

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ომარ ხელაძე

საქართველოს ენერგეტიკულ სისტემაში აქტიური სიმბლავრის სწრაფი რეგულირების მოწყობილობის მუშაობის რეჟიმები

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა: „ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“

შიფრი: 0405

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

ივლისი, 2019 წ.

საავტორო უფლება © 2019 წელი, ომარ ხელაძე

თბილისი

2019 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ომარ ხელაძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „საქართველოს ენერგეტიკულ სისტემაში აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულირების მოწყობილობის მუშაობის რეჟიმები“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

ივლისი, 2019 წელი

ხელმძღვანელი: _____ პროფესორი თ. კობრეიძე

რეცენზენტი: _____

რეცენზენტი: _____

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
2019 წელი

ავტორი: ომარ ხელაძე

თემის დასახელება: ”საქართველოს ენერგეტიკულ სისტემაში აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულირების მოწყობილობის მუშაობის რეჟიმები”

ფაკულტეტი: ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

ხარისხი: აკადემიური დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: ივლისი, 2019 წ.

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ ზემომოყვანილი 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 დაცულ მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა იმ მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

რეზიუმე

მსოფლიოში სხვადასხვა სახის ენერჯის წარმოება და მოხმარება იზრდება სწრაფი ტემპით, განსაზღვრული ადამიანის მოქმედებით ყველა დარგში. ერთდროულად რთულდება ენერჯის გარდაქმნის პროცესები, ფართოვდება ენერგეტიკული დანადგარების და აგრეგატების მრავალსახეობა, რომლებმაც უნდა უზრუნველყონ რაციონალური რეჟიმები სხვადასხვა სახის მოხმარებლების ელექტროკვებისათვის. მრეწველობის, ტრანსპორტის, სოფლის მეურნეობის და საყოფაცხოვრებო დარგების ენერგოუზრუნველყოფის რიცხოვრივი მაჩვენებლების ზრდასთან ერთად დიდ როლს თამაშობს ენერჯის ხარისხის მაჩვენებელი, რაც დაკავშირებულია ენერჯის პარამეტრების რაციონალურ შეთანხმებასთან მისი გარდაქმნის სხვადასხვა სტადიაზე. მნიშვნელოვანი ადგილი აღნიშნული პრობლემის გადაწყვეტაში უკავია ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლებს, რომლებიც წარმოადგენენ მნიშვნელოვან შუალედურ რგოლს ენერჯის გენერაციის, გადაცემის და მოხმარების სისტემებში. ენერჯის დაგროვების პრობლემის აქტუალობა იმდენად სწრაფად იზრდება, რომ მათი მნიშვნელობა თანამედროვე სამეცნიერო - ტექნიკურ ლიტერატურაში ასახულია არა ადეკვატურად.

ნაშრომის პირველ თავში წარმოდგენილია ენერგეტიკულ სისტემაში აქტიური სიმძლავრის რეგულირების ლიტერატურული მიმოხილვა. ნაჩვენებია, რომ აქტიური სიმძლავრის რეგულირების ამოცანას წარმოადგენს განახორციელოს ელექტროსისტემაში სადგურების აგრეგატებს შორის ელექტროსისტემის დატვირთვის ეკონომიურად ხელსაყრელი და ორგანიზაციულად სწორი განაწილება. აქედან ჩანს, რომ სიხშირის ავტომატური რეგულირების ამოცანები მჭიდროდ არიან ერთმანეთთან დაკავშირებული.

აქტიური სიმძლავრის და სიხშირის ავტომატური რეგულატორები დაერთვიან პირველადი ძრავების სიჩქარის რეგულატორებს. ყველა ეს რეგულატორი უშუალოდ მოქმედებს მამოძრავებელი ფაქტორის მიმწოდებელი ერთსა და იმავე მექანიზმზე. მიუხედავად ზემოთ აღნიშნულისა, მათ შორის არის ერთგვარი განსხვავებაც, კერძოდ სიჩქარის რეგულატორები რეაგირებენ უშუალოდ ტურბინების ბრუნვათა რიცხვის შეცვლაზე, ხოლო სიხშირის რეგულატორები რეაგირებენ ცვლადი დენის სიხშირის შეცვლაზე გენერატორის აქტიური სიმძლავრის სიდიდის მიუხედავად. აქტიური სიმძლავრის რეგულატორები მოქმედებენ გენერატორის სიმძლავრის შეცვლისას გენერატორის სიხშირის მნიშვნელობის მიუხედავად. მაშასადამე. აგრეგატების ბრუნვათა რიცხვის მნიშვნელობის მიუხედავად.

ენერგეტიკულ სისტემაში აქტიური სიმძლავრის მაგროვებელი მოწყობილობის მრავალი სახეობა არსებობს. მათ შორის შეგვიძლია განვიხილოთ: ჰიდრომაკუმულირებადი ელექტროსადგურები, ჰაერმაკუმულირებადი მოწყობილობები, წყალბადის მოწყობილობები,

აკუმულიატორთა ბატარეა, სუპერკონდენსატორები, მქნევარა მოწყობილობები და ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლები.

ელექტროენერჯის მაგროვებლები ელექტროსადგურების რეგულირების მოთხოვნის შემსუბუქების საშუალებას იძლევა, რომლებიც ბაზისურ რეჟიმში მუშაობენ, ამალეებს ელექტროგადამცემი ხაზების მუშაობის ეფექტურობას, რომელთა დატვირთვა ნომინალურის 50-60%-ის ფარგლებშია და ზრდის მის გამტარუნარიანობას.

ინდუქციური მაგროვებლის პრინციპული უპირატესობა არის ის, რომ ენერჯია მასში ინახება ისეთი სახით, როგორი სახითაც გამოიყენება - ელექტრომაგნიტური. არ არის აუცილებელი ენერჯის ერთი სახიდან მისი მეორე სახეში გარდაქმნა, ასევე არ არის დიდი დროის ხარჯები თვითონ ამ პროცესზე, როგორც სხვა სახის მაგროვებელზე. აქედან გამომდინარე, ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის უნიკალური თვისებაა ელექტროენერჯის დაგროვების რეჟიმიდან მისი გაცემის რეჟიმში სწრაფი გადასვლა.

ნაშრომის მეორე თავში განხილულია ინდუქციური მაგროვებლები (იმ) კონსტრუქციული შესრულების მიხედვით. გამოყოფილია ორი ძირითადი კლასი: წრფივი მაგროვებლები, რომელშიც კოჭა (ხვიები) განლაგებულია სწორხაზოვანი ღერძის ირგვლივ, და ტორიდული მაგროვებელი (θ -ტიპის), რომელშიც კოჭა (ხვიები) მოიცავს რგოლისებრ ცენტრალურ ხაზს.

წრფივი იმ კონსტრუქციულად მარტივია და ტექნოლოგიურია, უზრუნველყოფს აქტიური მასალის კარგ გამოყენებას, მხოლოდ წარმოშობს მნიშვნელოვან მაგნიტურ ველს გარე სივრცეში.

ტორიდული იმ (θ -ტიპის) არ ჩამოუვარდება წრფივ იმ-ს წონა-ზომების მაჩვენებლებით, გააჩნია გართულებული კონსტრუქცია, მეორე მხრივ საშუალებას იძლევა პრაქტიკულად სრულად გამორიცხული იქნეს გარე მაგნიტური ველები, რაც ხშირ შემთხვევაში თამაშობს განსაკუთრებულ როლს ზეგამტარული ელექტრომოწყობილობების დამუშავების დროს.

განხილულია წრფივი იმ-ის პარამეტრები და მაჩვენებლები ცილინდრული, რგოლისებური, სოლენოიდური და სფერული ფორმის კოჭებით, შემდეგ ჩატარებულია ანალოგიური ანალიზი ტორიდული იმ-სათვის სხვადასხვა გეომეტრიით.

ნაშრომის მესამე თავში მოცემულია ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის სისტემაში სადენების დენგამტარუნარიანობის და დანაკარგების ანგარიშის მეთოდები ცვლად მაგნიტურ ველში. ნაჩვენებია, რომ ენერგეტიკული დანიშნულების ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის დამუშავება და შექმნა მოითხოვს ზეგამტარული (ზგ) სადენების გამოყენებას მაღალი დენგამტარუნარიანობით და დაბალი დანაკარგებით. აღნიშნული მიზნის მიღწევა შესაძლებელია მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენებით ლოკალიზებული მაგნიტური ველით (მძზგსლ), რომელშიც ურთიერთ

გავლენა ცალკეული ძარღვების მაგნიტური ველების დაყვანილია მინიმუმამდე. გრაგნილების ასეთი შესრულებით დენგამტარუნარიანობა თითოეული ზგ ძარღვის განისაზღვრება საკუთარი მაგნიტური ველით და საკუთარი პარამეტრებით.

შესწავლილია ენერგიის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის სისტემის მაგნიტურ წრედში ამორფული შენადნობების გამოყენების თანამედროვე ტენდენციები. დამუშავებულია ელექტროენერგიის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის ფუნქციონირების საანგარიშო მათემატიკური მოდელი აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულატორის რეჟიმში, რომელიც რეალიზებული იქნა მისი ენერგეტიკული მახასიათებლების აგებისათვის და შეფასებისათვის. მიღებული მახასიათებლები უზრუნველყოფს გენერატორების მდგრად მუშაობას ელექტროსისტემაში ავარიის დროს.

განხილულია უსაფრთხოების სპეციალური საკითხები: თხევადი კრიოგენული პროდუქტებთან მიმოქცევის საერთო წესები; თხევადი აზოტთან და ჰელიუმთან მიმართვის განსაკუთრებულობა; ფეთქებადსაშიში მინარევების შემადგენლობის კონტროლი; უსაფრთხოების უზრუნველყოფის ორგანიზაციული საფუძვლები.

Summary

Production and consumption of different kinds of energy expand at a high rate, that is determined by human activity in all fields. At the same time, the energy conversion processes are getting complicated, variety of energy power plants and power generating units that have to provide rational modes for electric supply of different consumers is getting wider. The superconducting induction energy storage, which is a significant intermediate link in the energy generation, transmission and consumption systems is of key importance in the mentioned problem solving. The topicality of energy storage problem increases so fast that its importance is not adequately reflected in the modern scientific and technical literature.

In the first chapter of the work a literature review of active power adjustment in the energy system is presented. It is shown that the task of active power adjustment is to implement the economically profitable and organizationally proper distribution of electric system load between power generating units of stations in the electric system. From here it is seen that automatic frequency control tasks are closely linked to each other.

Active power and automatic frequency controllers are attached to speed control unit of primary engines. All these controllers directly act on one and the same supplying mechanism of the driving factor. Despite the above mentioned, there is a definite difference between them, as well; in particular, speed control units directly react on the change in turbine rotation number, while frequency controllers response on the change in alternating current frequency regardless of generator's active power value. Active power controllers act during generator power change regardless of generator frequency value, therefore, irrespective of rotation number value of power generating units.

There are many types of active power storage devices in the energy system. Among them we can consider: hydroelectric pumped storage power plants, air storage systems, hydrogen devices, accumulator battery, supercondensers, pendulum devices and superconducting inductive storages.

Electric energy storages make it possible to mitigate requirements for electric power plant control that operate in basic mode, improve the efficiency of electric power transmission lines, load of which is within 50-60% limits of nominal one and increases its transmission capacity.

An essential advantage of inductive storages is that the energy is stored in such a form, in which form it is used – i.e. electromagnetic. There is no necessity to transform the energy from one form to another, also there is no large time consumption directly for this process unlike the other types of storages. Based on this fact, superconducting inductive storage has a unique feature of rapid transition from electric energy storage mode to its output mode.

In the second part of the work the inductive storages (IS) are considered according to their embodiment (design). Two main classes are singled out: linear

storages, in which a coil (loops) are located along the rectilinear axis, and toroidal (θ -type) storages, in which a coil (loops) contains the central ring-shaped line.

Linear IS is structurally simple and processable, provides proper use of active material but generates significant magnetic field in the external space.

Toroidal (θ -type) IS are as good as linear IS according their weight and size parameters, they have complicated design, but on the other hand make it possible to almost completely eliminate the external magnetic field that frequently plays essential role during designing of superconducting electric devices.

The linear IS' parameters and indicators with cylindrical, ring-shaped, solenoidal and spherical coils are considered, at the same time the analogous analysis for toroidal IS of different geometry is conducted.

In the third chapter of the work a current conductivity of wires of superconducting inductive energy storage and losses in the alternating magnetic field are given. It is shown that development and creation of superconducting inductive energy storage for energy purposes requires the use of superconducting wires (SW) with high current conductivity and low losses. The mentioned goal can be achieved by means of magnetic field localized by multicore superconducting wires (MSSCWL), in which the mutual effect of magnetic fields of separate cores is reduced to the minimum. For such execution of winding the current conductivity of each superconducting core is determined by its own magnetic field and own parameters.

The modern trends of amorphous alloys use in the magnetic circuit of the superconducting inductive energy storage system are studied.

The calculation mathematical model of superconducting inductive electric energy storage functioning in the active power rapid control mode is developed, which was implemented for plotting and assessment of its energy characteristics. The obtained characteristics secure stable operation of generators in case of emergency taking place in the electric system.

There are considered special security issues: general rules of handling with liquid cryogenes; feature of address to liquid nitrogen and helium, control over explosion hazardous admixture composition; organization bases of security assurance.

შინაარსი

	88.
შესავალი	16
ლიტერატურული მიმოხილვა.....	19
შედეგები და მათი განსჯა.....	21
თავი 1. ენერგეტიკულ სისტემაში აქტიური სიმძლავრის რეგულირების ლიტერატურული მიმოხილვა.....	21
1.1. აქტიური სიმძლავრის რეგულირების ზოგადი მიმოხილვა	21
1.2. აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულირების მოწყობილობის ლიტერატურული მიმოხილვა.....	24
თავი 2. ენერგოსისტემაში აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულირების მოწყობილობების კლასიფიკაცია	32
2.1. ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი მართკუთხა კვეთით ცილინდრული კოჭას სახით.	32
2.2. ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი რგოლისებრი კოჭას სახით	44
2.3. ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი თხელი სოლენოიდის სახით.	50
2.4. ზეგამტარული სფერული ინდუქციური მაგროვებელი.....	56
2.5. დიპოლური ტიპის ზეგამტარული კოჭას ეკრანირება.....	58
2.6. ტოროიდული ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი	60
თავი 3. ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში.....	73
3.1. ერთძარღვიანი ზეგამტარული სადენის დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში	73
3.2. მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში.	84
3.3. მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენი ლოკალიზებული მაგნიტური ველით.....	86

3.4. ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის სისტემის მაგნიტურ წრედში ამორფული შენადნობების გამოყენების თანამედროვე ტენდენციები.....	93
3.5. ელექტროენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის ფუნქციონირების საანგარიშო მათემატიკური მოდელი აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულატორის რეჟიმში	97
თავი 4. უსაფრთხოების სპეციალური საკითხები	110
4.1. თხევადი კრიოგენული პროდუქტებთან მიმოქცევის საერთო წესები.....	110
4.2. თხევადი აზოტთან და ჰელიუმთან მიმართვის განსაკუთრებულობა.....	113
4.3. ფეთქებადსაშიში მინარევების შემადგენლობის კონტროლი	114
4.4. უსაფრთხოების უზრუნველყოფის ორგანიზაციული საფუძვლები.....	115
დასკვნები.....	117
გამოყენებული ლიტერატურა.....	120

ცხრილების ნუსხა

გვ.

ცხრილი 1.1. ენერჯის სხვადასხვა მაგროვებლების ხვედრითი ხარჯი და მ.ქ.კ.26

ცხრილი 2.1. სადენის ერთნაირი მოცულობის დროს იმ-ის ძირითადი ტიპების ფარდობითი ენერჯია.....38

ცხრილი 3.1. ძალოვანი ტრანსფორმატორების საშუალო უქმი სვლის დანაკარგები 10 კვ ნომინალურ ძაბვაზე და (25÷2500) კვა სიმძლავრეზე.....96

ნახაზების ნუსხა

88.

ნახ.2.1. მართკუთხა კვეთით ცილინდრული კოჭა (ა) და ბრუკსას კოჭა (ბ)	33
ნახ. 2.2. ცილინდრული კოჭას ელემენტზე მომქმედი ძალა.....	39
ნახ.2.3. კოჭა წრიული კვეთით.....	46
ნახ.2.4. რგოლისებრი კოჭა-ტორი φ ტიპის დენური ფენის სახით ა) და დახვეული წრიული სადენით (ბ).....	48
ნახ.2.5. კოჭა მართკუთხა სალტისაგან თხელი სოლენოიდის სახით (ა) და წრიული სადენით (ბ).....	51
ნახ.2.6. $k_{\phi\ell} / \ell = f(\ell_*)$ დამოკიდებულების მრუდი სოლენოიდის ოპტიმალური ფორმის განსაზღვრისათვის	52
ნახ.2.7. სფერული იმ (ა) და მისი მოდელი არაერთგვაროვანი დენური ფენებით $\delta(\beta)$	56
ნახ.2.8. ცილინდრული კოჭა ელექტრომაგნიტური ეკრანით ორი დამატებითი კოჭას სახის უკუდენით.....	60
ნახ.2.9. თხელი ტოროიდული კოჭა (ა) და მასში მაგნიტური წნევის ძალები (ბ).....	61
ნახ.2.10. სქელი ტოროიდული კოჭა	64
ნახ.2.11. ტოროიდული კოჭა მართკუთხა კვეთით (ა) და კოაქსიალური (ბ).....	65
ნახ.2.12. D-ს მაგვარი ტოროიდული კოჭა (ა) და მისი პროფილი სხვადასხვა ტოროიდულობის ε დროს (ბ).....	67
ნახ.2.13. ბრტყელი მოდელი დისკრეტული ტოროიდული კოჭებით.....	71
ნახ.3.1. სქემები და ვექტორული დიაგრამები	74
ნახ.3.2. მატრიცის წინააღობის გავლენის განსაზღვრა დანაკარგებზე.....	82

ნახ.3.3. ერთფენიანი ლოკალიზებული მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენი	88
ნახ.3.4. მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენი ლოკალიზებული მაგნიტური ველით	90
ნახ.3.5. კრისტალური და ამორფული ატომების განლაგება, ზოლი ამორფული შენადნობისაგან, მაგნიტური წრედი	94
ნახ.3.6. ელექტროსისტემის ელექტრული სქემა	99
ნახ.3.7. ელექტროგადაცემის საანგარიშო სქემა	99
ნახ.3.8. გადაცემის კუთხის ცვლილება ავარიულ რეჟიმში; ა) ეზგიმ-ის გარეშე; ბ) ეზგიმ-ის მუშაობის დროს.....	105
ნახ.3.9. ეზგიმ-ის დენის რეგულატორის დანაყენის ცვლილება.....	106
ნახ.3.10. ეზგიმ-ის სიმძლავრის ცვლილება გენერატორის როტორის გაქცევის დემფირების რეჟიმში: ა) აქტიური სიმძლავრე; ბ) რეაქტიული სიმძლავრე.....	107
ნახ.3.11. ეზგიმ-ის ენერგეტიკული მახასიათებლები დინამიკურ რეჟიმში; ა) დაგროვილი ენერგია; ბ) გამართული დენი; ვ) გამართული დენის ცვლილების სიჩქარე.....	107
ნახ.3.12. ბოგირული გარდამქმნელის ვენტილების მართვის კუთხის ცვლილების მახასიათებელი.....	108
ნახ.3.13. ეზგიმ-ის მუშაობის დროს გადაცემის აქტიური სიმძლავრე დინამიკურ რეჟიმში: ა) გენერატორის სიმძლავრე; ბ) სისტემის სიმძლავრე.....	109

ძირითადი აღნიშვნები

$\rho_{\text{ფ}}$ - სადენის ხვედრითი წინაღობა ნორმალურ მდგომარეობაში

S - სადენის კვეთი

ℓ - სადენის სიგრძე

j - დენის სიმკვრივე

B_0 - სადენის ზედაპირზე მაგნიტური ინდუქცია

I_3 - დენის კრიტიკული მნიშვნელობა

$i_{\text{ფ}}$ - დენის აქტიური მდგენელი, ან დენი გამოწვეული ნორმალური

ელექტრონებისაგან

$i_{\text{ფ}0}$ - დენის ზეგამტარული მდგენელი

$n_{\text{ფ}}$ - ერთეულ მოცულობაში ნორმალური ელექტრონების რიცხვი

n_0 - ერთეულ მოცულობაში საერთო ელექტრონების რიცხვი

$R_{\text{ფ}0}$ - ნომინალურ მდგომარეობაში ზეგამტარული სადენის წინაღობა

L_3 - კინეტიკური ინდუქციურობა

$\ell_{\text{კ}0}$ - ხვედრითი კინეტიკური ინდუქციურობა

m - ელექტრონების მასა

e - ელექტრონების მუხტის მნიშვნელობა

λ_0 - დენის შეღწევადობის სიღრმე

ω - კუთხური სიხშირე

*
 $I_{\text{ფ}}^*$ - მაქსიმალური დენის ფარდობითი მნიშვნელობა

$d_{\text{ფ}}$ - ზეგამტარული ძარღვის დიამეტრი

β_3 - მაგნიტური ინდუქციის კრიტიკული მნიშვნელობა

$\beta_{\text{ფ}}$ - მაგნიტური ინდუქცია სადენის ზედაპირზე

$D_{\text{ფ}}$ - სადენის დიამეტრი

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

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

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

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

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

N - ძარღვების რიცხვი

d - ზეგამტარულ სადენში მოთავსებული ძარღვის დიამეტრი

$K_{შეკვ.}$ - შეკვების კოეფიციენტი

τ - ზეგამტარული ძარღვების განლაგების ბიჯი

იმ - ინდუქციული მაგროვებელი

ეზგიმ - ენერგიის ზეგამტარული ინდუქციული მაგროვებელი

ზგ - ზეგამტარული

ემმ - ელექტრომაგნიტური ძალა

ლმძზგ - ლოკალიზებული მრავალძარღვა ზეგამტარული

შესავალი

მსოფლიოში სხვადასხვა სახის ენერჯის წარმოება და მოხმარება იზრდება სწრაფი ტემპით, განსაზღვრული ადამიანის მოქმედებით ყველა დარგში. ერთდროულად რთულდება ენერჯის გარდაქმნის პროცესები, ფართოვდება ენერჯეტიკული დანადგარების და აგრეგატების მრავალსახეობა, რომლებმაც უნდა უზრუნველყონ რაციონალური რეჟიმები სხვადასხვა სახის მოხმარებლების ელექტროკვებისათვის. მრეწველობის, ტრანსპორტის, სოფლის მეურნეობის და საყოფაცხოვრებო დარგების ენერჯოუზრუნველყოფის რიცხოვრივი მაჩვენებლების ზრდასთან ერთად დიდ როლს თამაშობს ენერჯის ხარისხის მაჩვენებელი, რაც დაკავშირებულია ენერჯის პარამეტრების რაციონალურ შეთანხმებასთან მისი გარდაქმნის სხვადასხვა სტადიაზე. მნიშვნელოვანი ადგილი აღნიშნული პრობლემის გადაწყვეტაში უკავია ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლებს, რომლებიც წარმოადგენენ მნიშვნელოვან შუალედურ რგოლს ენერჯის გენერაციის, გადაცემის და მოხმარების სისტემებში. ენერჯის დაგროვების პრობლემის აქტუალობა იმდენად სწრაფად იზრდება, რომ მათი მნიშვნელობა თანამედროვე სამეცნიერო - ტექნიკურ ლიტერატურაში ასახულია არა ადეკვატურად.

სადისერტაციო ნაშრომში, საქართველოს ენერჯეტიკულ სისტემაში აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულირების მოწყობილობის მუშაობის რეჟიმები, მოიცავს შემდეგ საკითხებს: ენერჯეტიკულ სისტემაში აქტიური სიმძლავრის რეგულირების ლიტერატურული მიმოხილვა; ენერჯოსისტემაში აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულირების მოწყობილობების კლასიფიკაცია; ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი მართკუთხა კვეთით ცილინდრული კოჭას სახით, ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი რგოლისებრი კოჭას სახით, ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი თხელი სოლენოიდის სახით,

ზეგამტარული სფერული ინდუქციური მაგროვებელი, დიპოლური ტიპის ზეგამტარული კოჭას ეკრანირება, ტოროიდული ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი. ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში; ერთძარღვიანი ზეგამტარული სადენის დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში, მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში, მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენი ლოკალიზებული მაგნიტური ველით, ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის სისტემის მაგნიტურ წრედში ამორფული შენადნობების გამოყენების თანამედროვე ტენდენციები, ელექტროენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის ფუნქციონირების საანგარიშო მათემატიკური მოდელი აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულატორის რეჟიმში. უსაფრთხოების სპეციალური საკითხები; თხევადი კრიოგენული პროდუქტებთან მიმოქცევის საერთო წესები, თხევადი აზოტთან და ჰელიუმთან მიმართვის განსაკუთრებულობა, ფეთქებად საშიში მინარევების შემადგენლობის კონტროლი, უსაფრთხოების უზრუნველყოფის ორგანიზაციული საფუძვლები.

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

ნაშრომის სამეცნიერო სიახლე:

1. დადგენილია, რომ ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის ზეგამტარული სადენების გამტარუნარიანობის გაზრდისათვის და მასში დანაკარგების შემცირებისათვის ზგ სადენი სრულდება მრავალძარღვიანი. იმასთან დაკავშირებით, რომ სადენის ზგ ძარღვი მგრძნობიარეა გარე მაგნიტური ველის მიმართ, მათი დენგამტარუნარიანობა მრავალძარღვიანი ზგ სადენში მნიშვნელოვნად მცირდება ძარღვების რიცხვის გაზრდით და მათ შორის მანძილის

შემცირების დროს. ზგ სადენის და ზგ მარღვის მოცემული დიამეტრის დროს სადენში მარღვების შემცირებით, მანძილი მათ შორის იზრდება, მაგნიტური ურთიერთქმედება მარღვებს შორის სუსტდება და დენგამტარუნარიანობა ზგ მარღვის იზრდება. ზგ მარღვის რაოდენობის ოპტიმალური მნიშვნელობა წრიული კვეთის ზგ მრავალმარღვა სადენში: $N_{\sigma} = \frac{D_b}{d_{\sigma}}$, აღნიშნული რაოდენობა ზგ მარღვების შეესაბამება ზგ სადენის შევსების კოეფიციენტს: $K_{\text{შვს.}} = \frac{d_{\sigma}}{D_b}$.

2. გამოვლენილია, რომ ენერგიის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის სისტემის მაგნიტურ წრედში ამორფული შენადნობების გამოყენება, კერძოდ ენერგიის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის კვების წყაროსათვის შექცევადი ტირისტორული გარდამქნელი ტრანსფორმატორის მაგნიტურ წრედში ამორფული შენადნობების გამოყენება საგრძნობლად ამცირებს დანაკარგებს. გარდა დანაკარგების შემცირებისა, მცირდება აგრეთვე დამაგნიტების დენის სიდიდე, რის შედეგად მცირდება ტრანსფორმატორის ტემპერატურა და იზრდება მისი მომსახურების ვადა.

3. დამუშავებულია ეზგიმ-ის ფუნქციონირების მათემატიკური მოდელი, აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულატორის რეჟიმში, რომელიც რეალიზებული იქნა მისი ენერგეტიკული მახასიათებლების აგებისათვის და შეფასებისათვის, მიღებული მახასიათებლები უზრუნველყოფს გენერატორების მდგრად მუშაობას ელექტროსისტემაში ავარიის დროს.

სადისერტაციო სამუშაოში მიღებული შედეგები შეიძლება გამოყენებული იქნეს ენერგიის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის დაგეგმარების და დამზადების დროს.

სადისერტაციო სამუშაოს ძირითადი შედეგები მოხსენებული იქნა: სტუ-ის სტუდენტთა 85-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე, (2016 წ.). ასევე, ელექტროტექნიკისა და ელექტრონიკის დეპარტამენტში I, II და III კოლოქვიუმზე.

ლიტერატურული მიმოხილვა

ელექტროენერჯის წარმოება და მოხმარება იზრდება სწრაფი ტემპით. ერთდროულად რთულდება ენერჯის გარდაქმნის პროცესები, ფართოვდება ენერჯეტიკული დანადგარების და აგრეგატების მრავალსახეობა, რომლებმაც უნდა უზრუნველყონ რაციონალური რეჟიმები სხვადასხვა სახის მოხმარებლების ელექტრომომარაგებისათვის. სხვადასხვა დარგების ენერჯოუზრუნველყოფის რიცხოვრივი მაჩვენებლების ზრდასთან ერთად დიდ როლს თამაშობს ენერჯის ხარისხის მაჩვენებელი, რაც დაკავშირებულია ენერჯის პარამეტრების რაციონალურ შეთანხმებასთან მისი გარდაქმნის სხვადასხვა სტადიაზე. მნიშვნელოვანი ადგილი აღნიშნული პრობლემის გადაწყვეტაში უკავია ენერჯის მაგროვებლებს, რომლებიც წარმოადგენენ მნიშვნელოვან შუალედურ რგოლს ენერჯის გენერაციის, გადაცემის და მოხმარების სისტემებში [11,13,16,35,36,37,40,11].

ელექტროენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი მაღალი ენერჯოტევადობით წარმოადგენს ერთ-ერთ ეფექტურ საშუალებას, რომელსაც შეუძლია მნიშვნელოვანი როლი შეიტანოს ქვეყნის ენერჯოუსაფრთხოების გადაწყვეტის საკითხებში. ეზგიმ-ს გააჩნია უნარი შეასრულოს შემდეგი ფუნქციები: სტატიკური და დინამიკური მდგრადობის გაუმჯობესება, პიკური დატვირთვების დაფარვა, სისტემის გარკვეულ წერტილებში ძაბვის შენარჩუნება, სისტემაში აქტიური სიმძლავრის ბალანსის დარღვევის დროს სიხშირის აღდგენის უზრუნველყოფა და ელექტროენერჯის შენახვა [35,40,41]. ეზგიმ-ი ხასიათდება ისეთი თვისებებით, როგორცაა სწრაფქმედება, მაღალი მ.ქ.კ., ენერჯის შეყვანისა და გამოყვანის სრული ავტომატიზაციის შესაძლებლობა და გენერატორებში ავარიის შემდგომი რეჟიმებში ელექტრომექანიკური პროცესების დემფირება [16,35].

ამჟამად ენერგეტიკოსების დიდ ყურადღებას იპყრობს ეზგიმ-ი, თავისი შესაძლებლობების მიხედვით, როგორცაა ელექტროენერჯის აკუმულირება და მისი სწრაფი რეალიზაცია. ეზგიმ-ის გამოყენებას ენერგეტიკაში გააჩნია დიდი პერსპექტივა, ის შეიძლება გახდეს ეფექტური საშუალება ელექტროსისტემის ეკონომიურობისა და საიმედოობის ამაღლებისა.

სიმძლავრეების გადანაწილების ანგარიშის პროგრამაში ეზგიმ განიხილება ენერგოსისტემას კვანძში როგორც აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების სწრაფმოქმედი რეგულატორი, რომელიც უზრუნველყოფს:

ძაბვის შენარჩუნებას ელექტროსისტემის კვანძში საჭირო დონეზე; ელექტროგადაცემის გამტარუნარიანობის გაზრდას;

ელექტროგადაცემაში სიმძლავრეების რყევების აღძვრის დროს, ელექტროსისტემის მიმღებში შემფოთების გავრცელების ლოკალიზაციას.

დინამიკური მდგრადობის ანგარიშის პროგრამაში ეზგიმ განიხილება, როგორც სწრაფმოქმედი რეგულატორი, უპირატესად აქტიური სიმძლავრისა, დადგმული ელექტროსადგურებში და უზრუნველყოფს გენერატორების როტორის შემობრუნების კუთხის აჩქარების შეზღუდვას ავარიის შემდგომ რეჟიმებში ელექტროგადაცემი ხაზის წარმატებით თუ არაწარმატებითი ავტომატორი განმეორებითი ჩართვის მოქმედების გათვალისწინებით.

ეზგიმ-ის ენერგეტიკული პარამეტრები დამოკიდებულია მისი ჩართვის ადგილზე. თუ ეზგიმ ჩაირთვება ელექტროსადგურში, მაშინ მიზანშეწონილია მისი ზემოქმედება აქტიური სიმძლავრის მართვაზე, ხოლო თუ ეზგიმ ჩაირთვება ელექტროენერგეტიკული სისტემის კვანძში, მაშინ პრიორიტეტულია მისი ზემოქმედება რეაქტიული სიმძლავრის მართვაზე, რათა ეფექტურად განხორციელდეს ძაბვის რეგულირება ელექტროსისტემის კვანძში.

შედეგები და მათი განსჯა

თავი 1. ენერგეტიკულ სისტემაში აქტიური სიმძლავრის რეგულირების ლიტერატურული მიმოხილვა

1.1. აქტიური სიმძლავრის რეგულირების ზოგადი მიმოხილვა

აქტიური სიმძლავრის რეგულირების ამოცანას წარმოადგენს განახორციელოს ელექტროსისტემაში სადგურების აგრეგატებს შორის ელექტროსისტემის დატვირთვის ეკონომიურად ხელსაყრელი და ორგანიზაციულად სწორი განაწილება. აქედან ჩანს, რომ სიხშირის ავტომატური რეგულირების ამოცანები მჭიდროდ არიან ერთმანეთთან დაკავშირებული.

აქტიური სიმძლავრისა და სიხშირის ავტომატური რეგულატორები დაერთვიან პირველადი ძრავების სიჩქარის რეგულატორებს. ყველა ეს რეგულატორი უშუალოდ ან პირდაპირ მოქმედებს მამოძრავებელი ფაქტორის მიმწოდებელ ერთსა და იმავე მექანიზმზე. მიუხედავად ზემოთ აღნიშნულისა, მათ შორის არის ერთგვარი განსხვავებაც, კერძოდ.

სიჩქარის რეგულატორები რეაგირებენ უშუალოდ ტურბინების ბრუნვათა რიცხვის შეცვლაზე, ხოლო სიხშირის რეგულატორები რეაგირებენ ცვლადი დენის სიხშირის შეცვლაზე (მაშასადამე პირდაპირ ბრუნვათა რიცხვის შეცვლაზე) გენერატორის აქტიური სიმძლავრის სიდიდის მიუხედავად. აქტიური სიმძლავრის რეგულატორები მოქმედებენ გენერატორის სიმძლავრის შეცვლისას გენერატორის სიხშირის მნიშვნელობის მიუხედავად. მაშასადამე, აგრეგატების ბრუნვათა რიცხვის მნიშვნელობის მიუხედავად.

ასეთია ყველა ის მიზეზი, რომლებიც მოითხოვს ენერგოსისტემის სიხშირის შენარჩუნებას მის ნორმალურ დონეზე. სიხშირის რხევისას

მოითხოვება მისი სწრაფი აღდგენა, ისე რომ მისი გადახრა არ აღემატებოდეს 0,1%-ს, რაც 0,05 ჰერცის ტოლია. ამიტომ ენერგოსისტემის სიხშირის რეგულირება არ შეიძლება განხორციელდეს ხელით. აღნიშნულიდან გამომდინარე, თანამედროვე ელექტრულ სისტემებში, როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული აქტიური სიმძლავრის რეგულირება უნდა განხორციელდეს ავტომატურად.

ენერგოსისტემის რაციონალური რეგულირების მიზნით, სპეციალისტს უნდა შეეძლოს თავის პრაქტიკულ საქმიანობაში გამოიყენოს ჰიდროელექტროსადგურების აგრეგატების მათემატიკური მოდელი და მათი ჯგუფური რეგულირების შესაძლებლობები, რათა უზრუნველყოფილი იქნეს ენერგოსისტემის მუშაობის ძირითადი პარამეტრების (აქტიური სიმძლავრე, სიხშირე, ძაბვა) ოპტიმალური რეჟიმების შექმნა.

აღნიშნულის შედეგად იკვეთება შესაძლებლობა შემცირებული იქნეს ჰიდროელექტროსადგურის აქტიური სიმძლავრის მართვის გარდამავალი პროცესები. ეს კი რასაკვირველია თავის მხრივ უზრუნველყოფს როგორც შიგა ქსელით, ასევე სისტემათაშორისო ხაზებით გადაცემული ელექტროენერგიის ხარისხს, იმედიანობას და რაოდენობას.

როცა საუბარი გვაქვს ელექტროენერგიის ხარისხზე ენერგოსისტემაში, აუცილებელია შემდეგი პირობების გათვალისწინება:

1. $P_{\text{ჯამური}} = P_{\text{დატ}} + P_{\text{დანაკ.}}$ ელექტროსადგურების ჯამური აქტიური სიმძლავრის სიდიდე უნდა იყოს საკმარისი იმისათვის, რომ დაფარული იქნეს სისტემის ყველა საკვანძო წერტილის აქტიური დატვირთვა და აქტიური სიმძლავრის დანაკარგები ქსელში ნომინალური სიხშირისა და ძაბვის დროს; ამ პირობის შეუსრულებლობა და აქტიური სიმძლავრის დეფიციტის გაჩენა შეუძლებელს გახდის ნორმალური სიხშირის შენარჩუნებას.

2. გენერატორების აქტიური და რეაქტიული, ასევე რეაქტიული სიმძლავრის წყაროების ჯამური სიმძლავრის სიდიდე უნდა იყოს საკმარისი

იმისათვის, რომ დაფარული იქნეს სისტემის ყველა საკვანძო წერტილების რეაქტიული დატვირთვა და რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები ქსელში ნორმალური სიხშირისა და ძაბვის დროს; ამ პირობის შეუსრულებლობა შეუძლებელს გახდის ქსელში ძაბვის საშუალო ნორმალური დონის შენარჩუნებას.

გენერატორების აქტიური და რეაქტიული, ასევე რეაქტიული სიმძლავრის წყაროების ჯამური სიმძლავრე, განაწილებული უნდა იქნეს იმგვარად, რომ თითოეულ რაიონში რეაქტიული დატვირთვა რაიონის ყველა საკვანძო წერტილში, რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგების გათვალისწინებით, ძირითადად დაიფაროს ადგილობრივი გენერატორებით და რეაქტიული სიმძლავრის წყაროების საშუალებით და რეაქტიული სიმძლავრის გამათანაბრებელი ნაკადები რაიონებს შორის იყოს იმდენად უმნიშვნელო, რომ არ გამოიწვიოს ქსელში ძაბვის მნიშვნელოვანი დანაკარგები;

3. გენერატორების აქტიური და რეაქტიული, ასევე რეაქტიული სიმძლავრის წყაროების ჯამური სიმძლავრე, განაწილებული უნდა იქნეს იმგვარად, რომ თითოეულ რაიონში რეაქტიული დატვირთვა რაიონის ყველა საკვანძო წერტილში, რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგების გათვალისწინებით, ძირითადად დაიფაროს ადგილობრივი გენერატორებით და რეაქტიული სიმძლავრის წყაროების საშუალებით და რეაქტიული სიმძლავრის გამათანაბრებელი ნაკადები რაიონებს შორის იყოს იმდენად უმნიშვნელო, რომ არ გამოიწვიოს ქსელში ძაბვის მნიშვნელოვანი დანაკარგები; ამ პირობის შეუსრულებლობა და რეაქტიული სიმძლავრის ადგილობრივი დეფიციტის გამოვლენა ცალკეულ რაიონებში შეუძლებელს გახდის ნორმალური დონის ძაბვების უზრუნველყოფას.

აქტიური სიმძლავრის დეფიციტი იწვევს არა მხოლოდ სიხშირის შემცირებას, არამედ რეაქტიული სიმძლავრის რეზერვის უქონლობის

შემთხვევაში, ძაბვის შემცირებას, რაც თავის მხრივ, ნაწილობრივ ამცირებს აქტიური სიმძლავრის დეფიციტს.

რეაქტიული სიმძლავრის დეფიციტი იწვევს არა მხოლოდ ძაბვის შემცირებას, არამედ ზრდის სისტემაში აქტიური სიმძლავრის რეზერვს მომხმარებლების აქტიური სიმძლავრის შემცირების ხარჯზე, რაც ნაწილობრივ ამცირებს რეაქტიული სიმძლავრის დეფიციტს.

1.2. აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულირების მოწყობილობის ლიტერატურული მიმოხილვა

ენერგეტიკულ სისტემაში აქტიური სიმძლავრის მაგროვებელი მოწყობილობის მრავალი სახეობა არსებობს. მათ შორის შეგვიძლია განვიხილოთ:

1. ჰიდრომააკუმულირებელი ელექტროსადგურები.
2. ჰაერმააკუმულირებადი მოწყობილობები.
3. წყალბადის მოწყობილობები.
4. აკუმულიატორთა ბატარეა.
5. სუპერკონდენსატორები.
6. მქნევარა მოწყობილობები.
7. ზეგამტარული ინდუქციური მოწყობილობები.

ელექტროენერჯის მაგროვებლები ელექტროსადგურების რეგულირების მოთხოვნის შემსუბუქების საშუალებას იძლევა, რომლებიც ბაზისურ რეჟიმში მუშაობენ, ამაღლებს ელექტროგადამცემი ხაზების მუსაობის ეფექტურობას, რომელთა დატვირთვა ნომინალური 50-60%-ის ფარგლებშია და ზრდის მის გამტარუნარიანობას.

ასევე ელექტროენერჯის მაგროვებლების გამოყენებას მნიშვნელოვანი ფუნქცია გააჩნია ავარიული რეჟიმების დროს. ელექტროენერჯის

მაგროვებლების გამოყენებას მრავალი მნიშვნელოვანი პოტენციალური შესაძლებლობა გააჩნია. კერძოდ:

- დატვირთვის რეჟიმების მართვა-მაგროვებლების დამუხტვა ღამის საათებში და მათი განმუხტვა პიკის საათებში. აღნიშნული მეთოდი იძლევა დღისა და ღამის საათების დატვირთვის გათანაბრების საშუალებას;

- სიმძლავრის გადადინების მართვა - ადგილობრივი დატვირთვით მომხმარებელთა ელექტრომომარაგება, როცა საერთო ქსელით ეს შეუძლებელია;

- მბრუნავი რეზერვი - ეს იძლევა საშუალებას მუშაობიდან ავარიულად გამოსული მძლავრი აგრეგატის სიმძლავრე, მბრუნავი რეზერვის ხარჯზე, დაბალანსირებული იქნეს და მომხმარებლებზე უმტკივნეულოდ განხორციელდეს ელექტროენერჯის მიწოდების აღდგენა;

- ელექტროენერჯის გადაცემის დიდი შესაძლებლობა - ძაბვის რეგულირება, სიხშირის შენარჩუნება, ენერგოსისტემის მდგრადობა და მთლიანად ენერგოსისტემის მუშაობის სტაბილურობის ამაღლება;

- დატვირთვის გრაფიკის რეგულირება;

- ელექტროენერჯის ხარისხის გაუმჯობესება - ელექტროენერჯის მაგროვებლის დაყენება როგორც გამავალ ფიდერებზე, ისე უშუალოდ მომხმარებლებთან, როცა მომხმარებელი მუდმივ დატვირთვებზე მუშაობს;

ინდუქციული მაგროვებლის პრინციპული უპირატესობა არის ის, რომ ენერჯია მასში ინახება ისეთი სახით, როგორი სახითაც გამოიყენება - ელექტრომაგნიტური. არ არის აუცილებელი ენერჯიის ერთი სახიდან მისი მეორე სახეში გარდაქმნა, ასევე არ არის დიდი დროის ხარჯი თვითონ იმ პროცესზე, როგორც სხვა სახის მაგროვებელზე. აქედან გამომდინარე, ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის უნიკალური თვისებაა ელექტროენერჯის დაგროვების რეჟიმიდან მისი გაცემის რეჟიმში სწრაფი გადასვლა.

ქვემოთ მოცემულია მარგი ქმედების კოეფიციენტისა და ხვედრითი ღირებულების ცხრილი სხვადასხვა ტიპის მაგროვებლისათვის:

ცხრილი 1.1. ენერჯის სხვადასხვა მაგროველების ხვედრითი ხარჯი და მ.ქ.კ.

ენერჯის სხვადასხვა მაგროველების ხვედრითი ხარჯი და მ.ქ.კ.				
№	სამუშაოს დასახელება	ხვედრითი ღირებულება		მ.ქ.კ. ციკლი დამუხტვა/ განმუხტვა %
		ენერჯია დოლარი/ კვტ.სთ	სიმძლავრე დოლარი/ კვტ.	
1	2	3	4	5
1.	მჟავა აკუმულატორები			
ა	მცირე სიმძლავრის	175	200,00	0,80
ბ	საშუალო სიმძლავრის	225	250,00	0,85
გ	დიდი სიმძლავრის	250	300,00	0,85
2.	მოდერნიზებული აკუმულატორები	245	300,00	0,70
3.	ზეგამტარული მაგროველები			
ა	მიკრო სიმძლავრის	72000	300,00	0,95
	საშუალო სიმძლავრის	2000	300,00	0,95
	დიდი სიმძლავრის	500	300,00	0,95
4.	მქნევარა			
ა	დიდი სიჩქარის	25000	350,00	0,93
ბ	დაბალი სიჩქარის	300	280,00	0,90
5.	სუპერკონდენსატორები	82000	300,00	0,95
6.	ჰაერის აკუმულირებადი დანადგარები	3	425,00	0,79
7.	ჰაერის აკუმულირებადი დანადგარები (ბალონე- ბით)	50	517,00	0,70
8.	ჰიდრომააკუმულირებადი დანადგარები	10	600,00	0,87
9.	წყალბადის დამაგროველები	15	1500,00	0,59

ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი ენერჯის აგროვებს ინდუქციური კოჭას მაგნიტურ ველში, რომელშიც დენი ცირკულირებს დანაკარგების გარეშე. ინდუქციური მაგროვებლების მნიშვნელოვანი უპირატესობა არის მისი სწრაფქმედება, რომელიც ერთეული მილიწამის ფარგლებშია. ეს კი იძლევა საშუალებას მისი მოქმედება განხორციელებული იქნეს ენერჯოსისტემაში მოულოდნელი ავარიის შემთხვევაში.

ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის კონსტრუქცია შეიძლება გამოყოფილი იქნეს სამი ძირითადი კვანძისაგან. ესენია:

- საკუთარი მაგნიტური სისტემა;
- კრიოგენური სისტემა;
- გარე ქსელთან კავშირის სისტემა. ე.ი. ინვერტორული გარდამქმნელი;
- უპირატესობა მარგიქმედების კოეფიციენტის მაღალი სიდიდე (95%-ზე მეტი);
- ელექტროენერჯის გადაცემის დიდი სისწრაფე;
- ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი უძლებს დამუხტვა-განმუხტვის ათასობით ციკლს ყოველგვარი უარყოფითი მოვლენების გამოხატვის გარეშე.
- ენერჯის დაგროვების მეთოდი გამოირჩება ეკოლოგიური სისუფთავით;
- არ არის გამოყენებული მავნე მასალები;
- არ წარმოიქმნება არავითარი ქიმიური რეაქცია;
- ასევე არ არის არავითარი ნარჩენები ენერჯის წარმოების დროს;
- ასეთი სახის მაგროვებელს გააჩნია ფართო პერსპექტივები, რაც განისაზღვრება მაგნიტური ენერჯის სახით ენერჯის დიდი ხნით შენახვაში. ეს კი იძლევა საშუალებას შექმნილი იქნეს სისტემა მზადყოფნის მაღალი დონით;
- ამ მოწყობილობის განსაკუთრებულობა მდგომარეობს იმაში, რომ მცირეა კვების წყარო და დაბალი ელექტრული სიმძლავრე. ენერჯის

ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის აქტუალობა გამოიხატება იმაში, რომ მისი გამოყენებით შეიძლება გადაწყვეტილი იქნეს ორი აუცილებელი და მნიშვნელოვანი დავალება. შემცირებული იქნეს ელექტროენერჯის წარმოებაზე დანახარჯები და გადაწყვეტილი იქნეს მთლიანად ელექტროსისტემის მუშაობის იმედიანობის ამაღლების საკითხი;

- მაგროვებელი იძლევა საშუალებას შემცირებული იქნეს დატვირთვის პიკი, რაც თავისმხრივ ენერჯოსისტემის მუშაობის მდგრადობის გარანტიაა და შესაბამისად იძლევა საშუალებას ამაღლებული იქნეს მთლიანად ენერჯოსისტემის საიმედო მუშაობა;

- დანახარჯები მცირდება დატვირთვის მაქსიმუმის შემცირების ხარჯზე;

- ასევე იზრდება ტურბოგენერატორის მუშაობის მარჯი ქმედების კოეფიციენტი (დაცულია პირობა - მინიმალური დანახარჯები და მაქსიმალური წარმადობა).

ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის შექმნაში ახალი ტექნიკური შესაძლებლობები შეიძლება დაკავშირებული იქნეს მაღალ ტემპერატურულ ზეგამტარებთან. აღნიშნული ზეგამტარული მასალები ხასიათდებიან კრიტიკული ველის მაღალი მნიშვნელობით.

ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის დანერგვასა და მის ფართო გამოყენებას ენერჯოსისტემაში შეიძლება გამოიწვიოს მასიური ცვლილებები.

მათ შორის:

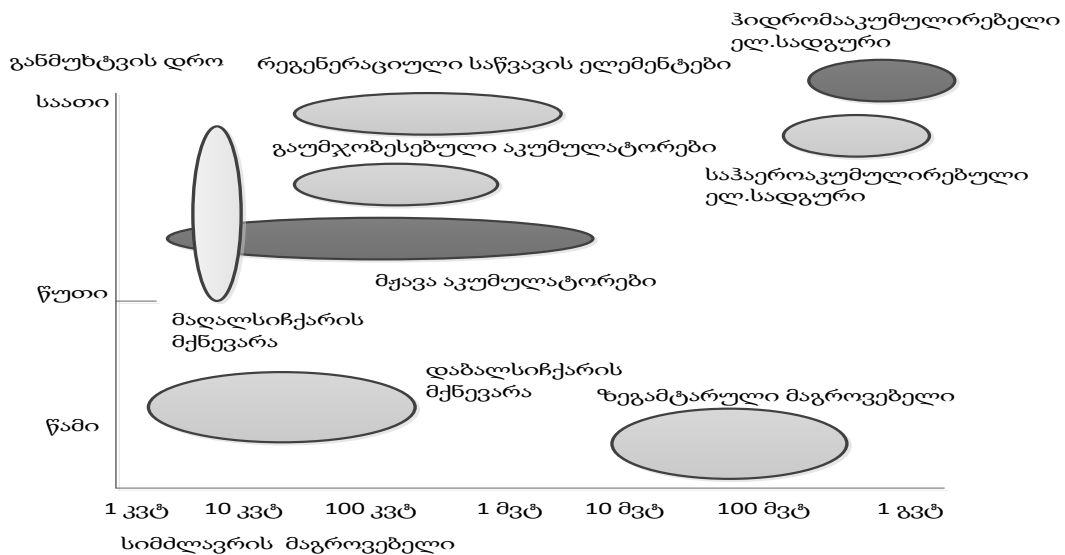
1. მნიშვნელოვნად ამაღლდება ენერჯოსისტემის მუშაობის საიმედოობა, რაც თავის მხრივ გამოიწვევს ენერჯის დანაკარგების შემცირებას როგორც ელექტროენერჯის ტრანსპორტირებაზე და განაწილებაზე, ასევე მის მოხმარებაზე. ამასთანავე, მისი ერთ-ერთი ძირითადი თვისება იქნება ქსელში დაბალი სიხშირული ცვლილებების დროს მინიმალური დანაკარგები;

2. მნიშვნელოვნად შემცირდება კომერციული დანაკარგები ელექტროენერჯის მომხმარებლებთან. განსაკუთრებით საპასუხისმგებლო მომხმარებლებთან, ისეთებთან როგორცაა: ნავთობქიმიური კომბინატები და ნავთობგადამამუშავებელი ქარხნები. არის საწარმოო ხაზები და უბნები, რომლებზეც ელექტროენერჯის მიწოდების შეწყვეტა დაუშვებელია, თუნდაც რამოდენიმე წამის განმავლობაში. ნავთობგადამამუშავებელი ქარხნები ამის გამო უზრუნველყოფილი არიან ოთხი მხრიდან ელექტრომომარაგებით. ელექტროენერჯის მიწოდებაში შეფერხების დროს ავტომატურად უნდა გაეშვას დიზელ-გენერატორი. წინააღმდეგ შემთხვევაში, მოწყობილობები რომლებიც რამოდენიმე მილიონი დოლარის ღირებულებისაა გამოვა მწყობრიდან გამომდინარე შედეგებით. ასევე დიდი დანაკარგები იქნება წარმოების მოცდენით.

დიზელ-გენერატორებს ავტომატურ რეჟიმში გაშვებისათვის ესაჭიროება დროის გარკვეული პერიოდი, რომელიც დაახლოებით 10-13 წამის ტოლია. ამ დროის განმავლობაში კი წარმოება ფაქტიურად რჩება ელექტროენერჯის გარეშე. დროის ამ პერიოდში შეიძლება იმუშაოს ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელმა დაგროვილი ენერჯით. ამ დროის განმავლობაში ელექტროენერჯის გარეშე დარჩენილი მომხმარებლები იმუშავებენ სარეზერვო მაგროვებლის მიერ გაცემული ელექტროენერჯის ხარჯზე. ამასობაში დიზელ-გენერატორი გაეშვება ექსპლოატაციაში და დაიწყებს ელექტროენერჯის მიწოდებას კვების სარეზერვო სისტემაზე. ასეთი სისტემა არსებობს ალუმინის წარმოებაში და სხვა საპასუხისმგებლო მომხმარებლებზე. ასევე შეიძლება აღნიშნოს სამედიცინო დარგი, სადაც ტარდება რთული ოპერაციები. თანამედროვე ტექნიკის გამოყენებით, ელექტროენერჯის გარანტირებული მიწოდების უზრუნველყოფა შესაძლებელია ზემოთ აღნიშნული თანამედროვე ტექნიკის გამოყენებით, ელექტროენერჯის გარანტირებული მიწოდების უზრუნველყოფა შესაძლებელია ზემოთ აღნიშნული მეთოდის გამოყენებით;

3. არსებითად შეიძლება ამაღლებული იქნეს ენერგოსისტემის საიმედოობა, სადაც ქვესადგურის ერთ-ერთი ელემენტის სახით გამოყენებული იქნება ენერგიის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი. მისი გამოყენება საშუალებას იძლევა დემფრირებული იქნეს ძაბვის ცვლილება დაბალი სიხშირით, რაც მიმდინარე ეტაპზე ერთ-ერთი სერიოზული პრობლემა არის ენერგოსისტემის მუშაობაში;

4. ატომური სადგურებიდან დამუხტვა - მძლავრი ენერგიის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის გამოყენებისას როგორც ენერგიის მაგროვებელი, საშუალებას იძლევა ისინი დამუხტული იქნეს ენერგოსისტემის ატომური ელექტროსადგურიდან იმ დროს, როცა მოხმარების სიდიდე მცირდება და ქსელში ეს სიმძლავრე გაცემული იქნეს მომხმარებელთა მაქსიმალური დატვირთვის დროს. ეს კი საშუალებას იძლევა გათანაბრებული იქნეს დატვირთვის გრაფიკი ისეთი საპასუხისმგებლო ბაზისური ელექტროსადგურისა, როგორცაა ატომური ელექტროსადგური. ეს კი ქმნის ამ უკანასკნელის მუშაობის იმედიანობის ამაღლების და უსაფრთხო მუშაობის წინა პირობას.



ენერგიის მაგროვებლის სისტემის შერჩევა ქსელის მოთხოვნაზე დამოკიდებული. ეს მოთხოვნებია:

- დღელამური გრაფიკების გათანაბრება - მოითხოვს დიდი სიმპლავრის ენერგიის უწყვეტ გაცემას ქსელში;

- კრიტიკულ მომხმარებლებზე ელექტროენერგიის უწყვეტი მიწოდება. ეს არის მომხმარებლები, რომლებიც უზრუნველყოფილი უნდა იყვნენ ელექტროენერგიის მიწოდებით რეზერვის აგრეგატის ჩართვამდე.

თავი 2. ენერგოსისტემაში აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულირების მოწყობილობების კლასიფიკაცია

ინდუქციური მაგროვებლები (იმ) კონსტრუქციული შესრულების მიხედვით არსებობს ორი ძირითადი კლასის: წრფივი მაგროვებლები, რომელშიც კოჭა (ხვიები) განლაგებულია სწორხაზოვანი ღერძის ირგვლივ, და ტოროიდული მაგროვებელი (მ-ტიპის), რომელშიც კოჭა (ხვიები) მოიცავს რგოლისებრ ცენტრალურ ხაზს.

წრფივი იმ კონსტრუქციულად მარტივია და ტექნოლოგიურია, უზრუნველყოფს აქტიური მასალის კარგ გამოყენებას, მხოლოდ წარმოშობს მნიშვნელოვან მაგნიტურ ველს გარე სივრცეში.

ტოროიდული იმ (მ-ტიპის) არ ჩამოუვარდება წრფივ იმ-ს წონა-გაბარიტული მაჩვენებლებით, გააჩნია გართულებული კონსტრუქცია, მეორე მხრივ საშუალებას იძლევა პრაქტიკულად სრულად გამორიცხული იქნეს გარე მაგნიტური ველები, რაც ხშირ შემთხვევაში თამაშობს განსაკუთრებულ როლს ზეგამტარული ელექტრომოწყობილობების დამუშავების დროს.

ჯერ განვიხილოთ წრფივი იმ-ის პარამეტრები და მაჩვენებლები ცილინდრული, რგოლისებური, სოლენოიდური და სფერული ფორმის კოჭებით, შემდეგ ჩავატაროთ ანალოგიური ანალიზი ტოროიდული იმ-სათვის სხვადასხვა გეომეტრიით.

2.1. ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი მართკუთხა კვეთით ცილინდრული კოჭას სახით

კოჭას ღერძული სიგრძე l , რადიალური სიმაღლე (სისქე) h და საშუალო დიამეტრი d იგულისხმება თანაზომადი (ნახ.2.1, ა). ინდუქციურობა ცილინდრული კოჭას ω ხვიებით [1]:

$$L_{\text{კ}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \omega^2 k_{\phi 1} d, \quad (2.1)$$

სადაც $k_{\phi 1}$ -ფორმის კოეფიციენტი, დამოკიდებულია კოჭას კვეთის ფარდობით ზომებზე, ე.ი. ფარდობაზე $\ell_* = \ell/d, h_* = h/d$. კვადრატული კვეთის კოჭასათვის ($\ell = h$)

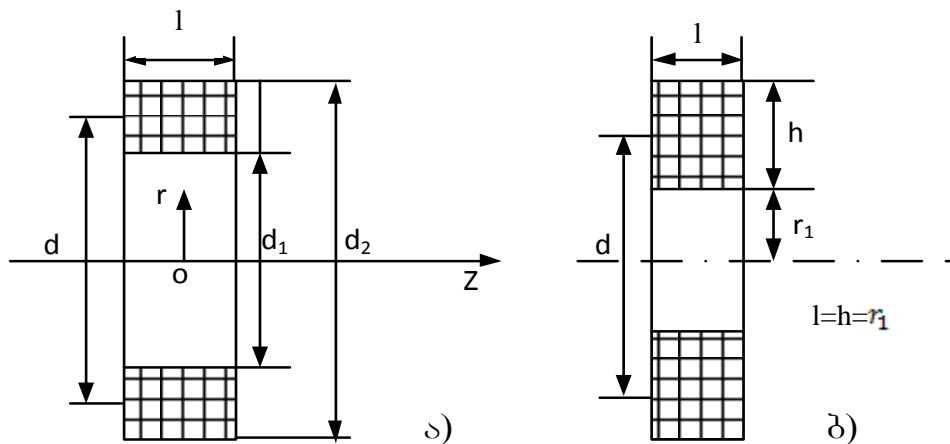
$$L'_{\text{კ}} = \frac{\mu_0}{8\pi} \omega^2 k_{\phi 2} d \quad (2.2)$$

$K_{\phi 1}$ და $K_{\phi 2}$ მნიშვნელობები მოყვანილია [1]. მაქსიმალურ ინდუქციურობას სადენი მოცემულ მოცულობაში ავლენს ბრუკსას კოჭაში [2], რომელსაც $\ell_* = h_* = 1/3$ (დაზუსტებით, 0,3367) ან $\ell = h = r_1$, სადაც r_1 -შიდა რადიუსი (ნახ.2.1, ბ). [1]-ის თანახმად

$$L_{\text{ბ}} = 8,497 \frac{\mu_0}{4\pi} \omega^2 d \quad (2.3)$$

თუ მოცემულია სადენის კვეთი $S_{\text{მპ}}$, რომლისგანაც იხვევა ბრუკსას კოჭა, $L_{\text{ბ}}$ -ს მნიშვნელობა, მაშინ მორიგი ტოლობის გათვალისწინებით $\omega S_{\text{მპ}} = h \ell k_{3,4}$, სადაც $k_{3,4}$ - შევსების კოეფიციენტი ცილინდრული კოჭას კვეთის აქტიური სადენების, მარტივად შეიძლება ვიპოვოთ მისი ზომები:

$$h = \ell = r_1 = \sqrt[5]{\frac{10^7 L_{\text{ბ}} S_{\text{მპ}}^2}{25,49 K_{3,4}^2}} \quad (2.4)$$



ნახ. 2.1. მართკუთხა კვეთით ცილინდრული კოჭა (ა) და ბრუკსას კოჭა (ბ)

ცილინდრული იმ-ის ძირითადი საანგარიშო განტოლება, რომელიც აკავშირებს დაგროვილ ენერგიას $W_{\text{ჟ}} = 0,5L_{\text{ჟ}}i_{\text{ჟ}}^2$, ზომებს და დასაშვები დენის სიმკვრივეს სადენებში (2.1) და $W = \ell h K_{3,4}/S_{\text{მპ}} = \ell h K_{3,4}J/i$ გამოსახება შემდეგი სახით

$$W_{\text{ჟ}} = \frac{\mu_0}{8\pi} K_{\phi 1} (k_{3,4} J_{\text{ჟ}} \ell_* h_*)^2 d^5 \quad (2.5)$$

(2.5)-დან გამომდინარეობს, რომ ძირითადი გზა იმ-ის ენერგიის ამალღებისა დაკავშირებულია მისი ზომების და დენის სიმკვრივის გაზრდასთან.

(2.5) ფორმულა საშუალებას იძლევა განვსაზღვროთ ცილინდრული იმ-ის ზომები მისი მოცემული $W_{\text{ჟ}}$ ენერგიის მიხედვით.

რადგანაც ცილინდრული იმ-ის სადენის მასა

$$W_{\text{ჟ}} = \gamma \pi d^3 k_{3,4} \ell_* h_* \quad (2.6)$$

სადაც γ – სადენების მასალის სიმკვრივე, იმ-ის ხვედრითი ენერგია გამოსახება შემდეგი სახით

$$W_{\text{ჟ/მგ}} = \frac{W_{\text{ჟ}}}{M_{\text{ჟ}}} = \frac{\mu_0}{8\pi^2 \gamma} k_{\phi 1} k_{3,4} \ell_* h_* (J_{\text{ჟ}} d)^2 \quad (2.7)$$

(2.5) და (2.7)-დან გამომდინარეობს, რომ $W_{\text{ჟ/მგ}}$ იზრდება $W^{2/5}$ -ის პროპორციულად. ასეთი დამოკიდებულობა დამახასიათებელია იმ-ების მრავალი ტიპებისათვის. შესაბამისად იმ-ის გამოყენება მით რაციონალურია, რაც მსხვილია იმ და მასში დაგროვილი ენერგია დიდია (იმ მით ეკონომიურია აქტიური მასალების ხარჯვის მიხედვით, რაც მეტია ნამრავლი $J_{\text{ჟ}} d$ და W).

ზოგიერთი ანგარიშებისათვის მოხერხებულია $W_{\text{ჟ}}$ გამოვსახოთ კოჭას აქტიური სადენების მოცულობით $Q_{\text{ჟ}}$. (2.6)-ის გათვალისწინებით (2.5)-დან მივიღებთ:

$$W_{\text{ჟ}} = \frac{\mu_0}{8\pi^{8/3}} K_{\phi 1} (k_{3,4} \ell_* h_*)^{1/3} J_{\text{ჟ}}^2 Q_{\text{ჟ}}^{5/3} \quad (2.8)$$

რადგანაც $Q = M_{\text{H}}/\gamma$, (2.8) გამოსახავს კავშირს W_{H} და M_{H} შორის. ანალოგიური თანაფარდობებია ბრუკსას კოჭასათვის:

$$W_{\text{B}} = \frac{0,0131}{\pi} \mu_0 (k_{3\text{B}} J_{\sigma})^2 d^5; \quad (2.9)$$

$$W_{\text{H}} = \frac{0,118}{\pi^2 \gamma} \mu_0 k_{3\sigma} (J_{\text{B}} d)^2; \quad (2.10)$$

$$W_{\text{B}} = \frac{0,51 \mu_0}{\pi^{8/3}} k_{3\text{B}}^{1/3} J_{\text{B}}^2 Q_{\text{B}}^{5/3} \quad (2.11)$$

მაგნიტური ენერგია ცილინდრული კოჭასი შედარებით ბრუკსას კოჭასთან ერთნაირი მოცულობის (ან წონის სადენების დროს, როგორც გამომდინარეობს (2.8), (2.11)-დან განისაზღვრება ფარდობით

$$\frac{W_{\text{H}}}{W_{\text{B}}} = \frac{k_{\phi 1}}{4,08} \left(\frac{k_{3\text{H}}}{k_{3\text{B}}} \right)^{1/3} \left(\frac{J_{\text{H}}}{J_{\text{B}}} \right)^2 (\ell_* h_*)^{1/3} \quad (2.12)$$

შემდგომში სხვადასხვა ტიპის იმ-ის განხილვის დროს ფარდობა მათი ენერგიის W_{B} -სთან სადენის ერთნაირი მოცულობის დროს გამოიყენება როგორც ძირითადი ენერგეტიკული მაჩვენებელი იმ-ის. ბუნებრივია, რომ ეს მაჩვენებელი ტოლია აგრეთვე ხვედრითი ენერგიის ფარდობისა შესაბამისი მაგროვებლის და ბრუკსას კოჭასა. ცხრილი 2.1-ში მოცემულია ფორმულები მარტივი გეომეტრიის იმ-ის ძირითადი ტიპების ფარდობითი ენერგიის ანგარიშისათვის.

ხშირ შემთხვევებში იმ-ის ანალიზისათვის აუცილებელია ვიცოდეთ მაგნიტური ინდუქცია B_0 ცილინდრული კოჭას ცენტრში ღერძზე ($z = 0, r = 0$).

[3]-ის თანახმად გვაქვს

$$B_0 = 0,5 \mu_0 k_{3\text{H}} J_{\text{H}} d \ell_* \times \ell_n \left(\frac{1+h_*+\sqrt{(1+h_*)^2+\ell_*^2}}{1-h_*+\sqrt{(1-h_*)^2+\ell_*^2}} \right) \quad (2.13)$$

ელექტრული დანაკარგები კოჭაში სადენების მოცულობით Q_{H} როცა $J_{\text{H}} = \text{const}$:

$$\Delta P = J_{\text{H}}^2 \rho Q_{\text{H}} = J_{\text{H}}^2 \rho \pi k_{3\text{H}} \ell_* h_* d^3, \quad (2.14)$$

სადაც ρ -სადენის მასალის ხვედრითი წინაღობა.

გამოვსახოთ J_{II} (2.13)-დან, გვექნება

$$\Delta P = \frac{4\pi B_0^2 \rho d h_*}{\mu_0^2 k_{3,4} \ell_* \left[\ell_n \left(\frac{1 + h_* + \sqrt{(1 + h_*)^2 + \ell_*^2}}{1 - h_* + \sqrt{(1 - h_*)^2 + \ell_*^2}} \right) \right]^2} \quad (2.15)$$

ცილინდრული კოჭას ანგარიშის დროს ხშირად იყენებენ თანაფარდობას გამომდინარე (2.15)-დან,

$$B_0 = \mu_0 k_F (\Delta P k_{3,4} / \rho r_1)^{1/2}, \quad (2.16)$$

სადაც ფაზრის კოეფიციენტი k_F დამოკიდებულია მხოლოდ ფარდობით ზომებზე და აღწევს მაქსიმუმს, როცა $h_* = 0,5$, $\ell_* = 0,75$ [4].

B_0 და r_1 მოცემული მნიშვნელობისათვის k_F -ის მაქსიმუმს შეესაბამება ΔP მინიმუმი.

ამგვარად კოჭას ოპტიმალური გეომეტრია, რომელიც მოითხოვს მინიმალურ სიმძლავრეს მოცემული მაგნიტური ველის შექმნისათვის ცენტრში, არსებითად განსხვავდება კოჭას ოპტიმალური გეომეტრიისაგან, რომელიც უზრუნველყოფს მასალების მინიმალურ ხარჯს მოცემული მაგნიტური ენერჯის დროს ($\ell_* = h_* = 1/3$).

განვსაზღვრავთ B_0 (2.13)-ის მიხედვით მოცემული ზომებითა და დენის სიმკვრივით, შეიძლება შევაფასოდ კოჭაში მაქსიმალური მაგნიტური ინდუქცია B_m , რომელიც ჩვეულებრივ რეალიზდება შიდა რადიუსზე მერიდიანის სიბრტყეში ($z = 0$, $r = r_1$) კოეფიციენტის $k_B = B_m / B_0$ საშუალებით, რომელიც დამოკიდებულია ℓ_* და h_* [14,15]. თავის მხრივ, B_m -ის მიხედვით შეიძლება ვიპოვოთ მაქსიმალური მოცულობითი ელექტრომაგნიტური ძალა $f_m = J \times B_m$, რომელიც მოქმედებს კოჭაში. ზეგამტარული კოჭასათვის B_m -ის მნიშვნელობამ არ უნდა გადააჭარბოს კრიტიკულ ინდუქციას, რომელიც არღვევს სადენის ზეგამტარულ მდგომარეობას. შევნიშნავთ, რომ საყელურისმაგვარი ბრტყელი კოჭასათვის $\ell_* \ll h_*$, $h_* \lesssim 1$ მაქსიმალური ინდუქციამ

შეიძლება მიაღწიოს კიდურ შუბლურ ნაწილს ($z = \pm 0,5\ell$). მეორე მხრივ იმ-სათვის ასეთი კოჭები ჩვეულებრივ არ გამოიყენება.

ზოგიერთ შემთხვევებში ცილინდრული იმ-ის ანგარიშის დროს შეიძლება წარმოიშვას B_0 ინდუქციაზე დასაშვები გარე მაგნიტური ველის შეზღუდვა.

მაშინ ძირითადი საანგარიშო თანაფარდობა იმ-სათვის მიიღება, თუ მოცემული B_0 ინდუქციის მიხედვით ვიპოვით J_{H} (2.13)-დან და შედეგს ჩავსვამთ (2.5) და (2.7). როგორც (2.13)-იდან ჩანს, მოცემული h_* და ℓ_* -ისათვის ამ შემთხვევაში d -ს გაზრდის დროს აუცილებელია უკუპროპორციულად შევამციროდ J_{H} ($J_{\text{H}} \sim 1/d$). ამიტომ (2.5)-ის თანახმად იმ-ის ენერგია იქნება პროპორციული d^3 :

$$W_{\text{H}} = \frac{k_{\phi 1} B_0^2 h_*^2 d^3}{2\pi\mu_0} \times \left[\ell_n \frac{1 + h_* + \sqrt{(1 + h_*)^2 + \ell_*^2}}{1 - h_* + \sqrt{(1 - h_*)^2 + \ell_*^2}} \right]^{-2}$$

ხვედრითი ენერგია (2.7)-ის შესაბამისად ამ შემთხვევაში არაა დამოკიდებული d -ზე

$$W_{\text{H,კვ}} = \frac{k_{\phi 1} h_* B_m^2}{2\pi^2 \mu_0 \gamma k_{3,4} K_B^2 \ell_*} \times \left[\ell_n \frac{1 + h_* + \sqrt{(1 + h_*)^2 + \ell_*^2}}{1 - h_* + \sqrt{(1 - h_*)^2 + \ell_*^2}} \right]^{-2}$$

დავამყაროთ კავშირი ცილინდრული კოჭას დროის მუდმივასა და მის ზომებს შორის $\tau_{\text{H}} = L_{\text{H}}/R_{\text{H}}$. ვინაიდან აქტიური წინაღობა $R_{\text{H}} = \rho\pi d\omega^2 / (h\ell k_{3,4})$, (2.1)-ის გათვალისწინებით გვექნება

$$\tau_{\text{H}} = \mu_0 k_{\phi 1} k_{3,4} h_* \ell_* d^2 / (4\pi^2 \rho) \quad (2.17)$$

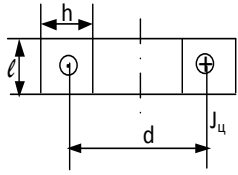
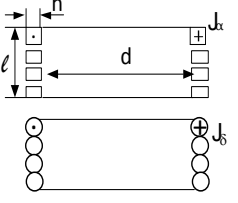
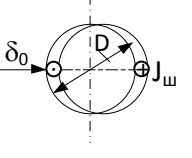
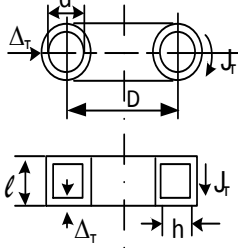
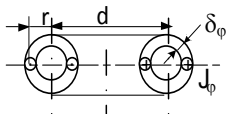
ბრუკსას კოჭასათვის

$$\tau_{\text{B}} = 0,3 \cdot 10^{-7} k_{3\text{B}} d_{\text{B}}^2 / \rho \quad (2.18)$$

გამოვსახოთ აგრეთვე τ_{B} აქტიური სადენის მოცულობით $Q_{\text{B}} = M_{\text{B}}/\gamma$ (2.6)-ის გათვალისწინებით.

$$\tau_{\text{B}} = 6,062 \cdot 10^{-8} k_{3\text{B}}^{1/3} Q_{\text{B}}^{2/3} / \rho \quad (2.19)$$

ცხრილი 2.1. სადენის ერთნაირი მოცულობის დროს იმ-ის ძირითადი ტიპების ფარდობითი ენერგია

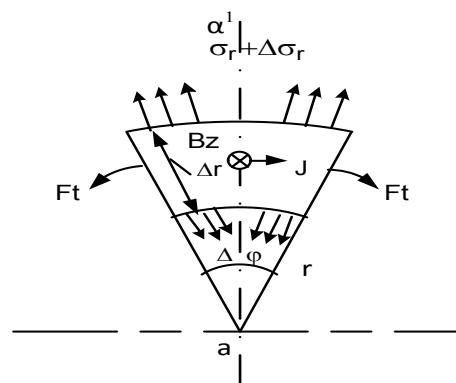
იმ-ის ტიპი	გეომეტრია	იმ-ის ენერგიის ფარდობა ბრუკსას კოჭას ენერგიასთან	ზომა
ცილინდრული		$\frac{k_{\Phi 1}}{4,08} \left(\frac{k_{\Phi II}}{k_{\Phi B}} \right)^{1/3} \left(\frac{J_{II}}{J_B} \right)^2 (h_* \ell_*)^{1/3}$	$h_* = h/d$ $\ell_* = \ell/d$
სოლენოიდური ა) სადენის მართკუთხა კვეთით ბ) სადენის წრიული კვეთით		$2,12 \left(\frac{k_{\Phi \alpha}}{k_{\Phi B}} \right)^{1/3} \left(\frac{J_{\alpha}}{J_B} \right)^2 h_*^{1/3}$ $(\ell_* = \ell_{*opt} = 0,406)$ $1,445 \left(\frac{k_{\Phi \sigma}}{k_{\Phi \delta}} \right)^{1/3} \left(\frac{J_{\sigma}}{J_{\sigma}} \right)^2 W^{-1/3}$	$h_* = h/d$ $\ell_* = \ell/d$
სფერული		$1,61 \delta_0^{1/3} \left(\frac{J_{III}}{J_B} \right)^2 \left(\frac{k_{\Phi III}}{k_{\Phi B}} \right)^{1/3}$	$\delta_{0*} = \delta_0/D$
ტოროიდული შ-ტიპის: ა) სადენის წრიული კვეთით ბ) სადენის მართკუთხა კვეთით		$2,255 \left(\frac{k_{\Phi T}}{k_{\Phi B}} \right)^{1/3} \left(\frac{J_T}{J_B} \right)^2$ $(1 - \sqrt{1 - d_*^2}) \Delta_r^{1/3} / d_*^{4/3}$ $1,524 \left(\frac{k_{\Phi T}}{k_{\Phi B}} \right)^{1/3} \left(\frac{J_T}{J_B} \right)^2 \frac{\ell_* (\Delta_r h_*)^{1/3}}{(\ell_* + h_*)^{5/3}} \ell_n \frac{1 + h_*}{1 - h_*}$	$\Delta_{r*} = \Delta_r/d$ $d_* = d/D$ $\ell_* = \ell/D$ $\Delta_{r*} = \Delta_r/n$ $h_* = h/D$
ტოროიდული Φ -ტიპის		$2,84 \left[(1 + r_*^2) \ell_n \frac{4}{r_*} - 2 \right] \left(\frac{J_{\Phi}}{J_B} \right)^2 \left(\frac{k_{\Phi \Phi}}{k_{\Phi B}} \right)^{1/3} r_*^{2/3} \delta_{\Phi*}^{1/3}$	$r_* = r/d$ $\delta_{\Phi*} = \delta_{\Phi}/r$
შენიშვნა. ბრუკსას კოჭას ბაზისური ენერგია		$W_B = \frac{0,0131}{\pi} \mu_0 (k_{\Phi B/B})^2 d^5 = \frac{0,51}{\pi^{8/3}} \mu_0 k_{\Phi B}^{1/3} J_B^2 Q^{5/3}$	

τ მნიშვნელობა, ახასიათებს უპირველეს ყოვლისა იმ-ის დამუხტვის პროცესის ხანგრძლივობას და მეორის მხრივ დამუხტვის პროცესის ეფექტურობას. τ ტოლია ფარდობისა გაორმაგებული დაგროვილი ენერჯიის $0,5Li^2$ ომური დანაკარგების Ri^2 სიმძლავრესთან მუდმივი i დენის დროს. რაც მეტია τ , მით ნაკლებია აქტიური დანაკარგების წილი იმ-ის აქტიურ წინაღობაში მისი დამუხტვის დროს. ცილინდრული კოჭასათვის სადენის მოცემული მოცულობისთვის Q , τ -ს მნიშვნელობა, წარმოადგენს მაქსიმალურს ბრუკსას კოჭასათვის. (2.5)-(2.11) და (2.17)-(2.19)-დან გამომდინარეობს, რომ იმ-ის ზომების გაზრდას მივყავართ მისი ენერჯიის ზრდასთან და ომური დანაკარგების წილის შემცირებასთან. ამ მოსაზრებით აიხსნება იმ-ის რაციონალური ენერჯიის შეზღუდვა ($w \geq 10^5 \div 10^6$ ჯე)-იქ ქვემოთ.

ცილინდრულ კოჭაში მექანიკური ძალვის ანგარიში, შექმნილი მოცულობითი ძალებით $f = J \times B$ წარმოადგენს საერთო შემთხვევაში რთულ ამოცანას B-ს არაერთგვაროვანი განაწილების გამო.

თუ ჩავთვლით, რომ კოჭა წარმოადგენს ერთგვაროვან ცილინდრს, მაშინ საერთო მიდგომა მექანიკური ძალვის ანგარიშისთვის მდგომარეობს შემდეგში [4].

გამოვყოფთ ელემენტარულ სექტორს კოჭაში, შეზღუდული რადიუსებით $r, r + \Delta r$ მცირე კუთხის საზღვრებში $\Delta\phi$ და გააჩნია ერთეული სიგრძე Z -ის მიხედვით (ნახ.2.2).



ნახ. 2.2. ცილინდრული კოჭას ელემენტზე მომქმედი ძალა.

განვიხილოთ რადიალური ძალები, რომლებიც მოქმედებენ სექტორზე სიმეტრიული aa' ხაზის გასწვრივ, უშვებთ, რომ $k_3 = 1$.

ეს ჯერ-ერთი, ელექტრომაგნიტური რადიალური ძალა $F_{1r} = JB_z r \Delta\varphi \Delta r$ (იმ გათვალისწინებით, რომ $\cos(\Delta\varphi/2) \approx 1$).

და მეორე, თითოეულ გვერდითი მხარეს სექტორთან მოდებულია ტანგენციალური გამჭიმავი ძალა $F_t = \sigma_t \Delta r$, სადაც σ_t -ტანგენციალური ძაბვა ცილინდრის მასალაში. F_t - გეგმილების ჯამი aa' ხაზზე:

$$F_{2r} = -2F_t \sin(\Delta\varphi/2) \approx -\sigma_t \Delta r \Delta\varphi, \text{ სადაც}$$

გათვალისწინებულია, რომ $\sin(\Delta\varphi/2) \approx \Delta\varphi/2$.

მესამე, ეს ძალა ტოლია ძალების სხვაობის რადიალური ძაბვის σ_r , წარმოქმნილი შიდა და გარე რადიუსებში:

$$F_{3r} = (\sigma_r + \Delta\sigma_r)(r + \Delta r)\Delta\varphi - \sigma_r r \Delta\varphi \approx (\sigma_r \Delta r + r \Delta\sigma_r)\Delta\varphi$$

ვინაიდან $F_{1r} + F_{2r} + F_{3r} = 0$, მაშინ ($\Delta r \rightarrow dr$) ზღვარზე გადასვლით,

მივიღებთ

$$-\sigma_t + \frac{d}{dr}(r\sigma_r) = -JB_z r \quad (2.20)$$

ძალვა σ_t და σ_r გუკას კანონის გათვალისწინებით გამოისახება რადიალური U ცვლადით:

$$\sigma_t = \frac{E}{1 - \mu^2} \left(\frac{U}{r} + \mu \frac{dU}{dr} \right); \quad (2.21)$$

$$\sigma_r = \frac{E}{1 - \mu^2} \left(\frac{du}{dr} + \mu \frac{U}{r} \right); \quad (2.22)$$

სადაც E -იუნგას დრეკადობის მოდული, μ -უასონის ფარდობა მოცემული მასალისათვის.

ჩავსვათ (2.21), (2.22) (2.20)-ში მივიღებთ განტოლებას რადიალური გადაადგილებისა

$$\frac{d^2 U}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = -\frac{1 - \mu^2}{E} JB_z \quad (2.23)$$

2.23)-ის ამოხსნა წარმოებს სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით ცილინდრის შიდა ($r = r_1$) და გარე ($r = r_2$) ზედაპირზე.

ეს პირობები განისაზღვრება, კერძოდ კონსტრუქციული ელემენტების არსებობით და მათი თვისებებით. ვიცით რა U , შეიძლება ვიპოვოთ σ_z და σ_r ძალვა (2.21) და (2.22)-ის მიხედვით.

ანალოგიური სახით პოულობენ ღერძული მკუმშავი ძალვას საწყისი განტოლების გამოყენებით.

$$d\sigma_z/dz = -JB_r \quad (2.24)$$

თუ კოჭა შედგება მექანიკურად არა ურთიერთმომქმედი ხვიებისაგან, σ_z ძალვა მაქსიმალურია შუბლურ ზონაში, სადაც მაქსიმალურია რადიალური მდგენელი B_r . კოჭაზე მკუმშავი ძალა იოლად შეიძლება გამოითვალოს გამოსახულებით

$$F_z = \int_{S_T} \sigma_z dS_T, \quad (2.25)$$

სადაც S_T – გვერდითი შუბლას ფართი.

მექანიკურად ურთიერთდაკავშირებული ხვიების დროს ღერძული მკუმშავი ძალვა გადაეცემა ცენტრალურ სიბრტყეს ($z = 0$) და შეიძლება იყოს მნიშვნელოვანი.

როგორც წესი, კოჭას მექანიკური ძალვას განსაზღვრავს ტანგენციალური ძალვა σ_t ან ძვრის ძალვა $\sigma_s = 0,5(\sigma_t - \sigma_r)$ [4] საინჟინრო ანგარიშების სიზუსტისათვის σ_t მნიშვნელობა შეიძლება შეფასდეს მედიანის სიბრტყისთვის მთლიანი ცილინდრული კოჭას შემდეგი სახით.

განვიხილოთ ცილინდრულ კოჭაში ელემენტარული რგოლი r რადიუსით dr სისქის და ერთეული სიგრძის Z -ის გასწვრივ. რგოლის ერთეულ ტანგენციალურ სიგრძეზე (როცა $k_{3,4} = 1$) მოქმედებს ძალა $JB_z dr$. თუ მისი მნიშვნელობას გავამრავლებთ დიამეტრზე, მივიღებთ

ძალას $2rJB_z dr$, რომელიც მიისწრავის მოაცილოს რგოლის ერთი ნახევარი მეორეს [7].

რგოლის ერთი კვეთისათვის ელემენტარული გამწყვეტი ელექტრომაგნიტური ძალვა

$$dF_p = rJB_z dr,$$

ხოლო ცილინდრის ყველა მერიდიანული კვეთისათვის

$$F_p = \int_{r_1}^{r_2} JB_z r dr \quad (2.26)$$

ეს ძალა წონასწორდება მექანიკური ტანგენციალური ძალვით σ_t .

დრეკადობის თეორიის თანახმად სქელკედლიანი ცილინდრისათვის

$$\sigma_t = E \varepsilon_t / r, \quad (2.27)$$

სადაც ε_t -ფარდობითი ტანგენციალური დეფორმაცია, დაკავშირებული რადიალურ გადაადგილებასთან

$$\varepsilon_t = [2\pi(r + u) - 2\pi r] / (2\pi r) = U / r \quad (2.28)$$

ცილინდრის კვეთში (ერთეულ სიგრძეზე z-ის მიხედვით) (2.27)-ის გათვალისწინებით მოქმედებს ტანგენციალური ძალვა

$$F_t = \int_{r_1}^{r_2} \sigma_t dr = E \varepsilon_t \ell_n \frac{r_2}{r_1} \quad (2.29)$$

გაუტოლოდ F_p და F_t , (2.27)-ის გათვალისწინებით გვექნება [15].

$$\sigma_t = \int_{r_1}^{r_2} JB_z r dr / \left(r \ell_n \frac{r_2}{r_1} \right) \quad (2.30)$$

მიახლოებითი ანგარიშებისთვის შეიძლება მივიღოთ, რომ მედიანის სიბრტყეში B_z ინდუქცია იცვლება წრფივად კოჭას შიგნით [8], [6], ე.ი.

$$[B(r) - B_1] / (r - r_1) = -(B_1 - B_2) / (r_2 - r_1), \quad (2.31)$$

სადაც B_1 და B_2 , B_z -ის მნიშვნელობა კოჭას შიდა და გარე რადიუსზე.

მაშინ (2.30)-ის ინტეგრირების შემდეგ მივიღებთ [3]:

$$\sigma_t(r) = \frac{J[B_1(r_2^2 + r_1 r_2 - 2r_1^2) + B_2(2r_2^2 - r_1 r_2 - r_1^2)]}{6r\ell_n \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.32)$$

კოჭასათვის თანაზომადი d, h, ℓ ზომებით (2.32) იძლევა კარგ შედეგს ზუსტი ანგარიშისთვის. მაქსიმალური ძალვა (2.32)-ის თანახმად აღიძვრება ზონაში ახლოს შიდა რადიუსთან. თუ კოჭა არ წარმოადგენს მთლიან ცილინდრს, შედგება ცალკეული მექანიკურად არა ურთიერთმომქმედი კონტურებისაგან i დენით, მაშინ σ_t -ს ანგარიში მარტივდება. ამ შემთხვევაში (1.36)-ის თანახმად გამწყვეტი ძალვა კონტურის ერთ კვეთზე არის $rB_z i$ და შესაბამისად

$$\sigma_t = rB_z i / S_k, \quad (2.33)$$

სადაც S_k – კონტურის კვეთი.

თუ მივიღებთ დამოკიდებულებას $B_z(r)$ (2.31) სახეში, მაშინ, როგორც იოლად ჩანს, σ_t აღწევს თავის მაქსიმუმს რადიუსზე

$$r_m = (B_1 r_2 - B_2 r_1) / [2(B_1 - B_2)] \quad (2.34)$$

ამგვარად, მაქსიმალური ძალვა გვაქვს კოჭას შიგნით ($r_1 < r_m < r_2$), და არა როცა $r = r_1$ როგორც მთლიან ცილინდრში.

ზოგჯერ მიახლოებითი შეფასებისათვის მექანიკური ძალვის ანგარიშისათვის თვლიან, რომ მაგნიტური ველი იქმნება დენური ფენებით კოჭას შიდა ზედაპირზე, ხოლო დანარჩენი მისი ნაწილი იჭერს ამ ფენას [4]. ამ შემთხვევაში მექანიკური ძალვა შეიძლება შეფასდეს, როგორც კოჭა ეკვივალენტური სქელკედლიანი ცილინდრი, რომელიც შევსებულია გაზით წნევის ქვეშ $P_M = i' B'$, სადაც i' - სრული დენი ღერძის ერთეულ სიგრძეზე, $B' = 0,5(B'_1 + B'_2)$ -საშუალო ინდუქცია, B'_1 და B'_2 - B_z - ის მნიშვნელობა დენის ფენის შიდა და გარე ზედაპირზე. შედარებით გრძელი ცილინდრული დენური ფენისთვის Z - ის მიხედვით გვექნება $B'_2 \approx 0$, ხოლო $B'_1 \approx \mu_o i'$ ამიტომ

$$P_M \approx B_1^2 / 2\mu_o = \mu_o (i')^2 / 2 \quad (2.35)$$

ე.ი. საანგარიშო წნევა ტოლია მაგნიტური წნევის კოჭას შიგნით. ძალვა სქელკედლიან ცილინდრში, შევსებული გაზით წნევის ქვეშ P_M , [4] – ის თანახმად ტოლია:

$$\sigma_t = P_M \frac{1 + (r_2/r)^2}{(r_2/r_1)^2 - 1} \quad (2.36)$$

$$\sigma_r = P_M \frac{1 - (r_2/r)^2}{(r_2/r_1)^2 - 1} \quad (2.37)$$

$$\sigma_s = 0,5(\sigma_t - \sigma_r) = P_M \frac{(r_2/r)^2}{(r_2/r_1)^2 - 1} \quad (2.38)$$

ძალვის ძვრა, როგორც (2.38)-დან ჩანს, მეტია კოჭას შიდა რადიუსზე. (2.35)-(2.38) ფორმულების სიზუსტე რეალური კოჭასთვის მით მაღალია, რაც მცირეა r_2/r_1 . როცა $r_2/r_1 \approx 2$, რა შემთხვევისთვისაც ჩვეულებრივ სრულდება იმ, ფორმულები (2.36) – (2.38) იძლევა σ_s -ის ამაღლებულ მნიშვნელობას, არა უმეტეს ვიდრე 40%-ისა. ე.ი. საშუალება გვეძლევა ჩავატაროთ შეფასება მექანიკური ძალვის რეალური მარაგით.

2.2. ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი რგოლისებრი კოჭას სახით

იმ-ის ანგარიში მარტივდება, თუ კოჭას მართკუთხა კვეთით, გააჩნია კვეთის მცირე ზომები ($\ell_* \ll 1$, $h_* \ll 1$). ამ შემთხვევაში [1,7]-ის თანახმად

$$L_k \approx 0,5\mu_0 w_k^2 d \left(\ell_n \frac{4}{\ell_* + h_*} - 0,5 \right) \quad (2.39)$$

და შესაბამისად

$$W_k = 0,25\mu_0 (J_k K_{3,k} \ell_* h_*)^2 d^5 \left(\ell_n \frac{4}{\ell_* + h_*} - 0,5 \right); \quad (2.40)$$

$$W_{y,d,k} = 0,25\mu_0 K_{3,k} \ell_* h_* (J_k d)^2 \left(\ell_n \frac{4}{\ell_* + h_*} - 0,5 \right) / (\pi\gamma); \quad (2.41)$$

$$\tau_k = \frac{\mu_0}{2\pi\rho} k_{3,k} \ell_* h_* d^2 \left(\ell_n \frac{4}{\ell_* + h_*} - 0,5 \right) \quad (2.42)$$

(1.34) და (2.39) გათვალისწინებით რადიალური ძალა კოჭაზე

$$F_{rk} = 0,5i^2 \frac{\partial L_k}{\partial r} = 0,5\mu_0 (iw)^2 \left(\ell_n \frac{4}{\ell_* + h_*} + 0,5 \right) \quad (2.43)$$

კვეთის მიხედვით საშუალო ტანგენციალური ძალვა სადენში (1.36) და $i_k W_k = k_{3,k} \ell h J_k$ -ის გათვალისწინებით

$$\sigma_{tcp} = -\frac{F_r}{2\pi\ell h k_{3,k}} = \frac{\mu_0}{4\pi} k_{3,k} \ell_* h_* (J_k d)^2 \left(\ell_n \frac{4}{\ell_* + h_*} + 0,5 \right) \quad (2.44)$$

მსგავსების შენარჩუნების დროს გვაქვს $\sigma_t \sim (J_k d)^2$, ე.ი რაც მძლავრია იმ და კოჭაში დიდია დენის სიმკვრივე, მით დიდი როლი უნდა ითამაშოს კონსტრუქციის ელემენტების სიმტკიცემ. თუ σ_{tcp} ხდება ზღვრულად დასაშვები, d გაზრდის დროს უნდა გვქონდეს $J_k \sim d^{-1}$, ამიტომ $W_{y,d,k} = const$, ე.ი. იმ ის წონა იზრდება W -ს პროპორციულად.

(2.39) – (2.44) ფორმულების სიზუსტე მცირდება ℓ_* და h_* -ის გაზრდით. მეორე მხრივ, [7] თანახმად მათი გამოყენება შეიძლება უკვე $\ell_* \approx h_* \lesssim 0,3$.

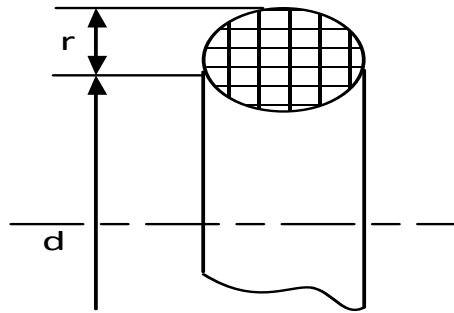
გამოვსახოთ $(J_k d)^2$ (2.44)-იდან და ჩავსვათ შედეგი (2.41)-ში მივიღებთ ფორმულას

$$W_{y,d,k} = \sigma_{tcp} \left(\ell_n \frac{4}{\ell_* + h_*} - 0,5 \right) / \left[\gamma \left(\ell_n \frac{4}{\ell_* + h_*} + 0,5 \right) \right]$$

რომლის საშუალებით შეიძლება შეფასდეს იმ-ის ხვედრითი ენერგია, გამომდინარე დასაშვები მექანიკური ძალვით.

თუ მივიღებთ სპილენძის სადენისათვის $\sigma_{tcp} \approx 10^8$ პა (10კგწ/მმ²), მაშინ როცა $\ell_* = h_* = 0,3$ გვექნება $W_{y,d,k} = 6,5$ კჯ/კგ (სადენის მასის ერთეულზე ენერგია).

ხშირ შემთხვევაში იმ-ისათვის შეიძლება გამოყენებული იქნეს კოჭა წრიული კვეთით (ნახ. 2.3).



ნახ. 2.3. კოჭა წრიული კვეთით

თუ კვეთის რადიუსი $r \ll d (r_* = r/d < 0,2)$, მაშინ ფორმულების გათვალისწინებით [1,7]-იდან გვექნება

$$L'_k = 0,5\mu_0 w_k^2 d \left(\ell_n \frac{4}{r_*} - 1,75 \right); \quad (2.45)$$

$$W'_k = \frac{\mu_0 \pi^2}{64} (k_{3,k} J_k)^2 d^5 \left(\ell_n \frac{4}{r_*} - 1,75 \right); \quad (2.46)$$

$$W_{yA,k} = \frac{\mu_0 k_{3,k} (J_k d)^2}{64 \gamma r_*^2} \left(\ell_n \frac{4}{r_*} - 1,75 \right); \quad (2.47)$$

$$\tau'_k = \frac{\mu_0}{2\rho} k_{3,k} (r_* d)^2 \ell_n \left(\frac{4}{r_*} - 1,75 \right); \quad (2.48)$$

$$\sigma'_{tcp} = 0,25\mu_0 k_{3,k} (J_k r_* d)^2 \ell_n \left(\frac{4}{r_*} - 0,75 \right) \quad (2.49)$$

როცა r , თანაზომადია d , ინდუქციურობა თანახმად [1] გამოითვლება [2.1], სადაც გამოიყენება ფორმის კოეფიციენტი $k_{3,k}$, რომელიც დამოკიდებულია $r_* = \frac{r}{d}$. მაქსიმალური ინდუქციურობა მიიღწევა როცა $r_* = 0,19$ და პრაქტიკულად ემთხვევა ბრუკსას კოჭას ინდუქციურობას სადენის ერთნაირი მოცულობის დროს. ასეთი კოჭას ღირსებას წარმოადგენს ინდუქციის ერთგვაროვანი და შესაბამისად კვეთის მიხედვით მექანიკური ძალვის განაწილება, თუმცა მისი დამზადების ტექნოლოგია გაცილებით რთულია, ვიდრე კოჭა მართკუთხა კვეთით.

ზოგად შემთხვევაში რგოლისებრი კოჭას ინდუქციურობის ანგარიშის დროს ნებისმიერი ფორმის კვეთის მცირე ზომებით, შეიძლება გამოვიდეთ ანალიზური ფორმულებიდან [1].

$$L = 0,5\mu_0\omega^2 d \left(\ell_n \frac{4d}{g} - 2 \right), \quad (2.50)$$

სადაც გ-საშუალო გეომეტრიული მანძილი კვეთის ფართის თავისთავისგან.

ზოგიერთი იმ-ისათვის, ტრანსფორმატორული ტიპის, მიზანშეწონილია გამოყენებული იქნეს კოჭა რგოლისებრი კვეთით, რომელშიც ხვები სხვადასხვა დიამეტრით განლაგებულია ტოროიდულ ზედაპირზე d საშუალო დიამეტრით და კვეთის r რადიუსით, რომელიც მოიცავს მთავარ ღერძს (ნახ.2.4.)

ასეთი კოჭას ეწოდება ტორი φ - ტიპის [9] ან ტორი გარე ველით [10]. φ ტიპის ტორში მაგნიტური ველი შიდა ტოროიდული ზოლში პრაქტიკულად გამორიცხულია განსხვავებით ჩვეულებრივი Q ტიპის ტოროიდული კოჭასაგან, სადაც ველი თავმოყრილია შიდა ზოლში. [2,10] თანახმად ინდუქციურობა φ ტიპის ტორისა

$$L_\varphi = 0,5\mu_0\omega_\varphi^2 d \left[(1 + r_*^2)\ell_n \frac{4}{r_*} - 2 \right], \quad (2.51)$$

$$\text{სადაც } r_* = r/d$$

თუ ჩავთვლით, რომ კოჭა ეკვივალენტურია დენური ფენის სისქით δ_φ შევსების კოეფიციენტით $k_{3\varphi}$ (ნახ.2.4, ა), მაშინ წინა ფორმულების მსგავსად შეიძლება მივიღოთ.

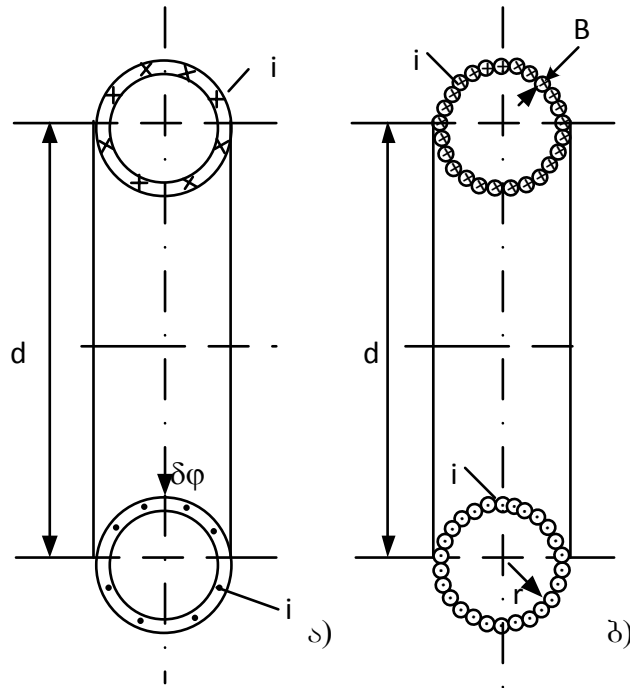
$$W_\varphi = \pi^2 \mu_0 (J_\varphi k_{3\varphi} r_*^2 \delta_{*\varphi})^2 d^5 \left[(1 + r_*^2)\ell_n \frac{4}{r_*} - 2 \right]; \quad (2.52)$$

$$W_{\gamma d \varphi} = \frac{\mu_0}{2\gamma} k_{3\varphi} (J_\varphi r_* d)^2 \left[(1 + r_*^2)\ell_n \frac{4}{r_*} - 2 \right]; \quad (2.53)$$

$$\tau_\varphi = \frac{\mu_0}{\rho} \delta_{*\varphi} k_{3\varphi} (r_* d)^2 \left[(1 + r_*^2)\ell_n \frac{4}{r_*} - 2 \right], \quad (2.54)$$

$$\text{სადაც } \delta_{*\varphi} = \delta_\varphi / r$$

ფარდობა φ -ტორის ენერჯის დენური ფენით δ_φ ბრუკსას კოჭას ენერჯიასთან სადენის ერთი და იგივე ხარჯით, განისაზღვრება შემდეგი სახით.



ნახ. 2.4. რგოლისებრი კოჭა-ტორი φ ტიპის დენური ფენის სახით ა) და დახვეული წრიული სადენით (ბ)

მორიგი ფორმულებიდან φ -ტორის სადენების მოცულობისათვის გვექნება

$$Q_\varphi = \pi d(2\pi r)\delta_\varphi k_{3\varphi} = 2\pi^2 k_{3\varphi} \delta_{*\varphi} r_*^2 d^3$$

d დიამეტრი გამოისახება Q_φ -ით და შედეგი ჩაისმება (2.52)-ში.

მიღებული გამოსახულება W_φ -სათვის იყოფა (2.11)-ზე, რომ $Q_\varphi = Q_\sigma$ გათვალისწინებით მივიყვანოთ ფორმულასთან

$$\frac{W_\varphi}{W_B} = 2,84 \left[(1 + r_*^2) \ell_n \frac{4}{r_*} - 2 \right] \left(\frac{J_\varphi}{J_B} \right)^2 \left(\frac{k_{3\varphi}}{k_{3B}} \right)^{1/3} r_*^{2/3} \delta_{*\varphi}^{1/3}. \quad (2.55)$$

თუ, მაგალითად, $r_* = 0,1$; $\delta_{*\varphi} = 0,2$, მაშინ ერთნაირი J და $k_{3\varphi}$ -ის დროს გვექნება $W_\varphi/W_E = 0,616$.

ინტერესს წარმოადგენს აგრეთვე φ -ტორი, დახვეული ერთ ფენად b დიამეტრის წრიული კვეთის სადენით, რომელსაც ერთმანეთთან მომიჯნავე ხვეების რიცხვი, ტოლია $\omega = 2\pi r/b$ (ნახ.2.4, ბ). ასეთი ტორი შეიძლება დამზადდეს, მაგალითად კოაქსიალური კაბელისგან, რომელიც იძლევა საშუალებას დამზადდეს ტრანსფორმატორული იმ, გრაგნილების კავშირის მაღალი კოეფიციენტით. იმის გათვალისწინებით, რომ

$$i = J \frac{\pi b^2}{4} k'_{3\varphi} = \pi^3 r^2 J_\varphi k'_{3\varphi} / \omega^2$$

სადაც $k'_{3\varphi}$ ითვალისწინებს სადენის კვეთის აქტიურ ნაწილს (მაგალითად მილისებრი სადენის გამოყენების დროს), იოლად მივიღებთ φ -ტორას ტიპისათვის გამოსახულებას

$$W'_\varphi = 0,5L_\varphi i^2 = 0,25\mu_0\pi^6 r_*^4 J_\varphi^2 d^5 \left[(1+r_*^2)\ell_n \frac{4}{r_*} - 2 \right] / \omega^2 \quad (2.56)$$

მოცულობა φ -ტორასათვის სადენის წრიული კვეთით ტოლია

$$Q'_\varphi = \pi^4 k_{3\varphi} r_*^2 d^3 / \omega. \quad (2.57)$$

(2.56), (2.57) და (2.11) გათვალისწინებით ვიპოვიოთ ენერჯის ფარდობას

$$\frac{W'_\varphi}{W_E} = 4,84 \left[(1+r_*^2)\ell_n \frac{4}{r_*} - 2 \right] \left(\frac{k'_{3\varphi}}{k_{3E}} \right)^{1/3} \left(\frac{J'_\varphi}{J_E} \right)^2 \frac{r_*^{2/3}}{\omega^{1/3}} \quad (2.58)$$

როცა $W = 100, r_* = 0,1, k'_{3\varphi} = k_{3\sigma}$ და $J'_\varphi = J_\sigma$ გვექნება $W'_\varphi/W_\sigma = 0,387$. როცა $W = 16$ და იგივე პირობებში $W'_\varphi/W_E = 0,713$. აგრეთვე უნდა იქნეს გათვალისწინებული, რომ წრიული კვეთის მასიური სადენისათვის $k'_{3\varphi}$ ახლოსაა ერთთან, ხოლო $k_{3E} \leq 0,6$. ამიტომ, მაგალითად მეორე შემთხვევისთვის მასიური სადენის დროს ($\omega = 16, k'_{3\varphi} = 1, k'_{3E} = 0,6$) მივიღებთ $W'_\varphi/W_E = 0,845$. გარდა ამისა,

გაცივების საუკეთესო პირობების ხარჯზე შეიძლება $I'_\phi > J_E$ (კვების წყაროს სიმძლავრის შესაბამისი გაზრდის შემთხვევაში).

ამგვარად, ენერგეტიკული მაჩვენებლები იმ-ის φ - ტორას ტიპის საფუძველზე შეიძლება მიუახლოვდეს ბრუკსას კოჭას მაჩვენებლებთან მასალის ერთი და იგივე ხარჯის დროს. ანალოგიური დასკვნა მიღებულია [10]-ში.

2.3. ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი თხელი სოლენოიდის სახით

კოჭას $h \ll \ell, h \ll d$ (თხელი სოლენოიდი) გააჩნია დიდი ზედაპირი, უზრუნველყოფს სადენის გაცივების კარგ პირობებს და შეიძლება ეფექტურად გამოყენებული იქნეს, მაგალითად კრიოგენული სადენიან იმ-ში, აგრეთვე ტრანსფორმატორული ტიპის იმ-ში, როცა მოეთხოვება გრანულიების კავშირის კოეფიციენტების მაღალი მნიშვნელობა.

ინდუქციურობა თხელი სოლენოიდის [1]

$$L_c = 0,25\pi\mu_0 k_{\phi 4} \omega_c^2 (d/\ell_*) \quad (2.59)$$

$k_{\phi 4}$ მნიშვნელობა, დამოკიდებულია $\ell_* = \ell/d$ -ზე, მოყვანილია [1]-ში.

განვიხილოთ ორი ტიპი ერთფენიანი სოლენოიდის: დახვეული მართკუთხა სალტისაგან h სიმაღლით, Δ სიგანით, P ბიჯით (ნახ.2.5, ა) და წრიული კვეთის სადენისაგან b დიამეტრით (ნახ.2.5, ბ).

ნახ.2.5, ა შემთხვევისათვის

$$W_\alpha = \pi\mu_0 k_{\phi 4} \ell_* (J_\alpha h_* k_{3\alpha})^2 d^5/8; \quad (2.60)$$

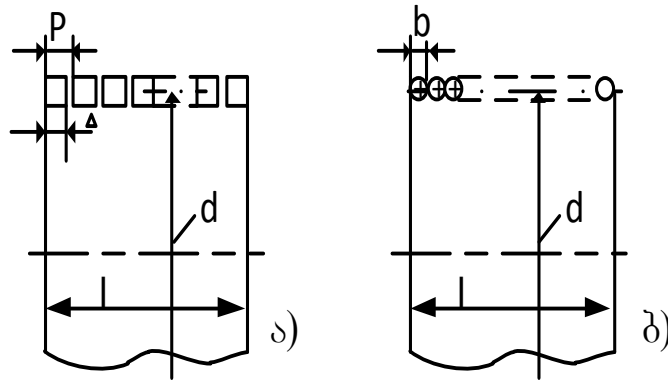
$$W_{\gamma, \alpha} = \mu_0 k_{\phi 4} k_{3\alpha} h_* (J_\alpha d)^2/8\gamma; \quad (2.61)$$

ნახ.2.5, ბ შემთხვევისათვის

$$W_E = \pi^3 \mu_0 k_{\phi 4} \ell_* (J_E k_{3E} b_*)^2 d^5/128; \quad (2.62)$$

$$W_{y_{\text{გე}}} = \pi k_{\phi 4} k_{3\text{B}} b_* (J_{\text{E}} d)^2 / (32\gamma); \quad (2.63)$$

სადაც $h_* = h/d$, $b_* = b/d$, $k_{3\alpha} = \Delta/P$, ხოლო $k_{3\delta}$ ითვალისწინებს სადენის აქტიური მოცულობის ნაწილს ფართის წრიულ კვეთთან $\pi b^2/4$ (კერძოდ, გარე იზოლაცია, ღრუ სადენის გამოყენება და ა.შ.) (2.60) – (2.63) განტოლებების მიღების დროს გათვალისწინებული იქნა, რომ $w_{\alpha} = \ell k_{3\alpha} / \Delta$ და $W_{\delta} = \ell / b$.



ნახ.2.5. კოჭა მართკუთხა სალტისაგან თხელი სოლენოიდის სახით (ა) და წრიული სადენით (ბ)

ვიპოვოთ დროის მუდმივები სოლენოიდების. ნახ. 2.5, ა შემთხვევისთვის აქტიური წინაღობა $R_{\alpha} = \rho \pi d w^2 / (\ell h k_{3\alpha})$ და $M_{\alpha} = \gamma \pi k_{3\alpha} d \ell h$ გათვალისწინებით მივიღებთ

$$\tau_{\alpha} = \frac{\mu_0}{4\rho} k_{\phi 4} k_{3\alpha} d h = \frac{\mu_0}{4\pi\rho} \left(\frac{k_{\phi 4}}{\ell} \right) \left(\frac{M_{\alpha}}{\gamma} \right) \quad (2.64)$$

ნახ.2.5, ბ შემთხვევისთვის, როცა $b = \ell / W$, გვექნება

$$R_{\delta} = 4\rho d w^3 / (k_{3\delta} \ell)^2, \quad M_{\delta} = \pi^2 \gamma \ell^2 k_{3\delta} d / (4w)$$

და შესაბამისად

$$\tau_{\delta} = \frac{\mu_0}{16\rho w} \pi k_{\phi 4} k_{3\delta} d \ell = \frac{\mu_0}{4\pi\rho} \left(\frac{k_{\phi 4}}{\ell} \right) \left(\frac{M_{\delta}}{\gamma} \right) \quad (2.65)$$

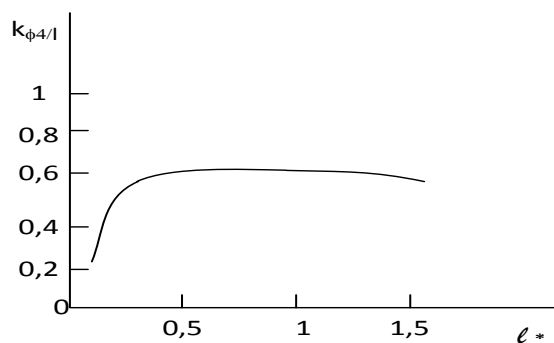
ამგვარად τ -ს მნიშვნელობა ორივე ტიპის სოლენოიდებისთვის გამოისახება მასის საშუალებით ერთნაირად.

თუ გაგვაჩნია განსაზღვრება სადენის რაოდენობაზე (M მასით) და მოცემული კვეთით, მაშინ მისგან, ბუნებრივია, შეიძლება დახვეული იქნეს სოლენოიდი ნებისმიერი მნიშვნელობებით $\ell_* = \ell/d$.

დიდ ინტერესს წარმოადგენს სოლენოიდი მაქსიმალური დროის მუდმივათი τ , რომელიც უზრუნველყოფს, როგორც ნაჩვენები იყო ადრე, დაგროვილი ენერგიის მაქსიმუმს მოცემული მასალის ხარჯვის დროს. ბუნებრივია, რომ ამ შემთხვევაში (2.64) ან (2.65) თანახმად უნდა იყოს ფარდობა $(k_{\phi 4}/\ell)$ მაქსიმუმი. ამიტომ სოლენოიდის ოპტიმალურ ფორმას ვპოულობთ შემდეგი სახით.

M_α და M_β გამოსახულებებიდან $\omega_\beta = \ell/b$ გათვალისწინებით ჩანს, რომ h ან b ფიქსირებული მნიშვნელობების დროს გვაქვს $M \sim \ell d = const.$ რადგანაც მუდმივი სიდიდეები როლს არ თამაშობენ, მივიღოთ პირობითად $\ell d = 1$. შემდეგ ვცვლით d -ს ერთეულის პირობებში (მაგალითად, 0,1 დან 10-მდე) ვაფიქსირებთ $\ell = 1/d$, თითოეული შერწყმისათვის d და ℓ -ის განსაზღვრავთ ფარდობითი სიგრძეს $\ell_* = \ell/d$ და კოეფიციენტს $k_{\phi 4}(\ell_*)$ [1], შემდეგ ვაგებთ დამოკიდებულებას $k_{\phi 4}/\ell = f(\ell_*)$ (ნახ.2.6)

როცა $\ell_* \approx 0,406$ და $k_{\phi 4} = 0,48$ აგებული მრუდს გააჩნია მაქსიმუმი. ე.ი. სოლენოიდი $\ell_* \approx 0,406$ წარმოადგენს ოპტიმალურს დაგროვილი მაგნიტური ენერგიის მიხედვით.



ნახ. 2.6. $k_{\phi 4}/\ell = f(\ell_*)$ დამოკიდებულების მრუდი სოლენოიდის ოპტიმალური ფორმის განსაზღვრისათვის

როგორც 2.6 ნახაზიდან ჩანს მრუდის მაქსიმუმი მეტად დაქანებულია და $0,25 \leq \ell_* \leq 0,6$ დიაპაზონში $k_{\phi 4} / \ell$ მნიშვნელობა (შესაბამისად, τ) განსხვავდება რამოდენიმე პროცენტით. დადგენილი დიაპაზონი ℓ_* -ისათვის, შეიძლება განვიხილოთ, როგორც მეტად რაციონალური სოლენოიდების დამზადების დროს მოცემული სადენების რაოდენობიდან. ნახ. 2.6 მრუდში მაქსიმუმის არსებობა დაკავშირებულია იმასთან, რომ ℓ -ის ცვლილება, როცა $\ell d = const$ მიყვავართ $\ell_* = \ell/d$ -ის კვადრატულ ცვლილებასთან და შესაბამისად $k_{\phi 4}(\ell_*)$ უეცარი ცვლილებასთან [1] იმავე მხარეს, რაც ℓ . მნიშვნელობები $L, W, W_{\gamma d}$ ოპტიმალური სოლენოიდებისათვის გამოითვლებიან (2.59)-(2.63)-ის მიხედვით როცა $\ell_* = 0,406$ და $k_{\phi 4} = 0,48$ ან ახლოს ამ პარამეტრებთან.

ანალოგიური მიდგომა მიეკუთვნება სოლენოიდებს ხვეების რამოდენიმე ფენებით, თუ მათი რიცხვი დაფიქსირებულია ℓ_* -ის ოპტიმალური მნიშვნელობის პოვნის დროს. არსებითად ეს ნიშნავს, რომ უნდა დაფიქსირდეს ხვეების რიცხვი სოლენოიდის ღერძული სიგრძის ერთეულზე. ასეთი პირობა უზრუნველყოფს მოცემული სადენების რაოდენობის დროს $\ell d = const$ შესრულებას.

ვიყენებთ რა კავშირს d და Q შორის, მივიღებთ (2.60) და (2.11)-დან, გათვალისწინებით $\ell_* = 0,406, k_{\phi 4} = 0,48$

$$W_{\text{აოპტი}} / W_{\text{B}} = 2,12 (k_{3\text{B}} / k_{3\sigma})^{1/3} (J_{\alpha} / J_{\text{B}})^2 h_*^{1/3} \quad (2.66)$$

ანალოგიურად შემთხვევისათვის ნახ. 2.5, ბ:

$$W_{\text{ბოპტი}} / W_{\text{B}} = 1,445 (k_{3\text{b}} / k_{3\text{b}})^{1/3} (J_{\text{b}} / J_{\text{B}})^2 (1/\lambda)^{1/3} \quad (2.67)$$

დაუშვათ, მაგალითად, მოცემულ მოცულობაში მართკუთხა კვეთის სადენებისგან დავამზადებთ ერთფენიანი ოპტიმალური სოლენოიდი (ნახ.2.5, ა ტიპის), ან ბრუკსას კოჭა. მაშინ როცა $J_{\alpha} = J_{\text{B}}, k_{3\alpha} = k_{3\text{B}}$ და $h_* = 0,01 \div 0,05$ გვექნება $W_{\alpha} / W_{\text{B}} = 0,46 \div 0,78$. ანალოგიური ალტერნატივა წრიული კვეთის სადენისათვის, როცა $\lambda = 100$

შესაბამება $W_\delta/W_\sigma = 0,31$. რეალურ კონსტრუქციაში $k_{3\delta} \approx 1$, $k_{3E} \approx 0,4 \div 0,5$ და როცა $W = 100$ გვაქვს $W_\delta/W_E \approx 0,4$. J_α და J_δ მნიშვნელობამ შეიძლება მნიშვნელოვნად გადააჭარბოს J_E მნიშვნელობას გაცივების უკეთეს პირობებში, რაც დამატებით მოგვიწოდებს ავამაღლოთ $W_{\alpha,\delta}/W_E$. მეორე მხრივ სადენის მოცემული კვეთისა და სიგრძის დროს J -ს გაზრდა იწვევს დანაკარგების გაზრდას და მოითხოვს უფრო მძლავრ კვების წყაროს. შევნიშნავთ აგრეთვე, რომ სოლენოიდების და ბრუკსის კოჭას დროის მუდმივას ფარდობა მოცემული სადენების ერთი და იგივე ხარჯის დროს, ტოლია დაგროვილი ენერჯის ფარდობისა.

$$\tau_\alpha/\tau_E = 2,12(k_{3\alpha}/k_{3E})^{1/3}h_*^{1/3}; \quad (2.68)$$

$$\tau_\delta/\tau_E = 1,445(k_{3\delta}/k_{3E})^{1/3}(1/\mu^{1/3}); \quad (2.69)$$

იმ-ის ზომების შეზღუდვის დროს ინტერესს წარმოადგენს ოპტიმალური სოლენოიდის გაზარიტული ზომების შედარება ბრუკსის კოჭასთან ერთი და იგივე დაგროვილი ენერჯის დროს. (2.60) და (2.9)-გათვალისწინებით.

$$\frac{d_\alpha}{d_E} = \sqrt[5]{\frac{0,0545}{h_*^2} \left(\frac{k_{3E}J_E}{k_{3\alpha}J_\alpha} \right)^2}; \quad (2.70)$$

რადგანაც გარე დიამეტრი $d_{\alpha H} = d_\alpha(1 + h_*)$, $d_{EH} = 1,333d_E$,

$$\frac{d_{\alpha H}}{d_{EH}} = 0,75(1 + h_*) \sqrt[5]{\frac{0,0545}{h_*^2} \left(\frac{k_{3E}J_E}{k_{3\alpha}J_\alpha} \right)^2} \quad (2.71)$$

შესაბამისად $d_\alpha = 2,46\ell_\alpha$, $d_E = 3\ell_E$ გათვალისწინებით გვექნება.

$$\frac{\ell_\alpha}{\ell_E} = 1,22 \sqrt[5]{\frac{0,0545}{h_*^2} \left(\frac{k_{3E}J_E}{k_{3\alpha}J_\alpha} \right)^2} \quad (2.72)$$

თუ მაგალითად, $h_* = 0,05$, $k_{3E} = k_{3\alpha}$, $J_E = J_\alpha$,

მაშინ $d_{\alpha H}/d_{EH} = 1,459$, $\ell_\alpha/\ell_E = 2,26$.

მექანიკური ძალვა თხელ სოლენოიდში მოხერხებულია ვიპოვოთ, მაგნიტური წნევის P_M ცნების გამოყენებით. მისი მაქსიმალური მნიშვნელობა მიიღწევა ჩვეულებრივ შიდა რადიუსზე მედიანის სიბრტყეში და განისაზღვრება (2.35). სრული რადიალური ძალვა კონტურისათვის ერთეულ ღერძულ სიგრძეზე

$$F_r = P_M 2\pi r = 0,5\mu_0(i')^2 2\pi r, \quad \text{და} \quad (1.36) \quad \text{თანახმად} \quad \text{და}$$

$S = k_{3,c} h, \quad i' = J h k_{3,c}$ გათვალისწინებით გვექნება

$$\sigma_{tcp} = 0,25\mu_0 k_{3,c} h_x (Jd)^2 \quad (2.73)$$

როგორც რგოლისებრი კოჭასათვის, $\sigma_{tcp} \sim (Jd)^2$, ე.ი. მექანიკური ძალვა მით მაღალია, რაც მძლავრია კოჭა. (2.73) გამოსახულების მიღების დროს დაშვებულია, რომ სოლენოიდის ხვიები მექანიკურად არ ურთიერთმოქმედებენ, ხოლო მექანიკური ძალვა σ_t გამოწვეულია სადენებით. გამოსახულებას $(Jd)^2$ (2.73)-დან σ_{tcp} საშუალებით ჩავსვამთ (2.61), მივიღებთ მარტივ ფორმულას სოლენოიდის ხვედრითი ენერჯის შეფასებისათვის

$$W_{yda} = 0,5 k_{\phi 4} \sigma_{tcp} / \gamma$$

თუ, მაგალითად, მივიღებთ $\sigma_{tcp} = 10^8$ პა (სპილენძი), მაშინ ოპტიმალური სოლენოიდისთვის ($k_{\phi 4} = 0,48$) $W_{yda} \approx 2,6 \cdot 10^3$ ჯ/კგ (სადენის ერთეულ მასაზე ენერჯია). ზღვრულ შემთხვევაში უსასრულოდ გრძელი სოლენოიდისთვის გვექნება $k_{\phi 4} = 1$ და $W_{yda} = 0,5(\sigma_{tcp} / \gamma)$ (სპილენძის სადენისათვის $W_{yda} \approx 5,6 \cdot 10^3$ ჯ/კგ).

თუ მექანიკური ძალვა ლოკალურად გადანაწილდება გრაგნილებიდან მტკიცე ელემენტებზე (მაგალითად ჩაშენებული არტახზე) W_{yda} -ს მნიშვნელობა შეიძლება გაიზარდოს.

2.4. ზეგამტარული სფერული ინდუქციური მაგროვებელი

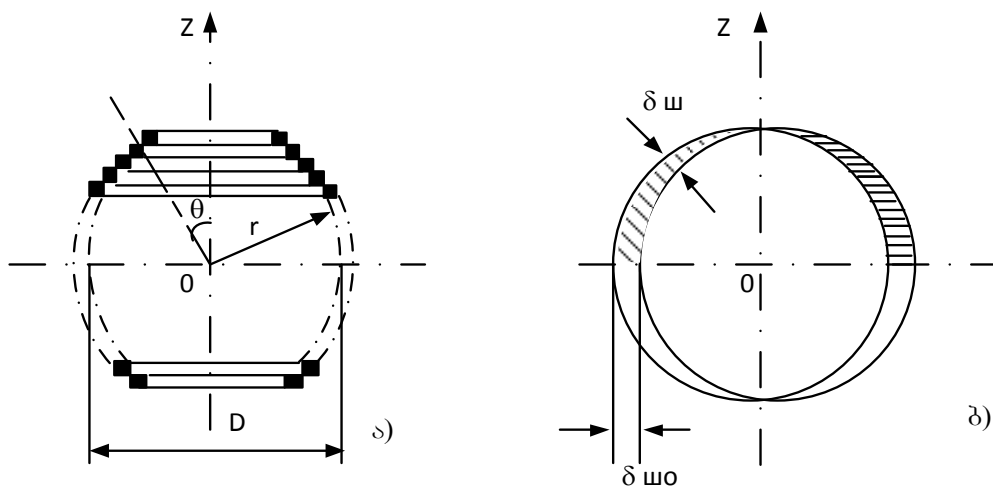
სფერულ იმ-ში ხვები მოიცავს საერთო ღერძს და განლაგებულია სფეროს ზედაპირზე (ნახ.2.7, ა). ხვების დიამეტრი მცირდება სფეროს პოლუსთან მიახლოებისას. ჩვეულებრივ ხვები (ელემენტარული კოჭები) სხვადასხვა დიამეტრი განლაგებულია ერთი მეორეზე Z ღერძის გასწვრივ და გააჩნია მუდმივი კვეთი, რომლის ცენტრი იმყოფება სფეროზე. თუ კოჭაში გვაქვს $w_{\text{მ}}$ ხვია, მაშინ ღერძის გასწვრივ სიგრძის ერთეულზე, ბუნებრივია მოვა $w_{\text{მ}0} = w_{\text{მ}}/D$ ხვები, სადაც D სფეროს საშუალო დიამეტრია.

შემოვიღოთ ცნება, სფეროზე ხვების ზედაპირული სიმკვრივე, ე.ი. $w'_{\text{მ}}$ ხვების რიცხვი, მოსული πD წრის ერთეულ სიგრძეზე. ბუნებრივია, რომ $w'_{\text{მ}}$ მნიშვნელობა მაქსიმალურია ეკვატორზე ($z = 0$) და მცირდება პოლუსებთან ($z = \pm 0,5D$). შეიძლება მივიღოთ

$$w'_{\text{მ}} = w_0 \theta \quad (2.74)$$

ასეთი სფერული იმ-ის ინდუქციურობა [1]

$$L_{\text{მ}} = \frac{\pi}{9} \mu_0 w_{\text{მ}}^2 D \quad (2.75)$$



ნახ. 2.7. სფერული იმ(ა) და მისი მოდელი არაერთგვაროვანი დენური ფენებით δ (ბ)

თუ შევცვლით ხვეებს ეკვივალენტური დენური ფენებით სფეროზე სისქით $\delta_{\text{მ}}$ მუდმივი $J_{\text{მ}}$ დენის სიმკვრივის მნიშვნელობებით (ტოლია რეალური დენის სიმკვრივის სადენში) და $k_{3,\text{მ}}$ შევსების კოეფიციენტით, მაშინ ბუნებრივია, რომ

$$\delta_{\text{მო}} = \delta_{\text{მო}} \sin\theta, \quad (2.76)$$

სადაც $\delta_{\text{მო}}$ -ეკვატორზე ფენის მაქსიმალური სისქე.

სფერული კოჭა ასეთი დენური ფენებით ნაჩვენებია ნახ.2.7, ბ. დენი სადენში $S_{\text{მ}}$ კვეთით.

$$i = J_{\text{მ}} S_{\text{მ}} = J_{\text{მ}} k_{3,\text{მ}} \delta_{\text{მო}} / \omega_{\text{მო}} \quad (2.77)$$

იმ-ის ენერგია (2.75), (2.77) და $\omega_{\text{მო}} = \omega_{\text{მო}} D$ გათვალისწინებით ტოლია:

$$W_{\text{მ}} = 0,5 L_{\text{მ}} i^2 = \frac{\pi}{18} \mu_0 (k_{3,\text{მ}} J_{\text{მ}} \delta_{\text{მო}})^2 D^5, \quad (2.78)$$

სადაც $\delta_{*o} = \delta_{\text{მო}} / D$.

კოჭას ელემენტარული აქტიური მოცულობა განისაზღვრება, როგორც კვეთის $k_{3,\text{მ}} \delta_{\text{მო}} \sin\theta r d\theta$ ნამრავლი ხვიას სიგრძეზე $\pi D \sin\theta$. თუ გავაინტეგრირებთ მოცულობას θ -თი და გადავალთ იმ-ის აქტიურ წონაზე მივიღებთ

$$M_{\text{მ}} = \gamma \pi^2 k_{3,\text{მ}} \delta_{*o} D^3 / 4 \quad (2.79)$$

ხვედრითი ენერგია

$$W_{y,\text{მ}} = W_{\text{მ}} / M_{\text{მ}} = 2 \mu_0 k_{3,\text{მ}} (J_{\text{მ}} D)^2 \delta_{*o} / (9 \pi \gamma) \quad (2.80)$$

ვინაიდან სადენის ელემენტარული სიგრძე $d\ell = (\omega_{\text{მო}} \sin\theta) \times (r d\theta) (2 \pi r \sin\theta)$, ხოლო მისი კვეთი $S_{\text{მ}} = k_{3,\text{მ}} \delta_{\text{მო}} / \omega_{\text{მო}}$, მაშინ აქტიური წინაღობა იმ-ის ინტეგრირების შემდეგ ℓ -ით

$$R_{\text{მ}} = \rho (\pi D \omega_{\text{მო}})^2 / (4 \delta_{\text{მო}} k_{3,\text{მ}}), \quad (2.81)$$

ხოლო დროის მუდმივა (2.75) და (2.81)-ის გათვალისწინებით

$$\tau_{\text{მ}} = L_{\text{მ}} / R_{\text{მ}} = 4 \mu_0 k_{3,\text{მ}} \delta_{*o} D^2 / (9 \pi \rho) \quad (2.82)$$

გამოვსახოთ $W_{\text{III}}, M_{\text{III}}$ -ით (2.78) და (2.79)-ის საფუძველზე და (2.11), გავითვალისწინოთ, მივიღებთ ენერგიის ფარდობას სფერული კოჭასა და ბრუკსას ხვიას, აქტიური მასალის ერთი და იგივე ხარჯვის დროს:

$$W_{\text{III}}/W_{\text{E}} \approx 1,61\delta_{*o}^{1/3}(J_{\text{III}}/J_{\text{E}})^2(k_{3,\text{III}}/k_{3\text{E}})^{1/3} \quad (2.83)$$

თუ, მაგალითად, $J_{\text{III}} = J_{\text{E}}$, $k_{3,\text{III}} = k_{3\text{E}}$, $\delta_{*o} = 0,1$, მაშინ $W_{\text{III}}/W_{\text{E}} = 0,747$ რადგანაც სფერული კოჭას გაცივება იოლია, ვიდრე ბრუკსას კოჭას, შეიძლება დაუშვათ $J_{\text{III}} > J_{\text{E}}$ და $W_{\text{III}}/W_{\text{E}}$ უახლოვდება ერთს (კვების წყაროს სიმძლავრის შესაბამისი გაზრდით).

გარე დიამეტრების ფარდობა სფერული იმ-ის და ბრუკსას კოჭას, ერთი და იგივე ენერგიით (2.78) და (2.9):

$$\frac{D_{\text{III}}}{d_{\text{EII}}} = \sqrt[5]{2,39 \cdot 10^{-2} \left(\frac{k_{3\text{E}}J_{\text{E}}}{k_{3,\text{III}}J_{\text{III}}\delta_{*o}} \right)^2 \left(\frac{1+\delta_{*o}}{1,333} \right)} \quad (2.84)$$

როცა $J_{\text{III}} = J_{\text{E}}$, $k_{3,\text{III}} = k_{3\text{E}}$, და $\delta_{*o} = 0,1$ გვექნება $D_{\text{III}}/d_{\text{EII}} = 0,98$.

ამგვარად, წონაგაბარიტული და ენერგეტიკული მაჩვენებლებით სფერული კოჭა ახლოსაა ბრუკსას კოჭასთან და შესამჩნევად აჭარბებს ტოროიდულს. ბრუკსას კოჭასთან შედარებით სფერულ იმ-ს გააჩნია ნაკლები გარე ველი (პოლუსების ზონაში ველის ფოკუსირების ხარჯზე) და უკეთესი პირობა გაცივების დიდი ზედაპირის წყალობით. ტოროიდული კოჭასთან შედარებით სფერულ იმ-ში იქმნება უფრო სიმეტრიული ელექტროდინამიური ძალვა, მომქმედი ხვიაზე [11].

სფერული იმ-ის მთავარი უარყოფითი მხარეა მისი რთული ტექნოლოგიური დამზადება.

2.5. დიპოლური ტიპის ზეგამტარული კოჭას ეკრანირება

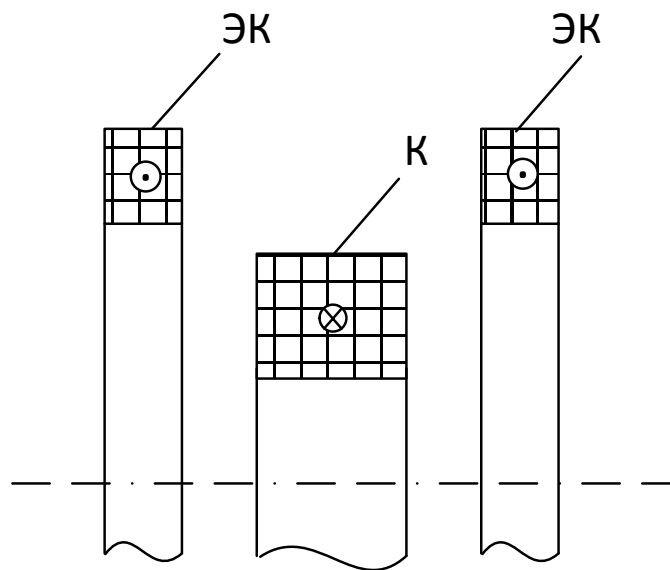
ყველა განხილული იმ-ების მთავარ ნაკლოვანებას წარმოადგენს არსებობა მნიშვნელოვანი მაგნიტური ველების გარე სივრცეში,

რომლებმაც შეიძლება იქონიოს მავნე ზეგავლენა სხვადასხვა ელემენტებზე იმ-ის ახლოს, შექმნას ელექტრომაგნიტური დაბრკოლება არასტაციონალურ რეჟიმებში, გამოიწვიოს დამატებითი ენერჯის დანაკარგები და ა.შ. წრფივი იმ-ის თითოეული კოჭა ეკვივალენტურია მაგნიტური დიპოლის, რომლის ინდუქცია R მანძილზე აჭარბებს კოჭას ზომებს, კლებულობს R^{-3} -ის პროპორციულად და კოჭას შიგნით ძლიერი ველის დროს, შეიძლება შესამჩნევი იქნეს R -ის დიდი მნიშვნელობის დროს.

აღნიშნული ეფექტის საწინააღმდეგოდ გამოიყენება კოჭას ეკრანირება.

შესაძლებელია ეკრანის შესრულება, მაგალითად ფერომაგნიტური ცილინდრის სახით, რომელიც მოიცავს კოჭას [12]. მეორე მხრივ იმ-ისთვის, როცა სწრაფად იცვლება მუშა დენები, ფერომაგნიტური ეკრანი ნაკლებად გამოსადეგია, ვინაიდან მასში აღიძვრება გრიგალური დენები და წარმოშობს მავნე მოვლენებს. უფრო უნივერსალური და ეფექტურია ელექტრომაგნიტური (აქტიური) ეკრანი უკუდენებით. მარტივ ეკრანს წარმოადგენს მაეკრანირებელი კოჭას (ЭК) წყვილი, განლაგებული სიმეტრიულად ძირითადი K კოჭას მიმართ მედიანის სიბრტყეში, როგორც ნაჩვენებია ნახ. 2.8 ეკრანირებული იმ-ის ანგარიში შეიძლება ჩატარდეს [13] საფუძველზე.

ყველა სამი კოჭას მაგნიტური ველის ვექტორული პოტენციალი განლაგდება მწკრივში R -ის ხარისხის მიხედვით, შემდეგ განულდება პირველი მეტად არსებითი წევრი მწკრივის, საიდანაც მიიღება მაეკრანირებელი კოჭას პარამეტრიც. ეკრანირებული იმ-ის დროს მუდმივას ოპტიმიზაციის გზით პოულობენ კოჭას ზომებს და მასას. [13]-ში ნაჩვენებია, რომ მასა ეკრანირებული იმ-ის, გარე ველის შესუსტების დროს 10-30 ჯერ, იზრდება 3-5 ჯერ არაეკრანირებული იმ-ის მასასთან შედარებით. თუ გამოიყენება ორი წყვილი მაეკრანირებელი კოჭები, იმ-ის მასის გაზრდის ჯერადობა შეადგენს 1,5-2.

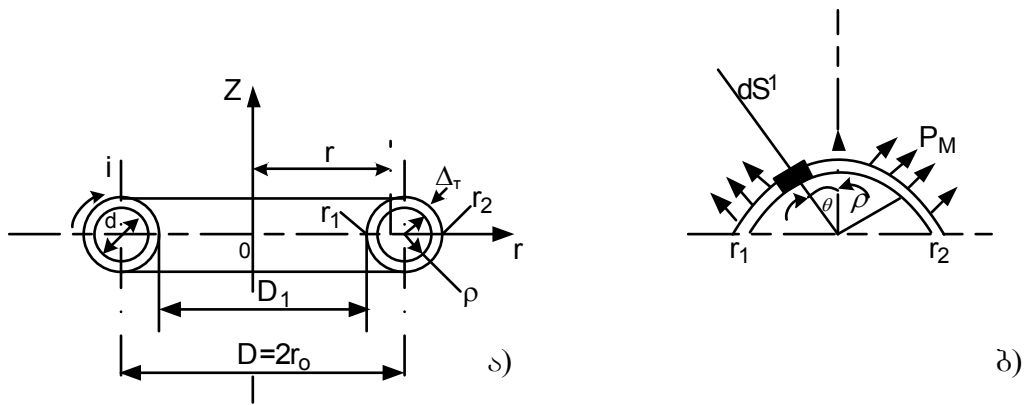


ნახ. 2.8. ცილინდრული კოჭა ელექტრომაგნიტური ეკრანით ორი დამატებითი კოჭას სახის უკუდენით

სფერული იმ-ის ეკრანირებისათვის შეიძლება გამოყენებული იქნეს სფერული ეკრანი უკუდენით. ანალოგიური შემადგენლობის სფერული მაგნიტური სისტემის ანალიზი კოჭას სასრული სისტემის დროს ჩატარებულია [14].

2.6. ტოროიდული ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი

ტოროიდულ კოჭაში θ - ტიპის ხვები დენებით განლაგებულია ტოროიდულ ზედაპირზე და მოიცავს რგოლის ცენტრალურ ხაზს. ძირითადი ველის მაგნიტური ინდუქციის ხაზები იკვრება ტორის ღერძის ირგვლივ (ნახ. 2.9, ა).



ნახ.2.9. თხელი ტოროიდული კოჭა (ა) და მასში მაგნიტური წნევის ძალები (ბ)

იდეალური ტორისათვის ერთგვაროვანი დენური ფენებით ყველა მაგნიტური ველი თავმოყრილია ტოროიდული ზედაპირის შიგნით. რეალურ კონსტრუქციაში გვაქვს გარე მაგნიტური ველი, მაგრამ ისინი მიიღვეიან ბევრად სწრაფად, ვიდრე ზემოდ განხილულ დიპოლის ტიპის კოჭაში, რაც წარმოადგენს მთავარ უპირატესობას ტოროიდული იმ-ის.

განვიხილოთ თავიდან თხელი ტოროიდული კოჭა (მცირე სისქის დენური ფენა), რომელსაც გააჩნია რგოლური მერიდიანული კვეთი (ნახ.2.9, ა.) მისი ინდუქციურობა [7,10].

$$L_T = 0,5\mu_0 i^2 D \left(1 - \sqrt{1 - d_*^2}\right), \quad (2.85)$$

სადაც D -ტორის დიდი დიამეტრი; d -კვეთის დიამეტრი, $d_* = d/D$. დაუშვათ Δ_T -ტოროიდული კოჭას დახვევის სისქე, მიიღება მუდმივი, $k_{3,T}$ - კოჭას შევსების კოეფიციენტი D დიამეტრზე, i -დენი. მაშინ $i\omega = \pi D \Delta_T K_{3,T} J_T$ და დაგროვილი ენერგია

$$W_T = 0,5 L_T i^2 = 0,25 \mu_0 \pi^2 (k_{3,T} J_T \Delta_T d_*)^2 \left(1 - \sqrt{1 - d_*^2}\right) D^5, \quad (2.86)$$

სადაც $\Delta_{*T} = \Delta_T/d$ ($\Delta_{*T} \ll 1$).

ვინაიდან კოჭას აქტიური წონა

$$M_T = \gamma \pi^2 k_{3,T} \Delta_{*T} d_*^2 D^3, \quad (2.87)$$

მაშინ ხვედრითი ენერგია

$$W_{y_{3,T}} = W_T / M_T = \mu_o k_{3,T} \Delta_{*T} (J_T D)^2 (1 - \sqrt{1 - d_*^2}) / (4\gamma). \quad (2.88)$$

აქტიური წინაღობა

$$R_T = \rho d_* \omega^2 / (\Delta_T k_{3,T}),$$

და დროის მუდმივა

$$\tau_T = 0,5 \mu_o \Delta_{*T} k_{3,T} (1 - \sqrt{1 - d_*^2}) D^2 / \rho \quad (2.89)$$

(2.86), (2.87) და (2.11)-ის გათვალისწინებით მივიღებთ W_T -ს ფარდობას ბრუკსას კოჭას ენერგიასთან სადენის ერთი და იგივე მოცულობის დროს ($Q_T = M_T / \gamma = Q_B$)

$$W_T / W_B = 2,225 (k_{3,T} / k_{3B})^{1/3} (J_T / J_B)^2 (1 - \sqrt{1 - d_*^2}) \Delta_{*T}^{1/3} / d_*^{4/3}. \quad (2.90)$$

მაგალითად, როცა $k_{3,T} = k_{3B}$, $J_T = J_B$, $d_* = d / D = 0,3$ და $\Delta_{*T} = \Delta_T / d = 0,1$ გვექნება $W_T / W_B = 0,241$.

შევნიშნავთ, რომ ჩაწერილ ფორმულაში $k_{3,T}$ მნიშვნელობა აიღება D -ს საშუალო მნიშვნელობისთვის. თუ სადენის კვეთი მუდმივაა, მაშინ $k_{3,T}$ იზრდება ტორას ცენტრისაკენ, სადაც ხვები უახლოვდებიან, ე.ი. $k_{3,Tm} D_1 = k_{3,T} D = const$, სადაც D_1 -შიდა დიამეტრი. ამიტომ შეიძლება გადავიდეთ $k_{3,T}$ საშუალო მნიშვნელობიდან მაქსიმალურზე:

$$k_{3,Tm} = k_{3,T} / (1 - d_*) \quad (2.91)$$

კერძოდ, $k_{3,T}$ -ს შეცვლით $k_{3,Tm}$ -ით (2.90)-ში გამოჩნდება მამრავლი $(1 - d_*)^{1/3}$, რომელიც ამცირებს W_T / W_B .

ტორას დიდი ზედაპირის წყალობით შეიძლება დაუშვათ $J_T > J_B$, რაც ზრდის W_T / W_B . მეორე მხრივ, როგორც ზემოდ იყო აღნიშნული, საჭიროა უფრო მეტი სიმძლავრის კვების წყარო.

ელექტრომაგნიტური ძალის შეფასებისთვის ტოროიდულ კოჭაში ვითვალისწინებთ, რომ სრული დენის კანონის თანახმად აზიმუტის ინდუქცია ტორას შიგნით უკუპროპორციულია r დაშორების მთავარ ღერძამდე:

$$B(r) = \mu_0 i \omega / (2\pi r) \quad (2.91)$$

(2.91) ფორმულა, ბუნებრივია, სამართლიანია ღერძულსიმეტრიული ტორას ნებისმიერი კვეთის ფორმის დროს. ვინაიდან ტორას გარეთ ველი არ არის, შეიძლება ჩაითვალოს, რომ მის შიგნით მოქმედებს მაგნიტური წნევა

$$P_M = B^2(r) / 2\mu_0 = \mu_0 i^2 \omega^2 / 8\pi^2 r^2 \quad (2.92)$$

განვსაზღვროთ ძალა, რომელიც მოქმედებს Z ღერძის გასწვრივ და მისწრაფვის მოაცილოს ტორას ზედა ნახევარი S' ფართით ქვედასგან ($z = 0$ სიბრტყის მიმართ):

$$F_{ZT} = \int_{S'} P_M \cos\theta dS' \quad (2.93)$$

(2.92)-ის გათვალისწინებით და $r = r_1 + \rho(1 - \sin\theta)$, $dS' = 2\pi r \rho d\theta$ (ნახ.2.9, ა), (2.93)-ის ინტეგრირების შემდეგ მივიღებთ

$$F_{ZT} = \frac{\mu_0 (i\omega)^2}{4\pi} \ell_n \frac{1+d_*}{1-d_*} \quad (2.94)$$

გავყოთ F_{ZT} კოჭას ეკვატორული კვეთის აქტიურ ფართზე, მივიღებთ სადენში საშუალო მექანიკური ძალვის შეფასებას.

$i\omega = \pi D \Delta_T k_{3,T} J$ გათვალისწინებით გვაქვს

$$\sigma_{tcp} = \frac{F_{Zt}}{2\pi \Delta D k_{3,T}} = \frac{\mu_0}{8} k_{3,T} \Delta_{*T} d_* (J_T D)^2 \ell_n \frac{1+d_*}{1-d_*} \quad (2.95)$$

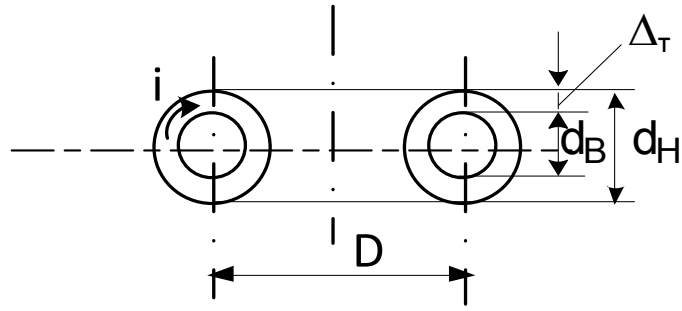
σ_{tcp} -ის მნიშვნელობა მით მეტია, რაც მძლავრია იმ და დიდია J . სრული რადიალური ძალა, რომელიც კუმშავს ტორს Z ღერძის გასწვრივ, შეიძლება იოლად ვიპოვოთ (1.35)-იდან:

$$F_{rT} = 0,5 i^2 \frac{dL_T}{dr_0} = 0,5 i^2 \omega^2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-d_*^2}} \right), \quad (2.96)$$

სადაც $r_0 = 0,5D$

F_{rT} ძალა უნდა გადაეცეს საყრდენი ელემენტებს.

სქელი ტოროიდული კოჭასათვის დახვევის სისქე $\Delta_T = 0,5(d_H - d_B)$ თანაზომადია გარე (d_H) და შიდა (d_B) დიამეტრების ტორას მერიდიანული კვეთის (ნახ.2.10)



ნახ. 2.10. სქელი ტოროიდული კოჭა

[15]-ის თანახმად ამ შემთხვევისთვის გვექნება, გამოვიყენოთ აღნიშვნები $d_{*B} = d_B/D$ და $d_{*H} = d_H/D$:

$$L_{T,T} = 0,5\mu_o\omega^2D \left\{ 1 - \sqrt{1 - d_{*B}^2} + (d_{*H} - d_{*B})^{-2} \left[d_{*H}(\arcsin d_{*B} - \arcsin d_{*H}) - \frac{1}{3}\sqrt{1 - d_{*B}^2}(2 + d_{*H}^2) + \frac{1}{3}\sqrt{1 - d_{*B}^2}(2 + d_{*B}^2 + 3d_{*H}(d_{*H} - d_{*B})) \right] \right\} \quad (2.97)$$

კოჭას ენერგია $i\omega = 0,5(d_H - d_B)\pi D k_{3,T} J_T$ -ის გათვალისწინებით გამოისახება შემდეგი სახით

$$W_{T,T} = 0,5L_{T,T}i^2 = 0,0625\mu_o\pi^2(k_{3,T}J_T)^2 f(d_{*H}, d_{*B})d^5, \quad (2.98)$$

სადაც $f(d_{*H}, d_{*B})$ არის გამოსახულება (2.97)-ის ფიგურულ ფორმულაში მარჯვენა ნაწილში, გამრავლებული $(d_{*H} - d_{*B})^2$. სადენის წონა

$$M_{T,T} = 0,25\pi^2\gamma k_{3,T}(d_{*H}^2 - d_{*B}^2)D^3 \quad (2.99)$$

ხვედრითი ენერგია $W_{T,T\gamma H} = W_{T,T}/M_{T,T}$ განისაზღვრება (2.98), (2.99)-დან.

სრული ელექტრომაგნიტური ძალები

$$F_{ZT,T} = \frac{\mu_o(i\omega)^2}{4\pi(d_{*H} - d_{*B})^2} \left\{ \left[(1 + d_{*H}^2)\ell_n \frac{1+d_{*H}}{1-d_{*H}} \right] - \left[(1 + 2d_{*B}d_{*H} - d_{*B}^2)\ell_n \frac{1+d_{*B}}{1-d_{*B}} \right] + \left[2d_{*H}\ell_n \frac{1-d_{*H}^2}{1-d_{*B}^2} \right] - 2(d_{*H} - d_{*B}) \right\}; \quad (2.100)$$

$$F_{rT,T} = 0,5\mu_o (i\omega)^2 \left\{ 1 - 2(d_{*H} - d_{*B})^{-2} \left[d_{*H} (\arcsin d_{*H} - \arcsin d_{*B}) - \sqrt{1 - d_{*B}^2} + \sqrt{1 - d_{*H}^2} \right] \right\} \quad (2.101)$$

[8]-ში მოცემულია ფორმულები მაქსიმალური ტანგენციალური და რადიალური მექანიკური ძალებისათვის სქელი ტოროიდული კოჭაში:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{tm} &= 0,25d_B (J_T k_{3,T}) \frac{d_{*H}(2-d_{*H})}{(d_{*H}-d_{*B})(1-d_{*H})} B_m i \\ \sigma_{rm} &= 0,25d_B (J_T k_{3,T}) \frac{d_{*H}}{(d_{*H}-d_{*B})} B_m \end{aligned} \right\} \quad (2.102)$$

ეს ძალვა აღიძვრება $\pi(D - d_B)$ წრის არეში ტორას შიდა ზღვარში, სადაც მაგნიტური ინდუქცია აღწევს მაქსიმუმს:

$$B_m = 0,5\mu_o (k_{3,T} J_T) D \frac{(d_{*H}-d_{*B})(1-d_{*H})}{1-d_{*B}} \quad (2.103)$$

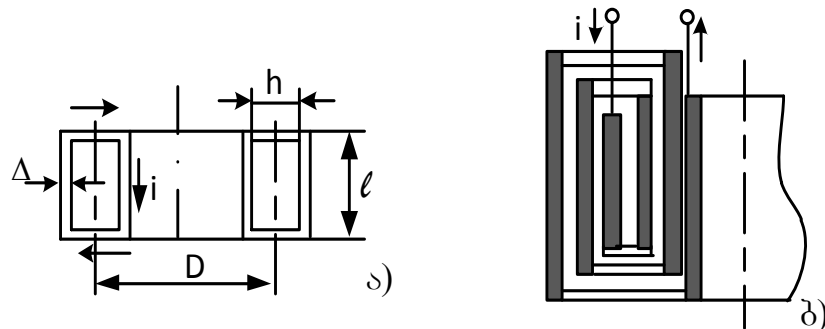
ოგიერთი პრაქტიკული ამოცანისათვის წარმოადგენს ინტერესს იმ მართკუთხა კვეთის ტოროიდული კოჭას საფუძველზე (ნახ.2.11, ა), რომლის ინდუქციურობა მცირე სისქის დახვევით [1].

$$L'_T = \frac{\mu_o}{2\pi} \omega^2 \ell_* D \ell_n \frac{1+h_*}{1-h_*} \quad (2.104)$$

სადაც $\ell_* = \ell/D$, $h_* = h/D$

ჩვეულებრივი ტოროიდული კოჭას ანალოგიურად $i\omega = \pi \Delta_{*T} h_* D^2 J_T k_{3,T} \delta$

სადაც $\Delta_{*T} = \Delta_T/h$, გვექნება:



ნახ. 2.11. ტოროიდული კოჭა მართკუთხა კვეთით (ა) და კოაქსიალური (ბ)

$$W'_T = 0,25\pi\mu_o\ell_* (\Delta_{*T}h_*k_{3,T}J_T)^2 D^5 \ell_n \frac{1+h_*}{1-h_*}; \quad (2.105)$$

$$M'_T = 2\pi\gamma(h_* + \ell_*)\Delta_{*T}h_*k_{3,T}D^3; \quad (2.106)$$

$$W'_{yA,T} = \frac{\mu_o\ell_*\Delta_{*T}h_*k_{3,T}(JD)^2 \ell_n \frac{1+h_*}{1-h_*}}{8\gamma(\ell_*+h_*)}; \quad (2.107)$$

$$\tau'_T = \frac{\mu_o k_{3,T} \Delta_{*T} \ell_* h_* D^2 \ell_n \frac{1+h_*}{1-h_*}}{4\rho(\ell_*+h_*)}; \quad (2.108)$$

$$\frac{W'_T}{W_B} = 1,524 \left(\frac{k_{3,T}}{k_{3B}}\right)^{1/3} \left(\frac{J_T}{J_B}\right)^2 \frac{\ell_* (\Delta_{*T} h_*)^{2/3}}{(\ell_* + h_*)^{5/3}} \ell_n \frac{1+h_*}{1-h_*} \quad (2.109)$$

როცა $\ell_* = h_* = 0,3$ და $\Delta_{*T} = 0,1$ სხვადასხვა ერთნაირ პირობებში გვექნება $W'_T/W_B = 0,206$.

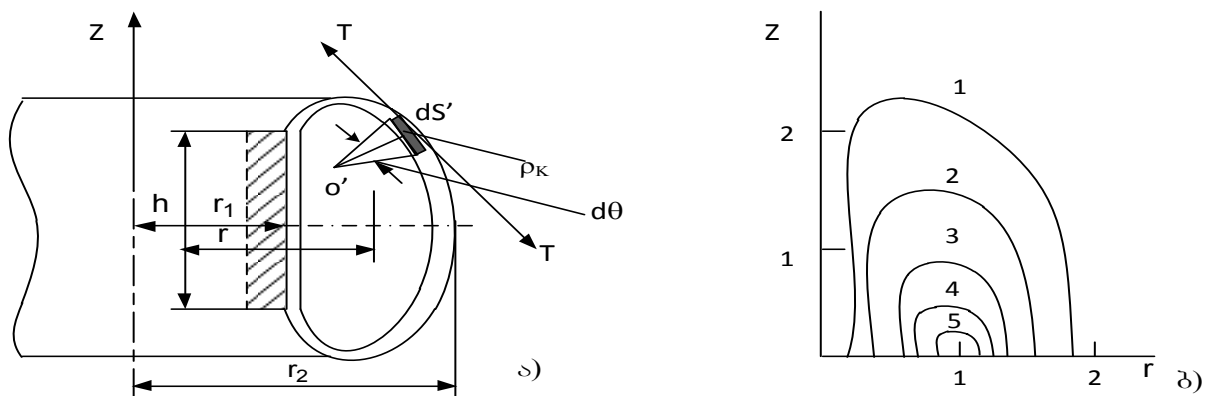
(2.107)-დან ჩანს, რომ მოცემული D და h_* სიდიდეებისთვის ტორას ღერძული სიგრძის ℓ_* გაზრდა იწვევს მასალების გამოყენების ეფექტურობის ამაღლებას, მეორე მხრივ $\ell/h \lesssim 4$ დამოკიდებულება $W'_{yA,T}(\ell_*)$ გაჯერდება. თუ შევცვლით ℓ_* კოჭას მოცემულ მოცულობაში, შევინარჩუნებთ $h_* = const$, მაშინ როგორც (2.109)-დან ჩანს W'_T ენერგიას გააჩნია მაქსიმუმი როცა $\ell_* = 1,5h_*$. [16]-ში აღნიშნულია, რომ განსაზღვრული ფარდობითი ზომების დროს ($h_* \approx 0,5$, $\ell_* \approx 0,8$) ენერგიამ W'_T შეიძლება შესამჩნევად გადააჭარბოს W_T ენერგიას ტოროიდული იმ-ის წრიული მერიდიანული კვეთით (მასალების ერთი და იგივე ხარჯვის დროს).

(2.105)-(2.109)-ში $k_{3,T}$ მნიშვნელობა, როგორც ჩვეულებრივ ტორასთვის, აიღება D დიამეტრისთვის. მაქსიმალური კოეფიციენტი $k_{3,Tm} = k_{3,T}/(1 - d_{*H})$ მიიღწევა შიდა დიამეტრზე ($D_1 = D - d_H$) ტორას ღერძთან ხვების მიახლოების შედეგად. დახვევის საბოლოო სისქის Δ_T დროს, კოჭას ინდუქციურობის მიახლოებითი ანგარიში წრიული და მართკუთხა კვეთით, შეიძლება ჩატარდეს “ეფექტური” ხვიას ცნების საფუძველზე. რომლის არსი იქნება წარმოდგენილი D სახის კოჭას განხილვის დროს. კერძო შემთხვევაში ტოროიდული იმ მართკუთხა

კვეთით წარმოადგენს კოაქსიალური იმ-ს, წარმოქმნილი შიდა და გარე მეტალური კოაქსიალური ცილინდრებით (ნახ.2.11, ბ). ცილინდრები შეიძლება ჩაირთოს მიმდევრობით შუბლა ფირფიტების სამუალებით, ხოლო ღრეჩო ცილინდრებს შორის ფიქსირდება საიზოლაციო სადებებით და შეიძლება ემსახუროს გაცივების არხებს [18].

ზემოდ განხილული ტოროიდული კოჭები წრიული ან მართკუთხა კვეთებით არ წარმოადგენს ოპტიმალურს აქტიური მასალების გამოყენების მიზნით, თუ გავითვალისწინებთ იმ-ის სიმტკიცის მახასიათებლებს. ასეთ კოჭაში მერიდიანული კვეთით მოქმედებს არა მხოლოდ არსებითად არაერთგვაროვანი ძალები გაჭიმვის, არამედ მოღუნვის ძალვა, რომლის კომპენსაცია კონსტრუქციული ელემენტებით ხშირად დაკავშირებულია სიმძნელებთან. მასალების გამოყენების მიხედვით საუკეთესოს წარმოადგენს ტოროიდული კოჭა ისეთი კვეთის ფორმით, რომლის დროსაც გამჭიმავი ძალვა მუდმივია, ხოლო ღუნვის ძალვა გამორიცხებულია [17,19].

განვსაზღვროთ ტორას ოპტიმალური კვეთის ფორმა. დაუშვათ ამ კვეთს გააჩნია რადიუსის თითოეულ წერტილში სიმრუდე ρ_K (ნახ.2.12, ა).



ნახ.2.12. D -ს მაგვარი ტოროიდული კოჭა (ა) და მისი პროფილი სხვადასხვა ტოროიდულობის ε დროს (ბ):
1-0,9; 2-0,7; 3-0,5; 4-0,3; 5-0,1.

გამოვეყნოთ რგოლური ელემენტი ტორას ზედაპირზე, რომელიც მოიცავს Z -ის მთავარ ღერძს და გააჩნია ფართი $dS' = 2\pi r \rho_k d\theta$. ღუნვის ძალვის გამორიცხვის დროს, მასზე მოქმედებს მაგნიტური წნევა P_M შიგნიდან და გამჭიმავი ძალვა T , მიმართული მხების სახით ზღვარზე.

ძალების ბალანსიდან გამომდინარეობს: $P_M dS' = 2T \sin(d\theta/2)$. (2.92)-ის გათვალისწინებით და $\sin(d\theta/2) \approx d\theta/2$ გვექნება $\pi r \rho_k B^2(r)/\mu_0 = T$, საიდანაც

$$\rho_k = Kr, \quad (2.110)$$

$$\text{სადაც } K = 4\pi T / [\mu_0 (i\omega)^2] \quad (2.111)$$

ამგვარად, თუ გამჭიმავი ძალვა მუდმივია მერიდიანულ კვეთში ($T = \text{const}$) და მღუნავი ძალვა გამორიცხულია, კვეთის სიმრუდის ლოკალური რადიუსი უნდა იყოს პროპორციული r დაშორების ტორის ღერძიდან, ე.ი. კვეთის სიმრუდე იზრდება Z ღერძთან მიახლოების დროს. ასე რომ ზოგად შემთხვევაში ნებისმიერი მრუდისათვის $Z(r)$ გვექნება.

$$\rho_k = \frac{[1 + (dZ/dr)^2]^{3/2}}{(d^2Z/dr^2)} \quad (2.112)$$

მაშინ (2.110)-ის თანახმად ტოროიდული კოჭას კვეთის ოპტიმალური ფორმა განისაზღვრება განტოლებით

$$\frac{d^2Z}{dr^2} = \frac{1}{Kr} [1 + (dZ/dr)^2]^{3/2} \quad (2.113)$$

K მუდმივა პირველი მიახლოებით შეიძლება შეფასდეს (2.111)-ის მიხედვით, მივიღოთ

$$T \approx \pi D \Delta_T K_{3,T} \sigma_t, \quad (2.114)$$

სადაც σ_t -გამტარში საანგარიშო მექანიკური გამჭიმავი ძალვა. რადგანაც კოჭას კვეთის პროფილი იგულისხმება უწყვეტი და გლუვი, მაშინ მისი სიმეტრიის პირობიდან $Z = 0$ სიბრტყის მიმართ გვექნება $dZ/dr \rightarrow \infty$, როცა $r = r_1, r = r_2$, სადაც r_1 და r_2 ტორას შიდა და გარე რადიუსები. ამიტომ როცა $r = r_1$ მრუდის ზედა და ქვედა ბოლოები,

განსაზღვრული (2.113), შერწყმულია პროფილის ცილინდრული უბნის მხებთან. ეს უბანი მირთულია ცილინდრის საყრდენთან, რომელიც აწონასწორებს სრულ ელექტრომაგნიტურ ძალას, რომელიც ჭიმავს ტორს ცენტრისაკენ. პროფილის ცილინდრულ უბანში, როგორც მრუდწირასი, მოქმედებს მუდმივი გამჭიმავი ძალვა იმ პირობით, რომ ცენტრალური საყრდენი კოჭა ჰქმნის აუცილებელ განაწილებულ რადიალურ ძალვას [15]. ასეთი სახით აგებული კოჭას პროფილი $Z(r)$, ნაჩვენებია ნახ. 2.12, ა-ზე და გააჩნია D -ს მაგვარი ფორმა, შეესაბამება (2.113) და წარმოადგენს ოპტიმალურს, ხოლო კოჭას ეწოდება D -ს მაგვარი.

D -ს მაგვარი კოჭას რადიუსები r_1 და r_2 დაკავშირებულია თანაფარდობებით [15]:

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= r_o e^{-k}; & r_2 &= r_o e^k; \\ r_o &= \sqrt{r_1 r_2}; & K &= 0,5 \ell_n \frac{r_2}{r_1} \end{aligned} \right\} \quad (2.115)$$

F_Z ძალა, მიისწრაფვის მოაცილოს ზედა ნახევარი D -ს მაგვარი ტორს ქვედასაგან ($Z = 0$ სიბრტყის მიმართ):

$$F_{ZD} = B_m^2 \pi r_1^2 \ell_n \frac{r_2}{r_1} \quad (2.116)$$

წრიული კვეთის ტორასათვის (2.116) გადადის (2.94)-ში. შეიძლება ვაჩვენოთ, რომ (2.116) ფორმულა სამართლიანია ნებისმიერი ფორმის მერიდიანული კვეთისათვის [15], ე.ი. F_Z დამოკიდებულია მხოლოდ ტორას დამახასიათებელი ზომებით მის ეკვატორულ კვეთში ($Z = 0$).

D -ს მაგვარი კოჭას პროფილი სხვადასხვა ტოროიდალობით $\xi = (r_2 - r_1)/(2r_{cp})$ როცა $r_{cp} = 0,5(r_1 + r_2) = 1$ ნაჩვენებია (2.12,ბ) [20]. D -ს მაგვარი პროფილი, როგორც ჩანს უშუალოდ (2.110) და (2.115)-დან გამოვლინდება მით ნათლად, რაც მეტია სხვაობა r_1 და r_2 -ს შორის. [20]-ში ნაჩვენებია, რომ D -ს მაგვარი კოჭები უზრუნველყოფენ დაგროვილი ენერჯის მაქსიმუმს ფიქსირებული მოცულობაში.

D -ს მაგვარი კოჭას პარამეტრები გამოისახება ზესელვას n რიგის მოდიფიცირებული ფუნქციით [10]:

საყრდენი ცილინდრის შიდა სიმაღლე (ნახ.2.12, ა).

$$h = 2\pi r_0 K I_1(K); \quad (2.117)$$

ხვიას სიგრძე (კვეთის პერიმეტრი)

$$\ell_B = 2\pi r_0 K [I_0(K) + I_1(K)]; \quad (2.118)$$

მერიდიანული კვეთის ფართი

$$S = 2\pi r_0^2 K [I_1(2K) - e^{-K} I_1(K)]; \quad (2.119)$$

ინდუქციურობა

$$L_D = 0,5\mu_0 r_0 \omega^2 K^2 [I_0(K) + 2I_1(K) + I_2(K)]; \quad (2.120)$$

$$m_{D} \approx 2\pi r_0 \ell_B \Delta K_{3,T} \gamma, \quad (2.121)$$

სადაც Δ - დახვევის სისქე (პირობიდან $\Delta \ll r_2 - r_1$).

მიღებული ფორმულები საშუალებას იძლევა ვიპოვოთ $W, W_{D\gamma}, \tau$ და სხვა მაჩვენებლები იმ-ის D -ს მაგვარი კოჭას საფუძველზე, ანალოგიური ასეთი სხვა ტიპის იმ-სათვის. ანგარიშები გეომეტრიული, ელექტრომაგნიტური და სიმტკიცის პარამეტრების D - ს მაგვარი მაგნიტური სისტემის ჩატარებულია [21]-ში.

[21]-ში მიღებულია შეფასება იმ-ის ხვედრითი ენერჯის D -ს მაგვარი პროფილით:

$$W_{D\gamma} = \left\{ 1 - \frac{I_1(K)}{K[I_0(K) + I_1(K)]} \right\} \frac{\sigma_{TCP}}{\gamma}$$

როგორც სხვა იმ-ში, $W_{D\gamma}$ წრფივად არის დამოკიდებული (σ_{TCP}/γ) -ზე.

ინდუქციურობის მიახლოებითი შეფასებისათვის ტოროიდული კოჭას საბოლოო სისქის სხვადასხვა ფორმის კვეთით (წრიული, მართკუთხა, ოვალური, D -ს მაგვარი) შეიძლება გამოყენებული იქნეს მიდგომა ტოროიდული ფორმის ხვიას “ეფექტური” ცნების

საფუძველზე, განლაგებული რეალური კოჭას შიგნით $\Delta/3$ -ის დაშორებით კვეთის შიდა საზღვრიდან [19]. ამ შემთხვევაში

$$L_T \approx \mu_0 \omega^2 S_3 / \ell_3 \quad (2.122)$$

(2.122)-ში S_3 – ფართი, შემოწვდომილია “ეფექტური” ხვიათი, ℓ_3 – ინდუქციის ხაზების ეფექტური სიგრძე. D -ს მაგვარი კოჭასათვის

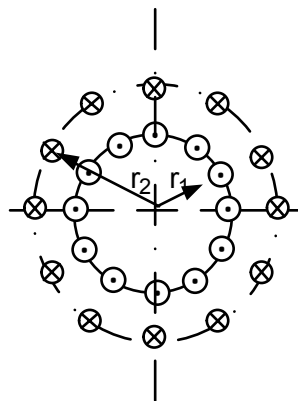
$$\ell_3 = 2\pi\sqrt{r_{13}r_{23}} \approx \pi(r_{13} + r_{23}) \times [1 - (\alpha^2/8) - (\alpha^4/128)], \quad (2.123)$$

$$\text{სადაც } \alpha = 2(r_{23} - r_{13}) / (r_{13} + r_{23}); \quad (2.124)$$

r_{13} და r_{23} -მანძილი Z ღერძიდან უახლოესი და დაშორებულ წერტილამდე “ეფექტური” ხვიას.

უმრავლეს შემთხვევაში ტოროიდული იმ სრულდება არა უწყვეტი კოჭას სახით, არამედ შემადგენელი N დისკრეტული ცილინდრული კოჭათი, შემომწვდომი წრიული ღერძის D დიამეტრით. ამ შემთხვევაში ველი კოჭას შიგნით ხდება სამგანზომილებიანი არაერთგვაროვანი და გაჩნდება გარე ველები.

მაგნიტური ინდუქციის ძირითადი φ – მდგენელის არაერთგვაროვნების შეფასება შეიძლება მივიღოთ, ბრტყელი მოდელის განხილვით, შემდგარი N წყვილებისაგან უსასრულო გრძელი ძაფებით საწინააღმდეგო მიმართულების დენებით Z ღერძის გასწვრივ, განლაგებული წრეებზე r_1 და r_2 (ნახ.2.13)



ნახ. 2.13. ბრტყელი მოდელი დისკრეტული ტოროიდული კოჭებით

[15]-ში მოყვანილია შემდეგი ფორმულა B_φ ინდუქციისათვის სიბრტყეში სადენების ერთი წყვილისათვის ასეთი სისტემისათვის:

$$B_\varphi = \frac{\mu_0 Ni}{2\pi r} \left[1 + \frac{1}{(r/r_2)^{N-1}} + \frac{1}{(r_2/r)^{N-1}} \right] \quad (2.125)$$

ზღვარში, როცა $N \rightarrow \infty$ ფორმულა (2.125) გადადის (2.91)-ში. შესაბამისად D -ს მაგვარი კოჭას ოპტიმალური მდგენელის პროფილი

$$\frac{d^2 Z}{dr^2} = \frac{1}{Kr} \left[1 + \left(\frac{dz}{dr} \right)^2 \right]^{3/2} \left[1 + \frac{1}{(r/r_2)^{N-1}} + \frac{1}{(r_2/r)^{N-1}} \right] \quad (2.126)$$

N -ის შემცირებით D -ს მაგვარი პროფილი ხდება უფრო მდოვრე და უახლოვდება წრეს.

[22]-ში დეტალურად აღწერილია კონსტრუქცია ტოროიდული იმ-ის 10 მგჯ დისკრეტული კოჭათი D -ს მაგვარი პროფილით, თხევადი აზოტის გაცივებით.

თავი 3. ენერგიის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში

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

3.1. ერთძარღვიანი ზეგამტარული სადენის დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში

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

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

სადენის ზედაპირზე მაგნიტური ინდუქციისათვის გვექნება:

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

სადაც I_k -დენის კრიტიკული მნიშვნელობა,

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

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

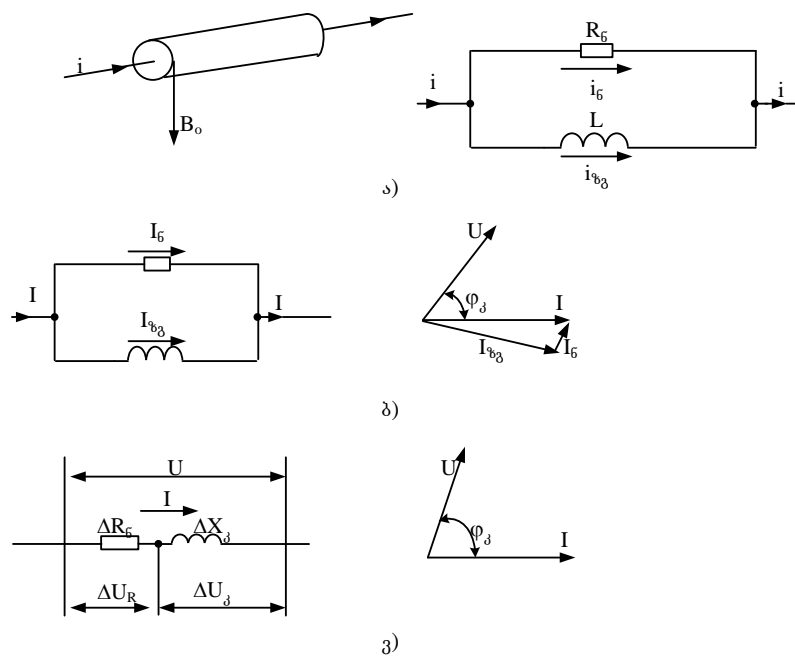
$$i = i_{\theta} + i_{\theta\theta} \quad (3.3)$$

სადაც i_5 -დენის აქტიური მდგენელი, ან დენი გამოწვეული ნორმალური ელექტრონებისაგან,

i_{Φ_3} - დენის ზეგამტარული მდგენელი.

სრული დენის აქტიური მდგენელი იზღუდება წინააღობით, რომლისთვისაც

$$R_n = \rho_{\delta} \frac{\ell}{S_{\lambda}} = \frac{\rho_{\delta 0}}{n_{\delta}^* S_0 S_{\lambda}^*} = \frac{1}{n_{\delta}^* S_{\lambda}^*} R_{\delta 0}, \quad (3.4)$$



ნახ. 3.1. სქემები და ვექტორული დიაგრამები

სადაც $R_{\delta 0} = \rho_{\delta 0} \frac{\ell}{S_0}$,

ℓ - სადენის სიგრძე,

$\rho_n = \frac{\rho_{\delta 0}}{n_{\delta}^*}$ - სადენის ხვედრითი წინააღობა,

$\frac{*}{S_{\lambda}} = \frac{S_{\lambda}}{S_0}$ - დენით დაკავებული ფარდობითი ფართი ზგ სადენის მთლიანი

ფართის $S_0 = \pi r_0^2$ ნაწილიდან,

$\rho_{\delta 0}$ - ხვედრითი წინააღობა, როცა, $\frac{*}{n_{\delta}} = 1$,

$n_{\Sigma}^* = \frac{n_{\Sigma}}{n_0}$ - ნორმალური ელექტრონების სიმკვრივის ფარდობითი მნიშვნელობა,

n_{Σ} - ერთეულ მოცულობაში ნორმალური ელექტრონების რიცხვი,

n_0 - ერთეულ მოცულობაში საერთო ელექტრონების რიცხვი,

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

სრული დენის ზეგამტარული მდგენელი იზღუდება კინეტიკური ინდუქციურობით

$$L_{\Sigma} = \ell_{\Sigma} \frac{\ell}{S_{\lambda}} = \frac{\ell_{\Sigma}}{n_{\Sigma}} \frac{\ell}{S_{\lambda} S_0} = \frac{1}{n_{\Sigma}^* S_{\lambda}} L_{\Sigma 0} \quad (3.5)$$

სადაც $L_{\Sigma 0} = \ell_{\Sigma 0} \frac{\ell}{S_0}$; $\ell_{\Sigma} = \frac{\ell_{\Sigma 0}}{n_{\Sigma}^*}$ - ხვედრითი კინეტიკური ინდუქციურობა;

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

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

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

$$n_{\Sigma}^* = 1 - \frac{\gamma_0}{B_{\Sigma}} = 1 - \frac{\gamma_0}{I_{\Sigma}}; \quad n_{\Sigma} = \frac{\gamma_0}{B_{\Sigma 0}} = \frac{\gamma_0}{I_{\Sigma}}$$

სადაც γ_0 - უგანზომილებო კოეფიციენტი, რომელიც მიიღება ექსპერიმენტალური გზით.

დენით დაკავებული ფართი, იცვლება დენის შეღწევის სიღრმისგან დამოკიდებულებაში:

$$\frac{s}{S_0} = \frac{S_{\lambda}}{S_0} = \frac{2\pi \left(r_0 - \frac{\lambda}{2}\right) \lambda}{\pi r_0^2}, \quad (3.6)$$

სადაც λ - დენის შეღწევადობის სიღრმე,

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{n_{\Sigma}^*}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \frac{\gamma_0}{I_{\Sigma}}}} \quad (3.7)$$

λ_0 - დენის შეღწევადობის სიღრმე (ლონდონისებური).

ზგ სადენის მაქსიმალური დენგამტარიანობა განისაზღვრება დენის შევსებით, რომლის დროსაც დენის ზეგამტარული მდგენელი მიაღწევს მაქსიმუმს. $\lambda = r_0$ პირობის დროს დენის შევსებისთვის მივიღებთ:

$$I_{\theta}^{\text{შევს.}} = \gamma_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{r_0}\right)^2} \quad (3.8)$$

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

$$I^* = I_{\theta}^* + I_{\text{ფგ}}^* \quad (3.9)$$

$$\text{სადაც } I_{\theta}^* = \frac{\dot{U}}{R_{\theta}}; \quad I_{\text{ფგ}}^* = \frac{\dot{U}}{jX_j}; \quad X_j = \omega L_j$$

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

$$\dot{U} = \Delta Z I^* = (\Delta R_{\theta} + j\Delta X_j) I^* \quad (3.10)$$

$$\text{სადაც } \Delta Z = \frac{jX_j R_{\theta}}{R_{\theta} + jX_j} = \Delta R_{\theta} + j\Delta X_j = |\Delta Z| e^{j\varphi_j},$$

$$\Delta R_{\theta} = \frac{R_{\theta} X_j^2}{R_{\theta}^2 + X_j^2},$$

$$\Delta X_j = \frac{X_j R_{\theta}^2}{R_{\theta}^2 + X_j^2},$$

$$\varphi_j = \arctg \frac{\Delta X_j}{\Delta R_{\theta}},$$

$$|\Delta Z| = \frac{R_{\theta} X_j}{\sqrt{R_{\theta}^2 + X_j^2}}.$$

სრული დენის მდგენელებისთვის გვექნება:

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

$$I_{\text{ფგ}} = \frac{\Delta Z}{X_j} I = \frac{R_{\theta}}{\sqrt{R_{\theta}^2 + X_j^2}} I, \quad (3.12)$$

ფარდობითი ფართი სადენის დენით შევსებამდე ტოლია:

$$s = \frac{\lambda}{r_0} \left(2 - \frac{\lambda}{r_0}\right) = \frac{\lambda_0}{r_0 \sqrt{1 - I_{\theta}^{\gamma_0}}} \left(2 - \frac{\lambda_0}{r_0 \sqrt{1 - I_{\theta}^{\gamma_0}}}\right) \quad (3.13)$$

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

ΔR წინააღმდეგობაში აქტიური დანაკარგების განსაზღვრისათვის გვექნება

$$\Delta P = I_{\sigma}^2 R_{\sigma} = I^2 \Delta R = \frac{R_{\sigma} X_j^2}{R_{\sigma}^2 + X_j^2} I^2 \quad (3.14)$$

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

$$I = I_j = I_{\sigma}; I_{\Sigma} = 0; \Delta P = R_{\sigma} I^2 \quad (3.15)$$

სადენი სრულად გადადის ნორმალურ მდგომარეობაში.

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

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

სადაც I_{σ} - მაქსიმალური დენის მნიშვნელობა ზგ ძარღვებში

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

i დენი შეიძლება წარმოვიდგინოთ შემდეგი სახით:

$$i = I_j I_{\sigma} \sin \omega t,$$

სადაც - i დენის მყისი მნიშვნელობა, ზგ ძარღვში

$$i_{\sigma}^* = \frac{I_{\sigma}}{I_j}; 0 < i_{\sigma}^* < 1,$$

სადაც i_{σ}^* - მაქსიმალური დენის ფარდობითი მნიშვნელობა.

როცა $i_{\sigma}^* = 1$ ძარღვი გადადის ნორმალურ მდგომარეობაში,

იკარგება ზეგამტარობა. ძარღვების დენი მის ზედაპირზე ქმნის ველს

$$B_{\sigma d} = \mu_0 \frac{i}{\pi d_{\sigma}}$$

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

$B_{\sigma d}$ მაგნიტური ინდუქციის მნიშვნელობას, I_{σ} კრიტიკული დენის

საშუალებით ექნება შემდეგი სახე:

$$B_{\sigma d} = \mu_0 \frac{I_{\sigma} I_m}{\pi d_{\sigma}} \sin \omega t$$

მაგნიტური ინდუქციის კრიტიკული მნიშვნელობა

$$B_{\sigma} = \mu_0 \frac{I_{\sigma}}{\pi d_{\sigma}}$$

შესაბამისად $B_{\sigma d} = B_{\sigma} I_{\sigma} \sin \omega t$ *

მაქსიმალური მაგნიტური ინდუქციის ფარდობითი მნიშვნელობა:

$$\frac{B_{\sigma d}}{B_{\sigma}} = I_{\sigma}$$

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

$$B_{\sigma} = \mu_0 \frac{N \cdot i}{\pi D_{\sigma}}$$

სადაც D_{σ} - სადენის დიამეტრი.

თუ სადენი შესრულებულია მჭიდროდ შევსებული ზგ ძარღვებით, მაშინ

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

ამ შემთხვევაში სადენის ზედაპირზე მაგნიტური ინდუქცია

$$B_{\sigma} = \mu_0 \frac{N \cdot i}{\pi \sqrt{N} d_{\sigma}} = B_{\sigma d} \sqrt{N}$$

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

სადენის B_{σ} ინდუქციის შენარჩუნებისთვის ერთი ძარღვის $B_{\sigma d}$ 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

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

აქტიური ΔR წინააღობისთვის გვექნება:

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

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

$$\frac{I_{\text{გ}}^*}{I_{\text{გ}}^0} = 1; \quad \rho_{\text{გ}0} - \text{ზეგამტარის ხვდრითი წინააღობა ნორმალურ}$$

მდგომარეობაში.

კინეტიკური ინდუქციური წინაღობა X_j , რომელიც ზღუდავს ზეგამტარულ დენს ტოლია

$$X_j = X_{j0} \frac{1}{1 - \gamma_0^*}$$

$$X_{j0} = \ell_{j0} \frac{\ell}{S}$$

სადაც X_{j0} -გრაგნილის კინეტიკური ინდუქციური წინაღობა, როცა $\gamma_0^* = 0$

ΔR -ის რიცხობრივი შეფასება, როცა $\rho_{\text{ფ}} = 4 \cdot 10^{-7}$ ომი. მ, $\ell_{j0} = 10^{-22}$

ომი, მ, როცა $\gamma_0^* = 0,5, \Delta R = 10^{-22} R_{\text{ფ}}$, 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

$$\phi_x = \ell B_{\sigma} X = \ell B_j B_0^* X = \ell_{j0}^* I_j X$$

$$\text{სადაც } B_0^* = \frac{B_0}{B_j}$$

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

$$E_{\sigma} = \omega \ell x I_{\sigma} I_j$$

*

R_x წინაღობა ელემენტარული dx ფენის ტოლია

$$R_x = \rho_{\text{ფ}} \frac{\ell}{S_x}$$

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

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

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

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

გაინტეგრირებისას, მივიღებთ:

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

ჩავსვათ ρ_{θ} და λ -ის მნიშვნელობები

$$\rho_{\theta} = \frac{\rho_{\theta 0}}{\gamma_{\theta}}, \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1-\gamma_{\theta}^2}}$$

გრიგალური დანაკარგებისთვის მივიღებთ გამოსახულებას

$$\Delta P_{\text{გრიგალური}} = \frac{1}{3} \frac{\omega^2}{\rho_{\theta 0}} \ell r \pi I_{\theta}^{*2} I_j^2 \lambda_0^3 \frac{1}{(1-\gamma_{\theta}^2)^{\frac{3}{2}}} \left(1 - \frac{3}{4} \frac{\lambda_0}{r \sqrt{1-\gamma_{\theta}^2}}\right)$$

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

მიიღწევა მაქსიმალური მნიშვნელობა.

$$\Delta P_{\text{გრიგალური, მაქს.}} = \frac{\omega^2}{3\rho_{\theta 0}} I_j^2 \ell r \pi \frac{1}{4}$$

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

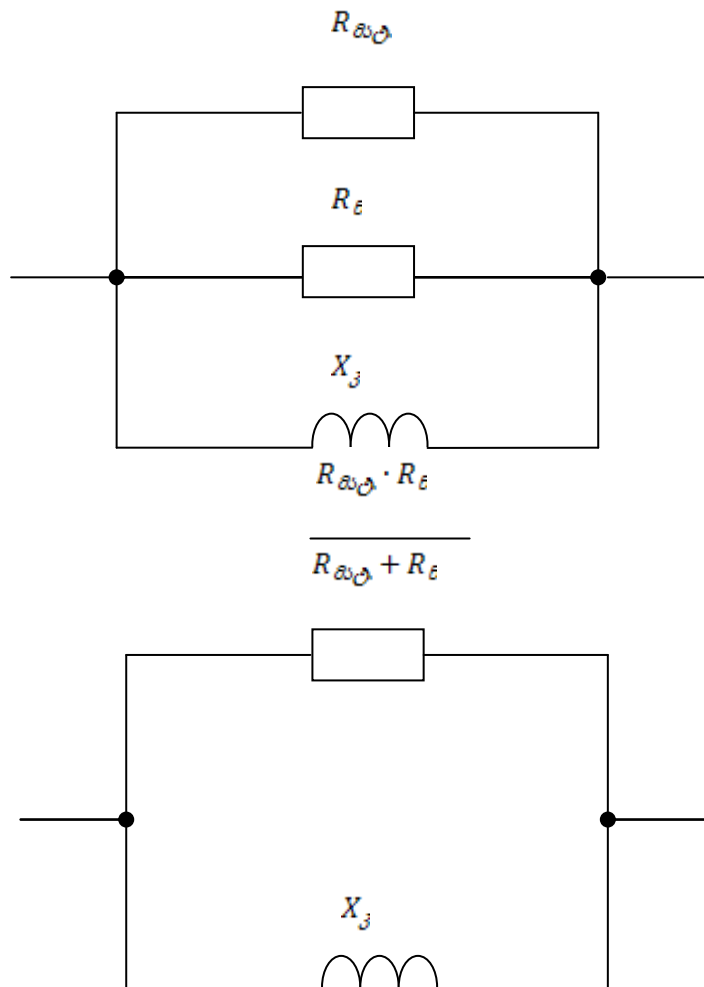
$$\Delta P_{\text{გრიგალური, მაქს.}} = \frac{1}{12\rho_{\theta 0}} \omega^2 r^2 V I_j^2$$

მატრიცაში გრიგალური დანაკარგებისთვის ანალოგიურად, შეიძლება მივიღოთ გამოსახულება

$$\Delta P_{\text{გრიგ.მატ.}} = \frac{\omega^2}{3\rho_{\text{მატ.}}} \cdot \frac{I^2 \ell^2 b^4 \pi}{1 \sigma^2 j} \frac{1}{4},$$

სადაც $\rho_{\text{მატ.}}$ - მატრიცის ხვედრითი წინაღობა; b - მატრიცის სიგანე; ℓ - მარღვის სიგრძე; λ - მაგნიტური ველის შეღწევის სიღრმე; r_{ϵ} ზეგამტარული მარღვის რადიუსი.

მატრიცაში გრიგალური დანაკარგების გარდა, მიღებულია შეფასდეს ზგ მარღვის წინაღობის გავლენით ელექტრული დანაკარგები. მატრიცის წინაღობა $R_{\text{მატ.}}$ შეერთებულია პარალელურად R_{ϵ} წინაღობასთან (ნახ.3.2)



ნახ. 3.2 მატრიცის წინაღობის გავლენის განსაზღვრა დანაკარგებზე

$R_{\text{მატ.}}, R_{\text{გ}}$ წინაღობების შეცვლით ერთი ეკვივალენტური წინაღობით $R_{\text{კვ.}}$ მივიღებთ წრედს, რომელშიც კინეტიკური ინდუქციური წინაღობა X_j შეერთებულია პარალელურად ეკვივალენტური წინაღობასთან

$$R_{\text{კვ.}} = \frac{R_{\text{გ}} \cdot R_{\text{მატ.}}}{R_{\text{გ}} + R_{\text{მატ.}}},$$

რაც ახდენს გავლენას ΔR წინაღობაზე, რომელიც განისაზღვრება გამოსახულებით

$$\Delta R = \frac{R_{\text{კვ.}} \cdot X_j^2}{R_{\text{კვ.}} + X_j^2}$$

ჰისტერეზისული დანაკარგები $\Delta P_{\text{ჰისტ.}}$ გამოწვეული საკუთარი მაგნიტური ველით განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით [12,23]:

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

ვითვალისწინებთ, რა

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

მივიღებთ:

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

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:

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

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

ჰისტერეზისული დანაკარგები ერთეულ მოცულობაში გამოითვლება ფორმულით

$$\frac{\Delta P_{ჰისტ.}}{V} = \frac{1}{24} \mu_0 f d_{გ}^{2;2} i_{გ}^3$$

სრული დანაკარგები ერთ ზეგატარულ ძარღვში ტოლია:

$$\Delta P_{გ} = \Delta P_{გლ.ზგ.} + \Delta P_{გლ.მატ.} + \Delta P_{გრიგ.მატ.} + \Delta P_{გრიგ.ზგ.} + \Delta P_{ჰისტ.ზგ.}$$

3.2. მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში.

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

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

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

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

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

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

მაგნიტური ველი ზგ ძარღვებში აღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას

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

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

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

ზგ ძარღვში, როცა $i_{\sigma} = i_{\rho}$, ზგ სადენში $I = I_{\rho}$ და ინდუქცია $B_{o\perp} = B_{\rho}$,

(3.17) განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$B_{\rho} = \mu_o \left(\frac{D}{d}\right)^2 \frac{i_{\rho}^{პერ.}}{\pi D} K_{შვეს.}, \quad (3.19)$$

სადაც $i_{\rho}^{პერ.}$ -კრიტიკული დენი ზგ პერიფერიული ძარღვის ზგ სადენში.

(3.19) განტოლებიდან ძარღვის კრიტიკული დენისთვის მივიღებთ:

$$i_{\rho}^{პერ.} = \frac{\pi D B_{\rho}}{\mu_o K_{შვეს.} \left(\frac{D}{d}\right)^2} = i_{\rho}^{განს.} \left(\frac{d}{DK_{შვეს.}}\right), \quad (3.20)$$

სადაც $i_{\rho}^{განს.}$ -ზგ სადენში განმხოლოებული ძარღვის კრიტიკული დენი.

$$i_{\rho}^{განს.} = \frac{\pi}{\mu_o} d_{\rho} B_{\rho}$$

როგორც (3.20) განტოლებიდან ჩანს, გარე ზგ ძარღვის კრიტიკული დენი $\frac{d}{DK_{შვეს.}}$ ჯერ ნაკლებია განმხოლოებული ძარღვის კრიტიკული დენის მნიშვნელობაზე.

$$I_{\rho} = \left(\frac{1}{K_{შვეს.}} i_{\rho}^{განს.} \frac{d}{D}\right) \left(\frac{D}{d}\right)^2 K_{შვეს.} = \frac{D}{d} i_{\rho}^{განს.} \quad (3.21)$$

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

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

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

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

დენგამტარუნარიანობის და დანაკარგების დამოკიდებულება დაგრეხვის ბიჯისგან გრძივი და განივი მაგნიტურ ველებში გამოკვლეულია შრომებში [24,25,26].

3.3. მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენი ლოკალიზებული მაგნიტური ველით

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

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

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

(3.22) პირობის გათვალისწინებით (3.20) განტოლების შესაბამისად მივიღებთ

$$i_{dკ}^{პერ.} = i_{dკ}^{განზ.} \quad (3.23)$$

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

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

იმასთან დაკავშირებით, რომ ზეგამტარული ძარღვები იმყოფებიან საკუთარ ლოკალიზებულ მაგნიტურ ველებში, ლოკალიზებული მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენი არ საჭიროებს დაგრეხვას და ტრანსპორმაციას. დანაკარგები ლოკალიზებული მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენებში განისაზღვრება ცალკეული ზეგამტარული ძარღვების ჯამური დანაკარგებით.

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

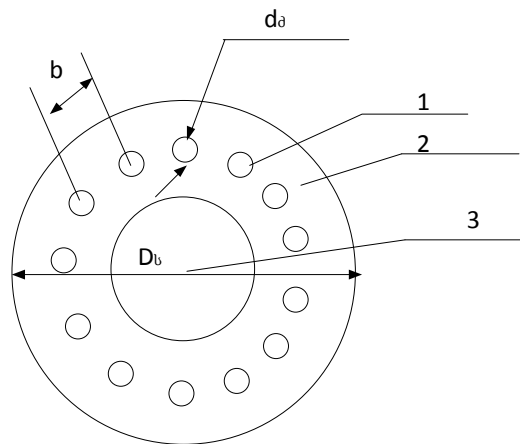
ნახ.3.3 ნაჩვენებია წრიული კვეთის ზეგამტარული სადენი განივი კვეთის ჭრილში, ცვლადი დენისთვის, ერთფენიანი კონსტრუქციის ლოკალიზებული მაგნიტური ველით.

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

მანძილი მეზობელი ზეგამტარული ძარღვების გრძივი ღერძებს შორის b განისაზღვრება თანაფარდობით:

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

სადაც d_{ϕ} - ზეგამტარული ძარღვების დიამეტრი.



ნახ. 3.3. ერთფენიანი ლოკალიზებული მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენი

ზეგამტარული ძარღვების რიცხვი N_{ϕ} სადენში:

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

სადაც D_b - ზეგამტარული სადენის დიამეტრი.

ზეგამტარული სადენის ზედაპირზე მაგნიტური ინდუქცია

$$B_b = \mu_0 \frac{N_{\phi} i_{\phi}}{\pi D_b}, \quad (3.26)$$

სადაც: i_{ϕ} - ზეგამტარული ძარღვების დენი.

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

$$B_{\sigma} = \mu_{\sigma} \frac{i_{\sigma}}{\pi d_{\sigma}}$$

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

$$B_{\sigma} = B_{\sigma} = B_{\sigma}$$

$$i_{\sigma} = \frac{B_{\sigma}}{\mu_{\sigma}} \pi d_{\sigma}$$

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

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

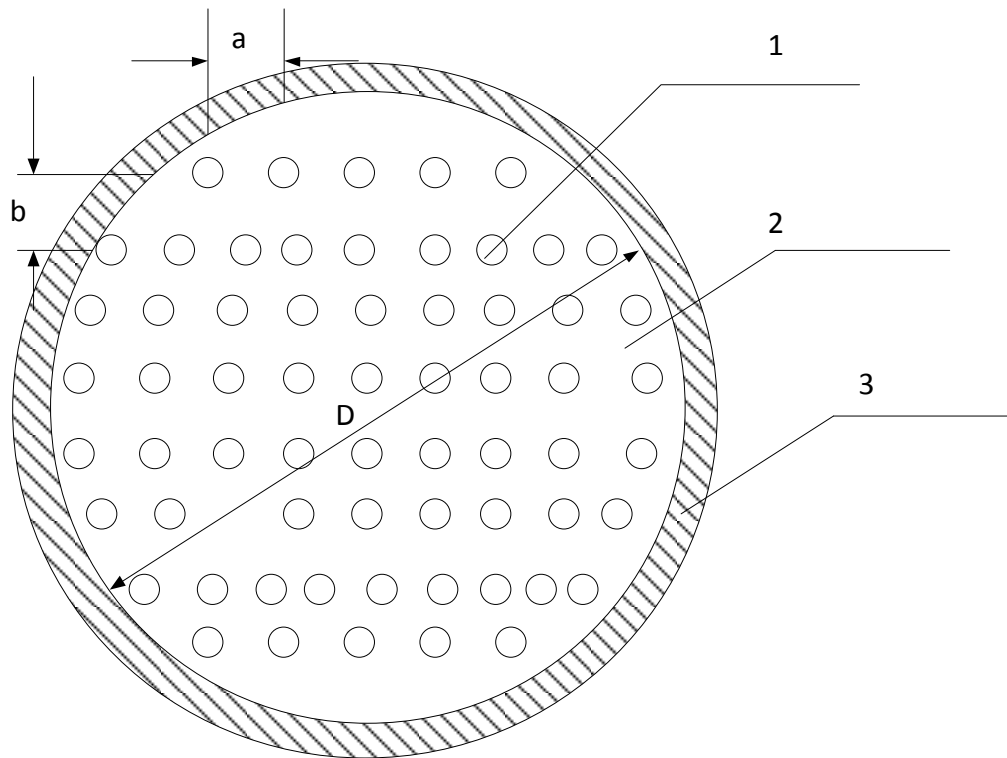
აღნიშნულ შემთხვევაში კრიტიკული დენი I_{σ} ლმძზგ სადენისთვის ტოლია კრიტიკული დენის მძზგ სადენისთვის მისი კვეთის ზეგამტარული ძარღვებით მჭიდრო შევსების შემთხვევაში

$$I_{\sigma} = N_{\sigma} i_{\sigma} = \frac{D_{\sigma} B_{\sigma}}{d_{\sigma} \mu_{\sigma}} \pi d_{\sigma} = \frac{\pi D_{\sigma} B_{\sigma}}{\mu_{\sigma}}$$

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

ცვლადი დენების წრიული კვეთის ზეგამტარული მრავალძარღვიანი სადენი შეიცავს ზეგამტარულ ძარღვებს-1, მოთავსებული მატრიცაში-2,

სადენის მთლიან კვეთში, დაშორებული ერთმანეთის მიმართ b მანძილით.
 3-სადენის გარე იზოლირებული გარსი (ნახ.3.4)



ნახ.3.4. მრავალძარღვიანი ზეგამტარული სადენი ლოკალიზებული მაგნიტური ველით

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

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

სადაც: d_s -ზეგამტარული ძარღვების დიამეტრი

D - ზეგამტარული სადენის დიამეტრი

t - ზეგამტარული ძარღვების განლაგების ბიჯი

სადენში ზეგამტარული ძარღვების რიცხვი განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

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

ლმძზგ სადენი ზედაპირზე მაგნიტური ინდუქციის სიდიდე:

$$B_o \frac{Ni_s}{\pi D} = \frac{D}{d_s} \frac{i_s}{\pi D}$$

რადგანაც $i_s = B_j \pi d_s$, მაშინ მისი ჩასმით B_o გამოსახულებაში, მივიღებთ:

$$B_o = B_s = B_j$$

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

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

კრიტიკული დენი I_j ლმძზგ სადენის, როცა შევსების კოეფიციენტი

$$K_{\vartheta} = \frac{d_s}{D}$$

ტოლია :

$$I_j = Ni_{sj} = \frac{D}{\mu_o d_s} B_j \pi d_s = \frac{\pi D B_j}{\mu_o}$$

მიღებული კრიტიკული დენის, მნიშვნელობა ტოლია ჩვეულებრივი მრავალძარღვა ზეგამტარული სადენის კრიტიკული დენის მნიშვნელობისა მისი კვეთის მჭიდროდ შევსებით ზეგამტარული ძარღვებით ე.ი. როცა $K_{\vartheta} = 1$.

ძარღვების რიცხვი ლოკალიზებულ მრავალძარღვა ზეგამტარულ სადენში მცირდება შედარებით ჩვეულებრივი მრავალძარღვა ზეგამტარულ სადენთან $\frac{D}{d_s}$ -ჯერ, რაც შესაბამისად ამცირებს ზეგამტარული მასალის

ხარჯს და აუმჯობესებს მოწყობილობის ტექნიკურ ეკონომიკურ მაჩვენებლებს.

ჩატარებული სამუშაოს შედეგად შეიძლება ასეთი დასკვნა გავაკეთოდ:

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

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

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

3.4. ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის სისტემის მაგნიტურ წრედში ამორფული შენადნობების გამოყენების თანამედროვე ტენდენციები

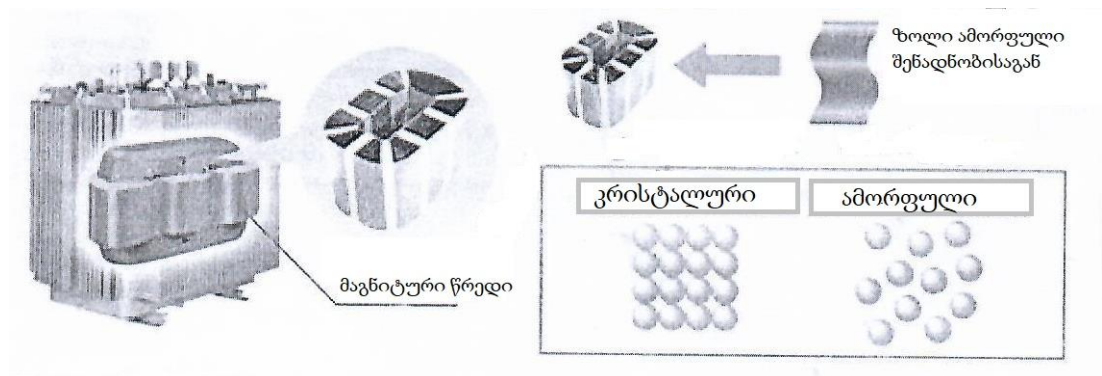
ამორფული შენადნობების გამოყენება ძალიან ტრანსფორმატორების მაგნიტურ წრედებში დაიწყო შედარებით ახლახან. ამორფული შენადნობი წარმოადგენს პრეციზიული შენადნობის გარკვეულ სახეს. მისი განსხვავებული მახასიათებელი კრისტალური სტრუქტურის შენადნობისაგან, წარმოადგენს ფიზიკური და ქიმიური თვისებების მთელ კომპლექსს. ამორფული შენადნობის ერთ-ერთ ძირითად განსხვავებას ელექტროტექნიკური ფოლადისაგან წარმოადგენს ატომების განლაგებაში პერიოდულობის არარსებობა. აგრეთვე ამორფული შენადნობები განსხვავდებიან კრისტალური შენადნობებისაგან კოროზიასთან მიმართებაში დიდი მდგრადობით, ისინი რამოდენიმეჯერ მტკიცეა და ხასიათდებიან უკეთესი ელექტრომაგნიტური მახასიათებლებით [6-13].

გაცივების მეთოდის და ქიმიური შენაერთების შერჩევის გზით, რომელიც მიმდინარეობს სიჩქარით, კრისტალიზაციის სიჩქარესთან გადაჭარბებით (დისკზე, რომელიც ბრუნავს დიდი სიჩქარით, გადაიღვრება გამზადებული ნადნობი), მიღწევა მეტალის ამორფული მდგომარეობა. როგორც კი ნადნობი მოხვდება მბრუნავ დისკზე, ის უეცრად ცივდება და ღებულობს ლენტის ფორმას სისქით 15÷60 მკმ. მიღებული ლენტისგან მიმდინარეობს მაგნიტური წრედის დამზადება სხვადასხვა ფორმით. თანამედროვე ტექნოლოგიების საშუალებით შესაძლებელი გახდა მიღება მაგნიტური გულარას სხვადასხვა დიამეტრებით, დაწყებული რამოდენიმე მილიმეტრიდან დამთავრებული 0,5 მეტრის დიამეტრით. თერმომაგნიტური დამუშავების გზით მიმდინარეობს შენადნობზე სპეციალური თვისების მინიჭება (შეიძლება მივიღოთ ჰისტერეზისის

ყულფი განსაზღვრული ფორმით): სტრუქტურა ხდება ნაწილობრივ კრისტალიზირებული, ამორფული ან ნანოკრისტალური.

1988 წელს Hitachi Metals ფირმის მიერ პირველად იყო დამუშავებული ნანოკრისტალური შენადნობი.

ნახ. 3.5. ნაჩვენებია მაგნიტური წრედი კრისტალური და ამორფული ატომების განლაგებით, ზოლი ამორფული შენადნობისაგან.



ნახ.3.5. კრისტალური და ამორფული ატომების განლაგება, ზოლი ამორფული შენადნობისაგან, მაგნიტური წრედი

გულარას ყველა მაგნიტური წრედის ლენტაზე (10÷20) ნმ დიამეტრით განლაგებული კრისტალიტის მეშვეობით მიიღება ნანოკრისტალური სტრუქტურული ზოლი მინიმალური კოერციტიული ძალით და მაქსიმალური მაგნიტური შეღწევადობით. შედარებით მაღალი ხვედრითი წინაღობის (110÷120) მკ ომი/სმ, და ლენტის უმნიშვნელო სისქით, გამოჩნდა შესაძლებლობა მიღწევისა მინიმალური კოერციტიული ძალის და მაქსიმალური მაგნიტური შეღწევადობისა.

მაგნიტური წრედებში დამზადებული ფერიტისაგან, პერმალოისაგან, ელექტროტექნიკური ფოლადისაგან, გაცილებით მეტია ხვედრითი მაგნიტური დანაკარგები, ვიდრე მაგნიტური წრედებში დამზადებული ნანოკრისტალური და ამორფული შენადნობისაგან. ასეთ გულარას გააჩნია

შედარებით მაღალი საწყისი და მაქსიმალური შეღწევადობა და ასევე მაღალი გაჯერების ინდუქცია მაღალი სიხშირეებზე მუშაობის დროს. მაგნიტური წრედები, დამზადებული ამორფული შენადნობებისაგან თავისი ფიზიკური თვისებებით, ფართოდ გამოიყენება მეტროლოგიაში, სახელდობრ დენისა და ძაბვის მზომი ტრანსფორმატორების კონსტრუირების დროს, აგრეთვე ძალოვანი ტრანსფორმატორების დამზადების დროს.

მაგნიტურ წრედებში, რომლებშიც, ჩვეულებრივ გამოიყენება ლენტი ამორფული შენადნობისაგან შეიცავს რკინას (Fe)-78%, ბორს (B)-13% და სილიციუმს (Si)-9%. ამერიკული კომპანიის Metglas-მონაცემებით განმანაწილებელი ქსელების ძალოვან ტრანსფორმატორებში, რომლებშიც გამოიყენება მაგნიტური წრედი ელექტროტექნიკური ფოლადისაგან დანაკარგები წელიწადში შეადგენს 8% მისი შესყიდვის ღირებულებიდან. ცხრილი 3.1-ში მოცემულია ძალოვანი ტრანსფორმატორების საშუალო უქმი სვლის (უს) დანაკარგები 10 კვ ნომინალურ ძაბვაზე და (25÷2500) კვა სიმძლავრეზე.

მაგნიტურ წრედში ამორფული შენადნობით, გარდა დანაკარგების შემცირებისა, მცირდება აგრეთვე დამაგნიტების დენის სიდიდე. შედეგად:

- მცირდება ტრანსფორმატორის ტემპერატურა და იზრდება მისი მომსახურების ვადა;
- რამოდენიმეჯერ მცირდება დანახარჯები მომხმარებლებზე ელექტროენერჯის გადაცემის დროს;
- ადგილი აქვს ქვეყნის ენერგეტიკაში ელექტრომომხმარების საერთო შემცირებას; და შედეგად არსებითად მცირდება საწვავის ხარჯი ელექტროენერჯის გამომუშავებისთვის.

საზღვარგარედ პირველი განმანაწილებელი სიმძლავრით 630-1000 კვა ამორფული გულარათი იყო დამზადებული 10 წლის წინ. მოცემული მიმართულებით ყველაზე მეტად გამოირჩევა აშშ, ჩინეთი და ინდოეთი. დაწყებული 2009 წლიდან, რიგი ევროპული განმანაწილებელი კომპანიებმა

აგრეთვე დაამუშავეს რამოდენიმე ტრანსფორმატორი სიმძლავრით 400 კვა ამორფული ლენტისაგან დამზადებული გულარით. 2012 წელს პირველად რუსეთში დაიწყო გამოშვება ძალოვანი ტრანსფორმატორებმა ამორფული გულარით ATMF ტიპის.

ცხრილი 3.1. ძალოვანი ტრანსფორმატორების საშუალო უქმი სვლის დანაკარგები 10კვ ნომინალურ ძაბვაზე და (25-2500)კვა სიმძლავრეზე

სამფაზა ტრანსფორმატორის სიმძლავრე 10 კვ ძაბვაზე კვა	საშუალო უ.ს კმდანაკარგები, მაგნიტური წრედი-სატრანსფორმატორო ფოლადი SiFe ვტ	საშუალო უ.ს. დანაკარგები, მაგნიტური წრედი-ამორფული შენადნობი Fe78B13Si9 ვტ	დანაკარგების შედარებითი შემცირება, %
25	100	28	72
40	140	39	72
63	180	50	72
100	260	66	75
250	520	150	71
630	1000	280	77
1000	1700	350	80
1600	2100	490	77
2500	2700	550	80

დამამზადებელი ფირმა ცნობილია „ტრანსფორმერ“-ის სახელწოდებით.

ეხლა განვიხილოდ ენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის კვების წყაროსათვის შექცევადი ტირისტორული

გარდამქმნელი ტრანსფორმატორის მაგნიტურ წრედში ამორფული შენადნობების გამოყენების თანამედროვე ტენდენციები:

- ჩატარებული ანალიზმა აჩვენა, რომ ტრანსფორმატორები მაგნიტური წრედით ამორფული შენადნობებისაგან გამოირჩევა უფრო ენერგოეფექტური, ვიდრე ტრანსფორმატორები ტრადიციული მაგნიტური წრედებით ელექტროტექნიკური ფოლადისაგან.
- აუცილებელია განვითარდეს წარმოება ამორფული შენადნობების და განხორციელდეს ეტაპობრივი გადასვლა მათი გამოყენებისა მაგნიტურ წრედებში სხვადასხვა დანიშნულების თანამედროვე ტრანსფორმატორებში.
- შემდგომი შესწავლა ამორფული შენადნობების თვისებების საშუალებას მოგვცემს განისაზღვროს მიზანდასახულება მათი გამოყენებისა არა მხოლოდ სტატიკური ელექტრომაგნიტური აპარატებში, არამედ ელექტრული მანქანების ელექტრომაგნიტურ სისტემებში.

3.5. ელექტროენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური

მაგროვებლის ფუნქციონირების საანგარიშო მათემატიკური მოდელი აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულატორის რეჟიმში

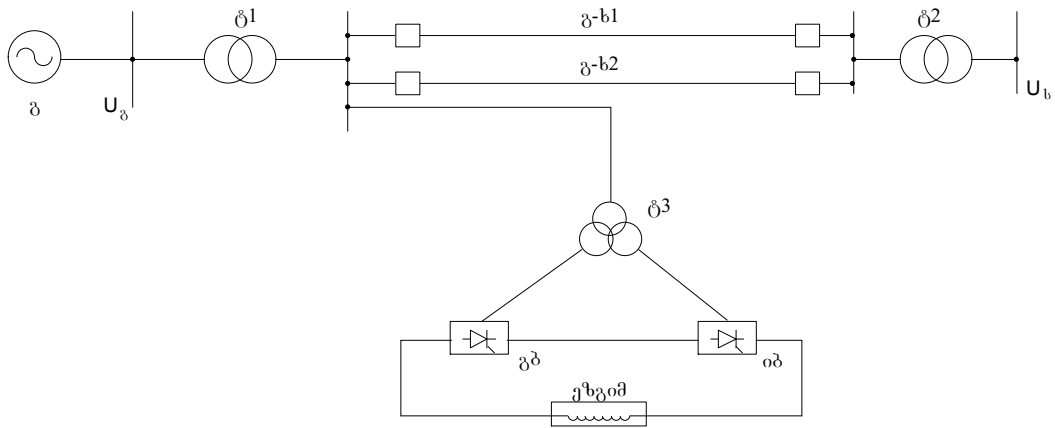
სიმძლავრეების გადანაწილების ანგარიშის პროგრამაში ეზგიმ განიხილება ენერგოსისტემის კვანძში როგორც აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების სწრაფმოქმედი რეგულატორი, რომელიც უზრუნველყოფს:

მაბვის შენარჩუნებას ელექტროსისტემის კვანძში საჭირო დონეზე;
ელექტროგადაცემის გამტარუნარიანობის გაზრდას;

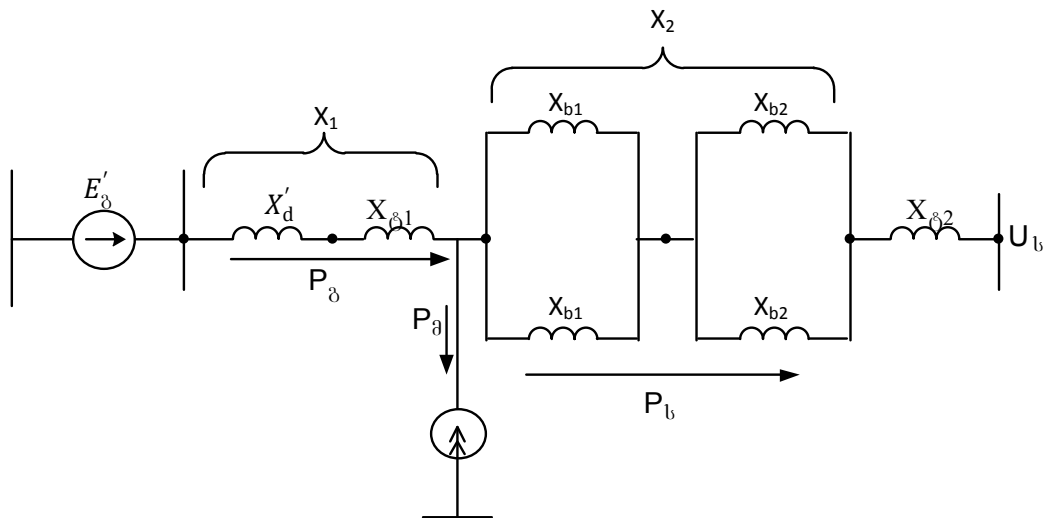
ელექტროგადაცემაში სიმძლავრეების რყევების აღძვრის დროს, ელექტროსისტემის მიმღებში შემფოთების გავრცელების ლოკალიზაციას.

დინამიკური მდგრადობის ანგარიშის პროგრამაში ეზგიმ განიხილება, როგორც სწრაფმოქმედი რეგულატორი, უპირატესად აქტიური სიმძლავრისა, დადგმული ელექტროსადგურში და უზრუნველყოფს გენერატორების როტორის შემობრუნების კუთხის აჩქარების შეზღუდვას ავარიის შემდგომ რეჟიმებში ელექტროგადამცემი ხაზის წარმატებითი თუ არაწარმატებითი ავტომატური განმეორებითი ჩართვის მოქმედების გათვალისწინებით. ეზგიმ, შესაბამისად დადგმული ელექტროსისტემის კვანძში, არეგულირებს ძაბვის მოდულსა $U=const$ და არგუმენტს, ხოლო ეზგიმ, დადგმული ელექტროსადგურზე, არეგულირებს გენერატორების მიერ გაცემული აქტიური სიმძლავრის მნიშვნელობას ელექტროსისტემაში $P_g=const$ პირობის დაცვით. ეზგიმ-ის ენერგეტიკული პარამეტრები დამოკიდებულია მისი ჩართვის ადგილზე. თუ ეზგიმ ჩაირთვება ელექტროსადგურში, მაშინ მიზანშეწონილია მისი ზემოქმედება აქტიური სიმძლავრის მართვაზე, ხოლო თუ ეზგიმ ჩაირთვება ელექტროენერგეტიკული სისტემის კვანძში, მაშინ პრიორიტეტულია მისი ზემოქმედება რეაქტიული სიმძლავრის მართვაზე, რათა ეფექტურად განხორციელდეს ძაბვის რეგულირება ელექტროსისტემის კვანძში.

განვიხილოთ ელექტროსისტემის ელექტრული სქემა, რომელიც ნაჩვენებია ნახ.3.6. ელექტროსისტემა ენერგიას დებულობს ელექტროსადგურებიდან (გ- ეკვივალენტური სინქრონული გენერატორი) ტ1, გ-ხ1, გ-ხ2 და ტ2-ის საშუალებით [35-37]. ეზგიმ-ი ჩართულია ტ1 ტრანსფორმატორის ქვესადგურის სალტესთან სამგრაგნილა ტ3 ტრანსფორმატორით და შექცევადი ტირისტორული გარდამქმნელებით, რომელიც ასრულებს ცვლადი დენის ქსელთან ეზგიმ-ის კავშირისა და მართვის ფუნქციას.



ნახ.3.6. ელექტროსისტემის ელექტრული სქემა: იბ-ინვერტორის ბლოკი; გბ-გამმართველის ბლოკი; ტ1, ტ2-ძალოვანი ტრანსფორმატორები ტ3-შექცევადი ტირისტორული გარდამქმნელის ტრანსფორმატორი; გ-ხ1, გ-ხ2 – გადამცემი ხაზები; გ-ეკვივალენტური სინქრონული გენერატორი; ეზგიმ-ელექტროენერჯის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი



ნახ.3.7. ელექტროგადამცემის საანგარიშო სქემა

შექცევადი ტირისტორული გარდამქმნელი შედგება ორი გარდამქმნელი ბლოკისაგან (იბ, გბ), შეერთებული ტ3-ის ცალკეულ გრაგნილებთან და შეერთებულია მიმდევრობით ეზგიმ-თან. ეზგიმ მუშაობს სამ რეჟიმში:

1. ხანგრძლივ დამყარებულ რეჟიმში მუდმივი დენის მნიშვნელობისას, რომელიც შეესაბამება ეზგიმ-ის დენის ნომინალურ მნიშვნელობას. აღნიშნულ რეჟიმში პირველი ბლოკი ჩართულია როგორც გამმართველი, ხოლო მეორე ბლოკი კი როგორც ინვერტორი. ამ შემთხვევაში ტ3-ის მეორად გრაგნილებში დენებს გააჩნიათ საწინააღმდეგო მიმართულება და ენერგეტიკული კავშირი ეზგიმ-სა და ელექტრულ სისტემას შორის მინიმალურია.

2. ავარიის მომენტში მოკლე დროით გარდამავალი რეჟიმის დროს პირველი ბლოკი გადადის გამმართველის რეჟიმიდან ინვერტორულ რეჟიმში, იცვლება ტ3-ში დენის მიმართულება და ენერგია, დაგროვილი ეზგიმ-ში, მიეწოდება მომხმარებლებს.

3. მოკლე დროით გამმართველ-ინვერტორულ რეჟიმში დენის ზრდით 0-დან $I_{ნომ}$. –მდე და ეზგიმ-ში ენერგიის დაგროვებით მოცემულ რეჟიმში, როგორც ხანგრძლივ რეჟიმში, არ უნდა იმოქმედოს გავლენა მომხმარებლის მუშაობაზე. მოცემული რეჟიმის უზრუნველყოფა ხორციელდება გამმართველის და ინვერტორის ბლოკების რეგულირების კუთხეების (α_1, α_2) ავტომატური მართვის გზით. გამმართველები და ინვერტორები აწყობილია GTO ჩამკეტი ტირისტორების ბაზაზე. ტირისტორული გარდამქმნელები უზრუნველყოფილია მართვის სისტემით, რომელმაც უნდა ჩართოს ეზგიმ-ი აუცილებელი სწრაფქმედებით, შეიყვანოს ენერგია და უზრუნველყოს ხანგრძლივი მუშაობა გამმართველისა და ინვერტორის ბლოკების.

ტირისტორული გარდამქმნელი უზრუნველყოფს ეზგიმ-ის აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების მართვას

$$\left. \begin{aligned} p &= \cos\alpha_1 + \cos\alpha_2; \\ q &= \sin\alpha_1 + \sin\alpha_2; \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

სადაც p, q ეზგიმ-ის აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების ფარდობითი მნიშვნელობებია; α_1, α_2 – ტირისტორების მართვის კუთხეები.

ელექტროსისტემის კვანძთან მიმართებაში ეზგიმ შეიძლება წარმოვიდგინოთ სინუსოიდური დენის წყაროდ ან აღნიშნული კვების წყაროს ეკვივალენტური მიმდევრობით შეერთებული R და X წინაღობებით. დენის პირველი რიგის ჰარმონიკის ამპლიტუდა და ფაზა, ან შესაბამისად ეკვივალენტური წინაღობების მნიშვნელობები, ფუნქციონალურად დაკავშირებულია ტირისტორული გარდამქმნელის მართვის კუთხეებზე და ეზგიმ-ში შემავალი გამართული მუდმივი დენის I_a სიდიდეზე. ეკვივალენტური წინაღობის R დადებითი მნიშვნელობა შეესაბამება ეზგიმ-ის მიერ მოთხოვნილ აქტიურ სიმძლავრეს, უარყოფითი მნიშვნელობა კი – ეზგიმ-ის მიერ გაცემულ აქტიურ სიმძლავრეს. ეკვივალენტური რეაქტიული წინაღობის X მნიშვნელობა შეესაბამება მოთხოვნილ რეაქტიულ სიმძლავრეს. ეზგიმ-ის ბაზისურ მოდელად განიხილება ინდუქციური კოჭა L უნდუქციურობით, გრაგნილებში აქტიური დანაკარგების გათვალისწინების გარეშე. ეზგიმ-ის საანგარიშო მოდელის შედგენისათვის ძირითად პარამეტრებს წარმოადგენს: მაქსიმალური დაგროვილი ენერგია W_0 ; მაქსიმალური გამართული დენი I_{a0} , რომელიც შეესაბამება აღნიშნულ დაგროვილ ენერგიას; გამართული დენის ცვლილების მაქსიმალური სიჩქარე dI_{a0}/dt , რომლის მნიშვნელობა შეზღუდულია ძაბვის დასაშვები მნიშვნელობით მის გამომყვანებზე; დასაშვები მინიმალური ენერგია W_{\min} , რომლის დროსაც ხორციელდება მართვის საჭირო კანონი იმის და მიხედვით, თუ რა რეჟიმში მუშაობს ეზგიმ (დამუხტვის, განმუხტვის ან ენერგიის შენახვის).

ეხლა განვიხილოთ ეზგიმ-ის ფუნქციონირების საანგარიშო მოდელი აქტიური სიმძლავრის რეგულატორის რეჟიმში.

ეზგიმ-ის მუშაობა აქტიური სიმძლავრის რეგულატორის რეჟიმში უზრუნველყოფს ელექტროსადგურში გენერატორების სინქრონიზმის შენარჩუნებას, ელექტროსისტემაში შემფოთების შემთხვევაში. შემფოთების გამომწვევ მიზეზად შეიძლება განვიხილოთ მოკლე შერთვა ელექტროგადამცემ ხაზზე ავტომატური განმეორებითი ჩართვის

მოქმედების გათვალისწინებით, ელექტროგადაცემის კუთხის δ -ს უეცარი ცვლილების დროს. ამავე დროს ეზგიმ ელექტროსადგურზე უზრუნველყოფს სიხშირის შენარჩუნებას ნომინალური პარამეტრების ფარგლებში. ნახ. 3.7-ზე ნაჩვენებია უმარტივესი ელექტროგადაცემის საანგარიშო სქემა, რომელიც გამოსაკვლევია რეჟიმის ანალიზის საშუალებას იძლევა. საანგარიშო სქემაში გენერატორები ჩანაცვლებულია გარდამავალი ელექტრომამოძრავებელი ძალით E'_g და გარდამავალი ინდუქციური წინაღობის გრძივი მდგენელით X'_d , U_s არის მიმღები სისტემის ძაბვა; ეზგიმ წარმოდგენილია დენის წყაროს $I_a e^{j\alpha_s}$ სახით, რომელიც ორიენტირებულია სისტემის ძაბვის მიმართ. I_a ეზგიმ-ის ხაზური დენის პირველი რიგის ჰარმონიკის მოქმედი მნიშვნელობაა.

ელექტროსისტემაში შემფოთების დროს გამოწვეული ელექტროგადაცემის პარამეტრების უეცარი ცვლილებით, ეზგიმ ასრულებს პირობას, $P_g = \text{const}$ და, ფუნქციონალურად კვალდაკვალ დაკავშირებულია ელექტროგადაცემის δ კუთხის ცვლილებასთან [36].

$$\left. \begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= \left(P_{\delta} - P_{\text{ფ}} S - P_{\delta} \right) \frac{100\pi}{T_j}; \\ \frac{d\delta}{dt} &= S, \end{aligned} \right\} \quad (3.28)$$

სადაც s გენერატორის როტორის სრიალია სინქრონული ღერძის მიმართ; P_{δ} $P_{\text{ფ}}$ -ტურბინის და გენერატორის ელექტრომაგნიტური სიმძლავრე; $P_{\text{ფ}}$ -დემფირების კოეფიციენტი; T_j -გენერატორის ინერციის მუდმივა, მიყვანილი ბაზისურ სიმძლავრესთან.

ელექტროგადაცემის სიმძლავრეებისათვის ეზგიმ-ის მოქმედების გათვალისწინებით შეიძლება შევადგინოთ შემდეგი განტოლებები:

$$\left. \begin{aligned} P_{\delta} &= E'_g U_L Y_{12} \sin \delta + E'_g I_g X_2 Y_{12} \cos(\delta - \alpha_g); \\ P_L &= U_L E'_g Y_{12} \sin \delta - U_L I_g X_1 Y_{12} \cos \alpha_g; \\ Q_L &= -U_L^2 Y_{12} + U_L E'_g Y_{12} \cos \delta + U_L I_g X_1 Y_{12} \sin \alpha_g; \\ P_g &= I_g Y_{12} [E'_g X_2 \cos(\delta - \alpha_g) - U_L X_1 \cos \alpha_g]; \\ Q_g &= I_g Y_{12} [E'_g X_2 \sin(\delta - \alpha_g) - U_L X_1 \sin \alpha_g + I_g X_1 X_2]; \\ Y_{12} &= 1/(X_1 + X_2), \end{aligned} \right\} \quad (3.29)$$

სადაც P_8 გენერატორის აქტიური სიმძლავრეა; P_s, Q_s -სისტემის მიერ მოთხოვნილი აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრე; P_a, Q_a -ეზგიმ-ის აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრე. ეზგიმ-ის ელექტროსისტემის კვანძში ჩართვის დროს ძაბვის კომპლექსური მნიშვნელობა

$$Ue^{j\beta} = \frac{U_s^2 + Q_s X_s}{U_s} + j \frac{P_s X_s}{U_s} \quad (3.30)$$

ეზგიმ-ის ხაზური დენის პირველი რიგის ჰარმონიკის მოქმედი მნიშვნელობა I_a , როდესაც ეზგიმ წარმოდგენილია, როგორც დამაკავშირებელი მოწყობილობა ელექტროსისტემასთან ტირისტორული გარდამქმნელით, გვექნება

$$I_a = \frac{2\sqrt{6}I_d}{\pi k_g} \cos\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) \quad (3.31)$$

ტირისტორული გარდამქმნელის მართვისა და კომუტაციის კუთხეებს ექნება შემდეგი სახე.

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \arccos\left(\cos\varphi_1 + \frac{X_s I_d}{6\sqrt{2}U_s}\right); \\ \alpha_2 &= \arccos\left(\cos\varphi_2 + \frac{X_s I_d}{6\sqrt{2}U_s}\right); \\ \gamma &= \arccos\left(\cos\alpha + \frac{X_s I_d}{3\sqrt{2}U_s}\right) - \alpha, \end{aligned} \right\} \quad (3.32)$$

სადაც U_s ტირისტორული გარდამქმნელი ტრანსფორმატორის გრანდილის ფაზური ძაბვაა.

ეზგიმ-ის ხაზური დენის პირველი რიგის მოქმედი მნიშვნელობა (3.31 დამოკიდებულია, როგორც მართვის კუთხეებზე, ისე გამართული დენის I_d ცვლილებაზე ეზგიმ-ის ენერჯის შენახვის, განმუხტვის და დამუხტვის რეჟიმებში:

$$\frac{dW_a}{dt} = P_a; \quad I_d = \sqrt{2W_a/L}, \quad (3.33)$$

სადაც W_a, L ეზგიმ-ის ენერჯია და ინდუქციურობაა. φ_1, φ_2 და φ კუთხეებს შორის კავშირი შეირჩევა ეზგიმ-ის და ტირისტორული გარდამქმნელის მუშაობის საჭირო რეჟიმების შესაბამისად, კერძოდ, როდესაც

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi \text{ და } \cos\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) = 1, \quad (3.34)$$

ხორციელდება გარდამქმნელის სიმეტრიული მართვა $\alpha_1 = \alpha_2$ პირობის შესრულებით. კუთხეების აღნიშნული თანაფარდობების დროს ეზგიმ ახდენს ელექტროსისტემასთან მაქსიმალური აქტიური სიმძლავრის გაცვლას, ითხოვს ელექტროსისტემიდან მაქსიმალურ რეაქტიულ სიმძლავრეს და ადაბლებს ძაბვას ჩართვის კვანძში. ეფექტური რეჟიმი მიიღება მინიმალური მოთხოვნილი რეაქტიული სიმძლავრისას

$$\varphi_2 = 0, \varphi_1 = 2\varphi, \cos\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) = \cos\varphi \quad (3.35)$$

ეზგიმ-ის მუშაობის ანალიზი ელექტროსისტემაში დინამიურ რეჟიმში, გამოწვეული ელექტროგადაცემის პარამეტრების უეცარი ცვლილებებით, ხორციელდება განტოლება (2)-ისა და ეზგიმ-ის დენის რეგულატორის დანაყენის ცვლილების განტოლების ერთობლივი ამოხსნით

$$\left. \begin{aligned} \frac{dI_{\text{დ.რ.}}}{dt} &= \frac{U_{\text{L}}(\sin\delta - \sin\delta_0)}{T_{\text{g}}X_{\text{g}}} - \frac{I_{\text{დ.რ.}}}{T_{\text{g}}} \\ I_{\text{დ.რ.}} &= T_{\text{g}} \cos(\delta - \alpha_{\text{g}}) = T_{\text{g}} \cos(\delta - \beta + \varphi) \end{aligned} \right\} (3.36)$$

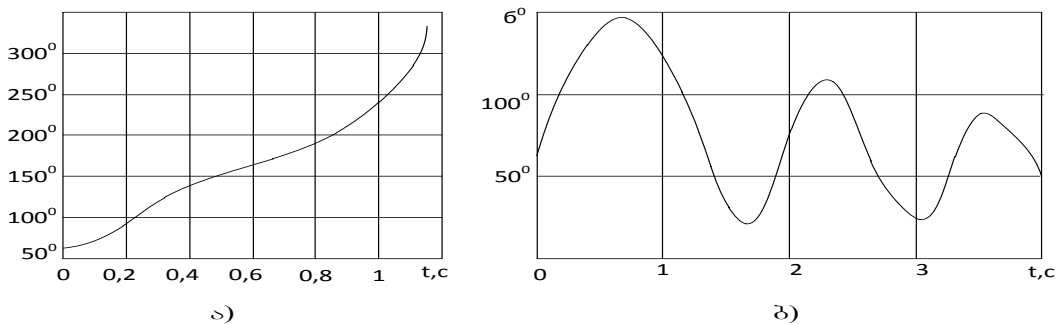
სადაც δ_0 გადაცემის კუთხეა დამყარებულ რეჟიმში; T_{a} - ეზგიმ-ის დენის რეგულატორის დროის მუდმივა; β - ძაბვის ვექტორის არგუმენტი ეზგიმ-ის ელექტროსისტემაში ჩართვის კვანძში, მიმღები ელექტროსისტემის ძაბვის მიმართ; φ - ეზგიმ-ის დენის არგუმენტი ელექტროსისტემის კვანძში ჩართვის ძაბვის ვექტორის მიმართ.

დამუშავებული საანგარიშო მოდელის შესაბამისად ელექტროსისტემაში ავარიული პროცესების ანალიზი იყოფა ორ ეტაპად; პირველ ეტაპზე (3.28) და (3.36) განტოლებების ამოხსნით (3.29) განტოლების გათვალისწინებით, განისაზღვრება ეზგიმ-ის მართვადი მოცულობის ზემოქმედება, რომელიც აუცილებელია გენერატორების დინამიკური მდგრადობის შენარჩუნებისათვის. მეორე ეტაპზე (3.29)-(3.35) განტოლებების შესაბამისად იანგარიშება ეზგიმ-ის ენერგეტიკული პარამეტრები და ტექნიკური მახასიათებლები, რომლებიც უზრუნველყოფენ მართვადი ზემოქმედების საჭირო ცვლილებას.

ეზგიმ-ის ფუნქციონირების დამუშავებული მათემატიკური მოდელი აქტიური სიმძლავრის რეგულატორის რეჟიმში, გამოყენებული იქნა მისი ენერგეტიკული მახასიათებლების აგებისათვის და შეფასებისთვის, რომელიც უზრუნველყოფს გენერატორების მდგრად მუშაობას ელექტროსისტემაში ავარიის დროს (ნახ.3.7).

განხილულ იქნა სამფაზა მოკლე შერთვის რეჟიმი $t_{ა.გ.}=0.14$ წმ ხანგრძლივობით ხაზის ერთ ჯაჭვზე ℓ_1 წრედის გამორთვით და შესაბამისად წარმატებული ავტომატური განმეორებითი ჩართვით (აგჩ)-ით შუალედით $t_{აგ} = 1$ წმ.

ელექტროგადაცემის პარამეტრებია: გენერატორი $\rho_{\sigma} = 1200$ მგვტ; $\cos\varphi_{\sigma} = 0.85$; $T_j = 8$ წმ; ტრანსფორმატორები: $S_{\sigma} = 1500$ მგვ.ა; $U_{ა.გ.} = 10\%$; ელექტროგადამცემი ხაზები: ორჯაჭვა, $\ell_1 = 200$ კმ; $\ell_2 = 400$ კმ; $X_{\ell_3} = 0,34$ ომი/კმ; პარამეტრების გარდობითი მნიშვნელობები; $U_{\ell} = 1$; $P_{\theta} = 1$; $P_d = 0,15$; $X'_d = 0,3$; $X_{\theta 1} = X_{\theta 2} = 0,1$; $X_{\ell 1} = 0,384$; $X_{\ell 2} = 0,768$; გენერატორის ნომინალური სიმძლავრის გაცემის რეჟიმში, ნომინალური ძაბვის დროს ($U = 1$) ელექტროსადგურის მაღალი ძაბვის სალტეზე (ეზგიმ-ის ჩართვის კვანძში) $E'_g = 1,26$; გადაცემის ნომინალური კუთხე $\delta_{\sigma} = 58,7^{\circ}$; ეზგიმ-ის ინდუქციურობა $L = 2,2$ ჰნ. ნახ. 3.8-ზე ნაჩვენებია გადაცემის კუთხის ცვლილება $\delta = f(t)$ განსახილველ ავარიულ რეჟიმისთვის

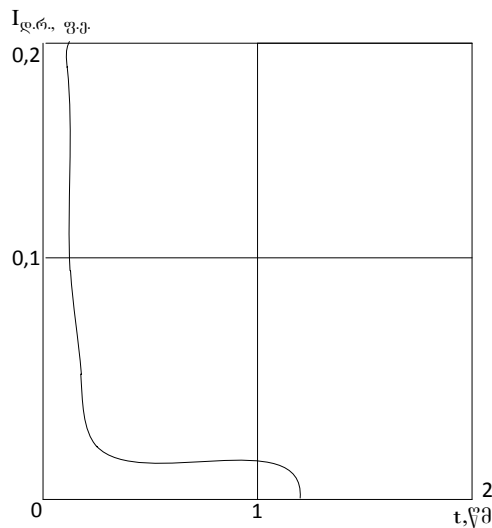


ნახ.3.8. გადაცემის კუთხის ცვლილება ავარიულ რეჟიმში;
ა) ეზგიმ-ის გარეშე; ბ) ეზგიმ-ის მუშაობის დროს

დენის რეგულატორის $I_{დ.რ.}$ დანაყენის ცვლილება მდგრადობის შენარჩუნების საჭიროებისათვის ნაჩვენებია ნახ.3.9-ზე.

რეგულატორი მუშაობს $T_i=0,1$ წმ. დროის მუდმივით და ეზგიმ-ს გამორთავს ელექტროსისტემიდან $\delta=\delta_0$ მომენტში.

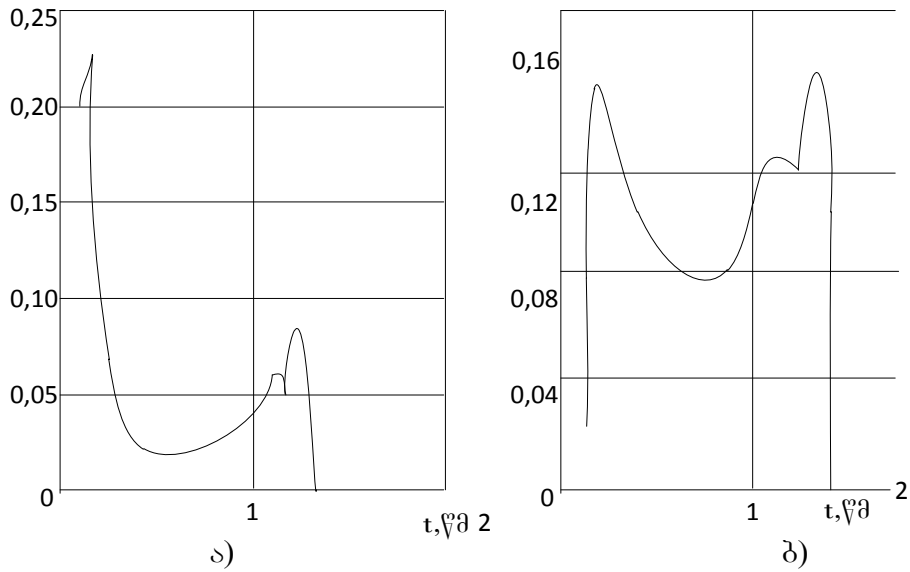
დენის რეგულატორის ცვლილებამ უზრუნველყო სისტემის დინამიკური მდგრადობის შენარჩუნება.



ნახ. 3.9. ეზგიმ-ის დენის რეგულატორის დანაყენის ცვლილება.

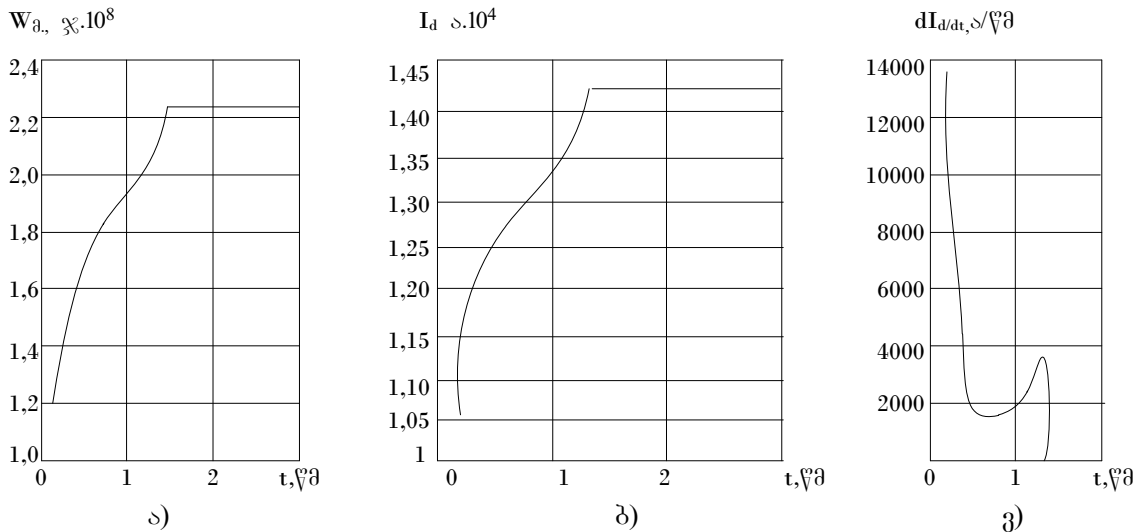
ეზგიმ-ის აქტიური (ნახ.3.10ა) და რეაქტიული (ნახ.3.10ბ) სიმძლავრეების ცვალებადობის ხასიათის გათვალისწინებით გენერატორის როტორის გაქცევის პროცესის შეზღუდვით ხორციელდება ტირისტორული გარდამქმნელი ტრანსფორმატორის ტიპიური სიმძლავრის შეფასება.

განხილულ მაგალითში გამოყენებულია ტრანსფორმატორი ჯამური სიმძლავრით $S_{ტფ}=600$ მგვ.ა, ტრანსფორმაციის კოეფიციენტით $k_{ტ}=38,5$, ხაზური ძაბვა ტირისტორული ტრანსფორმატორის გრაგნილების $U_{ბ}=13$ კვ. მოკლე შერთვის ძაბვა მიყვანილი სასისტემო გრაგნილის ნომინალურ სიმძლავრესთან $U_{ა.ა.} = 12,5\%$.



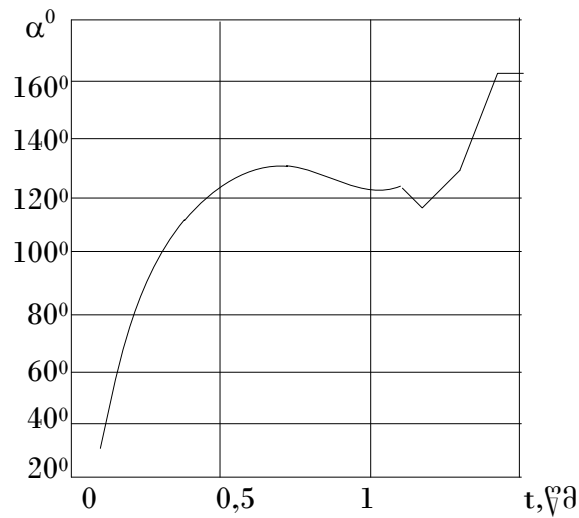
ნახ.3.10. ეზგიმ-ის სიმძლავრის ცვლილება გენერატორის როტორის გაქცევის დემფირების რეჟიმში: ა) აქტიური სიმძლავრე; ბ) რეაქტიული სიმძლავრე

ნახ. 3.11, ა,ბ,გ ნაჩვენებია მაგნიტური ენერჯის W_a , გამართული დენის I_d და მისი წარმოებულის (ცვლილების სიჩქარის) მახასიათებლები.



ნახ.3.11. ეზგიმ-ის ენერგეტიკული მახასიათებლები დინამიკურ რეჟიმში: ა) დაგროვილი ენერჯია; ბ) გამართული დენი; ვ) გამართული დენის ცვლილების სიჩქარე

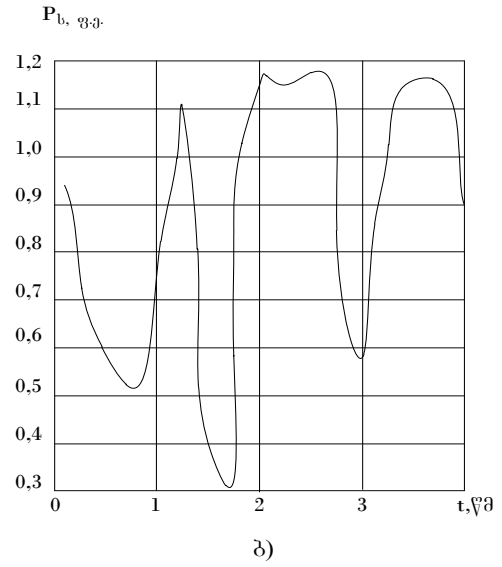
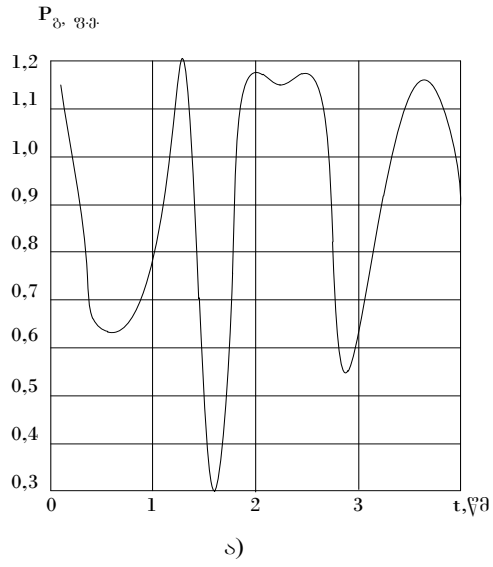
ნახ.3.12-ზე ნაჩვენებია ტირისტორების რეგულირების კუთხის α ცვლილების მახასიათებელი ერთი ბოგირის მუშაობის პროცესში. ვინაიდან ერთი ბოგირი მუდმივად მუშაობს გამმართველის რეჟიმში მინიმალური მართვის კუთხით, მაშინ ეზგიმ-ის გამორთვა ქსელიდან ხორციელდება მეორე ბოგირის გადართვით ინვერტორულ რეჟიმში მაქსიმალური მართვის კუთხით. ჩატარებული შეფასების მიხედვით ვენტილების კომუტაციის კუთხეები არ აჭარბებს 20° .



ნახ.3.12. ბოგირული გარდამქმნელის ვენტილების მართვის კუთხის ცვლილების მახასიათებელი

ნახ.3.13-ზე ნაჩვენებია გენერატორის მიერ გაცემული აქტიური სიმძლავრის P_s ცვლილების მახასიათებელი და სისტემაში მიწოდებული აქტიური სიმძლავრის P_r ცვლილების მახასიათებელი აღნიშნული სიმძლავრეების სხვაობა შეესაბამება ეზგიმ-ის მიერ მოთხოვნილ აქტიურ სიმძლავრეს.

ელექტროსისტემის კვანძში ძაბვის დადაბლება (ნახ.3.6) დაკავშირებულია ეზგიმ-ის მიერ მოთხოვნილი რეაქტიული სიმძლავრის მნიშვნელობასთან, და რიგ შემთხვევებში შეიძლება გამოიწვიოს ვენტილების კომუტაციის მოშლა.



ნახ.3.13. ეზგიმ-ის მუშაობის დროს გადაცემის აქტიური სიმძლავრე დინამიკურ რეჟიმში: ა) გენერატორის სიმძლავრე; ბ) სისტემის სიმძლავრე

4. უსაფრთხოების სპეციალური საკითხები

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

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

4.1. თხევადი კრიოგენული პროდუქტებთან მიმოქცევის

საერთო წესები

თხევადი კრიოგენული პროდუქტების აორთქლების დროს წარმოიქმნება დიდი რაოდენობის გაზი. დახურულ მოცულობაში თხევადი კრიოგენული პროდუქტების აორთქლების დროს იქმნება საშიშროება წნევის მნიშვნელოვანი გაზრდისა. წნევის გაზრდის სიჩქარე დამოკიდებულია თბომიმღების სიდიდეზე და სითხეზე გაზური ბალიშის მოცულობაზე. ასეთი მოვლენების გამორიცხვისათვის ყველა ჭურჭელზე, რომლებიც განკუთვნილია თხევადი კრიოგენული პროდუქტებისათვის, აუცილებლად აყენებენ დამცავი სარქველებს და გამწყვეტ მემბრანებს,

არაკონტროლირებადი წნევის გაზრდის აღმოსაფხვრელად. ავზები, ჭურჭლები და ვანები შეიძლება შეივსოს და გამოყენებული იქნეს მხოლოდ ისეთი კრიოგენული პროდუქტებისათვის, რომლებისთვისაც ისინი დანიშნულია დამამზადებლისაგან, რაზედაც უნდა მოწმოდეს ჭურჭლის შეღებვა და მასზე წარწერა.

თხევადი კრიოგენული პროდუქტებთან მუშაობის დროს საჭიროა დიდი სიფრთხილე, არ დაუშვათ მათი გაშხეფა და ადუღება. შემთხვევითი სხეულის მოხვედრა ვანაში და ჭურჭელში თხევადი კრიოგენული პროდუქტებთან უნდა იყოს სრულად გამორიცხული.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

შენობაში თხევადი ჟანგბადის დაღვრამ შეიძლება გამოიწვიოს ხანძარი ან აფეთქება.

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

თხევადი კრიოგენული პროდუქტები მიეკუთვნება საშიშ ტვირთს. კლასიფიკაცია მათი საშიშროების ხარისხის მიხედვით მოცემულია სახელმწიფო სტანდარტში ГОСТ14433-81 „საშიში ტვირთები“, ხოლო მათი ტრანსპორტირების განსაკუთრებულობა რეგლამენტირებულია საავტომობილო ტრანსპორტით გადაზიდვა ინერტული გაზების და შეკუმშული და თხევადი ჟანგბადის [38].

4.2. თხევადი აზოტთან და ჰელიუმთან მიმართვის განსაკუთრებულობა

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

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

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

4.3. ფეთქებადსაშიში მინარევების შემადგენლობის კონტროლი

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

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

4.4. უსაფრთხოების უზრუნველყოფის ორგანიზაციული საფუძვლები

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

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

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

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

მუშა - მოსამსახურის კვალიფიკაციის ამაღლება უნდა განხორციელდეს პროფესიული სწავლების სპეციალური დებულებით [39].

დასკვნები

1. სამუშაოში განხილულია აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულირების მოწყობილობები, ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლების სახით, ორო ძირითადი კლასის შესრულებით: წრფივი მაგროვებლები, რომელშიც კოჭა (ხვიები) განლაგებულია სწორხაზოვანი ღერძის ირგვლივ, და ტოროიდული მაგროვებელი (θ -ტიპის), რომელშიც კოჭა (ხვიები) მოიცავს რგოლისებრ ცენტრალურ ხაზს.

2. ნაჩვენებია, რომ წრფივი ინდუქციური მაგროვებლები კონსტრუქციულად მარტივია და ტექნოლოგიურია, უზრუნველყოფს აქტიური მასალის კარგ გამოყენებას, მხოლოდ წარმოშობს მნიშვნელოვან მაგნიტურ ველს გარე სივრცეში.

ტოროიდული ინდუქციური მაგროვებელი (θ -ტიპის) არ ჩამოუვარდება წრფივ ინდუქციურ მაგროვებელს წონა-ზომების მაჩვენებლებით, გააჩნია გართულებული კონსტრუქცია, მეორე მხრივ საშუალებას იძლევა პრაქტიკულად სრულად გამორიცხვული იქნეს გარე მაგნიტური ველები, რაც ხშირ შემთხვევაში განსაკუთრებულ როლს თამაშობს ზეგამტარული ელექტრომოწყობილობების დამუშავებისას.

3. მიღებულია ძირითადი თანაფარდობები ორივე კლასის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლების პარამეტრების ანგარიშისთვის.

4. ზეგამტარული სადენების გამტარუნარიანობის გაზრდისათვის და მასში დანაკარგების შემცირებისათვის ზგ სადენი სრულდება მრავალძარღვიანი. იმასთან დაკავშირებით, რომ სადენის ზგ ძარღვი მგრძნობიარეა გარე მაგნიტური ველის მიმართ, მათი დენგამტარუნარიანობა მრავალძარღვიანი ზგ სადენში მნიშვნელოვნად მცირდება ძარღვების რიცხვის გაზრდით და მათ შორის მანძილის შემცირების დროს. ზგ სადენის და ზგ ძარღვის მოცემული დიამეტრის დროს სადენში ძარღვების შემცირებით, მანძილი მათ შორის იზრდება,

მაგნიტური ურთიერთქმედება ძარღვებს შორის სუსტდება და დენგამტარუნარიანობა ზგ ძარღვის იზრდება. ზგ ძარღვის რაოდენობის ოპტიმალური მნიშვნელობა წრიული კვეთის ზგ მრავალძარღვა სადენში: $N_d = \frac{D_b}{d_d}$, აღნიშნული რაოდენობა ზგ ძარღვების შეესაბამება ზგ სადენის შვესების კოეფიციენტს: $K_{შვეს.} = \frac{d_d}{D_b}$.

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

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

6. ენერგიის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის სისტემის მაგნიტურ წრედში ამორფული შენადნობების გამოყენება, კერძოდ ენერგიის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის კვების წყაროსათვის შექცევადი ტირისტორული გარდამქმნელი ტრანსფორმატორის მაგნიტურ წრედში ამორფული შენადნობების გამოყენება საგრძნობლად ამცირებს დანაკარგებს. გარდა დანაკარგების შემცირებისა, მცირდება აგრეთვე დამაგნიტების დენის სიდიდე, რის შედეგად მცირდება ტრანსფორმატორის ტემპერატურა და იზრდება მისი მომსახურების ვადა.

7. დამუშავებულია ელექტროენერგიის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის (ეზგიმ)-ის ენერგოსისტემაში მუშაობის საანგარიშო მათემატიკური მოდელი, დაფუძნებული ეზგიმ-ის წარმოდგენაზე დენის წყაროს სახით ან მისი ეკვივალენტური მიმდევრობით შეერთებული არახაზოვანი აქტიური და ინდუქციური წინაღობებით.

8. დამუშავებული მათემატიკური მოდელი ეზგიმ-ის ფუნქციონირების, აქტიური სიმპლავრის სწრაფი რეგულატორის რეჟიმში რეალიზებული იქნა მისი ენეგეტიკული მახასიათებლების აგებისათვის და შეფასებისათვის, მიღებული მახასიათებლები უზრუნველყოფს გენერატორების მდგრად მუშაობას ელექტროსისტემაში ავარიის დროს.

9. განხილულია უსაფრთხოების სპეციალური საკითხები: თხევადი კრიოგენული პროდუქტებთან მიმოქცევის საერთო წესები; თხევადი აზოტთან და ჰელიუმთან მიმართვის განსაკუთრებულობა; ფეთქებადსაშიში მინარევების შემადგენლობის კონტროლი; უსაფრთხოების უზრუნველყოფის ორგანიზაციული საფუძვლები.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей Л.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Grover F.W. Inductance Calculation. N.-Y.: Van-Nostrand. 1946.
3. Алиевский Б.Л., Орлов В.Л. Расчет параметров магнитных полей осесимметричных катушек (справочник). М.: Энергоатомиздат, 1983.
4. Монгомери Д.Б. Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. М.: Мир, 1971.
5. Казовский Е.Я., Карцев В.П., Шахтарин В.Н. сверхпроводящие магнитные системы. Л.: Наука, 1967.
6. Зенкевич В.Б., Сычев В.В. Магнитные системы на сверхпроводниках. М.: Наука, 1972.
7. Холявский Г.Б. Расчет электродинамических усилий в электрических аппаратах, Л.: Энергия, 1971.
8. Сверхпроводящие машины и устройства/Под ред. с. фонера, Б. Шварца. М.: Мир, 1977.
9. Комин А.В., Кучинский В.Г. Мощные импульсные источники питания. Обзор ОК-21. Л.:НИИЭФА. 1978.
10. Sadedin D.R. Geometry of a Pulse Transformer for Electromagnetic Launching//IEEE Transactions on Magnetics, 1984. Vol. МаG-20, N2, P. 381-384.
11. Егоров С.А., Костенко А.Н. К применению сверхпроводящих сферических катушек в качестве индуктивных накопителей энергии. Препринт Б-0329, Л.: НИИЭФА, 1977.
12. Брехна Г. Сверхпроводящие магнитные системы. М.: Мир, 1976.
13. Некоторые вопросы активного экранирования накопителей цилиндрической геометрии /Ф.З. Гальчук, А.С. Дружинин, В.Г. Кучинский, Б.А. Ларионов. Доклады 2-й Всесоюзной конференции по инженерным

проблемам термоядерных реакторов (23-25 июня 1981г.) т.III. Л.: НИИЭФА, 1982. с. 125-132.

14. Конеев С.М. Магнитная система со сферическим катушками конечной толщины//Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт. 1980. №4. с.163-166.

15. Том Р., Тарр Дж. Магнитные системы МГД-генераторов и термоядерных установок. М.: Энергоатомиздат, 1985.

16. Проблемы накопления и преобразования электромагнитной энергии в импульсных системах питания с индуктивными накопителями /Б.А. Ларионов, Ф.М. Спевакова, А.М. Столов, Э.А. Азизов // сб. статей «Физика и техника мощных импульсных систем» /Под ред. Е.П. Велихова, М.: Энергоатомиздат, 1987. с. 66-104.

17. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1989.

18. Fabrication of Compact Storage Inductor for Railguns/M.L. Spann S.B. Prataр, J.H. Gully e.a.//IEEE Transactions on Magnetics. 1984. Vol. MAG-20, N2. P.215-218.

19.Лейтес Л.В. Тороидальный реактор без сердечника для энергосистем // электричество. 1960. №11. с.76-81.

20. Шафранов В.Д. Об оптимальной форме тороидальных соленоидов// ЖТФ, 1972. Т.XLII, №9. с.178-1791.

21. Колядин Н.М., Касабова И.В. Расчет геометрических, электромагнитных и прочностных параметров D-образной тороидальной магнитной системы с учетом реальных особенностей конструкции. Препринт ИАЭ-3155, ИАЭ им. Курчатова. М.:1979.

22. A 10 mJ Cryogenic Inductor/D.T. Hackworth, D.W. Deis, P.W. Eckels, D. Marchik//IEEE Transactions on Magnetics, 1986. Vol. MAG-22, N6.

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

24. Kwasnitza K., Horwath I. Reduction of the a. c. losses of multifilament superconductors by the use of low twist rate. J. Appl. phys., 1976, V.47,Nº11, P.5038.

25. Глебов И.А., Лаверик Ч., Шахтарин В.Н. Электрофизические проблемы использования сверхпроводимости. Наука Л., 1980.
26. Лутидзе Ш.И., Джафаров Э.А., и др. Сверхпроводящий провод круглого сечения для переменного тока. //А.С. СССР, №1421158, Б.И. №32, М, 1988.
27. Аморфные сплавы и экономия //Энергетика, оборудование, документация [Электронный ресурс]. URL: <http://forca.ru/stati/podstancii/amorfnye-splavy-i-ekonomiya.html> (дата обращения 20.11.2017).
28. Печенкин В. И. Силовые «аморфные» трансформаторы. Будущее в настоящем //Электротехнический рынок. 2012. №5-6 (47-48) [Электронный ресурс]. URL: <http://market.elec.ru/nomer/44/silovyeamorfnye-transformatory-budushee-v-nasyoya/>-(дата обращения 20.11.2017).
29. Магнитопроводы из аморфных сплавов // Каталог продукции ОАО «Ашинский металлургический завод» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.amet.ru/buyers/product/amorf> (дата обращения 20.11.2017).
30. Энергосберегающие трансформаторы с магнитопроводами из аморфных сплавов // Энергосбережение в электроэнергетике и промышленности: материалы VI Международной конференции ТРАВЭК, Москва, 17-18 марта 2010 года. [Электронный ресурс]. URL: <http://ukrm.ru/content/view> (дата обращения 20.11.2017).
31. Трансформаторы с аморфным магнитопроводом //Энергетика, оборудование, документация. [Электронный ресурс]. URL: <http://forca.ru/stati/podstancii/transformatory-s-amorfnyummagnitoprovodom.html> (дата обращения 20.11.2017).
32. Энергосбережение в Европе: применение энергоэффективных распределительных трансформаторов // Энергосбережение. 2003. №6. [Электронный ресурс]. URL: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid-2281 (дата обращения 20.11.2017).
33. Горбунов А.С. Трансформаторно-индукторные модули для комплексных электротехнологических процессов с индукционным нагревом: автореферат дис. ... канд. тех.наук: 05.09.03/Горбунов Антон Сергеевич; [Место защиты: Уфим.гос.авиаци.-техн.ун-т]. Уфа, 2015.16 с.
34. Хавроничев С.В., Сошинов А.Г., Галушак В.С., Копейкина Т.В. Современные тенденции применения аморфных сплавов в магнитопроводах

силовых трансформаторов //Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015.№12-4. С.607-610.

35. კობრეიძე თ, ხელაძე ო. ენერგოსისტემაში აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულირების მოწყობილობის მათემატიკური მოდელი. "ენერჯია", 2017, №4(84), გვ. 30-36.

36. კობრეიძე თ. ელექტროენერჯიის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებელი სისტემის მუშაობის სპეციალური რეჟიმები. "ენერჯია", 2000, №4(16), გვ. 40-45.

37. კობრეიძე თ, ხელაძე ო. ელექტროენერჯიის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის ფუნქციონირების საანგარიშო მათემატიკური მოდელი აქტიური სიმძლავრის სწრაფი რეგულატორის რეჟიმში. "ენერჯია", 2018, №3(87), გვ.15-25.

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

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

40. კობრეიძე თ. ხელაძე ო. ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში აქტიური სიმძლავრის მართვა ნორმალურ და ავარიულ რეჟიმებში. სტუ, სტუდენტთა 85-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. თეზისების კრებული. 2017.

41. კობრეიძე თ. ხელაძე ო.. ენერჯიის ზეგამტარული ინდუქციური მაგროვებლის სისტემაში სადენების დენგამტარუნარიანობა და დანაკარგები ცვლად მაგნიტურ ველში. „ენერჯია“, 2019, №1(89), გვ. 27-33.