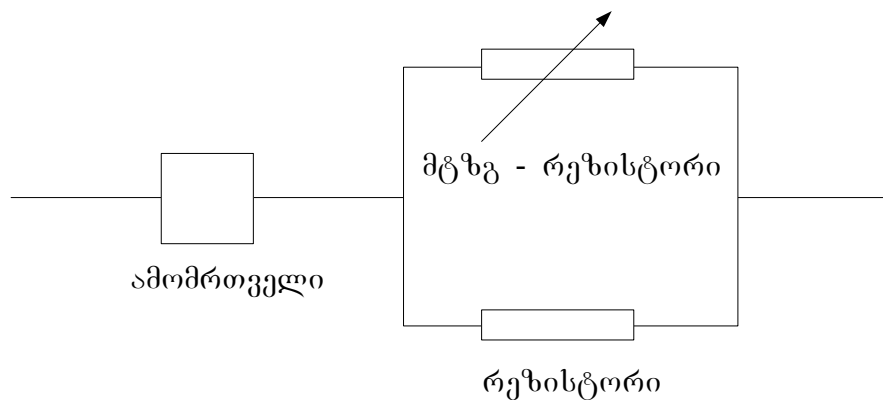
ნახ. 1.2. რეზისტორული დენსაზღუდის სქემატური კონსტრუქცია პირველ შემთხვევაში (ნახ.1.3) ზეგამტარული რეზისტორი ინდუქციურობის გარეშე მიმდევრობით ჩართულია დასაცავი დატვირთვის სქემაში



ნახ. 1.3. რეზისტორული მტზგ – მიმდევრობითი ტიპის დენსაზღუდი

ნორმალურ რეჟიმში დენსაზღუდის წინაღობა ტოლია ნულის, მაგრამ როგორც კი ავარიის დროს დენი მიაღწევს მოცემულ მნიშვნელობას, დენსაზღუდი გამოდის ზეგამტარული მდგომარეობიდან და გადადის რეზისტორულ მდგომარეობაში. ასეთი შესრულება დენსაზღუდის მოითხოვს დენის მაღალ სიმკვრივეს მტზგ – სადენის და ზეგამტარიდან დიდი სიდიდის სითბოს ეფექტურ გამოყვანას, გამოყოფილი მოკლედ შერთვის რეჟიმში, ავარიის ლიკვიდაციის შემდეგ მისაღები დროისთვის ზეგამტარული მდგომარეობის აღდგენა. ამიტომ მიმდევრობითი რეზისტორული ტიპის დენსაზღუდი შეიძლება გამოვიყენოთ სქემაში, სადაც რამოდენიმე წუთი აღდგენისათვის მოქმედების შემდეგ საკმარისია. ანგარიში გვიჩვენებს, რომ ზემოდ ნაჩვენები შესრულება შეიძლება გამოყენებული იქნეს სქემაში, სადაც რეალიზებულია ერთჯერადი ავტომატური განმეორებითი ჩართვა (აგჩ), მაგრამ ამ შემთხვევაში საჭირო გახდება შედარებით დიდი რაოდენობის მტზგ – სადენი, ხოლო კრიოგენული დანადგარი გაზრდის დენსაზღუდის ზომებს რვაჯერ, რაც ბუნებრივია არც ისე მიზანშეწონილია.

გაცილებით ეფექტურია მაშუნტებელი ტიპის დენსაზღუდი (ნახ.1.4).



ნახ. 1.4. რეზისტორული მტზგ – მაშუნტებელი ტიპის დენსაზღუდი

დენსაზღუდის პრინციპი ანალოგიურია მიმდევრობითი ტიპის, მაგრამ ამ შემთხვევაში ზეგამტარის პარალელურად ჩართულია “თბილი” რეზისტორი ან ინდუქციურობის კოჭა.

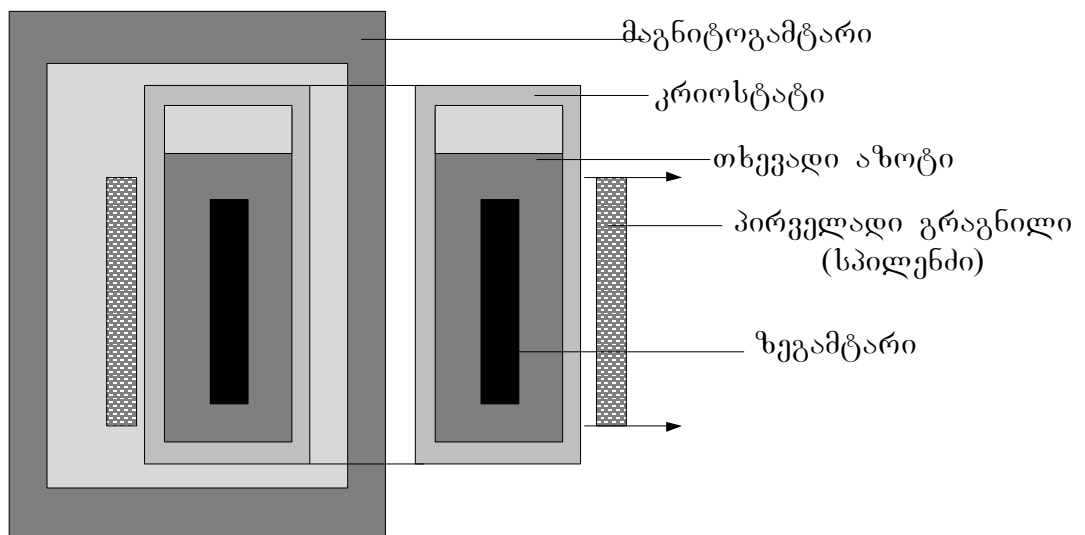
ნორმალური მუშაობის რეჟიმში მტზგ-კოქსას წინააღობა ტოლია ნულის და დენი გადის მის გავლით. მოკლედ შერთვის პერიოდში, ზეგამტარის წინააღობის გარკვეულ სიდიდემდე მიღწევის დროს, დენი გადაირთვება პარალელურად შეერთებულ ელემენტზე, რომელიც დებულობს თავისთავზე მთლიან “დარტყმას”.

ასეთი შესრულების დენსაზღუდს შეუძლია გაუძლოს რამოდენიმე მოკლედ შერთვას ზედიზედ საკმარისი მაღალი სწრაფქმედებით, რადგანაც ზეგამტარის ტემპერატურა არ იზრდება ისე ძლიერად, როგორც მიმდევრობითი შეერთების დროს.

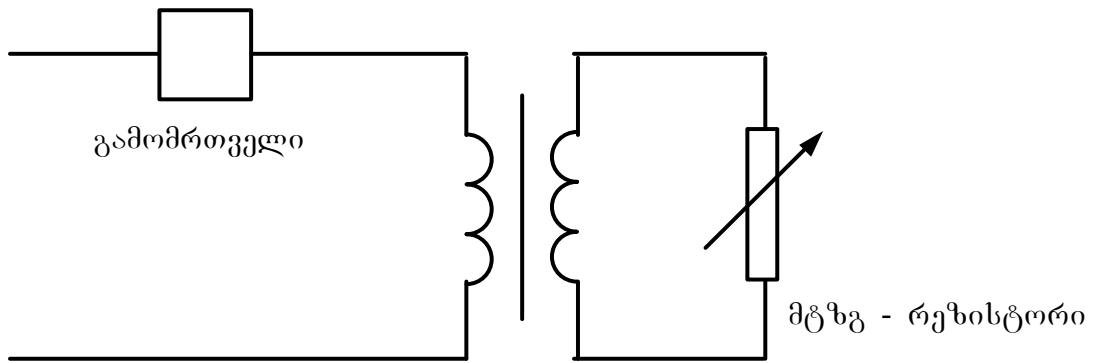
თუმცა მაშუნტებელი დენსაზღუდის დამზადების დროს საჭირო გახდება დაახლოებით 10%-ით მეტი მტზგ – სადენი.

მაშუნტებელი ტიპის დენსაზღუდი შეიძლება გამოყენებული იქნეს როგორც ერთჯერადი აგჩ სქემაში, ისე ორჯერადი სქემაში.

ზეგამტარის არაწრფივი ვოლტამპერული მახასიათებელი გამოიყენება აგრეთვე ინდუქციური ტიპის დენსაზღუდში (ნახ. 1.5). ის შეიძლება წარმოვიდგინოთ ტრანსფორმატორის სახეში მტზგ – არაწრფივი რეზისტორით მეორადი გრაგნილის დატვირთვის რიცხვში (ნახ. 1.6.)



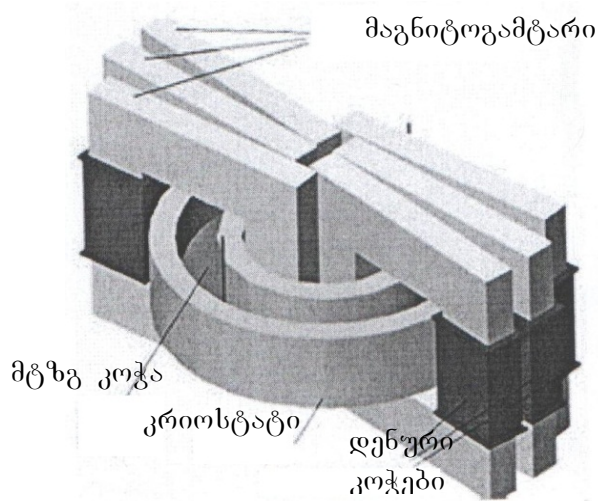
ნახ. 1.5. ინდუქციური ტიპის დენსაზღუდის სქემატური კონსტრუქცია



ნახ. 1.6. ინდუქციური მტზგ - დენსაზღუდი

ნორმალური მუშაობის რეჟიმში ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილი დამოკლებულია მტზგ რეზისტორით, რომლის წინაღობა ახლოსაა ნულთან. მოკლედ შერთვის წარმოშობის დროს რეზისტორი გამოდის ზეგამტარული მდგომარეობიდან და მისი წინაღობა იზრდება, რის შედეგად მოკლედ შერთვის დენი იზღუდება პირველადი გრაგნილის ინდუქციური წინაღობით. ინდუქციური მტზგ –დენსაზღუდის ძირითად ნაკლოვანებას წარმოადგენს მოწყობილობის დიდ ზომებს, აგრეთვე უფრო რთულ კონსტრუქციას და მაღალ ღირებულებას შედარებით რეზისტორულ დენსაზღუდთან.

დენსაზღუდი გაჟღენთილი მაგნიტოგამტარით ნაჩვენებია ნახ. 1.7.



ნახ. 1.7. დენსაზღუდი გაჟღენთილი მაგნიტოგამტარით

შეიცავს მტზგ შემაგნიტების კოჭას, დენის კოჭას და მაგნიტოგამტარს. შემაგნიტების კოჭა ემსახურება იმას, რომ გაჯერდეს მაგნიტოგამტარი, ამ შემთხვევაში უეცრად ეცემა ინდუქციურობა დენების გრაგნილის – დენსაზღლუდი მუშაობს ნომინალურ რეჟიმში.

მოკლედ შერთვის შემთხვევაში დენის გრაგნილი ქმნის მაგნიტურ ნაკადს, რომელიც აკომპენსირებს ნაკადს შემაგნიტების კოჭასაგან, მაგნიტოგამტარები გამოდიან გაჯერების რეჟიმიდან, დენების გრაგნილის ინდუქციურობა იზრდება – მიმდინარეობს დენის შეზღუდვა. ვინაიდან დენის შეზღუდვა მოეთხოვება ორივე ნახევარპერიოდში, აუცილებელია გამოყენება წყვილი მგნიტოგამტარების და დენების კოჭების თითოეული ფაზისთვის.

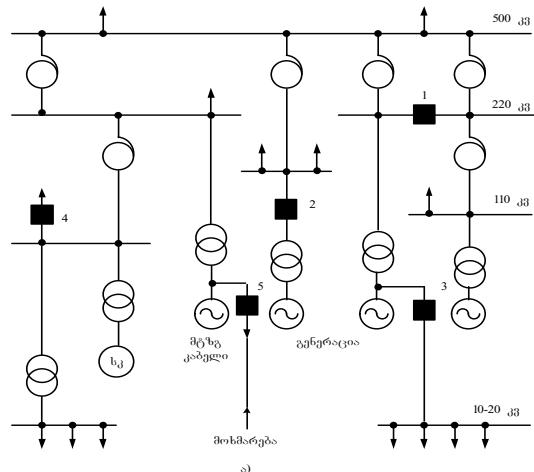
ძირითადი უპირატესობა დენსაზღლუდის გაჯერებული მაგნიტოგამტარით წარმოადგენს ის, რომ დენსაზღლუდის დროს მასში არ მიმდინარეობს შემაგნიტების ზეგამტარული გრაგნილის გადასვლა ზეგამტარული მდგომარეობიდან რეზისტორულში, რაც იძლევა მაღალ სწრაფქმედებას და მზადყოფნას შემდგომი მყისიერი მოქმედებისა. კურჩატოვის ინსტიტუტში წარმატებით იქნა გამოცდილი მოდელი სამფაზა დენსაზღლუდის გაჟღენთილი მაგნიტოგამტარით.

1.2. მტზგ დენსაზღლუდის გამოყენება მაღალი ძაბვის ელექტრულ ქსელებში

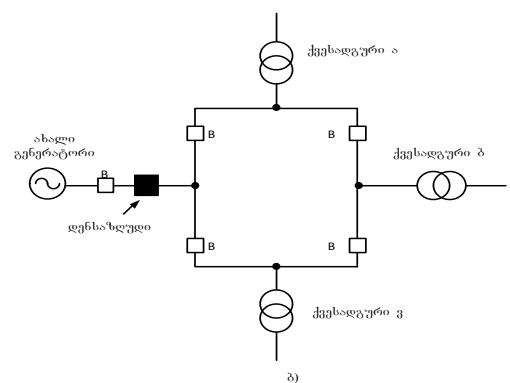
ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მტზგ დენსაზღლუდის გამოყენება მაღალი ძაბვის ელექტრულ ქსელებში გააჩნია არსებითი სისტემური ეფექტი, დამოკიდებულია დენსაზღლუდის დაყენების ადგილზე. დენსაზღლუდი მოწყობილობა შეიძლება გამოყენებული იქნეს [2]:

- ქვესადგურის სექციების სალტების გაერთიანებისთვის (1 ნახ. 1.8, ა);
- ელექტროსადგურზე ახალი გენერაციის წყაროს შეყვანისათვის (2 ნახ. 1.8, ა);

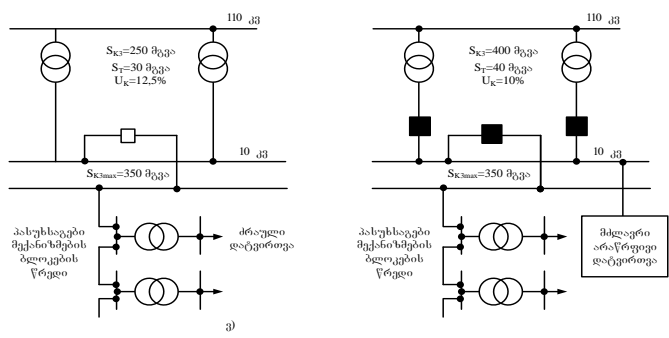
- საგენერატორო ძაბვის სალტესთან ელექტროენერჯის განაწილებისათვის (ნახ. 1.8, ა);
 - საჰაერო და საკაბელო ელექტროგადაცემის ხაზებში მოკლედ შერთვის დენების შეზღუდვისათვის (4 ნახ. 1.8, ა);
 - ზეგამტარულ კაბელებში მოკლედ შერთვის დენების შეზღუდვისათვის (5 ნახ. 1.8, ა);
 - ქვესადგურის გაფართოებისათვის ახალი გენერაციის სიმძლავრეების მიერთება (ნახ. 1.8, ბ);
 - მძლავრი დატვირთვის ჩართვისათვის (ნახ. 1.8 ვ);
 - ლოკალური ენერგოსისტემის გაერთიანებისათვის (ნახ. 1.8, გ).
- ეფექტურობა მტზგ დენსაზღუდის გამოყენებისა მაღალი ძაბვის ელექტრულ ქსელებში განისაზღვრება შემდეგი ფაქტორებით:
- ახალი ხაზების ან დამატებითი სიმძლავრეების ჩართვის დროს სადგურებზე და ქვესადგურებზე არსებული საკომუტაციო მოწყობილობების შენარჩუნება.
 - ახლად მშენებარე ობიექტებში საკომუტაციო მოწყობილობებზე დანახარჯების შემცირება;
 - 110-500 კვ ძაბვის ელექტრულ ქსელებში სექციონირებაზე უარის თქმა, რომელიც უზრუნველყოფს სისტემის მუშაობის საიმედოობის ამაღლებას;
 - სამრეწველო საწარმოების კვების საიმედოობის ამაღლება;
 - ელექტროენერჯის ხარისხის ამაღლება, ქსელის ეკვივალენტური ინდუქციური წინაღობის შემცირების ხარჯზე;
 - ელექტრომოწყობილობების მუშაობის საიმედოობის ამაღლება, მოკლედ შერთვის დამყარებული და დარტყმის დენების შეზღუდვის დროს ელექტროდინამიკური და თბური ზემოქმედების შემცირების ხარჯზე;
 - ძაბვისა და ელექტროენერჯის დანაკარგების შემცირება, ტრადიციული დენსაზღუდის რეაქტორების შეცვლის ხარჯზე;



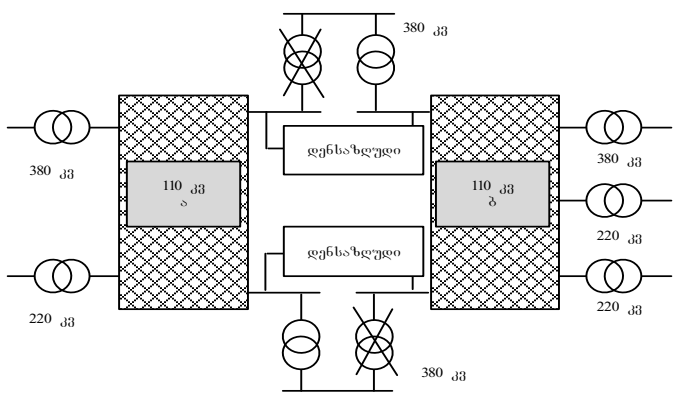
ა)



ბ)



გ)



დ)

ნახ. 1.8. ელექტრულ ქსელებში დენსაზღუდის გამოყენების არე - ელექტრომომარაგების სქემის გამარტივება, საგენერატორო ძაბვის სალტიდან ელექტროენერგიის განაწილების ორგანიზაციის შესაძლებლობის ხარჯზე

- ზეგამტარული საკაბელო ხაზის ღირებულების შემცირება და ექსპლუატაციის საიმედოობის ამაღლება.

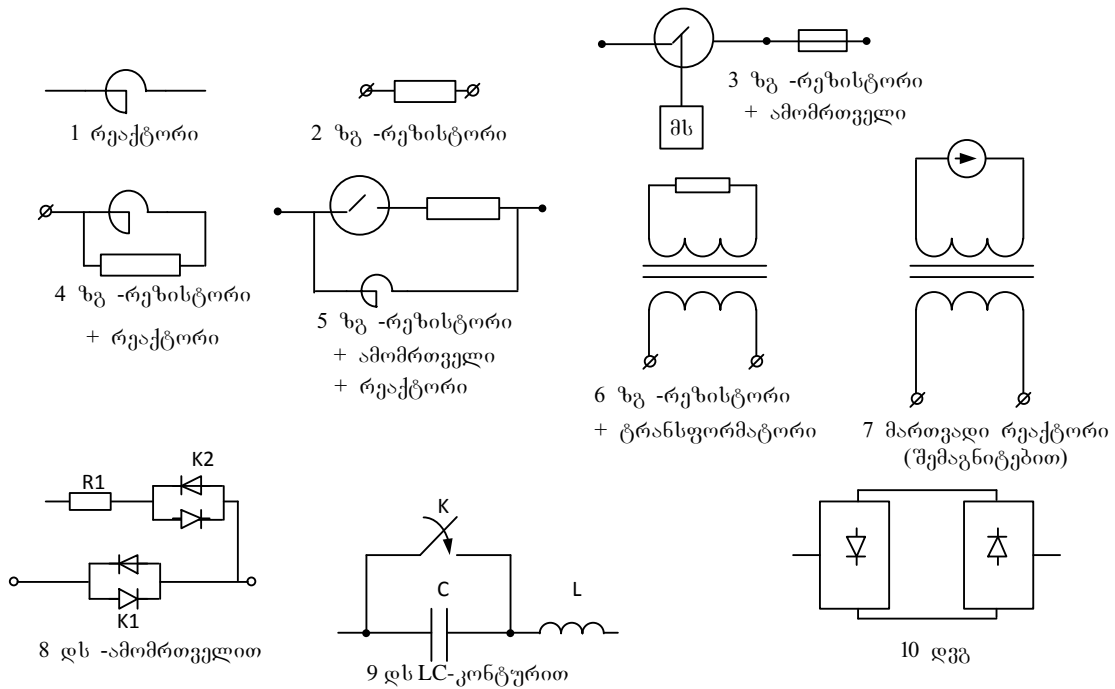
ვითვალისწინებთ მრავალსახეობას შემოთავზებული ტექნიკური გადაწყვეტისა დენსაზღუდის მოწყობილობის შექმნის მიმართულებით, მიზანშეწონილია ჩავატაროთ ტექნიკურ-ეკონომიკური შედარება მეტად პერსპექტიული ვარიანტებისა ზეგამტარული [3] და ნახევრადგამტარული [4] დენსაზღუდის (ნახ.1.9).

დენსაზღუდის საწყის ტექნიკურ მახასიათებლად, ანალიზისათვის მიღებულია მონაცემები, რომელიც მოცემულია ცხრილი 1.1-ში. მოკლედ შერთვის დენის დამყარებული მნიშვნელობის ვარირება დენსაზღუდის არსებობის დროს იძლევა საშუალებას გამოვავლინოთ დენის შეზღუდვის ჯერადობა.

$$K_{შეზ.} = I_{მშ(დ.შ-ის გარეშე)} / I_{მშ(დ.შ-ით)}$$

ცხრილი 1.1. დენსაზღუდის მონაცემები

პარამეტრი	ძაბვის კლასი			
	10 კვ	20 კვ	110 კვ	220 კვ
ნომინალური დენი, კა	1	1	2	2
მოქმედების დრო, კა	2	2	3	3
მ.შ-ის ხანგრძლივობა, მილი წმ	100	100	100	100
მ.შ-ის დარტყმის დენი (დშ-ის გარეშე)	100	100	150	150
დამყარებული მ.შ. დენი: დშ-ის გარეშე, კა დშ-ით, კა	40 20;5	40 20;5	63 40;20;5	63 40;20;5



ნახ. 1.9. მოკლე შერთვის დენების შეზღუდვისათვის ძირითადი არსებული და პერსპექტიული მოწყობილობები

ნახ. 1.9-ზე წარმოდგენილი დენსაზღვრედი მოწყობილობის ვარიანტები შეიცავს მოწყობილობების ჯგუფს ზეგამტარული ელემენტებით (2-6 ნახ. 1.9-ზე) და ჯგუფი მოწყობილობების ნახევრადგამტარული ელემენტებით (7-10 ნახ. 1.9-ზე).

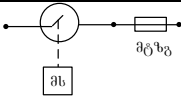
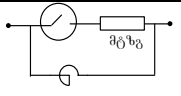
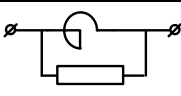
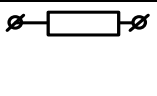
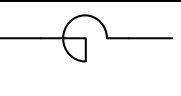
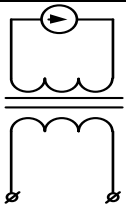
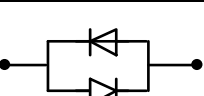
პრინციპულად მნიშვნელოვან მახასიათებელს ზეგამტარული დენსაზღვრედის (ზგდს) წარმოადგენს თვისება ბუნებრივი გადასვლა ზეგამტარული ელემენტის ზეგამტარული მდგომარეობიდან ნორმალურში ყოველგვარო გარე მართვადი სიგნალების გარეშე, მხოლოდ მასში გამავალი გაზრდილი ზეკრიტიკული დენის მყარი მნიშვნელობის ხარჯზე, რაც იძლევა საშუალებას შეიქმნას საიმედო დენსაზღვრედი მოწყობილობა, რომელსაც არ გააჩნია რაიმე დამატებითი გარე მართვადი სისტემა.

პრინციპიალური გადაწყვეტა, რომელიც უზრუნველყოფს არსებით შემცირებას საჭირო მტზგ მასალის, წარმოადგენს შემცირებას ზეგამტარში დენის გავლის ხანგრძლივობის სწრაფმოქმედი (ვაკუუმური) ამომრთველით (ვარიანტები 3 და 5 ნახ. 1.9-ზე) [5].

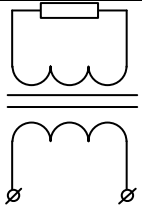
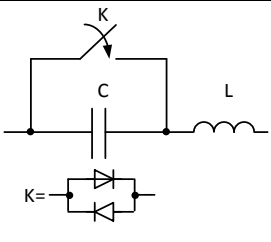
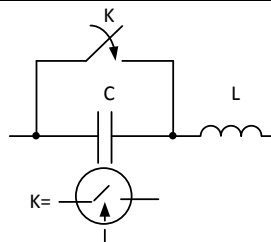
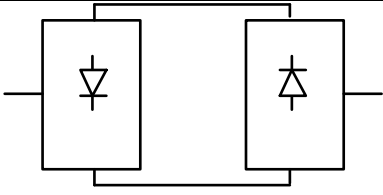
დენსაზღუდის განხილული ვარიანტების ტექნიკურ-ეკონომიკური ანალიზის შედეგები მოცემულია ცხრილი 1.2-ში, სადაც მოცემულია მონაცემები დენსაზღუდის ვარიანტების ხვედრითი ღირებულება დენსაზღუდის სხვადასხვა კოეფიციენტებისათვის.

შედეგების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ პერსპექტიულ მიმართულებას დენსაზღუდის დამუშავებისა წარმოადგენს მიმართულება, დაკავშირებული კომბინირებული დენსაზღუდის მოწყობილობის შექმნისა, რომელიც დაფუძნებულია ზეგამტარული ელემენტების და ტრადიციული, პირველ რიგში სწრაფმომქმდი ვაკუუმური საკომუტაციო აპარატების და რეაქტორების გამოყენებაზე.

ცხრილი 1.2. დენსაზღუდის ვარიანტების ტექნიკურ-ეკონომიკური ანალიზის შედეგები

დენსაზღუდის ტიპები							
ხვედრილი ღირებულება	15-11\$/კვა როცა $K_{შეზ} = 5 - 6$ 70-80\$/კვა როცა $K_{შეზ} = 13$ (220 კვ)	10-8\$/კვა როცა $K_{შეზ} = 1.5 - 2.0$	30-22\$/კვა როცა $K_{შეზ} = 1.5 - 2.0$	15-11\$/კვა როცა $K_{შეზ} = 5 - 6$	1-3\$/კვა როცა $K_{შეზ} = 1.5 - 2.0$	12-14\$/კვა როცა $K_{შეზ} = 1.5 - 10$	10-5\$/კვა როცა $K_{შეზ} = 10 - 15$
მშ-ის დენის ზემოქმედების ხანგრძლივობა, მწმ	10	10	100	100	100	100	10
გავლენა დაბვის დონეზე, %	$\Delta U \sim 0$	$\Delta U \sim 0$	$\Delta U \sim 0$	$\Delta U \sim 0$	$\Delta U \sim 2 - 40\%$	$\Delta U \sim 0.4 - 7.5\%$	$\Delta U < 0.1\%$
დანაკარგები, %	$\Delta P \sim 0$	$\Delta P \sim 0$	$\Delta P \sim 0$	$\Delta P \sim 0$	$\Delta P \sim 0.1 - 0.3\%$	$\Delta P \sim 0.5 - 0.7\%$	$\Delta P \sim 0.3 - 0.4\%$
შენიშვნა	პერსპექტივაში ღირებულება შეიძლება შემცირდეს 2-3 ჯერ						

ცხრილი 12 (გაგრძელება)

დენსაზღუდის ტიპები				
ხვედრითი ღირებულება	47-35\$/კვა როცა $K_{შეზ} = 4.0 - 8.0$	35-40\$/კვა როცა $K_{შეზ} = 4 - 8$	25-30\$/კვა როცა $K_{შეზ} = 4 - 8$	200-130\$/კვა
მშ-ის დენის ზემოქმედების ხანგრძლივობა, მწმ	100	10	100	100
გაველენა ძაბვის დონეზე, %	$\Delta U < 2\%$	$\Delta U < 0.1\%$	$\Delta U < 0.1\%$	$\Delta U \sim 0$
დანაკარგები, %	$\Delta P \sim 0.2 - 0.3\%$	$\Delta P \sim 0.3-0.4\%$	$\Delta P \sim 0.1 - 0.3\%$	$\Delta P \sim 1.6 - 1.8\%$
შენიშვნა				დენის ვენტილური გარდამქმნელისთვის (დვგ) 10-220 კვ ძაბვით

1.3. ენერგეტიკული დანიშნულების მაღალტემპერატურული

(77 კ) ზეგამტარული დენსაზღუდი

ელექტრულ სისტემაში მოკლე შერთვის (მშ) დენების ზრდის დონეები, უყენებს ამაღლებულ მოთხოვნას, ელექტროდინამიკური და თერმული მედეგობის უზრუნველყოფისათვის ელექტროტექნიკურ მოწყობილობას. განსაკუთრებით აქტუალურია ეს პრობლემა ზეგამტარული (ზგ) ელექტრომოწყობილობებისთვის, როგორცაა: ზგ ტრანსფორმატორები, ზგ გენერატორები, ზგ ელექტროგადამცემი ხაზები და ა.შ. ზგ ელექტრომოწყობილობების შიდა წინაღობა, შედარებით ტრადიციული ელექტრომოწყობილობების შიდა წინაღობასთან, მნიშვნელოვნად დაბალია, რის შედეგად მშ-ის დენებმა შეიძლება მიიღოს დაუშვებლად მაღალი მნიშვნელობა.

მშ-ის დენების შეზღუდვის ეფექტურ საშუალებას წარმოადგენს სწრაფმომქმედი ზგ დენსაზღუდი მოწყობილობა, რომელიც მუშაობს არაწრფივი ვოლტამპერული მახასიათებლის საფუძველზე, როცა ზგ-ის წინაღობა იცვლება დენის სიდიდისგან დამოკიდებულებაში, რაც საშუალებას იძლევა შეზღუდოს როგორც დარტყმის, ისე დამყარებული მშ-ის დენები. სწრაფქმედება ზგ დენსაზღუდის (ზგდს) მიიღწევა იმის შედეგად, რომ იცვლება ფაზური მდგომარეობა ზგ-ის გაზრდილი მაგნიტური ველის ზემოქმედებით [6], წარმოქმნილი უშუალოდ თვით მშ-ის დენით, სადაც გამორიცხულია მართვის ესა თუ ის შუალედური რგოლი. სწრაფმომქმედი ზგდს შეიძლება გამოყენებული იქნეს როგორც ცვლადი, ისე მუდმივი დენის წრედებში.

ზგდს არაწრფივი ელემენტების სახეობის მიხედვით, შეიძლება წარმოვიდგინოთ შემდეგი ტიპები:

1. დროსელური ზგდს. არახაზოვანი ელემენტი დროსელურ ზგდს-ში შესრულებულია ზგ დროსელის სახით მცირე ინდუქციურობით. მოკლე შერთვის რეჟიმში დროსელი კარგავს ზეგამტარობას და გადადის

ნორმალურ მდგომარეობაში, ზღუდავს მშ-ის დენს. არახაზოვანი ელემენტის პარალელურად შეერთებულია ზგ დროსელი წრფივი მახასიათებლით, რომლის დანიშნულებას წარმოადგენს დენურ განტვირთვას და დანაკარგების შემცირებას არახაზოვან ელემენტში.

2. ზგდს ელექტრომაგნიტური ეკრანით. არახაზოვანი ელემენტი აღნიშნულ ზგდს-ში შესრულებულია ელექტრომაგნიტური ეკრანის სახით, განსაზღვრული მოცულობის ეკრანიერებით მაგნიტური ველის შეღწევადობისაგან. ეკრანი იმყოფება ელექტრომაგნიტურ ველში, შექმნილი დამამაგნიტებელი გრაგნილის დატვირთვის დენით დასაცავი ობიექტის, და გადადის ნორმალურ მდგომარეობაში მშ-ის რეჟიმში, დენის გაზრდის დროს. ამ შემთხვევაში საწყისი მოცულობა ეკრანიერებული ნორმალურ რეჟიმში, წყვეტს ეკრანიერებას, მაგნიტური ველი მასში იზრდება, რაც იწვევს, შესაბამისად, ინდუქციურობის გაზრდას, ინდუქციურ წინაღობას და, როგორც ამის შესაბამისად, მშ-ის დენის შეზღუდვას.

3. ტრანსფორმატორული ზგდს. არახაზოვან ელემენტს ტრანსფორმატორული ტიპის ზგდს-ში წარმოადგენს ზგ პირველადი ან მეორადი გრაგნილი. მშ-ის რეჟიმში ტრანსფორმატორის გრაგნილი გადადის ზგ-დან ნორმალურ მდგომარეობაში, რაც იწვევს ტრანსფორმატორის გადასვლას მოკლე შერთვის რეჟიმიდან უქმი სვლის (უს) რეჟიმში ტრანსფორმატორის ინდუქციური წინაღობის გაზრდით მშ-ის წინაღობიდან უს წინაღობამდე, რაც თავის მხრივ იწვევს მშ-ის დენის შეზღუდვას.

ყველა ტიპის ზგდს-ში მიმდინარეობს ელექტრომაგნიტური პროცესები, გამოწვეული წინაღობის გაზრდით ფაზური გადასვლის დროს ზგ არახაზოვანი ელემენტის დაშუნტების დროს, მისი ინდუქციური წინაღობით. ამასთან დაკავშირებით ანგარიში ზგდს-ის შეიძლება განხორციელდეს ნახ.1.10 მოცემული სქემის მიხედვით, სადაც განხილულია მაგალითის სახით ზგ ტურბოგენერატორის დაცვა (მისი წინაღობა $r_r = 0$).

აღნიშნულ სქემაში ზგ ტურბოგენერატორი წარმოდგენილია ზეგარდამავალი ემმ-ით e'' და ზეგარდამავალი ინდუქციურობით L'' ,

U_0 - ძაბვა ზგდს-ზე,

U_H - ძაბვა დატვირთვაზე,

R - ზგ არაწრფივი ელემენტის წინაღობა, რომლის წინაღობა იცვლება 0-დან ზგ მდგომარეობაში R_H -მდე ნორმალურ მდგომარეობაში,

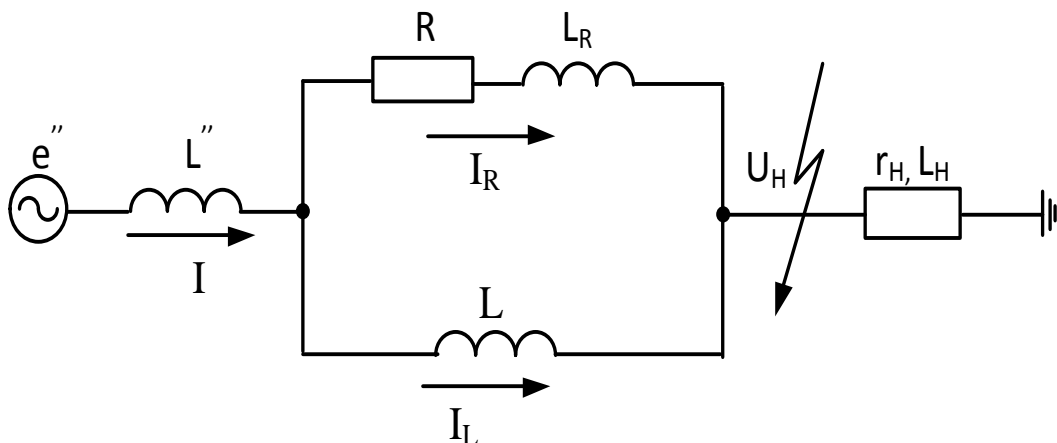
L_R - არაწრფივი ელემენტის ინდუქციურობა,

r_H - დატვირთვის წინაღობა,

L - წრფივი დროსელის ინდუქციურობა,

L_H - დატვირთვის ინდუქციურობა.

i, i_R, i_L -დენები ზგ ტურბოგენერატორის, ზგ არაწრფივი ელემენტის და წრფივი დროსელის.



ნახ.1.10. ტურბოგენერატორის ჩანაცვლების სქემა ზგდს-ით

ზგ არაწრფივ ელემენტში დენების შეზღუდვასთან დაკავშირებით და მოკლე დროით მათი გადინებით დროსელური და ტრანსფორმატორული ზგდს-თვის, შეიძლება გავაკეთოთ დაშვება ტემპერატურის მუდმივობაზე ნახევარპერიოდის განმავლობაში. ზგდს-ისათვის ელექტრომაგნიტური ეკრანით, აუცილებელია ამოვხსნათ ეკრანის თბური ბალანსის განტოლება მნიშვნელოვანი დანაკარგებისათვის, მასში გრიგალური დენებისაგან და ჰისტერეზისული მოვლენისაგან და ჯოულის დანაკარგებისაგან R_H

წინააღმდეგობაში, ეკრანის ნორმალურ მდგომარეობაში. ეს განტოლება მაღალტემპერატურული ზეგანისათვის, თხევადი აზოტით გაცივებით, გააჩნია სახე (საწყისი პირობებით როცა $t = 0, T = T_N$):

$$C \frac{dT}{dt} + hS(T - T_N) = \Delta W,$$

სადაც C, S, T -თბოტევადობა, გასაცივებელი ზედაპირი და ტემპერატურა ზეგანის არაწრფივი ელემენტის, ΔW - სითბოს გამოყოფის სიმძლავრე ეკრანში ნორმალურ მდგომარეობაში, T_N - თხევადი აზოტის ტემპერატურა, h -თბოგადაცემის კოეფიციენტი ზეგანის არაწრფივი ელემენტის ზედაპირიდან თხევად აზოტში T_N ტემპერატურით.

ჩავატაროთ ანალიზი ელექტრომაგნიტური პროცესების, დროსელურ ზგდს-ის მაგალითზე. ავღნიშნოთ R_t ზეგანის არაწრფივი ელემენტის წინააღმდეგობა t დროის მომენტში. მაშინ ზგ ტურბოგენერატორის გარდამავალი პროცესების განტოლებას ზგდს-ით გააჩნია შემდეგი სახე:

$$i = i_R + i_L \quad (1.1)$$

$$e'' = U_o + L'' \frac{di}{dt} \quad (1.2)$$

$$U_o = R_t i_R + L_R \frac{di_R}{dt} \quad (1.3)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} \left(R_t i_R + L_R \frac{di_R}{dt} \right) \quad (1.4)$$

ჩავსვათ U_o (1.3) განტოლებიდან და i მნიშვნელობა (1.1) განტოლებიდან (1.2) განტოლებაში, მივიღებთ:

$$e'' = R_t i_R + L_R \frac{di_R}{dt} + L'' \frac{di_R}{dt} + L'' \frac{di_L}{dt} \quad (1.5)$$

ჩავსვათ $\frac{di_L}{dt}$ მნიშვნელობა (1.4) განტოლებიდან (1.5) განტოლებაში, გარდაქმნის შემდეგ მივიღებთ:

$$e'' = R_t \left(1 + \frac{L''}{L} \right) i_R + \left(L_R + L'' + \frac{L''}{L} L_R \right) \frac{di_R}{dt} \quad (1.6)$$

(1.6) განტოლებიდან განვსაზღვრავთ i_R , (1.4) განტოლებიდან ვპოულობთ დენს დროსელში:

$$i_L = \frac{1}{L} \int_0^t \left(R_t i_R + L_R \frac{di_R}{dt} \right) dt \quad (1.7)$$

ტურბოგენერატორის დენს ვპოულობთ (1.1) განტოლებიდან. (1.1)-(1.7) განტოლებებში R_t წინაღობა იცვლება ზგ არაწრფივი ელემენტის ფაზური მდგომარეობისგან დამოკიდებულებაში.

ზგდს-ის ანგარიშის ამოცანა მდგომარეობს, (1.1)-(1.7) განტოლების გამოყენებით განისაზღვროს პარამეტრების R_t, L_R, L, L'' ოპტიმალური მნიშვნელობები, რომლის დროსაც:

- 1) ზგდს-ის ჩართვა არ არღვევს ტურბოგენერატორის ნორმალურ რეჟიმს, არ იწვევს ენერჯის დანაკარგებს და ძაბვის ვარდნას;
- 2) უზრუნველყოფილი ხდება მშ-ის დენის საჭირო შეზღუდვა;
- 3) ზგდს-ში მიიღწევა მინიმალური თბოგამოყოფა, სტაბილურობა და საიმედო მუშაობა;
- 4) ზგდს ხასიათდება მინიმალური წონაზომის მაჩვენებლებით და ღირებულებით.

აღნიშნული ამოცანის გადაწყვეტისათვის აუცილებელია (1.1)-(1.7) განტოლებების საფუძველზე ანგარიშების ჩატარება. ანგარიში ტარდება ინტერვალების მიხედვით დროში. იმასთან დაკავშირებით, რომ მშ-ის დენის მაქსიმალური მნიშვნელობა იცვლება მშ-ის დაწყების მომენტიდან დამოკიდებულებაში, ვირჩევთ შედარებით არასასურველ ვარიანტს, როცა მშ მიმდინარეობს დროის მომენტში $= 0, e'' = 0$. ასეთ შემთხვევაში მშ-ის დენს აღნიშნულ ფაზაში გააჩნია მაქსიმალური აპერიოდული მდგენელი, შედარებით მოკლე შერთვასთან სხვა ფაზაში, და დარტყმის დენი აღწევს თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას.

1.4. ზეგამტარული ელექტრომოწყობილობების მოკლე შერთვის დენების შეზღუდვა ზეგამტარული დენსაზღუდით და მისი ანგარიში დროში ინტერვალების მიხედვით

განხილულია ენერგეტიკული დანიშნულების მაღალ-ტემპერატურული (77კ) ზეგამტარული დენსაზღუდი (ზგდს) [7], რომელშიც

მიმდინარეობს ელექტრომაგნიტური პროცესები, გამოწვეული წინააღმდეგობის გაზრდით ფაზური გადასვლის დროს ზგ წრფივი ელემენტის დაშუნტების დროს, მისი ინდუქციური წინააღმდეგობით. ამასთან დაკავშირებით ანგარიში ზგდს-ის შეიძლება განხორციელდეს ნახ.1 მოცემული სქემის მიხედვით, სადაც განხილულია მაგალითის სახით ზგ ტურბოგენერატორის დაცვა (მისი წინააღმდეგობა $r_r = 0$). აღნიშნულ სქემაში ზგ ტურბოგენერატორი წარმოდგენილია ზეგარდამავალი ემმ-ით e'' და ზეგარდამავალი ინდუქციურობით L'' .

U_o - ძაბვა ზგდს-ზე,

U_H - ძაბვა დატვირთვაზე,

R -ზე არაწრფივი ელემენტის წინააღმდეგობა, რომელიც იცვლება 0-დან ზგ მდგომარეობაში R_H -მდე ნორმალურ მდგომარეობაში,

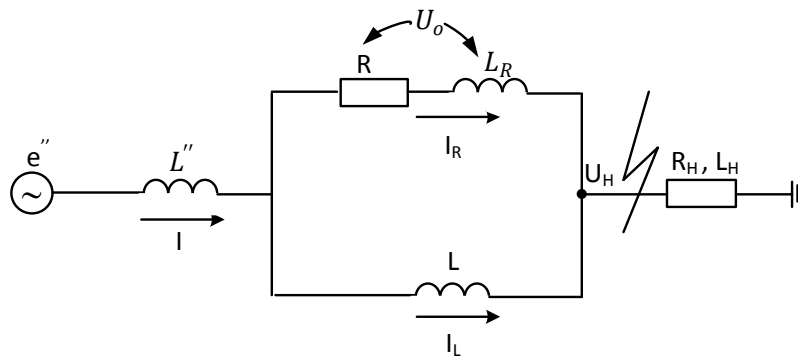
L_R - არაწრფივი ელემენტის ინდუქციურობა,

r_H -დატვირთვის წინააღმდეგობა,

L - წრფივი დროსელის ინდუქციურობა,

L_H - დატვირთვის ინდუქციურობა.

i, i_R, i_L -დენები ზგ ტურბოგენერატორის, ზგ არაწრფივი ელემენტის და წრფივი დროსელის.



ნახ.1.11. ზგ ტურბოგენერატორის ჩანაცვლების სქემა ზგდს-ით

ჩავატაროთ ანალიზი ელექტრომაგნიტური პროცესების, დროსელურ ზგდს-ის მაგალითზე. ავღნიშნოთ R_r ზგ არაწრფივი ელემენტის წინააღმდეგობის

მნიშვნელობა t დროის მომენტში. მაშინ ზგ ტურბოგენერატორის გარდამავალი პროცესების განტოლებას ზგდს-ით გააჩნია შემდეგი სახე:

$$i = i_R + i_L \quad (1.8)$$

$$e'' = U_o + L'' \frac{di}{dt} \quad (1.9)$$

$$U_o = R_t i_R + L_R \frac{di_R}{dt} \quad (1.10)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} \left(R_t i_R + L_R \frac{di_R}{dt} \right) \quad (1.11)$$

ჩავსვათ U_o (1.10) განტოლებიდან და i მნიშვნელობა (1.8) განტოლებიდან (1.9) განტოლებაში, მივიღებთ:

$$e'' = R_t i_R + L_R \frac{di_R}{dt} + L'' \frac{di_R}{dt} + L'' \frac{di_L}{dt} \quad (1.12)$$

ჩავსვათ $\frac{di_R}{dt}$ მნიშვნელობა (1.11) განტოლებიდან (1.12) განტოლებაში, გარდაქმნის შემდეგ მივიღებთ::

$$e'' = R_t \left(1 + \frac{L''}{L} \right) i_R + \left(L_R + L'' + \frac{L''}{L} L_R \right) \frac{di_R}{dt} \quad (1.13)$$

(1.13) განტოლებიდან განვსაზღვრავთ i_R , (1.11) განტოლებიდან ვპოულობთ დენს დროსელში::

$$i_L = \frac{1}{L} \int_0^t \left(R_t i_R + L_R \frac{di_R}{dt} \right) dt \quad (1.14)$$

ტურბოგენერატორის დენს ვპოულობთ (1.8) განტოლებიდან.

(1.8)-(1.14) განტოლებებში R_t წინაღობა იცვლება ზგ არაწრფივი ელემენტის ფაზური მდგომარეობისაგან დამოკიდებულებაში.

ზგდს-ის ანგარიშის ამოცანის გადაწყვეტისათვის აუცილებელია (1.8)-(1.14) განტოლებების საფუძველზე ანგარიშების ჩატარება. ანგარიში ტარდება ინტერვალების მიხედვით დროში. ვირჩევთ შედარებით არასასურველ ვარიანტს, როცა მოკლე შერთვა (მშ) მიმდინარეობს დროის მომენტში $t = 0, e'' = 0$. ასეთ შემთხვევაში მშ-ის დენს აღნიშნულ ფაზაში გააჩნია მაქსიმალური აპერიოდული მდგენელი, შედარებით მოკლე შერთვასთან სხვა ფაზაში, და დარტყმის დენი აღწევს თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას.

ვთვლით, რომ მშ მიმდინარეობს წრედში ზგდს-ის შემდეგ, დატვირთვის დამოკლების დროს (ნახ.1.11).

დროის I ინტერვალი: $t < t_1$ (ნახ.1.12). ზგ არაწრფივი ელემენტი იმყოფება ზგ მდგომარეობაში, $R_t = 0$. i_R დენის განსაზღვრისათვის ვიყენებთ (1.13) განტოლებას, როცა $R_t = 0$, შედეგად ვღებულობთ:

$$e'' = \left(L_R + L'' + \frac{L''}{L} L_R \right) \frac{di_R}{dt},$$

$$\text{აქედან } i_R = \frac{1}{L_R + L'' + \frac{L''}{L} L_R} \int_0^t e'' dt \quad (1.15)$$

მივიღებთ $e'' = \sqrt{2} E'' \sin \omega t$, (1.15) განტოლებიდან მივიღებთ

$$i_R = \frac{\sqrt{2} E''}{\omega \left(L_R + L'' + \frac{L''}{L} L_R \right)} (-\cos \omega t) \Big|_0^t = \frac{\sqrt{2} E''}{\omega \left(L_R + L'' + \frac{L''}{L} L_R \right)} (1 - \cos \omega t) \quad (1.16)$$

როცა $0 < t < t_1$. ზგდს-ის გამორიცხვის დროს i_R დენი, როცა $\omega t = \pi$ აღწევს თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას:

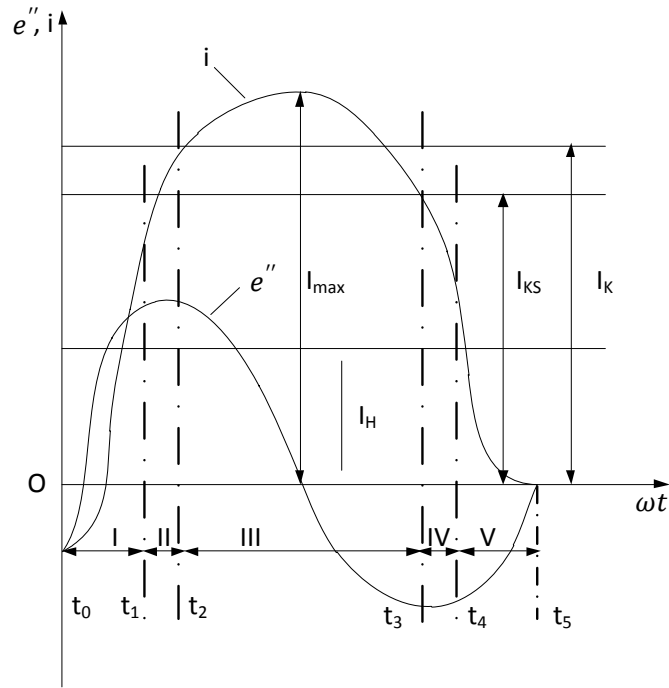
$$I_{km} \cong \frac{\sqrt{2} E''}{\omega L''} = \frac{\sqrt{2} E''}{X''}, \quad (1.17)$$

რაც დაუშვებელია ტურბოგენერატორისთვის, და ის უნდა შეიზღუდოს პერიოდის პირველ მეოთხედში.

დროის II ინტერვალი: $t_1 < t < t_2$. t_1 დროის მომენტში i_R დენი აღწევს I_{KS} მნიშვნელობას, რომლის დროსაც ზგ არაწრფივი ელემენტი გადადის რეზისტულ მდგომარეობაში. I_{KS} დენი ნაკლებია I_K კრიტიკულ დენზე ზგ არაწრფივი ელემენტის: $I_{KS} < I_K, I_K = k_1 I_H$, სადაც I_H -ტურბოგენერატორის ნომინალური დენი, $k_1 > 1$. k_1 კოეფიციენტი გვიჩვენებს ფარდობით ჯერადობას კრიტიკული დენის ტურბოგენერატორის ნომინალური დენთან. I_{KS} დენის მნიშვნელობა განისაზღვრება ზგ სადენის ვოლტამპერული მახასიათებლით [8], რომლისგანაც შესრულებულია ზგ არაწრფივი ელემენტი.

რეზისტულ მდგომარეობაში R_t წინაღობა იზრდება თავისი ნულოვანი მდგომარეობიდან, R_H მდგომარეობამდე, ე.ი. ნორმალურ მდგომარეობაში წინაღობის მნიშვნელობა. R_t წინაღობის განსაზღვრისათვის შეიძლება გამოვიყენოთ შემდეგი გამოსახულება

$$R_t = \frac{i_R - I_{KS}}{I_K - I_{KS}} R_H \quad \text{როცა } I_{KS} \leq i_R \leq I_K, \quad (1.18)$$



ნახ. 1.12. ინტერვალების მიხედვით ზგ არაწრფივი ელემენტში დენის ანგარიში

რომელიც აღწერს წინააღობის ზრდას $R_t = 0$ დან (როცა $i_R = I_{KS}$) $R_t = R_H$ (როცა $i_R = I_K$).

i_R დენის განსაზღვრისათვის რეზისტულ მდგომარეობაში (1.13) და (1.17) დან მივიღებთ:

$$\sqrt{2} E'' \sin \omega t = \frac{(i_R - I_{KS})}{I_K - I_{KS}} \left(1 + \frac{L''}{L} \right) i_R + \left(L_R + L'' + \frac{L''}{L} L_R \right) \frac{di_R}{dt}, \quad (1.19)$$

როცა $t_1 < t < t_2$.

i_R დენი იზრდება I_{KS} სიდიდიდან I_K -მდე. t_2 დროის მომენტი განისაზღვრება (1.19) განტოლებიდან: როცა $t = t_2, i_R = I_K$. (1.19) განტოლება წარმოადგენს არაწრფივს.

მეორე ინტერვალის განმავლობაში ენერჯის ჯამური დანაკარგები ზგ არაწრფივ ელემენტში შეადგენს

$$\Delta W_y = \int_{t_1}^{t_2} i_R^2 \left(\frac{i_R - I_{KS}}{I_{KS} - I_K} \right) R_H dt \quad (1.20)$$

დროის III ინტერვალი: $t_2 < t < t_3$. ზგ არაწრფივი ელემენტი აღნიშნულ დროის ინტერვალში იმყოფება ნორმალურ მდგომარეობაში.

i_R დენის განსაზღვრისათვის ნორმალურ მდგომარეობაში არაწრფივი ზგდს გვექნება:

$$\sqrt{2} E'' \sin \omega t = \left(1 + \frac{L''}{L}\right) R_H i_R + \left(L_R + L'' + \frac{L''}{L} L_R\right) \frac{di_R}{dt}, \quad (1.21)$$

როცა $t_2 < t < t_3$

აღნიშნული დროის ინტერვალში i_R დენის სიდიდე იზღუდება R_H წინააღობით (ნახ.1.12), დენის მნიშვნელოვანი ნაწილი ამ შემთხვევაში, (1.14) განტოლების თანახმად, წრფივ დროსელში R_H, L_R, L პარამეტრების სიდიდეების შერჩევასთან დამოკიდებულებაში. ზგ ტურბოგენერატორის დენი აგრეთვე შეზღუდულია ((1.8) განტოლება). დროის აღნიშნულ ინტერვალში არაწრფივ ელემენტში მიმდინარეობს ენერგიის დანაკარგები:

$$\Delta W_H = \int_{t_2}^{t_3} R_H i_R^2 dt$$

$\omega t = \pi$ მომენტში e'' ემპ-ის მნიშვნელობა გადადის ნულზე და შემდეგ ხდება უარყოფითი. ამასთან დაკავშირებით i_R როცა $\omega t = \pi$ აღწევს თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას, რომელიც მნიშვნელოვნად დაბალია, ვიდრე მაქსიმალური მშ დენი, განსაზღვრული (1.17).

დენის მაქსიმალური მნიშვნელობა ტოლია $I_{max} = k_2 I_H$, სადაც k_2 - დენის მაქსიმალური მნიშვნელობის ჯერადობა ზგდს არსებობის დროს, როცა $k_2 > k_1$. აღნიშნული ჯერადობა შეიძლება განისაზღვროს ზგდს პარამეტრების შერჩევით.

დროის IV ინტერვალი: $t_3 < t < t_4$. i_R დენის შემცირების დროს დგება ტ_3 დროის მომენტი, რომლის დროს i_R დენი აღწევს I_k დენის კრიტიკულ მნიშვნელობას და შემდეგ ხდება I_k -ზე ნაკლები.

აღნიშნულ დროის ინტერვალში ზგ არაწრფივი ელემენტი ნორმალური მდგომარეობიდან გადადის რეზისტორულ მდგომარეობაში, მაგრამ დროის II ინტერვალისაგან განსხვავებით R_t წინააღობა i_R დენის შემცირებასთან დაკავშირებით I_k სიდიდიდან I_{KS} -მდე, იქნება შემცირებული R_H სიდიდიდან ნულამდე. i_R დენის განსაზღვრისათვის გვაქვს განტოლება:

$$\sqrt{2} E'' \sin \omega t = \frac{(i_R - I_{KS}) R_H}{I_k - I_{KS}} \left(1 + \frac{L''}{L}\right) i_R + \left(L_R + L'' + \frac{L''}{L} L_R\right) \frac{di_R}{dt} \quad (1.21)$$

როცა $t_3 < t < t_4$

i_R დენი მცირდება I_K სიდიდიდან I_{KS} მდე.

აღნიშნულ ინტერვალში დანაკარგები ზგდს-ში განისაზღვრება (1.20) განტოლებით.

დროის V ინტერვალი: $t_4 < t < t_5$. ზგ არაწრფივი ელემენტი თავიდან იმყოფება ზეგამტარულ მდგომარეობაში, და i_R დენი განსაზღვრება განტოლებით, ანალოგიურად იმისა, რომელიც სამართლიანია დროის პირველ ინტერვალში:

$$i_R = \frac{\sqrt{2} E''}{\omega(L_R + L'' + \frac{L''}{L} L_R)} (1 - \cos \omega t) \quad (1.22)$$

ასე მთავრდება დენების განსაზღვრა გარდამავალ პროცესში დროის პირველ ციკლში (ხანგრძლივობით 0,02 წმ) მშ-ის შემდეგ. აღნიშნული საკმარისია ზგდს-ის პარამეტრების განსაზღვრისათვის, აუცილებელი მშ-ის დენების შეზღუდვისათვის.

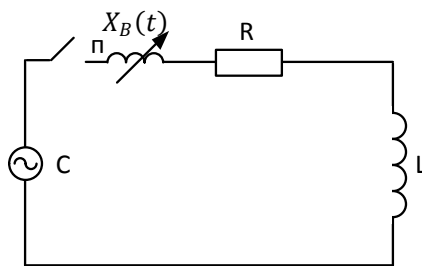
შემდეგი ციკლების ანგარიში დაზიანებული უბნის გამორთვის მომენტამდე ამომრთველებით, მიმდინარეობს ანალოგიურად პირველი ციკლის ანგარიშის დროის ინტერვალების მიხედვით, ამ შემთხვევაში მშ-ის დენები თანდათანობით იქნება შემცირებული მშ-ის დენების დამყარებული მნიშვნელობამდე.

მშ-ის დენების ანგარიშის მოცემული მეთოდი დროის ინტერვალების მიხედვით იძლევა შესაძლებლობას სხვადასხვა ტიპის ზგდს-ების შედარების, მათი გამოყენების ოპტიმიზაციის მიზნით, სხვადასხვა ელექტროენერგეტიკული ობიექტების დაცვისათვის.

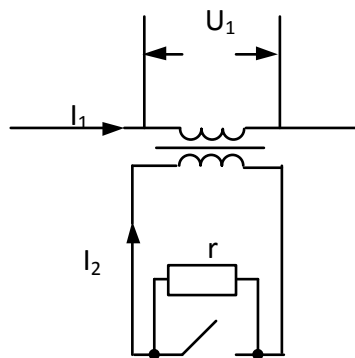
1.5. ტრანსფორმატორული ტიპის ზეგამტარული დენსაზღუდი

ამჟამად ენერგოსისტემაში მოკლე შერთვის დენების შეზღუდვისათვის გამოიყენება არარეგულირებადი რეაქტორი წრფივი მახასიათებლებით. ნახ.1.13 ნაჩვენებია წრედის პრინციპული სქემა ამომრთველით, რომელსაც

გააჩნია ცვლადი ინდუქციური წინაღობა $X_B(t)$, რომელიც რეაგირებს წრედის გამორთვის პროცესში, Π შუალედში, წრედის ნარჩი დენის გაწყვეტისათვის, $I_{ocT} \approx U_H / X_{Bmax}$, თუ მხედველობაში არ მივიღებთ საკუთარ წინაღობას მ.შ-ის დროს [9]. დენსაზღვდი მოწყობილობის ძირითად ელემენტს წარმოადგენს ტრანსფორმატორი მიმდევრობითი ჩართვით, რომლის მეორადი წრედი ჩართულია ამა თუ იმ არაწრფივ წინაღობაზე ნახ. 1.14.



ნახ.1.13. წრედის პრინციპული სქემა



ნახ.1.14. ტრანსფორმატორი მიმდევრობით ჩართვით

აუცილებელია ავღნიშნოთ, რომ არაწრფივ წინაღობად შეიძლება გამოყენებული იქნეს სხვადასხვა სწრაფმომქმედი საკომუტაციო წინაღობა, რომელსაც გააჩნია მინიმალური წინაღობა. მათ მიეკუთვნება სხვადასხვა ზეგამტარული საკომუტაციო მოწყობილობა, კრიოტრონი, დნობადი მცველი და სხვა.

დენის შეზღუდვა სქემაში ნახ.1.14, ხორციელდება ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილის გახსნით. ნომინალურ რეჟიმში მუშაობის დროს ტრანსფორმატორის წინაღობა ახლოსაა ტრანსფორმატორის მოკლედ შერთვის წინაღობასთან და გააჩნია მინიმალური წინაღობა. მ.შ-ის აღძვრის დროს ხაზში, ე.ი. ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილში დენი იზრდება, რაც იწვევს დენი ზრდას მეორად გრაგნილში და მოყავს მოქმედებაში საკომუტაციო მოწყობილობა. ამ შემთხვევაში წინაღობა მიიღებს მნიშვნელობას, უქმი სვლის წინაღობისა, რომლის ხარჯზე მიმდინარეობს დასაცავ წრედში მ.შ-ის დენის შეზღუდვა.

განსაკუთრებულ ინტერესს წარმოადგენს სწრაფმომქმედი მოწყობილობა, რომელსაც გააჩნია უნარი შეზღუდოს მ.შ-ის დენი პირველი ნახევარპერიოდის განმავლობაში მისი წარმოქმნის შემდეგ, ე.ი. შესწევს უნარი შეზღუდის როგორც დამყარებული, ისე მ.შ-ის დარტყმის დენი [10].

საწყისი მონაცემები ტრანსფორმატორული ტიპის დენსაზღუდი მოწყობილობის ანგარიშისათვის წარმოდგენილია ცხრილი 1.3. მოცემული მნიშვნელობა ΔU_H განსაზღვრავს მაქსიმალურ დასაშვებ წინაღობას დენსაზღუდი მოწყობილობის ნომინალურ რეჟიმში (ე.ი. მიმდევრობით ჩართული ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილის მ.შ-ის დროს).

$Z_{II} = \Delta U_H / I_{II}$, შესაბამისად, Z_{II} მნიშვნელობა რეაქტორებისათვის 10 კვ და 110 კვ არ უნდა აჭარბებდეს 0.15 ომი და 1.65 ომი, შესაბამისად. დამყარებულ რეჟიმში დენის შეზღუდვა, დენსაზღუდი მოწყობილობის წინაღობამ უნდა უზრუნველყოს დენის შეზღუდვა სიდიდით 3 კა. ე.ი. აღნიშნულ რეჟიმში მისი წინაღობა Z_o უნდა იყოს არა ნაკლები 3.33 ომი ვარიანტისთვის 10 კვ და 36.6 ომი 110 კვ ძაბვის ვარიანტისთვის.

დენსაზღუდი მოწყობილობის ანგარიშისათვის გამოიყენება ტრადიციული მეთოდი ტრანსფორმატორების ანგარიშისათვის, ორი განსხვავებული ფაქტორის გამორიცხვით, განპირობებული ამოცანის სპეციფიკიდან.

ცხრილი 1.3. დენსაზღვდი მოწყობილობის ანგარიშისთვის ტექნიკური დავალების საწყისი მონაცემები

დასახელება	აღნიშვნა	საზ. ერთ.	მნიშვნელობა	
			№1	№2
ნომინალური ძაბვა	U_H	კვ	10	110
ნომინალური დენი. მომქმედი მნიშვნელობა. (ქსელის ნომინალური მუშაობის რეჟიმში, მეორადი გრაგნილი მოკლედ ჩართულია)	I_H	კა	1	1
ნომინალურ რეჟიმში ძაბვის ვარდნა. მომქმედი მნიშვნელობა. არა უმეტეს (მეორადი გრაგნილი მოკლედ ჩართულია)	ΔU_H	კვ	0.15	1.65
დაცვის ამოქმედების დენი. მყისი მნიშვნელობა. (ქსელის დენი, რომლის დროსაც მიეწოდება სიგნალი მეორადი გრაგნილის გახსნაზე)	I_p	კა	3	3
დაცვის ამოქმედების დრო. არა უმეტეს (მეორადი გრაგნილის გახსნის დრო)	τ_p	მკწმ	5	5
დარტყმის დენი. მყისი მნიშვნელობა არა უმეტეს (მ.შ-ის რეჟიმში დენის მაქსიმალური დასაშვები მნიშვნელობა)	I_{yg}	კა	12	12
დამყარებულ რეჟიმში შეზღუდვის დენი. მომქმედი მნიშვნელობა (ქსელში დამყარებული დენის მნიშვნელობა იმ პირობებში: მეორადი გრაგნილი გახსნილია, დატვირთვის წინაღობა ტოლია ნულის, ე.ი. ქსელში დენი იზღუდება მხოლოდ პირველადი გრაგნილის წინაღობით)	I_o	კა	3	3
ქსელის რელეური დაცვის გამორთვის დრო. არა უმეტეს (ეს დრო ტოლია მ.შ-ის რეჟიმში დენსაზღვდი მოწყობილობის მუშაობის მაქსიმალური დროის)	τ_c	მკწმ	120	120
მუშაუნარიანობის აღდგენის დრო. (დენსაზღვდი მოწყობილობის მზადყოფნის აღდგენის დრო რელეური დაცვის საცდელ ჩართვასთან)	$\Delta\tau$	წმ	2	2
რელეური დაცვის საცდელი მიყოლებით ჩართვის რაოდენობა	n	ცალი	3	3

1. ჩვეულებრივ გრაგნილის საკუთარი და ურთიერთინდუქციურობა, აგრეთვე მათ მიერ შექმნილი მაგნიტური ველი გამოითვლება იმ დაშვებით, რომ გრაგნილის კვეთში დენის განაწილება თანაბარია. განხილულ შემთხვევაში ასეთი გამარტივება დაუშვებელია, რადგანაც ხვიები პირველადი და მეორადი გრაგნილების დენსაზღვდი მოწყობილობის შეთავსებულია ერთ კოჭაში. ამიტომ ანგარიში ზემოდნაჩვენები მახასიათებლების მიმდინარეობს სპეციალური პროგრამით, სადაც გათვალისწინებულია ზუსტი კოორდინატი თითოეული ხვისის. გარდა ამისა, ვინაიდან ეკვივალენტურ ინდუქციურობა დენშემზღვდი მოწყობილობის ნომინალურ რეჟიმში განისაზღვრება სხვაობით ახლო სიდიდეების (პირველადი და მეორადი გრაგნილების საკუთარი ინდუქციურობებით), ინდუქციურობების ანგარიშის სიზუსტე იყო ამაღლებული 10-6-მდე.

2. დარტყმის დენების ანგარიშისთვის გამოთვლის პროცედურა იყო შევსებული გარდამავალი პროცესების ანალიზით, აღძრული ქსელში მ.შ-ის შემთხვევაში.

ნომინალურ რეჟიმში (ე.ი. ქსელის დამყარებულ რეჟიმში მუშაობის დროს მ.შ-ის აღძვრამდე) დენშემზღვდი მოწყობილობის მეორადი გრაგნილი მოკლედ ჩართულია, და დენები პირველად და მეორად გრაგნილებში I_1 და I_2 განისაზღვრება განტოლებათა სისტემით.

$$\left. \begin{aligned} L_1 \cdot \frac{dI_1}{dt} + M \cdot \frac{dI_2}{dt} + R_1 \cdot I_1 + L_H \cdot \frac{dI_1}{dt} + R_H \cdot I_1 &= U_o \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_o) \\ L_2 \cdot \frac{dI_2}{dt} + M \cdot \frac{dI_1}{dt} + R_2 \cdot I_2 &= 0, \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} (1.23, \text{ ა}) \\ (1.23, \text{ ბ}) \end{array}$$

სადაც L_1, L_2 და R_1, R_2 -პირველადი და მეორადი გრაგნილების საკუთარი ინდუქციურობები და აქტიური წინაღობები, M -აღნიშნული გრაგნილების ურთიერთ ინდუქციურობა, L_H, R_H -ქსელის დატვირთვის ინდუქციურობა და აქტიური წინაღობა.

ზოგად შემთხვევაში (1.23) სისტემა რიცხობრივად შეიძლება ამოიხსნას. მეორე მხრივ, რადგანაც დენსაზღვდი მოწყობილობისთვის 1-2% სიზუსტით სამართლიანია ტოლობა $L_1 = L_2$ და $R_1 = R_2$ შეიძლება გარდავექმნათ (1.23) სისტემა ისეთ სახეში, რომ მოხერხებული იქნეს ანალიზური განხილვისათვის. ვღებულობთ $I_2 \cdot R_2 = -I_1 \cdot R_1$ და გამოვსახავთ $d_2 I_2 / dt$ (1.23, ბ)-დან მივიღებთ

$$\left(L_1 - \frac{M^2}{L_2}\right) \cdot \frac{dI_1}{dt} + (R_1 + R_2) \cdot I_1 + L_H \cdot \frac{dI_1}{dt} + R_H \cdot I_1 = U_o \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_o). \quad (1.24).$$

(1.24)-დან ჩანს, რომ ნომინალურ რეჟიმში დენსაზღვდი მოწყობილობა წარმოგვიდგება როგორც დატვირთვა ეკვივალენტური ინდუქციურობით, ტოლი $L_{\exists} = L_1 - \frac{M^2}{L_2}$, და ეკვივალენტური აქტიური წინააღობით $R_{\exists} = R_1 + R_2$.

მ.შ-ის აღძვრის მომენტში, დენსაზღვდი მოწყობილობის მუშაობის ნომინალური რეჟიმი იცვლება არარეგულირებადი მ.შ-ის რეჟიმით. ეს რეჟიმი აღიწერება (1.23) განტოლებით ან მიახლოებითი განტოლებით (1.24) პირობის დროს $R_H^0, L_H = 0$ ანალიზური ამოხსნას (1.24) განტოლების, შესაბამის გარდამავალი პროცესისათვის აქვს შემდეგი სახე:

$$I_1 = E_{exp} \left(-\frac{R_{\exists}}{L_{\exists}} \cdot (t - t_1) \right) \cdot \left[I_1(t_1) - \frac{U_o}{Z_{\exists}} \cdot \sin(\omega \cdot t - \Delta\varphi_o) \right] + \frac{U_o}{Z_{\exists}} \cdot \sin(\omega \cdot t - \Delta\varphi_o), \quad (1.25)$$

სადაც t_1 -რეჟიმის დაწყების დრო, $I_1(t_1)$ -რეჟიმის დასაწყისში დენი,

$$Z_{\exists} = \sqrt{(R_{\exists}^2 + C\omega^2 \cdot L_{\exists}^2)}, \quad \Delta\varphi = \varphi - \varphi_o,$$

$$\varphi = \arctg \left(\frac{\omega \cdot L_{\exists}}{R_{\exists}} \right)$$

ამოხსნიდან ჩანს, რომ აღნიშნულ რეჟიმში დენის ცვლილების ხასიათი არსებითად დამოკიდებულია $I_1(t_1)$, ე.ი.

მ.შ-ის აღძვრის მომენტზე, როცა $t \rightarrow \infty$ ამოხსნა მიისწრაფვის დამყარებულისკენ, რომელიც ტოლია (1.25)-ის ბოლო მდგენელის.

როცა I_1 დენის მნიშვნელობა მიაღწევს დენსაზღვდი მოწყობილობის დაცვის ამოქმედების დენს I_p , იწყება მეორადი გრაგნილის წრედის გახსნა. აღნიშნული რეჟიმი აღიწერება (1.23) სისტემით, იმ განსხვავებით, რომ (1.23,

ბ) განტოლების მარცხენა ნაწილს დაემატება მდგენელი $R_B(\Delta t) \cdot I_2$. სადაც $R_B(\Delta t)$ -ამომრთველის აქტიური წინააღობის დამოკიდებულება დროის შუალედზე, განვლილი გამორთვის დაწყებიდან.

დროის შუალედის გავლის დროს $\Delta t = \tau_p$ მეორადი გრაგნილის გახსნის პროცესი დამთავრდება და იწყება დენსაზღვრული მოწყობილობის ბოლო მუშაობის რეჟიმი – მ.შ-ის დენის შეზღუდვის რეჟიმი. აღნიშნულ რეჟიმში $I_2 = 0$ და ამიტომ პროცესი ზუსტად აღიწერება (1.23, ა) განტოლებით, პირობებით როცა $\frac{dI_2}{dt} = 0, R_H = 0, L_H = 0$ შესაბამისი ამოხსნა განისაზღვრება (1.25)-დან, რომელშიც მიღებულია დაშვება: $L_3 = L_1$ და $R_3 = R_1$, ხოლო t_1 და $I_1(t_1)$ ნაცვლად შევიყვანოთ შესაბამისად რეჟიმის საწყისი დრო და დენი დროის აღნიშნულ მომენტში. მარტივად ჩანს, რომ მოცემული ამოხსნა როცა $t \rightarrow \infty$, მიისწრაფის დამყარებული რეჟიმისკენ, რომელიც ეკვივალენტურია დატვირთვის ქსელში ჩართვის წინააღობით, $Z = \sqrt{R_1^2 + \omega^2 L_1^2}$.

დამყარებულ რეჟიმში დენის შეზღუდვის დროს ქსელის მთელი ძაბვა ვარდება დენსაზღვრულის პირველ გრაგნილზე. ამიტომ, უგულვებელყოფთ ველის განზნევის, ფოლადში დანაკარგებს, გრაგნილში აქტიური წინააღობას (რომელიც არ აჭარბებს 1% მისი ინდუქციური წინააღობიდან), შესაბამისად შეიძლება ჩავწეროთ ტოლობა

$$\int_{t_1}^{t_2} U \cdot dt = \Delta\psi = W_1 \cdot B_{CT} \cdot S_{CT}, \quad (1.26)$$

სადაც $\Delta\psi$ -ნაკადუმბის ცვლილება დროის შუალედში t_1 -დან t_2 -მდე W_1 – დენსაზღვრულის პირველადი გრაგნილის ხვიათა რიცხვი, B_{CT} – ფოლადში მაგნიტური ველის ინდუქცია, S_{CT} – ფოლადის კვეთის ფართი. ნაკადუმბის მაქსიმალური ცვლილებას შეესაბამება ძაბვის ნახევარპერიოდის ცვლილება. ამ შემთხვევაში ფოლადში ინდუქცია შეიძლება შეიცვალოს $+B_N$ -დან $-B_N$ -მდე, სადაც B_N -ფოლადის გაჯერების ინდუქცია. ამიტომ (1.26)-დან გამომდინარეობს

$$W_1 \cdot S_{CT} \geq \frac{\sqrt{2} \cdot U_H}{\omega \cdot B_N} \quad (1.27)$$

(1.27)-დან გამომდინარეობს, რომ კონსტრუქციის ოპტიმიზაციისათვის ფოლადის კვეთის ნამრავლი ხვიათა რიცხვებზე უნდა დარჩეს მუდმივი. B_N ცალკეული მარკის ფოლადისათვის შეიძლება აღწევდეს 2 ტლ. ამ შემთხვევაში, დენსაზღუდის მოწყობილობის შერჩევის დროს 10 კვ ძაბვაზე მნიშვნელობით $W_1 = 60$ ვლებულობთ $S_{CT} = 0,47\text{მ}^2$, რაც სტანდარტით ფოლადის შევსების კოეფიციენტი წრიული კვეთით შეადგენს 0.93, ფოლადის გულარას დიამეტრი შეადგენს 0.8 მ. შესაბამისად (1.27) სამართლიანია იმ შემთხვევაში, თუ გრაგნილის ხვიათა რიცხვი საკმარისია უზრუნველყოს მაგნიტური ველის დამაბულობა H_{CT} , რომელიც შეესაბამება გაჯერების ინდუქციას $B_N \cdot H_{CT}$ ანგარიშსთვის ვიყენებთ სრული დენის კანონს

$$I_o \cdot W_1 = H_{CT} \cdot l_{CT} + H_B \cdot l_B = \frac{B \cdot l_{CT}}{\mu_o \cdot \mu} + \frac{B \cdot l_B}{\mu_o} \quad (1.28)$$

სადაც l_{CT} და l_B – შესაბამისად ველის ძალოვანი ხაზების სიგრძე ფოლადში და საჰაერო ღრეჩოში.

თუ მივიღებთ $l_B = 0$, მაშინ მოცემული მნიშვნელობებისთვის $I_o = 3$ კა და $W_1 = 60$ (1.28)-დან ვლებულობთ, რომ $H_{CT} = 2000$ ა/მ, იმ დროს, როცა B_N -ის მიღწევისთვის საკმარისია $H_N \approx 500$ ა/მ (მაგალითად, \exists -370 მარკის ფოლადისთვის). ამგვარად, $U_N = 10$ კვ ძაბვისათვის ფოლადი გამოიყენება არაეფექტურად: მნიშვნელობისთვის $\mu = B_N / \mu_o H_N \approx 2500$ ფაქტიურად საკმარისია $\mu \approx 60$.

თანაფარდობა ხვიათა რიცხვსა და ფოლადის კვეთს შორის უნდა დაზუსტდეს დაგეგმარების ეტაპზე.

მოცემული ანალიზიდან შეიძლება გაკეთდეს რამოდენიმე დამატებითი დასკვნა, რომელიც აუცილებელია გავითვალისწინოთ ფოლადით დენსაზღუდის მოწყობილობის დაგეგმარების ეტაპზე.

1. H_{CT} მნიშვნელობა მიზანშეწონილია მიუახლოვოთ H_N -ის მნიშვნელობას საჰაერო ღრეჩოს შეყვანის გზით, რომელიც დენსაზღუდის 1 ვარიანტის შემთხვევაში შეიძლება შეადგენდეს 60-80 მმ. ღრეჩო ამაღლებს დენსაზღუდის მოწყობილობის გრაგნილის წრფივობას როგორც ნორმალურ

რეჟიმში, ისე დენის შეზღუდვის რეჟიმში, აგრეთვე ამცირებს ინდუქციურობის მნიშვნელობას ნომინალურ რეჟიმში. ნომინალურ რეჟიმში H მნიშვნელობა, შექმნილი დენსაზღუდვი მოწყობილობის გრაგნილებით, ახლოსაა ნულთან.

2. ფოლადის მარკის შერჩევა უნდა მოხდეს ორი პარამეტრის მიხედვით – გაჯერების ინდუქცია და ღირებულება.

μ სიდიდე დიდ როლს არ თამაშობს, რადგანაც მისი ფაქტიური მნიშვნელობა მაღალია დასაშვებზე. აგრეთვე არა არსებითია დანაკარგები ფოლადში შემაგნიტებაზე და გრიგალურ დენებზე, ვინაიდან ნომინალურ რეჟიმში მაგნიტური ინდუქცია ფოლადის გულარასი პრაქტიკულად ნულის ტოლია, ხოლო დენის შეზღუდვის რეჟიმში მცირე დროით მუშაობს დენსაზღუდვი მოწყობილობა.

3. გარდამავალ პროცესში ფოლადის გულარაში მაგნიტური ველის და გრაგნილში დენის სწრაფი ზრდის ხარჯზე აღიძვრება მნიშვნელოვანი დარტყმის მექანიკური დატვირთვები. ამიტომ დაგეგმარების ეტაპზე აუცილებელია მიექცეს ყურადღება მექანიკურ ძაბვებს და დეფორმაციას.

1.6. დენსაზღუდვი მოწყობილობის შექმნის პერსპექტივა ზეგამტარული გრაგნილებით

ზეგამტარული გრაგნილების გამოყენება დენსაზღუდვი მოწყობილობის მაგნიტურ სისტემაში საშუალებას იძლევა აამაღლოს მასში დენის სიმკვრივე დაახლოებით 100-ჯერ, ერთდროულად შეამციროს თბური დანაკარგები ნულამდე მუდმივი დენის შემთხვევაში და 10-50-ჯერ 50 ჰვ სიხშირის დროს. შესაბამისად მკვეთრად უმჯობესდება წონა-ზომის მახასიათებლები.

ასეთი შედეგების მიღებას შეიძლება ხელი შეუშალოს ორი გარემოებამ.

1. კრიტიკული დენის სიმკვრივის არსებითი შემცირება გარე მაგნიტური ველის ზედღების დროს (დაახლოებით 5-ჯერ, როცა მაგნიტური ინდუქცია იზრდება 2 ტლ-მდე).

2. დანაკარგების მკვეთრი ზრდა ზეგამტარში შემაგნიტებაზე გარე ცვლადი მაგნიტური ველის შედეგად (20-30-ჯერ, როცა იზრდება ველის რხევის ამპლიტუდა 0,01-დან 0,1 ტლ-მდე). აღნიშნული დანაკარგების დონე ცვლად დენზე არ ქმნის პრობლემას გრაგნილების გაცივების შესაძლებლობის თვალსაზრისით, თუმცა სერიოზულად აუარესებს ეკონომიურ მაჩვენებელს, რადგანაც სითბოს ართმევის მ.ქ.კ თხევადი აზოტის ტემპერატურის დროს შეადგენს 10%.

აღნიშნული გარემოება არ წარმოადგენს არსებითს დენსაზღუდი მოწყობილობისათვის, რადგანაც ნომინალურ რეჟიმში მის პირველად და მეორად გრაგნილებში მაგნიტური ველები გამოაკლდებიან. შედეგად, ზეგამტარი მუშაობს პირობებში.

ელექტრული დენის გადაცემის გარე ველის გამორიცხვით. აღნიშნული პირობებისათვის მისაღებია ზეგამტარების ის მახასიათებლები, რომლებიც უკვე არსებობს დღევანდელი დღეს.

შევაფასოდ, მაგალითისათვის, შესაძლო მახასიათებლები დენსაზღუდი მოწყობილობის დენგამტარი ელემენტით, რომელსაც გააჩნია პარამეტრები თანამედროვე მეორე თაობის მაღალტემპერატურული ზეგამტარების. განვიხილოდ ზეგამტარი მარკით SCS –12050, რომელსაც ამზადებს ფირმა *Super Power* (აშშ). [11]. ეს სრულად სტაბილიზირებულია სპილენძით, ლენტის კვეთი შეადგენს $12 \times 0,095$ მმ. ლენტის შევსების კოეფიციენტი სპილენძით -50%. ლენტის კრიტიკული დენის სიმკვრივე მის სრულ კვეთაში ტოლია $I_c = 220$ ა/მმ². დანაკარგები 50 ჰვ სიხშირეზე ლენტის ერთეულ სიგრძეზე შეადგენს $P_{SP} = 0,4$ ვტ/(კა.მ). ლენტას ამზადებენ ნაჭრებად 600 მ სიგრძით, გარანტიით მახასიათებლის ერთგვაროვნებით სიგრძის მიხედვით-5%.

გრაგნილი უნდა დარჩეს სრულად ზეგამტარული მხოლოდ ნომინალური მუშაობის რეჟიმში. ამ შემთხვევაში I_H -ის გაზრდის დროს, ჭარბი დენი იქნება გამოდევნილი სპილენძის ფუბეშრეში, რის შედეგად სრული სტაბილიზაციის პირობიდან გამომდინარე არ დაირღვევა დენსაზღუდის მუშაუნაროანობა. სპილენძში არძრული დამატებითი დანაკარგები უმნიშვნელოა, რადგანაც I_H -ის გაზრდის რეჟიმი მოკლე დროის განმავლობაში მიმდინარეობს.

თავი II. ინდუქციური ტიპის მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღუდის გავლენა ელექტროენერგეტიკული სისტემის მდგრადობაზე

2.1. ენერგეტიკული დანიშნულების ტრანსფორმატორული ტიპის დენსაზღუდის ზეგამტარული არაწრფივი რეზისტორით

ელექტროენერგეტიკული სისტემის (ეეს) საიმედო მუშაობის უზრუნველყოფისათვის მნიშვნელოვან შემადგენელ ფაქტორს წარმოადგენს მოკლე შერთვის (მ.შ) დენების კორექციის საკითხი. მშ-ის დენების შეზღუდვის ტრადიციული მეთოდების გამოყენება თანმხლებია ენერჯის და სიმძლავრის დანაკარგებისა დენსაზღუდის რეაქტორში ელექტრომომარაგების სისტემის ნორმალურ რეჟიმებში, მრავალ შემთხვევაში ვერ უზრუნველყოფს ძაბვის დონეს მკვებავ კვანძში ავარიულ რეჟიმში მომხმარებლის უწყვეტი ტექნოლოგიის მუშაობის პირობის შემთხვევაში. თანამედროვე ტექნოლოგიების გამოყენება, პირველ რიგში მაღალტემპერატურული ზეგამტარული (მტზგ) მასალები და ნანოტექნოლოგიები საშუალებას იძლევა დამუშავდეს რიგი მეთოდები და მოწყობილობები მშ-ის დენების შეზღუდვისა.

ასეთი მოწყობილობების რიცხვში შეიძლება აღინიშნოს ზეგამტარული დენსაზღუდის სხვადასხვა სახის (რეზისტორული, ტრანსფორმატორული), აგრეთვე ელექტროენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი (ეზგიმ). ეზგიმ-ის გამოყენება საშუალებას იძლევა მთელი რიგი ამოცანების გადაწყვეტისა, დაკავშირებული ელექტროენერჯის ხარისხის უზრუნველყოფასთან და ზარალის შემცირებასთან ელექტრომომარაგების უწყვეტის შემთხვევაში.

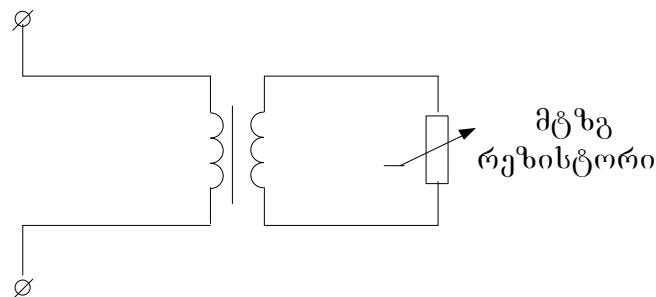
ზეგამტარული მასალების უნიკალური თვისება საშუალებას იძლევა შეიქმნას დენსაზღუდები, რომლებსაც ანალოგები არა აქვს ტრადიციული ელექტროტექნიკური მოწყობილობებს შორის.

დენსაზღუდების ჩართვა ენერგოსისტემის გარკვეულ კვანძებში საშუალებას იძლევა გაიზარდოს საკომუტაციო აპარატების

მომსახურების ვადები და შეიქმნას პირობა მათი თანდათანობით შეცვლისა თანამედროვე მოწყობილობებით.

სამუშაოში განხილულია ენერგეტიკული დანიშნულების ტრანსფორმატორული ტიპის დენსაზღუდი ზეგამტარული არაწრფივი რეზისტორით. აღწერილია მისი კონსტრუქცია და მუშაობის პრინციპი, მოცემულია ელექტრომაგნიტური პროცესების რიცხობრივი ანგარიშები, მოცემული სამუშაო დაფუძნებულია ზეგამტარის არაწრფივი ვოლტამპერული მახასიათებელზე, რომლის წინაღობა იცვლება დენის სიდიდისაგან დამოკიდებულებაში [7].

ტრანსფორმატორული ტიპის დენსაზღუდის სქემა ზეგამტარული არაწრფივი რეზისტორით ნაჩვენებია ნახ. 2.1. არაწრფივი ელემენტი ზგდს-ში შესრულებულია ზეგამტარული რეზისტორის სახით მცირე ინდუქციურობით.

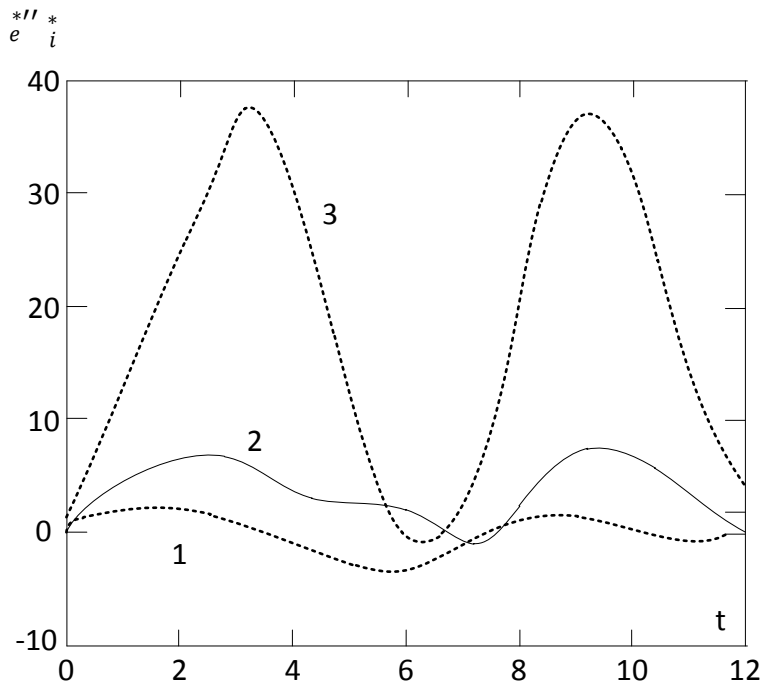


ნახ.2.1. ტრანსფორმატორული ტიპის მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღუდი

ქსელის ნორმალურ რეჟიმში ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილი დამოკლებულია რეზისტორზე ზეგამტარულ მდგომარეობაში, ამ შემთხვევაში დენსაზღუდს გააჩნია წინაღობის მინიმალური მნიშვნელობა. როდესაც ქსელში მიმდინარეობს მშ, რეზისტორი კარგავს ზეგამტარობას და გადადის რეზისტორულ მდგომარეობაში. ამის შედეგად მშ-ის დენი იზღუდება ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის ინდუქციური წინაღობით.

აღნიშნული დენსაზღუდები ხასიათდებიან კონსტრუქციის სიმარტივით, ნომინალური მუშაობის რეჟიმში არ გააჩნიათ იმპედანსი, აგრეთვე ისინი გავლენას არ ახდენენ ქსელის ძაბვისა და დენის ხარისხზე.

რიცხოვრივი მოდელირების შედეგი მოყვანილი ნახ.2.1, იძლევა საშუალებას შევადაროთ მშ-ის საანგარიშო დენები წრედში ზგდს არსებობის დროს და მის გარეშე. მშ წრედში მიმდინარეობს $t=0$ დროის მომენტში. ნახ. 2.2 მოყვანილია ემპ ზეგამტარული გენერატორის (e^{**}) (1 მრუდი), წრედში დენი i^* ზგდს ამოქმედების დროს (2 მრუდი) და იმ შემთხვევაში, როცა ზგ დს-ი გამორიცხულია (3 მრუდი). ზგდს გამოყენება მნიშვნელოვნად ამცირებს მშ დენის სიდიდეს.

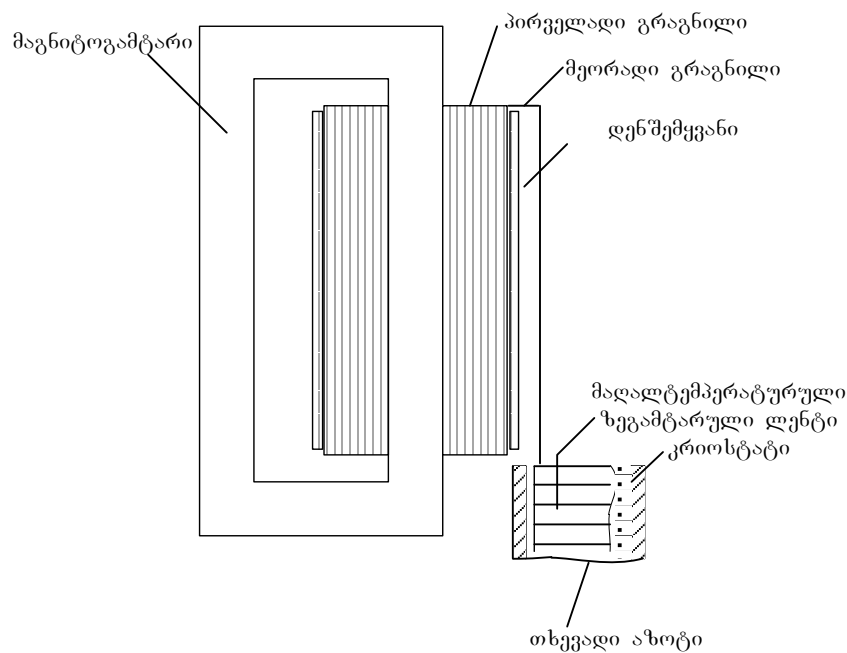


ნახ.2.2. ანგარიშის შედეგები (ფარდობით ერთეულებში) გარდამავალი პროცესი მშ-ის დროს წრედში ზგდს-ის არსებობის დროს (2) და როცა ზგდს გამორიცხულია (3)

არაწრფივი რეზისტორის დამზადებისათვის შეიძლება გამოყენებული იქნეს კომპოზიციური მაღალტემპერატურული ზეგამტარული სადენი, $Bi-2223$ ზეგამტარის საფუძველზე ვერცხლის მატრიცაში. მრავალძარღვიანი სადენი (შედგება 61 კერამიკული ზეგამტარული ძარღვისაგან მატრიცაში არაღებულ ვერცხლისაგან).

კონსტრუქციული შესრულება ტრანსფორმატორული ტიპის მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღუდის ნაჩვენებია ნახ.2.3.

დენსაზღუდის ტრანსფორმატორული ნაწილის პირველადი (მუშა) და მეორადი გრაგნილები შესრულებულია სპილენძის სადენისაგან, მაგნიტოგამტარი – ელექტროტექნიკური ფოლადისაგან, კრიოსტატი – ქაფპლასტისაგან.

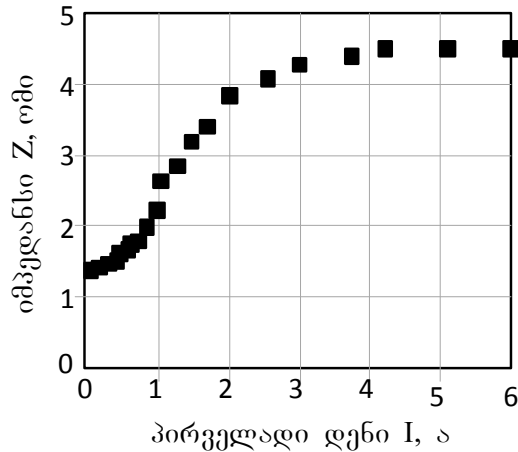


ნახ. 2.3. მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღუდის კონსტრუქციული სქემა

მეორადი გრაგნილის ბოლოსთან შეერთებულია სპილენძის დენშემყვანი. დენშემყვანის და მასთან მიერთებული მაღალტემპერატურული ზეგამტარული სადენების ბოლოები ჩაძირულია თხევად აზოტში.

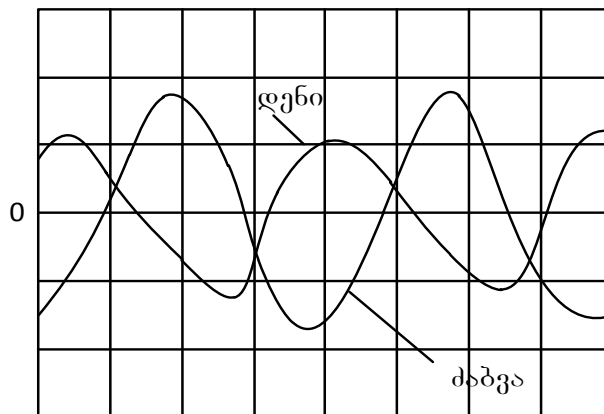
დამოკიდებულება დენსაზღუდის იმპენდანსისა – Z მუშა დენისაგან – I მოცემულია ნახ.2.4. მოცემულ დამოკიდებულებაზე შეიძლება გამოიყოს სამი არე: დაბალი მნიშვნელობის არე როცა დენი იცვლება $0 \div 0,3$ ა - $Z \approx 1,2$ ომი; გარდამავალი არე როცა დენი იცვლება $0,3 \div 4$ ა, 4 რომელშიც იმპენდანსი მდოვრედ იზრდება დენის ზრდასთან ერთად $Z \approx 4,5$ ომი მნიშვნელობამდე. მაღალი მნიშვნელობის არე როცა დენი

იცვლება 4 ა და მეტი; უნდა აღინიშნოს, რომ ნახ.2.4-ზე მოყვანილი ყველა არეში დამოკიდებულება $Z = f(I)$ წარმოადგენს სტაციონარულს.



ნახ. 2.4. დამოკიდებულება მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღუდის, იმპედანსის – Z დენისაგან – I მუშა (პირველად) გრაგნილში

ნახ. 2.5 მოყვანილია საანგარიშო ოსცილოგრამა წრედში დენის და ძაბვის, დენის შეზღუდვის რეჟიმში. ჩანს, რომ ძაბვა წარმოადგენს სინუსოიდალურს, ხოლო დენი მნიშვნელოვნად განსხვავდება სინუსოიდისაგან.



ნახ.2.5. საანგარიშო ოსცილოგრამები ძაბვისა და დენის მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღუდის წრედში, დენსაზღუდის იმპედანსის გაზრდის რეჟიმში, როცა დენი იზრდება. მუშა გრაგნილში დენი – 1,8ა; სიხშირე – 50 ჰც

2.2. დენსაზღუდის გავლენა ელექტროენერგეტიკული სისტემის მდგრადობაზე

ელექტროენერგეტიკული სისტემის საიმედოობის და სიცოცხლისუნარიანობის, მძლავრი ენერგეტიკული კვანძების ელექტრომომარაგების და ელექტრული ენერჯის ეფექტური განაწილებისათვის, აუცილებელია შეიქმნას საკომპუტაციო მოწყობილობა, რომელიც უზრუნველყოფს დატვირთვის დენების და მოკლე შერთვის (მშ) დენების გამორთვის დადგენილ რიცხვს.

ელექტრული წრედის განრთვის ქვეშ ჩვეულებრივ იგულისხმება გარდამავალი პროცესი, რომლის დროს წრედის დენი იცვლება, რაღაც გარკვეული მნიშვნელობიდან ნულამდე. ჩვეულებრივ ცდილობენ, რომ განრთვის პროცესი წრედის, დასრულდეს შეძლებისდაგვარად სწრაფად.

აღნიშნული მიზნის შესრულებას ემსახურება საკომპუტაციო აპარატები (ამომრთველები, ავტომატები, კონტაქტორები, მცველები და ა.შ.). აღნიშნული აპარატების მოწყობილობა დამოკიდებულია მოთხოვნებთან წაყენებული მათ მიმართ მუშა ძაბვების დონეების მიმართებაში, მშ-ის დენების და ნომინალური დენების მნიშვნელობასთან, გადამეტაბვების დონეებით, წრედების „სიხისტე“ (L, C და R მუდმივების შეუღლება, რომლისგანაც დამოკიდებულია ძაბვის აღდგენის სიჩქარე), ატმოსფერული პირობები, სწრაფქმედების ხარისხი და ა.შ.

პრინციპულად შესაძლებელია მუდმივი და ცვლადი დენის ელექტრული წრედების განრთვის სამი ხერხი: მარტივი რკალური, შეზღუდული - რკალური და რკალის გარეშე. ინდუქციური ტიპის მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღუდი ხასიათდება მაღალი ეფექტურობით.

რეჟიმის დიდი შემფოთება, აღძრული ელექტრულ სისტემაში, ხშირად გამოწვეულია მძლავრი დატვირთვის ან გენერატორების გადამტანი დატვირთვის, ტრანსფორმატორების, ელექტროგადამცემი ხაზების გამორთვებით [12]. კიდევ უფრო მეტი მკვეთრი ცვლილება რეჟიმის,

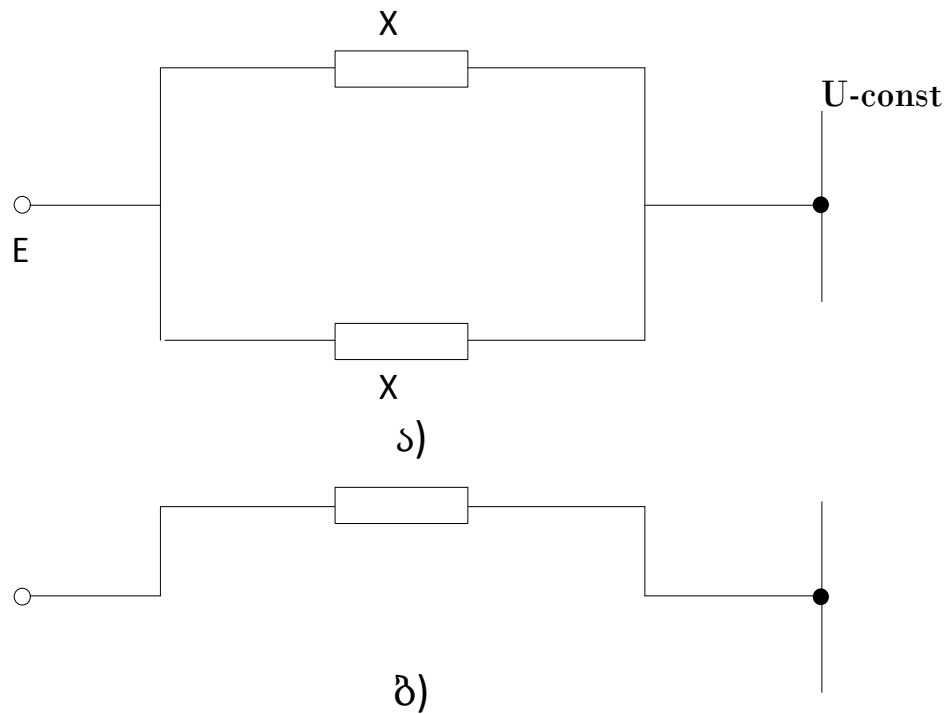
შეიძლება გამოიწვიოს მოკლე შერთვამ, რომლის დროსაც სიმძლავრის ცვლილება სისტემის ცალკეულ უბნებზე თანაზომადია მთელი სისტემის ჯამური სიმძლავრის. მოკლე შერთვის ადგილისა და მათი სახეობის მიხედვით მათ შეუძლიათ გამოიწვიოს გადასაცემი სიმძლავრის სხვადასხვა ცვლილება. შედარებით მძიმე რეჟიმს წარმოადგენს სამფაზა მოკლე შერთვა, როდესაც სრულად წყდება სიმძლავრის გადაცემა იმ ელემენტის გავლით, რომელზეც მოხდა ავარია. შედარებით მსუბუქ რეჟიმს წარმოადგენს ორფაზა მოკლე შერთვა მიწაზე, კიდევ უფრო მსუბუქ რეჟიმს წარმოადგენს ორფაზა მოკლე შერთვა და ყველაზე მსუბუქ რეჟიმს წარმოადგენს ერთფაზა მოკლე შერთვა (გენერატორებში და ტრანსფორმატორებში გარდამავალი პროცესების გარეშე).

ავარიების სტატისტიკა აჩვენებს, რომ მაღალი ძაბვის ხაზებზე ავარიების უმრავლესობა მოდის ერთფაზა მოკლე შერთვაზე (75-90%). ორფაზა მოკლე შერთვა შეადგენს 5-15% მოკლე შერთვის საერთო რიცხვიდან. შედარებით იშვიათს წარმოადგენს სამფაზა მოკლე შერთვა, რომელიც შეადგენს 5-10%.

ჩვეულებრივ სისტემის მდგრადობაზე შემოწმების მიზნით გამოავლენენ წერტილს, რომელშიც მოკლე შერთვა შედარებით საშიშია, და მისთვის აწარმოებენ ანგარიშებს. თუ მოკლე შერთვა იქნება განხილული საშიში წერტილიდან მოშორებით, მაშინ ისინი უკვე შეიძლება ჩაითვალოს მსუბუქ რეჟიმად. სახელდობრ ამიტომ სისტემის ან გადაცემის მდგრადობის შეფასება ჩატარებული მოკლე შერთვისთვის შედარებით საშიშ წერტილში, იძლევა პრაქტიკულად გარკვეულ ამაღლებულ (საიმედოობის სასარგებლოდ) შედეგებს. უნდა აღინიშნოს აგრეთვე, რომ ავარიის დროს წარმოიქმნება გარკვეული გაუთვალისწინებელი ფაქტორები (როგორცაა, მაგალითად, რკალის გავლენა მოკლე შერთვის ადგილში).

დიდი შეშფოთების დროს, დაკავშირებული რეჟიმის უეცარი ცვლილებასთან, გენერატორების ელექტრომომძრავებელი ძალა (ემძ) არ იქნება უცვლელი. ემძ-ის ცვლილების გათვალისწინება დროში ძლიერ

ართულებს ანგარიშებს, და პირველი მიახლოებით ისინი შეიძლება ჩავატაროთ, გენერატორების კვაზიგარდამავალი (კვაზიდინამიკური) სიმძლავრის მახასიათებლების გათვალისწინებით, ე.ი. როცა $E = E'$, სადაც E' -გარდამავალი ემმ, პროპორციული როტორის დენის. მაშინ სისტემისათვის (ნახ.1.6, ა) შეიძლება ჩავწეროთ:



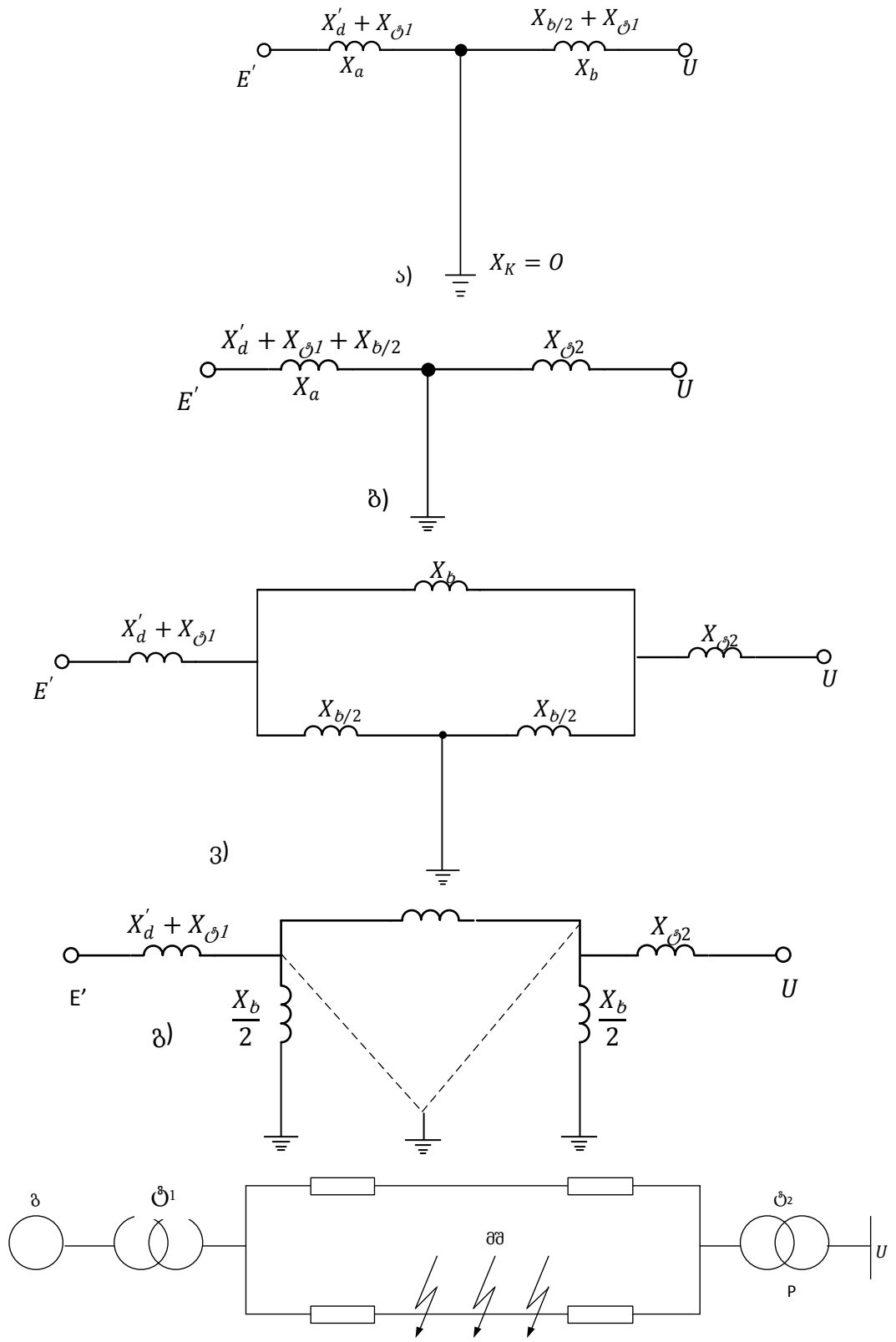
ნახ. 2.6. „სადგური-სალტე“ სისტემის გამოსაკვლევი სქემა: ა) საწყისი; ბ) გამორთვის შემდეგ

$$P = E^2 Y_{11} \sin \alpha_{11} + E U Y_{12} \sin(\delta - \alpha_{12}). \quad (2.1)$$

თუ აქტიური წინაღობა მხედველობაში არ მიიღება, მაშინ

$$P = E U Y_{12} \sin \delta \text{ ან } P = \frac{E U}{X_{12}} \sin \delta \quad (2.2)$$

სადაც $Y_{12} = 1/X_{12}$, $X_{12} = X_{\Sigma}$ -ჯამური წინაღობა წრედის ემმ E' -ის მოდების წერტილიდან U ძაბვის სალტემდე (ნახ.2.6, ბ).



ნახ.2.7. გადამცემი ხაზზე სამფაზა მოკლე შერთვის დროს ჩანაცვლების სქემა: ა- ხაზის დასაწყისში; ბ- ხაზის ბოლოში; ვ- ხაზის შუაში; გ- ნახ. 2.7 ვ გარდაქმნილი სქემა

ელექტრომაგნიტური მომენტი, რომელიც მოქმედებს გენერატორის ლილვზე და განმსაზღვრელ მახასიათებელს წარმოადგენს მისი მოძრაობისა, განისაზღვრება როგორც

$$M = P\omega,$$

თუმცა ელექტრომექანიკურ პროცესებში შეიძლება დიდი ცდომილების გარეშე მივიღოთ

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega = \omega_0$$

ამის საფუძველს წარმოადგენს ის, რომ სიჩქარე პროცესის დასაწყისში $\Delta\omega$ როტორის დიდი ინერციის შედეგად იცვლება ნელა და შეადგენს არა უმეტეს 1-2% სინქრონული სიჩქარის მიმართ. სიჩქარის ასეთი მცირე ცვლილების პირობებში მდგრადობის ანგარიშისათვის ჩვეულებრივ მიიღება, რომ ფარდობით ერთეულებში (როცა $\omega_0 = 1$) მომენტის ცვლილება რიცხობრივად ტოლია სიმძლავრის ცვლილების:

$$\Delta M = \Delta P / (\omega_0 + \Delta\omega) = \Delta P / \omega_0$$

იმისათვის, რომ მოკლე შერთვის დროს შევინარჩუნოდ მდგრადი მუშაობა შეძლებისდაგვარად უმრავლეს შემთხვევაში საჭიროა სწრაფად გამოვროთ ავარიული უბანი. სისტემისათვის, ნაჩვენები ნახ.2.7 განვსაზღვროთ არასასურველი ადგილი სამფაზა მოკლე შერთვისათვის დინამიკური მდგრადობის შენარჩუნების შესაძლებლობის თვალსაზრისით.

1. სამფაზა მოკლე შერთვის დროს ხაზის დასაწყისში (ნახ.2.7, ა) ურთიერთ წინაღობა მოდებული E' ემმ და U ძაბვას შორის:

$$X_{12} = X_a + X_b + X_a X_b / X_k = \infty,$$

სადაც $X_k = 0$

შესაბამისად,

$$P_m^{III} = E' U Y_{12} = 0$$

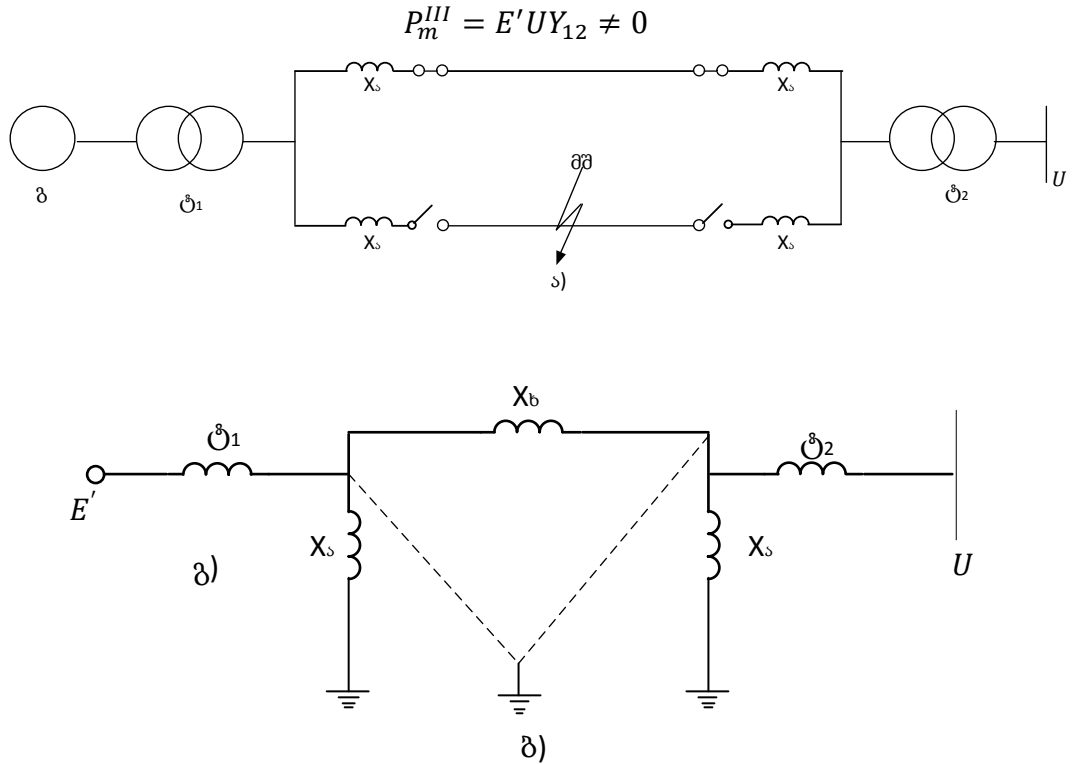
2. სამფაზა მოკლე შერთვის დროს ხაზის ბოლოში (ნახ.2.7, ბ):

$$X_{12} = X_a + X_b + X_a X_b / X_k = \infty,$$

$$P_m^{III} = E' U Y_{12} = 0$$

3. სამფაზა მოკლე შერთვის დროს ხაზის შუაში წინაღობა $X_{12} \neq \infty$. ხაზის ცალკეული უბნების წინაღობა (ნახ.2.7, ვ) სქემის მიხედვით

წარმოიქმნა სამკუთხედად. სამკუთხედის გარდაქმნით ვარსკვლავში (ნახ.2.7, გ, პუნქტირი ხაზი), მივიღებთ ჩანაცვლების სქემას, რომლის თანახმად ვპოულობთ წინაღობას და სიმძლავრეს ავარიულ რეჟიმში:



ნახ.2.8. გამოსაკვლევი სისტემის (ა) და მისი ჩანაცვლების სქემა მოკლე შერთვის დროს, როცა თითოეული ამომრთველი აღჭურვილია დენსაზღვდი ინდუქციური წინააღობით (ბ)

დაუშვათ, რომ თითოეული ამომრთველი სისტემის აღჭურვილია დენსაზღვდი ინდუქციური წინააღობით (ნახ.2.8).

სისტემისთვის, სადაც თითოეული ამომრთველი ხაზში აღჭურვილია დენსაზღვდი ინდუქციური წინააღობით, მოკლე შერთვის ადგილს არა აქვს მნიშვნელობა დინამიკური მდგრადობის შენარჩუნების შესაძლებლობის თვალსაზრისით. ამ შემთხვევაში $X_{12} \neq \infty$, ცალკეული უბნების წინააღობა სქემაზე (ნახ.2.8) წარმოდგენილია სამკუთხედით. სამკუთხედის გარდაქმნით ვარსკვლავში, მივიღებთ ჩანაცვლების სქემას, რომლის თანახმად ვპოულობთ X_{12} წინააღობას და სიმძლავრეს ავარიულ რეჟიმში P^{III} (ანალოგიურად მოკლე შერთვისა ხაზის შუაში).

ნახ.2.9. ნაჩვენებია სიმპლავრის მახასიათებლები ნორმალური (I), ავარიის შემდგომი (II) და ავარიული III რეჟიმებისათვის, აჩქარების და დამუხრუჭების ფართები.

დენსაზღუდი ინდუქციური წინაღობის შემოყვანა, აცილებს მოკლე შერთვის ადგილის გავლენას ავარიის სირთულეზე, მოკლე შერთვის დენების მიმართებაში, აგრეთვე სისტემის მდგრადობაზე ზემოქმედებით. ამ შემთხვევაში, რაც მეტია ფარდობა X_a/X_b , მით მსუბუქია ავარია მისი გავლენის მიმართებაში სისტემის მდგრადობაზე.

სადენებზე და აპარატებზე მოკლე შერთვის დენის ჯამური ელექტროდინამიკური და თერმული ზემოქმედების შემცირებისათვის აუცილებელია შეიზღუდოს როგორც მოკლე შერთვის დენი, დარტყმის დენის ჩათვლით, ისე მისი ხანგრძლივობა ქსელში.

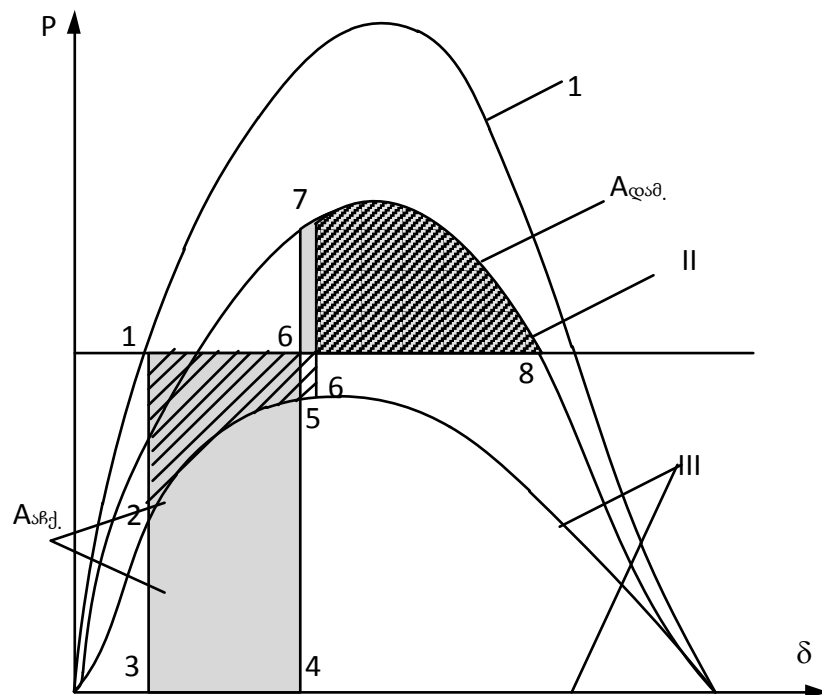
აღნიშნული ამოცანის გადაწყვეტის პრინციპული გზა - მაღალი ძაბვის ამომრთველების სწრაფქმედების ამაღლება, მოკლე შერთვის დენის შეზღუდვა, დაზიანებული წრედის უინერციო გაწყვეტა [10,12].

მოკლე შერთვის დენების შეზღუდვის რიცხვში სამამულო და უცხოურ პრაქტიკაში გამოიყენება: სხვადასხვა დენსაზღუდი რეაქტორები; ტრანსფორმატორები და ავტოტრანსფორმატორები დაბალი ძაბვის გრაგნილის გახლეჩით; ზესწრაფმომქმედი, მათ რიცხვში „სინქრონიზირებული“, ამომრთველები საკუთარი 0,5-2 პერიოდი დროის გამორთვით; ტირისტორული ამომრთველები ბუნებრივი და ხელოვნური კომუტაციით; დარტყმის დენის შემზღუდველი მოქმედებით. უინერციო დენსაზღუდი მოწყობილობა რეზონანსური სქემების ბაზაზე არაწრფივი და ზღურბლური ელემენტებით; სხვა დენსაზღუდი მოწყობილობა, რომელიც შედგება კომბინაციისაგან, წრფივი, არაწრფივი და ზღურბლური ელემენტებისაგან, მათ შორის მრავალმიზნობრივი ჩანართი, მუდმივი დენის ზეგამტარული მოწყობილობით.

განსაკუთრებით ინტერეს წარმოადგენს სწრაფმომქმედი მოწყობილობა, რომელსაც გააჩნია უნარი შეზღუდოს მოკლე შერთვის დენი მისი

წარმოშობის შემდეგ პირველი ნახევარპერიოდის განმავლობაში, ე.ი. გააჩნიათ უნარი შეზღუდოს როგორც დამყარებული ისე მოკლე შერთვის დარტყმის დენი.

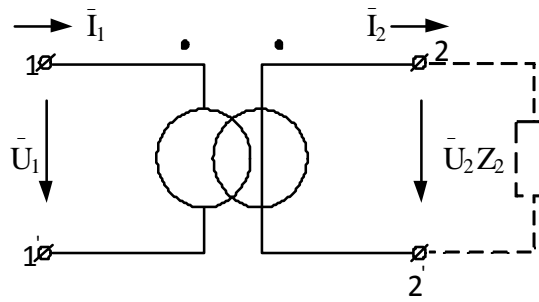
ტრანსფორმატორული ტიპის დენსაზღუდი მოწყობილობის ძირითად ელემენტს წარმოადგენს ტრანსფორმატორი მიმდევრობით ჩართვით, რომლის მეორადი წრედი ჩართულია ამა თუ იმ არაწრფივ წინააღობაზე, მათ შორის რელეური (ზღურბლური) მახასიათებლით



ნახ.2.9. სიმძლავრის მახასიათებლები, აჩქარების ფართი, როცა მოკლე შერთვა წარმოიშვა ხაზის დასაწყისში (1-3-4-6-1), შემთხვევაში, თუ თითოეული ამომრთველი აღჭურვილია დენსაზღუდი ინდუქციური წინააღობით (1-2-5-6-1) და დამუხრუჭების ფართი (6-7-8-6)

მიმდევრობითი ჩართვით ტრანსფორმატორის პარამეტრებს ირჩევენ იმგვარად, რომ წრედში ზღვრული მოკლე შერთვის დენის დროს და მეორადი გახსნილი გრაგნილით მისი მაგნიტოგამტარი არ გაჯერდეს.

დენსაზღუდის სქემაში, რომელიც ნაჩვენებია ნახ.2.10, ხორციელდება ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილის განრთვის დროს დარტყმის დენის შეზღუდვით ან სხვა უინერციო აპარატით.



ნახ.2.10. „იდეალური ტრანსფორმატორის“ სქემის ოთხპოლუსა ელემენტი

„იდეალური“ ტრანსფორმატორი წარმოადგენს სქემის ოთხპოლუსა ელემენტს. აღნიშნული მოწყობილობა არსებობს მხოლოდ ჰიპოთეზურად. მიზეზი მდგომარეობს იმაში, რომ, მოწყობილობის არსებობა მიიჩნევა გარკვეული საწყისი პირობებით, სახელდობრ [14,15]:

თითოეული გრაგნილის წინაღობა $\rightarrow 0$;

თითოეული გრაგნილის განზნევის ინდუქციურობა $\rightarrow 0$;

ურთიერთ მაგნიტური ნაკადი $\rightarrow 0$

$$W_1 \rightarrow \infty$$

$$W_2 \rightarrow \infty$$

$$W_1/W_2 = \alpha \text{ (მუდმივი).}$$

დაუშვათ „იდეალური“ ტრანსფორმატორის მეორად (გამოსავალ) მომჭერებზე მიერთებულია დატვირთვა კომპლექსური Z_2 წინაღობით. მაშინ შესავალი წინაღობა პირველადი მომჭერების მხარეზე

$$Z_{1\text{შეს.}} = \frac{\bar{U}_1}{\bar{I}_1} = K_{\phi}^2 Z_2 \quad (2.3)$$

ე.ი. შესავალი წინაღობა K_{ϕ}^2 –ჯერ მეტია Z_2 წინაღობაზე.

თუ პირველად მომჭერებთან მიერთებულია დატვირთვა კომპლექსური წინაღობით, ხოლო კვება განხორციელებულია მეორადი მომჭერების მხრიდან, მაშინ ანალოგიური გზით შეიძლება ვაჩვენოთ, რომ

$$Z_{2\text{შეს.}} = \frac{Z_1}{K_{\phi}^2}$$

ეს ორი თანაფარდობა ახასიათებს წინააღმდეგობების ტრანსფორმაციას. თუ მეორადი მომჭერები გახსნილია, მაშინ $Z_{1\text{შეს.}} = \infty$, თუ ისინი მოკლედ ჩართულია, მაშინ $Z_{1\text{შეს.}} = 0$.

ანგარიშების დროს „იდეალური“ ტრანსფორმატორი გამოიყენება ტრანსფორმატორების და ავტოტრანსფორმატორების ეკვივალენტური სქემის შემადგენელ ელემენტად. მართალია „იდეალური“ ტრანსფორმატორის დამზადება შეუძლებელია, მისი თეორიული არსებობა სასარგებლოა რეალური ტრანსფორმატორის თვისებების კვლევისათვის ეკვივალენტური სქემის მიხედვით.

გავარკვიოდ, როგორი უნდა იყოს რეალური ტრანსფორმატორის პარამეტრები, რათა მისი თვისებები შეესაბამოს იდეალურ ტრანსფორმატორს [14].

ვაჩვენოთ, რომ ფარდობა ტრანსფორმატორის პირველადი და მეორადი კომპლექსური ძაბვების ნებისმიერი დატვირთვის დროს იქნება მუდმივი, თუ:

გრაგნილების წინააღმდეგობა იქნება ნულის ტოლი, ე.ი. $R_1 = R_2 = 0$; გრაგნილებს შორის მაგნიტური კავშირის კოეფიციენტი $K_c = 1$. მართლაც, როცა $R_1 = R_2 = 0$ ძაბვები U_1 და U_2 ტოლია და ეწინააღმდეგება ნიშნის მიხედვით ℓ_1 და ℓ_2 ემმ-ებს.

როცა $K_c = 1$ ტრანსფორმატორის ორივე გრაგნილის ყველა ხვეიბი გადაიკვეთება ერთნაირი მაგნიტური ϕ ნაკადებით და ამიტომ

$$\begin{aligned} U_1 = -\ell_1 \frac{d\phi}{dt}, \\ U_2 = -\ell_2 \frac{d\phi}{dt} \end{aligned} \quad (2.4)$$

ან

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 = j\omega W_1 \bar{\phi}, \\ \bar{U}_2 = j\omega W_2 \bar{\phi} \end{aligned} \quad (2.5)$$

საიდან

$$\frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2} = \frac{W_1}{W_2} = \text{const.}$$

განვიხილოდ, როგორი მოთხოვნა უნდა წაუყენოთ ტრანსფორმატორის პარამეტრებს, რათა უზრუნველყოს მუდმივობა მეორადი და პირველადი დენების. ნახ.2.10-ზე მითითებული დენების მიმართულებისათვის გვექნება

$$W_1 i_1 - W_2 i_2 = R_M \phi,$$

სადაც $W_1 i_1 - W_2 i_2$ - ჯამური მაგნიტო მამოძრავებელი ძალა (მმმ); R_M - მაგნიტური წინაღობა მაგნიტური ნაკადისთვის, ან

$$W_1 \bar{I}_1 - W_2 \bar{I}_2 = R_M \bar{\phi},$$

ჩავსვათ $\bar{\phi}$ მნიშვნელობა (1.5)-დან, მივიღებთ:

$$W_1 \bar{I}_1 - W_2 \bar{I}_2 = \frac{R_M \bar{U}_1}{j\omega W_1},$$

საიდანაც

$$\frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1} = \frac{W_1}{W_2} - \frac{R_M \bar{U}_1}{j\omega W_1 W_2 \bar{I}_1},$$

ფარდობა I_2/I_1 იქნება მუდმივი იმ შემთხვევაში, თუ $R_M = 0$ და W_1 და W_2 მისწრაფის უსასრულობისკენ, თანაც მათი ფარდობა რჩება უცვლელი.

თუ აღნიშნული პირობა იქნება შესრულებული, მაშინ რეალური ტრანსფორმატორი გახდება „იდეალური“. რომლის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი ტოლია W_1/W_2 .

„იდეალური“ ტრანსფორმატორის შექმნა შეუძლებელია, მაგრამ მოყვანილი ანალიზი აჩვენებს, როგორ უნდა შევირჩიოდ რეალური ტრანსფორმატორის პარამეტრები, რათა მისი თვისებები მიუახლოვდეს „იდეალური“ ტრანსფორმატორის თვისებებს.

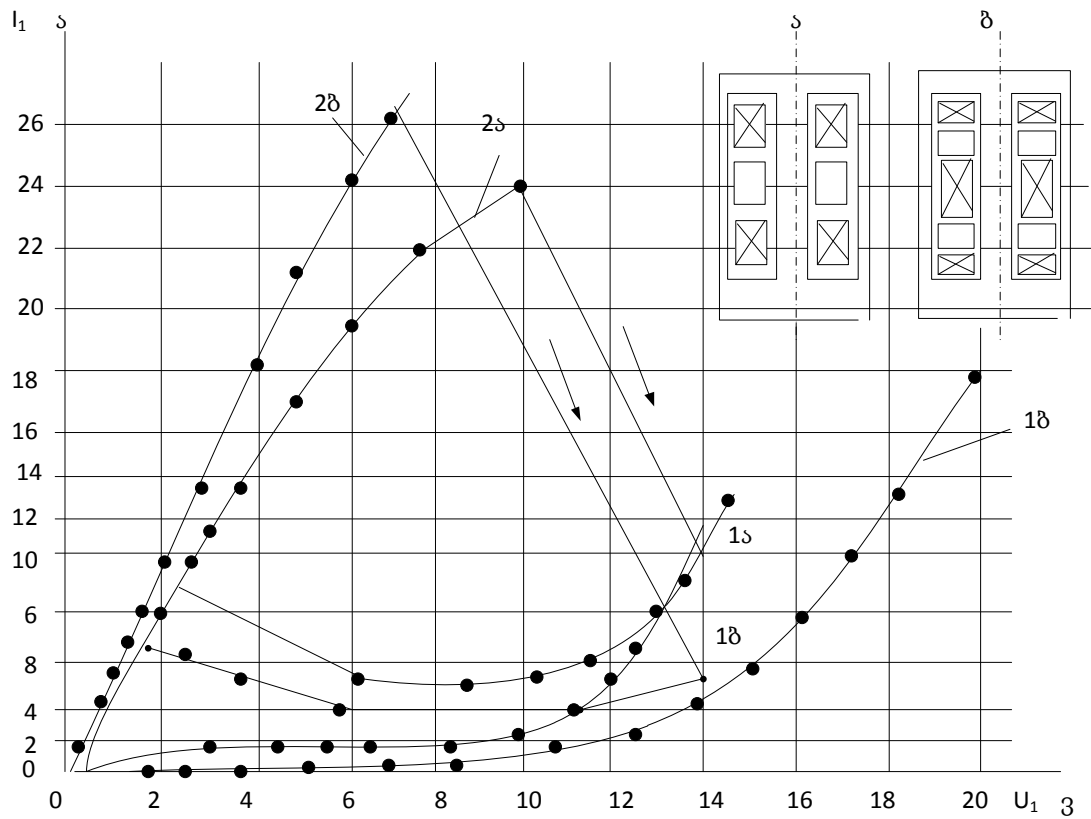
შეიძლება დამზადდეს ტრანსფორმატორი, რომელიც შეიცავს მაგნიტოგამტარს და ორი გრაგნილს: მუშა, რომელიც ჩართულია ქსელში, და მოკლედჩართული - ზეგამტარული რგოლის სახით. ასეთი ცვლადი დენის ტრანსფორმატორი შეიძლება გამოყენებული იქნეს დენის შეზღუდვისათვის ან რეგულირებისათვის. ექსპერიმენტული დანადგარი დენსაზღუდი მოწყობილობის მოდელის გამოკვლევისათვის აღწერილია [6]-ში. განვიხილოდ ექსპერიმენტული მონაცემები, მიღებული

დენსაზღუდი მოწყობილობის მოდელის შესწავლის პროცესში სხვადასხვა ვარიაციის დროს როგორც ზეგამტარული რგოლის რიცხვის, ისე მუშა გრაგნილით. კვლევის დროს გამოყენებული იქნა სხვადასხვა მაღალტემპერატურული ზეგამტარული (მტზგ) რგოლი, დამზადებული ერთი და იგივე ტექნოლოგიით [16].

დენსაზღუდი მოწყობილობა წარმოადგენს ტრანსფორმატორს, რომლის პირველადი მუშა გრაგნილის გავლით გადის შესაზღუდი დენი, ხოლო მეორადი გრაგნილი მოკლედ ჩართულია და შედგება მტზგ რგოლებისაგან. ნომინალურ რეჟიმში მუშაობისას საერთო წინაღობა დენსაზღუდი მოწყობილობის წარმოადგენს მოკლე ჩართული ტრანსფორმატორის წინაღობას და გააჩნია მცირე მნიშვნელობა (წრფივი უბანი). მოკლე შერთვის წარმოქმნის დროს დენი პირველად გრაგნილში იზრდება, რაც იწვევს დენის ზრდას მეორად გრაგნილში და მიმდინარეობს გადასვლა მტზგ რგოლების ნორმალურ მდგომარეობაში.

ამ შემთხვევაში საერთო წინაღობა დენსაზღუდი მოწყობილობის ღებულობს მნიშვნელობას, ანალოგიურად უქმი სვლის რეჟიმში ტრანსფორმატორის წინაღობისა (ქვედა მრუდეები), რის ხარჯზე მიმდინარეობს მოკლე შერთვის დენის შეზღუდვა დასაცავი წრედში. ნახ. 2.11 ნაჩვენებია მუშა გრაგნილის და ზეგამტარული რგოლების რიცხვის პარამეტრების გავლენა დენსაზღუდი მოწყობილობის ვოლტ-ამპერულ მახასიათებელზე.

აქ შედარება ხდება ორი დენსაზღუდი მოწყობილობის სიმეტრიულად მონაცვლე გრაგნილებით (ნახ.2.11): ა - გრაგნილი - რგოლი-გრაგნილი (ერთი ჯგუფი); ბ- გრაგნილი-რგოლი-გრაგნილი, გრაგნილი-რგოლი-გრაგნილი (ორი ჯგუფი). ზეგამტარული რგოლების ზომები შერჩეულია ისე, რომ ზეგამტარული მასალების რაოდენობა ორივე შემთხვევაში დაახლოებით ერთნაირია.



ნახ.2.11. დენსაზღუდის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები ზეგამტარული რგოლების სხვადასხვა რიცხვის დროს

ნახ.2.11-დან ჩანს, რომ დენსაზღუდი მოწყობილობის საერთო წინაღობის ცვლილება, რომელსაც გააჩნია გრაგნილი, შედგება ერთი ჯგუფისაგან, ნაკლებია (დაახლოებით 3-ჯერ), ვიდრე მოწყობილობის წინაღობის ასევე ცვლილება, გააჩნია გრაგნილი, რომელიც შედგება ორი ჯგუფისაგან მონაცვლე გრაგნილებით. ამგვარად, ეს წარმოადგენს ექსპერიმენტულ მტკიცებულებას დენის ჯერადობის გაზრდისა მეორადი გრაგნილის სექციონირების ხარჯზე [8].

განვიხილოდ მაგნიტური ველის განაწილება ტრანსფორმატორისთვის მოკლე შერთვის რეჟიმში. მაგნიტური ველის მაქსიმალური ინდიქცია B_m

$$B_m = \frac{\mu_0 I_K W}{\Delta R}$$

სადაც ΔR - გრაგნილის რადიალური ზომა; W -ხვიების რიცხვი რადგანაც პირველადი გრაგნილი დამზადებულია ერთი და იგივე სადენისგან, მაშინ $B_{m\beta}$ დაახლოებით ორჯერ ნაკლებია, ვიდრე $B_{m\alpha}$. ეს ნიშნავს, რომ ბ-ს შემთხვევაში (ნახ.2.11) მტზგ რგოლის გადასვლა ნორმალურ მდგომარეობაში განხორციელდება დიდი დენის დროს (მტზგ რგოლი დამზადებულია იგივე მასალისაგან).

ეხლა განვიხილოდ ტრანსფორმატორის უქმი სვლის რეჟიმი (როგორც წესი, აქტიური წინაღობა მტზგ რგოლების ძალიან დიდია). ბ-ს შემთხვევაში (ნახ.2,11) პირველადი გრაგნილის ინდუქციური წინაღობა აღმოჩნდება დიდი ა-ს პირველადი გრაგნილის ინდუქციური წინაღობისა, ამიტომ ბ მრუდი (ნახ.2.11) გადის ა მრუდის ქვემოთ.

2.3. ზეგამტარები ელექტროენერგეტიკისათვის

მძლავრდენისა მაღალტემპერატურული ზეგამტარული (მტზგ) სადენების დამუშავება პირველ ეტაპზე უმრავლეს დამამზადებლებს მოუხდა გამოყენებინა ადრე კარგად ათვისებული დაბალტემპერატურული ზეგამტარული სადენების დამზადების ტექნოლოგია „ფხვნილი მილში“. აღნიშნული ტექნოლოგიური პროცესი მოიცავს 3 ეტაპს:

1) მეტალის მილის (როგორც წესი, ვერცხლისგან) შევსება მტზგ ფხვნილით (ძირითადად B_i -ის სისტემით); 2) შევსებული მილის მოჭიმვა და გაგლინვა; 3) მრავალჯერადი ციკლი „მოწვა-ბრტყელი გაგლინვა“. რუსეთში „ფხვნილი - მილში“ ტექნოლოგიის მიხედვით მიღებულია B_i -სისტემის ლენტები 250 მეტრის სიგრძემდე.

უნდა აღინიშნოს, რომ „ფხვნილი მილში“ ტექნოლოგია ხასიათდება ნაკლოვანებებით:

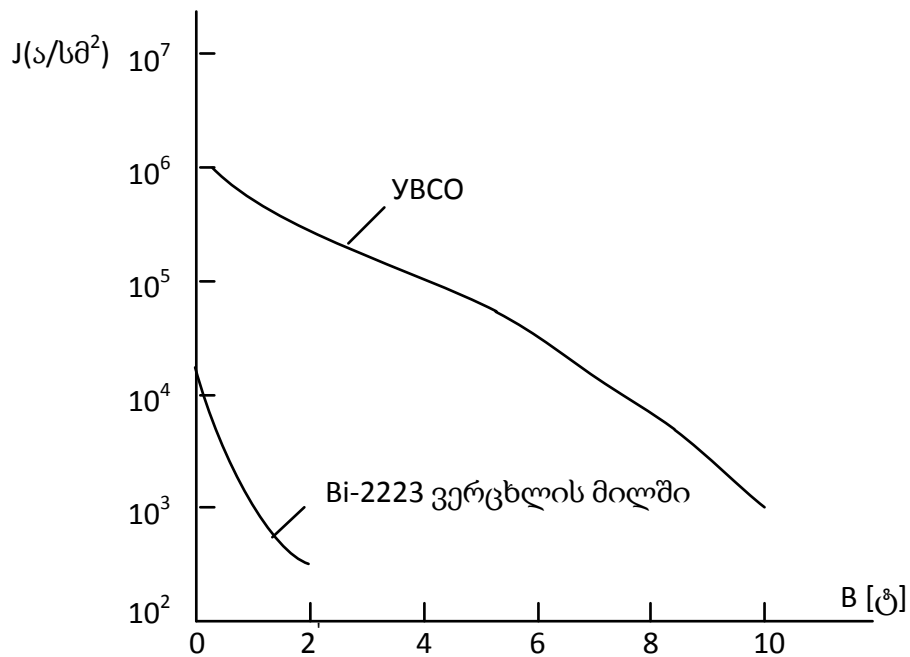
1) გაგლინვის პროცესში მტზგ მასალის დეფორმირების აუცილებლობა (აქედან გამომდინარეობს მრავალჯერ მოწვა); 2) B_i სისტემის მიღებული

სადენის დენგამტარობის უნარი ეცემა მაგნიტურ ველში ~ 1 ტლ (რაც ზღუდავს მის გამოყენებას მთელი რიგ მოწყობილობებში); 3) მაღალი ღირებულება, გამოწვეული ვერცხლის მატრიცით.

აღნიშნულ მასალებმა თავისი ამოცანა შეასრულეს. მათ მიერ დამზადებული იქნა კაბელები, ტრანსფორმატორები, დენსაზღუდეები, დენის რეგულატორები, ძრავები და გენერატორები. აჩვენეს პრინციპული უპირატესობა მტზგ მძლავრდენისა მოწყობილობებმა ტრადიციული მოწყობილობების წინაშე. ისინი ცნობილია, როგორც მტზგ სადენები პირველი თაობის - 1G. ამის შემდეგ გადავიდნენ პრინციპულად ახალ ტექნოლოგიაზე - აფსკური (საზღვარგარედ მიღებულია ტერმინი „დაფარული“ (coated) ტექნოლოგია) მტზგ (Y-სისტემა) მასალა დაილექება სპეციალურად დამზადებული ლენტისმაგვარი ფუძემრეზე (გამოირიცხება მტზგ მასალის დეფორმაციის პროცედურა). შედეგი მეტად პერსპექტიულია. ახალი სადენებმა მიიღეს სახელწოდება მტზგ სადენები მეორე თაობის (2G-second generation).

მახასიათებლები 2G მტზგ სადენების (იტრიუმის YBaCuO სისტემის საფუძველზე) შედარებით 1Gმტზგ სადენებთან ($BiSrCaCuO$) ნაჩვენებია ნახ.2.12 სადენში Y - სისტემის საფუძველზე კრიტიკული დენის მნიშვნელობა 10-ჯერ უფრო დიდია, ვიდრე Bi - სისტემის სადენებში, და რჩება აღნიშნულ დონეზე მნიშვნელოვნად მაგნიტური ველების დიდ ინტერვალში.

მსოფლიო კონკურენტუნარიანი ფირმებს შორის დგას ამოცანა პირველად აითვისონ სამრეწველო წარმოება 2G მტზგ სადენების მაღალი ხარისხის და ღირებულებით ნაკლები ან ტოლი 10\$/1კა.მ. აშშ-ის ნაციონალური ლაბორატორიების წინაშე დასმულია ამოცანა 2G მტზგ სადენების დამზადების ოპტიმალური ტექნოლოგიების დამუშავების. თითოეული სამი ლაბორატორიიდან - ლოსალამოსკის (LANL), ოკრიდუსკის (ORNL) და არგონსკის (ANL), თითოეულმა დამოუკიდებლად დაამუშავა დამზადების ტექნოლოგია.



ნახ.2.12. მტზგ Bi-(1G) და Y-სისტემის (2G) სადენებისთვის მაგნიტურ ველში კრიტიკული დენის სიმკვრივის შედარება

მაგალითად LANL ლაბორატორიამ გამოიყენა ორი მეთოდი მტზგ (YBCO) სადენის დამზადებისთვის:

- 1) იმპულსური ლაზერული დაფარვით (Pulsed Laser Deposition, PLD).
- 2) იონურ-სხივური დალექვით (Ion Beam-Assisted Deposition, IBAD).

მრავალფენოვანი სტრუქტურა დაიფარება ზემოდან ვერცხლის თხელი ფენით.

იაპონიაში მტზგ 2G სადენის დამუშავებით დაკავებულია ფირმები Toshiba, Furukawa, Sumitomo Electric Industry, Fujikura, Showa Electric.

აშშ-ის ფირმებისაგან (PLD, IBAD) განსხვავებით იაპონური ფირმებმა აითვისეს მტზგ მასალების დალექვის პროცესი და დაფარვა ორთქლით (ლითონორგანული შეერთებით (MOCVD)). ბუფერულ ფენად გამოიყენეს GdZrO, ხოლო მტზგ დასაფარ მასალად გამოიყენეს შენაერთი HoBaCuO. დამუშავების შემდეგი ეტაპით, იაპონიაში მიღწეული იქნა დამზადებულიყო 500 მ სიგრძის ლენტა 300ა კრიტიკული დენით, როცა დაფარვის დალექვის სიჩქარე შეადგენდა 5 მ/სთ.

გერმანიაში შეიქმნა კონსორციუმი Trithor GmbH, რომელმაც დაიკავა ლიდერის როლი ევროპაში, როგორც პირველი თაობის მტზგ სადენების წარმოებაში. კონსორციუმი ამზადებს მრავალძარღვიანი $B_i - 2223/Ag$ სადენებს სიგრძით 1200 მეტრამდე. (განივი კვეთი 4,1 მმ×0,22 მმ) დენებზე 50 ა, 60ა, 70ა, 80ა, 90 ა(77კ, საკუთარ ველში). ბოლო წლებში კონსორციუმმა მიიღო 2 მილიონი ევრო ევროპული კომისიიდან (EUCommission) 2G მტზგ სადენების სამრეწველო წარმოების შექმნისათვის.

კონსორციუმის ხელმძღვანელობის აზრით მეორე თაობის 2G მტზგ სადენების შექმნის შემთხვევაში სავსებით შეიცვლება ელექტროენერგეტიკის მთლიანი სტრუქტურა მაღალი მარგი ქმედების კოეფიციენტით და დაბალი ელექტროენერგის დანაკარგებით.

2.4. მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღუდისთვის ზეგამტარული სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში

ენერგეტიკული დანიშნულების ზეგამტარული დენსაზღუდის 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.

თუ ერთძარღვიანი ზგ სადენში (ნახ. 2.13, ა) გადის ცვლადი სინუსოიდური დენი

$$i = I_a \sin \omega t = i_a^* I_a \sin \omega t, \quad i_a^* = \frac{I_a}{I_a} \quad (2.6)$$

სადენის ზედაპირზე მაგნიტური ინდუქციისათვის გვექნება:

$$B_o = \mu_o \frac{i}{2\pi r_o} = {}^* B_{\beta}; \quad {}^* B_o = \frac{B_o}{B_{\beta}} = {}^* i; \quad {}^* B_{o\beta} = {}^* i_{\beta}; \quad B_{\beta} = \mu_o \frac{i_{\beta}}{2\pi r_o}; \quad (2.7)$$

სადაც I_{β} -დენის კრიტიკული მნიშვნელობა,

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

ზეგამტარულ სადენში დენი შედგება ორი მდგენელისაგან (ნახ.2.13, ა)

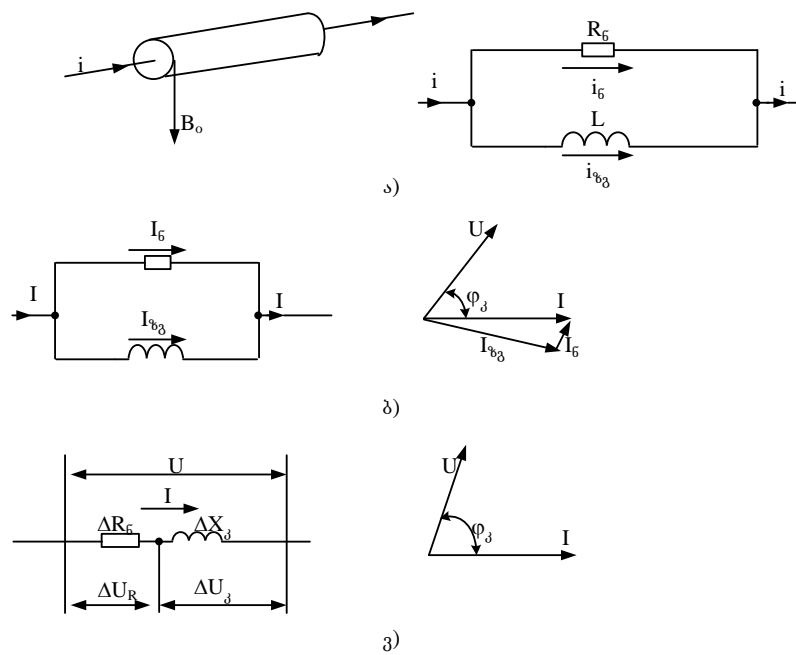
$$i = i_{\beta} + i_{\text{ზგ}} \quad (2.8)$$

სადაც i_{β} -დენის აქტიური მდგენელი, ან დენი გამოწვეული ნორმალური ელექტრონებისაგან,

$i_{\text{ზგ}}$ - დენის ზეგამტარული მდგენელი.

სრული დენის აქტიური მდგენელი იზღუდება წინააღობით, რომლისთვისაც

$$R_{\beta} = \rho_{\beta} \frac{\ell}{S_{\lambda}} = \frac{\rho_{\beta o}}{n_{\beta}^* S_o S_{\lambda}^*} = \frac{1}{n_{\beta}^* S_{\lambda}^*} R_{\beta o}, \quad (2.9)$$



ნახ. 2.13. სქემები და ვექტორული დიაგრამები

$$\text{სადაც } R_{\beta o} = \rho_{\beta o} \frac{\ell}{S_o},$$

ℓ - სადენის სიგრძე,

$$\rho_{\beta} = \frac{\rho_{\beta o}}{n_{\beta}^*} - \text{სადენის ხვედრითი წინააღობა,}$$

$s_{\lambda}^* = \frac{S_{\lambda}}{S_o}$ - დენით დაკავებული ფარდობითი ფართი ზგ სადენის მთლიანი ფართის $S_o = \pi r_o^2$ ნაწილიდან,

ρ_{60} - ხვედრითი წინაღობა, როცა, $n_{6}^* = 1$,

$n_{6}^* = \frac{n_6}{n_o}$ - ნორმალური ელექტრონების სიმკვრივის ფარდობითი მნიშვნელობა,

n_6 - ერთეულ მოცულობაში ნორმალური ელექტრონების რიცხვი,

n_o - ერთეულ მოცულობაში საერთო ელექტრონების რიცხვი,

R_{60} -ნორმალურ მდგომარეობაში ზგ სადენის წინაღობა, როცა $n_{6}^* = 1$.

სრული დენის ზეგამტარული მდგენელი იზღუდება კინეტიკური ინდუქციურობით

$$L_{\lambda} = \ell_{\lambda} \frac{\ell}{S_{\lambda}} = \frac{\ell_{\lambda}}{n_{6\lambda}^*} \frac{\ell}{s_{\lambda}^* S_o} = \frac{1}{n_{6\lambda}^* s_{\lambda}^*} L_{\lambda o} \quad (2.10)$$

სადაც $L_{\lambda o} = \ell_{\lambda o} \frac{\ell}{S_o}$; $\ell_{\lambda} = \frac{\ell_{\lambda o}}{n_{6\lambda}^*}$ - ხვედრითი კინეტიკური ინდუქციურობა;

$\ell_{\lambda o}$ - ხვედრითი კინეტიკური ინდუქციურობა, როცა $n_{6\lambda}^* = 1$; $\ell_{\lambda o} = \frac{m}{n_o e^2}$,

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

$n_{6\lambda}^*$ და n_6^* ელექტრონების სიმკვრივის ცვლილების განსაზღვრისათვის, მაქსიმალური დენისაგან დამოკიდებულებაში გვექნება

$$n_{6\lambda}^* = 1 - \frac{\gamma_o}{B_{\lambda}} = 1 - \frac{\gamma_o}{I_{\lambda}}; \quad n_6^* = \frac{\gamma_o}{B_{o6}} = \frac{\gamma_o}{I_{o6}}$$

სადაც γ_o - უგანზომილებო კოეფიციენტი, რომელიც მიიღება ექსპერიმენტალური გზით.

დენით დაკავებული ფართი, იცვლება დენის შეღწევის სიღრმისგან

დამოკიდებულებაში:

$$s = \frac{S_{\lambda}}{S_o} = \frac{2\pi(r_o - \frac{\lambda}{2})\lambda}{\pi r_o^2}, \quad (2.11)$$

სადაც λ -დენის შეღწევადობის სიღრმე,

$$\lambda = \frac{\lambda_o}{\sqrt{n_{6\lambda}^*}} = \frac{\lambda_o}{\sqrt{1 - \frac{\gamma_o}{I_{\lambda}}}} \quad (2.12)$$

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:

$$J_{\theta}^{\text{შევს.}} = r_o \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_o}{r_o}\right)^2} \quad (2.13)$$

დენების მომქმედი მნიშვნელობების განსაზღვრისთვის, გვექნება (ნახ.2.13, ბ).

$$I = I_{\zeta} + I_{\text{ზგ}}, \quad (2.14)$$

$$\text{სადაც } I_{\zeta} = \frac{U}{R_{\zeta}}; \quad I_{\text{ზგ}} = \frac{U}{jX_{\zeta}}; \quad X_{\zeta} = \omega L_{\zeta}$$

დენი იწვევს სადენში ძაბვის ვარდნას (ნახ. 2.13, ვ):

$$U = \Delta Z I = (\Delta R_{\zeta} + j\Delta X_{\zeta}) I, \quad (2.15)$$

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

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

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

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

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

სრული დენის მდგენელებისთვის გვექნება:

$$I_{\zeta} = \frac{\Delta Z}{R_{\zeta}} I = \frac{X_{\zeta}}{\sqrt{R_{\zeta}^2 + X_{\zeta}^2}} I, \quad (2.16)$$

$$I_{\text{ზგ}} = \frac{\Delta Z}{X_{\zeta}} I = \frac{R_{\zeta}}{\sqrt{R_{\zeta}^2 + X_{\zeta}^2}} I, \quad (2.17)$$

ფარდობითი ფართი სადენის დენით შევსებამდე ტოლია:

$$s = \frac{\lambda}{r_o} \left(2 - \frac{\lambda}{r_o}\right) = \frac{\lambda_o}{r_o \sqrt{1 - I_{\theta}^{*Y_0}}} \left(2 - \frac{\lambda_o}{r_o \sqrt{1 - I_{\theta}^{*Y_0}}}\right) \quad (2.18)$$

$0 < s < s^{\text{შევს.}}$, სადენის დენით შევსების შემდეგ $s = 1$

ΔR წინააღობაში აქტიური დანაკარგების განსაზღვრისათვის გვექნება

$$\Delta P = I_6^2 R_6 = I^2 \Delta R = \frac{R_6 X_3^2}{R_6^2 + X_3^2} I^2 \quad (2.19)$$

სადენის კვეთის დენით შევსებით, კინეტიკური ინდუქციური წინაღობა იზრდება უსასრულოდამდე, დენი აღწევს კრიტიკულ მნიშვნელობას:

$$I = I_3 = I_6; I_{\text{ზგ}} = 0; \Delta P = R_6 I^2 \quad (2.20)$$

სადენი სრულად გადადის ნორმალურ მდგომარეობაში.

ზეგამტარულ დენსაზღუდის 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

$$i = I_3 \sin \omega t,$$

სადაც I_3 - მაქსიმალური დენის მნიშვნელობა ზგ ძარღვებში

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

i დენი შეიძლება წარმოვიდგინოთ შემდეგი სახით:

$$i = I_3 I_3^* \sin \omega t,$$

სადაც - i დენის მყისი მნიშვნელობა, ზგ ძარღვში

$$I_3^* = \frac{I_3}{I_3}; 0 < I_3^* < 1,$$

სადაც I_3^* - მაქსიმალური დენის ფარდობითი მნიშვნელობა.

როცა $I_3^* = 1$ ძარღვი გადადის ნორმალურ მდგომარეობაში, იკარგება ზეგამტარობა. ძარღვების დენი მის ზედაპირზე ქმნის ველს

$$B_{\text{ო.ა.}} = \mu_0 \frac{i}{\pi d_3},$$

სადაც d_3 – ზგ ძარღვის დიამეტრი, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ ჰ/მ

B_{od} მაგნიტური ინდუქციის მნიშვნელობას, I_3 კრიტიკული დენის საშუალებით ექნება შემდეგი სახე:

$$B_{od} = \mu_0 \frac{I_3^* I_3}{\pi d_3} \sin \omega t$$

მაგნიტური ინდუქციის კრიტიკული მნიშვნელობა

$$B_3 = \mu_0 \frac{I_3}{\pi d_3},$$

შესაბამისად $B_{od} = B_3 I_3^* \sin \omega t$

მაქსიმალური მაგნიტური ინდუქციის ფარდობითი მნიშვნელობა:

$$B_{od}^* = \frac{B_{od}}{B_3} = I_3^*$$

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

$$B_s = \mu_0 \frac{N \cdot i}{\pi D_s},$$

სადაც D_s - სადენის დიამეტრი.

თუ სადენი შესრულებულია მჭიდროდ შევსებული ზგ ძარღვებით, მაშინ

$$D_3 \cong \sqrt{N} d_3$$

ამ შემთხვევაში სადენის ზედაპირზე მაგნიტური ინდუქცია

$$B_s = \mu_0 \frac{N \cdot i}{\pi \sqrt{N} d_3} = B_{od} \sqrt{N},$$

ე.ი. B_3 აჭარბებს B_{od} სიდიდეს \sqrt{N} -ჯერ, და როცა $B_s = B_3$ დენგამტარუნარიანობა სადენის მცირდება \sqrt{N} -ჯერ, შედარებით ერთი ძარღვის დენგამტარუნარიანობასთან.

სადენის B_s ინდუქციის შენარჩუნებისთვის ერთი ძარღვის B_{od} 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

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

აქტიური ΔR წინააღობისთვის გვექნება:

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

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

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

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

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

კინეტიკური ინდუქციური წინააღობა $X_{\text{კ}}$, რომელიც ზღუდავს ზეგამტარულ დენს ტოლია

$$X_{\text{კ}} = X_{\text{კ}0} \frac{1}{1 - I_{\text{მ}}^* \gamma_0}$$

$$X_{\text{კ}0} = \ell_{\text{კ}0} \frac{\ell}{s}$$

სადაც $X_{\text{კ}0}$ -გრაგნილის კინეტიკური ინდუქციური წინააღობა, როცა $I_{\text{მ}}^* \gamma_0 = 0$

ΔR -ის რიცხოვრივი შეფასება, როცა $\rho_{60} = 4 \cdot 10^{-7}$ ომი. მ, $\ell_{j_0} = 10^{-22}$ ომი, მ, როცა $I_{\theta}^{*Y0} = 0,5, \Delta R = 10^{-22} R_{60}$, 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

$$\phi_x = \ell B_0 X = \ell B_j \dot{B}_0 X = \ell I_{\theta}^* I_j X$$

$$\text{სადაც } \dot{B}_0 = \frac{B_0}{B_j}$$

მაგნიტური ნაკადი წარმოიქმნება ზეგამტარული დენის მდგენელით. დაუშვათ, რომ მაგნიტური ინდუქცია სადენის შიგნით ინარჩუნებს თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას $B_{0\theta}$ სადაც $-B_{0\theta}$ მაგნიტური ინდუქცია სადენის ზედაპირზე. ე.მ.მ-ის მაქსიმალური მნიშვნელობა, წარმოქმნილი მაგნიტური ნაკადის ცვლილებით, ტოლია

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

R_x წინაღობა ელემენტარული dx ფენის ტოლია

$$R_x = \rho_6 \frac{\ell}{S_x}$$

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:

$$\Delta P_x = \frac{E_{\theta}^2 x}{R_x} = \frac{\omega^2}{\rho_6} 2\pi \ell x^2 (r-x) I_{\theta}^{*2} I_j^2 dx$$

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

$$\Delta P_{\text{გრიგ.}} = \frac{1}{2} \int_0^{\lambda} \Delta P_x dx = \frac{1}{2} \int_0^{\lambda} \frac{\omega^2}{\rho_6} 2\pi \ell I_{\theta}^{*2} I_j^2 X^2 (r-x) dx$$

გაინტეგრირებისას, მივიღებთ:

$$\Delta P_{\text{გრიგ.}} = \frac{\omega^2}{3\rho_6} I_{\theta}^{*2} I_j^2 \ell r \lambda^3 \left(1 - \frac{3}{4} \cdot \frac{\lambda}{r}\right) \pi$$

ჩავსვათ ρ_6 და λ -ის მნიშვნელობები

$$\rho_6 = \frac{\rho_{60}}{I_{\theta}^* r_0}, \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - I_{\theta}^* r_0^2}}$$

გრიგალური დანაკარგებისთვის მივიღებთ გამოსახულებას

$$\Delta P_{გრ.გ.} = \frac{1}{3} \frac{\omega^2}{\rho_{60}} \ell r \pi I_{\theta}^* I_3^2 \lambda_0^3 \frac{1}{(1 - I_{\theta}^* r_0^2)^{\frac{3}{2}}} \left(1 - \frac{3}{4} \frac{\lambda_0}{r \sqrt{1 - I_{\theta}^* r_0^2}} \right)$$

I_{θ}^* -ის გაზრდით დანაკარგები იზრდება, როცა $I_{\theta}^* = I_{\theta}^*{}_{კვ.} \approx 1, \lambda = r$ მიიღწევა მაქსიმალური მნიშვნელობა.

$$\Delta P_{გრ.გ.} = \frac{\omega^2}{3\rho_{60}} I_3^2 \ell r \pi \frac{1}{4}$$

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

$$\Delta P_{გრ.გ.} = \frac{1}{12\rho_6} \omega^2 r^2 V I_3^2$$

მატრიცაში გრიგალური დანაკარგებისთვის ანალოგიურად, შეიძლება მივიღოთ გამოსახულება

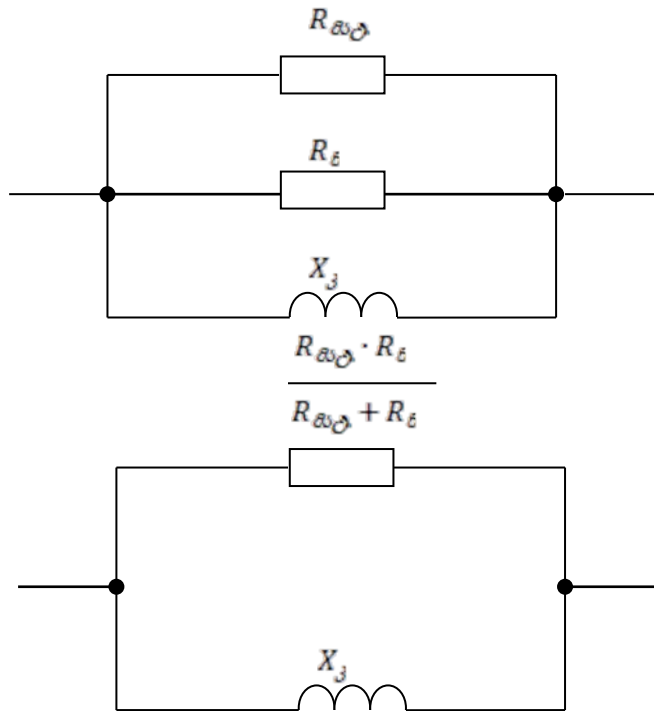
$$\Delta P_{გრ.მ.ტ.} = \frac{\omega^2}{3\rho_{მ.ტ.}} I_3^2 \ell b^4 \pi \frac{1}{4},$$

სადაც $\rho_{მ.ტ.}$ - 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 $R_{მ.ტ.}$ შეერთებულია პარალელურად R_6 წინალობასთან (ნახ.2.2).

$R_{მ.ტ.}, R_6$ წინალობების შეცვლით ერთი ეკვივალენტური წინალობით $R_{კვ.}$ მივიღებთ წრედს, რომელშიც კინეტიკური ინდუქციური წინალობა X_3 შეერთებულია პარალელურად ეკვივალენტური წინალობასთან

$$R_{კვ.} = \frac{R_6 \cdot R_{მ.ტ.}}{R_6 + R_{მ.ტ.}}$$



ნახ. 2.14. მატრიცის წინაღობის გავლენის განსაზღვრა დანაკარგებზე.

რაც ახდენს გავლენას ΔR წინაღობაზე, რომელიც განისაზღვრება გამოსახულებით

$$\Delta R = \frac{R_{გვ} \cdot X_{გ}^2}{R_{გვ} + X_{გ}^2}$$

ჰისტერეზისული დანაკარგები $\Delta P_{ჰისტ.}$ გამოწვეული საკუთარი მაგნიტური ველით განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით [23]:

$$\Delta P_{ჰისტ.} = \frac{\mu_0}{\pi} I_3^2 \ell f \frac{1}{6} \left(\frac{\Delta I}{2I_3} \right)^3$$

ვითვალისწინებთ, რა

$$\frac{\Delta I}{2I_3} = \frac{2I_{\theta}}{2I_3} = I_{\theta}^*$$

მივიღებთ:

$$\Delta P_{ჰისტ.} = \frac{\mu_0}{6\pi} f \ell I_3^2 I_{\theta}^{*3}$$

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:

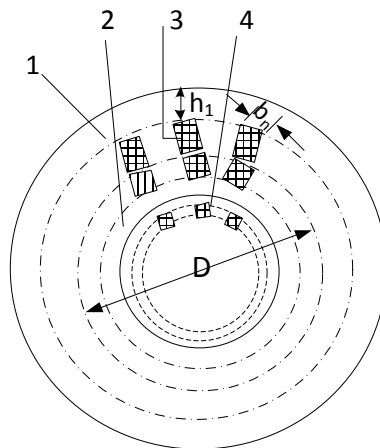
$$\Delta P_\theta = \Delta P_{ელ.ზგ.} + \Delta P_{ელ.მატ.} + \Delta P_{გრიგ.მატ.} + \Delta P_{გრიგ.ზგ.} + \Delta P_{ჰისტ.ზგ.}$$

თავი III. მართვადი რეაქტორის ტიპის მაღალტემპერატურული ზეგამტარული დენსაზღვრული მბრუნავი მაგნიტური ველით

3.1. მართვადი რეაქტორის ძირითადი თვისება და კონსტრუქციული გადაწყვეტა

მართვადი რეაქტორი წარმოადგენს ელექტრომაგნიტურ აპარატს, რომლის ინდუქციური წინაღობა მდოვრედ რეგულირდება მუდმივი დენით შემაგნიტების გზით.

რეაქტორის ცილინდრული მაგნიტოგამტარი დამზადებულია ფურცლოვანი ელექტროტექნიკური ფოლადისაგან და გააჩნია კილოები, რომელშიც ჩაწყობილია სამფაზა გრაგნილი და ტოროიდული მართვის გრაგნილი, რომელიც მოიცავს ერთ-ერთ უღელს (ნახ.3.1).

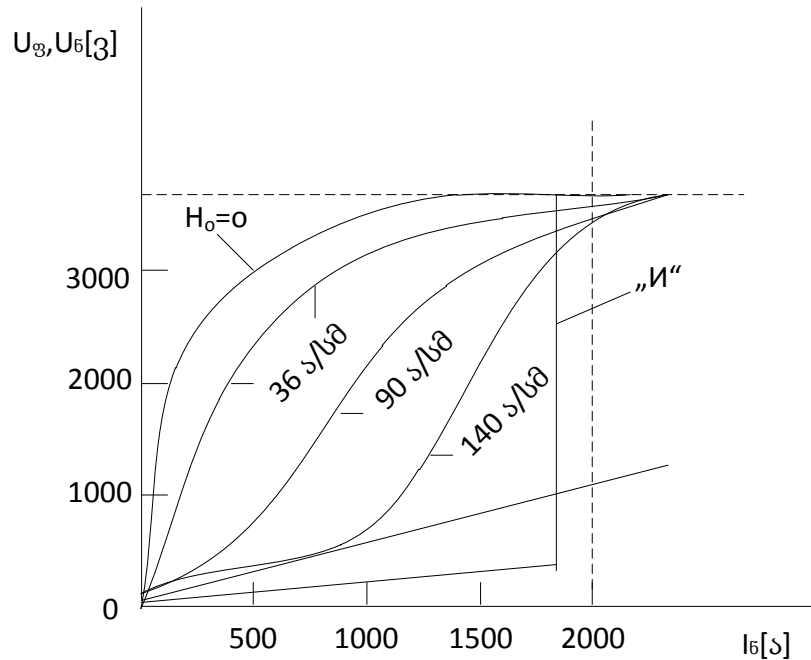


ნახ.3.1. მბრუნავი მაგნიტური ველით მართვადი რეაქტორის განივი ჭრილი
1-გარე უღელი; 2-შიდა უღელი; 3-სამფაზა გრაგნილი; 4-მართვის გრაგნილი

მართვის გრაგნილში დენის გაზრდის დროს მაგნიტური ველის დამაბულობის მუდმივი მდგენელი დასამაგნიტებელ უღელში იზრდება, რაც განაპირობებს ფოლადში მაგნიტური შეღწევადობის შემცირებას. მაგნიტური შეღწევადობა ფოლადში შეიძლება შემცირდეს ერთამდე, რაც შეესაბამება დასამაგნიტებელი უღლის დაშორებას.

ნახ.3.2. ნაჩვენებია რეაქტორის საანგარიშო ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი, გადამცემი ხაზში მიმდევრობით ჩართვის დანიშნულებით,

მაგნიტური ველის დაძაბულობის H_0 მუდმივი მდგენელის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის, აგრეთვე მაგნიტოგამტარის შიდა ნაწილის ამოღებით (წრფივი მახასიათებელი). ანალოგიური სახე გააჩნია რეაქტორის მახასიათებლებს, პარალელური ჩართვის დროს.



ნახ.3.2. მართვადი რეაქტორის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები ქსელში მიმდევრობით ჩართვით. ნომინალური ძაბვა $U_{\text{ფ}} = 6,3$ კვ, ნომინალური დენი $I_{\text{ფ}} = 500$ ა, $U_{\text{ფ}}$, I - რეაქტორის ფაზური ძაბვა და დენი

რეაქტორის რეაქტიული სიმძლავრე რეგულირდება, ძაბვით, მისი პარამეტრებით და შემაგნიტების დენის სიდიდით. შევთანხმდეთ, რომ რეგულირების სიღრმეს $k_{\text{რეგ}}$ უწოდოთ რეაქტორის ნომინალური დენის ფარდობას უქმი სვლის დენთან, როცა შემაგნიტება გამორიცხულია (ნომინალური ძაბვის დროს).

რეგულირების სიღრმე წარმოადგენს რეაქტორის ერთ-ერთ განმსაზღვრელ მაჩვენებელს; მისი გაზრდისათვის სასურველია დავიყვანოთ მინიმუმზე მაგნიტოგამტარში არამაგნიტური ღრეჩო.

იმასთან დაკავშირებით, რომ მართვის გრაგნილი მოიცავს მხოლოდ შიდა ტოროიდულ უღელს, რეაქტორში არ არის პირდაპირი ინდუქციური კავშირი სამფაზა წრედსა და მართვის წრედს შორის. მაგნიტური ნაკადი,

შექმნილი მართვის გრაგნილით შეიკვრება დასამაგნიტებელი ულლის ზღვრებში და არ შეიღწევა სამფაზა გრაგნილში. მეორე მხრივ, მართვის გრაგნილში შეიღწევა ცვლადი მაგნიტური ნაკადი და საპოლუსო დანაყოფზე აღიძვრება ელექტრომაგნიტური ძალა, ცვლადი ძაბვა აღნიშნული გრაგნილის გამომუშავებაზე ტოლია ნულის, შედეგად აპარატის წრიული სიმეტრიისა, ასე რომ მუდმივი დენის წყაროს წრედში არ აღიძვრება პარაზიტული ცვლადი მდგენელები. ურთიერთქმედება მართვის წრედსა და სამფაზა მუშა წრედს შორის ხორციელდება დასამაგნიტებელი ულლის მაგნიტური მდგომარეობის ცვლილების გზით, რაც საშუალებას იძლევა მივიღოთ შედარებით მაღალი სწრაფქმედება. ქსელის სიმეტრიული და სინუსოიდური ძაბვის დროს რეაქტორის დენი რჩება სინუსოიდური, მიუხედავად ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის არაწრფივობისა (ნახ.3.2).

ეს აიხსნება რეაქტორის წრიული მაგნიტური სიმეტრიით, სამფაზა განაწილებული გრაგნილების თვისებებით 60 გრადუსიანი ფაზური ზონით და განსაკუთრებულობით ტოროიდული მართვის გრაგნილის, შემაგნიტების დროს არ ირღვევა აპარატის სიმეტრია [18].

ქსელის ძაბვის სიმეტრიის დარღვევა იწვევს დენის მრუდის ფორმის დამახინჯებას და ერთი ფაზის გაწყვეტის დროს რეაქტორი მოითხოვს ქსელიდან შემაგნიტების დენს, რომელიც ახლოსაა ჰარმონიული შემადგენლობით ტრანსფორმატორის უქმი სვლის დენტან, ე.ი. შეიცავს კენტი ჯერადობის მაღალი რიგის ჰარმონიკებს. შემაგნიტება ახლოებს დენის მრუდის ფორმას სინუსოიდურთან.

მართვადი რეაქტორს მბრუნავი მაგნიტური ველით, შეიძლება გააჩნდეს სხვადასხვა კონსტრუქცია იმის და მიხედვით, სად არის განლაგებული არამაგნიტური ღრეჩო: მაგნიტური გამტარის კბილურ ნაწილებს შორის (ნახ.3.2); კბილებსა და შიდა უღელს შორის; კბილებსა და გარე უღელს შორის, აგრეთვე რა სახით არის ის შესრულებული.

სამფაზა და მართვადი გრაგნილი შეიძლება განთავსდეს საერთო ან ცალკეულ კილოებში; შემაგნიტება შეიძლება, როგორც გარე, ისე შიდა უღელზე. თითოეული მათგანს შეიძლება გააჩნდეს თავისი უპირატესი გამოყენება. კონსტრუქციაში გამოყენებულია მაღალტემპერატურული ზეგამტარული სადენები, რაც ზრდის დენსაზღუდის მარგი ქმედების კოეფიციენტს და ამცირებს მოწყობილობაში ელექტრულ დანაკარგებს.

3.2. მოკლე შერთვის დენების შეზღუდვა მართვადი რეაქტორის საშუალებით

ნახ.3.2-ზე ნაჩვენებია ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი „იდეალური“ დენსაზღუდის, მოკლე შერთვის დენებისათვის (ტეხილი ხაზი „II“). ნომინალური დენის დროს წინაღობა ასეთი დენსაზღუდისა ახლოსაა ნულთან, ხოლო მოკლე შერთვის დროს წინაღობა ნახტომისებურად იზრდება.

მართვადი რეაქტორის მახასიათებელი გარკვეული ხარისხით თანხვედრაშია იდეალურ მახასიათებელთან „II“ (ნახ.3.2) ერთის განსხვავებით, რომ გადასვლა მცირე წინააღობიდან დიდ წინააღობაზე მიმდინარეობს მდოვრე მრუდით. უნდა აღინიშნოს, რომ რეაქტორის წინააღობა იცვლება შესაბამისად მისი მახასიათებლით ამა თუ იმ მარეგულირებელი მოწყობილობის ჩარევის გარეშე, ე.ი. დაგვიანების გარეშე. დენსაზღუდის დინამიკური მახასიათებელი, გარკვეულად განსხვავდება მოყვანილი ნახ.3.2 სტატიკური მახასიათებლისაგან. კვლევა აჩვენებს, რომ მოკლე შერთვის დარტყმის დენი იზღუდება ნაკლები ხარისხით, ვიდრე დამყარებული.

ფერომაგნიტური დენსაზღუდის მოქმედების ეფექტურობა დამოკიდებულია იმაზე, თუ რამდენჯერ გაიზრდება მისი წინააღობა, ქსელის ნომინალური ძაბვის დროს, შედარებით წინააღობასთან ნომინალური დენის დროს.

რექტორის ინდუქციურობის გაზრდა მოკლე შერთვის რეჟიმში იწვევს ძაბვის რხევების თავისუფალი სიხშირის დადაბლებას, რაც კიდევ მეტად აიოლებს ქსელის დაზიანებული მონაკვეთის გამორთვისას.

3.3. მართვადი რექტორის რეგულირების დრო

გარდამავალ პროცესზე, აღძრული რექტორის მართვის გრაგნილში დენის ცვლილების დროს, ზემოქმედებენ თვით მართვის გრაგნილის პარამეტრები, მუდმივი დენის წრედის გარე პარამეტრები, დენის საწყისი მნიშვნელობა და კვების წყაროს ძაბვის დროში ცვლილება, აგრეთვე ცვლადი დენის გრაგნილზე ძაბვის მნიშვნელობა.

მართვის გრაგნილში გარდამავალი პროცესების რიცხობრივი შეფასება ჩავატაროდ შემდეგი დაშვებებით.

1. დასამაგნიტებელი უღელი წარმოადგენს მაგნიტოგამტარის განკერძოებულ ნაწილს, რომელიც შეიძლება განვიხილოდ ცალკე, თუ რექტორი არაა ჩართული ძაბვის ქვეშ.

2. გარდამავალი პროცესი მართვის გრაგნილში მიმდინარეობს ნელა შედარებით მუშა დენის ცვლილების სიხშირესთან. ასეთი თანაფარდობა ჩვეულებრივ შენარჩუნებულია რექტორში რამოდენიმე კილოვოლტამპერ სიმძლავრიდან.

3. სამფაზა გრაგნილების წრედში დამატებით გარდამავალი პროცესი არ აღიძვრება და სამი ფაზური დენი ერთდროულად, დაგვიანების გარეშე კვალდაკვალ მიყვება მართვის დენის ცვლილებას.

განვიხილოდ სამი შემთხვევა მართვის დენის ცვლილებისა:

- მართვის გრაგნილის ჩართვა სამფაზა გრაგნილში დენის არ არსებობის დროს;
- მართვის გრაგნილის ჩართვა სამფაზა გრაგნილში დენის არსებობის დროს;

- მართვის გრაგნილში დენის ნაწილობრივი ცვლილება, რეაქტორის რეგულირების დროს, ჩართული ძაბვის ქვეშ.

- მართვის გრაგნილის მაგნიტური ნაკადი შეიკვრება დასამაგნიტებელი უღელში, სადაც მას არ ხვდება თავის გზაზე არა მაგნიტური ღრეჩოები (ნახ.3.1). ამგვარად მართვის წრედი წარმოადგენს არაწრფივს. სამფაზა გრაგნილში დენის არ არსებობის, მართვის გრაგნილის ჩართვა ანალოგიურია ფოლადგულარიანი კოჭას ჩართვისა მუდმივ ძაბვაზე.

ასეთი წრედში გარდამავალი პროცესის კვლევისათვის მოხერხებულია ავირჩიოდ შემდეგი გამოსახულება დამაგნიტების მახასიათებლების აღწერისათვის:

$$H = A(e^{\beta B} - 1), \quad (3.1)$$

სადაც H -მაგნიტური ველის დამაბულობა, B -მაგნიტური ველის ინდუქცია, A და β - მუდმივები, დამოკიდებული ფოლადის ხარისხზე და დასამაგნიტებელი უღლის ზომებზე.

(3.1) გამოსახულების გამოყენებით, შეიძლება ვიპოვოთ გარდამავალი პროცესის განტოლებისთვის ამოხსნა

$$\frac{d\psi_{\theta}}{dt} + i_{\theta}R_{\theta} = U_{\theta}, \quad (3.2)$$

საიდანაც მივიღებთ ფორმულას ახალი რეჟიმის დროის დადგომისა შემდეგი სახეში.

მართვის გრაგნილის ჩართვა ძაბვის ქვეშ

$$t = \frac{1}{c_1 + c_2} \ell_n \left[i_{\theta} \frac{c_2}{c_1(1 - i_{\theta})} \right]; \quad (3.3)$$

მართვის წრედის გამორთვა კვების წყაროდან და მისი მოკლე ჩართვა (R_{θ} წინაღობა რჩება წრედის მოკლე ჩართვის ნაწილში).

$$t = \frac{1}{c_1} \ell_n \left[i_{\theta} \frac{M-1}{i_{\theta}M-1} \right] \quad (3.4)$$

(3.3) და (3.4) ფორმულებში აღნიშნულია:

$$C_1 = \frac{A\beta R_{\theta} \Lambda_{\text{საშ}}}{\omega_{\theta}^2 S_{\theta}}; \quad (3.5)$$

$$C_2 = \frac{U_{\theta} \beta}{\omega_{\theta} S_{\theta}}; \quad (3.6)$$

$$i_{\theta} = i_{\theta}/I_{\theta 0}; \quad (3.7)$$

$$M = e^{\beta B_0} (B_0, I_{\theta 0} \text{ დენის დროს}), \quad (3.8)$$

სადაც $\Lambda_{\text{საშ}}$ - დასამაგნიტებელ უღელში მაგნიტური გზის საშუალო სიგრძე; $I_{\theta 0}$ -მართვის გრაგნილში დამყარებული დენის მნიშვნელობა (3.3) ფორმულის ან მისი საწყისი მნიშვნელობა (3.4) ფორმულის მიხედვით; $S_{\text{უ}}$ - უღლის კვეთი.

(3.3) და (3.4) გამოსახულებების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მართვის წრედის არაწრფივობა არსებითად ზემოქმედებს $i_{\theta}(t)$ დენის ცვლილების ხასიათზე. რეაქტორისთვის არ შეიძლება გამოვიყენოთ ჩვეულებრივ წრფივი ელექტრული წრედების თეორიისათვის ცნება „დროის მუდმივა“.

რეაქტორის სწრაფქმედების შეფასებისთვის შეიძლება შევთავაზოთ ნომინალური დენის დადგომის დრო ნულოვანი საწყისი პირობებისთვის t_{θ} . 5000 კვა სიმძლავრის რეაქტორისთვის $t_{\theta} = 1,8$ წმ, რაც შეეხება პირობით დროის მუდმივას.

$$T_{\theta 0} = \frac{t_{\theta}}{3} = \frac{1,8}{3} = 0,6 \text{ წმ}. \quad (3.9)$$

ვინაიდან რეაქტორის სიმძლავრე რეგულირდება მუდმივი დენის წყაროს ძაბვის ცვლილებით, მაშინ მიზანშეწონილია გამოვიყენოთ სწრაფქმედების ასამალლებლად ძლიერი მოქმედების აგზნების რეგულატორი.

- სამფაზა გრაგნილის დენების გავლენა გარდამავალ პროცესებზე მართვის წრედში გამოვლინდება მაშინ, რომ B_{θ} ინდუქციის ერთი მიმართულების მდგენელი დასამაგნიტებელ უღელში იქნება ფუნქცია არა მხოლოდ მართვის H_0 მაგნიტური ველის დამაბულობის, არამედ B_{1m} ინდუქციის პირველი რიგის ჰარმონიკის ამპლიტუდის:

$$B_{\theta} = f(H_0, B_{1m}) \quad (3.10)$$

ან

$$H_0 = \psi(B_{\theta}, B_{1m}) \quad (3.11)$$

გარდამავალი პროცესის განტოლებას გააჩნია ისეთი სახე, რაც (3.2), სადაც

$$\psi_{\theta} = B_{\theta} \omega_{\theta} S_{\theta} \quad I_{\theta} = \psi(B_{\theta} B_{1m}) \quad (3.12)$$

დამყარებულ რეჟიმში მაგნიტური ველის დაძაბულობა დასამაგნიტებელ უღელში აღიწერება გამოსახულებით

$$H \approx H_o + H_m \sin \omega t \quad (3.13)$$

(3.13)-ის საფუძველზე შეიძლება განისაზღვროს დამოკიდებულება $H_{\text{საშ}} = f(B_{1m})$ როცა $H_o = \text{const}$ (ცხრილი 3.1).

ცხრილი 3.1

$H_{\text{საშ}} = f(B_{1m})$ ფუნქციის მნიშვნელობები ფოლადებისთვის $\exists 41$ და $\exists 42$, სისქე 0,35 და 0,5 მმ, $f = 50$ ჰც.

აღნიშნული ანგარიშის მიხედვით შეიძლება აიგოს $B_o = f_1(H_{\text{საშ}})$ მახასიათებლები, სადაც B_o - უღელში ინდუქციის მუდმივი მდგენელი. მახასიათებლების აპროქსიმაცია შეიძლება გამოისახოს გამოსახულებით

$$H_o = \alpha_1 B_o^4, \quad (3.14)$$

სადაც

$$\alpha_1 = f_3(B_{1m})$$

ჩასმის საშუალებით

$$\left. \begin{aligned} H_o &= \frac{i_{\theta} \omega_{\theta}}{\Lambda_{\text{საშ}}}; \\ B_o &\approx B_{\theta} = \frac{\psi_{\theta}}{S_{\theta} \omega_{\theta}} \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

(3.13) გამოსახულება მიიღებს სახეს

$$i_{\theta} = K \psi_{\theta}^4 \quad (3.16)$$

სადაც

$$K = \alpha_1 \frac{\Lambda_{\text{საშ}}}{S_{\theta}^4 \omega_{\theta}^5} \quad (3.17)$$

(3.16) თანაფარდობის გამოყენებით, შეიძლება ვიპოვოთ (2.2) განტოლების ამონახსნი, რომელიც აღწერს მართვის წრედში გარდამავალ პროცესს. გარდამავალი პროცესის დროის გამოსახულებას აქვს შემდეგი სახე:

$$t = \frac{1}{2l_{\theta}^{3/4} R_{\theta} K^{1/4}} \left(0,5 \ell_n \frac{1 + \sqrt[4]{i_{\theta}/I_{\theta o}}}{1 - \sqrt[4]{i_{\theta}/I_{\theta o}}} + \text{arctg} \sqrt[4]{i_{\theta}/I_{\theta o}} \right). \quad (3.18)$$

K -კოეფიციენტი გამოითვლება (3.17)-ის მიხედვით. თუ რეაქტორის კონსტრუქცია და ძირითადი პარამეტრები ცნობილია და საჭიროა განისაზღვროს რეგულირების დრო, მაშინ საჭიროა აიგოს დამოკიდებულობა.

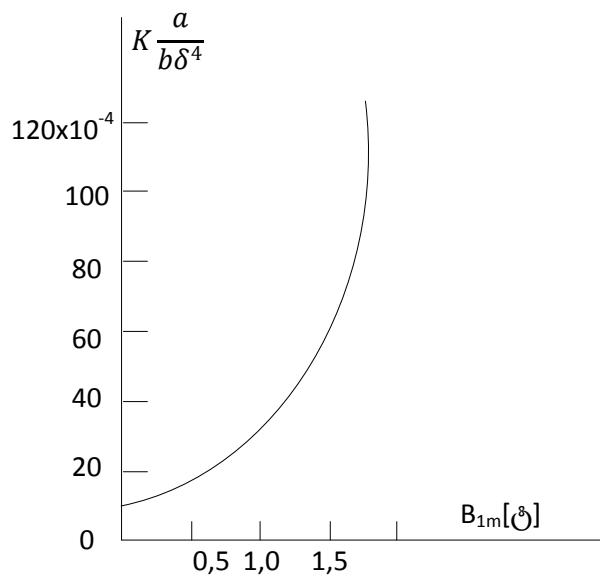
ცხრილი 3.1. $H_{საშ} = f(B_{1m})$ ფუნქციის მნიშვნელობები ფოლადებისთვის $\varnothing 41$ და $\varnothing 42$, სისქე 0,35 და 0,5 მმ, $f = 50$ ჰც

B_{1m} , ტ	(დასამაგნიტებელი ულლის სიგრძის მიხედვით) მაგნიტური ველის დამაბულობის ცვლადი მდგენელის მომქმედი საშუალო მნიშვნელობა $H_{საშ}$, ა/სმ, როცა H_0 , ა/სმ						
	100	200	300	400	500	600	700
0,4	71	145	215	285	355	428	490
0,45	74	147	217	289	362	435	496
0,5	76	150	220	294	368	440	502
0,55	77	152	224	298	374	445	508
0,6	78	155	227	302	380	450	514
0,65	79	157	229	306	384	454	520
0,7	80	159	232	309	389	459	525
0,75	81	161	234	312	393	464	530
0,8	82	162	237	314	397	468	535
0,85	83	164	239	317	400	473	540
0,9	84	165	242	320	404	478	545
0,95	85	167	244	323	407	483	550
1,0	86	169	247	326	410	487	556
1,05	88	172	249	328	413	492	562
1,1	89	174	252	331	416	496	567
1,15	90	176	255	334	420	501	572
1,2	91	178	258	338	424	506	578
1,25	93	180	261	342	428	512	584
1,3	96	182	264	346	433	517	591
1,4	98	186	270	354	439	528	607
1,5	104	192	277	364	448	541	627
1,6	110	198	286	374	460	556	648
1,7	119	205	296	388	474	574	670

$K = f_3(B_{1m})$, რომლის მიხედვით შეიძლება დადგინდეს K-ს მნიშვნელობა მოცემული B_{1m} -ისათვის. ასეთი დამოკიდებულობა ერთ-ერთი მოდელისთვის მოცემულია ნახ.3.3. რეალურ რეაქტორში $H_0(i_{\theta})$

სიდიდის ცვლილებით იცვლება B_{1m} სიდიდე, სამფაზა გრაგნილის განხვევის ინდუქციურ წინააღმდეგობაზე ძაბვის ვარდნის შედეგად. ამიტომ გარდამავალ პროცესში K კოეფიციენტი ღებულობს სხვადასხვა მნიშვნელობას, პროცესის ბოლოს მცირდება.

მართვის გრაგნილში ნაწილობრივ დენის ცვლილების დროს, როგორც ამას ადგილი აქვს რეაქტორის რეგულირების დროს, გარდამავალი პროცესის ანალიზი, შეიძლება ჩატარდეს (3.18) გამოსახულებით, როგორც საწყისი გამოსახულება.



ნახ.3.3. მართვადი რეაქტორის მოდელისთვის დამოკიდებულება $K = f_3(B_{1m})$, \exists 41 ტიპის ფოლადისთვის

a, b, δ - მართვადი რეაქტორის გეომეტრიული ზომები.

დასკვნები

1. დამუშავებულია ენერგეტიკული დანიშნულების ტრანსფორმატორული ტიპის დენსაზღუდი, ზეგამტარული არაწრფივი რეზისტორით. მოყვანილია ასეთი ტიპის დენსაზღუდის წრედებში ელექტრომაგნიტური პროცესების რიცხოვრივი ანგარიშები.

2. განხილულია ელექტრულ სისტემაში მოკლე შერთვის დენების შეზღუდვის არატრადიციული საშუალება, დაფუძნებული სწრაფმომქმედი ზეგამტარული დენსაზღუდი მოწყობილობის გამოყენებაზე, რომელიც მუშაობს არაწრფივი ვოლტამპერული მახასიათებლის საფუძველზე, როცა ზეგამტარის წინაღობა იცვლება დენის სიდიდისგან დამოკიდებულებაში, რაც საშუალებას იძლევა შეზღუდოს როგორც დარტყმის, ისე დამყარებული მოკლე შერთვის დენები. მაგალითის სახით განხილულია ზეგამტარული ტურბოგენერატორის დაცვა. მიღებულია ელექტრომაგნიტური პროცესების განტოლებები და ჩატარებულია მისი ანალიზი.

3. გაანალიზებულია ინდუქციური ტიპის ზეგამტარული დენსაზღუდის გავლენა ელექტროენერგეტიკული სისტემის მდგრადობაზე. მარეგულირებელ ელემენტად შემოთავაზებულია ზეგამტარი, ხოლო ცვლად ინდუქციურ წინაღობას წარმოადგენს ტრანსფორმატორი. გამოკვლეულია ზეგამტარის და ტრანსფორმატორის პარამეტრების გავლენა დენსაზღუდი მოწყობილობის მუშაობაზე.

4. დამუშავებული მათემატიკური მოდელი ზეგამტარული დენსაზღუდის, საშუალებას იძლევა: ზგდს მოწყობილობის წინაღობის ცვლილების ინერციულობის მოდელირებას, ანალიზურად აღიწეროს ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესი ზგდს-ის გათვალისწინებით, შევაფასოდ ელექტროდინამიკური და თბური ზემოქმედება მოკლე შერთვის დენის, ზგდს-ის არსებობის დროს.

5. ზგდს ერთჯერადი მოქმედებით, აუმჯობესებს ელექტრული სისტემის დინამიკურ მდგრადობას სინქრონული გენერატორის დაბალი დატვირთვის დროს ავარიამდე რეჟიმში და პირიქით, აუარესებს მაღალი

დატვირთვის დროს; ზგდს მრავალჯერადი მოქმედებით აუმჯობესებს დინამიკურ მდგრადობას რეჟიმის ნებისმიერი პარამეტრის დროს, შედარებით ტრადიციულ რეაქტორთან.

6. ზგდს-ის გამოყენება ელექტრული ქსელის მძლავრი ქვესადგურის კვანძში, მოკლე შერთვის დენების კოორდინაციის დროს, საშუალებას იძლევა გაზარდოს საიმედოობა სექციების ერთობლივი მუშაობის შესაძლებლობის ხარჯზე, მუშაობის ნორმალურ რეჟიმში, უზრუნველყოს ელექტრული ენერჯის ხარისხი სახელმწიფო სტანდარტის შესაბამისად.

7. ზგდს-ის მოწყობილობის გამოყენება 6-35 კვ ძაბვის ელექტრული ქსელის ნეიტრალში საშუალებას იძლევა მრავალჯერადი მოქმედების რეზისტორული ტიპის ზგდს მოწყობილობისათვის ძაბვის ესკალაციის ალბათობის შემცირებას, როცა ხაზის სიგრძე შეადგენს 71%-დან 100%-მდე მისი კრიტიკული სიგრძის;

8. ზგდს მოწყობილობის გამოყენება 110 კვ ძაბვის ელექტრული ქსელის ნეიტრალში არ იძლევა პრინციპულად ახალ ეფექტს, შედარებით ტრადიციულ რეაქტორთან, მაგრამ მოკლე შერთვის დენების შეზღუდვისათვის შეიძლება იყოს მიზანშეწონილი.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Блинков Е.Л., Лутидзе Ш.И., Джафаров Э.А, Флейшман Л.С., электро, 6,39, (2003).
2. Paul W., M/ Chen? Lakner M., Rhyner J., Braun D., Lanz W., Kleimaier M. Superconducting Fault Current Limiter Applications, technical and economical benefits, simulations and test results. CIGRE session 2000, paper 13-201.
3. Алексеев Б.А. Сверхпроводниковые ограничители токов коротких замыканий. Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2002, №6.
4. Алексеев Б.А. Полупроводниковые ограничители токов короткого замыкания. Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2008, №3.
5. Lee B.W., Park K.B., Sim J., Jang E., On I.S., Hyun. O.B. Field test application of the hybrid superconducting fault current limiters to the grid power network in Korea. CIGRE session 2008, paper D1-104.
6. В. Букель. Сверхпроводимость. М.: «Мир», 1975
7. კობრიძე თ., კენჭოშვილი ფ. ენერგეტიკული დანიშნულების მაღალტემპერატურული (77კ) ზეგამტარული დენსაზღუდი. "ინტელექტუალი", 2016, №31, გვ. 189-193.
8. Лутидзе Ш.И. «Вольтамперная характеристика сверхпроводящего провода». Приборы и системы, 2002, №7.
9. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей. М.: Энергия, 1973. 204 с.
10. Неклепаев Б.Н. Координация и оптимизация уровней токов короткого замыкания в электрических системах. М.: Энергия, 1978. 152 с.
11. URL: <http://www.superpower-inc/com/>
12. Электрические сети, электрические системы /Под ред. В.А. Строева. – М.: Высшая школа. 1998.
13. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. М.: Энергоиздат, 1965.
14. Сили С. Электромеханические преобразование энергии. – М.: Энергия. 1968.

15. Иванов С.С., Жемерикин В.Д., Копылов С.И. Однофазный сверхпроводящий управляемый реактор. – Перепринт оИВТ РАН №4-475.-М., 2004.

16. Полущенко О.Л., Матвеев В.А., Нижельский Н.А., Шавкин С.В. Рост кристаллов и структуры иттрий-бариевых сверхпроводников при направленной кристаллизации. – физика и химия обработки материалов, 2003. №1.

17. Копылов С.И. Секционирование сверхпроводящих токоограничивающих устройств. – Электротехника, 2005, №6.

18. Либкинд М.С., Управляемый реактор для линии передачи переменного тока. Изд-во АН СССР, 1961.

19. კობრეიძე თ., კენჭოშვილი ფ. ზეგამტარული ელექტრომოწობილობების მოკლე შერთვის დენების შეზღუდვა ზეგამტარული დენსაზღუდით და მისი ანგარიში დროში ინტერვალების მიხედვით. ენერგეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები მოხსენების კრებული. ქუთაისი, საქართველო, 2016. გვ. 93-98.

20. კობრეიძე თ., კენჭოშვილი ფ. ძალოვანი ზეგამტარული დენსაზღუდის მათემატიკური მოდელი. სტუ, სტუდენტური კონფერენცია. თეზისების კრებული. თბილისი, საქართველო, 2016, გვ.4-7.

21. კობრეიძე თ.კ. კენჭოშვილი ფ. ენერგეტიკული დანიშნულების ტრანსფორმატორული ტიპის დენსაზღუდის ზეგამტარული არაწრფივი რეზისტორით. “ენერჯია”. 2017, №4(84), გვ. 37-41.

22. კობრეიძე თ., კენჭოშვილი ფ. ინდუქციური ტიპის ზეგამტარული დენსაზღუდის გავლენა ელექტროენერგეტიკული სისტემის მდგრადობაზე. “ენერჯია”, 2018, №1(85), გვ. 14-20.

23. Брехна Г. Сверхпроводящие магнитные системы. Мир, м., 1976.