



საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ლაშა მაისურაძე

**საავიაციო აირტურბინული ძრავებისათვის ელექტროძრავა-
გენერატორული მოწყობილობების პარამეტრების ოპტიმიზაცია**

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა : საფრენი აპარატების დაპროექტება და წარმოება

შიფრი: 0715

საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

თბილისი 0103, საქართველო

2021 წელი

საავტორო უფლება @ 2021 წელი, ლაშა მაისურაძე

საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

საინჟინრო ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ლაშა მაისურაძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით „საავიაციო აირტურბინული ძრავებისათვის ელექტრო ძრავა-გენერატორული მოწყობილობების პარამეტრების ოპტიმიზაცია“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტის საინჟინრო ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

, 2021 წელი

სამეცნიერო ხელმძღვანელი- სტუ-ის ასოცირებული პროფესორი ზურაბ გობიანიძე

.....

რეცენზენტები:

სსუ-ის პროფესორი დემურ ვეფხვაძე

.....

სტუ-ის პროფესორი თამაზ კობრეიძე

.....

საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

2021

ავტორი: ლაშა მაისურაძე

თემის დასახელება : „საავიაციო აირტურბინული ძრავებისათვის ელექტროძრავა-გენერატორული მოწყობილობების პარამეტრების ოპტიმიზაცია“

სადოქტორო პროგრამა: „საფრენი აპარატების დაპროექტება“

ხარისხი: აკადემიური დოქტორი

სხდომა ჩატარდა : , 2021 წელი

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

ავტორის ხელმოწერა

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

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

რეზიუმე

სადისერტაციო ნაშრომის „საავიაციო აირტურბინული ძრავებისათვის ელექტროძრავა-გენერატორული მოწყობილობების პარამეტრების ოპტიმიზაცია“ ძირითადი მიზანია საჰაერო ხომალდების აირტურბინულ ძრავებში გამოყენებული ელექტროძრავა-გენერატორული მოწყობილობების ალტერნატიული ვარიანტის დაპროექტება და დამზადება რომელიც გამორჩეული იქნება გაუმჯობესებული მახასიათებლებით, კერძოდ მაღალი საიმედოობით, მცირე მასა-გაბარიტებით, ნაკლები თვითღირებულებით და სხვა.

საჰაერო ხომალდების საფრენოსნო-ტექნიკური მონაცემების თვისობრივად გაუმჯობესების მიზნით მსოფლიო საავიაციო ინდუსტრიის მიერ შემუშავებულია „მთლიანად ელექტროფიცირებული თვითმფრინავის“ კონცეფცია რომლის რეალიზაციის პრობლემატურ საკითხებს უკავშირდება აირტურბინულ ძრავებში არსებული მექანიკური დანაკარგების შემცირება (ან მათი მთლიანად აღმოფხვრა) რომელიც იხარჯება პირველ შემთხვევაში საჰაერო ხომალდების ელექტრო კვების ცვლადი და მუდმივი დენის გენერატორების და მეორე შემთხვევაში ელექტრო გამვების (სტარტერ-გენერატორის) ან საჰაერო გამვების სისტემის კვანძების (საჰაერო ტურბინა და მასთან დაკავშირებული კბილანური გადაცემები) აძვრაზე რომლებიც მოქმედებაში მოდიან აირტურბინული ძრავების როტორებიდან გადაცემული სიმძლავრით. უნდა აღინიშნოს, რომ უახლესი ტიპის საჰაერო ხომალდების ელექტროკვების გაზრდილი მოთხოვნის დასაკმაყოფილებლად გენერატორებით გამომუშავებული სიმძლავრეები განუხრელად იზრდება. ასე მაგალითად თუ პირველი თაობის საჰაერო ხომალდების Boeing 737 Original და Boeing 737 Classic ტურბოვენტილატორულ ძრავებზე CFM-56 დაყენებული გენერატორების სიმძლავრე შეადგენდა 40 კვტ-ს, მომდევნო თაობის Boeing 737 Next Generation-ზე არსებული გენერატორების სიმძლავრე გაიზარდა 90 კვტ-დე, ხოლო საჰაერო ხომალდ Boeing 777—300ER-ის ტურბოვენტილატორულ ძრავებზე General Electric GE90-115B (510 კვ) დაყენებული იქნა ორი გენერატორი თითოეული სიმძლავრით 250 კვტ.

ზემოთ აღნიშნულის გათვალისწინებით საავიაცო აირტურბინული ძრავების ტექნიკურ და საექსპლუატაციო მახასიათებლების შემდგომი გაუმჯობესების მიზნით მიზანშეწონილია მოხდეს გამშვების სისტემის და გენერატორული მოწყობილობების ინტეგრირება ძრავების ვენტილატორის და კომპრესორების კვანძებში (როტორებში და მათ შესაბამის კორპუსებში) რითაც უზრუნველყოფილი იქნება მაღალი ენერგეტიკული სიმძლავრეების რეალიზაცია მექანიკური დანაკარგების გარეშე. ასეთი კონსტრუქციული გადაწყვეტილება საფუძველს უყრის ჰიბრიდული აირტურბინული ძრავას შექმნის რეალიზაციის რაც ძალზე მნიშვნელოვანია როგორც ეკონომიური ასევე ეკოლოგიური თვალსაზრისით.

ძრავა-გენერატორულ მოწყობილობად ხშირ შემთხვევაში გამოიყენება მუდმივი დენის კოლექტორული ძრავები მუდმივი მაგნიტების აღზნებით. ამ შემთხვევაში ღუზა რომელშიც განთავსებულია ელექტროგრაგნილები წარმოადგენს როტორს, ხოლო მუდმივი მაგნიტები მოთავსებულია სტატორში. ამ ძრავებს გააჩნიათ მაღალი მქ და შეიძლება გამოყენებული იქნენ სერვოდრავებადაც. მათ ნაკლოვან მხარეს მიეკუთვნება მუსა-კოლექტორის კვანძის არსებობა რომელიც ექსპლუატაციის პროცესში იცვითება და საჭიროებს ძრავას მიმდინარე რემონტის ჩატარებას, რაც საგრძნობლად აუარესებს საიმედობის მაჩვენებლებს. არსებობენ ასევე მუდმივი დენის უკონტაქტო ვენტილური ძრავები რომლებშიც აღნიშნული ნაკლოვანება აღმოფხვრილია მუსა-კოლექტორული კვანძის შეცვლით სადაც მათ ფუნქციას ასრულებენ ტრანზისტორული ან ტირისტორული ინვენტორები. ამ შემთხვევაში ღუზის გრაგნილები მოთავსებულია სტატორში ხოლო როტორი შედგება ერთი ან რამდენიმე მუდმივი მაგნიტისაგან. ცნობილია ასევე ცვლადი დენის სინქრონული ძრავა მუდმივი მაგნიტებით რომლის კონსტრუქცია მცირედ განსხვავდება მუდმივი დენის უკონტაქტო ვენტილური ძრავასაგან.

აღნიშნულის გათვალისწინებით მოცემულ ნაშრომში განხილულია მუდმივმაგნიტებიანი (მაღალი ტექნიკურ მაჩვენებლიანი) კლასიკური შესრულების სამი ან მრავალფაზა ცვლადი დენის უკონტაქტი ძრავა-გენერატორი.

იმასთან დაკავშირებით, რომ როგორც მუდმივი დენის ასევე ცვლადი დენის ძრავა-გენერატორულ მოწყობილობების მაღალი საექსპლუატაციო მახასიათებლების მისაღებად მნიშვნელოვანი როლი აკისრიათ მუდმივ მაგნიტებს ამიტომ მოცემულ სადოქტორო ნაშრომში დიდი ყურადღება აქვს დათმობილი არსებული მუდმივი მაგნიტების შედარებით ანალიზს როლებიც დამზადებული არიან როგორც იშვიათ მიწათა (ნეოდიმ-რკინა-ბორი

Nd-Fe-B, სამარიუმ-კობალტის SmCo) ასევე იშვიათ მიწათა მეტალების არშემცველ ელემენტებისაგან კერძოდ, კობალტის ნანომავთულების ბაზაზე შემუშავებული ახალი ტექნოლოგიებით (ქიმიური დალექვის მეთოდი და დარტმითი ტალღით ცხლად დაწნევის მეთოდი). როგორც ცნობილია იშვიათ მიწათა მეტალების შენადნობებისაგან დამზადებული მუდმივი მაგნიტები ძირითად იწარმოება ჩინეთში და რომელზედაც საბაზრო ფასები განიცდის მკვეთრ რყევებს. აქედან გამომდინარე დღეისათვის მსოფლიოს წამყვან სამეცნიერო წრეებში ძალზე აქტუალურია მუდმივი მაგნიტების მიღება რომელთაც გააჩნიათ არსებულ მაგნიტებთან მიახლოებული მახასიათებლები მაგრამ არ შეიცავენ (ან შეიცავენ მცირე რაოდენობით) იშვიათ მიწათა ელემენტებს. როგორც პირველადმა გამოკვლებმა აჩვენა ქართველი მეცნიერების მიერ ნანოტექნოლოგიებით შემუშავებული მუდმივი მაგნიტების ნიმუშები როლებიც დამზადებული არიან იშვიათ მიწათა მეტალების არშემცველ ელემენტებისაგან ზოგიერთ კომპონენტებში აღმატებიან იშვიათმიწათა მეტალების ელემენტებისაგან დამზადებულ მაგნიტებს, მაგალითად სიიაფით და მაღალტემპერატურულ გამოყენებებში 250°C-ზე ზევით, სადაც NdFeB მაგნიტების გამოყენება არ არის შესაძლებელი. აქედან გამომდინარე ეს საკითხი ძალზედ აქტუალურია და მოითხოვს შესაბამის ძალისხმევას რათა კონკრეტული ექსპერიმენტალური ძრავა-გენერატორული მოწყობილობისათვის დამზადდეს და პრაქტიკულად გამოიცადოს მდმივი მაგნიტების ნიმუშები იშვიათ მიწათა არშემცველი მეტალების ელემენტების გარეშე.

ელექტროძრავა-გენერატორული მოწყობილობის ოპტიმალური პროექტი-რების პროცესი შედგება ორი ეტაპისაგან. პირველ ეტაპზე განხილულია მრავალკრიტერიუმისანი ამოცანა, რომელიც იძლევა საშუალებას უამრავი არსებული ძრავა-გენერატორების ტიპებიდან ავირჩიოთ ჩვენთვის სასურველი, საუკეთესო ვარიანტი. მეორე ეტაპზე გამოყენებულია პროგრამირების შედარებით თანამედროვე მეთოდები, კერძოდ გეომეტრიული პროგრამირების მეთოდი. გეომეტრიული პროგრამირების გამოყენება საშუალებას იძლევა მოიძებნოს გლობალური ოპტიმალური ვარიანტი და დავაპროექტოთ ძრავა-გენერატორი ელექტროტექნიკური მასალების მასების მინიმუმაციით.

გეომეტრიული პროგრამირებაში გამოყენებულია მაღალი ხარისხის განზოგადოებული სიდიდეები, კერძოდ მრავალი ცვლადის მიზნობრივად შემზღუდავი ფუნქციის ხარისხის მაჩვენებლები. აღნიშნული ხარისხის მაჩვენებლები საშუალებას

იდლევა არსებული ინფორმაცია გავავრცელოთ სხვადასხვა სიმძლავრის მსგავს ძრავა-გენერატორებზე.

მიზნობრივად შემზღულადვი ფუნქციის საშუალებით ძრავა-გენერატორის მათემატიკური მოდელის შექმნა შესაძლებელი გახდა მას შემდეგ რაც კომბინაციურ სტილში გამოყენებული იქნა ექსპერიმენტის დაგეგმა, რეგრესიული ანალიზი და მათემატიკური სტატისტიკის არსებული ხერხები.

შემზღულადვი ფუნქციები, როგორცაა მაგნიტური და ელექტრული დანაკარგები, სიმძლავრისა და მარგი ქმედების კოეფიციენტი, ცალკეული დეტალების, მაგნიტოგამტარების და დენგამტარების გადახურების ტემპერატურები და ა.შ. წარმოდგენილია განყენებული ხასიათის რიცხვების საშუალებით - ე.წ. ხარისხის მაჩვენებლებით. მათი გამოყენება საშუალებას იძლევა ინფორმაცია გავავრცელოთ ერთი ტიპის სხვადასხვა სიმძლავრის ძრავა-გენერატორებზე. ასეთი მიდგომა პროექტირების საწყის ეტაპზე საგრძნობლად ამარტივებს ოპტიმალური ვარიანტის პოვნას, საშუალებას იძლევა იოლად შევირჩიოთ ახალი ორიენტირი და შესაბამისად ახალი საძიებო საჭირო ინტერვალები ცვლადი სიდიდეებისათვის. ოპტიმალური პროექტირება ჩატარებულია კომპიუტერული მოდელირების პროგრამული სისტემის **Matlab/Simulink**-ის გამოყენებით, რომელიც საშუალებას იძლევა დაგროვილი თეორიული მასალა გავავრცელოთ მსგავს სხვადასხვა სიმძლავრის ძრავა-გენერატორებზე.

უნივერსალური ექსპერიმენტალური სტენდის საშუალებით ჩატარდა ძრავა-გენერატორული მოდელის გამოსავალი პარამეტრების გამოკვლევა, ერთფაზა, ორფაზა და სამფაზა მ.შ. რეჟიმების შემთხვევაში.

სადისერტაციო ნაშრომი საშუალებას იძლევა საგრძნობლად გავაიოლოდ პროექტირების წინასწარი ეტაპები ელექტროძრავა-გენერატორის ოპტიმალური ვარიანტის შესაქმნელად.

Summary

The main goal of the dissertation is to "Optimize the parameters of electric motor-generator devices for aviation turbine engines" is to design and manufacture of alternative versions of electric motor-generator equipment used in aircraft turbine engines, which will be distinguished by improved characteristics, in particular high reliability, small mass, lower cost and more.

In order to improve the quality of aircraft technical data, the world aviation industry has developed the concept of "fully electrified aircraft", the implementation of which is related to the reduction of mechanical losses in air turbine engines (or their complete elimination) spent in the first case in the case of power generators and, in the second case, electric jets (starter-generator) or air junction system knots (air turbine and related gear transmissions) that come into operation with the power transmitted from the rotor of the air turbine engines. It should be noted that the capacities generated by generators are steadily increasing to meet the increased demand for the latest types of aircraft power supplies. So for example, if the power of the CFM-56 generators installed on the first generation Boeing 737 Original and Boeing 737 Classic generators output power was 40 kW, the power of the generators on the next generation Boeing 737 (Next Generation) increased to 90 kW, and the Boeing 777 —300ER with turbofan engines General Electric GE90-115B (510 kN) have two generators and each has a capacity of 250 kW.

In view of the above, in order to further improve the technical and operational characteristics of aircraft air turbine engines, it is advisable to integrate the start-up system and generator equipment into the engine fan and compressor units (rotors and their respective housings) without ensuring high energy efficiency. Such a constructive decision lays the foundation for the realization of the creation of a hybrid air turbine engine, which is very important both economically and ecologically.

As a motor-generator device is often used constant current collector motors with excitation of constant magnets. In this case the nozzle in which the electrodes are placed is the rotor while the permanent magnets are placed in the stator. These engines have a high activity coefficient and can also be used for servomotors. Their disadvantage is the presence of a mouse-collector node which wears out during operation and requires ongoing engine repair, which significantly worsens the reliability. There are also DC non-contact valve motors in which this defect is eliminated by replacing the mouse-collector node where their function is performed by transistor or thyristor inverters. In this case the nut windings are placed in the stator while the rotor consists of one or more permanent magnets. It is also known as a variable current synchronous motor with permanent magnets whose construction is slightly different from that of a DC non-contact valve motor.

Considering the above, the given work discusses the contactless motor-generator of three- or multi-phase alternating current of high-performance (high technical performance) classic performance.

Due to the fact that permanent magnets play an important role in obtaining high performance characteristics of both DC and AC motor-generator devices, therefore in this doctoral dissertation much attention is paid to the comparative analysis of existing permanent magnets. Nd-Fe-B, Samarium-Cobalt (Sm-Co) is also made from non-metallic elements of rare earth metals, in particular with new technologies developed on the basis of cobalt nanomaterial (chemical precipitation method and hot pressing method with kick wave). As it is known, permanent magnets made of rare earth metal alloys are mainly produced in China and on which market prices are experiencing sharp fluctuations. Therefore, it is very important today in the world's leading scientific circles to obtain permanent magnets that have characteristics close to existing magnets but do not contain (or contain in small quantities) rare earth elements. As the first research showed, the samples of permanent magnets developed by Georgian scientists using nanotechnologies are also made of rare earth metal-free elements. Therefore, this issue is very urgent and requires appropriate efforts to make a specific experimental engine-generator device and to practice a sample of permanent magnets without rare earth metal-containing metal elements. For example, in cheap and high temperature applications above 250 ° C where Nd-Fe-B magnets cannot be used. Therefore, this issue is very urgent and requires appropriate efforts to make a specific experimental engine-generator device and to practice a sample of permanent magnets without rare earth metal-containing metal elements.

The process of optimal design of an electric motor-generator device consists of two stages. In the first stage, a multi-criteria task is discussed, which allows us to choose the best option we want from the many types of existing motor-generators. In the second stage, relatively modern methods of programming are used, namely the method of geometric programming. The use of geometric programming makes it possible to find the global optimal option and design the motor-generator by minimizing the masses of the electro technical materials.

High-quality generalized values are used in geometric programming, namely quality indicators of functionally limiting function of many variables. These quality indicators allow us to disseminate the available information on similar generators of different capacities.

Through the purpose of limiting function, it became possible to create a mathematical model of the engine-generator after the experimental style was used to plan the experiment, regression analysis and existing methods of mathematical statistics.

Limiting functions in the paper, such as magnetic and electrical losses, power and efficiency coefficient, overlap temperatures of individual details, conductors and conductors, etc. It is represented by the numbers of the separated character - the so-called with quality indicators. Their use allows us to disseminate information on different types of power generators. Such an approach greatly simplifies the search for the optimal option at the initial stage of design, allowing us to easily select a new landmark and consequently new search required intervals for variable values. Optimal design is carried out using Mat Lab methods, which allows to distribute the accumulated theoretical material motor-generators of similar different power.

The solution of the solution parameters of the engine-generator model, single-phase, two-phase and three-phase, etc. was carried out by means of a universal experimental stand. In the case of modes.

The dissertation allows to significantly simplify the preliminary stages of design to create the optimal version of the electric motor-generator.

სარჩევი:

რეზიუმე.....	4
ცხრილების ნუსხა.....	13
ნახაზების ნუსხა.....	14
მადლიერება.....	19
შესავალი.....	20
თავი I. საავიაციო აირტურბუნული ძრავებისათვის ელექტრო ძრავა-გენერატორული მოწყობილობების კონსტრუქციული სქემების მიმოხილვა	25
თავი II. საავიაციო ძრავა-გენერატორული მოწყობილობების პროექტირების მეთოდოლოგია.....	38
2.1. ძრავა-გენერატორის პროექტირების სტრუქტურა.....	38

2.2. მუდმივი მაგნიტების შედარებითი ანალიზი.....	45
2.2.1. მოკლე ცნობები მუდმივი მაგნიტების შესახებ	45
2.2.2. მუდმივი მაგნიტების ტიპები და მათი დამზადების ტექნოლოგია.....	48
2.2.3. იშვიათ მიწათა მეტალების არშემცველი მუდმივი მაგნიტების შემუშავება კობალტის ნანომავთულების ბაზაზე საავიაციო ტექნიკაში გამოყენების მიზნით.....	52
2.2.3.1. Cu-Co ნანომავთულის კომპოზიტების მიღება ქიმიური დალექვის მეთოდით.....	54
2.2.3.2. Cu-Co ნანომავთულის კომპოზიტების მიღება დტცდ მეთოდით	55
2.3. ძრავა-გენერატორის პროექტირების წინა პირობები. მაგნიტური ველების ანგარიშის გამარტივების ხერხები და დაშვებები.....	58
2.4. მრავალკრიტერიუმანი ოპტიმიზაციის გამოყენება ძრავა-გენერატორის პროექტირების პირველ ეტაპზე.....	61
თავი III. 3.1. გეომეტრიული პროგრამირების მეთოდის ზოგადი მიმოხილვა	64
3.2. პროექტირების ცვლადი შემავალი პარამეტრების ხარისხის მაჩვენებლები, როგორც აპრიორული ცნობების მატარებელი განზოგადოებული სიდიდეები.....	68
3.3. ძრავა-გენერატორის პროექტირება ელექტროტექნიკური მასალების.....	77
მინიმალური მაჩვენებლებით, გეომეტრიული პროგრამირების ხერხების გამოყენებით	
თავი IV. ექსპერიმენტული მონაცემების დამუშავება კომპიუტერული სისტემა Matlab/Simulink-ის საშუალებით.....	85
4.1 უმცირესი კვადრატების მეთოდი.....	87
4.2. უმცირესი კვადრატების მეთოდის გამოყენება ერთგანზომილებიანი და მრავალგანზომილებიანი რეგრესიული ანალიზის დროს.....	88
4.3. კომპიუტერული სისტემა Matlab-ის მოკლე აღწერა.....	89
4.4. უმცირესი კვადრატების მეთოდის რეალიზაცია სისტემა Matlab-ში.....	91
4.5. მანქანური ექსპერიმენტის ჩატარება.....	101
4.6. ექსპერიმენტული მონაცემების რეგრესიული ანალიზი.....	106

4.7. გამოსასვლელ ცვლადებს შორის რეგრესიული ანალიზი.....	112
თავი V. ძრავა-გენერატორის გამოსაკვლევი უნივერსალური სტენდი.....	127
5.1 ძრავა-გენერატორის კვლევის მეთოდიკა გამოსაცდელი უნივერსალური სტენდის საშუალებით.....	128
5.2. ცვლადი დენის სამფაზა, მუდმივმაგნიტებიანი კლასიკური შესრულების გენერატორის ექსპერიმენტული კვლევა.....	134
5.3. ჩატარებული ექსპერიმენტების შედეგები	140
ძირითადი დსკვნები	141
გამოყენებული ლიტერატურა.....	143

ცხრილების ნუსხა

- ცხრილი 2.1. პროექტირების პარამეტრების დასახელება ცვლილების ინტერვალი და ბიჯი;
- ცხრილი 2.2. სხვადასხვა მასალებისაგან დამზადებული მუდმივი მაგნიტების დამახასიათებელი ძირითადი პარამეტრები;
- ცხრილი 4.1. ძრავა-გენერატორის გენერატორული რეჟიმის შემავალი და საანგარიშო (ოპტიმალური) პარამეტრები;
- ცხრილი 4.2. Matlab/Simulink-ით საანგარიშო ძრავა-გენერატორის საანგარიშო პარამეტრები;

ცხრილი 4.3. Matlab/Simulink Matlab/Simulink-ით საანგარიშო ძრავა-გენერატორის საანგარიშო პარამეტრები;

ცხრილი 4.4. Matlab/Simulink Matlab/Simulink-ით საანგარიშო ძრავა-გენერატორის საანგარიშო პარამეტრები;

ცხრილი 5.1. ძრავა-გენერატორული მოწყობილობის გენერატორული რეჟიმის ექსპერიმენტის მონაცემები ნომინალური დატვირთვის შემთხვევაში.

ნახაზების ნუსხა

ნახ. 1.1. Rolls-Royce-ის პერსპექტიული ტურბორეაქტიული ძრავას სქემა;

ნახ. 1.2. ტურბორეაქტიული ძრავა ვენტილატორში განთავსებული ელექტრო გენერატორით;

ნახ.1. 3. ვენტილატორში ინტეგრირებული მუდმივმაგნიტებიანი ელექტრო ძრავა;

ნახ.1.4. აირტურბინული ძრავა ჩამონტაჟებული ძრავა-გენერატორული მოწყობილობით;

ნახ.1.5.სამკონტურიანი ტურბორეაქტიული ძრავა საჰაერო ხრახნში ინტეგრირებული ძრავა-გენერატორული მოწყობილობით;

ნახ. 1.6. სამკონტურიანი ტურბორეაქტიული ძრავას საერთო ხედი საჰაერო ხრახნში ინტეგრირებული ძრავა -გენერატორული მოწყობილობით;

ნახ. 1.7. მუდმივმაგნიტებიანი საჰაერო ხრახნი;

ნახ.1.8. ორკონტურიანი ტურბოვენტილატორული ძრავას კონსტრუქციული სქემა ვენტილატორში და მაღალი წნევის კომპრესორში ინტეგრირებული ძრავა-გენერატორული მოწყობილობებით;

ნახ.1.9. მუსა-კოლექტორიანი სტარტერ- გენერატორი;

ნახ. 1.10. განვითარებული სიმძლავრის დამოკიდებულება როტორის ბრუნვათა რიცხვზე ფიქსირებული გეომეტრიული ზომების $D_{შიგა.}, D_{გარე}$ და ელექტრომაგნიტური დატვირთვების $A_s \cdot B_s = const$ დროს;

ნახ. 2.1. ძრავა-გენერატორის გენერატორული რეჟიმის ბლოკური სქემა;

ნახ.2. 2 ძრავა-გენერატორის ძრავული რეჟიმის ბლოკური სქემა;

ნახ. 2.3. ძრავა-გენერატორის ოპტიმალური ვარიანტის პოვნის გრაფიკი;

ნახ. 2.4. მაგნიტური თვისებების მქონე ნივთიერებები;

ნახ.2.5. მუდმივი მაგნიტების ერთნაირი და სხვადასხვა პოლუსების ძალხაზების სახეები;

ნახ.2.6. გრძივი მუდმივი მაგნიტის მაგნიტური ხაზების მიმართულებები;

ნახ.2.7. მუდმივი მაგნიტის დასამზადებლად გამოყენებული ზოგიერთი მასალის მაჩვენებელთა შედარება;

ნახ. 2.8. წყალხსნარში ქიმიური დაფენით ოთახის ტემპერატურაზე მაგნიტური ველის ზემოქმედებისას C_{0} ნანომავთულების ფორმირების სქემატური დიაგრამა;

ნახ. 2.9 რს რეზონანსული მაგმეტომეტრის სქემა;

ნახ. 2.10. რს რეზონანსული მაგმეტომეტრის სიხშირის ცვლილების Δf დამოკიდებულება მაგნიტური ველის H დამაბულობაზე;

ნახ. 2.11. ელექტრომაგნიტური გარდამქმნელებია სტრუქტურული სქემა;

ნახ. 3.1. ძრავა-გენერატორის ელექტრო-მაგნიტური სისტემა;

ნახ. 4.1. I_1 ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით;

ნახ.4.2. I_1 ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით სივრცეში;

ნახ. 4.3. $P_{1,3}$ ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით;

ნახ. 4.4. $P_{1,3}$ ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით სივრცეში

ნახ.4.5. $P_{ელექ}$ ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით;

ნახ.4.6. $P_{ელექ}$ ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით სივრცეში;

ნახ.4.7. ΣC ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით;

ნახ.4.8. η ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით;

ნახ.4.9. C_1 ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით;

ნახ.4.10. C_2 ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით;

ნახ.4.11. C_3 ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით;

ნახ.4.12. $Q_{1,3r}$ ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით;

ნახ.4.13. $P_{1,3}$ ცვლადის $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ცვლადებზე დამოკიდებულების აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით;

ნახ. 4. 14. I_1 ცვლადის $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ცვლადებზე დამოკიდებულების აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით;

ნახ. 4.15. $P_{ელექ}$ ცვლადის $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ცვლადებზე დამოკიდებულების აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით;

ნახ. 4.16. ΣP ცვლადის $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ცვლადებზე დამოკიდებულების აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით;

ნახ.4. 17. η ცვლადის $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ცვლადებზე დამოკიდებულების აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით;

ნახ. 4.18. ΣG ცვლადის $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ცვლადებზე დამოკიდებულების აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით;

- ნახ. 4.19. C_1 ცვლადის $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ცვლადებზე დამოკიდებულების აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით;
- ნახ. 4.20. C_2 ცვლადის $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ცვლადებზე დამოკიდებულების აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით;
- ნახ. 4.21. C_3 ცვლადის $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ცვლადებზე დამოკიდებულების აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით;
- ნახ. 4.22. $Q_{1გრ}$ ცვლადის $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ცვლადებზე დამოკიდებულების აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით;
- ნახ.4. 23. C_1 (y26) ცვლადის $b_{1კვ}$ (y12) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი;
- ნახ. 4.24. C_1 (y26) ცვლადის $h_{1ღრშ}$ (y13) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი;
- ნახ. 4. 25. C_1 (y26) ცვლადის $h_{1ულლ}$ (y14) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი;
- ნახ.4. 26. C_1 (y26) ცვლადის $h_{1ულლ}$ (y14) და $h_{1ღრშ}$ (y13) ცვლადებზე დამოკიდებულების ზედაპირი;
- ნახ. 4.27. $P_{ელექ}$ (y21) ცვლადის $D_{1შოდა}$ (y1) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი;
- ნახ. 4.28. $P_{ელექ}$ (y21) ცვლადის $A_{1სტატ}$ (y4) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი;
- ნახ. 4.29. $\sum P$ (y22) ცვლადის D_1 (y1) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი;
- ნახ. 4.30. $\sum P$ (y22) ცვლადის $A_{1სტატ}$ (y4) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი;
- ნახ.4. 31. η (y23) ცვლადის D_1 (y1) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი;
- ნახ. 4.32. η (y23) ცვლადის $A_{1სტატ}$ (y4) და l_1 (y10) ცვლადებზე დამოკიდებულების გრაფიკი;
- ნახ. 4.33. η (y23) ცვლადის $D_{1შოდა}$ (y1) და $K_{1ულლ}$ (y6) ცვლადებზე დამოკიდებულების გრაფიკი;
- ნახ. 4.34. C_2 (y27) ცვლადის $b_{1ღრშ}$ (y11) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი;

ნახ.4. 35. C_2 (y27) ცვლადის $b_{1ღრძ}$ (y11) და $h_{1ღრძ}$ (y13) ცვლადებზე დამოკიდებულების გრაფიკი;

ნახ.4 36. C_3 (y28) ცვლადის $D_{1შიდა}$ (y1) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი;

ნახ. 4.37. C_3 (y28) ცვლადის $K_{1უღო}$ (y6) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი;

ნახ. 4.38. C_3 (y28) ცვლადის α_δ (y9) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი;

ნახ. 4.39. $\sum c$ (y29) ცვლადის $D_{1შიდა}$ (y1) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი; ნახ.

4.40. $\sum c$ (y29) ცვლადის $A_{1სტატ}$ (y4) და l_1 (y10) ცვლადებზე დამოკიდებულების გრაფიკი;

ნახ. 5.0. ძრავგენერატორის გამოსაცდელი უნივერსალური სტენდის ბლოკური სქემა;

ნახ.5.1. ცვლადი დენის სამფაზა ძრავა-გენერატორის გამოსაკვლევი უნივერსალური სტენდი;

ნახ.5.2. ძრავა-გენერატორის გამოსაცდელი უნივერსალური სტენდის ელექტრო სქემა;

ნახ. 5.3. ძრავგენერატორის ა) ერთფაზა, ბ) ორფაზა და გ) სამფაზა მოკლეჩართვის რეჟიმების სქემები;

ნახ. 5.4. ექსპერიმენტალური მუდმივმაგნიტებიანი ძრავა-გენერატორის როტორის კვანძი;

ნახ. 5.5. ექსპერიმენტალური მუდმივმაგნიტებიანი ძრავა-გენერატორის სტატორის კვანძი;

ნახ. 5.6. ემძ-ს დამოკიდებულების გრაფიკი ბრუნვათა სიხშირეზე;

ნახ. 5.7. დატვირთვის დენის დამოკიდებულება ბრუნვათა სიხშირესთან ფარდობით ერთეულებში აქტიური დატვირთვის შემთხვევაში;

ნახ.5.8. დატვირთვის დენის დამოკიდებულება ბრუნვათა სიხშირესთან ფარდობით ერთეულებში აქტიურ-ინდუქტიური დატვირთვის შემთხვევაში;

ნახ. 5.9. გენერატორის დატვირთვის დენის დამოკიდებულება ბრუნვათა სიხშირესთან სხვადასხვა სიდიდის შიდა წინააღმდეგობის შემთხვევაში;

ნახ.5.10. გენერატორის მქკ აქტიური დატვირთვის შემთხვევაში;

ნახ. 5.11. ცვლადი დენის სამფაზა გენერატორის გამოსავალი ძაბვისა და დატვირთვის დენის მყისა მნიშვნელობის მრუდები შერეული დატვირთვის შემთხვევაში;

ნახ. 5.12. ცვლადი დენის სამფაზა გენერატორის გამოსავალი ძაბვისა და დატვირთვის დენის მყისა მნიშვნელობის მრუდები აქტიური დატვირთვის შემთხვევაში;

ნახ. 5.13. ცვლადი დენის სამფაზა გენერატორის გამოსავალი ძაბვისა და დატვირთვის დენის მყისა მნიშვნელობის მრუდები A და B ფაზისათვის აქტიური დატვირთვის შემთხვევაში.

მადლიერება

ავტორი დიდ მადლობას გამოხატავს სამეცნიერო ხელმძღვანელის სტუ-ის ასოცირებული პროფესორის ზურაბ გობიანიძის მიმართ იმ კონსულტაციებისა და პრაქტიკული დახმარებისათვის რამაც მნიშვნელოვნად განაპირობა სადოქტორო ნაშრომის თეორიულ-ექსპერიმენტალური კვლევითი სამუშაოების წარმატებით ჩატარება.

ავტორი ასევე მადლიერია სსუ-ის რექტორის პროფესორ სერგო ტეფნაძის, საინჟინრო ფაკულტეტის ყოფილი დეკანის პროფესორ გიორგი ცირეკიძის, ამჟამინდელი დეკანის ასოცირებული პროფესორის ნიკოლოზ თიკანიშვილის იმ

სასარგებლო რჩევებისათვის რაც დაკავშირებული იყო სადისერტაციო ნაშრომზე მუშაობის პროცესში წარმოქმნილი პრობლემატური საკითხების გადაჭრასთან.

ავტორი გულისხმობს ადნიშნავს იმ დიდ წვლილს რაც სადოქტორო ნაშრონის შეფასებისას გასწიეს რეცენზენტებმა: სსუ-ის პროფესორმა დემურ ვეფხვაძემ, სსუ სკც-ის უფროსმა მეცნიერ თანამშრომელმა გიორგი მუშკუდიანმა, სტუ-ის პროფესორმა თამაზ კონრეიძემ და სტუ-ის პროფესორმა მურმან კუბლაშვილმა.

შესავალი

თემის აქტუალობა: სადისერტაციო ნაშრომი ეხება საფრენი აპარატების ელექტროძრავა - გენერატორული მოწყობილების ოპტიმალური ვარიანტის პროექტირების საკითხებს.

დღეისათვის საფრენი აპარატების ცალკეული კვანძების მიმართ წაყენებული მოთხოვნები გამკაცრებულია. ძირითადი მოთხოვნები ეხება საიმედობის საკითხებს და დასაპროექტებელი ნაკეთობების მასა - გაბარიტებს. არსებული ელექტროძრავა - გენერატორების კვანძი წარმოადგენს მუდმივი დენის ელექტრომექანიკურ გარდამქმნელს, რომლის ძირითად ნაწილს შეადგენს მუსა - კოლექტორი. მუსა - კოლექტორის უარყოფითი მხარეა კონტაქტების არსებობა, მუდმივი კომუტაციის (ჩართვა - გამორთვის) რეჟიმი,

რომელიც იწვევს საიმედობის პირობების მკვეთრ გაუარესებას, ნაპერწკლიანობის, მუსების ცვეთის ა.შ. სხვადასხვა პირობების გაუარესებას.

ნაშრომში მრავალი არსებული ელექტროძრავა - გენერატორებიდან შერჩეული იქნა მაღალი ტექნიკური მონაცემების მუდმივმაგნიტებიანი, კლასიკური შესრულების სამფაზა უკონტაქტო ძრავა, რომელიც თვისობრივად განსხვავდება პრაქტიკაში არსებული ძრავა - გენერატორისაგან და ახასიათებს მრავალი უპირატესობა, როგორც საიმედობის ასევე ელექტროტექნიკური და მასა-გაბარიტული მაჩვენებლების თვალსაზრისით. აქედან გამომდინარე ნაშრომი იძენს აქტუალურობას.

ნაშრომის მიზანი: ნებისმიერი ელექტრომექანიკური გარდამქმნელი, კერძოდ ძრავა - გენერატორი პროექტირების პირველ ეტაპზე მოითხოვს აპრიორული მონაცემების ცოდნას. ოპტიმალური პროექტირების წინასწარ ეტაპზე აუცილებელია ვიცოდეთ ისეთი გამოსასვლელი პარამეტრები როგორიცაა სიმძლავრე და მარგი ქმედების კოეფიციენტი. მიახლოებით დავადგინოთ შემავალი ცვლადი პარამეტრების ცვლილებების ზღვრები, მაგნიტოგამტარის დიამეტრი, სიგრძე და მათი თანაფარდობა, ელექტრომაგნიტური დატვირთვების, როგორიცაა დასაშვები მაგნიტური ინდუქციები ცალკეულ უბანზე, ხაზოვანი დატვირთვები და ა.შ. დღეისათვის ყველა ზემოთ ჩამოთვლილი მონაცემები წარმოდგენილია მრუდების, ცხრილებისა და ემპირიული ფორმულების სახით.

ნაშრომში გამოყენებული ოპტიმალური პროექტირების მეთოდი მათემატიკის სხვა ხერხებთან ერთად (როგორიცაა ექსპერიმენტის დაგეგმა, რეგრესიული ანალიზი, მათემატიკური სტატისტიკა, მსგავსების თეორია და სხვა) საშუალებას იძლევა პროექტირების აპრიორული მონაცემები წარმოვადგინოთ ეგრეთწოდებული დადებითი ნორმალიზებული მასების და ცვლადი პარამეტრების ხარისხის მაჩვენებლების საშუალებით და მიღებული ინფორმაცია გავავრცოთ სხვადასხვა სიმძლავრის ძრავა - გენერატორებზე. შექმნილი მეთოდიკა საშუალებას იძლევა მოდელიდან ან ერთი სიმძლავრის ძრავა - გენერატორიდან მიღებული ინფორმაცია გავავრცელოთ მსგავსი ნაკეთობის სხვადასხვა სიმძლავრის ნაკეთობაზე.

3.მეცნიერული სიახლე. ძრავა - გენერატორის დამახასიათებელი გამოსავალი ფუნქციები წარმოადგენენ მრავალწევრებს ან ერთწევრებს. ისინი დამოკიდებული არიან შემავალი ცვლადი პარამეტრების სიდიდეებზე და უშუალო კავშირში იმყოფებიან

ერთმანეთთან. პროექტირების შემავალი სიდიდეები შეიძლება იყვეს მუდმივი ან ცვლადი, აბსოლუტური ან ფარდობითი, დაყვანილი ან მიყვანილი სიდიდეები და ა.შ.

გეომეტრიული პროგრამირებისა და მათემატიკაში არსებული სხვა ხერხების ერთობლივმა გამოყენებამ საშუალება მოგვცა ძრავა - გენერატორის დამახასიათებელი პროექტირების ფუნქციები წარმოვადგინოთ სულ სხვა, თვისობრივად განსხვავებული ეგრეთწოდებული დადებითი ნორმალიზებული მასებისა და ხარისხის მაჩვენებლების სახით. ასე მაგალითად ძრავა - გენერატორის ელექტროტექნიკური მასალების (დენგამტარები და მაგნიტოგამტარები) ჯამური მასა წარმოადგენს მრავალწევრს, რომლის თითოეული შესაკრები თავის მხრივ დამოკიდებულია პროექტირების შემავალ ცვლად სიდიდეებზე. მისი წარმოდგენა შესაძლებელი გახდა მრავალწევრის საშუალებით, რომელიც წარმოადგენს ხარისხის მაჩვენებელში აყვანილ ცვლადი შემავალი სიდიდეების ნამრავლს. ხარისხის მაჩვენებლები არიან მაღალი ხარისხის განზოგადოებული სიდიდეები და მათი საშუალებით შესაძლებელი გახდა ერთი ძრავა- გენერატორის მონაცემები გავავრცოთ სხვა სიმძლავრის მქონე ძრავა - გენერატორის სერიაზე. ხარისხის მაჩვენებლები გვიჩვენებენ თუ რა წვლილი მიუძღვით ამა თუ იმ ცვლად შემავალ პარამეტრს პროექტირების გამოსავალი ფუნქციის სიდიდეზე.

პრაქტიკული გამოყენება. ნებისმიერი ელექტრომექანიკური გარდამქმნელის ოპტიმალური პროექტირება წარმოუდგენელია აპრიორული ცნობების გარეშე, რომლებიც დღეისათვის გაბნულია ცხრილების, მრუდების და ემპირიული ფორმულების სახით. მათი შენახვა დაკომპლექტება და წარმოდგენა უფრო კოჰაქტური სახით შესაძლებელი გახდა გეომეტრიული პროგრამირების ეგრეთ წოდებული დადებითი ნორმალიზებული მასებისა და ცვლადი შემავალი პარამეტრების ხარისხის მაჩვენებლების გამოყენების შედეგად. ხარისხის მაჩვენებლების გამოყენება საშუალებას იძლევა მოვახდინოთ მაღალი რანგის განზოგადოება და აბსოლუტური, ფარდობითი სიდიდეებისაგან განსხვავებით, გავავრცელოთ ინფორმაცია დიდი სიმძლავრის მსგავს ნაკეთობებზე. შევამციროთ ოპტიმალური ვარიანტის ძებნის სფეროები და ინტერვალები. შევამციროთ ძიების დრო და გავამარტივოთ ოპტიმიზაციის ამოცანა.

შედეგების სიზუსტე (უტყუარობა) . ნაშრომის პრაქტიკული ნაწილი მოიცავს რამდენიმე ეტაპს:

ა) ძრავა - გენერატორის (მცირე სიმძლავრის) დამზადება;

ბ) ძრავა - გენერატორის გამოსაცდელი უნივერსალური სტენდის შექმნა, რომელიც საშუალებას იძლევა როგორც ძრავულ ასევე გენერატორულ რეჟიმში გამოიცადოს მოდელი ან საცდელი ნიმუში;

გ) გამოცდის მეთოდის დამუშავება, რომელიც საშუალებას იძლევა ძრავა - გენერატორი გამოიცადოს, როგორც ნომინალურ ასევე ავარიულ რეჟიმებში;

დ) გენერატორულ რეჟიმში ძრავა - გენერატორის ყველა საჭირო პარამეტრების დაფიქსირება და ანალიზის ჩატარება, ზემოთჩამოთვლილი სამუშაოების ჩატარება საშუალებას იძლევა შევადაროთ თეორიული და პრაქტიკული მონაცემები და გავაკეთოთ შესაბამისი დასკვნები.

ნაშრომის აპრობაცია და გამოქვეყნებული პუბლიკაციები :

სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები მოხსენებული იქნა სსუ სტუდენტთა საერთაშორისო კონფერენციებზე:

- დოქტორანტი ლაშა მაისურაძე, ხელმძღვანელი სტუ-ის პროფესორი ზურაბ გობიანიძე „აირტურბინული ძრავას ვენტილატორში ინტეგრირებული ძრავა-გენერატორული მოწყობილობის პარამეტრების ოპტიმიზაცია“ მოხსენებათა თეზისები 25-26 მაისი სტუდენტთა მე-12 საერთაშორისო კონფერენცია თბილისი 2018 წ. (17-19).

- დოქტორანტი ლაშა მაისურაძე, ბაკალავრი თემურ განარია ხელმძღვანელი სტუ-ის პროფესორი ზურაბ გობიანიძე „საავიაციო ძრავა-გენერატორული მოწყობილობების დაპროექტების ოპტიმიზაცია მინიმალური მასით და ელექტრიტექნიკური მასალეებით“ მოხსენებათა თეზისები 28-29 მაისი სტუდენტთა მე-13 საერთაშორისო კონფერენცია თბილისი 2019 წ. (39-40).

და ასევე სსუ-ის სადოქტორო საბჭოზე თეორიულ-ექსპერიმენტალური კვლევა/კოლოქვიუმების სახით.

პუბლიკაციები: დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია 4 სამეცნიერი ნაშრომი და მიღებულია 1 პატენტი გამოგონებაზე თანაავტორებთან ერთად. ამასთან 1 სამეცნიერ ნაშრომი იბეჭდება მაღალი რეიტინგის საზღვარგარეთის ჟურნალში „ WORLD JOURNAL OF CONDENSED MATTER PHYSICS“.

1. ა. მაისურაძე, ლ.მაისურაძე პატენტი გამოგონებაზე GE P 2017 6732 B „სამკონტურაინი ტურბორეაქტიული ძრავა“

2. A. Maisuradze, L. Maisuradze, Z. Gobianidze

PROCEEDINGS OF MECHANICS 2016 The International Conference on Mechanics 2016
OPTIMIZATION OF DESIGN SCHEMES AND PARAMETERS OF MOTOR-
GENERATORS FOR AVIATION GAS TURBINE ENGINES (163-170)

3. A. Maisuradze, L. Maisuradze, Z. Gobianidze

„OPTIMIZATION OF DESIGN SCHEMES AND PARAMETERS OF
MOTOR-GENERATORS FOR AVIATION GAS TURBINE ENGINES” AIR TRANSPORT
Aviation University of Georgia №1(12)/2017 TBILISI (79-89)

4. докторант Лаша Маисурадзе, Зураб Гобианидзе „Вопросы предварительного расчета
оптимального электромеханического преобразователя энергии с помощью степенных
показателей геометрического программирования” ENERGY №3(91) თბილისი, (30-32)

5. G. I. Mamniashvili, D. I. Gventsadze, L. N. Rukhadze, L. A. Maisuradze

WORLD JOURNAL OF CONDENSED MATTER PHYSICS (კონდენსირებული ფიზიკის გარემოს
მსოფლიო ჟურნალი)

Fabrication of polymer magnetic nanocomposites containing carbon nanoparticles doped
with cobalt nanoclusters and study their conductivity, self-healing and adhesion properties

სამუშაოს მოცულობა. სადისერტაციო ნაშრომი შედგება 5 თავისაგან, გადმოცემულია 145
ნაბეჭდ გვერდზე და მოიცავს 76 ნახაზს და 7 ცხრილს. გამოყენებული ლიტერატურის სია
მოიცავს 31 დასახელებას.

თავი I. საავიაციო აირტურბუნული ძრავებისათვის ელექტრო ძრავა-გენერატორული მოწყობილობების კონსტრუქციული სქემების მიმოხილვა

თანამედროვე საჰაერო ხომალდების საფრენოსნო ტექნიკური მახასიათებლების და საექსპლუატაციო მონაცემების შემდგომი გაუმჯობესების მიზნით საზღვარგარეთის წამყვანი საავიაციო ფირმების მიერ მიმდინარეობს სამეცნიერო კვლევითი სამუშაოები შემდეგი მიმართულებებით: საჰაერო ხომალდებისა და ძრავების პერსპექტიული კონსტრუქციული სქემების და დამზადების ტექნოლოგიების შემუშავება, აგრეგატების მასა - გაბარიტული მაჩვენებლების გაუმჯობესება, ტექნიკური მომსახურების დანახარჯების შემცირება, საწვავისა და შემზეთი მასალების ხარჯის შემცირება, დეტალებისა და კვანძების დამზადება 3D პრინტერის გამოყენებით (მოცულობითი ბეჭვდა), გაუმჯობესებული მახასიათებლებიანი მუდმივი მაგნიტების გამოყენებით ელექტრო ძრავებისა და გენერატორების დაპროექტება, საერთაშორისო ნორმებით დადგენილი ეკოლოგიური მაჩვენებლების შემდგომი გაუმჯობესება და სხვა.

ერთ-ერთ პერსპექტიულ მიმართულებას რომელიც პასუხობს ზემოთ ჩამოთვლილ მოთხოვნებს წარმოადგენს „მთლიანად ელექტროფიცირებული თვითმფრინავის“ კონცეფციის რეალიზაცია [9], [11].

მოცემული კონცეფციის განხორციელება საშუალებას იძლევა გამოვრიცხოთ: თვითმფრინავის ცენტრალიზებული ჰიდროსისტემა და პნევმოსისტემა რომლისთვისაც ჰაერის ართმევა ხდება უშალოდ ძრავადან, აგრეთვე კბილანური გადაცემები თვითმფრინავისა და ძრავას აგრეგატების აძვისათვის. ამ დროს საგრძნობლად იცვლება

ძალური დანადგარის აგრეგატებისა და კვანძების ფუნქციები და შეთანწყობა. ძრავას აღარ ექნება აგრეგატების აძვრის კოლოფი ძველი სახით. სტარტერ- გენერატორი გარე განლაგების ნაცვლად ჩადგმული იქნება ძრავას შიგნით მაღალი წნევის კომპრესორის კასკადში. დამხმარე ძალური დანადგარი გამოყენებული იქნება ელექტრო ენერჯის გენერირებისათვის. ამრიგად „მთლიანად ელექტროფიცირებული თვითმფრინავის“ ელექტროფიკაციის დონის ამაღლებას თან ახლავს როგორც ელექტროენერჯის წყაროების ასევე ელექტრო მომარაგების სისტემების სიმძლავრეების გაზრდა. უნდა აღინიშნოს, რომ ამ მიმართულებით უკვე გადადგმულია სერიოზული ნაბიჯები რასაც ადასტურებს საჰაერო ხომალდ Boeing-ის სხვადასხვა თაობებში და მოდიფიკაციებში ელექტრო კვების მომხმარებლებისათვის გაზრდილი სიმძლავრეები.

თანამედროვე საჰაერო ხომალდებს ძირითადად გააჩნიათ ელექტროკვების ორი სისტემა. პირველადს წარმოადგენს ცვლადი დენის სისტემა ძაბვით 115 ვ და სიხშირით 400 ჰც ხოლო მეორადს მუდმივი დენის სისტემა ძაბვით 28 ვ.

საჰაერო ხომალდებზე Boeing 737 Original და 737 Classic ელექტროენერჯის წყაროს წარმოადგენს ორ ძრავაზე დაყენებული ცვლადი დენის სინქრონული გენერატორი მუდმივი ბრუნვების ამძრავით და დამხმარე ძალური დანადგარის გენერატორი. გენერატორების სიმძლავრე შეადგენს 40 კვტ. მეორადს წარმოადგენს მუდმივი დენის სისტემა ძაბვით 28 ვ, რომლის ენერჯის წყაროს წარმოადგენს სამი გამმართველი მოწყობილობა და სააკუმულიატორო ბატარეა.

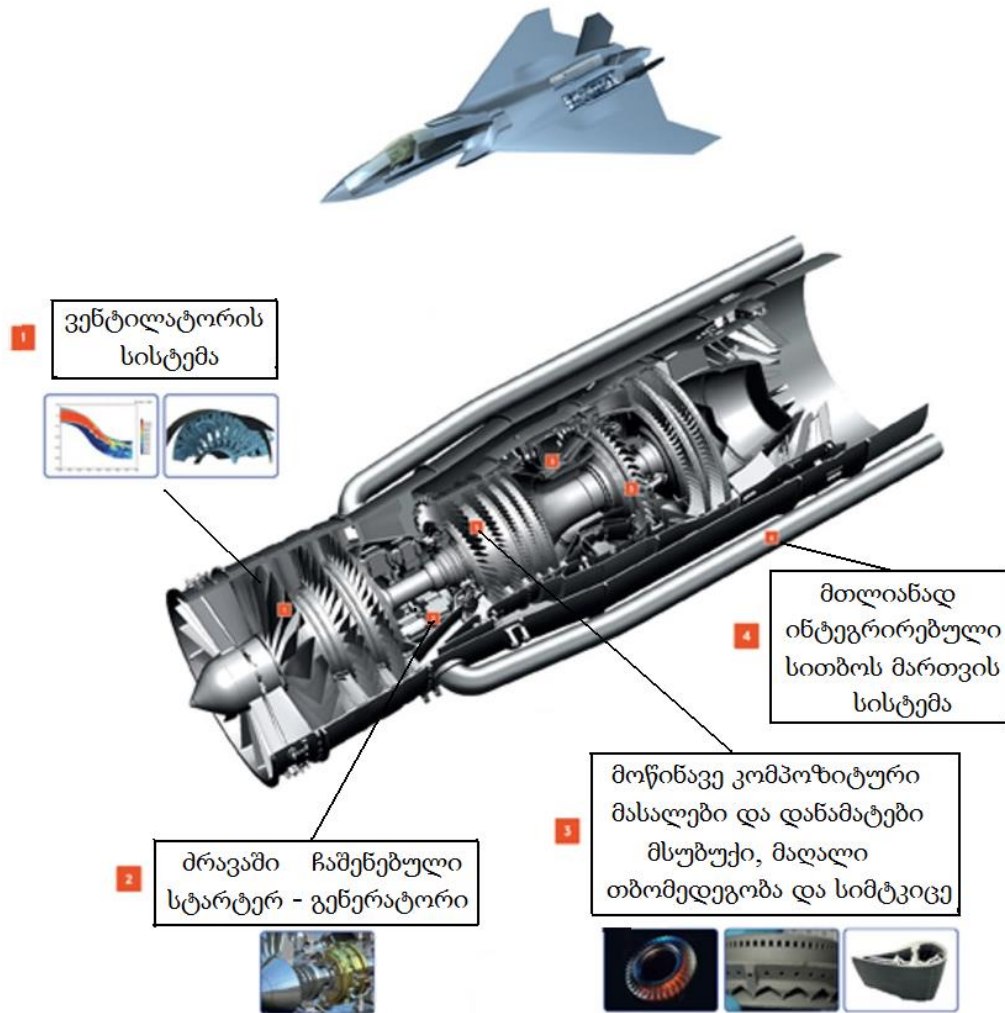
საჰაერო ხომალდებზე Boeing NG ელექტრომომარაგების სისტემა რამდენადმე შეცვლილია 737 Classic-თან შედარებით - შეცვლილია ელექტრო ენერჯის განაწილების სისტემა, დამატებულია დამხმარე ძალური დანადგარის გაშვების სააკუმულიატორო ბატარეა და დაყენებულია ახალი გენერატორები, რომლებიც კომბინაციაში არიან მუდმივი ბრუნვების ამძრავთან Integrated Driven Generator (IDG) 90 კვტ-ის სიმძლავრით. ელექტრული მართვის პანელზე დაყენებულია ციფრული ინდიკატორი ისრიანი მაჩვენებლის მაგივრად.

საჰაერო ხომალდ Boeing 777-ზე ელექტრომომხმარებლებისათვის გამომუშავდება 1450 კვტ ჯამურ ელექტროენერჯია. ამისთვის ორივე ტურბოპროპელსატორულ ძრავაზე General

Electric GE90-115B დაყენებულია ორ-ორი 250 - კვტ-იანი და დამხმარე ძალურ დანადგარზე ასევე ორი 225კვტ-იანი გენერატორები.

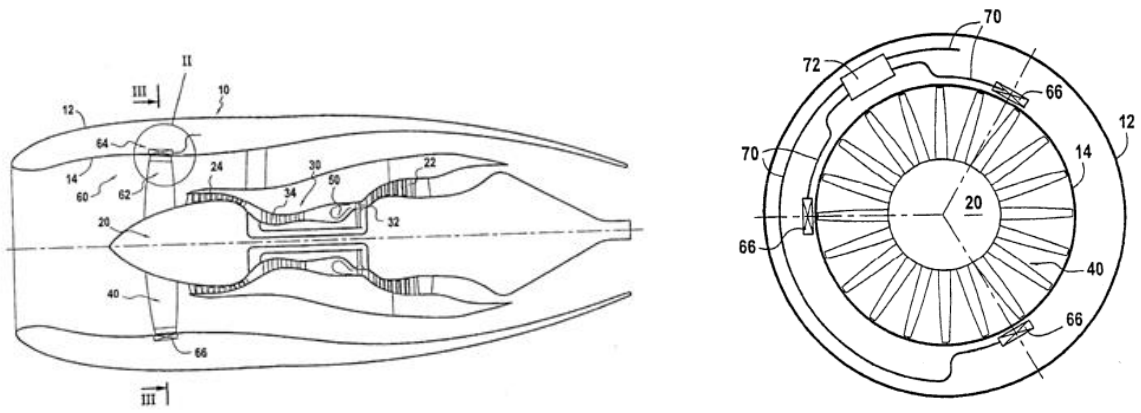
საინტერესოა ასევე ინფორმაცია იმის შესახებ, რომ ბრიტანული ძრავათმშენებელი კომპანია Rolls-Royce ამუშავებს მეექვსე თაობის ტურბორეაქტიულ ძრავას რომლითაც აღიჭურვება TEAM TEMPEST-ის ავიაგამანადგურებლები და რომელთა წარმოებაში ჩაშვება გათვალისწინებულია 2035 წლიდან. მოცემულ ძრავაში მაღალი საფრენოსნო-ტექნიკური მონაცემების მისაღწევად გამოყენებული იქნება თანამედროვე მასალები და ტექნოლოგიები, მნიშვნელოვნად გაიზრდება ძრავას მიერ გამომომუშავებული ელექტრო ენერჯია. ასევე გათვალისწინებულია მთლიანად ინტეგრირებული სითბოს მართვის სისტემის და მაღალი ელექტრო ენერჯიის კვების წყაროს ძრავაში ჩაშენებული სტარტერ-გენერატორის გამოყენება (ნახ. 1.1) [10] , [23].

ROLLS-ROYCE-ის მომავლის ტურბო-რეაქტიული ძრავა



ნახ. 1.1. Rolls-Royce-ის პერსპექტიული ტურბორეაქტიული ძრავას სქემა

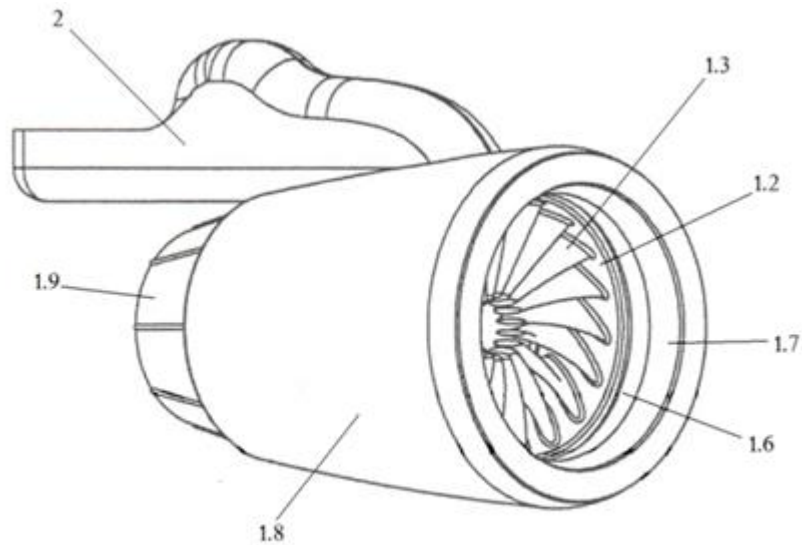
ამ საკითხის ირგვლივ არსებული სამეცნიერო ნაშრომებისა (4) და ქვემოთ მოყვანილი გამოგონებების: პატენტი №RU2490497 C2 2006 „ტურბორეაქტიული ძრავა ვენტილატორში განთავსებული ელექტრო გენერატორით“ (ნახ.1.2) [14];



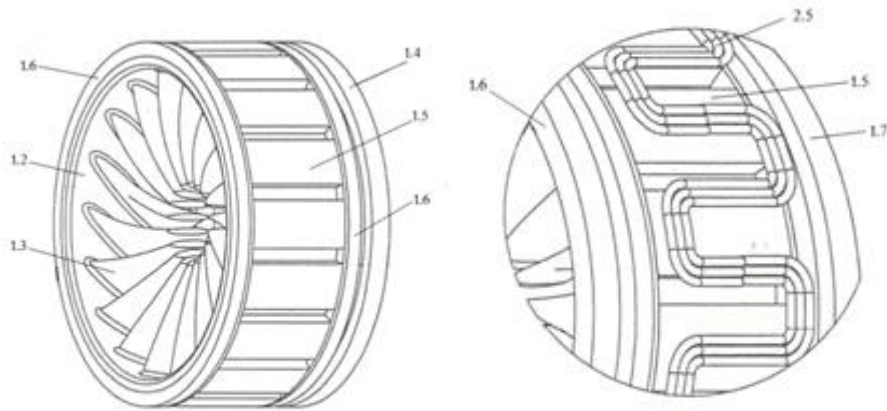
ნახ. 1.2. ტურბორეაქტიული ძრავა ვენტილატორში განთავსებული ელექტრო გენერატორით:

12 - ძრავას ჰაერმიმღების გარე ზედაპირი; 14 - ძრავას ჰაერმიმღების შიდა ზედაპირი; 20 - კოკი; 22 - დაბალი წნევის ტურბინა; 24 - დაბალი წნევის კომპრესორი; 32 - მაღალი წნევის ტურბინა; 34 - მაღალი წნევის კომპრესორი; 50 - წვის კამერა; 30 - ტურბოკომპრესორის გარე კორპუსი; 40 - ვენტილატორის ფრთა; 60 ვენტილატორის არხი; 62 - მუდმივი მაგნიტი; 64 - ელექტრო სვია; 68 - დენის გამმართველი; 70 - ელექტრო სადენები; 72 - სადენების სამაგრი კვანძი

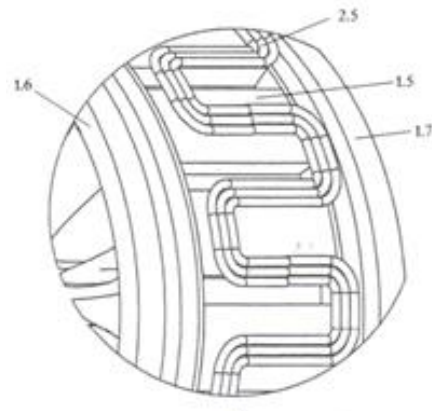
პატენტი WO2015/191017A1 (17.12.2015) „საჰაერო ხომალდებისათვის ზეგამტარიანი ელექტროძრავა ვენტილატორით“ (ნახ.1.3), [31] ;



ა)



ბ)

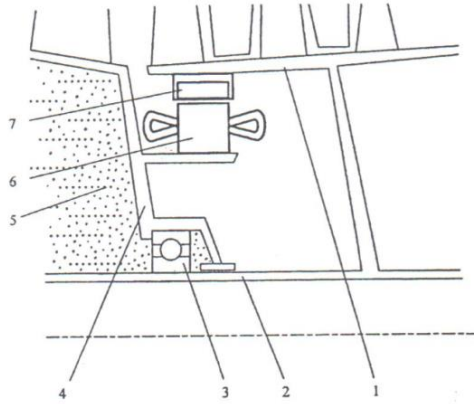


გ)

ნახ.1. 3. ვენტილატორში ინტეგრირებული მუდმივმაგნიტებიანი ელექტრო ძრავა

1.2 - ვენტილატორის გარე სარტელი; 1.3 - ვენტილატორის ფრთა; 1.4 - ტორსული საყრდენი ზედაპირი; 1.5 - მუდმივი მაგნიტი; 1.6 - მაგნიტური სარტყელი; 1.7 - ვენტილატორის გონდოლასსიდა ზედაპირი ; 1.8 - ძრავას გონდოლას გარსშემონაკერი; 1.9 საქსენის საგდულები; 2 - ზეგამტარი კვანძი

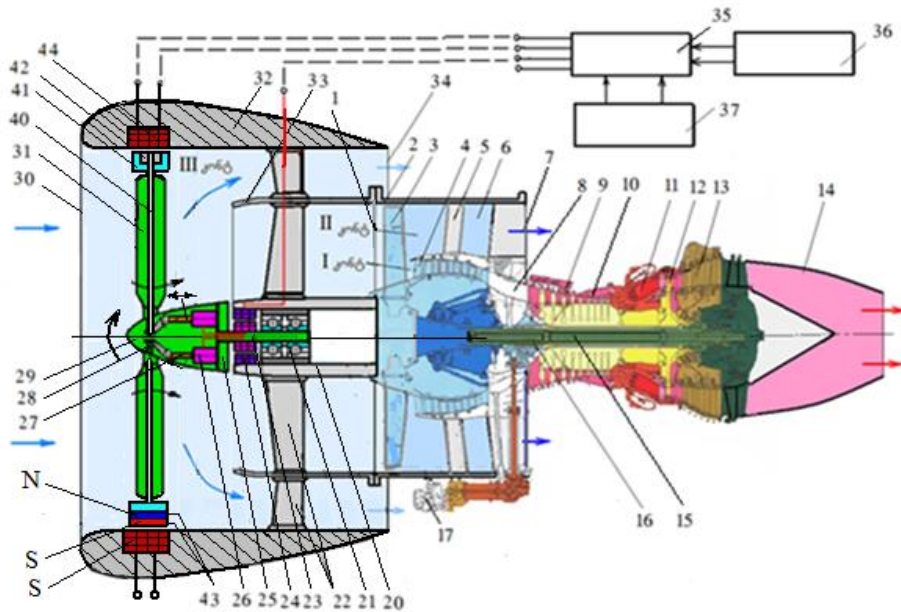
პატენტი №PΦ2252316 „აირტურბინული ძრავა ჩამონტაჟებული ძრავა-გენერატორული მოწყობილობით8". " ნახ.1.4. [



ნახ.1.4. აირტურბინული ძრავა ჩამონტაჟებული ძრავა-გენერატორული მოწყობილობით:

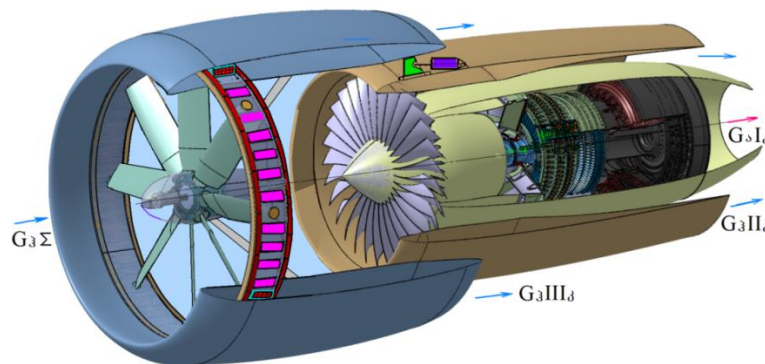
- 1 - მაღალი წნევის კომპრესორის როტორი; 2 - ტურბო-კომპრესორის ლილვი; 3 - ბურთულსაკისარი; 4 - დაბალი წნევის კომპრესორის კორპუსი ; 5 - ზეთის არე; 6 - უძრავი ელექტრო გრაგნილი; 7 - მუდმივი მაგნიტი

პატენტი GEP 2017 6732B „სამკონტურიანი ტურბორეაქტიული ძრავა“ (ნახ. 1.5, 1.6, 1.7) [5], ანალიზის საფუძველზე მიზანშეწონილია განხორციელდეს მათ ვენტილატორებში და კომპრესორებში ძრავა-გენერატორული მოწყობილობების ინტეგრაციის საკითხების დამუშავება (ნახ.1.8.)

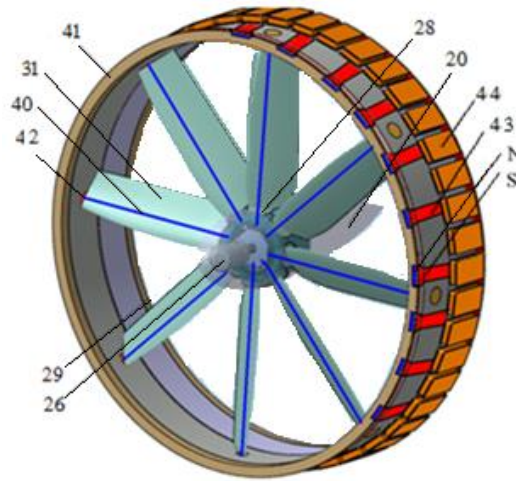


ნახ. 1.5. სამკონტურიანი ტურბორეაქტიული ძრავა საჰაერო ხრახნში ინტეგრირებული ძრავა - გენერატორული მოწყობილობით :

1 - საბაზო ტურბოვენტილატორული ძრავა; 2 - მეორე კონტურის კორპუსი; 3 - ვენტილატორი; 4 - დაბალი წნევის კომპრესორის როტორი; 5 - პირველი და მეორე კონტურების კორპუსების დგარი; 6 - მეორე კონტურის არხი; 7 - მეორე კონტურის გამოსასვლელი მოწყობილობა; 8 - პირველი კონტურის გამდინარე არხი; 9 - მაღალი წნევის კომპრესორი; 10 - პირველი კონტურის კორპუსი; 11 - წვის კამერა; 12 - მაღალი წნევის ტურბინა; 13 - დაბალი წნევის ტურბინა; 14 - რეაქტიული საქმენი; 15 - დაბალი წნევის ტურბო-კომპრესორის ლილვი; 16 - მაღალი წნევის ტურბო - კომპრესორის ლილვი; 17 - ძრავას გაშვების საჰაერო ტურბინა; 20 -საჰაერო ხრახნის ძალური კორპუსი; 21 - საჰაერო ხრახნის საკისრების კვანძი; 22 - ვერტიკალური დგარი; 23 - საჰაერო ხრახნის ლილვი; 24 - დენმომხსნელი; 25 - საჰაერო ხრახნის მილისა; 26 - ბიჯური ელექტროძრავა; 27 - საწევი; 28 - ფრთების სახსრული ჩამაგრების ღერძი; 29 - საჰაერო ხრახნი; 30- შესასვლელი არე; 31 - საჰაერო ხრახნის ფრთები ; 34 -მესამე კონტურის გამოსასვლელი არხი



ნახ. 1.6. სამკონტურიანი ტურბორეაქტიული ძრავას საერთო ხედი საჰაერო ხრახნში ინტეგრირებული ძრავა -გენერატორული მოწყობილობით



ნახ. 1.7. მუდმივმაგნიტებიანი საჰაერო ხრახნი :

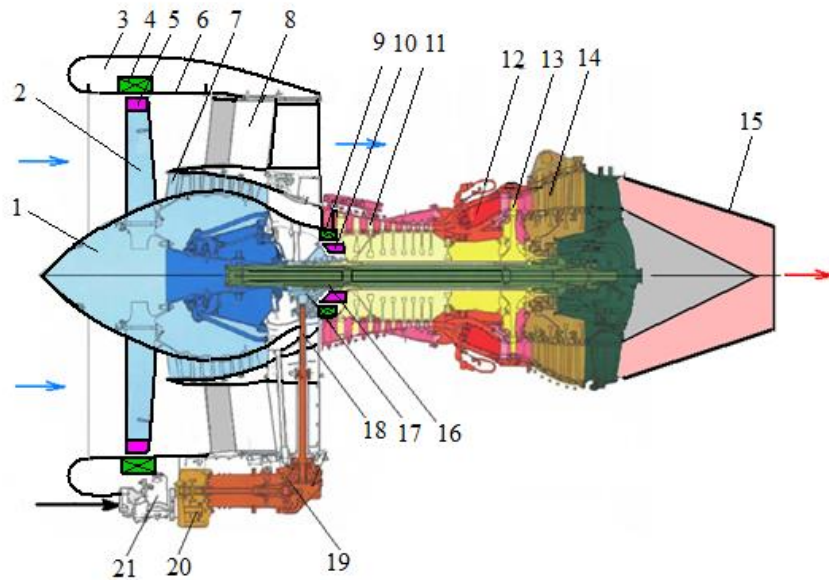
20 - საჰაერო ხრახნის საკისრების კვანძი; 26 - ბიჯური ელექტრო ამძრავი; 28 - კოკი; 29 - დამაფიქსირებელი რგოლი; 31- ფრთა; 40 - ფრთის ღერძი; 41 -გარე ძალური სარტყელი; 42 - სახსარი; 43 - მუდმივი მაგნიტი; 44 - ელექტრო ხვიები

ელექტრო ძრავა-გენერატორული მოწყობილობის აირტურბინული ძრავას ვენტილატორში (კომპრესორში) განთავსება უზრუნველყოფს რიგი დადებითი ფაქტორების რეალიზაციას:

- ძირითად უპირატესობას წარმოადგენს ის, რომ წარმოქმნილია დიდი ადგილი ძრავა-გენერატორული მოწყობილობის განსათავსებლად, რადგანაც მეორე კონტურის გარე კორპუსს გააჩნია საკმაოდ დიდი დიამეტრალური ზომები ელექტრო გრაგნილების მოსათავსებლად, რაც საშუალებას იძლევა რეალიზებული იქნეს დიდი სიმძლავრის ელექტროდენი როგორც გენერატორულ ასევე ძრავას რეჟიმში მუშაობის დროს.

- გარდა ამისა იმასთან დაკავშირებით, რომ როგორც ვენტილატორი ასევე კომპრესორი მდებარეობენ ძრავას ცივ ზონაში, ეს უზრუნველყოფს ელექტრო ხვიების და მუდმივი მაგნიტების კარგ გაგრილებას რითაც მიიღწევა მათი საიმედო მუშაობა.

- მნიშვნელოვნად მცირდება მექანიკური დანაკარგები დაკავშირებული აირტურბინული ძრავებით აძრული ელექტროგენერატორების ჩანაცვლებაზე მის მბუნავ ელემენტებში (ვენტილატორში, საჰაერო ხრახნში დაბალი და მაღალი წნევის კომპრესორში).



ნახ.1.8. ორკონტურიანი ტურბოვენტილატორული ძრავას კონსტრუქციული სქემა ვენტილატორში და მაღალი წნევის კომპრესორში ინტეგრირებული ძრავა-გენერატორული მოწყობილობებით:

1 - კოკი; 2 - ვენტილატორი; 3 - გონდოლა; 4 - ელექტრო ხვია; 5 - მუდმივი მაგნიტი; 6 - გონდოლას შიდა ზედაპირი; 7 - დაბალი წნევის კომპრესორი; 8 - მეორე კონტურის არხი; 9 , 10 - მუდმივმაგნიტებიანი სტარტერ - გენერატორი; 11 - მაღალი წნევის კომპრესორი; 12 - წვის კამერა; 13 - მაღალი წნევის ტურბინა; 14 - დაბალი წნევის ტურბინა; 15 - რექტიული საქმენი; 16, 17, 18,19,20 მაღალი წნევის ტურბო - კომპრესორის კბილანური ამძრავი; 21 - საჰაერო ტურბინა

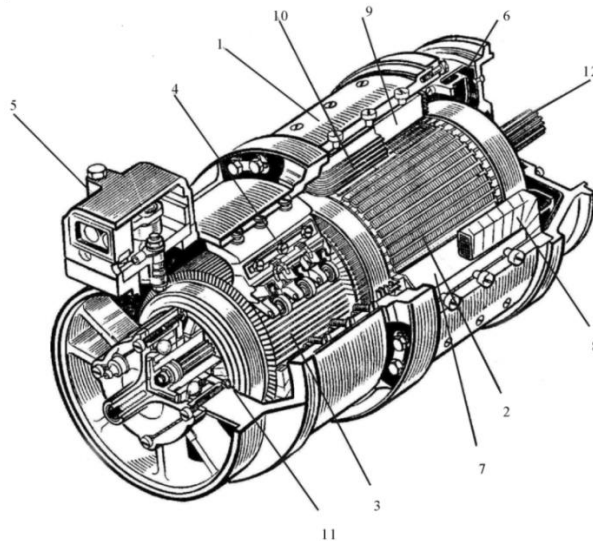
მოცემული სადოქტორო ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს საჰაერო ხომალდ Boeing 737-ის ორკონტურიანი ტურბოვენტილატორული ძრავების CFM-56 მაგალითზე [4], [13], მის მბრუნავ კვანძებში (ვენტილატორი, დაბალი წნევის კომპრესორი, მაღალი წნევის კომპრესორი) ინტეგრირებული ელექტროძრავა-გენერატორული მოწყობილობის პარამეტრების ოპტიმიზაცია მათემატიკური მოდელირების პროგრამირების მეთოდების გამოყენებით რაზედაც მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული ელექტრო მოწყობილობის როგორც მასა გაბარიტები ასევე მარგი ქმედების კოეფიციენტი. სასრული ელემენტების მეთოდთან ერთად გეომეტრიული პროგრამირება წარმოადგენს

მოხერხებულ ინსტრუმენტს მრავალპარამეტრებიანი მოწყობილობების დაპროექტების დროს ისეთების როგორებიც არიან ელექტრო ძრავები და გენერატორები.

ოპტიმიზაცია საჭიროა ჩატარდეს ორ ეტაპად:

1. ძრავა-გენერატორის ოპტიმალური ტიპის შერჩევა ამჟამად არსებულიდან;
2. შერჩეული ძრავა-გენერატორული მოწყობილობის ოპტიმალური პროექტირება.

ნახ. 1.9-ზე წარმოდგენილია მუდმივი დენის საავიაციო სტარტერ-გენერატორის კონსტრუქციული სქემა.



ნახ.1.9. მუსა-კოლექტორიანი სტარტერ- გენერატორი:

- 1- სტატორი; 2- ღუზა; 3 -კოლექტორი; 4 - მუსდამჭერი; 5-კლემების კოლოფი; 6 - ვენტილატორი; 7- მთავარი პოლუსი; 8 - მთავარი პოლუსის გრაგნილი; 9 - დამატებითი პოლუსი; 10 - დამატებითი პოლუსის გრაგნილი; 11- დრუ ლილვი; 12 - შლიცებიანი ლილვი

სტარტერისა და გენერატორის ერთ აგრეგატში განთავსება განპირობებულია ელექტრული მანქანების შექცევადობის შესაძლებლობით. ამ თვისების გამოყენება ელექტრო მოწყობილობებში საშუალებას იძლევა მნიშვნელოვნად შემცირდეს მათი მასა.

მოცემული ძრავა-გენერატორი გამოირჩევა დაბალი საიმედოობით, რაც გამოწვეულია მუსებიან კოლექტორული კვანძის არსებობით.

ბიჯური, ინდუქციური და მათი მსგავსი ძრავები ასევე არ არიან მისაღები მასალების არაკომომიური გამოყენების გამო (აქტიური მასალების გამოყენების კოეფიციენტი ერთი რიგით დაბალი აქვთ ვიდრე ჩვეულებრივ ძრავებს).

ამჟამად დიდ ინტერესს იწვევს სხვადასხვა შესრულების უკონტაქტო სინქრონული და ასინქრონული ძრავები მუდმივი მაგნიტებით რომლებსაც გააჩნიათ მაღალი საექსპლუატაციო მახასიათებლები [17]. ამ მიმართულებით მნიშვნელოვან წარმატებას მიაღწია გერმანულმა ფირმა Siemens-მა რომელმაც დაამზადა საავიაციო ელექტროძრავა SP260D 260 კვტ სიმძლავრით და რომლის მასამ შეადგინა 50 კგ.

ცნობილია, რომ ოპტიმიზაციის დროს ელექტრომექანიკური გარდამქმნელების შემავალი პარამეტრების რაოდენობამ შეიძლება შეადგინოს რამდენიმე ათეულზე მეტი. ძირითადი გეომეტრიული ზომების (დიამეტრის $D_{შიგა}$, $D_{გარე}$, სიგრძის L) , გარდა არსებობენ კბილებისა და კილოების ზომები და ფორმები, რაც საგრძნობლად მოქმედებს მოწყობილობის გამოსასვლელ მაჩვენებლებზე. მაგნიტური ინდუქციები, დენის სიმკვრივეები, სხვადასხვა მასალენის თბოგამტარობები ასევე წარმოადგენენ სირთულეს საუკეთესო ვარიანტის შერჩევის დროს.

პროექტირების ჩვეულებრივ პრაქტიკაში არსებობს რეკომენდაციების დიდი რაოდენობა ცხრილების, მრუდებისა და სხვა თვალსაჩინო მაგალითების სახით. მაგალითად მანქანის აქტიური სიგრძის ფარდობა დიამეტრთან მიღებულია ზღვრებში 1,5–3; მაგნიტის სიმაღლის ფარდობა ლილვისა და მილისას სხვადასხვა დიამეტრების დროს და ა.შ. ამ რეკომენდაციების შესრულება უზრუნველყოფს ელექტრული მანქანის ოპტიმალური ვარიანტის მიღებას მაგრამ განხილული შემთხვევისათვის ზოგიერთი რეკომენდაცია მიუღებელია და არაოპტიმალურია.

აირტურბინული ძრავების კონსტრუქციიდან გამომდინარე ძრავა-გენერატორული მოწყობილობა მონტაჟდება ვენტილატორში, რომლის გარე დიამეტრი შეადგენს $D_{გარე} = 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0$ მეტრს, ხოლო რაც შეეხება მუდმივი მაგნიტების აქტიურ სიგრძეს ის იცვლება $L = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2$ მეტრის ფარგლებში, შესაბამისად დიამეტრისა და აქტიური სიგრძის ფარდობა კონკრეტულ შემთხვევაში მიიღება თითქმის ათეულჯერ მეტი ვიდრე პრაქტიკაში მიღებული ძრავებისათვის. ასევე შეიძლება უგულვებელყოთ რეკომენდაციები დაკავშირებული მუდმივი მაგნიტების სიმაღლის შერჩევაზე. მოცემულ კონკრეტულ შემთხვევაში მაგნიტები განცალკევებულია ლილვიდან.

ზემოთ თქმულიდან გამომდინარე საჭიროა ჩატარდეს თეორიული და პრაქტიკული ექსპერიმენტები შესაბამისი საპროექტო მონაცემების დაზუსტებისა და განსაზღვრისათვის.

ძრავა-გენერატორული მოწყობილობების პროექტირების საწყის ეტაპზე ოპტიმიზაციის ამოცანის გამარტივების მიზნით საჭიროა შევამციროთ შემავალი ცვლადების რიცხვი, ავიღოთ ფიქსირებული მნიშვნელობა და თანდათანობითი მიახლოებით გავაგრძელოთ პროექტირების პროცესი.

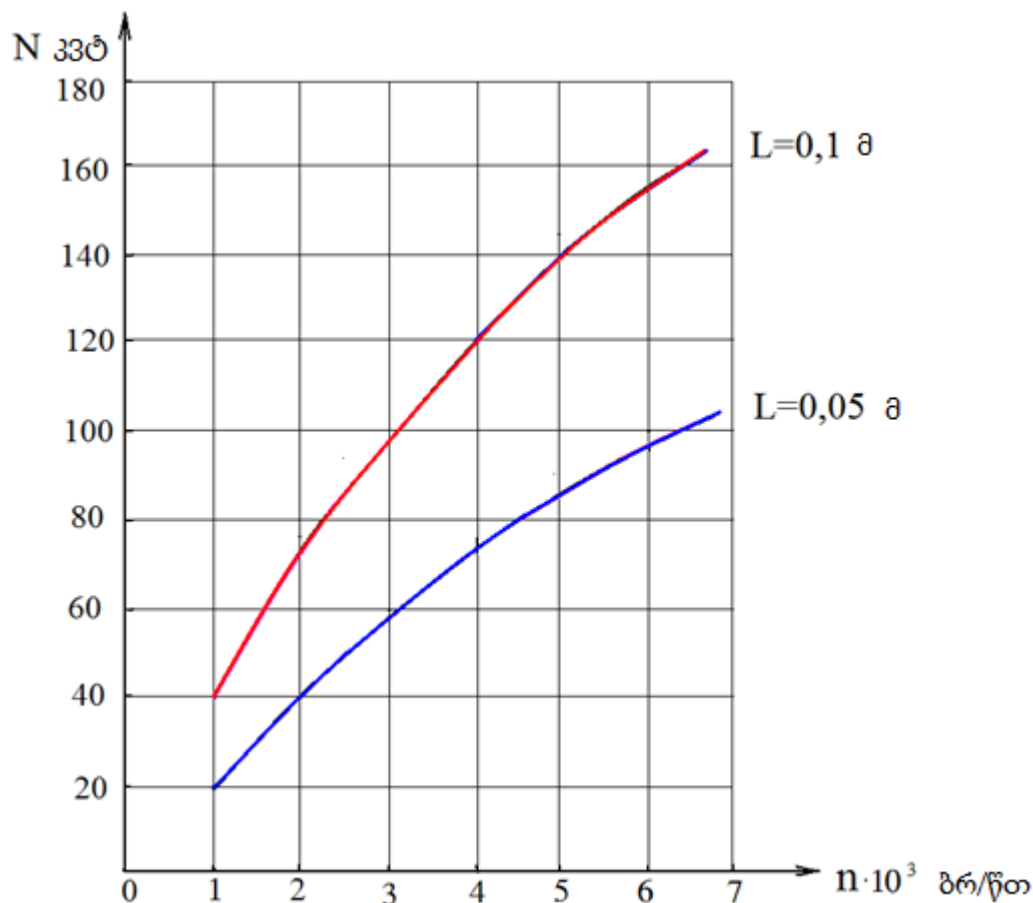
მაგალითად, თუ ძრავას მაგნიტური გამტარის შიგა დიამეტრი დაფიქსირებულია და შეადგენს $D_{\text{შ}} = 1,0$ მ-ს, მაშინ მისი სიგრძე იცვლება დისკრეტულად 4 ზემოთმოყვანილ ფიქსირებულ წერტილში. რაც შეეხება ელექტრო მაგნიტურ დატვირთვებს რომელზედაც ასევე არის დამოკიდებული მიზნობრივი ფუნქციის ოპტიმალური წერტილი მათი ნამრავლი ავიღოთ მუდმივი ე.ი. $A_s \cdot B_s = \text{const}$.

ძრავების პროექტირების დროს მუდმივი მაგნიტების აღზნებით პროექტის წინასწარი ვარიანტებისათვის საკმაო სიზუსტით შეიძლება განისაზღვროს მაგნიტური სისტემით გამოცემული ენერგია. მაშინ ოპტიმიზაციის შერჩევის ამოცანა პირველ ეტაპზე საგრძნობლად მარტივდება და შეიძლება განისაზღვროს ოპტიმალური ბრუნვათა რიცხვი და მასთან ერთმნიშვნელოვნად დაკავშირებული მაგნიტური სისტემის პოლუსების წყვილის ოპტიმალური რაოდენობა.

წინასწარი შემოწმებითი ანგარიში ჩატარებული იქნა სიხშირეებზე 400, 600, 800 და 1000 ჰც-ს და ელექტრომაგნიტური დატვირთვების დროს, რომლებიც შეესაბამებოდა მაგნიტების მიერ გამოცემულ მაქსიმალურ ენერგიას.

ოპტიმალური აღმოჩნდა ვარიანტი $2p=48$; რაც შეეხება გენერატორების მიერ განვითარებულ სიმძლავრეს ბრუნვათა რიცხვების დროს $n=1000, 2000, 3000, 4000, 5000$ და 6000 ბრ/წთ წარმოდგენილია ნახ. 1.10 -ზე მრუდების სახით [4].

სიმძლავრის შემცირების ტენდენცია აიხსნება განმაგნიტების მოქმედების გავლენაზე მაგნიტურ სისტემაზე მუდმივი მაგნიტებით. ამ ნაკლოვანების აღმოფხვრა შესაძლებელია უკონტაქტო კომბინირებული აღზნების გამოყენებით.



ნახ. 1.10. განვითარებული სიმძლავრის დამოკიდებულება როტორის ბრუნვათა რიცხვზე ფიქსირებული გეომეტრიული ზომების $D_{შიგა}$, $D_{გარე}$ და ელექტრომაგნიტური დატვირთვების $A_s \cdot B_s = \text{const}$ დროს

კლასიკური ელექტრომექანიკის თეორიით ცნობილია, რომ ელექტრული მანქანის განვითარებული სიმძლავრე ძირითადად დამოკიდებულია გეომეტრიულ ზომებზე, ელექტრომაგნიტურ დატვირთვებზე და ბრუნვათა რიცხვზე.

$$N = n \cdot D^2 \cdot L \cdot A_s \cdot B_s \quad (1.1)$$

სადაც: n -ბრუნვათა რიცხვია ბრ/წთ; D -ძრავას შიგა დიამეტრია სმ; L -მაგნიტური გამტარის აქტიური სიგრძეა სმ, A_s -ხაზობრივი დატვირთვაა ამპერი/სმ; B_s -მაგნიტური ინდუქცია ჰაუსებში.

უნდა აღინიშნოს, რომ სიმძლავრე N შიგა დიამეტრზე დამოკიდებულია კვადრატულად, რაც საგრძნობლად აღემატება სხვა პარამეტრებს,

გენერატორის მიერ გამომუშავებული სიმძლავრის გაზრდა შესაძლებელია ფორმულაში მოყვანილი მამრავლების გაზრდით მიზანშეწონილი შეთანწყობით. მაგრამ ელექტრომაგნიტურ დატვირთვებს გაზრდის მხარეს აქვთ შეზღუდვები გარე მაგნიტური ველების განმაგნიტების მოქმედების გამო. რაც შეეხება საანგარიშო სიგრძის გაზრდას ეს იწვევს გარკვეულ ნაკლოვანებებს, კერძოდ ლილვის ლუნვის გაზრდას და შესაბამისად საანგარიშო საჰაერო ღრეჩოს იძულებით მატებას, ტემპერატურული პარამეტრების გაუარესებას, გადახურებას, დამზადების ტექნოლოგიის გართულებას და ა.შ. აქედან გამომდინარე ელექტრომანქანების დაპროექტებას ფიქსირებული ბრუნვათა რიცხვის დროს და გაზრდილი ფარდობით $\lambda=D/L$, გააჩნია უდავოდ დიდი უპირატესობა. უარყოფით მხარეს მიეკუთვნება ცუდი გაშვების თვისებები, სიმძლავრის დაბალი კოეფიციენტი მაგნიტური ნაკადის გაზრდილი გაფანტვის გამო და არასტაბილური ბრუნვის დაბალი კოეფიციენტი.

ელექტრული მანქანები რომლებიც გამოყენებულია წარმოებაში ძირითადად დაპროექტებული არიან მინიმალური ღირებულების გათვალისწინებით გამოსასვლელი პარამეტრების სხვადასხვა შეზღუდვებით.

მოცემულ ნაშრომში ოპტიმალური პროექტირების მიზნით მიზანშეწონილია მათემატიკური მოდელირების გეომეტრიული პროგრამირების გამოყენება [1]. გეომეტრიული პროგრამირების მეთოდი კომბინაციაში ექსპერიმენტის დაგეგმასთან იძლევა სასურველ შედეგს მათემატიკური მოდელის მიზნობრივი შემზღუდავის სახით.

თავი II. საავიაციო ძრავა-გენერატორული მოწყობილობების პროექტირების მეთოდიკა

2.1. ძრავა-გენერატორის პროექტირების სტრუქტურა

საავიაციო ელექტროძრავა-გენერატორულ მოწყობილობების პროექტირება გართულებულია იმ ფაქტორით, რომ ერთი და იგივე მოწყობილობამ უნდა შეასრულოს აბსოლუტურად განსხვავებული ამოცანა, იმუშაოს სხვადასხვა რეჟიმებში, კერძოდ გენერატორული რეჟიმის შემთხვევაში იფუნქციონიროს ხანგრძლივ დამყარებულ რეჟიმში, ხოლო ძრავას რეჟიმის დროს – გარდამავალ რეჟიმში. ორივე შემთხვევაში გეომეტრიული ზომები და სტატიკური ხასიათის პარამეტრები დარჩება საერთო, ხოლო ელექტრომაგნიტური დატვირთვები, დინამიკური ხასიათის პარამეტრები იქნება საგრძნობლად განსხვავებული, ერთმანეთისაგან. თვისობრივად განსხვავებული იქნება აგრეთვე ძრავას და გენერატორულ რეჟიმში მომუშავე მოწყობილობის გამოსავალი პარამეტრები.

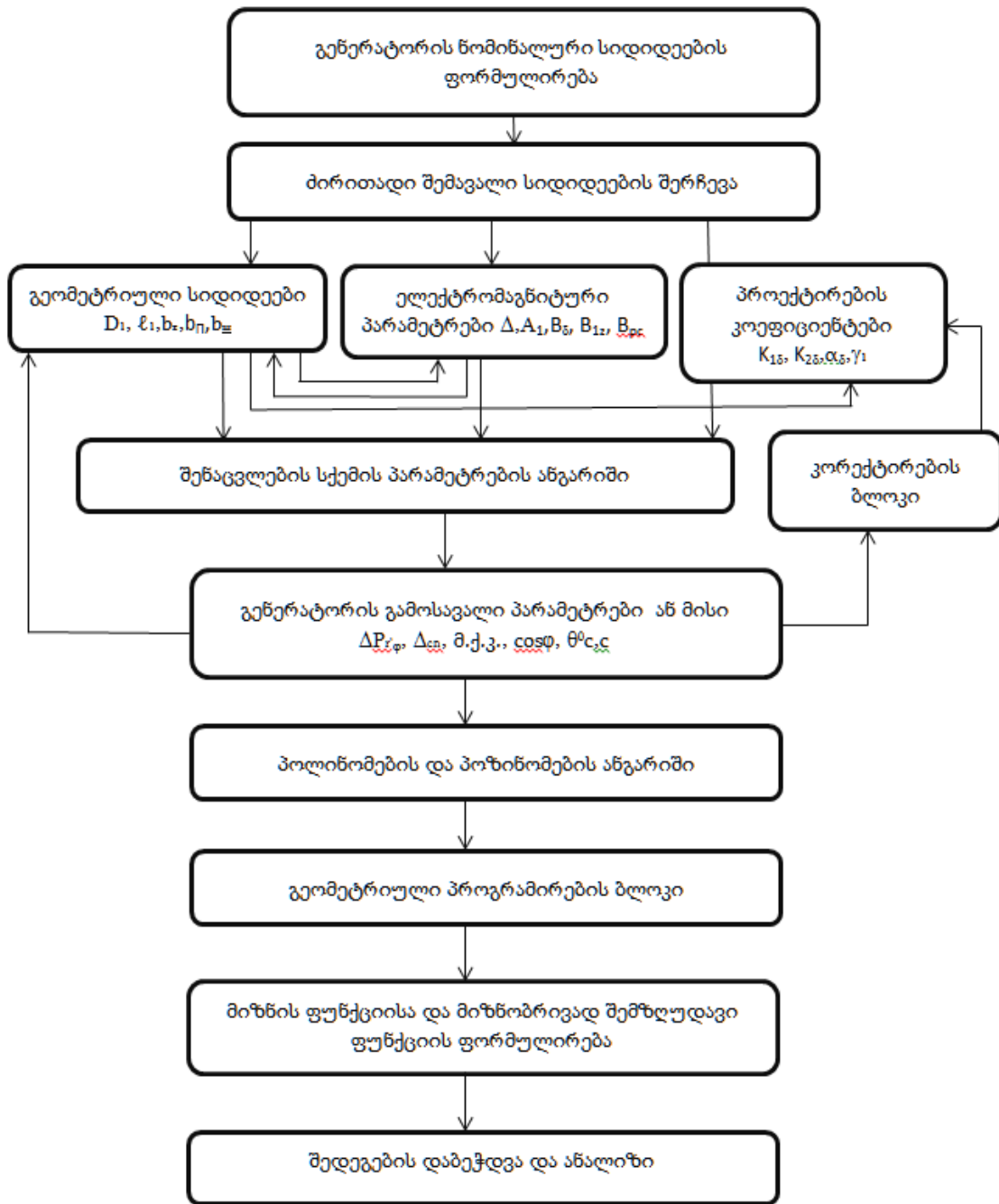
პროექტირება შედგება რამდენიმე ეტაპისაგან და ქვეეტაპისაგან.

პირველ ეტაპზე შერჩეულია პროექტირების მეთოდები. არსებული გეომეტრიული და პარამეტრული მეთოდებიდან შერჩეულია პროექტირების გეომეტრიული მეთოდი.

პროექტირების მეორე ეტაპი მოიცავს მათემატიკური მოდელის შექმნას პოლინომების ან პოზინომების სახით.

მესამე ეტაპზე ხდება ოპტიმიზაციის ამოცანის გადაწყვეტა, კერძოდ, უამრავი ვარიანტიდან ოპტიმალური ვარიანტის შერჩევა, რომელიც დააკმაყოფილებს ძრავა-გენერატორის მიმართ წაყენებულ ყოველგვარ მოთხოვნებს.

იმისათვის, რომ გენერატორულ რეჟიმში ხანგრძლივად მომუშავე ძრავა-გენერატორი გარდავქმნათ განმეორებით ხანმოკლე რეჟიმში მომუშავე ძრავად, გამოყენებულია მუშა გრაგნილების პარალელური შეერთების ხერხი. ამ შემთხვევაში ძრავა-გენერატორის ძირითადი პარამეტრები, როგორცაა უძრავი და მოძრავი ნაწილების აქტიური და რეაქტიული წინააღმდეგობები, საგრძნობლად მცირდება, რაც თავის მხრივ იწვევს სიმძლავრის, გამშვი, მაქსიმალური და ნომინალური მომენტების ზრდას. ძრავა-გენერატორის პროექტირების სტრუქტურული სქემა მოცემულია ნახ. 2.1. – ზე [1], [2].

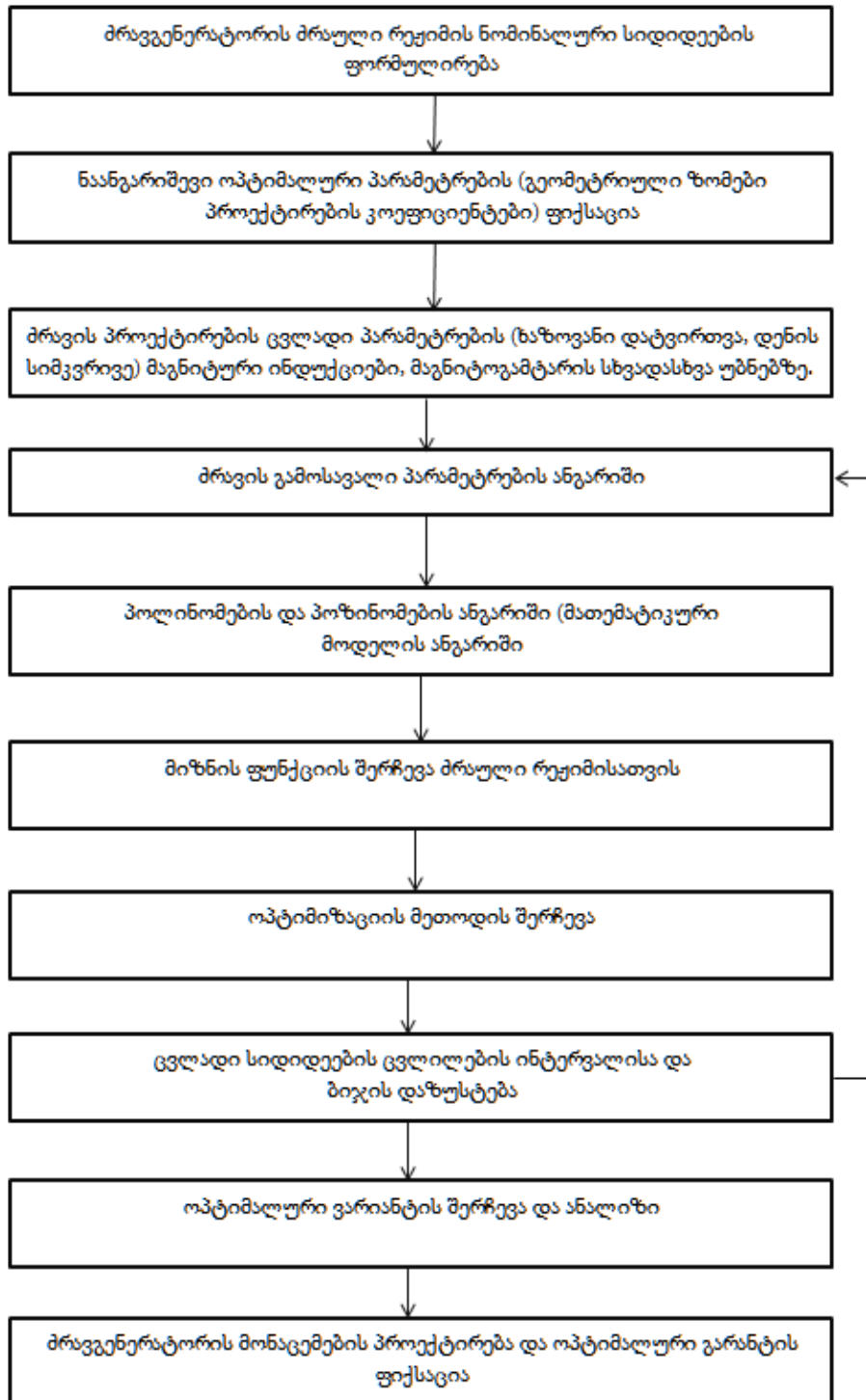


ნახ. 2.1. ძრავა-გენერატორის გენერატორული რეჟიმის ბლოკური სქემა

ძრავა-გენერატორის გენერატორული რეჟიმის ანგარიშის შედეგად მიღებულია ოპტიმალური გეომეტრიული ზომები მოძრავი და უძრავი ნაწილების დასამზადებლად.

რაც შეეხება ელექტრომაგნიტურ პარამეტრებს, როგორცაა ხაზოვანი დატვირთვა, დენის სიმკვრივე, მაგნიტური ინდუქცია მაგნიტოგამტარის სხვადასხვა უბანზე,

პროექტირების ცვლადი კოეფიციენტები და ა. შ. საანგარიშოა და ახლიდან შესარჩევია.
 ძრავა-გენერატორის ძრავას რეჟიმის ანგარიშის ბლოკური სქემა მოცემულია ნახ. 2.2. – ზე.



ნახ.2. 2 ძრავა-გენერატორის ძრავული რეჟიმის ბლოკური სქემა

ცხრილში N1 მოცემულია ძრავა-გენერატორის ოპტიმალური პროექტირების შემავალი სიდიდეების ნუსხა. იგი შეიძლება დავყოთ რამოდენიმე ქვეჯგუფებად, ესენია:

ა) მუდმივი პარამეტრები, რომლებიც დაპროექტირების პროცესის დროს არ იცვლიან აბსოლუტურ სიდიდეს,

ბ) ცვლადი შემავალი სიდიდეები, რომლებიც პროექტირების პროცესის დროს იცვლიან თავიანთ მნიშვნელობებს გარკვეულ ზღვრებში, განსაზღვრული ბიჯით.

გ) ცვლადი, ან მუდმივი კოეფიციენტები შესაბამისი ცვლილების ფარგლებით და ინტერვალით.

დ) მაგნიტოგამტარის გეომეტრიული ფიგურის ფორმები. კერძოდ კბილის და ღრმულის გეომეტრიული ზომები და ფორმა.

ე) მაგნიტის მაგნიტური მასალა, ფორმები და მაგნიტოგამტარის კომბინაციური სურათი.

ვ) საიზოლაციო მასალის იზოლაციის კლასი.

ზ) მაგნიტოგამტარის მარკა და ა. შ.

თ) ელექტრომაგნიტური დატვირთვები და ინდუქციები უბანზე. ცხრილში

2.1 მოცემულია პროექტირების პარამეტრების დასახელება ცვლილების ინტერვალი და ბიჯი.

ოპტიმალური ვარიანტის პოვნის გამარტივების მიზნით საჭიროა წინასწარ შეირჩეს ისეთი გამომავალი და შემავალი პარამეტრების სიდიდეები, რომ ოპტიმალური ვარიანტი მდებარეობდეს ან საზღვრებს შიგნით, ან საზღვარზე. მეორე ხერხი ანგარიშის გამარტივებისა მდგომარეობს შემდეგში, პირველ ეტაპზე რომელიმე შემავალი პარამეტრის ცვლილების ბიჯი შეირჩევა ამავე პარამეტრის ცვლილების ზღვრების 20% სიდიდის. ეს გარემოება საგრძნობლად ამცირებს საანგარიშო ვარიანტების რაოდენობას, ხოლო მეორე ეტაპზე შემავალი პარამეტრების ბიჯის ცვლილების სიდიდე დაიყვანება ინტერვალის სიდიდის 2% – მდე. რაც საგრძნობლად ამარტივებს ოპტიმალური ვარიანტის პოვნის სტრუქტურას. ცხრ. 2.1 მოცემულია თვალსაჩინოების მიზნით ზემოთაღწერილი ხერხის დემონსტრაცია.

ცხრილი 2. 1

N	ძრავა-გენერატორის პროექტირების მონაცემების დასახელება და ძრავას და გენერატორულ რეჟიმებში	აღნიშვნა	განზომილება MKC სისტემაში	ცვლადი სიდიდის ზღვარი ინტერვალი %-ში	ცვლილების ბიჯი
1	2	3	4	5	6
ძრავას რეჟიმი					
1	ნომინალური სიმძლავრე	$P_{\text{ძრ}}$	კვტ	-	-
2	ნომინალური სიხშირე	$f_{\text{ძრ}}$	ჰერცი	-	-
3	ფაზათა რაოდენობა	$m_{\text{ძრ}}$	ცალი	-	-
4	ნომინალური ძაბვა	$U_{\text{ნომ. ძრ}}$	ვოლტი	-	-
5	ბრუნვის სიხშირე	$n_{\text{ძრ}}$	ბრუნი/წთ	-	-
6	ძრავას გამშვიდების მომენტი	$M_{\text{გამშ}}$	კგმ		
7	გამშვიდების საფეხურების რაოდენობა	-	-		

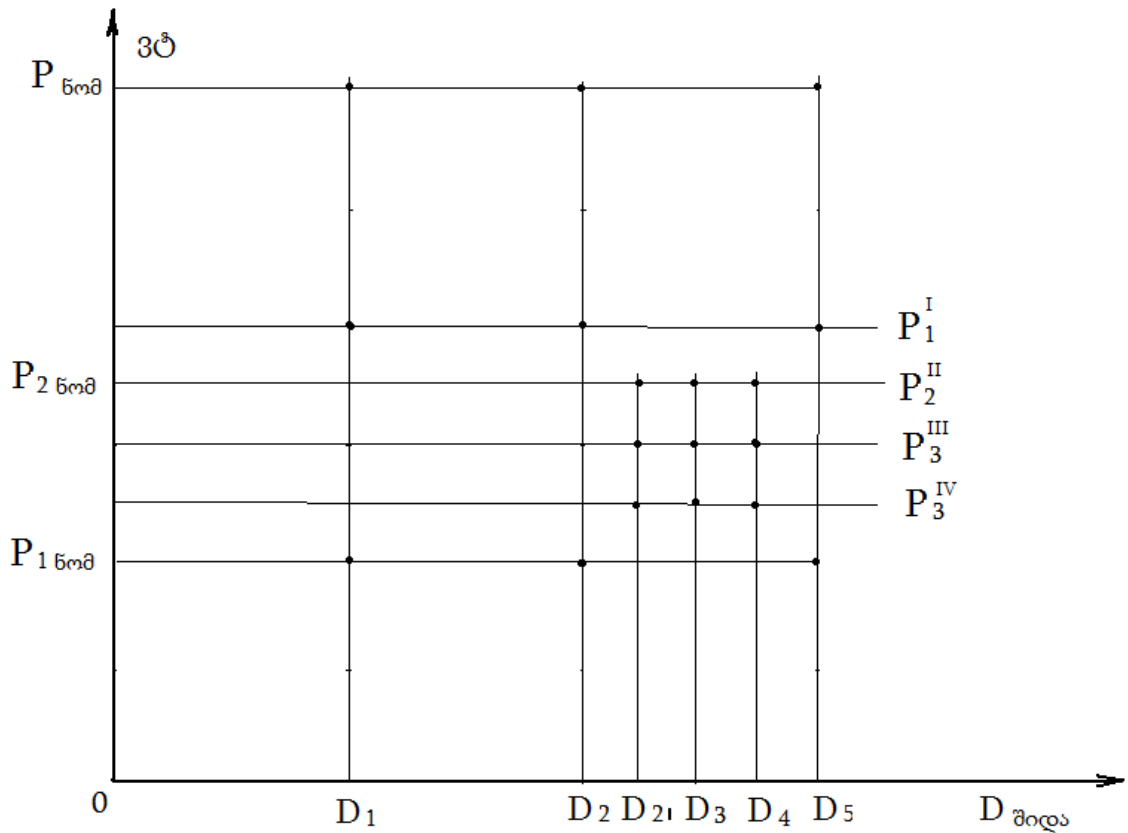
8	საფეხურების ხანგრძლივობის დრო	t	წმ		
---	-------------------------------------	---	----	--	--

და ა. შ.

1	2	3	4	5	6
ძრავას უძრავი ნაწილის (სტატორის) გეომეტრიული ზომები					
1	მაგნიტოგამტარის შიდა დიამეტრი	$D_{1\text{შიდა}}$	სმ	± 15	0,2
2	მაგნიტოგამტარის გარე დიამეტრი	$D_{1\text{გარე}}$	სმ	± 10	0,2
3	მაგნიტოგამტარის აქტიური სიგრძე	l_1	სმ	± 10	0,2
4	მაგნიტოგამტარის (სტატორის) კბილის სიმაღლე	$h_{1\text{კბ}}$	სმ	± 10	0,2
5	მაგნიტოგამტარის (სტატორის) კბილის სიგანე	$b_{1\text{კბ}}$	სმ	± 5	0,1
6	მაგნიტოგამტარის (სტატორის) ულლის სიმაღლე	$h_{1\text{ულ}}$	სმ	± 5	0,1
7	მაგნიტოგამტარის კბილის სათავის სიგანე	$b_{1\text{სათ}}$	სმ	± 5	0,02
8	მაგნიტოგამტარის კბილის სათავის სიმაღლე	$h_{1\text{სათ}}$	გეომეტრიული გრადუსი	± 5	0,02
9	მაგნიტოგამტარის კბილის დახრის კუთხე	$\gamma_{1\text{და}}$	სმ	± 1	0,1
10	სტატორის საპოლუსო დანაყოფი	τ_1	სმ	± 10	0,2
11	სტატორის საკბილო დანაყოფი	$t_{1\text{კბ}}$	სმ	± 10	0,2
12	სტატორის ღრმულის სიმაღლე	$h_{1\text{ღრმ}}$	სმ	–	–
13	სტატორის ღრმულის სიგანე	$b_{1\text{ღრმ}}$	სმ	–	–

14	საჰაერო ღრეჩო	δ	სმ	-	-
----	---------------	---	----	---	---

1	2	3	4	5	6
ძრავას რეჟიმის ელექტრომაგნიტური დატვირთვები და მაგნიტური ინდუქციები ცალკეულ უბანზე					
1	სტატორის გრაგნილის დენის სიმკვრივე	Δ_1	$\frac{\text{ამპერი}}{\text{მმ}^2}$	±10	0,3
2	სტატორის გრაგნილის ხაზოვანი დატვირთვა	A_1	$\frac{\text{ამპერი}}{\text{სმ}}$	±20	10
3	სტატორის გრაგნილის მოცულობითი დატვირთვა	V_1	$\frac{\text{ამპერი}}{\text{მმ}^3}$	-	-
4	მაგნიტური ინდუქცია საჰაერო ღრეჩოში	B_δ	ტესლა	±10	0,2
5	მაგნიტური ინდუქცია მაგნიტოგამტარის (სტატორის) კბილში	$B_{1კბ}$	ტესლა	±10	0,2
6	მაგნიტური ინდუქცია (სტატორის) უღელში	$B_{1უღ}$	ტესლა	±10	0,2



ნახ. 2.3. ძრავა-გენერატორის ოპტიმალური ვარიანტის პოვნის გრაფიკი

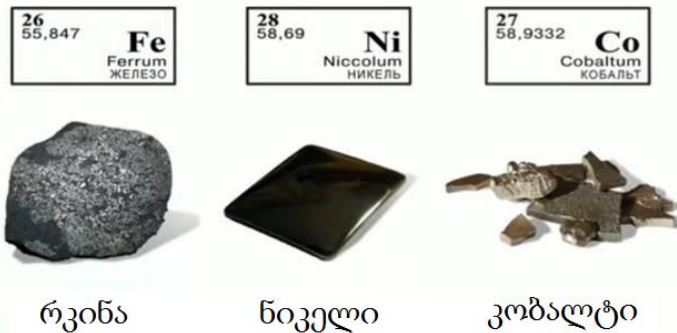
2.2. მუდმივი მაგნიტების შედარებითი ანალიზი

საავიაციო ძრავა-გენერატორული მოწყობილობების პროექტირების დროს გათვალისწინებული უნდა იქნეს მათი ტექნიკური - ეკონომიური და საექსპლუატაციო მოთხოვნები და ამის მიხედვით მოხდეს მათთვის მუდმივი მაგნიტების ტიპების შერჩევა. ქვემოთ წარმოდგენილია მუდმივი მაგნიტების ძირითადი მახასიათებლები და მათი დამზადების ტექნოლოგიები:

2.2.1. მოკლე ცნობები მუდმივი მაგნიტების შესახებ

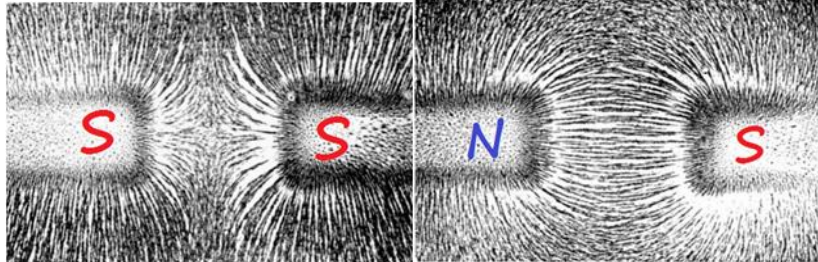
დღეისათვის ტექნიკაში მუდმივი მაგნიტების გამოყენების სფერო ძალზედ ფართოა, რადგან ისინი წარმოადგენენ მუდმივი მაგნიტური ველის ავტონომიურ წყაროს (ელექტროენერჯის მიწოდების გარეშე) რაც საგრძნობლად აუმჯობესებს ელექტრო ძრავა-გენერატორული მოწყობილობების მასა-გაბარიტულ და საექსპლუატაციო მახასიათებლებს რაც ძალზე მნიშვნელოვანია თანამედროვე საფრენი აპარატების პროექტირების დროს [25].

დედამიწაზე არსებული ნივთიერებებიდან მხოლოდ ზოგიერთი მათგანი რკინა, ნიკელი, კობალტი და მათი შენადნობები შეიძლება გახდნენ მუდმივი მაგნიტები მათი დამაგნიტების შედეგად და შეინარჩუნონ დამაგნიტებული მდგომარეობა დიდი ხნის განმავლობაში (ნახ. 2.4). ამრიგად, მაგნიტი ეს არის სხეული რომელსაც გააჩნია საკუთარი მაგნიტური ველი. მაგნიტური ველი შეიძლება შეიქმნას ელექტრო დენით და მუდმივი მაგნიტით. მუდმივი მაგნიტის მაგნიტური ველი წარმოიქმნება ელექტრონების ბრუნვით თავიანთი ღერძების გარშემო. ეს წარმოქმნის ელემენტარულ ჩაკეტილ დენებს. არადამაგნიტებულ სხეულში ელემენტარული დენების ცალკეული ჯგუფები და მათი მაგნიტური ველები განლაგებული არიან ქაოტურად, ამიტომ გარე სივრცეში მაგნიტური ველი არ შეინიშნება. გარე მაგნიტური ველის ზემოქმედებით ელემენტარული დენები წარმოქმნიან შემაჯამებელ მაგნიტურ ველს. ფერომაგნიტურ ველს რომელსაც გააჩნია ნარჩენი დამაგნიტებულება ეწოდება მუდმივი მაგნიტი. პირობითად მიღებულია, რომ მაგნიტური ძალური ხაზები გამოდიან ჩრდილოეთ პოლუსიდან და შედიან სამხრეთ პოლუსში. მაგნიტის შიგნით მაგნიტური ძალური ხაზები გამოდიან სამხრეთ პოლუსიდან და მიემართებიან ჩრდილოეთ პოლუსისაკენ.

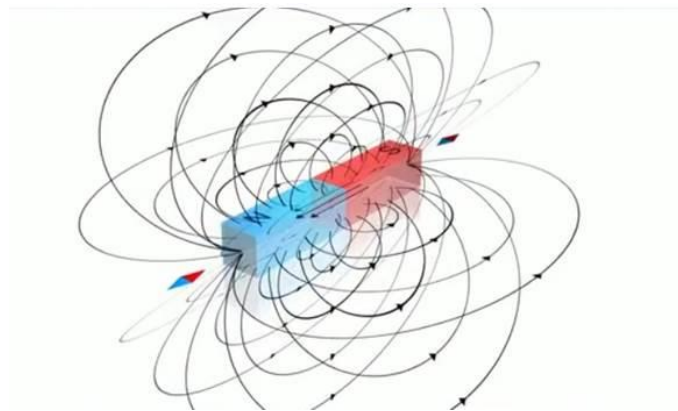


ნახ. 2.4. მაგნიტური თვისებების მქონე ნივთიერებები

მაგნიტის მაგნიტური ხაზები ისევე როგორც დენის მაგნიტური ველის მაგნიტური ხაზები წარმოადგენენ ჩაკეტილ ხაზებს. მაგნიტის გარეთ ისინი გამოდიან მაგნიტის ჩრდილოეთ პოლუსიდან და შედიან სამხრეთ პოლუსში და იკეტება მაგნიტის შიგნით ისევე როგორც დენიანი გრაგნილის მაგნიტური ხაზები (ნახ.2, 5, 2.6).



ნახ.2.5. მუდმივი მაგნიტების ერთნაირი და სხვადასხვა პოლუსების ძალხაზების სახეები



ნახ.2.6. გრძივი მუდმივი მაგნიტის მაგნიტური ხაზების მიმართულებები

მუდმივი მაგნიტების მახასიათებლები

მუდმივი მაგნიტების შესაფასებლად გამოიყენებენ შემდეგ ძირითად მახასიათებლებს:

ნარჩენი მაგნიტური ინდუქცია B_r (ტესლა SI სისტემაში; ან გაუსი, G) – არის დარჩენილი დამაგნიტებულობა, მასალის დამაგნიტების შემდეგ რომლისგანაც დამზადებულია მუდმივი მაგნიტი, გაზომილი მის ზედაპირზე . ზოგჯერ ამ სიდიდეს უწოდებენ „მაგნიტის ძალას“. $1 \text{ ტესლა} = 800 \text{ კილო ამპერი/მეტრი}$. $1 \text{ ტესლა} = 10000 \text{ გაუსს}$.

მაგნიტური ინდუქცია B / (ტესლა ან გაუსი, G) – არის რეალური, ფაქტიური მაგნიტური ველის ხელსაწყოთი გაზომილი მნიშვნელობა (გაუსმეტრით, ტესლამეტრით ან მაგნიტომეტრით) მისგან გარკვეულ მანძილზე.

კოერციტიული ძალა H_{cb} (კილო ამპერი/მეტრი)—არის გარე მაგნიტური ველის სიდიდე, რომელიც საჭიროა მაგნიტის სრული განმაგნიტებისათვის რომელიც დამაგნიტებულა სრულ გაჯერებამდე. ის ახასიათებს მდგრადობას განმაგნიტებაზე. ამ დროს მაგნიტური ინდუქცია $B_r=0$.

მაქსიმალური ენერგეტიკული ნამრავლი BH_{max} (მეგაგაუსი, ერსტედი) ახასიათებს მაგნიტის სიმძლავრეს.

ნარჩენი მაგნიტური ინდუქციის ტემპერატურული კოეფიციენტი $T_c - B_r$ (% $^{\circ}C$ -ზე) —ახასიათებს მაგნიტური ინდუქციის ცვლილებას ტემპერატურაზე დამოკიდებულებით.

მაქსიმალური მუშა ტემპერატურა T_{max} ($^{\circ}C$) — ტემპერატურის ზღვარი რომელზედაც მაგნიტი დროებით კარგავს თავისი მაგნიტური თვისების ნაწილს. მისი შემდგომი გაცივების დროს მისი ყველა მაგნიტური თვისება აღსდგება (კიურის წერტილისაგან განსხვავებით). გაცხელების გადაჭარბებამ რამდენიმე ათეული გრადუსით T_{max} -თან შედარებით შეიძლება გამოიწვიოს მაგნიტის ნაწილობრივი განმაგნიტება.

კიურის წერტილი T_{cur} ($^{\circ}C$) —ტემპერატურა რომლის ზემოთაც ქრება ფერომაგნიტის დამაგნიტება.

ნიკელის კიურის წერტილია $+358^{\circ}C$, რკინის $+769^{\circ}C$, კობალტის $+1121^{\circ}C$.

მაგნიტის განმაგნიტება და მოქმედების ვადა — მაგნიტი კარგავს დამაგნიტებას ძლიერი მექანიკური ვიბრაციების, დარტყმების, დეფორმაციის და საგრძნობი ტემპერატურული ვარდნების დროს. სრული განმაგნიტება ხდება გაცხელების დროს კიურის ტემპერატურის ზემოთ.

ყველაზე გავრცელებული რკინის მაგნიტები ჩვეულებრივი ოთახის პირობებში და ექსპლუატაციის პირობების დარღვევის გარეშე განმაგნიტდებიან ძალიან გვიან. 10 წლის განმავლობაში ნეოდიმის მაგნიტები კარგავენ 2%-ზე ნაკლებ ძალას, ხოლო კობალტის 1%-ზე ნაკლებს. რაც შეეხებათ ფერიტებს და ალნიკოს ისინი არასაიმედო არიან, სწრაფად ჯდებიან, ძველდებიან და მუშაობენ ნახევარი ძალით.

2.2.2. მუდმივი მაგნიტების ტიპები და მათი დამზადების ტექნოლოგია

არსებობენ ბუნებრივი და ხელოვნური მუდმივი მაგნიტები.

პირველი ბუნებრივი მაგნიტი დამზადებული იყო მაგნეტიტის მინერალისაგან $FeO \cdot Fe_2O_3$ (რკინაქვა, მაგნიტური ქვა) რომელიც იზიდავდა რკინის საგნებს. პირველ

ხელოვნურ მაგნიტურ მასალად გამოყენებული იქნა ნახშირბადიანი ფოლადი ნაწრთობი მარტენსიტის სტრუქტურით და 1,2 – 1,5 %-ის ნახშირბადის შემცველობით.

ამჟამად ხელოვნურ მუდმივ მაგნიტებს ამზადებენ სხვადასხვა მეტალებისაგან, ისეთებიდან როგორცაა: კობალტი, რკინა, ნიკელი, იშვიათ მიწათა მეტალების შენადნობები (ნეოდიმის მაგნიტებისათვის) და აგრეთვე მაგნეტიტების ტიპის ბუნებრივი მინერალები .

პოლიმერული მუდმივი მაგნიტები (მაგნიტოპლასტები) – დამზადებული არიან მაგნიტური ფხვნილისა და დამაკავშირებელი პოლიმერული მატრიცის (მაგალითად, თერმოპლასტების, რეზინის) ნარევისაგან. მაგნიტურ ფხვნილს მაგნიტოპლასტებში წარმოადგენენ ბარიუმიანი ან სტრონციუმიანი ფერიტები, იშვიათ მიწათა ელემენტების ბაზაზე დამზადებული შენადნობები (ნეოდუმი-რკინა-ბორი, სამარიუმი-კობალტი, სამარიუმი-რკინა,ფერიტი-სტრონციუმი), ალნიკო. მაგნიტოპლასტების დადებით მხარეს მიეკუთვნება ნაწარმის რთული ფორმების მიღების შესაძლებლობა ზომების მაღალი სიზუსტით დაწნეხვით, წნევით ჩამოსხმით, მაღალი დარტყმითი სიმტკიცე, დაბალი მყიფედობა, მაღალი კოროზიული მდგრადობა და მცირე კუთრი მასა. მაგნიტოპლასტები შესაძლებელია გამოყენებულ იქნან, როგორც მაღალი ხარისხის კონსტრუქციული ელემენტები და ამასთანავე ნახულობენ გამოყენებას ისეთ შემთხვევებში, როდესაც მუდმივმა მაგნიტმა უნდა გაიმეოროს უსწორმასწორობები და სიმრუდე მასთან მაკონტაქტირებელ ზედაპირებთან.

ლითონკერამიკული მაგნიტები (მათ შორის ფერიტები) წარმოადგენენ მასალებს რკინის ჟანგულის (ოქსიდის) ფერიტისა და რკინის ოქსიდის კომბინაციით, ასევე შეიცავენ Fe-Al- Ni სისტემის შენადნობებს, რომლებიც ლეგირებულია კობალტით, სილიციუმით, სპილენძით და სხვა. მათი დამზადება ხდება ფხვნილოვანი მეტალურგიის მათოდით. ჯერ იწნეხება ნაკეთობები საჭირო ფორმის და ზომების და შემდეგ ხდება შეცნობა მაღალ ტემპერატურაზე.

ფერომაგნიტებს გააჩნიათ მაღალი ელექტრული წინაღობა, კარგი მექანიკური სიმტკიცე, მაღალი კოროზიული მედეგობა, მცირე მასა (1,5-2 ჯერ მცირე). აქვთ კარგი მდგრადობა გარე მაგნიტური ველების მოქმედების დროს და გამოირჩევა შედარებითი სიიაფით. ისინი ფართოდ გამოიყენებიან მუდმივი დენის ძრავებში, გენერატორებში და სხვა.

ფერომაგნიტების უარყოფით მხარეებს მიეკუთვნება: სიმყიფე და სისალე. მისი დამუშავება შეიძლება მხოლოდ ხეხვით და ალმასის ჭრით და აგრეთვე კოერციტული ძალის შემცირება მისი გაცივების დროს – 20°C-ზე ქვემოთ. – 60 °C- ს დროს მაგნიტური თვისება შეუქცევადად იკარგება და არ აღდგება მისი დაბრუნების დროს ნორმალურ ტემპერატურულ პირობებში. თუ ტემპერატურა იცვლება სწრაფად 5-10 °C/წთ ფერიტზე წარმოიქმნება ბზარები, რაც აუარესებს მის ფიზიკურ თვისებებს.

მაგნიტური ინდუქცია $B_r=0,1-0,4$ ტესლა (1000-4000 გაუსი);

მაქსიმალური მუშა ტემპერატურა/კიურის წერტილი $T_{max}/ T_{cur}=250-300/450$ °C.

კოერციტული ძალა $H_{cb} =2-4$ კილოერსტედი.

ენერგეტიკული ნამრავლი $BH_{max} =1,1-4,5$ მეგაერსტედი.

AlNiCo (ალნიკო) წარმოადგენს თერმოსტაბილურად ჩამოსხმულ ან შეცხობილ მაგნიტს რკინა-ალუმინი-ნიკელი-სპილენძი-კობალტის ფუძეზე. მას გააჩნია მაღალი კოერციტული და რადიაციული მდგრადობა. მისი უარყოფითი თვისებებია სიმყიფე. მუშავდება პოლირებით, ხეხვით და აბრაზიული ჭრით. ის ადვილად განმაგნიტდება გარე მაგნიტური ველის ზემოქმედებით (დაბალი კოერციტული ძალა).

მაგნიტური ინდუქცია $B_r=0,7-1,3$ ტესლა ;

მაქსიმალური მუშა ტემპერატურა/კიურის წერტილი $T_{max}/ T_{cur}=250-550/800-850$ °C;

კოერციტული ძალა $H_{cb} =0,6-1,9$ კილოერსტედი.

ენერგეტიკული ნამრავლი $BH_{max} 1,4-7,5$ მეგაერსტედი.

SmCo სამარიუმი-კობალტის მაგნიტები –წარმოადგენენ იშვიათ მიწათა ელემენტებს სამარიუმით კობალტთან შეცხობილ მაგნიტებს. მათ გააჩნიათ მაღალი კოროზიული მდგრადობა, მუშა ტემპერატურა (თერმოსტაბილურია 350 °C -მდე) და კოერციტული ძალა.

მაგნიტური ინდუქცია $B_r=0,8-1,1$ ტესლა ;

მაქსიმალური მუშა ტემპერატურა/კიურის წერტილი $T_{max}/ T_{cur}=250-550/700-800$ °C;

კოერციტული ძალა $H_{cb} =8-10$ კილოერსტედი.

ენერგეტიკული ნამრავლი $BH_{max} =18-32$ მეგაერსტედი.

Nd-Fe-B – იშვიათ მიწათა ელემენტ ნეოდიუმის სუპერმაგნიტები (ნეოდიუმ-რკინა-ბორის შენადნობების საფუძველზე). მუშა ტემპერატურების დიაპაზონი –60-დან + 150-220°C-მდე.

მათი უარყოფითი მხარეა სიმყიფე და მცდნობიარეა ტემპერატურის მიმართ. ძლიერი გაცხელების შემდეგ მთლიანად კარგავს დამაგნიტების თვისებებს (აღდგენა შესაძლებელია მხოლოდ გადამაგნიტებით სპეციალურ დანადგარზე). გააჩნია არამაღალი კოროზიული მდგრადობა-ადვილად იჟანგება თუ დაზიანებული აქვს ანტიკოროზიული დაფარვა.

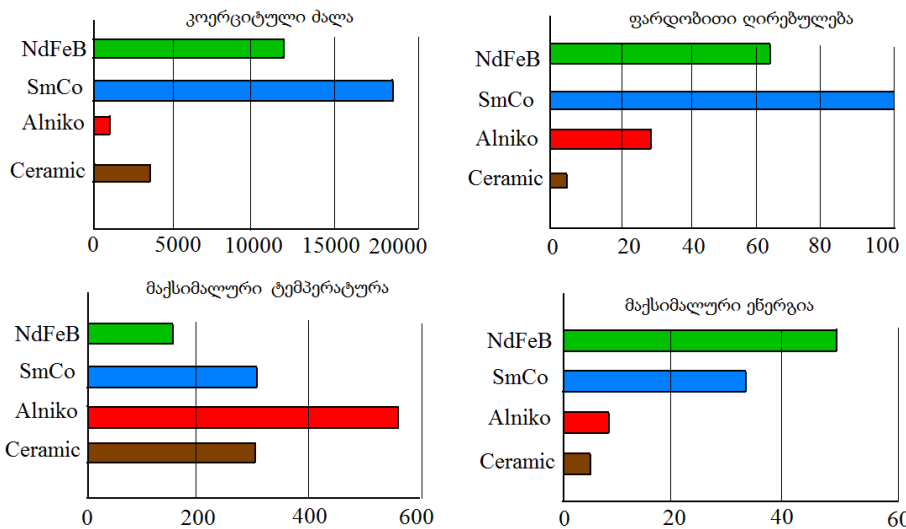
შეცხოვბილ ნეოდიუმის მაგნიტებს გააჩნიათ შემდეგი უპირატესობები: სხვებთან შედარებით მაღალი ნარჩენი მაგნიტური ინდუქცია და ენერგეტიკული ნამრავლი. მაქსიმალური მუშა ტემპერატურა გაიზრდება თუ მის შემადგენლობა რკინის მაგივრად დაემატება კობალტი, მაგრამ ეს იწვევს მაგნიტის გაძვირებას.

Br =1,0-1,4 ტესლა ; Tmax/ Tcur=80-220/310-330 °C; **Hcb**
=12 კილოერსტედი; BHmax =50 მეგაერსტედი.

ცხრილში 2.2. და ნახ.2.7-ზე წარმოდგენილია სხვადასხვა მასალებისაგან დამზადებული მუდმივი მაგნიტების დამახასიათებელი ძირითადი პარამეტრები [22]

ცხრილი 2.2

BHmax	მაგნიტის	Br	Hc	1კგ-ის ფასი	Bhmax-ის ფასი
კჯ/მ³	მასალა	ტესლა	ამპერი/მ	დოლარი	დოლარი
12,7	მაგნიტოპლასტები	0,173	2000	5-10	3,1-6,2
23,8	ფერიტები კერამიკა	0,40	2400	1-2,5	0,3-0,85
71,6	AlNiCo ალნიკო	1,35	1400	44,1	4,3
152	SmCo სამარიუმი კობალტი	1,05	9200	250-500	12,5
398	Nd-Fe-B ნეოდიუმის	1,42	12500	70-150	1,4-3,7



ნახ.2.7. მუდმივი მაგნიტის დასამზადებლად გამოყენებული ზოგიერთი მასალის მაჩვენებელთა შედარება (კოერციტული ძალა –ა/მ, ტემპერატურა– °C, ენერგია– მეგაერგი)

2.2.3. იშვიათ მიწათა მეტალების არშემცველი მუდმივი მაგნიტების შემუშავება კობალტის ნანომავთულების ბაზაზე საავიაციო ტექნიკაში გამოყენების მიზნით

იშვიათ მიწათა ელემენტების შემცველი მუდმივი მაგნიტების საუკეთესო მაგნიტური თვისებების გამო, მიუხედავად მათი სიძვირისა, ისინი მიეკუთვნებიან სტრატეგიულ პროდუქციას. მათი გამოყენების სფერო მატად დიდია, ბოლო დროს დიდი გაქანება მიეცა მათ ჰიბრიდულ ავტომობილებსა და ქარის გენერატორებში. იშვიათ მიწათა ელემენტების მუდმივი მაგნიტების კომერციული წარმოება სამარიუმ-კობალტის შენადნობის ბაზაზე დაწყებულ იქნა 1970 წელს აშშ-ი და ამან გამოიწვია რევოლუციური გარდაქმნები მრეწველობის სხვადასხვა დარგებში. შესაძლებლობა გაჩნდა დამზადებულიყო მინიატურული და მძლავრი დანადგარები. კობალტის სიძვირის გამო 1983 წელს შემუშავებულ იქნა მუდმივი მაგნიტები ნეოდიუმი-რკინა-ბორის ბაზაზე, რომელთა ფასი ნაკლები იყო კობალტი - სამარიუმის შენადნობზე და დიდი პოპულარობა მოიპოვა, განსაკუთრებით მინიტურიზაციის მიმართულებით და 2005 წლისათვის მისმა ბაზრის მოცულობამ 3,7 მილიარდი დოლარი შეადგინა. ასევე მაღალია მათი წილი მაგნიტური მასალების მსოფლიო ბაზარზე და ლიდერია ორი ძირითადი მახასიათებლების- ინდუქციისა და კოერციტული ძალის მიხედვით. მათზე დიდმა მოთხოვნილებამ გამოიწვია იშვიათ მიწათა ელემენტების ბაზარზე კრიზისი.

კილოგრამ ნეოდიუმის ფასმა 2006 წლიდან 2011 წლამდე 8 დოლარიდან 450 დოლარამდე გაიზარდა, თუმცა 2012 წელს 3-ჯერ შემცირდა, მაგრამ ამასთანავე ჩინეთმა მის ექსპორტზე შეზღუდვა შემოიღო. უნდა აღინიშნოს რომ ტერბიუმის ფასი ნეოდიუმის ფასზე 11-ჯერ მაღალია. სამწუხაროდ ჩინეთის მიმართ ალტერნატივა არ არსებობს. ამ ქვეყანამ დიდი ხნის წინათ იზრუნა იმაზე, რომ იშვიათ მიწათა ელემენტების თითქმის ერთადერთი მწარმოებელი ქვეყანა ყოფილიყო. ამიტომ დღეისათვის ძალზედ აქტუალურია მუდმივი მაგნიტების მიღება, რომელთაც გააჩნიათ არსებულ მაგნიტებთან მიახლოებული მახასიათებლები, მაგრამ არ შეიცავენ იშვიათ მიწათა ელემენტებს. ეს მეტად მნიშვნელოვანია ნებისმიერი ქვეყნის მრეწველობის უსაფრთხოებისათვის და მათ შორის ჩვენი ქვეყნისათვისაც. მეცნიერების თეორიული და ექსპერიმენტული მიღწევების გაანალიზებით და ინტეგრაციით შესაძლებელია წარმატებით გადაწყდეს იშვიათ მიწათა მეტალების არშემცველი მუდმივი მაგნიტების შემუშავება და დამზადება.

დღემდე მუდმივი მაგნიტების ენერგეტიკულ გამოყენებებში (ელექტრო-ძრავები, ქარის ტურბინები, ელექტრული მანქანები) და მაგნიტოელექტრონიკაში [14] დომინირებდნენ იშვიათ მიწათა (RE) ფერომაგნიტური მასალები (Nd-Fe-B, Sm-Co). მუდმივი მაგნიტების ხარისხი ფასდება მათი ენერგეტიკული სიმკვრივის $(BH)_{max}$ მაღალი მაჩვენებლით, რომელიც მოითხოვს როგორც მაღალ დამაგნიტებას, ასევე მაღალ კოერციულობას. დღეისთვის დიდი ძალისხმევა ფოკუსირდება იშვიათ მიწათა მეტალების არშემცველ მუდმივ მაგნიტებზე, RE ელემენტებთან დაკავშირებულ სხვადასხვა პრობლემების გამო, მათ შორის საერთაშორისო ბაზარზე RE ელემენტების მოწოდების გამარტივების აუცილებლობასთან [15]. ასევე [14, 15] შრომებში ასახულია მუდმივი მაგნიტების დამზადების მეთოდები მაგნიტური ნანომავთულების ბაზაზე, რომლებიც ორიენტირებულია ეპოქსიდურ ან პოლიმერულ მატრიცებში არსებულ მაგნიტურ ველში. [16] - ში ნაჩვენებია Co-ის ნანომავთულებისგან მაგნიტის მიღების შესაძლებლობა $(BH)_{max} \sim 260 \text{კჯ/მ}^3$ ენერგეტიკული სიმკვრივით (მაქსიმალური ენერგეტიკული პროდუქტი), რაც ახლოსაა საუკეთესო SmCo მაგნიტთან ($(BH)_{max} \sim 120 \text{კჯ/მ}^3$), მაგრამ ჯერ კიდევ ჩამორჩება NdFeB მაგნიტს ($(BH)_{max} \sim 440 \text{კჯ/მ}^3$). თუმცა, ეს მაგნიტები საინტერესოა მაღალტემპერატურულ გამოყენებებში 250°C -ზე ზევით, სადაც NdFeB მაგნიტების გამოყენება არ არის შესაძლებელი. კიდევ უფრო პერსპექტიული

მაგნიტები მიიღება ნანომავთულების კონსოლიდაციის მეთოდით, დამატებითი პოლიმერული მატრიცის არარსებობის პირობებში. მაგნიტურად ორიენტირებული ნანომავთულები კომპაქტირდება სხვადასხვა წნევისა და ტემპერატურის დროს. მიღებულია მაგნიტები, რომელთაც აქვთ კარგი მექანიკური სიმტკიცე და ენერჯის სიმკვრივე 65 კჯ/მ^3 [17].

იშვიათ მიწათა მეტალების არშემცველ მუდმივ მაგნიტებში გამოსაყენებლად Cu-Co ნანომავთულების კომპოზიტების მისაღებად უპირველეს ყოვლისა აუცილებელია კომპონენტების მისაღები ტექნოლოგიების დახვეწა და პირველ რიგში კობალტის Co ნანომავთულების. კობალტის ნანოფხვნილებით კობალტის ნანომავთულების კომპოზიტების მისაღებად შეიძლება გამოყენებული იქნეს ორი ტექნოლოგია: ქიმიური დალექვის (19) მეთოდი და დარტყმითი ტალღით ცხლად დაწნეხვის (დტცდ) მეთოდი [20].

2.2.3.1. Cu-Co ნანომავთულის კომპოზიტების მიღება ქიმიური დალექვის

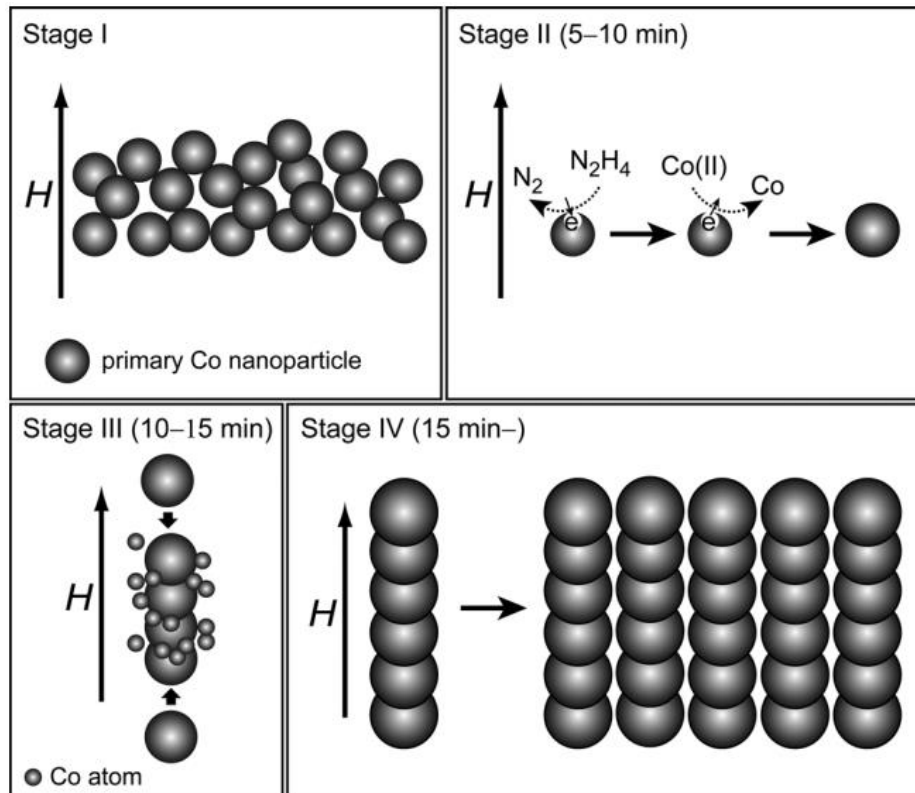
მეთოდით

ძრავა-გენერატორის მოდელური ნიმუშის დამზადებისას გამოვიყენებთ პოლიმერული მატრიცის მქონე მაგნიტებს ტემპერატურის, ცვლადი და მუდმივი მაგნიტური ველების ერთობლივი მოქმედების გამოყენებით ნანომავთულების ორიენტირებისთვის პოლიმერულ მატრიცაში, როგორც Co ნანოფხვნილების, ასევე Co და CoCu ნანომავთულების საშუალებით, რომლებიც მიღებული იქნება უელექტრიზო და ორთქლის ქიმიური დაფენის (CVD) და დარტყმითი ტალღით ცხლად დაწნეხვის (დტცდ) მეთოდებით.

ნახ. 2.8-ზე მოყვანილია სქემატური დიაგრამა, რომელიც ასახავს ამ მეთოდით Co-ის ნანომავთულების ეტაპობრივ ფორმირებას წყალხსნარში მაგნიტური ველის ზემოქმედებისას. ადრეულ ეტაპზე (I ეტაპი), გარე მაგნიტური ველის არსებობის მიუხედავად, ხსნარში პაწაწინა Co-ის ნანონაწილაკები წარმოიქმნებიან, პირველადი ნაწილაკების სახით, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ.2.8. a-ზე. საერთოდ, როდესაც გარე ველი არ არის მოდებული, თითოეული ნანონაწილაკის ორიენტაცია ხსნარში შემთხვევითია. ძლიერი მაგნიტური ველის არსებობის პირობებში, ეს ნანონაწილაკები დამაგნიტდება და

იწყება მათი ერთი მიმართულებით ორიენტირება. რადგან დიპოლური მაგნიტური მომენტი ნანონაწილაკის მოცულობის პროპორციულია, ნანონაწილაკებს შორის

ურთიერთქმედება ძალიან სუსტია იმისათვის რომ დასძლიონ რეაქციის დროს გამხსნელის მოძრაობა. უფრო ხანგრძლივი რეაქციის დროს, პირველადი Co-ის ნანონაწილაკები იზრდებიან (ნახ. 2.8 b), რაც ხდება II ეტაპზე და მათი მაგნიტური ურთიერთქმედება ძლიერდება, რაც მნიშვნელოვნად მოქმედებს მაგნიტურ ველში. შემდგომში, როდესაც ნანონაწილაკების დიპოლური მაგნიტური მომენტები ორიენტირებულია გარე მაგნიტური ველის გასწვრივ, მიზიდვის ურთიერთქმედებები ინდუცირდება მაგნიტური ველის პარალელურად. ამრიგად, მეზობელი Co - ნანონაწილაკები იწყებენ მაგნიტური ველის მიმართულებით გასწვრივ მოგროვებას და ქმნიან ნანონაწილაკების წრფივ ჯაჭვებს (III ეტაპი), როგორც ნაჩვენებია ნახ. 2.8. c-ზე. რეაქციის მიმდინარეობისას ხსნარში ერთდროულად წარმოქმნილი Co ატომები განსაკუთრებულად დაილექებიან სფერულ ნანონაწილაკებს შორის არსებულ ღრეჩოებში ინტერფეისური ენერჯის შემცირების გამო, ისე როგორც III ეტაპზე. ეს იწვევს Co-ის ნანომავთულების წარმოქმნას. თუ უფრო ძლიერი მაგნიტური ველია მოდებული, Co-ის ნანომავთულების სქელი პარალელური მასივების წარმოქმნა ხდება, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 2.8.d-ზე (IV ეტაპი) [21].



ნახ. 2.8. წყალხსნარში ქიმიური დაფენით ოთახის ტემპერატურაზე მაგნიტური ველის ზემოქმედებისას Co ნანომავთულების ფორმირების სქემატური დიაგრამა

2.2.3.2. Cu-Co ნანომავთულის კომპოზიტების მიღება დტცდ მეთოდით

დტცდ მეთოდი იყენებს ცხელ დარტყმით ტალღებს მაღალი სიმკვრივის, გრძელტანიანი ნანოსტრუქტურული ნიმუშების მისაღებად საწყისი ფხვნილებიდან. შემოთავაზებული არატრადიციული მიდგომის სიახლე მდგომარეობს იმ ფაქტში, რომ ცილინდრული გეომეტრიის მყარი ნიმუშების კონსოლიდაცია სუბმიკრონული და ნანომეტრული ზომების Co, W და Cu საწყისი მასალებისგან ხორციელდება ორ ეტაპად:

ა) პირველი ეტაპი: საწყისი მასალის წინასწარი აფეთქებით დაწნეხა ოთახის ტემპერატურაზე 5-10 გპა დატვირთვის ინტენსივობისას საწყისი სიმკვრივის გასაზრდელად და ნაზავში ნაწილაკების ზედაპირის გასააქტიურებლად;

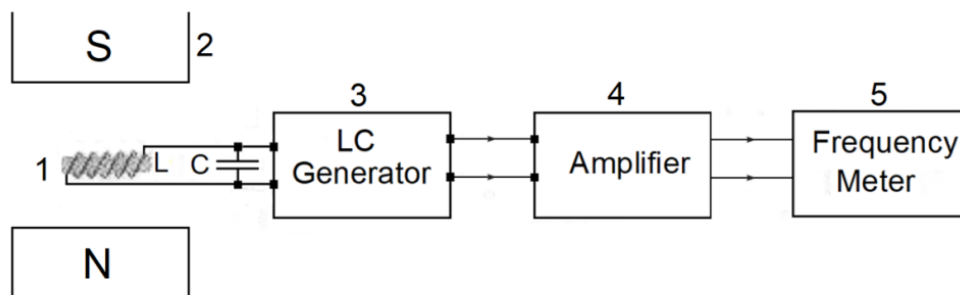
ბ) მეორე ეტაპი: უკვე წინასწარ გამკვრივებული იგივე ცილინდრული ნიმუში თავიდან იტვირთება 10 გპა ინტენსივობის პირველადი დარტყმითი ტალღით, ხოლო ტემპერატურა 900°C-მდეა.

დატვირთვის წინ დასაწინები ფხვნილების გაცხელებას და მათ ცხელ პირობებში დაწინებას მოყვება მათი დრეკადობის და პლასტიკური დენადობის ზრდა დარტყმითი ტალღით დაწინებვა-შეერთების პროცესის განმავლობაში. ამის შედეგად ადვილდება საერთო საზღვრების შექმნა, შესაძლებელი ხდება მყარი ხსნარებისა და მაღალი სიმკვრივის კომპაქტების მიღება. ჩვეულებრივი დაწინების მიახლოებები, რომელიც მოიცავს რეზინის შეკავშირებას, ექსტრუქციას და ცხელ-იზოსტატიკურ დაწინებას, აუარესებენ მაგნიტურ თვისებებს ან არამაგნიტური შემაკავშირებელი ჩანართების გამო ან ხანგრძლივი სითბური გადაადგილებების გამო, რაც ამსხვილებს ნაზ მიკროსტრუქტურას და არღვევს ქიმიურ ჰომოგენურობას. ამრიგად, **დტცდ** ტექნოლოგიით შესაძლებელია ნანოკომპიზიტური მოცულობითი მაგნიტების შექმნა მარცვლების ზრდის გარეშე, რადგან გაცხელება შემოსაზღვრულია ნაწილაკების ზედაპირულ არეებში და ეს ხდება მიკროწამების დროის განმავლობაში.

კვლევისთვის განსაკუთრებულ ინტერესს იწვევენ ერთგანზომილებიანი ნანომავთულები, მათი ფორმის და დამაგნიტების ძლიერი ანიზოტროპიის გამო, რაც მნიშვნელოვანია მათ გამოსაყენებლად მუდმივ მაგნიტებსა და მაღალი სიმკვრივის მაგნიტურ დამამახსოვრებლებში მოწყობილებებში. მეტალურ კობალტს გააჩნია დიდი გაჯერების ინდუქცია, რაც გამოიხატება მაგნიტური ძალის შემენის უნიკალური უნარით, რომელიც მრავალჯერ აღემატება გარე ველის სიმძლავრეს. კობალტის კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი თვისებაა კოერციტიული ძალის დიდი მნიშვნელობა (H_c), რაც ხელს უშლის განმეგნიტებას და გადამეგნიტებას. რადგან იშვიათ-მიწათა მეტალების ფასი უფრო მაღალია, ვიდრე მათ საფუძველზე დამზადებული იშვიათ-მიწათა მეტალების ფასი, იშვიათ მიწათა მეტალების გარეშე მაღალენერგეტიკული მაგნიტების შექმნა კვლავ პრობლემურია.

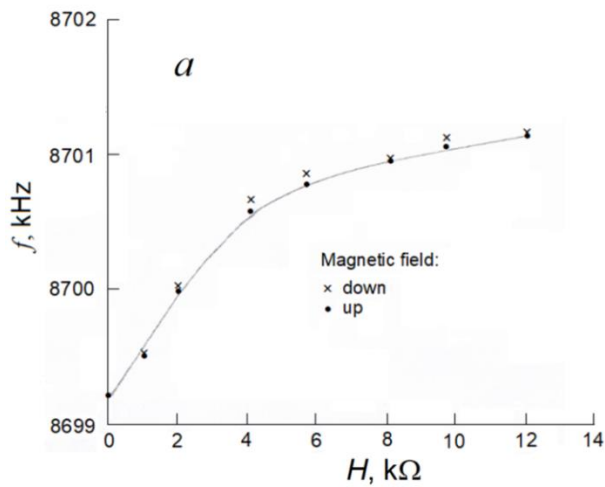
ამ შრომაში დამუშავებულია **დტცდ** ტექნოლოგია Cu-Co ნანომავთულების კომპოზიტების მისაღებად მათი იშვიათ-მიწათა მეტალების გარეშე მაგნიტებში პოტენციალური გამოყენებისთვის. კობალტის ნანომავთულები სინთეზირებული იყო ქიმიური დაფენის ზემოთ აღწერილი მეთოდით.

ფხვნილისმაგვარი Co ნანომავთულების (20 მასა %) და Cu მიკროფხვნილის საგულდაგულოდ შერეული ნაზავი თავსდება ფოლადის ცილინდრულ კონტეინერში (ფოლადის ცილინდრული მილი). შემდეგ ნიმუში თავსდება 500 ერსტედ მაგნიტურ ველში პოლარიზაციის მისაღწევად 3 დღის განმავლობაში ცილინდრის ღერძის პერპენდიკულარულად და საბოლოოდ ექვემდებარება **დტცდ** პროცედურას [19]. მიღებული ცილინდრული ნიმუში გამოკვლეულია მაგნეტომეტრით, ბმრ-ით, ოპტიკურად და მიკროსკოპით. რეზონანსული მაგნიტომეტრული გაზომვები LC რეზონანსულ კონტურში მოთავსებული ნიმუშისათვის ჩატარდა 1,5 T (ტესლამდე) მაგნიტურ ველში (ნახ.2.9).

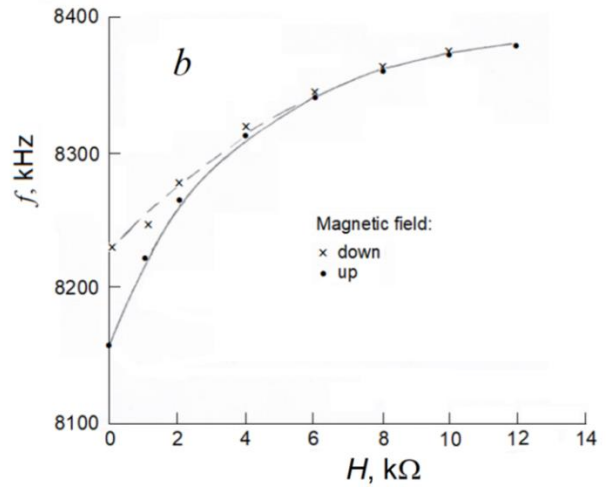


ნახ. 2.9 რს რეზონანსული მაგნეტომეტრის სქემა : 1 – LC კონტური; 2 -მუდმივი მაგნიტი 1,5T 3 - LC გენერატორი; 4 -რეზონანსული სიხშირის გამაძლიერებელი; 5 -სიხშირზომი

ნახ. 2.10-ზე ნაჩვენებია კობალტის ნანოფხვნილებისა და ნანომავთულების 1,2 ტესლამდე მაგნიტურ ველში რეზონანსული მაგნეტომეტრით შესწავლის შესაბამისი შედეგები



a



b

ნახ. 2.10. რს რეზონანსული მაგნეტომეტრის სიხშირის ცვლილების Δf დამოკიდებულება მაგნიტური ველის H დამაბულობაზე ((•) და (x) აღნიშნავენ მაგნიტური ველის მიმართულებისას ქვემოთ და ზემოდ):

a – Co ნანოფხვნილი და b – Co ნანომავთული,

2.3. ძრავა-გენერატორის პროექტირების წინა პირობები. მაგნიტური ველების ანგარიშის გამარტივების ხერხები და დაშვებები

ძრავგენერატორის ნებისმიერი გამოსავალი პარამეტრი მჭიდრო კავშირში იმყოფება ელექტრომამოძრავებელი ძალის სიდიდესთან. ეს უკანასკნელი დამოკიდებულია მაგნიტური ველის ცვლილების სიჩქარეზე. ელექტრომექანიკური ენერჯიის გარდაქმნის პროცესში მაგნიტური ველის ცვლილება დამოკიდებულია უამრავ პარამეტრზე, როგორცაა მაგნიტური ინდუქციის სიდიდე, ცვლილების სიხშირე, ფორმა საჰაერო ღრეჩოში, რომელიც განუწყვეტლივ იცვლება უძრავი და მოძრავი ნაწილების ურთიერთგანლაგების ცვლილებასთან დაკავშირებით, გაჟღენთვის ხარისხზე და ა. შ. გარდა ამისა არსებობს უამრავი დენის წყაროები და შესაბამისი მაგნიტური ველები, რომლებიც ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად წარმოშობენ შესაბამის მაგნიტურ ველებს. ცნობილია, რომ ძრავა-გენერატორის უძრავი და მოძრავი ნაწილების შიდა მოცულობაში მუშაობის პროცესში არსებობს ერთი ჯამური მაგნიტური ველი, მიუხედავად არსებული

უამრავი მაგნიტური ველისა, რომლებიც განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან სიდიდით, ცვლილების სიხშირით, ფორმით, წარმოშობის ბუნებით, მოქმედების არიალით და სხვა.

ჯამური მაგნიტური ველი აკმაყოფილებს შემდეგ პირობას:

$$\sum R_{\text{მაგნ}} = \min; \quad (2.1)$$

ჯამური მაგნიტური ველის მაგნიტური წინააღმდეგობა მინიმალურია.

ეს უკანასკნელი პირობა განაპირობებს ძრავა-გენერატორის აბსოლუტურად ყველა გამოსავალი პარამეტრების სიდიდეს. ამიტომ პროექტირების პრობლემა დაიყვანება მაგნიტური ველების ანგარიშის ამოცანაზე. დღეისათვის არათუ ანალიზური, არამედ რიცხობრივი მეთოდებიც კი ვერ წვდება ამ ამოცანის გადაწყვეტას. ამიტომ მიმართავენ ამოცანის გამარტივების ხერხებს, სხვადასხვა ხასიათის დაშვებებს, დაყვანისა და მიყვანის ფორმებს, ერთი საკორდინატო სისტემიდან მეორე საკორდინატო სისტემაზე გადასვლის საშუალებებს. ასე მაგალითად სამფაზა A,B,C სიმეტრიული, სამფაზა 120 ელექტრული გრადუსით დაძრული სისტემიდან, d, q ან α , β 90 ელექტრული გრადუსით დაძრულ სისტემაზე და ა. შ.

რადგანაც მაგნიტური ველი პერიოდული ხასიათისაა სივრცეში, იანგარიშება მხოლოდ ველის ნახევარპერიოდი გაზრდილი მასშტაბით, მთლიანი მანქანის მაგნიტური ველის მაგივრად, მაგნიტოგამტარის მაგნიტური შეღწევადობა საჭაერო ღრეჩოს მაგნიტურ შეღწევადობასთან შედარებით უსასრულოდ დიდია. ასეთი დაშვება პროექტირების პრაქტიკაში არ იწვევს დიდ ცდომილებას, ამიტომ მაგნიტოგამტარის ცალკეულ უბანზე მაგნიტური ინდუქციების ანგარიში შესაბამისი მდგრადობით დასაშვებია.

მომდევნო გამარტივება მდგომარეობს იმაში, რომ უამრავი არსებული ელემენტარული დენების მიერ შექმნილი მაგნიტური ველები წარმოქმნიან ცალკეულ მაგნიტურ ველებს და ჯამური მაგნიტური ველი შეიქმნება მათი სუპერპოზიციის საშუალებით. დენგამტარები ისევე როგორც მაგნიტოგამტარი, ატარებენ პერიოდულ

ხასიათს და საკმარისია ვიანგარიშით ერთეულოვანი დენის მიერ შექმნილი მაგნიტური ველი და მასშტაბის საშუალებით გადავიდეთ რეალურ მაგნიტურ ველზე.

მაგნიტური ველის ძალწირების სიგრძე მაგნიტოგამტარის ცალკეულ უბნებზე გასაშუალოებულია და შეკრული კონტურის ჯამური სიგრძე ტოლია ცალკეული მაგნიტოგამტარის უბნების საშუალო სიგრძეთა ჯამისა. მაგნიტური ინდუქციები მაგნიტური გამტარის ცალკეული უბნების განიკვეთის ფართში მუდმივი სიდიდეებია და მაგნიტური ველის დამახულობები შესაბამისად არ იცვლება. სრული დენის კანონი გამოყენებულია არა ინტეგრალური, ან დიფერენციალური სახით, არამედ ალგებრული გამოსახულებით.

მუდმივი მაგნიტის მაგნიტური ველის ანგარიშის დროს მიღებულია შემდეგი დაშვებები და გამარტივებები: მაგნიტის გვერდითი ნაწილების ფანტვის ნაკადების სიმცირის გამო უგულებელყოფილია მაგნიტური ინდუქცია მაგნიტის მთელი განიკვეთის ფართზე მუდმივია და გასაშუალოებულია მაგნიტური ჯაჭვის ანგარიში დაიყვანება ელექტრული ჩანაცვლების სქემების ანგარიშზე.

მაგნიტის მინიმალური რეჟიმის შესაბამისი პარამეტრები იანგარიშება დამაგნიტების მრუდის სიმრავლის კოეფიციენტის მეშვეობით. მაგნიტურ და არამაგნიტურ უბნებზე დამოკიდებულება მაგნიტურ გამტარობასა და მაგნიტურ გამტარობის კოეფიციენტს შორის სწორხაზოვანია.

მაგნიტური ველი ბრტყელპარალელურია ელექტრომექანიკური გარდაქმნის მთელ სივრცეში.

მუდმივი მაგნიტის ოპტიმალურ პარამეტრებად მიიჩნევა ის გეომეტრიული ზომები, რომლებიც შეესაბამებიან მაგნიტის მიერ განვითარებულ ენერჯის მაქსიმალურ მნიშვნელობას. მაგნიტოგამტარის ღრმულებისა და კბილების მონაცვლეობა საჰაერო ღრეჩოში იწვევს მაგნიტური ინდუქციის ცვლილებას. ამ ფაქტს ემატება ინდუქციის დამატებითი ცვლილება, რომელიც გამოწვეულია მბრუნავი ნაწილის მდგომარეობის პერიოდული ცვლილებით. პრაქტიკაში ასეთი ორმაგი ცვლილებით გამოწვეულ მაგნიტურ ველებს პულსირებული მაგნიტური ველები ეწოდება. პროექტირების დროს მათ მიერ გამოწვეული კარგები უგულებელყოფილია.

2.4. მრავალკრიტერიუმის ოპტიმიზაციის გამოყენება მრავალ-გენერატორის პროექტირების პირველ ეტაპზე.

მრავალ-გენერატორის პროექტირება ისევე როგორც ნებისმიერი ელექტრომექანიკური გარდამქმნელისა, წარმოადგენს მრავალკრიტერიუმის ამოცანას. მრავალ-გენერატორის გამოსავალი პარამეტრები როგორცაა სიმძლავრის, მარგი ქმედების კოეფიციენტი, საიმედოობა, გადატვირთვის უნარიანობა, მაბრუნის (მგრები) მომენტი და სხვა მრავალი, უნდა მიისწრაფოდნენ თავიანთი შესაძლო მაქსიმალური სიდიდეებისაკენ პროექტირების პროცესში. რაც შეეხება ელექტრულ და მაგნიტურ დანაკარგებს, მასაგაბარიტულ მაჩვენებლებს, გადახურების ტემპერატურებს, ფასებს და ა. შ. ისინი უნდა იყვნენ შესაძლო მინიმალური სიდიდეები (მიისწრაფოდნენ შესაძლო მინიმალური მნიშვნელობისაკენ) [1], [2].

მრავალკრიტერიუმის ამოცანას კიდევ ვექტორულ ოპტიმიზაციასაც უწოდებენ. ვექტორული ოპტიმიზაციის დროს გვიხდება ერთდროულად რამდენიმე კერძო კრიტერიუმების ოპტიმიზაცია. ძალიან ხშირად ოპტიმიზაციის კერძო კრიტერიუმები კონფლიქტურ ფუნქციებს წარმოადგენენ, ერთი კრიტერიუმის შემცირება იწვევს მეორის გაზრდას და პირიქით. ეს გარემოება ბადებს ამოცანას უამრავი ამონახსნით. ცალსახა ამონახსნის მიღება წარმოუდგენილია.

ვექტორული ოპტიმიზაციის ამოცანას ზოგადად აქვს შემდეგი სახე: მოიძებნოს მაქსიმალური მნიშვნელობები $F_1(x), F_2(x), \dots, F_n(x)$ ფუნქციებისა და იმავე დროს მინიმალური მნიშვნელობები $f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)$ ფუნქციებისა, სადაც x არის მრავალგანზომილებიანი სივრცითი ვექტორი. $X=(x_1, x_2, \dots, x_m)$

ამოცანის ამოხსნა იყოფა ორ ეტაპად:

1. ვნახულობთ მრავალ ამონახსნს პარეტოს მეთოდის მიხედვით.
2. მრავალი ამონახსნიდან ვირჩევთ ყველაზე ეფექტურს. ეფექტური ვარიანტი ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$X_{\text{ოპტ}} = \max F_i(x), \quad i=1,2,\dots,n$$

$$X_{\text{ოპტ}} = \min f_i(x), \quad i=1,2,\dots,m$$

ერთკრიტერიუმიანი ამოცანისაგან განსხვავებით, მრავალკრიტერიუმიანი ამოცანა განსხვავდება იმით, რომ სხვადასხვა კრიტერიუმის ფუნქციებს სხვადასხვა ფიზიკური არსი აქვთ, სხვადასხვა განზომილების ერთეულებით ხასიათდებიან, მასშტაბები სხვადასხვაა.

ამოცანის გამარტივების მიზნით ახდენენ კრიტერიუმების ნორმალიზაციას – ერთ საერთო განზოგადოებული ერთეულით შეფასებას. იგი სუბიექტურ ხასიათს ატარებს და პრაქტიკაში იშვიათად გამოიყენება.

არც თუ იშვიათად გამოიყენებენ კრიტერიუმების წილობითი კოეფიციენტების მეთოდს, რომელიც მდგომარეობს შემდეგში:

თანაბარი კვალიფიკაციის მქონე ექსპერტები, ათბალიან სისტემაში კრიტერიუმებს ანიჭებენ სხვადასხვა შეფასებებს.

თუ რამდენად მნიშვნელოვანია ესა თუ ის კრიტერიუმი, გამოითვლება ფორმულით:

$$\lambda_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^m r_i}; \quad i = 1,2,3, \dots, m; \quad (2.2)$$

λ_i არის I კრიტერიუმის წილობითი კოეფიციენტი.

r_i – არის კონკრეტული ექსპერტის შეფასება მოცემული კრიტერიუმისთვის.

წილობითი კოეფიციენტები უნდა აკმაყოფილებდეს შემდეგ პირობას:

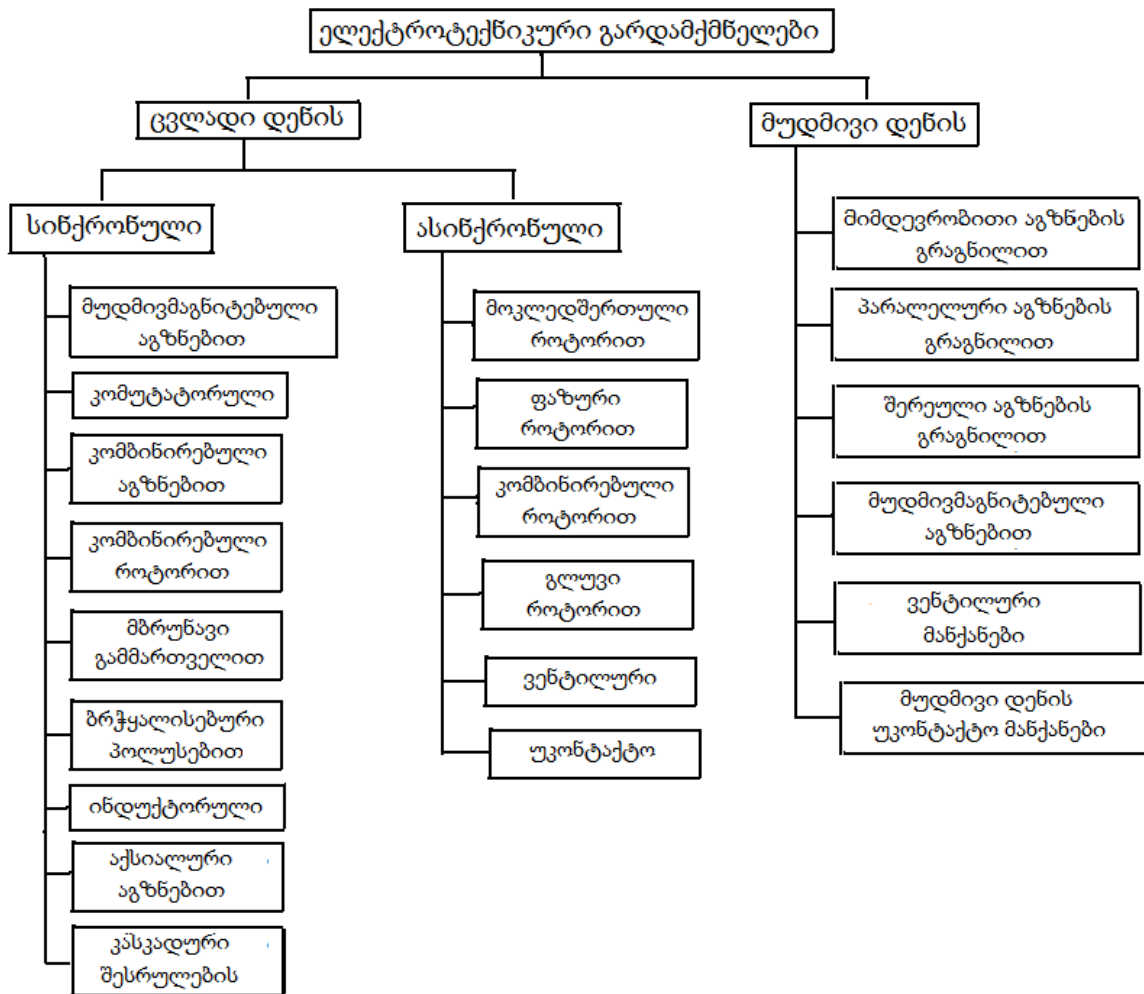
$$\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1; \quad (2.3)$$

ეს მეთოდიც აგრეთვე სუბიექტური ხასიათის მატარებელია და დამოკიდებულია ექსპერტების ცოდნაზე. მრავალკრიტერიუმიან ამოცანას, როგორც ვხედავთ მკაცრი მათემატიკური ამონახსნი არ აქვს და ატარებს სუბიექტურ ხასიათს.

მიუხედავად ზემოთაღნიშნულისა, პროექტირების პირველ ეტაპზე შესაძლებელია მრავალკრიტერიუმიანი ოპტიმიზაციის გამოყენება.

დღეისათვის ცნობილია, რომ არსებობს უამრავი ვარიანტი ძრავა-გენერატორის ტიპის შერჩევისა, ესენია: მუდმივი დენის კოლექტორული მანქანები, რომლებიც ხასიათდებიან დაბალი საიმედოობით, კოლექტორის და მუსების კვანძის არსებობის გამო, ბიჯური ძრავები, რომლებიც გამოირჩევიან მართვის მოქნილობით, მაგრამ აქვთ მოცულობის ერთეულზე გამომუშავებული სიმძლავრის დაბალი მაჩვენებელი;

ასინქრონული ძრავები, რომელთა წარმოება ტექნოლოგიურია, საიმედოა, მაგრამ ხასიათდებიან დაბალი მარგი ქმედებისა და სიმძლავრის კოეფიციენტებით. თუ გამოვიყენებთ ძრავალკრიტერიუმთან ოპტიმიზაციის ეგრეთ წოდებულ რანჟირების მეთოდს, ვნახავთ, რომ ყველაზე ოპტიმალური ვარიანტი ძრავა-გენერატორის პროექტირებისათვის არის მაღალი მონაცემების მქონე მუდმივმაგნიტებიანი ცვლადი დენის ძრავალფაზა კლასიკური შესრულების ელექტრული მანქანა, რომელიც აკმაყოფილებს მის მიმართ წაყენებულ ძირითად მოთხოვნებს, როგორცაა საიმედოობა, მასა – გაბარიტები. კლასიფიკაციის ცხრილი, მოცემულია ნახ. 2.11-ზე. ტექნოლოგიურობა და ა. შ. ელექტრული მანქანების პროექტირების მომდევნო ეტაპია მიზნობრივი ფუნქციის შერჩევა და ოპტიმალური პროექტირება მინიმალური ელექტრომაგნიტური მასალების დანახარჯებით გეომეტრიული პროგრამირების გამოყენებით.



ნახ. 2.11. ელექტრომაგნიტური გარდამქმნელებია სტრუქტურული სქემა

თავი III.

3.1. გეომეტრიული პროგრამირების მეთოდის ზოგადი მიმოხილვა

არსებობს ელექტრული მანქანების ოპტიმიზაციის მრავალი მეთოდი. თითოეულ მეთოდს საფუძვლად უდევს ესა თუ ის მათემატიკური მოდელი რომლებიც აკავშირებენ ელექტრული მანქანის შემავალ და გამომავალ მაჩვენებლებს. მრავალი მეთოდის საფუძველს წარმოადგენს პროექტირების განტოლებები, რომლებიც მიღებულია როგორც ანალიზურად ასევე ცდების გზით. ელექტრული მანქანების პროექტირების დროს მათემატიკურ მოდელეზად შეიძლება გამოყენებული იქნეს დიფერენციალური განტოლებები, რაც საშუალებას იძლევა გათვალისწინებული იქნეს როგორც სტატიკური ასევე დინამიკური მახასიათებლები. როგორც წესი ამოცანებს დაკავშირებულს

ელექტრული მანქანების ოპტიმიზაციასთან გააჩნიათ რამდენაიმე ამოხსნა და ოპტიმიზაციის მიზანს შეადგენს საუკეთესო ამოხსნის მოძებნა სხვა მრავალი პოტენციურად შესაძლოდან. ოპტიმიზაცია შეიძლება განხორციელდეს მრავალი მეთოდის საშუალებით, როგორც ძალზე რთული ანალიზური და რიცხვითი ასევე ხელით დათვლის მეთოდის გამოყენებით. ოპტიმიზაციის მეთოდები ერთმანეთისაგან განსხვავდებიან პროგრამირების სირთულით, ანგარიშის დროით და კრებადობის სიჩქარით. ელექტრული მანქანის დაპროექტების დროს შეზღუდვები დაკავშირებულია გრაგნილების გადახურებასთან, ღირებულებასთან, გაბარიტებთან და ა.შ. ყველაზე მეტად გავრცელებულია შეზღუდვების აღრიცხვების შემდეგი მეთოდები:

1. **ცვლადების ზღვრული მნიშვნელობების ფიქსაცია** – მოხერხებულია გამოსაყენებლად გრადიენტული მეთოდებისა და კორდინატული ძიების დროს როდესაც შეზღუდვები დადებულია დამოუკიდებელ ცვლადებზე.

2. **საჯარიმო ფუნქციების მეთოდი** – მხედველობაში ღებულობს უტოლობების ტიპის შეზღუდვებს და დაფუძნებულია ახალ ფუნქციაზე

$$J(x, u, t) = F(x, u, t) = III(x, u, t), \quad (3.1)$$

სადაც $F(x, u, t)$ – გამოსაკვლევი მიზნობრივი ფუნქციაა; $J(x, u, t)$ – ახლად შექმნილი ფუნქციაა; $III(x, u, t)$ – საჯარიმო ფუნქციაა.

საჯარიმო ფუნქციის ნიშანი დამოკიდებულია ამოხსნის მსვლელობაზე: მაქსიმუმის მოძებნის დროს საჯარიმო ფუნქციას აქვს უარყოფითი ნიშანი, ხოლო ფუნქციის მინიმიზაციის დროს ის დადებითია. თითოეული საჯარიმო ფუნქცია საშუალებას იძლევა შეიქმნას რიცხვითი მეთოდი ამოცანის უშალო ამოხსნისათვის.

3. **ლაგრანჟის მამრავლების მეთოდი** – საკმაოდ ეფექტურად აღრიცხავს ტოლობების ტიპის პირობების არსებობას. ამ პირობების აღრიცხვა დაფუძნებულია ახალი მიზნობრივი ფუნქციის შექმნაზე, რომელშიც ლაგრანჟის მამრავლების ძებნა შეიძლება განხორციელდეს მათემატიკური პროგრამირების ჩვეულებრივი მეთოდებით.

დღეისათვის ელექტრული გარდამქმნელების ოპტიმიზაციის მეთოდების ძებნა და გაუმჯობესება კვლავ გრძელდება. ამოცანების გარკვეული კლასისათვის მოძებნილი

იქნება ოპტიმიზაციის გარკვეული მეთოდები, მაგრამ ამოსახსნელი ამოცანების რიცხვი უფრო სწრაფად იზრდება ვიდრე ოპტიმიზაციის მეთოდების რიცხვი.

ექსპერიმენტის დაგეგმის მეთოდი – საშუალებას იძლევა საგრძნობლად შემცირდეს ექსპერიმენტების რიცხვი და გამოთვლების მოცულობა. ელექტრული მანქანების დაპროექტების დროს ექსპერიმენტის დაგეგმის მეთოდის გამოყენება საშუალებას იძლევა განახორციელოს განზოგადებული ელექტრული მანქანის მათემატიკური მოდელის გარდაქმნა უბრალო პოლინომიურ დამოკიდებულებებში. რაც აკავშირებს მანქანის მუშაობის მაჩვენებლების მის პარამეტრებთან. ექსპერიმენტის დაგეგმის მეთოდი ანხორციელებს ძირითადი და მეორეხარისხოვანი ფაქტორების გამოყოფას, რომლებიც გავლენას ახდენენ ამა თუ იმ მაჩვენებლებზე. ექსპერიმენტის დაგეგმის მეთოდის განვითარება საშუალებას იძლევა მივიღოთ ელექტრული მანქანის უფრო მაღალი ხარისხის მათემატიკური მოდელები და გადავიდეთ გეომეტრიულ პროგრამირებაზე.

გეომეტრიული პროგრამირება – ამ მეთოდის საშუალებით წარმატებით იხსნება მინიმიზაციის ამოცანები რომლებშიც ოპტიმალურობის და შეზღუდვების კრიტერიუმები გამოისახება გარკვეული ტიპის არახაზობრივი ფუნქციებით. გეომეტრიული პროგრამირება ექსპერიმენტის დაგეგმის მეთოდთან ერთად უზრუნველყოფს ახალი მათემატიკური მოდელების მიღებას ელექტრული მანქანების სინთეზისათვის [1].

გეომეტრიული პროგრამირება წარმოადგენს ოპტიმიზაციის ამოცანების გადაწყვეტის ერთ-ერთ ხერხს, რომელიც დაფუძნებულია უტოლობის თვისებაზე, კერძოდ საშუალო არითმეტიკული ტოლია ან მეტია საშუალო გეომეტრიულზე. თუ გვაქვს ორი ცვლადი u_1 და u_2 , მაშინ მართებულია გამოსახულება

$$\frac{u_1 + u_2}{2} \geq \sqrt{u_1 u_2} . \quad (3.2)$$

ამ პრინციპზე აგებული გეომეტრიული პროგრამირების მეთოდი იძლევა საშუალებას მოვძებნოთ გარკვეული შეზღუდული კლასის მრავალი ცვლადის ფუნქციის ექსტრემალური მნიშვნელობა შემზღუდავი ფუნქციების გათვალისწინებით. გეომეტრიული

პროგრამირების სფერო ეხება ე.წ. პოზინომიალური ფუნქციების გამოკვლევას. პოზინომი არის მრავალწევრების ჯამი ან ერთწევრი, შემდეგი ფორმის

$$F = f_1 + f_2 + \dots + f_n, \quad (3.3)$$

$$f_i = C_i X_1^{a_{i1}} X_2^{a_{i2}} \dots X_m^{a_{im}}. \quad (3.4)$$

სადაც C_i - დადებითი მუდმივი სიდიდეა,

X_1, X_2, \dots, X_m - პროექტირების დადებითი ცვლადი პარამეტრებია.

$a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}$ - პროექტირების ცვლადი პარამეტრების ხარისხის მაჩვენებლებია.

ძრავა - გენერატორის პროექტირების შემთხვევაში კვლევის საგანს წარმოადგენს ისეთი ფუნქციები, როგორცაა გამოყენებული ელექტრომაგნიტური მასალების მასების მინიმიზაცია, ელექტრული და მაგნიტური დანაკარგების მინიმალური მაჩვენებლები, მარგი ქმედების კოეფიციენტი, მინიმალური ფასი და ა.შ. ზემოთჩამოთვლილი ფაქტორები შედიან გეომეტრიული პროგრამირების კვლევის სფეროში.

გეომეტრიული პროგრამირება იყენებს თვისობრივად განსხვავებულ (სხვა სიდიდეებისაგან) ეგრეთ წოდებულ ნორმალიზებულ მასებს. ნორმალიზებულ მასები გვიჩვენებენ თუ რა წილი მიუძღვის მოცემულ F ფუნქციაში ამა თუ იმ შესაკრებ $f_1 + f_2 + \dots + f_n$ ფუნქციებს. მაგალითად f_1 ფუნქციას რა წილი უკავია F ფუნქციაში და აღინიშნება δ_1 -სიდიდით. ანალოგიურად $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ ეგრეთწოდებული ნორმალიზებული მასები გვიჩვენებენ $f_1 + f_2 + \dots + f_n$ ფუნქციების მიერ დაკავებულ წილს ჯამურ ფუნქციაში.

გეომეტრიული პროგრამირების ძირითადი მოთხოვნა - ნორმალიზაციის პირობა შემდეგია:

$$\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n = 1. \quad (3.5)$$

დადებითი ნორმალიზებული მასების ჯამი უნდა უდრიდეს 1-ს.

$\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ დადებითი ნორმალიზებული მასების შემოტანა იძლევა საშუალებას გამოსაკვლევ ფუნქცია (F) წარმოვიდგინოთ გეომეტრიული უტოლობის საშუალებით

$$F = f_1 + f_2 + \dots + f_n \geq \left(\frac{f_1}{\delta_1}\right)^{\delta_1} \left(\frac{f_2}{\delta_2}\right)^{\delta_2} \dots \left(\frac{f_n}{\delta_n}\right)^{\delta_n}. \quad (3.6)$$

გომეტრიული პროგრამირების მომდევნო ეტაპზე უნდა შედგეს დადებითი ნორმალიზებული მასების წრფივი განტოლებათა სისტემა, რომელიც უნდა აკმაყოფილებდეს ეგრეთწოდებულ ორთოგონალურობის პირობას.

$$\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n - \delta_{n-1} = 0 . \quad (3.7)$$

სადაც δ_{n-1} არის შემზღუდავი ფუნქციის დადებითი ნორმალიზებული მასა.

ნორმალიზაციისა და ორთოგონალურობის პირობები დადებითი ნორმალიზებული მასების წრფივი განტოლებებია. მრავალი ცვლადის შემთხვევაში ვღებულობთ ორგანოზომილებიან მატრიცას. ორთოგონალურობის პირობა გვიჩვენებს, თუ რა წილი მიუძღვის ამა თუ იმ შემავალ ცვლადს $f_1 + f_2 + \dots + f_n$ ფუნქციის სიდიდეში.

საბოლოო ჯამში F ფუნქციის ოპტიმალური სიდიდს ძიება დაიყვანება ნორმალიზაციისა და ორთოგონალურობის პირობებით შექმნილი წრფივი განტოლებათა სისტემის გადაწყვეტაში. $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ დადებითი ნორმალიზებული მასები წარმოადგენენ ხარისხის მაჩვენებლებს და შესაბამისად ახდენენ საპროექტო მონაცემების განზოგადოებას.

3.2. პროექტირების ცვლადი შემავალი პარამეტრების ხარისხის მაჩვენებლები, როგორც აპრიორული ცნობების მატარებელი განზოგადოებული სიდიდეები.

დღეისათვის ელექტრომექანიკური გარდამქმნელების პროექტირება აპრიორული ცნობების გარეშე წარმოუდგენელია. შეუძლებელია აგრეთვე იმ ოპტიმალური ინტერვალებისა და სიმრავლეების განსაზღვრა, სადაც იმყოფება. საძიებელი ვარიანტი. აპრიორული ცნობები ძირითადად მოცემულია მრუდების ან ცხრილების სახით და მიგვითითებს პროექტირების შემავალ ცვლად პარამეტრებს შორის კავშირზე [25]. არც თუ იშვიათად პროექტირების წინასწარ ეტაპებზე საჭიროა ცვლად შემავალ პარამეტრებსა და გამოსავალ პარამეტრებს შორის მიახლოებითი კავშირების ცოდნა. ასე მაგალითად: კავშირი მარგი ქმედების კოეფიციენტებისა, სიმძლავრის კოეფიციენტისა და საანგარიშო

სიმძლავრეებს შორის. პროექტირების წინასწარ ეტაპზე ფართოდ იყენებენ ისეთ აპრიორულ დამოკიდებულებებს, როგორცაა

$$\left. \begin{aligned} B = f_1(\tau), \lambda = f_2(D_{1\text{შიდა}}, \ell_1); \\ D_{1\text{შიდა}} = f_3(P'); \lambda = f_4(P) \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

სადაც B – მაგნიტური ინდექსია, τ – საპოლუსო დანაყოფი, λ – მაგნიტოგამტარის დიამეტრისა და სიგრძის თანაფარდობა, $D_{1\text{შიდა}}$ და ℓ მაგნიტოგამტარის გეომეტრიული ზომები, P' – საანგარიშო სიმძლავრე, P – წყვილ პოლუსთა რიცხვი. ოპტიმალური პროექტირების პარამეტრები განზოგადოების ხარისხისა და დონის მიხედვით შეიძლება დავეყოს რამდენიმე ჯგუფებად და ქვეჯგუფებად.

გარდა ამისა საპროექტო პარამეტრები ხასიათდებიან ცვლილების ინტენსიურობითა და ინტერვალებით.

პარამეტრების ცალკეულ ჯგუფებს შეიძლება მივაკუთვნოთ აბსოლუტური კოეფიციენტები, ხვედრითი მნიშვნელობის წარმოებული კოეფიციენტები, რომლებიც შეიძლება იყვეს როგორც განყენებული სიდიდეები (განზომილების გარეშე) ასევე განზომილებიანი, ფარდობითი სიდიდეები, დაყვანილი სიდიდეები და წილობითი სიდიდეები.

პირველს შეიძლება მივაკუთვნოთ ძრავა-გენერატორის გეომეტრიული ზომები, როგორცაა მაგნიტოგამტარის სიგრძე, გარე და შიდა დიამეტრის მიერ დაკავებული განივი კვეთის ფართი, მუდმივი მაგნიტის გეომეტრიული ზომები. ოპტიმალური პროექტირების პროცესის დროს აბსოლუტური სიდიდეები განსხვავდებიან სიდიდით. ცვლილების ზღვრებით და ცვლილების ინტენსიურობით.

მეორე ჯგუფს შეიძლება მივაკუთვნოთ პროექტირების კოეფიციენტები. კოეფიციენტები შეიძლება იყოს გამომავალი ან შემავალი პარამეტრები, ცვლადი ან მუდმივი სიდიდეები, განყენებული ან წარმოებული (ხვედრითი) სიდიდეები – განზომილებით, ან განზომილების გარეშე. ასე მაგალითად მარგი ქმედების

კოეფიციენტი, სიმძლავრის კოეფიციენტი, ენერგეტიკული მარგი ქმედების კოეფიციენტი წარმოადგენს განყენებულ გამოსავალ პარამეტრებს.

პროექტირების შემავალი განყენებული კოეფიციენტების

$$\lambda = \frac{D_{შიდა}}{\ell} \quad (3.9)$$

სადაც ℓ – მაგნიტოგამტარის სიგრძეა (სმ).

$D_{შიდა}$ – მაგნიტოგამტარის შიდა დიამეტრი სმ.

λ – ს შერჩევა დამოკიდებულია უამრავ ფაქტორზე, კერძოდ ძრავა – გენერატორის სიმძლავრეზე. ელექტრომაგნიტურ დატვირთვებზე, შესრულების ტიპზე, მუშაობის რეჟიმზე და სხვა.

$$\alpha_{\delta} = \frac{b_{პოლ}}{\tau} = \frac{B_{\delta\text{საშუალო}}}{B_{\delta}} \quad (3.10)$$

α_{δ} – პოლუსის გადაფარვის კოეფიციენტია.

$b_{პოლ}$ – პოლუსის საანგარიშო სიგანეა (სმ).

$B_{\delta\text{საშუალო}}$ – მაგნიტური ინდუქციის საშუალო სიდიდეა საჰაერო ღრეჩოში (ტესლა)

B_{δ} – მაგნიტური ინდუქციის მაქსიმალური მნიშვნელობა საჰაერო ღრეჩოში (ტესლა)

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{შიდა}}{2p} \quad (3.11)$$

τ – ძრავა-გენერატორის საპოლუსო დანაყოფი სმ)

p – წყვილ პოლუსთა რიცხვია.

გრაგნილის კოეფიციენტი, რომელიც წარმოადგენს სამი კოეფიციენტის ნამრავლს განყენებული სიდიდეა მთლიანად ახასიათებს

$$K_{\text{გრაგნილა}} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \quad (3.12)$$

მაგნიტური ველის სისტემას.

სადაც K_1 – გრაგნილის განაწილების კოეფიციენტი

$$K_1 = K_{\text{განაწილება}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m_1}\right)}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot q_1 \cdot m_1}\right)} \quad (3.13)$$

სადაც m_1 – სტატორის ფაზათა რაოდენობა.

q_1 – სტატორის ღრმულთა რაოდენობა ერთ ფაზაზე და ერთ პოლუსზე.

K_2 – ბიჯის შემოკლების კოეფიციენტი.

$$K_2 = K_{\text{შემოკლ}} = \sin\left(\frac{y_1}{\tau_1} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.14)$$

სადაც y_1 – სტატორის გრაგნილის ბიჯია.

τ_1 – სტატორის გრაგნილის საპოლუსო დანაყოფი.

$$K_3 = K_{\text{დახრის}} = \frac{\sin\left(\frac{b_{\text{დახრის}} \cdot \pi}{\tau_1 \cdot 2}\right)}{\frac{b_{\text{დახრის}} \cdot \pi}{\tau_1 \cdot 2}} \quad (3.15)$$

სადაც $b_{\text{დახრის}}$ – ღრმულის დახრის სიდიდეა სმ.

გარდა ზემოთხსენებული კოეფიციენტებისა, გამოყენებულია $K_{1\text{ულლის}}$ და $K_{1\text{სტატ}}$ – კოეფიციენტები, რომლებიც წარმოადგენენ განყენებულ სიდიდეებს და ზემოქმედებენ ძრავა-გენერატორის გამომავალი პარამეტრების ოპტიმალურ ვარიანტზე. მესამე ჯგუფს შეიძლება მივაკუთვნოთ ფარდობითი სიდიდეები, რომლებიც აგრეთვე წარმოადგენენ განზოგადოებულ სიდიდეებს. ფარდობითი სიდიდეების ანგარიშის დროს, ძალიან ხშირად იღებენ ძრავა-გენერატორის ნომინალურ სიდიდეებს, როგორცაა ნომინალური ძაბვა, ნომინალური სიმძლავრე, ნომინალური ბრუნვის სიჩქარე, ნომინალური სიხშირე და ა. შ.

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{ფარდ}} &= \frac{I}{I_{1\text{ნომ}}}; & P_{\text{ფარდ}} &= \frac{P}{P_{1\text{ნომ}}} \\ U_{\text{ფარდ}} &= \frac{U}{U_{1\text{ნომ}}}; & M_{\text{ფარდ}} &= \frac{M}{M_{1\text{ნომ}}} \\ n_{\text{ფარდ}} &= \frac{n}{n_{1\text{ნომ}}}; & r_{\text{ფარდ}} &= \frac{r}{r_{1\text{ნომ}}} \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

სადაც $I_{\text{ფარდ}}, P_{\text{ფარდ}}, U_{\text{ფარდ}}, M_{\text{ფარდ}}, n_{\text{ფარდ}}, r_{\text{ფარდ}}$ შესაბამისად დენის სიმძლავრის, ძაბვის მომენტის სიჩქარისა და აქტიური წინააღმდეგობის ფარდობითი მნიშვნელობებია.

I, P, U, M, n, r – იმავე სიდიდეების მიმდინარე მნიშვნელობებია.

ფარდობით სიდიდეებს განზომილება არა აქვთ, და ამიტომ აბსოლუტურ სიდიდეებთან შედარებით წარმოადგენენ უფრო მაღალი რანგის განზოგადოებულ სიდიდეებს. ასე მაგალითად სხვადასხვა სიმძლავრის ძრავა-გენერატორები თუ ერთმანეთისაგან განსხვავდებიან რამდენიმე ათეული ან ასეული სიდიდით, ფარდობითი სიმძლავრეების განსხვავება იცვლება მცირე ფარგლებში. ასე მაგალითად თუ დიდი სიმძლავრის მანქანებში აქტიური წინააღმდეგობა ძალზედ მცირეა და შეადგენს რამდენიმე მეათასედს, ხოლო მცირე სიმძლავრის მანქანებში დიდია და შეადგენს რამდენიმე ასეულ ომს, ფარდობით ერთეულებში იცვლებიან მცირე ზღვრებში. შესაბამისად განზოგადოების ხარისხი მაღალია აბსოლუტურ სიდიდეებთან შედარებით.

მეოთხე ჯგუფს შეიძლება მივაკუთვნოთ დაყვანილი სიდიდეები. კერძოდ ძალიან ხშირად უძრავი და მოძრავი ნაწილების ძაბვები, ფაზათა რაოდენობა, დენის ძალური აქტიური და რეაქტიული წინააღმდეგობები საგრძნობლად განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან.

ამიტომ ანგარიშის გამარტივებისა და ჩატარებით მიზნით ახდენენ უძრავი ნაწილების პარამეტრების დაყვანას მოძრავი ნაწილების პარამეტრებზე, ან პირიქით.

კერძოდ: ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის საშუალებით დაიყვანება პირველადი ძაბვა მეორად ძაბვაზე, პირველადი დენი მეორად დენზე, უძრავი ნაწილების წინააღმდეგობები, მოძრავი ნაწილების წინააღმდეგობებზე, უძრავი ნაწილების ფაზათა რაოდენობა მოძრავი ნაწილების ფაზათა რაოდენობაზე და ა. შ.

$$\begin{cases} K_U = \frac{U_1}{U_2}; & K_I = \frac{I_1}{I_2}; \\ K_2 = \frac{r_1}{r_2}; & K_m = \frac{m_1}{Um_2} \end{cases} \quad (3.17)$$

სადაც U_1, I_1, r_1, m_1 – უძრავი ნაწილების პარამეტრებია.

U_2, I_2, r_2, m_2 – მოძრავი ნაწილების პარამეტრებია.

K_U, K_I, K_2, K_m – დაყვანის კოეფიციენტებია, შესაბამისად.

დაყვანის კოეფიციენტები განყენებული სიდიდეები არიან და აგრეთვე წარმოადგენენ განზოგადოებულ სიდიდეებს, განსაკუთრებულ ყურადღებას იმსახურებს ხვედრითი (კუთრი) ხასიათის სიდიდეები. ისინი შეიძლება მივაკუთვნოთ მეორე ჯგუფის ქვეჯგუფს. ხვედრითი სიდიდის კოეფიციენტები წარმოადგენენ სხვადასხვა ფიზიკური არსისა და თვისების მქონე სიდიდეების ფარდობას. შესაბამისად აქვთ განზომილება და უფრო მაღალი დონის განზოგადოების შესაძლებლობა. ცვლილების მიხედვით შეიძლება იყვნენ მუდმივები, იცვლებოდნენ მცირე ან დიდ ფარგლებში, და დამოკიდებული იყვნენ ერთ ან რამდენიმე პარამეტრზე. ასე მაგალითად, დენგამტარი მასალის ხვედრითი წინააღმდეგობა დამოკიდებულია დენგამტარის სიგრძეზე, ფართზე, მასალაზე, გარემოს ტემპერატურაზე, მაგრამ პროექტირების პროცესში წარმოადგენს მუდმივ სიდიდეს.

ძრავა-გენერატორების პროექტირებისას ფართოდ არის გავრცელებული ისეთი კუთრი სიდიდეები, რომელთა გამყოფი სიდიდე წარმოადგენს ფართობს. ასეთებია მაგალითად მაგნიტური ინდუქცია B_s , რომელიც წარმოადგენს ფართის ერეულზე მოსულ მაგნიტური ნაკადის სიდიდეს (ტესლა).

დენის სიმკვრივე Δ , რომელიც წარმოადგენს დენის ძალას ანუ ელექტრონების რაოდენობას, რომელიც მიედინება დენგამტარი მასალის ფართის ერთეულში და იზომება $\frac{\text{ამპერი}}{\text{მმ}^2}$, თბური ნაკადის სიმკვრივე, რომელიც გამოიყოფა მაგნიტოგამტარის, ან დენგამტარის ზედაპირის ერთეული ფართისაგან და იზომება $\frac{\text{ვატი}}{\text{სმ}^2}$

პროექტირების საწყის ეტაპზე ძირითად პარამეტრად ითვლება არნოლდის მანქანის მუდმივა.

$$C_A = \frac{D_{შიდა} \cdot l \cdot n}{P'} = \frac{6.1 \cdot 10^{11}}{\alpha_{\delta} \cdot K_B \cdot K_{გრანული} \cdot A \cdot B_{\delta}} \quad (3.18)$$

სადაც P' – ძრავას გენერატორის ან ძრავა-გენერატორის საანგარიშო სიმძლავრეა.

$$A = \frac{W \cdot I_{\text{ნომ}} \cdot \ell \cdot n \text{ ამპერი}}{\pi \cdot D_{\text{შიდა}}^2 \text{ სმ}} \quad (3.19)$$

ხაზოვანი დატვირთვის სიდიდეა,

W - დენგამტარი ღრმულის ხვიათა რიცხვია,

I - ნომინალური დენია ამპერებში,

C_A არნოლდის მანქანის მუდმივა გვიჩვენებს ელექტრომაგნიტურის მასალის დანახარჯს ენერჯის ერთეულზე და იზომება $\frac{(\text{სმ})^3}{\text{კვა}\cdot\text{წუთი}}$,

C_A კოეფიციენტის შებრუნებულ სიდიდეს ეწოდება ესონის კოეფიციენტი

$$K_{\text{ფ}} = \frac{1 \text{ კვა}\cdot\text{წუთი}}{C_A (\text{სმ})^3} \quad (3.20)$$

და გვიჩვენებს ენერჯის სიმკვრივეს ერთეულ მოცულობაში, ანუ ერთეული მოცულობის მიერ განვითარებულ ენერჯიას.

თუ არნოლდის „მანქანის მუდმივას“ ფორმულიდან გამოვსახავთ საანგარიშო სიმძლავრეს P' – ს მივიღებთ, რომ ერთი შეხედვით იგი დამოკიდებულია ძირითადად ხუთი ცვლადი პარამეტრის სიდიდეზე ესენია: n, $D_{\text{შიდა}}$, ℓ , A, $B_{\text{ფ}}$.

$$P' = 6,1 \cdot 10^{-11} \cdot \alpha_{\text{ფ}} \cdot K_{\text{გრაგნილი}} \cdot K_B \cdot n \cdot D_{\text{შიდა}}^2 \cdot \ell \cdot A \cdot B_{\text{ფ}} \text{ კვა} \quad (3.21)$$

უნდა აღინიშნოს, რომ კოეფიციენტები $\alpha_{\text{ფ}}$, $K_{\text{გრაგნილი}}$, K_B – პროექტირების სხვადასხვა ეტაპზე მუდმივი ან ცვლადი სიდიდეები არიან, (ზოგიერთ ვარიანტში განიცდიან ცვლილებას და თვისობრივად ცვლიან მანქანის გამოსავალ პარამეტრებს). შესაძლებელია საანგარიშო სიმძლავრის წარმოდგენა სხვა ასპექტში, კერძოდ მისი გამოსახვა სხვა გეომეტრიული ზომების საშუალებით. მაშინ საანგარიშო სიმძლავრე მიიღებს ღრმულისა და მაგნიტოგამტარის კბილის გეომეტრიული ზომებისგან დამოკიდებულებას, ასე მაგალითად, თუ ხაზოვან დატვირთვას შევუცვლით სახეს და მის გამოსახულებაში ნორმალურ დენს წარმოვიდგენთ დენის სიმძლავრისა და დენგამტარის განივი კვეთის საშუალებით

$$I_{\text{ნომ}} = \Delta_1 \cdot S_{\text{დენგამტარი}} \cdot \text{ამპერი} \quad (3.22).$$

სადაც Δ_1 – სტატორის გრაგნილის (დენგამტარის) დენის სიმკვრივეა (დასაშვები დენის სიდიდე ფართის ერთეულზე, ხოლო $S_{\text{დენგამტარი}}$ – დენგამტარის განივი კვეთის ფართობი. თუ გრაგნილის ხვიათა რიცხვს გამოვსახავთ ღრმულის სიმაღლის, სიგანის და გრაგნილის შევსების კოეფიციენტის საშუალებით,

$$W = h_{\text{ღრმულს}} \cdot b_{\text{ღრმულს}} \cdot K_{\text{შევსებას}} \quad (3.23)$$

მაშინ საანგარიშო სიმძლავრე მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$P' = 6,1 \cdot 10^{-11} \cdot \alpha_{\delta} \cdot K_{\text{გრაგნილი}} \cdot K_B \cdot K_{\text{შევსებას}} \cdot n \cdot D_{\text{შიდა}}^2 \cdot \ell_1 \cdot \Delta_1 \cdot h_{\text{ღრმული}} \cdot b_{\text{ღრმული}} \cdot B_{\delta} \cdot \frac{1}{\pi} \quad (3.24)$$

ფორმულიდან ჩანს, რომ იგივე საანგარიშო სიმძლავრე შეიძლება წარმოვიდგინოთ შვიდი პარამეტრის ფუნქციის სახით.

პროექტირების წინა ეტაპზე ავაწყოთ ალგორითმი ისეთი სახით, რომ შემავალი პარამეტრები იყოს არამართო მაგნიტოგამტარის შიდა და გარე დიამეტრი, არამედ დენისა და მაგნიტური ნაკადის სიმკვრივეები, ღრმულის გეომეტრიული ნორმები და ა. შ.

შესაძლებელია საანგარიში სიმძლავრის სხვა ასპექტით წარმოვდგენა. ჩვენი ნებასურვილის მიხედვით, თუ შემავალი პარამეტრები, ისევე როგორც ხაზოვან დატვირთვის კოეფიციენტს შევუცვლით სახეს.

თუ საანგარიშო სიმძლავრეს დავუპირისპირებთ პოზინომიალურ ფუნქციას, მივიღებთ შემდეგი სახის გამოსახულებას:

$$P' = n^{t_1} \cdot D_{\text{შიდა}}^{t_2} \cdot \ell_1^{t_3} \cdot A^{t_4} \cdot B_{\delta}^{t_5} \quad (3.25)$$

სადაც t_1, t_2, \dots, t_5 – პროექტირების ცვლადი შემავალი პარამეტრების ხარისხის მაჩვენებლებია.

თუ ვიანგარიშებთ ხარისხის მაჩვენებლებს, მაშინ შესაძლებელი იქნება ცვლადი პარამეტრების წინასწარი ოპტიმალური საანგარიშო არეების განსაზღვრა. საანგარიშო სიმძლავრე შეიძლება წარმოვიდგინოთ შვიდი ცვლადი დამოუკიდებელი პარამეტრის საშუალებით.

$$P' = n^{y_1} \cdot D_{შიდა}^{y_2} \cdot \rho_1^{y_3} \cdot \Delta_1^{y_4} \cdot h_{ღრმული}^{y_5} \cdot b_{ღრმული}^{y_6} \cdot B_{\delta}^{y_7} \quad (3.26)$$

$y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7$ პროექტირების ცვლადი პარამეტრის ხარისხის მაჩვენებლებია.

პირველი მცდელობა, წარმოადგენს საანგარიშო სიმძლავრეს და პროექტირების პარამეტრები ხარისხის მაჩვენებლების საშუალებით, ეკუთვნის ბ.ი. კუზნეცოვს. ამ შემთხვევაში ბაზურ სიდიდეთ აღებული იყო მაგნიტოგამტარის შიდა დიამეტრი და პროექტირების სხვა სიდიდეებთან დაკავშირებული იყო კოეფიციენტისა და ხარისხში აყვანილი შიდა დიამეტრის ნამრავლის სახით.

კერძოდ პროექტირების ნებისმიერი საანგარიშო სიდიდე გამოსახულია კოეფიციენტისა და მაგნიტოგამტარის შიდა დიამეტრის ნამრავლის სახით. იმ განსხვავებით, რომ მაგნიტოგამტარის შიდა დიამეტრი აყვანილია სხადასხვა ხარისხში. ასე მაგალითად პროექტირების საანგარიშო სიმძლავრე ტოლია

$$P' = K_1 \cdot D_{შიდა}^{\alpha_1}$$

α_1 – არის ხარისხის მაჩვენებელი და წარმოადგენს უფრო მაღალი ხარისხის განზოგადოებულ სიდიდეს. ხაზოვანი დატვირთვის კოეფიციენტი

$$A = K_2 \cdot D_{შიდა}^{\alpha_2}$$

მაგნიტური ინდუქცია

$$B_{\delta} = K_3 \cdot D_{შიდა}^{\alpha_3}$$

მაგნიტოგამტარის სიგრძე

$$l_1 = K_4 \cdot D_{\text{შიდა}}^{\alpha_4}$$

სადაც A, B, δ, l_1 , პროექტირების სიდიდეებია.

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – პროექტირების ხარისხის მაჩვენებლებია შესაბამისი ცვლადი პარამეტრებისათვის.

ისინი იცვლებიან მცირე ფარგლებში და წარმოადგენენ უფრო მაღალი რანგის განზოგადოებულ სიდიდეებს.

სხვადასხვა სიმძლავრის და ერთი ტიპის ძრავა-გენერატორებისათვის ხარისხის მაჩვენებლებით წარმოდგენილი ინფორმაცია შეიძლება გამოყენებული იქნას ოპტიმალური არეების არჩევის დროს. იმისათვის, რომ შევზღუდოთ ოპტიმალური სიდიდე ძრავა-გენერატორის სიმძლავრისა, რაც შეეხება შემავალი პარამეტრების აბსოლუტურ სიდიდეებს, ისინი შეიცვლებიან ჩვენთვის სასურველი კანონების მიხედვით.

თუ ოპტიმალურ მიზნის ფუნქციას (ჩვენს კერძო შემთხვევაში მინიმალურ ელექტრომაგნიტური მასალების მასას

$$\sum G = f(h_{1\text{კბილის}}, b_{1\text{დრმული}}, b_{1\text{კბილის}}, l_1, h_{1\text{ულის}}, h_{2\text{გრაგნ}}, b_{2\text{გრაგნ}}, h_{2\text{ულის}}) \quad (3.27)$$

დავუპირისპირებთ პიზონომიალურ ფუნქციას, მივიღებთ შემდეგ სურათს.

$$\sum G = F(h_{1\text{კბილის}}^{x_1}, b_{1\text{დრმული}}^{x_2}, b_{1\text{კბილის}}^{x_3}, l_1^{x_4}, h_{1\text{ულის}}^{x_5}, h_{2\text{გრაგნ}}^{x_6}, b_{2\text{გრაგნ}}^{x_7}, h_{2\text{ულის}}^{x_8}) \quad (3.28)$$

$\sum G$ რომელიც შედგება რვა შესაკრებისაგან, და რომელთა წილი $\sum G$ სიდიდეში განისაზღვრება $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_8$, წილობითი სიდიდეებით, შესაძლებელია გამოისახოს პროექტირების შემავალი პარამეტრების საშუალებით, რომელთა წილი ტოლი იქნება X_1, X_2, \dots, X_8 სიდიდისა. ერთი ტიპის, სხვადასხვა სიმძლავრის ძრავა-გენერატორებისათვის $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$, და X_1, X_2, \dots, X_8 წარმოადგენენ ხარისხის მაჩვენებლებს და ხვდებიან მცირე ფორმებში, რაც საშუალებას იძლევა მოპოვებული ინფორმაცია გავრცელდეს სხვადასხვა სიმძლავრის ძრავა-გენერატორებზე.

3.3. ძრავა-გენერატორის პროექტირება ელექტროტექნიკური მასალების მინიმალური მაჩვენებლებით, გომეტრიული პროგრამირების ხერხების გამოყენებით

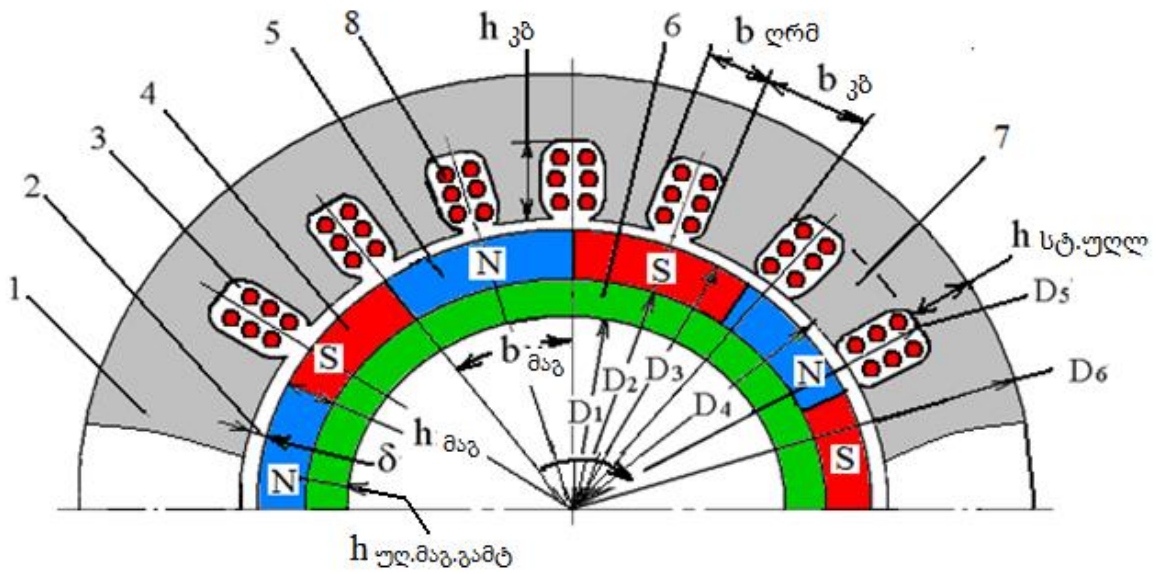
ელექტრომექანიკაში ელექტრომაგნიტური მასალების ქვეშ იგულისხმება მაგნიტოგამტარი, რომელიც შეიძლება იყოს ფურცლოვანი ან მასიური, დენგამტარი ნაწილები, დამზადებულია სპილენძისაგან, ან იშვიათ შემთხვევაში ალუმინისაგან, მუდმივი მაგნიტები – ძირითადად დამზადებულია მეტალოკერამიკისაგან, ან სპეციალური შენადნობებისაგან, საიზოლაციო მასალები, რომლებიც გამოირჩევიან მაღალი დიელექტრიკული შეღწევადობით და პრაქტიკაში გამოიყენებიან, როგორც მყარ, ასევე თხევად მდგომარეობაში .

საიზოლაციო მასალების მასა, რომლებიც გამოიყენება ელექტრომექანიკურ გარდამქმნელების შესაქმნელად, გაცილებით ნაკლებია დენგამტარების, მაგნიტოგამტარების და მაგნიტების მასებთან შედარებით. ამიტომ მათი მასები პროექტირების პროცესში უგულველყოფილია.

დღეისათვის პრაქტიკაში არსებული უამრავი კონსტრუქციებიდან, შეირჩა რგოლისებური მაგნიტი და მასიური რგოლისებური მაგნიტოგამტარი მცირე ნარჩენი მაგნიტიზმით [26].

ასეთი კონსტრუქციის მაგნიტური სისტემა ხასიათდება დიდი საიმედოობით, მარტივი დამზადების ტექნოლოგიით და სიიაფით.

ნახ. 3.1 – ზე მოცემულია გენერატორის მაგნიტური სისტემა.



ნახ. 3.1. ძრავა-გენერატორის ელექტრო-მაგნიტური სისტემა

1-სტატორის მაგნიტოგამტარი; 2-საჰაერო ღრეჩო; 3-ღრმული; 4-როტორის მუდმივი მაგნიტების ჩამაგრების ზონა; 5-რკალის ფორმის მუდმივი მაგნიტი; 6-როტორის მაგნიტოგამტარი; 7-კბილი; 8-სპილენძის მავთულის გრაგნილი

D_1 -მაგნიტოგამტარის დიამეტრი რომელიც დამზადებულია რბილი ელექტრომექანიკური ფოლადისაგან; D_2 -ცილინდრული მაგნიტის შიგა დიამეტრი; D_3 -როტორის გარე დიამეტრი; D_4 -სტატორის შიგა დიამეტრი; D_5 -სტატორის უღლის შიგა დიამეტრი; D_6 -სტატორის გარე დიამეტრი; δ -საჰაერო ღრეჩო

სადაც: D_1, D_2 – ცილინდრული, მასიური მაგნიტოგამტარის შიდა და გარე დიამეტრებია;

D_4, D_6 - სტატორის მაგნიტოგამტარის შიდა და გარე დიამეტრებია;

D_2, D_3 – რგოლისებური მუდმივი მაგნიტის შიდა და გარე დიამეტრებია;

δ – საჰაერო ღრეჩოა;

b_1 ღრმულის, h_1 ღრმულის – სტატორის მაგნიტოგამტარის ღრმულის გეომეტრიული ზომებია;

b_1 კბილის, h_1 კბილის – სტატორის მაგნიტოგამტარის კბილის გეომეტრიული ზომებია;

$b_{2მაგნ}$, $h_{2მაგნ}$, – მუდმივი მაგნიტის პოლუსის ზომებია;

$h_{1ულს}$ და $h_{2ულს}$ – სტატორის და როტორის ულლის სიმაღლეებია შესაბამისად.

ანგარიშის გამარტივების მიზნით მიღებულია შემდეგი დაშვებები:

1. სტატორის მაგნიტოგამტარის მასა შედგება ულლისა და კბილების ჯამური მასისგან;
2. ულლისა და კბილის გეომეტრიული ზომები გასაშუალებულია;
3. სტატორის გრაგნილის მასა წარმოდგენილია ხვეულის საშუალო სიგრძისა და ჯამური ხვიათა რიცხვის ნამრავლის სახით;
4. მაგნიტოგამტარის, მაგნიტის და გრაგნილის შევსების კოეფიციენტები შეირჩევა ცნობარების საშუალებით და რჩება მუდმივი ანგარიშის დამთავრებამდე;

ზემოთ ჩამოთვლილი დაშვებების საფუძველზე შეიძლება დავწეროთ შემდეგი გამოსახულებები:

$$G_1 = h_{1კბილის} \cdot b_{1კბილის} \cdot \ell_1 \cdot z \cdot g_{მაგნ.გამტ} \cdot K_0; \quad (3.29)$$

სადაც G_1 – სტატორის მაგნიტოგამტარის კბილების ჯამური მასაა.

$h_{1კბილის}$, $b_{1კბილის}$, ℓ_1 , z , $g_{მაგნ.გამტ}$, K_0 – იხილე დანართი ცხრილი N 1

ანალოგიური გამარტივების შემდეგ შეიძლება გამოვსახოთ სტატორის გრაგნილის მასა.

$$G_{გრანის} = b_{1დრმულის} \cdot h_{1კბილის} \cdot g_{სპილენძის} \cdot z \cdot K_{დრმულის} \cdot \ell_1 + b_{1დრმულის} \cdot h_{1^2კბილის} \cdot \frac{\pi \cdot z \cdot g_{სპილენძის} \cdot K_{დრმულის}}{p} + \frac{1}{p} \cdot b_{1დრმულის} \cdot h_{1კბილის} \cdot b_{1კბილის} \cdot \pi \cdot z \cdot g_{სპილენძის} \cdot K_{დრმულის} \quad (3.30)$$

$G_{გრანის}$ – სტატორის გრაგნილის მასაა.

მუდმივი სიდიდეები და ცვლადი შემავალი პარამეტრები იხილე დანართი №1 – ში.

მარტივი გარდაქმნების შედეგად გენერატორის სრული ელექტრომაგნიტური მასალების ჯამური მასა მიიღებს პოზინომიალურ სახეს:

$$\begin{aligned}
 \sum G = & h_{1კბილის} \cdot b_{1კბილის} \cdot \ell_1 \cdot z \cdot \text{გმაგნიტო გამტარის} \cdot K_0 + \\
 & + b_{1კბილის} \cdot h_{1უღლის} \cdot \ell_1 \cdot z \cdot \text{გმაგნიტო გამტარის} \cdot K_1 + b_{1ღრმულის} \cdot \\
 & \cdot h_{1უღლის} \cdot \ell_1 \cdot z \cdot \text{გმაგნიტო გამტარის} \cdot K_1 + h_{2მაგნიტის} \cdot b_{2მაგნიტის} \cdot \\
 & \cdot \ell_1 \cdot 2 \cdot p \cdot \text{გმაგნიტის} \cdot K_2 + h_{2მაგნიტის} \cdot h_{2უღლის} \cdot \ell_1 \cdot 2 \cdot p \cdot \text{გმაგნიტის} \cdot \\
 & \cdot K_3 \cdot \frac{1}{\alpha_\delta} + b_{1ღრმულის} \cdot h_{1კბილის} \cdot \ell_1 \cdot z \cdot \text{გსპილენძის} \cdot K_{ღრმულის} + \\
 & + b_{1ღრმულის}^2 \cdot h_{1კბილის} \cdot z \cdot \pi \cdot \text{გსპილენძის} \cdot K_{ღრმულის} \cdot \frac{1}{p} + b_{1ღრმულის} \cdot \\
 & \cdot h_{1კბილის} \cdot b_{1კბილის} \cdot z \cdot \pi \cdot \text{გსპილენძის} \cdot K_{ღრმულის} \cdot \frac{1}{p}; \tag{3.31}
 \end{aligned}$$

გეომეტრიული პროგრამირების მომდევნო ეტაპზე საჭიროა შევადგინოთ ეგრეთ წოდებულია ცვლადი შემავალი პარამეტრების დადებითი მასების მატრიცა. ჩვენს კონკრეტულ შემთხვევაში მატრიცა წარმოადგენს ცვლადი შემავალი პარამეტრების დადებითი მასების შესაბამის წრფით განტოლებათა სისტემას. მაგალითად ოპტიმიზაციის ფუნქციაში ცვლადი შემავალი პარამეტრი $h_{1კბილის}$ შედის პირველ, მეექვსე, მეშვიდე და მერვე შესაკრებ მდგენელში. (ჩვენს კერძო შემთხვევაში ოპტიმიზაციის ფუნქცია შედგება რვა შესაკრები მდგენელისაგან). $h_{1კბილის}$ ცვლადი შემავალი პარამეტრის შესაბამისი წრფივი განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$1 \cdot \delta_1 + 0 \cdot \delta_2 + 0 \cdot \delta_3 + 0 \cdot \delta_4 + 0 \cdot \delta_5 + 1 \cdot \delta_6 + 1 \cdot \delta_7 + 1 \cdot \delta_8 - x_1 \cdot \delta_9 = 0 \tag{3.32}$$

ანალოგიური კანონზომიერებით შეიძლება ჩავწეროთ ნებისმიერი ცვლადი შემავალი პარამეტრის შესაბამისი წრფივი განტოლება. მაგალითისათვის $b_{1\text{დრმულის}}$ წრფივ განტოლებას ექნება შემდეგი სახე:

$$0 \cdot \delta_1 + 0 \cdot \delta_2 + 1 \cdot \delta_3 + 0 \cdot \delta_4 + 0 \cdot \delta_5 + 1 \cdot \delta_6 + 2 \cdot \delta_7 + 1 \cdot \delta_8 - x_2 \cdot \delta_9 = 0 \quad (3.33)$$

საბოლოო ჯამში წრფივი განტოლებათა სისტემა მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\left. \begin{aligned} 1 \cdot \delta_1 + 1 \cdot \delta_2 + 1 \cdot \delta_3 + 1 \cdot \delta_4 + 1 \cdot \delta_5 + 1 \cdot \delta_6 + 1 \cdot \delta_7 + 1 \cdot \delta_8 + 1 \cdot \delta_9 &= 1 \\ 1 \cdot \delta_1 + 0 \cdot \delta_2 + 0 \cdot \delta_3 + 0 \cdot \delta_4 + 0 \cdot \delta_5 + 1 \cdot \delta_6 + 1 \cdot \delta_7 + 1 \cdot \delta_8 - x_1 \cdot \delta_9 &= 0 \\ 0 \cdot \delta_1 + 0 \cdot \delta_2 + 1 \cdot \delta_3 + 0 \cdot \delta_4 + 0 \cdot \delta_5 + 1 \cdot \delta_6 + 2 \cdot \delta_7 + 1 \cdot \delta_8 - x_2 \cdot \delta_9 &= 0 \\ 1 \cdot \delta_1 + 1 \cdot \delta_2 + 0 \cdot \delta_3 + 0 \cdot \delta_4 + 0 \cdot \delta_5 + 0 \cdot \delta_6 + 0 \cdot \delta_7 + 1 \cdot \delta_8 - x_3 \cdot \delta_9 &= 0 \\ 1 \cdot \delta_1 + 1 \cdot \delta_2 + 1 \cdot \delta_3 + 1 \cdot \delta_4 + 1 \cdot \delta_5 + 1 \cdot \delta_6 + 0 \cdot \delta_7 + 0 \cdot \delta_8 - x_4 \cdot \delta_9 &= 0 \\ 0 \cdot \delta_1 + 1 \cdot \delta_2 + 1 \cdot \delta_3 + 0 \cdot \delta_4 + 0 \cdot \delta_5 + 0 \cdot \delta_6 + 0 \cdot \delta_7 + 0 \cdot \delta_8 - x_5 \cdot \delta_9 &= 0 \\ 0 \cdot \delta_1 + 0 \cdot \delta_2 + 0 \cdot \delta_3 + 0 \cdot \delta_4 + 0 \cdot \delta_5 + 0 \cdot \delta_6 + 0 \cdot \delta_7 + 0 \cdot \delta_8 - x_6 \cdot \delta_9 &= 0 \\ 0 \cdot \delta_1 + 0 \cdot \delta_2 + 0 \cdot \delta_3 + 1 \cdot \delta_4 + 0 \cdot \delta_5 + 0 \cdot \delta_6 + 0 \cdot \delta_7 + 0 \cdot \delta_8 - x_7 \cdot \delta_9 &= 0 \\ 0 \cdot \delta_1 + 0 \cdot \delta_2 + 0 \cdot \delta_3 + 1 \cdot \delta_4 + 0 \cdot \delta_5 + 0 \cdot \delta_6 + 0 \cdot \delta_7 + 0 \cdot \delta_8 - x_8 \cdot \delta_9 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.34)$$

გეომეტრიული პროგრამირების თეორიის თანახმად მიზნობრივი ფუნქციის ოპტიმალური მნიშვნელობის შესაკრები მდგენელები ნაწილდებაიან შემდეგი კანონზომიერებით:

$$\left. \begin{aligned} \delta_1 \cdot \sum G_{\text{ოპტ}} &= h_{1\text{კბილის}} \cdot b_{1\text{კბილის}} \cdot \ell_1 \cdot z \cdot \text{გმაგნიტო გამტარის} \cdot K_0 \\ \delta_2 \cdot \sum G_{\text{ოპტ}} &= b_{1\text{კბილის}} \cdot h_{1\text{უღლის}} \cdot \ell_1 \cdot z \cdot \text{გმაგნიტო გამტარის} \cdot K_1 \\ \delta_3 \cdot \sum G_{\text{ოპტ}} &= b_{1\text{დრმულის}} \cdot h_{1\text{უღლის}} \cdot \ell_1 \cdot z \cdot \text{გმაგნიტო გამტარის} \cdot K_1 \\ \delta_4 \cdot \sum G_{\text{ოპტ}} &= h_{2\text{მაგნიტის}} \cdot b_{2\text{მაგნიტის}} \cdot \ell_1 \cdot 2 \cdot p \cdot \text{გმაგნიტის} \cdot K_2 \\ \delta_5 \cdot \sum G_{\text{ოპტ}} &= b_{2\text{მაგნიტის}} \cdot h_{2\text{უღლის}} \cdot \ell_1 \cdot 2 \cdot p \cdot \text{გმაგნიტის} \cdot K_3 \cdot \frac{1}{\alpha_8} \\ \delta_6 \cdot \sum G_{\text{ოპტ}} &= b_{1\text{დრმულის}} \cdot h_{1\text{კბილის}} \cdot \ell_1 \cdot 2 \cdot p \cdot \text{გსპილენძის} \cdot K_{\text{დრმულის}} \\ \delta_7 \cdot \sum G_{\text{ოპტ}} &= b_{1\text{დრმულის}}^2 \cdot h_{1\text{კბილის}} \cdot z \cdot \pi \cdot \text{გსპილენძის} \cdot K_{\text{დრმულის}} \cdot \frac{1}{p} \\ \delta_8 \cdot \sum G_{\text{ოპტ}} &= b_{1\text{დრმულის}} \cdot h_{1\text{კბილის}} \cdot b_{1\text{კბილის}} \cdot z \cdot \pi \cdot \text{გსპილენძის} \cdot K_{\text{დრმულის}} \cdot \frac{1}{p} \end{aligned} \right\} \quad (3.34)$$

რაც შეეხება ოპტიმიზაციის ფუნქციის საძიებელ მნიშვნელობას, გეომეტრიული პროგრესიის მეთოდის თანახმად შეიძლება ჩავწეროთ შემდეგი სახით:

$$\begin{aligned} \sum G_{\text{ოპტ}} = & \left(\frac{h_{1\text{კბილის}} \cdot b_{1\text{კბილის}} \cdot \ell_1 \cdot z \cdot \text{გმაგნიტო გამტარის} \cdot K_0}{\delta_1} \right)^{\delta_1} \cdot \cdot \\ & \left(\frac{b_{1\text{კბილის}} \cdot h_{1\text{უღლის}} \cdot \ell_1 \cdot z \cdot \text{გმაგნიტო გამტარის} \cdot K_1}{\delta_2} \right)^{\delta_2} \cdot \left(\frac{b_{1\text{ღრმულის}} \cdot h_{1\text{უღლის}} \cdot \ell_1 \cdot z \cdot \text{გმაგნიტო გამტარის} \cdot K_1}{\delta_3} \right)^{\delta_3} \cdot \\ & \cdot \left(\frac{h_{2\text{მაგნიტის}} \cdot b_{2\text{მაგნიტის}} \cdot \ell_1 \cdot 2 \cdot p \cdot \text{გმაგნიტის} \cdot K_2}{\delta_4} \right)^{\delta_4} \cdot \\ & \cdot \left(\frac{b_{2\text{მაგნიტის}} \cdot h_{2\text{უღლის}} \cdot \ell_1 \cdot 2 \cdot p \cdot \text{გმაგნიტის} \cdot K_3 \cdot \frac{1}{\alpha_6}}{\delta_5} \right)^{\delta_5} \\ & \cdot \left(\frac{b_{1\text{ღრმულის}} \cdot h_{1\text{კბილის}} \cdot \ell_1 \cdot z \cdot \text{გსპილენძის} \cdot K_{\text{ღრმულის}}}{\delta_6} \right)^{\delta_6} \cdot \\ & \cdot \left(\frac{b_{1\text{ღრმულის}}^2 \cdot h_{1\text{კბილის}} \cdot z \cdot \pi \cdot \text{გსპილენძის} \cdot K_{\text{ღრმულის}} \cdot \frac{1}{p}}{\delta_7} \right)^{\delta_7} \cdot \\ & \cdot \left(\frac{b_{1\text{ღრმულის}} \cdot h_{1\text{კბილის}} \cdot b_{1\text{კბილის}} \cdot z \cdot \pi \cdot \text{გსპილენძის} \cdot K_{\text{ღრმულის}} \cdot \frac{1}{p}}{\delta_8} \right)^{\delta_8} \cdot (\delta_9)^{\delta_9} \quad (3.35) \end{aligned}$$

თუ $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_8$ გეომეტრიული პროგრამირების თეორიაში იწოდებიან დადებით მასებად და რიცხობრივად გვიჩვენებენ ოპტიმიზაციის ფუნქციის შესაკრებთა წილობით სიდიდეებს, δ_9 – შეესაბამება მიზნობრივი შემზღუდავი ფუნქციის დადებით მასას.

მიზნობრივი შემზღუდავი ფუნქცია წარმოადგენს პოზინომს, რომელიც გამოისახება ცვლადი შემავალი პარამეტრების და ხარისხის მაჩვენებლების საშუალებით, კერძოდ:

$$\prod_{\text{შემზღუდავი}} = h_{1\text{კბილის}}^{x_1} \cdot b_{1\text{ღრმულის}}^{x_2} \cdot b_{1\text{კბილის}}^{x_3} \cdot \ell_1^{x_4} \cdot h_{1\text{ულის}}^{x_5} \cdot h_{2\text{ულის}}^{x_6} \cdot b_{2\text{მაგნიტის}}^{x_7} \cdot h_{2\text{მაგნიტის}}^{x_8} \quad (3.36)$$

x_1, x_2, \dots, x_8 წარმოადგენენ ცვლადი შემავალი პარამეტრების ხარისხის მაჩვენებლებს. მათი საშუალებით მყარდება ცალსახა კავშირი პროექტირების პარამეტრებს შორის ხარისხის მაჩვენებლის განსხვავებული კომბინაციები ქმნიან გამოსავალი პარამეტრების სხვადასხვა ვარიანტებს და შესაბამის ოპტიმიზაციის ფუნქციის რიცხვით კონკრეტულ მნიშვნელობას.

x_1, x_2, \dots, x_8 ფუნქციონალურ კავშირში იმყოფებიან პროექტირების ჩვენთვის სასურველ გამოსავალ პარამეტრებთან, როგორცაა მარგი ქმედების კოეფიციენტი, სიმძლავრის კოეფიციენტი, გადახურების ტემპერატურა, მუშაობის ხანგრძლიობა და ა. შ.

გამოსახულების ხელსაყრელი წარმოსახვის მიზნით შემოვიღოთ შემდეგი აღნიშვნები:

$$\begin{aligned} b_1 &= \ln\left(\delta_1 \cdot \sum G_{\text{ოპტ}}\right) - \ln(z \cdot \text{გმაგნიტო გამტარის} \cdot K_0); \\ b_2 &= \ln\left(\delta_2 \cdot \sum G_{\text{ოპტ}}\right) - \ln(z \cdot \text{გმაგნიტო გამტარის} \cdot K_1); \\ b_3 &= \ln\left(\delta_3 \cdot \sum G_{\text{ოპტ}}\right) - \ln(z \cdot \text{გმაგნიტო გამტარის} \cdot K_1); \\ b_4 &= \ln(\delta_4 \cdot \sum G_{\text{ოპტ}}) - \ln(2 \cdot p \cdot \text{გმაგნიტის} \cdot K_2); \\ b_5 &= \ln\left(\delta_5 \cdot \sum G_{\text{ოპტ}}\right) - \ln\left(2 \cdot p \cdot \text{გმაგნიტის} \cdot K_3 \cdot \frac{1}{\alpha_\delta}\right); \\ b_6 &= \ln\left(\delta_6 \cdot \sum G_{\text{ოპტ}}\right) - \ln(z \cdot \text{გსპილენძის} \cdot K_{\text{ღრმულის}}); \\ b_7 &= \ln(\delta_7 \cdot \sum G_{\text{ოპტ}}) - \ln\left(z \cdot \pi \cdot \text{გსპილენძის} \cdot K_{\text{ღრმულის}} \cdot \frac{1}{p}\right); \\ b_8 &= \ln\left(\delta_8 \cdot \sum G_{\text{ოპტ}}\right) - \ln\left(z \cdot \pi \cdot \text{გსპილენძის} \cdot K_{\text{ღრმულის}} \cdot \frac{1}{p}\right); \end{aligned} \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned}
z_1 &= \ln h_{1\text{კბილის}}; z_2 = \ln b_{1\text{ღრმულის}}; z_3 = \ln b_{1\text{კბილის}}; \\
z_4 &= \ln \ell_1; z_5 = \ln h_{1\text{უღლის}}; z_6 = \ln b_{2\text{მაგნიტის}}; \\
z_7 &= \ln h_{2\text{მაგნიტის}}; z_8 = \ln h_{2\text{უღლის}}.
\end{aligned} \tag{3.38}$$

ბოლო განტოლებათა გალოგარიტმების შედეგად შეიძლება ჩავწეროთ ცვლადი შემავალი პარამეტრების ხარისხის მაჩვენებლების წრფივი განტოლებათა სისტემა:

$$\left. \begin{aligned}
b_1 &= 1 \cdot z_1 + 0 \cdot z_2 + 1 \cdot z_3 + 1 \cdot z_4 + 0 \cdot z_5 + 0 \cdot z_6 + 0 \cdot z_7 + 0 \cdot z_8; \\
b_2 &= 0 \cdot z_1 + 0 \cdot z_2 + 1 \cdot z_3 + 1 \cdot z_4 + 1 \cdot z_5 + 0 \cdot z_6 + 0 \cdot z_7 + 0 \cdot z_8; \\
b_3 &= 0 \cdot z_1 + 1 \cdot z_2 + 0 \cdot z_3 + 1 \cdot z_4 + 0 \cdot z_5 + 0 \cdot z_6 + 0 \cdot z_7 + 0 \cdot z_8; \\
b_4 &= 0 \cdot z_1 + 0 \cdot z_2 + 0 \cdot z_3 + 0 \cdot z_4 + 0 \cdot z_5 + 1 \cdot z_6 + 1 \cdot z_7 + 0 \cdot z_8; \\
b_5 &= 0 \cdot z_1 + 1 \cdot z_2 + 0 \cdot z_3 + 1 \cdot z_4 + 0 \cdot z_5 + 0 \cdot z_6 + 0 \cdot z_7 + 1 \cdot z_8; \\
b_6 &= 1 \cdot z_1 + 1 \cdot z_2 + 0 \cdot z_3 + 1 \cdot z_4 + 0 \cdot z_5 + 0 \cdot z_6 + 0 \cdot z_7 + 0 \cdot z_8; \\
b_7 &= 1 \cdot z_1 + 2 \cdot z_2 + 0 \cdot z_3 + 0 \cdot z_4 + 0 \cdot z_5 + 0 \cdot z_6 + 0 \cdot z_7 + 0 \cdot z_8; \\
b_8 &= 1 \cdot z_1 + 1 \cdot z_2 + 1 \cdot z_3 + 0 \cdot z_4 + 0 \cdot z_5 + 0 \cdot z_6 + 0 \cdot z_7 + 0 \cdot z_8;
\end{aligned} \right\} \tag{3.39}$$

ოპტიმალური გეომეტრიული ზომების ძიების დამასრულებელი ეტაპია z_1, z_2, \dots, z_8 ხარისხის მაჩვენებლების პოვნა, კერძოდ წრფივი განტოლებათა სისტემის ამოხსნის ანგარიში.

(3.39) განტოლებათა სისტემიდან გამომდინარე საპროექტო გეომეტრიული ზომების ოპტიმალური მნიშვნელობები მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\left. \begin{aligned}
h_{1\text{კბილის}} &= e^{z_1}; b_{1\text{ღრმულის}} = e^{z_2}; b_{1\text{კბილის}} = e^{z_3}; \ell_1 = e^{z_4}; \\
h_{1\text{უღლის}} &= e^{z_5}; b_{2\text{მაგნიტის}} = e^{z_6}; h_{2\text{მაგნიტის}} = e^{z_7}; h_{2\text{უღლის}} = e^{z_8};
\end{aligned} \right\} \tag{3.40}$$

თავი IV. ექსპერიმენტული მონაცემების დამუშავება კომპიუტერული სისტემა Matlab/Simulink-ის საშუალებით

სხვადასხვა ობიექტების კვლევის ერთერთი მნიშვნელოვანი ეტაპია ექსპერიმენტული მონაცემების აპროქსიმაცია რაიმე გლუვი ფუნქციით. ეს ამოცანა დაიყვანება ექსპერიმენტიდან მიღებული მონაცემების საფუძველზე მოდელის პარამეტრების ისეთი მნიშვნელობების შერჩევაზე, როდესაც რეალური და მოდელის გამოსასვლელი სიდიდეები რაიმე კრიტერიუმით საუკეთესოთ უახლოვდებიან ერთმანეთს. მოდელის სახეც და მიახლოების კრიტერიუმიც შეირჩევა კონკრეტული ამოცანიდან გამომდინარე, დამოკიდებულია გამოსაკვლევი ობიექტის ან პროცესის თვისებებზე, ამოცანის მიზანზე და ა.შ.

დავუშვათ, რომ ზოგადად მოცემული y ცვლადი დამოკიდებულია x ცვლადზე რაიმე ფუნქციით: $y = f(x, a, b, c)$, სადაც a, b, c არის პარამეტრები, რომელთა განსაზღვრა არის საჭირო. ძრავა - გენერატორის ოპტიმალური პროექტირების შემთხვევაში y ცვლადი ფუნქციის როლში გამოდის ისეთი მახასიათებლები როგორცაა ელექტრომაგნიტური მასალების მასები, აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების დანაკარგები, დენგამტარი მილებისა და მაგნიტოგამტარების გადახურების ტემპერატურები, ძრავა - გენერატორის ძრავას რეჟიმის ნომინალური, მაქსიმალური და გამშვები მომენტები, გენერატორული რეჟიმის გადატვირთვის უნარიანობა, ნაკეთობის ფასი და სხვა.

რაც შეეხება X ცვლად დამოუკიდებელ სიდიდეებს, ისინი თვისობრივად განსხვავებულ პარამეტრებს წარმოადგენენ. ასე მაგალითად ძრავა - გენერატორის გეომეტრიული ზომები, როგორცაა საკბილო და საპოლუსო დანაყოფი, კბილისა და ღრმულის აბსოლუტური ზომები და ფორმა, მაგნიტოგამტარის უღელი, სიგრძე, შიდა

დიამეტრი და ა.შ. ბუნებით (თვისობრივად) აბსოლუტურად განსხვავდებიან ელექტრომაგნიტური პარამეტრებისაგან, როგორცაა ხაზოვანი დატვირთვა, დენგამტარი ნაწილების დენის სიმკვრივე, მაგნიტოგამტარის დასაშვები მაგნიტური ინდუქციები ცალკეულ უბნებზე, საჰაერო ღრეჩოს სიდიდე, ფორმა და ა.შ. თუმცა ზემოთ ჩამოთვლილი დამოუკიდებელი ცვლადი სიდიდეები არანაკლებ ზეგავლენას ახდენენ ძრავა - გენერატორის პროექტირების გამოსავალი ფუნქციების სიდიდეზე.

ტარდება ექსპერიმენტი, რომელშიც დამოუკიდებელ x ცვლადს ანიჭებენ გარკვეულ მნიშვნელობებს შესაძლო არიდან და აფიქსირებენ დამოკიდებულ y ცვლადის შესაბამის მნიშვნელობებს. ძრავა-გენერატორის ოპტიმალური პროექტირების პროგრამა ითვალისწინებს ექსპერიმენტის ჩატარების ფართო სპექტრს, კერძოდ შეიძლება ვცვალოთ შემავალი პარამეტრების რაოდენობა, მათი ცვლილების ინტერვალი, ცვლილების ბიჯი. ექსპერიმენტი ჩატარებულია [ადლერი. „ექსპერიმენტის დაგეგმა“] ლიტერატურის მიხედვით. ოპტიმალური პროექტირების დროს გადაწყვეტი მნიშვნელობა ენიჭება ექსპერიმენტის დაგეგმის თეორიულ ნაწილს. ექსპერიმენტის დაგეგმა მოიცავს ეგრეთწოდებული ბაზისური სიდიდეების სწორ მიკვლევას და შერჩევას. ბაზისური სიდიდეებიდან ცვლილების ინტერვალების მიზანშეწონილ აბსოლუტური სიდიდეების დადგენას, ცვლადი სიდიდეების ცვლილების ბიჯის შერჩევას და სხვა. ყველა ზემოთჩამოთვლილი სიდიდეები ატარებენ ერთიმეორისაგან განსხვავებულ, სპეციფიკურ ხასიათს. ამიტომ მათ შერჩევაზეა დამოკიდებული ექსპერიმენტის დადებითი ან უარყოფითი შედეგი. თუ რომელიმე მათგანი არასწორედ იქნება შერჩეული, ცვლადი ფუნქცია განიცდის წყვეტას და პასუხი ცალსახად იქნება განუსაზღვრელი და უარყოფითი. ასე, მაგალითად თუ არასწორედ შევირჩევთ მაგნიტოგამტარის კბილის სიგანის ბაზურ სიდიდეს, ან ცვლილების ინტერვალს, დადგება მაგნიტოგამტარის გაჟღენთვის მომენტი და აუცილებელი დამამაგნიტებელი ძალის (ამპერხვევების) სიდიდე გადაინაცვლებს განუსაზღვრელობაში (უსასრულოდ გაიზრდება). ექსპერიმენტის შედეგად მიიღება ამ ცვლადების მნიშვნელობების წყვილების სიმრავლე: (x_i, y_i) , სადაც $i = 1, \dots, N$, ხოლო N არის ექსპერიმენტების რაოდენობა. მიღებული ინფორმაციიდან ხდება a, b, c კოეფიციენტის მნიშვნელობების

მიება, ისე, რომ უზრუნველყოფილი იყოს მონაცემების f -ფუნქციით აღწერის სასურველი სიზუსტე. ყველაზე ხშირად გამოიყენება აღწერის ერთერთი საუკეთესო საშუალება - უმცირესი კვადრატების მეთოდი. მნიშვნელოვანია აგრეთვე, ამ ამოცანის გადასაწყვეტად საუკეთესო პროგრამული უზრუნველყოფის შერჩევა, რომელიც მოგვცემს საშუალებას გადაწყდეს აპროქსიმაციის ამოცანა საუკეთესო სიზუსტით, მოკლე დროის და ნაკლები შრომის დანახარჯებით. ნაშრომში გამოყენებულია მსოფლიოში ფართოდ გავრცელებული კომპიუტერული მოდელებების პროგრამული სისტემა Matlab/Somulink-ი.

4.1. უმცირესი კვადრატების მეთოდი.

უმცირესი კვადრატების მეთოდი წარმოადგენს სტატისტიკურ მეთოდს, რომლის დროს მოდელის პარამეტრების უცნობი მნიშვნელობები განისაზღვრება ნამდვილი (ემპირიული) და თეორიული მნიშვნელობების გადახრების კვადრატების ჯამის მინიმიზაციით.

განვიხილოთ ერთი არგუმენტის წრფივი ფუნქცია. დავუშვათ არის მოცემული ექსპერიმენტიდან მიღებული n წერტილი: $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$. მოდელი არის წრფივი: $y = ax + b$. ამოცანა მდგომარეობს ისეთი წრფის მონახვაში, რომელიც საუკეთესოდ დაემთხვევა მოცემულ წერტილებს. შემოვიტანოთ აღნიშვნა:

$$\delta_i = y_i - ax_i - b \quad (4.1)$$

რაც უფრო ნაკლებია δ_i სიდიდე, მით უფრო ზისტად არის შერჩეული სამოებელი კოეფიციენტები, ანუ წრფე. სიზუსტის შეფასებისათვის ავიღოთ შემდეგი სიდიდე:

$$S = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 \quad (4.2)$$

თუ (4.1) ჩავსვათ (4.2)-ში, მივიღებთ ფუნქციას, რომელიც დამოკიდებულია a და b კოეფიციენტებზე:

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 \quad (4.3)$$

ამ ფუნქციის მინიმუმის პირობიდან მიიღება განტოლებთა სისტემა:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n y_i x_i = a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n y_i = a \sum_{i=1}^n x_i + nb \end{cases} \quad (4.4)$$

მე-4 სისტემიდან შესაძლებელია x_i და y_i მონაცემებით a და b კოეფიციენტების მნიშვნელობების პოვნა. მიღებული წრფე $y = ax + b$ წარმოადგენს მოდელს, მიღებულს უმცირესი კვადრატების მეთოდით. პროექტირების პროცესში ნებისმიერ აპრიორულ ინფორმაციას აქვს თავისი დატვირთვა. ამ მხრივ გამოსავალი საძიებო ფუნქციებსა და შემავალ ცვლად სიდიდეებს შორის დამოკიდებულების გრაფიკები წარმოადგენს ღირებულ ინფორმაციას.

ბაზური სიდიდეების აბსოლუტური მნიშვნელობებისა და ცვლილების ზღვრების დადგენის დროს აუცილებელია ვიცოდეთ მათი დამოკიდებულების გრაფიკი. ასე მაგალითად, მარგი ქმედების კოეფიციენტი როგორ ფუნქციონალურ დამოკიდებულებაშია მაგნიტოგამტარის ზომებთან, შიდა დიამეტრთან, სიგრძესთან, კბილის ან ღრმულის სიმაღლესთან, მაგნიტურ ინდუქციასთან საჰაერო ღრეჩოში, დენგამტარ ნაწილების სიმკვრივესთან და ა.შ. ასეთი მრუდების ცოდნა ამარტივებს პროექტირების ამოცანას და იძლევა გარკვეულ ორიენტაციას ოპტიმალური ვარიანტის მისაკვლევად.

4.2. უმცირესი კვადრატების მეთოდის გამოყენება ერთგანზომილებიანი და მრავალგანზომილებიანი რეგრესიული ანალიზის დროს

რეგრესიული ანალიზი შეისწავლის ერთი ან რამოდენიმე დამოუკიდებელი x_i ცვლადების გავლენას დამოკიდებულ y ცვლადზე. ფუნქციური კავშირი დამოკიდებულ და დამოუკიდებელ ცვლადებს შორის შესაძლებელია აღიწეროს გარკვეული განტოლებით, რომელსაც რეგრესიის განტოლება ეწოდება. ყველაზე ხშირად პრაქტიკაში წრფივი რეგრესია გვხვდება ანუ დამოკიდებულება მოცემულია წრფივი ფუნქციით:

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + b, \quad (4.5)$$

რომელშიც კოეფიციენტები b, a_1, a_2, \dots, a_n მოიძებნება უმცირესი კვადრატების მეთოდის გამოყენებით. მათემატიკური მეთოდი, რომელიც დაფუძნებულია საძიებელი ცვლადების შემცველი გარკვეული ფუნქციების კვადრატების მინიმიზაციაზე. ამ მეთოდს დიდი გამოყენება აქვს რეგრესიულ ანალიზში და ფაქტიურად წარმოადგენს საბაზისო მეთოდს. კერძოდ, წრფივი რეგრესიის განტოლებაში უცნობი კოეფიციენტების შეფასება ხდება უმცირეს კვადრატთა მეთოდით. ვთქვათ, ამხსნელი ცვლადის (პრედიქტორის) და დამოკიდებული ცვლადის დაკვირვებულ მნიშვნელობათა წყვილებია:

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$$

როგორც უკვე აღწერილია, წრფივი რეგრესიისას ვეძებთ ისეთ $y = ax + b$ წრფეს, რომელშიც X -ის დაკვირვებული მნიშვნელობების შეტანის შემდეგ, Y -ის შესაბამისი მნიშვნელობებიდან გადახრების კვადრატების ჯამი მინიმალურია:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 \rightarrow \min \quad (4.6)$$

აქ საძიებელი ცვლადებია a და b კოეფიციენტები, რომლებისთვისაც ვიღებთ:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (4.7)$$

ნაშრომში ჩვენი მიზანია მრავალგანზომილებიანი რეგრესიის ანალიზის ჩატარება. უმცირესი კვადრატების მეთოდი გამოიყენება ამ შემთხვევაშიც. გამოთვლების მოცულება იზრდება, ამიტომ საჭიროა კომპიუტერული პროგრამების გამოყენება. მრავალგანზომილებიანი რეგრესიის მოდელი აღიწერება (4.5) გამოსახულებით. მასში შემევალი უცნობი კოეფიციენტები განისაზღვრება უმცირესი კვადრატების მინიმუმის მეთოდით.

4.3. კომპიუტერული სისტემა Matlab-ის მოკლე აღწერა

სისტემა Matlab-ი უნივერსალური ინტერაქტიული სისტემაა, რომელიც შეიცავს დიალოგის, გამოთვლების, გრაფიკის და ვიზუალიზაციის მძლავრ საშუალებებს. იგი გათვალისწინებულია ამოცანათა ფართო კლასის ამოხსნისათვის თითქმის ყველა დარგში. მონაცემების შეტანა ხდება უნივერსალური მატრიცული ფორმის საშუალებით [27], [28], [29], [30].

სისტემის შემავალი ენა წარმოადგენს მაღალი დონის ენას ტექნიკური გამოთვლებისათვის. სისტემა შეიცავს გამოყენებითი პროგრამების პაკეტების დიდ რაოდენობას.

სისტემის მნიშვნელოვან თვისებას წარმოადგენს გაფართოების უნარი. შესაძლებელია დაემატოს ახალი ფუნქციები, ბრძანებები, გამოყენებითი პროგრამები, რომელთა მოხმარება ისეთივე მარტივია, როგორც სისტემის ძირითად ბირთვში შემავალი ფუნქციების.

ბრძანებების და ფუნქციების უმრავლესობა რეალიზებულია როგორც m-გაფართოების ტექსტური ფაილები, რომელთა მოდიფიკაცია შესაძლებელია. ოპერატორების და ფუნქციების სიმრავლე საშუალებას იძლევა მარტივად გადაწყდეს მრავალი პრაქტიკული ამოცანა, რომელთა გადასაწყვეტად საჭირო იქნებოდა რთული პროგრამების დაწერა ნებისმიერ დაპროგრამების ენაზე. სისტემა Matlab არა მარტო აადვილებს საქმეს, არამედ ზოგავს დროსაც, რადგანაც ცნობილია, რა შრომატევადი და ხანგრძლივი არის პროგრამების წერა და მათი გამართვა. უნდა აღინიშნოს, რომ სისტემის ენის სიმარტივის გამო, მომხმარებელს არ სჭირდება პრაქტიკულად პროგრამირების ცოდნა, მეორე მხრივ, სისტემის ენა მძლავრი მათემატიკურ-ორიენტირებული მაღალი დონის პროგრამირების ენაა, რომელიც მათემატიკური გამოთვლების პროგრამირებისათვის უფრო მდიდარია, ვიდრე ნებისმიერი სხვა უნივერსალური მაღალი დონის პროგრამირების ენა. სისტემა Matlab/Simulink-ში რეალიზებულია თითქმის ყველა ცნობილი პროგრამირების საშუალება, მათ შორის ვიზუალური პროგრამირება (Simulink).

Matlab/Simulink-ის ერთერთი დადებითი თვისება არის მისი მძლავრი გრაფიკა, დაწყებული ერთცვლადიანი ფუნქციების მარტივი გრაფიკებიდან დამთავრებული

კომბინირებული და პრეზენტაციური, 2D და 3D გრაფიკებით, ანიმაციის ელემენტებით. სისტემის საშუალებით შეიძლება რთული ზედაპირების და ფიგურების აგება ფუნქციონალური გაფერადებით, სინათლის სხვადასხვა ეფექტით: ზედაპირის განათება სხვადასხვა ადგილას მოთავსებული სინათლის წყაროდან. ფიგურები შეიძლება იყოს გამჭვირვალე, შეიძლება გაკეთდეს მათი პროექციები სიბრტყეზე, შეიძლება მათი შემობრუნება.

სისტემაში არის მომხმარებლის ინტერფეისის ტიპური ელემენტების შექმნის საშუალება: ღილაკები, მენიუები, ინფორმაციული და ინსტრუმენტების პანელები და სხვა. ერთ გრაფიკულ ფანჯარაში შეიძლება ერთდროულად სასრული რაოდენობის გრაფიკების გამოტანა ან ერთი ფანჯრის რამოდენიმე ქვეფანჯრებად დაყოფა.

სისტემას გააჩნია დახმარების (Help) მძლავრი ინფორმაციული სისტემა, როგორც ინტერაქტიულ რეჟიმში, ისე ჰიპერტექსტური ფურცლების ფორმით, რიმელთა დათვალიერება შეიძლება დახმარების ბრაუზერის საშუალებით.

სისტემაში შემავალი პაკეტებს შორის არის პროგრამული პაკეტი Statistika, რომელიც იძლევა მონაცემების სტატისტიკური დამუშავების საშუალებას.

4.4. უმცირესი კვადრატების მეთოდის რეალიზაცია სისტემა Matlab-ში.

განვიხილოთ უმცირესი კვადრატების მეთოდის საფუძველზე მრავალგანზომილებიანი რეგრესიის ანალიზის ჩატარება სისტემა Matlab-ში. რეგრესიის მოდელების მისაღებად სისტემაში გამოიყენება ფუნქცია:

$$a = \text{regress}(y, X),$$

სადაც y არის დამოკიდებული ცვლადის მნიშვნელობები; X -დამოუკიდებელი ცვლადების მნიშვნელობათა მატრიცა; a - რეგრესიის მოდელის კოეფიციენტებია. მოდელის აგება ხორციელდება უმცირესი კვადრატების მეთოდის საშუალებით.

ძრავა-გენერატორის გენერატორული რეჟიმის შემავალი და საანგარიშო (ოპტიმალური) პარამეტრები მოცემულია ცხრილში 4.1

№	აღნიშვნა	დასახელება	საზომი ერთეული	აღნიშვნა პროგრამირების ენაზე	წარმომავლობა
1	2	3	4	5	6
1	P	ნომინალური სიმძლავრე	კვტ	P	მოცემულია
2	u	ნომინალური ფაზური ძაბვა	ვოლტი	u	მოცემულია
3	m ₁	სტარტერის გრაგნილის ფაზათა რაოდენობა	-	m ₁	მოცემულია
4	n ₁	ბრუნვათა რიცხვი	ბრუნი/წთ	n ₁	მოცემულია
5	a ₁	პარალელურ შტოთა რიცხვი	-	a ₁	მოცემულია
6	q ₁	ღრმულთა რიცხვი ფაზაზე და პოლუსზე	-	q ₁	შეირჩევა
7	D _{1შიდა}	სტატორის მაგნიტოგამტარის შიდა დიამეტრი	სმ	D _{1შიდა}	ცვლადი შემავალი პარამეტრი
8	δ	სტატორის დენგამტარის დენის სიმკვრივე	ამპერი/მმ ²	δ	ცვლადი შემავალი პარამეტრი

9	B_{δ}	მაგნიტური ინდუქცია სააერო ღრეჩოში	ტესლა	B_{δ}	ცვლადი შემავალი პარამეტრი
10	$A_{1სტატ}$	სტატორის გრაგნილის ხაზოვანი დატვირთვა	ამპერი/სმ	$A_{1სტატ}$	ცვლადი შემავალი პარამეტრი
11	f_1	გენერატორის სიხშირე	ჰერცი	f_1	მოცემულია
12	δ	საჰაერო ღრეჩო	მმ	δ	ცვლადი პარამეტრი
13	$K_{1უღელი}$	სტატორის მაგნიტოგა- მტარის უღლის გაჟღე- ნთვის კოეფიციენტი	-	$K_{1უღელი}$	ცვლადი პარამეტრი
14	$K_{1სტატ}$	სტატორის მაგნიტოგა- მტარის კბილის გაჟღე- ნთვის კოეფიციენტი	-	$K_{1სტატ}$	ცვლადი პარამეტრი
15	$B_{2უღლის}$	როტორის მაგნიტოგა- მტარის უღლის მაგნიტური ინდუქცია	ტესლა	$B_{2უღლის}$	ცვლადი პარამეტრი
16	α_{δ}	საპოლუსო დანაყოფის საანგარიშო გადაფა- რვის კოეფიციენტი	-	α_{δ}	ცვლადი პარამეტრი
17	K_0	სტატორის მაგნიტოგა- მტარის კბილის შევსების კოეფიციენტი	-	K_0	შეირჩევა ცნობარი-დან

18	K ₁	სტატორის მაგნიტოგამტარის უღლის შვესების კოეფიციენტი	-	K ₁	შეირჩევა ცნობარიდან
19	K ₂	მუდმივი მაგნიტის შვესების კოეფიციენტი	-	K ₂	შეირჩევა ცნობარიდან
20	K ₃	როტორის მაგნიტოგამტარის უღლის შვესების კოეფიციენტი	-	K ₃	შეირჩევა ცნობარიდან
21	K _{დრმულ}	სტატორის დრმულის შვესების კოეფიციენტი	-	K _{დრმულ}	შეირჩევა ცნობარიდან იანგარიშება
22	g _{სპილენძის}	სპილენძის კუთრ წონა	ტონა/მ ³	g _{სპილენძის}	შეირჩევა ცნობარიდან
23	g _{მაგნიტამტ}	მაგნიტოგამტარის კუთრი წონა	ტონა/მ ³	g _{მაგნიტამტ}	შეირჩევა ცნობარიდან
24	g _{მაგნიტის}	მაგნიტის კუთრ წონა	ტონა/მ ³	g _{მაგნიტის}	შეირჩევა ცნობარიდან
25	P _{მაგნიტოგამტარის}	მაგნიტოგამტარის კუთრი დანაკარგები	ვატი/კვ	P _{მაგნიტოგამტარის}	შეირჩევა ცნობარიდან
26	C _{მაგნიტოგამტარი}	1 კვ მაგნიტოგამტარის ფასი	ლარი	C _{მაგნიტოგამტარი}	სტანდარტი
27	C _{მაგნიტის}	1 კვ მაგნიტის ფასი	ლარი	C _{მაგნიტის}	სტანდარტი

28	სპილენძის	1 კგ დენგამტარი სპილენძის ხვეულის ფასი	ლარი	სპილენძის	სტანდარტი
29	H _{მაგნიტის}	მაგნიტის მაგნიტური ველის დამაბულობა მუშა უბანზე	ამპერი/სმ	H _{მაგნიტის}	საანგარიშო
30	B _{მაგნიტის}	მაგნიტის მაგნიტური ინდუქცია მუშა უბანზე	ტესლა	B _{მაგნიტის}	საანგარიშო
31	P	წყვილი პოლუმების რიცხვი (3)	-	P	იანგარიშება
32	τ_1	სტატორის საპოლუსე დანაყოფი	სმ	tau1	იანგარიშება
33	q ₁	სტატორის ღრმულთა რიცხვი პოლუსზე და ფაზაზე	-	q ₁	შეირჩევა აპრიორული ცნობების საფუძველზე
34	Z	სტატორის მაგნიტოგამტარის ღრმულთა რიცხვი	-	Z	იანგარიშება
35	t _{1კბილის}	სტატორის მაგნიტოგამტარის საკბილო დანაყოფი	სმ	t _{1kb}	იანგარიშება
36	I _{1ნომ}	გენერატორის ნომინალური ფაზური დენი	ამპერი	I _{1nom}	იანგარიშება

37	W ₁ ღრმული	გენერატორის სტატორის გრაგნილის ღრმულის ეფექტური ხვიათა რიცხვი	-	W _{1gr}	იანგარიშება
38	S ₁ სტატ	სტატორის გრაგნილის განივიკვეთის ფართი	მმ ²	S _{1Stat}	იანგარიშება
39	d	სტატორის გრაგნილის დიამეტრი	მმ	d	იანგარიშება შეირჩევა სტანდარტით
40	W ₁ ვაზის	სტატორის გრაგნილის ვაზის ეფექტური ხვიათა რიცხვი	-	W _{1fz}	იანგარიშება
41	ℓ ₁	გენერატორის სტატორის მაგნიტოგამტარის სიგრძე	სმ	L ₁	იანგარიშება
42	ΣS ₁ სტატ	სტატორის ხვეულის მიერ დაკავებული განივი კვეთის ფართობი	მმ ²	SumS _{1stat}	იანგარიშება
43	b ₁ ღრმული	სტატორის ღრმულის სიგანე	სმ	b _{1grm}	იანგარიშება
44	b ₁ კბილის	სტატორის კბილის სიგანე	სმ	b _{1kb}	იანგარიშება
45	h ₁ ღრმული	სტატორის ღრმულის სიმაღლე	სმ	h _{1grm}	იანგარიშება

46	$h_{1კბილის}$	სტატორის კბილის სიმაღლე	სმ	h_{1kb}	იანგარიშება
47	$h_{1უღლის}$	სტატორის უღლის სიმაღლე	სმ	h_{1ugl}	იანგარიშება
48	$D_{1გარე}$	სტატორის გარე დიამეტრი	სმ	D_{1gare}	იანგარიშება
49	$ℓ_{1უღლის}$	სტატორის უღლის საშუალო სიგრძე	სმ	$ℓ_{1uglis}$	იანგარიშება
50	τ_2	როტორის საპოლუსე დანაყოფი	სმ	τ_{au2}	იანგარიშება
51	$b_{2მაგნიტის}$	მაგნიტის პოლუსის ხაზოვანი სიდიდე	სმ	b_{2mag}	იანგარიშება
52	$B_{1კბილის}$	სტატორის კბილის მაგნიტური ინდუქცია	ტესლა	B_{1kb}	იანგარიშება
53	$B_{1უღლის}$	სტატორის უღლის მაგნიტური ინდუქცია	ტესლა	B_{1ugl}	იანგარიშება
54	H_{δ}	საჰაერო ღრეჩოს მაგნიტური ველის დაძაბულობა	ამპერი/სმ	H_{delta}	იანგარიშება
55	$h_{2უღლის}$	მაგნიტური პოლუსის უღლის სიმაღლე	სმ	h_{2ugl}	იანგარიშება
56	$H_{2უღლის}$	მაგნიტის უღლის მაგნიტური ველის დაძაბულობა	ამპერი/სმ	H_{2ugl}	იანგარიშება

57	$H_{1\text{კბილის}}$	სტატორის კბილის მაგნიტური ველის დამაბულობა	ამპერი/სმ	$H_{1\text{kb}}$	იანგარიშება
58	$H_{1\text{უღლის}}$	სტატორის უღლის მაგნიტური ველის დსამაბულობა	ამპერი/სმ	$H_{1\text{ugl}}$	იანგარიშება
59	F_{δ}	საჰაერო ღრეჩოს დამამაგნიტებელი ძალა	ამპერი	F_{delta}	იანგარიშება
60	$F_{1\text{კბილის}}$	სტატორის კბილის დამამაგნიტებელი ძალა	ამპერი	$F_{1\text{kb}}$	იანგარიშება
61	$F_{1\text{უღლის}}$	სტატორის უღლის დამამაგნიტებელი ძალა	ამპერი	$F_{1\text{ugl}}$	იანგარიშება
62	ΣF	მაგნიტური წრედის ჯამური დამამაგნიტე- ბელი ძალა	ამპერი	SumF	იანგარიშება
63	$h_{2\text{მაგნ}}$	მაგნიტის საანგარიშო სიმაღლე	სმ	$h_{2\text{mag}}$	იანგარიშება
64	$g_{1\text{კბილის}}$	სტატორის მაგნიტოგა- მტარის კბილების ჯამური მასა	კგ	$g_{1\text{kb}}$	იანგარიშება

65	$g_{1უღლის}$	სტატორის მაგნიტოგამტარის უღლის ჯამური მასა	კგ	g_{1ugl}	იანგარიშება
66	$g_{2მაგნიტის}$	მაგნიტის მასა	კგ	g_{2mag}	იანგარიშება
67	$g_{2უღლის}$	როტორის უღლის ჯამური მასა	კგ	g_{2ugl}	იანგარიშება
68	$g_{1გრაგნილის}$	სტატორის გრაგნილის ჯამური მასა	კგ	g_{1grsg}	იანგარიშება
69	Σg_1	ელექტროტექნიკური მასალების ჯამური მასა	კგ	$S_{um}g_1$	იანგარიშება
70	$P_{1კბილის}$	მაგნიტური დანაკარგები სტატორის მაგნიტოგამტარის კბილებში	ვტ	P_{1kb}	იანგარიშება
71	$P_{1უღლის}$	მაგნიტური დანაკარგები სტატორის მაგნიტოგამტარის უღელში	ვტ	P_{1ugl}	იანგარიშება
72	$\ell_{1საშ}$	სტატორის გრაგნილის ერთი ხვიის საშუალო სიგრძე	მ	ℓ_{1sh}	იანგარიშება
73	r_1	სტატორის გრაგნილის ერთი ფაზის აქტიური წინააღმდეგობა	ომი	r_1	იანგარიშება

74	$P_{ელექტრული}$	სტატორის გრაგნილის აქტიური ელექტრული დანაკარგები სამივე ფაზაში	ვატი	P_{el}	იანგარიშება
75	Σp	გენერატორის ჯამური დანაკარგები	ვატი	S_{ump}	იანგარიშება
76	η	გენერატორის მარგი ქმედების კოეფიციენტი	%	eta	იანგარიშება
77	$\lambda_{1ღრმულის}$	სტატორის მაგნიტოგამტარის ღრმულის გამტარობის კოეფიციენტი	-	Λ_{1gr}	იანგარიშება
78	X_1	სტატორის გრაგნილის ფანტვის ინდუქციური წინააღმდეგობა	ომი	X_1	იანგარიშება
79	$I_{1\mu\text{სტატ}}$	სტატორის დამაგნიტების დენი	ამპერი	$I_{1\mu\text{.stat}}$	იანგარიშება
80	$X_{1\mu}$	სტატორის გრაგნილის სრული ინდუქციური წინააღმდეგობა	ომი	X_{1m}	იანგარიშება
81	Z	სტატორის გრაგნილის სრული ინდუქციური წინააღმდეგობა	ომი	Z	იანგარიშება
82	$\text{COS}\varphi$	სიმძლავრის კოეფიციენტი	-	$\text{COS}\varphi$	იანგარიშება

83	G ₁	ელექტრომაგნიტური მასალების ჯამური წონის პირველი მდგენელი	კბ	G ₁	იანგარიშება
84	G ₂	..... „ .....	კბ	G ₂	იანგარიშება
85	G ₃	..... „ .....	კბ	G ₃	იანგარიშება
86	G ₄	..... „ .....	კბ	G ₄	იანგარიშება
87	G ₅	..... „ .....	კბ	G ₅	იანგარიშება
88	G ₆	..... „ .....	კბ	G ₆	იანგარიშება
89	G ₇	..... „ .....	კბ	G ₇	იანგარიშება
90	G ₈	..... „ .....	კბ	G ₈	იანგარიშება
91	ΣG	გენერატორის სრული ელექტრომაგნიტური მასალების ჯამური მასა	კბ	SumG	იანგარიშება
92	C ₁	გენერატორის მაგნიტო- გამტარის ფასი	ლარი	C ₁	იანგარიშება
93	C ₂	მაგნიტის ფასი	ლარი	C ₂	იანგარიშება
94	C ₃	გენერატორის დენგამტარის ფასი	ლარი	C ₃	იანგარიშება

95	ΣC	ელექტრომაგნიტური მასალების ჯამური ფასი	ლარი	SumC	იანგარიშება
96	C_A	ელექტრომაგნიტური მასალების მოცულობა ენერჯის ერთეულზე	სმ ³ /კვა.წთ	C_a	იანგარიშება
97	$Q_{1გრანილ}$	სტატორის გრანილის გადახურების ტემპერატურის საშუალო მნიშვნელობა	°C	Q_{1gr}	იანგარიშება
98	T	მუშაობის ხანგრძლივობა	წელი	T	იანგარიშება
99	C_G	ელექტრომაგნიტური მასალების მასა ენეჯის ერთეულზე	კგ/კვა.წთ	C_G	იანგარიშება

4.5. მანქანური ექსპერიმენტის ჩატარება

გამოვთვალოთ შერჩეული შესასვლელი ცვლადების მნიშვნელობები. ავიღოთ თვითოეულისათვის $n = 30$ წერტილი.

```

D1sh=linspace(30,40,30)';
deltaI1=linspace(4,5,30)';
Bdelta=linspace(0.6,0.8,30)';
Alstat=linspace(100,150,30)';
delta=linspace(0.15,0.25,30)';
Kluglis=linspace(0.5,1,30)';
K1stat=linspace(0.3,0.7,30)';

```

```
B2uglis=linspace(1.5,1.8,30)';
alfadelta=linspace(0.62,0.76,30)';
```

მიღებული შედეგები შევითანოთ შემდეგ ცხრილში 4.2 :

ცხრილი 4.2

M =

$D_{\text{შიდა}}$	δ_{11}	B_{δ}	$A_{1\text{სტატ}}$	δ	$K_{1\text{ულლ}}$	$K_{1\text{სტატ}}$	$B_{2\text{ულლ}}$	α_{δ}
30.0000	4.0000	0.6000	100.0000	0.1500	0.5000	0.3000	1.5000	0.6200
30.3448	4.0345	0.6069	101.7241	0.1534	0.5172	0.3138	1.5103	0.6248
30.6897	4.0690	0.6138	103.4483	0.1569	0.5345	0.3276	1.5207	0.6297
31.0345	4.1034	0.6207	105.1724	0.1603	0.5517	0.3414	1.5310	0.6345
31.3793	4.1379	0.6276	106.8966	0.1638	0.5690	0.3552	1.5414	0.6393
31.7241	4.1724	0.6345	108.6207	0.1672	0.5862	0.3690	1.5517	0.6441
32.0690	4.2069	0.6414	110.3448	0.1707	0.6034	0.3828	1.5621	0.6490
32.4138	4.2414	0.6483	112.0690	0.1741	0.6207	0.3966	1.5724	0.6538
32.7586	4.2759	0.6552	113.7931	0.1776	0.6379	0.4103	1.5828	0.6586
33.1034	4.3103	0.6621	115.5172	0.1810	0.6552	0.4241	1.5931	0.6634
33.4483	4.3448	0.6690	117.2414	0.1845	0.6724	0.4379	1.6034	0.6683
33.7931	4.3793	0.6759	118.9655	0.1879	0.6897	0.4517	1.6138	0.6731
34.1379	4.4138	0.6828	120.6897	0.1914	0.7069	0.4655	1.6241	0.6779
34.4828	4.4483	0.6897	122.4138	0.1948	0.7241	0.4793	1.6345	0.6828
34.8276	4.4828	0.6966	124.1379	0.1983	0.7414	0.4931	1.6448	0.6876
35.1724	4.5172	0.7034	125.8621	0.2017	0.7586	0.5069	1.6552	0.6924
35.5172	4.5517	0.7103	127.5862	0.2052	0.7759	0.5207	1.6655	0.6972
35.8621	4.5862	0.7172	129.3103	0.2086	0.7931	0.5345	1.6759	0.7021
36.2069	4.6207	0.7241	131.0345	0.2121	0.8103	0.5483	1.6862	0.7069
36.5517	4.6552	0.7310	132.7586	0.2155	0.8276	0.5621	1.6966	0.7117
36.8966	4.6897	0.7379	134.4828	0.2190	0.8448	0.5759	1.7069	0.7166
37.2414	4.7241	0.7448	136.2069	0.2224	0.8621	0.5897	1.7172	0.7214
37.5862	4.7586	0.7517	137.9310	0.2259	0.8793	0.6034	1.7276	0.7262
37.9310	4.7931	0.7586	139.6552	0.2293	0.8966	0.6172	1.7379	0.7310
38.2759	4.8276	0.7655	141.3793	0.2328	0.9138	0.6310	1.7483	0.7359
38.6207	4.8621	0.7724	143.1034	0.2362	0.9310	0.6448	1.7586	0.7407
38.9655	4.8966	0.7793	144.8276	0.2397	0.9483	0.6586	1.7690	0.7455
39.3103	4.9310	0.7862	146.5517	0.2431	0.9655	0.6724	1.7793	0.7503
39.6552	4.9655	0.7931	148.2759	0.2466	0.9828	0.6862	1.7897	0.7552
40.0000	5.0000	0.8000	150.0000	0.2500	1.0000	0.7000	1.8000	0.7600

ამ მონაცემების გარდა დავაფიქსიროთ ზოგიერთი პარამეტრის მნიშვნელობები:

$U_{1nom}=220$; $f_1=50$; $m_1=3$; $P_{1nom}=1000$;

$n_1=1000$; $q_1=2$; $a_1=1$; $k_0=0.9$; $k_1=0.9$; $k_2=1$;

$k_3=0.85$; $k_{gr}=0.8$; $g_{sp}=8.9 \cdot 10^{-3}$; $g_{rk}=7.8 \cdot 10^{-3}$;

$g_{mag}=8.9 \cdot 10^{-3}$; $g_1=8.9 \cdot 10^{-3}$; $Prk=2.5$; $Crk=1.5$;

$C_{mag}=33$; $C_{sp}=28$; $H_{mag}=990$; $B_{mag}=0.7$;

მოცემული საწყისი მნიშვნელობებისათვის გამოვთვალოთ გამოსასვლელი ცვლადების მინიშნელობები. მიღებული შედეგები ნაჩვენებია ცხრილში 4.3

ცხრილი 4.3

l_1	$b_{1ლრმ}$	$b_{1კბ}$	$h_{1ლრმ}$	$h_{1ულლ}$	$b_{2მაგ}$	$h_{2ულლ}$	$h_{2მაგ}$	$g_{2მაგ}$	$P_{1კბ}$
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1.1258	0.7854	1.8326	8.3333	2.7489	9.7292	0.1946	0.8067	0.4718	13.5668
1.0694	0.8310	1.8171	8.0349	2.8194	9.9171	0.1993	0.8169	0.4626	13.1180
1.0165	0.8774	1.8008	7.7605	2.8876	10.1084	0.2040	0.8282	0.4544	12.7146
0.9669	0.9246	1.7837	7.5075	2.9521	10.2997	0.2088	0.8403	0.4469	12.3519
0.9203	0.9727	1.7657	7.2730	3.0140	10.4928	0.2136	0.8534	0.4400	12.0251
0.8765	1.0216	1.7469	7.0551	3.0721	10.6877	0.2185	0.8672	0.4338	11.7308
0.8352	1.0713	1.7273	6.8520	3.1267	10.8859	0.2243	0.8809	0.4277	11.4660
0.7964	1.1218	1.7068	6.6623	3.1782	11.0843	0.2285	0.8975	0.4231	11.2281
0.7598	1.1729	1.6858	6.4861	3.2261	11.2843	0.2336	0.9138	0.4184	11.0158
0.7253	1.2251	1.6637	6.3193	3.2701	11.4861	0.2387	0.9309	0.4141	10.8257
0.6928	1.2782	1.6407	6.1622	3.3097	11.6914	0.2439	0.9489	0.4104	10.6567
0.6621	1.3321	1.6169	6.0140	3.3456	11.8966	0.2491	0.9676	0.4070	10.5077
0.6330	1.3868	1.5923	5.8741	3.3768	12.1043	0.2544	0.9763	0.3995	10.3778
0.6056	1.4423	1.5669	5.7415	3.4037	12.3141	0.2598	1.0078	0.4013	10.2659
0.5796	1.4987	1.5406	5.6159	3.4266	12.5246	0.2652	1.0291	0.3989	10.1714
0.5551	1.5559	1.5135	5.4967	3.4444	12.7368	0.2706	1.0513	0.3969	10.0926
0.5318	1.6139	1.4856	5.3832	3.4580	12.9507	0.2762	1.0746	0.3952	10.0314
0.5097	1.6727	1.4568	5.2751	3.4662	13.1682	0.2818	1.0990	0.3939	9.9865
0.4887	1.7324	1.4272	5.1720	3.4694	13.3856	0.2874	1.1245	0.3928	9.9577
0.4689	1.7930	1.3968	5.0735	3.4679	13.6048	0.2931	1.1510	0.3921	9.9451

0.4500	1.8543	1.3655	4.9794	3.4608	13.8276	0.2989	1.1789	0.3917	9.9490
0.4321	1.9165	1.3334	4.8893	3.4487	14.0502	0.3047	1.2080	0.3916	9.9699
0.4150	1.9792	1.3009	4.8037	3.4315	14.2745	0.3106	1.2386	0.3919	10.0071
0.3988	2.0430	1.2671	4.7208	3.4083	14.5006	0.3165	1.2708	0.3924	10.0631
0.3834	2.1077	1.2325	4.6411	3.3789	14.7304	0.3225	1.3049	0.3935	10.1382
0.3687	2.1732	1.1971	4.5646	3.3436	14.9599	0.3285	1.3407	0.3949	10.2336
0.3548	2.2395	1.1609	4.4909	3.3026	15.1912	0.3346	1.3787	0.3968	10.3508
0.3414	2.3066	1.1238	4.4201	3.2552	15.4242	0.3408	1.4190	0.3991	10.4917
0.3287	2.3746	1.0859	4.3517	3.2017	15.6610	0.3470	1.4620	0.4019	10.6583
0.3166	2.4435	1.0472	4.2857	3.1416	15.8975	0.3533	1.5079	0.4053	10.8535

ცხრილი 4.4

$P_{1\text{უღლ}}$	$P_{\text{კლქ}}$	$\sum P$	η	$\cos\varphi$	$\sum G$	C_1	C_2	C_3	$\sum C$
20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
38.0954	13.9551	65.6173	0.9384	0.9999	13.5082	9.8227	15.5707	181.6613	207.0547
36.3477	14.6103	64.0760	0.9398	0.9999	13.1558	9.1758	15.2673	184.1267	208.5699
34.7922	15.2897	62.7965	0.9409	0.9999	12.8512	8.5920	14.9968	186.7262	210.3149
33.3960	15.9933	61.7412	0.9418	0.9999	12.5878	8.0617	14.7472	189.4591	212.2681
32.1361	16.7225	60.8837	0.9426	0.9999	12.3611	7.5790	14.5215	192.3142	214.4146
31.0079	17.4775	60.2163	0.9432	0.9999	12.1664	7.1368	14.3151	195.2927	216.7447
30.0002	18.2591	59.7252	0.9436	0.9999	12.0009	6.7316	14.1146	198.3929	219.2391
29.0775	19.0675	59.3730	0.9440	0.9999	11.8615	6.3571	13.9608	201.6106	221.9285
28.2504	19.9034	59.1695	0.9441	0.9999	11.7464	6.0128	13.8074	204.9438	224.7641
27.4978	20.7669	59.0905	0.9442	0.9999	11.6517	5.6923	13.6664	208.3953	227.7540
26.8300	21.6598	59.1464	0.9442	0.9999	11.5759	5.3935	13.5440	211.9542	230.8918
26.2166	22.5819	59.3062	0.9440	0.9999	11.5178	5.1151	13.4298	215.6212	234.1662
25.6713	23.5339	59.5829	0.9438	0.9998	11.4712	4.8543	13.1820	219.3956	237.4318
25.1837	24.5165	59.9661	0.9434	0.9998	11.4485	4.6096	13.2426	223.2760	241.1282
24.7408	25.5302	60.4424	0.9430	0.9998	11.4351	4.3797	13.1648	227.2591	244.8036
24.3476	26.5752	61.0153	0.9425	0.9998	11.4351	4.1633	13.0979	231.3543	248.6154
24.0008	27.6531	61.6853	0.9419	0.9998	11.4463	3.9584	13.0417	235.5395	252.5397
23.7082	28.7642	62.4589	0.9412	0.9998	11.4685	3.7641	12.9981	239.8248	256.5870
23.4512	29.9089	63.3178	0.9405	0.9997	11.5010	3.5797	12.9635	244.2067	260.7499
23.2325	31.0879	64.2655	0.9396	0.9997	11.5434	3.4046	12.9379	248.6846	265.0271

23.0631	32.3022	65.3143	0.9387	0.9997	11.5950	3.2375	12.9272	253.2588	269.4235
22.9246	33.5512	66.4457	0.9377	0.9997	11.6556	3.0782	12.9233	257.9310	273.9324
22.8263	34.8373	67.6707	0.9366	0.9996	11.7247	2.9265	12.9316	262.6904	278.5485
22.7666	36.1604	68.9901	0.9355	0.9996	11.8012	2.7805	12.9508	267.5415	283.2729

22.7560	37.5215	70.4157	0.9342	0.9996	11.8853	2.6403	12.9870	272.4843	288.1116
22.7809	38.9207	71.9352	0.9329	0.9995	11.9766	2.5056	13.0326	277.5154	293.0536
22.8468	40.3592	73.5567	0.9315	0.9995	12.0749	2.3761	13.0934	282.6355	298.1049
22.9613	41.8365	75.2896	0.9300	0.9995	12.1801	2.2511	13.1688	287.8490	303.2689
23.1280	43.3555	77.1418	0.9284	0.9994	12.2919	2.1307	13.2643	293.1452	308.5403
23.3438	44.9154	79.1127	0.9267	0.9994	12.4098	2.0142	13.3753	298.5262	313.9158

C_A	$\sum \delta$	$\delta_9^{\delta_9}$	δ_9	Q_{136}	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
0.0011	1	1.5982	1.3410	0.8010	0.3253	0.3921	0.3283	0.2989	0.1130	0.0260	0.0362	0.0101
0.0011	2	1.5330	1.3214	0.8847	0.3417	0.4147	0.3357	0.3005	0.1161	0.0266	0.0370	0.0104
0.0011	3	1.4755	1.3016	0.9753	0.3588	0.4376	0.3428	0.3016	0.1188	0.0272	0.0378	0.0106
0.0011	4	1.4245	1.2820	1.0732	0.3764	0.4606	0.3494	0.3023	0.1211	0.0277	0.0385	0.0108
0.0012	5	1.3793	1.2626	1.1790	0.3946	0.4838	0.3555	0.3023	0.1230	0.0282	0.0392	0.0110
0.0012	6	1.3390	1.2436	1.2931	0.4131	0.5069	0.3610	0.3019	0.1245	0.0287	0.0399	0.0112
0.0012	7	1.3030	1.2252	1.4163	0.4319	0.5300	0.3659	0.3008	0.1256	0.0291	0.0405	0.0114
0.0013	8	1.2709	1.2076	1.5491	0.4510	0.5528	0.3701	0.2992	0.1263	0.0295	0.0410	0.0115
0.0013	9	1.2422	1.1907	1.6921	0.4702	0.5753	0.3736	0.2970	0.1266	0.0299	0.0415	0.0116
0.0013	10	1.2162	1.1746	1.8460	0.4895	0.5975	0.3764	0.2943	0.1265	0.0303	0.0420	0.0117
0.0014	11	1.1928	1.1593	2.0115	0.5088	0.6193	0.3783	0.2910	0.1260	0.0306	0.0423	0.0118
0.0014	12	1.1718	1.1448	2.1895	0.5281	0.6406	0.3795	0.2873	0.1252	0.0309	0.0427	0.0118
0.0014	13	1.1527	1.1312	2.3806	0.5474	0.6615	0.3801	0.2832	0.1240	0.0308	0.0426	0.0118
0.0015	14	1.1355	1.1184	2.5858	0.5662	0.6815	0.3795	0.2784	0.1224	0.0313	0.0432	0.0118
0.0015	15	1.1199	1.1064	2.8060	0.5849	0.7010	0.3784	0.2734	0.1206	0.0315	0.0433	0.0118
0.0015	16	1.1058	1.0952	3.0421	0.6033	0.7198	0.3765	0.2680	0.1184	0.0317	0.0435	0.0118
0.0016	17	1.0930	1.0847	3.2952	0.6214	0.7379	0.3738	0.2623	0.1160	0.0318	0.0436	0.0117
0.0016	18	1.0813	1.0750	3.5663	0.6391	0.7553	0.3705	0.2563	0.1133	0.0319	0.0436	0.0117
0.0017	19	1.0708	1.0659	3.8565	0.6564	0.7720	0.3664	0.2501	0.1104	0.0320	0.0436	0.0116
0.0017	20	1.0611	1.0575	4.1672	0.6733	0.7879	0.3617	0.2437	0.1074	0.0321	0.0436	0.0115
0.0017	21	1.0524	1.0497	4.4995	0.6897	0.8031	0.3563	0.2371	0.1041	0.0322	0.0436	0.0114

0.0018	22	1.0444	1.0425	4.8548	0.7057	0.8175	0.3503	0.2304	0.1007	0.0322	0.0435	0.0113
0.0018	23	1.0372	1.0358	5.2345	0.7211	0.8311	0.3438	0.2235	0.0972	0.0323	0.0434	0.0111
0.0019	24	1.0306	1.0297	5.6402	0.7361	0.8441	0.3367	0.2166	0.0936	0.0323	0.0433	0.0110
0.0019	25	1.0246	1.0240	6.0735	0.7506	0.8563	0.3290	0.2097	0.0899	0.0323	0.0432	0.0109
0.0019	26	1.0191	1.0188	6.5361	0.7646	0.8678	0.3209	0.2027	0.0861	0.0324	0.0431	0.0107
0.0020	27	1.0141	1.0139	7.0298	0.7781	0.8786	0.3124	0.1958	0.0822	0.0324	0.0430	0.0106
0.0020	28	1.0096	1.0095	7.5564	0.7911	0.8887	0.3034	0.1889	0.0784	0.0325	0.0428	0.0104
0.0021	29	1.0055	1.0055	8.1182	0.8036	0.8982	0.2940	0.1821	0.0745	0.0325	0.0427	0.0102
0.0021	30	1.0018	1.0018	8.7171	0.8156	0.9070	0.2843	0.1753	0.0706	0.0326	0.0427	0.0101

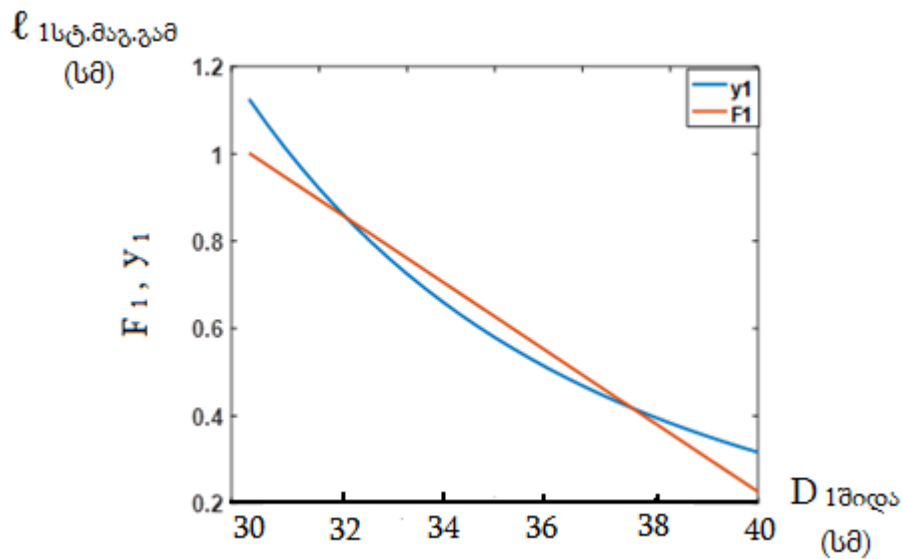
4.6. ექსპერიმენტული მონაცემების რეგრესიული ანალიზი

მოვახდინოთ მონაცემების რეგრესიული ანალიზი, ავაგოთ რეგრესიის მოდელები.

შევარჩიოთ გამოსასვლელი სიდიდე I_1 . მიღებული რეგრესიის მოდელი არის:

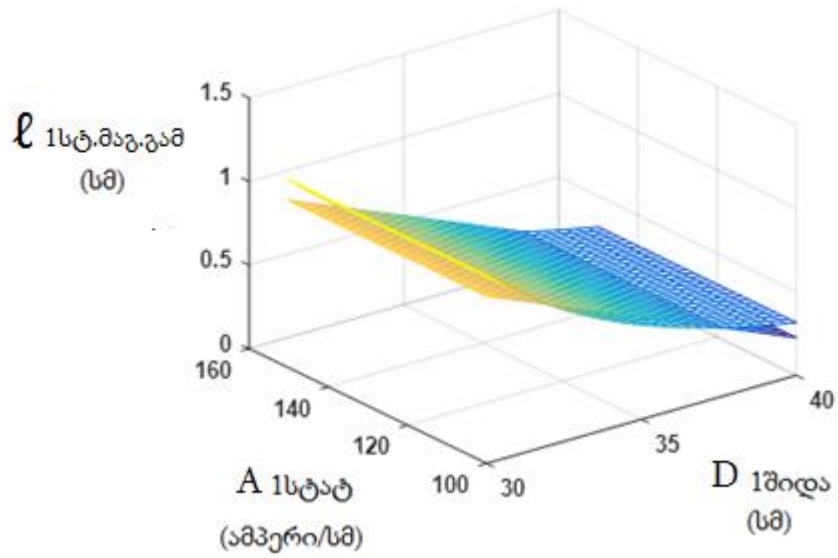
$$f1 = 0.2554 * z1 - 0.0666 * z4 ;$$

სადაც $f1$ არის I_1 , $z1$ არის $D1sh$, ხოლო $z4$ - $A1stat$. აპროქსიმაციის მრუდი ნაჩვენებია ნახ.4.1-ზე:



ნახ.4.1. l_1 ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით

მიღებული მოდელის ზედაპირი სამგანზომილებიან სივრცეში ნაჩვენებია ნახ.4.2-ზე:



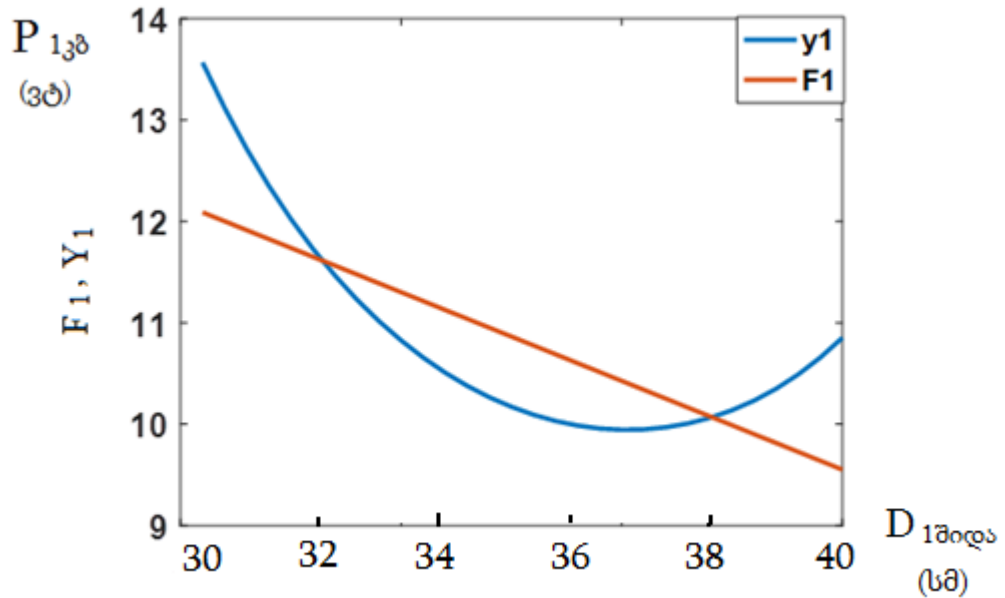
ნახ.4.2. l_1 ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით სივრცეში

მე-19 ცვლადის ($P_{1კბ}$) კვლევის შედეგია:

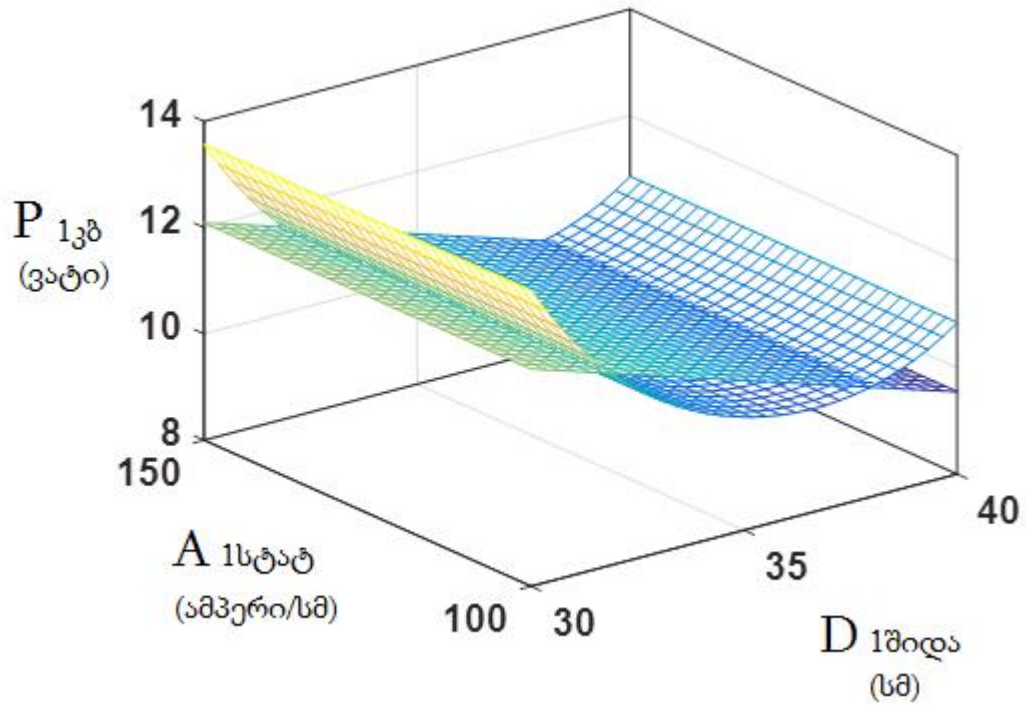
$$F1 = 1.7131 \cdot z1 - 0.3925 \cdot z4;$$

სადაც F1 არის $P_{1კბ}$ ცვლადი, z1 არის $D1sh$, ხოლო z4 - $A1stat$;

აპროქსიმაციის ნახაზები 4.7, 4.8, 4.9, 4.10:



ნახ. 4.3. $P_{1კბ}$ ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით



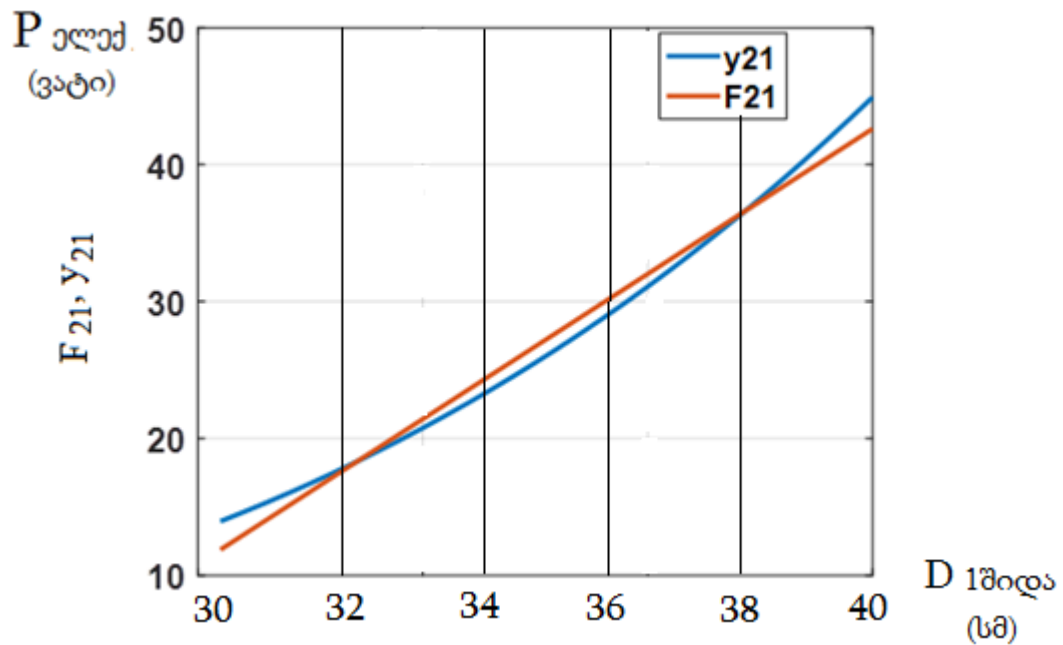
ნახ. 4.4. P_{13b} ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით სივრცეში

21-ე ცვლადის ($P_{ელექ}$) კვლევის შედეგია:

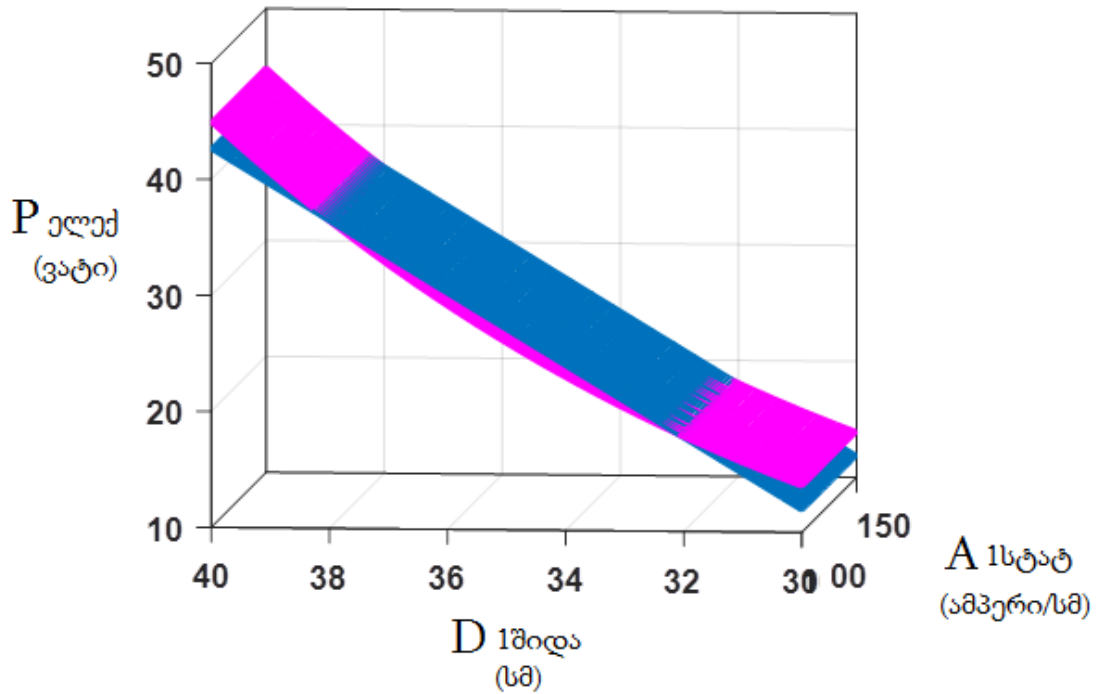
$$F_{21} = -4.9568 * z_1 + 1.6059 * z_4;$$

სადაც F_{21} არის $P_{ელექ}$ ცვლადი, z_1 არის $D1sh$, ხოლო z_4 - $A1stat$;

აპროქსიმაციის ნახაზები 4.11, 4.12 :



ნახ.4.5. P_{ელექ} ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით



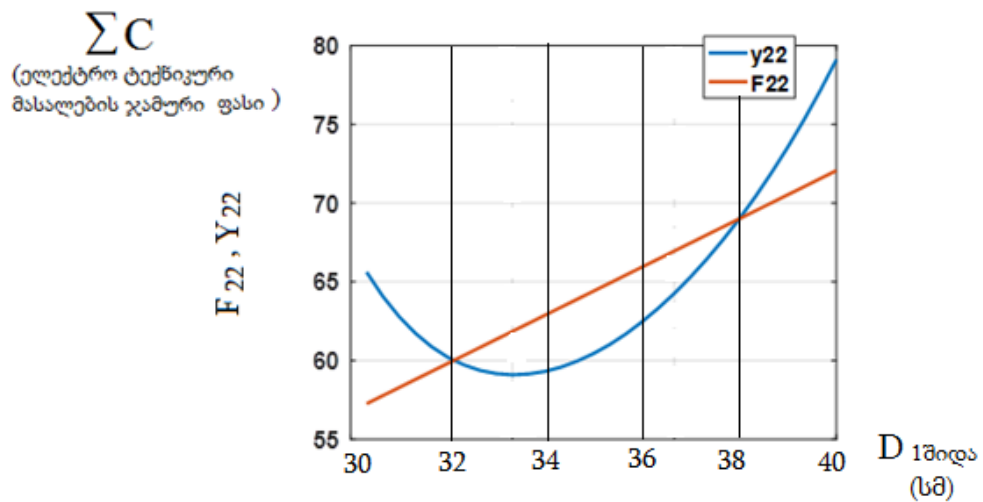
ნახ.4.6. P_{ელექ} ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით სივრცეში

22-ე ცვლადის (ΣC) კვლევის შედეგია:

$$F_{22} = 2.7667 * z_1 - 0.2574 * z_4;$$

სადაც F₂₂ არის ΣC ცვლადი, z₁ არის D_{1sh}, ხოლო z₄ - A_{1stat};

აპროქსიმაციის ნახაზი 4.13:



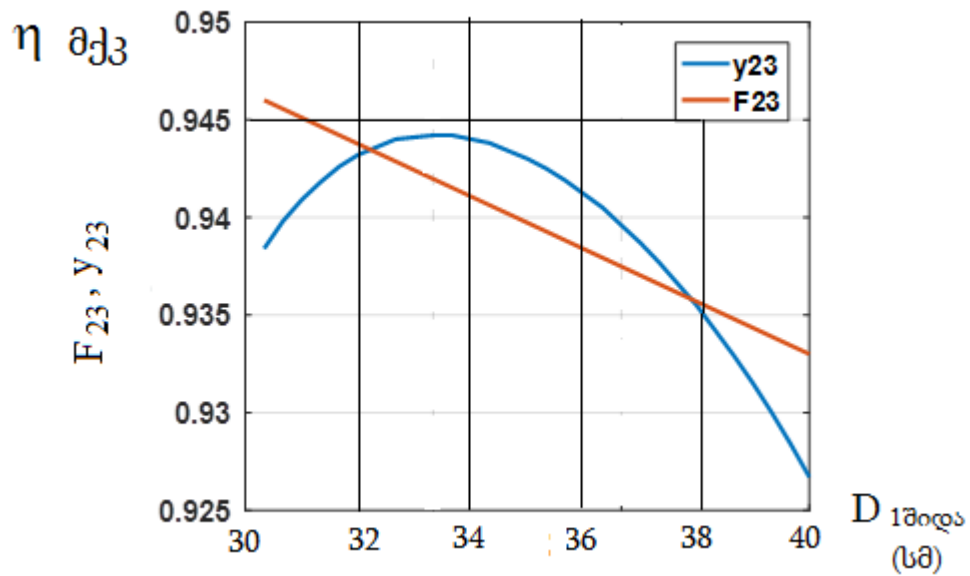
ნახ.4.7. ΣC ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით

23-ე ცვლადის (η) კვლევის შედეგია:

$$F23=0.0972*z1-0.0197*z4$$

სადაც F23 არის η ცვლადი, $z1$ არის D1sh, ხოლო $z4$ - A1stat;

აპროქსიმაციის ნახაზი: 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 , 4.18

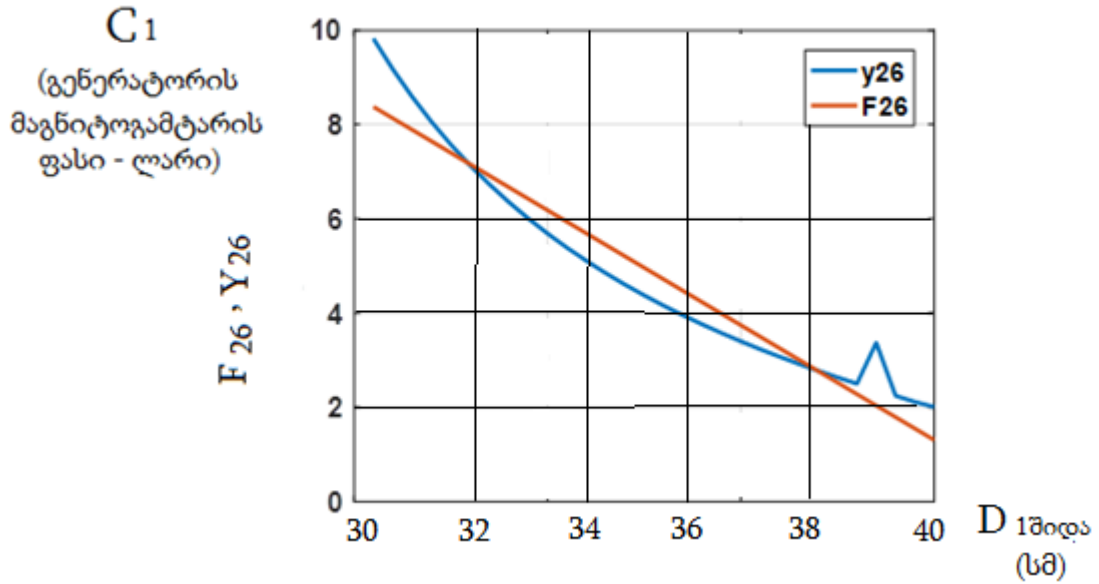


ნახ.4.8. η ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით

26-ე ცვლადის (C_1) კვლევის შედეგია:

$$F26=2.2509*z1-0.5915*z4;$$

სადაც F26 არის C_1 ცვლადი, $z1$ არის D1sh, ხოლო $z4$ - A1stat;

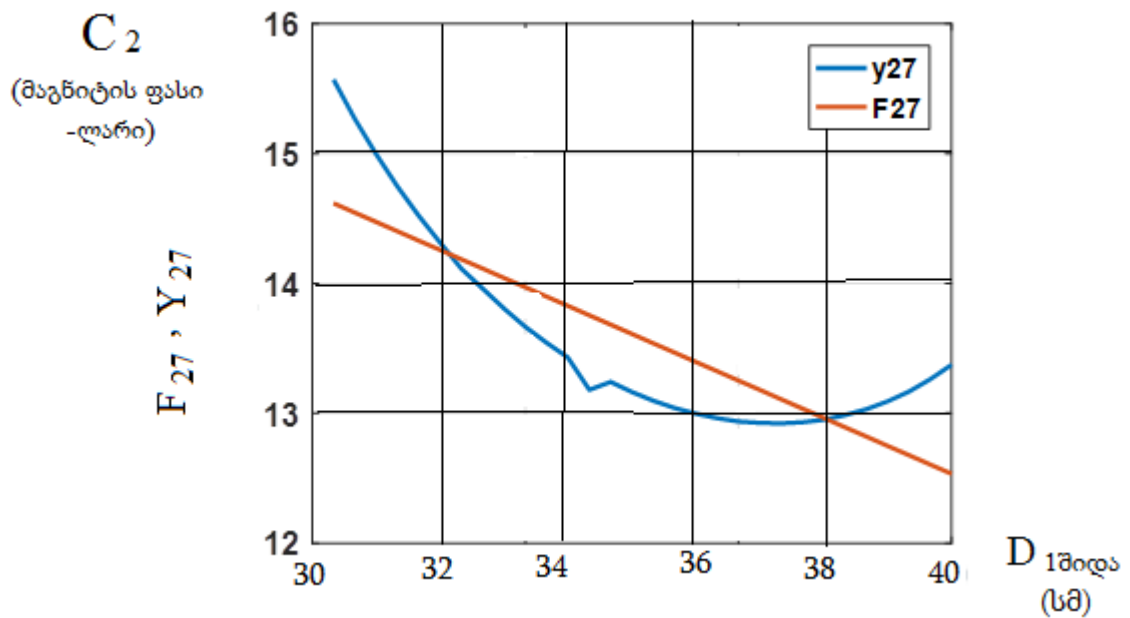


ნახ.4.9. C_1 ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით

27-ე ცვლადის (C_2) კვლევის შედეგია:

$$F_{27} = 1.8786 \cdot x_1 - 0.4174 \cdot x_4;$$

სადაც F_{27} არის C_2 ცვლადი, z_1 არის $D1sh$, ხოლო z_4 - $A1stat$;

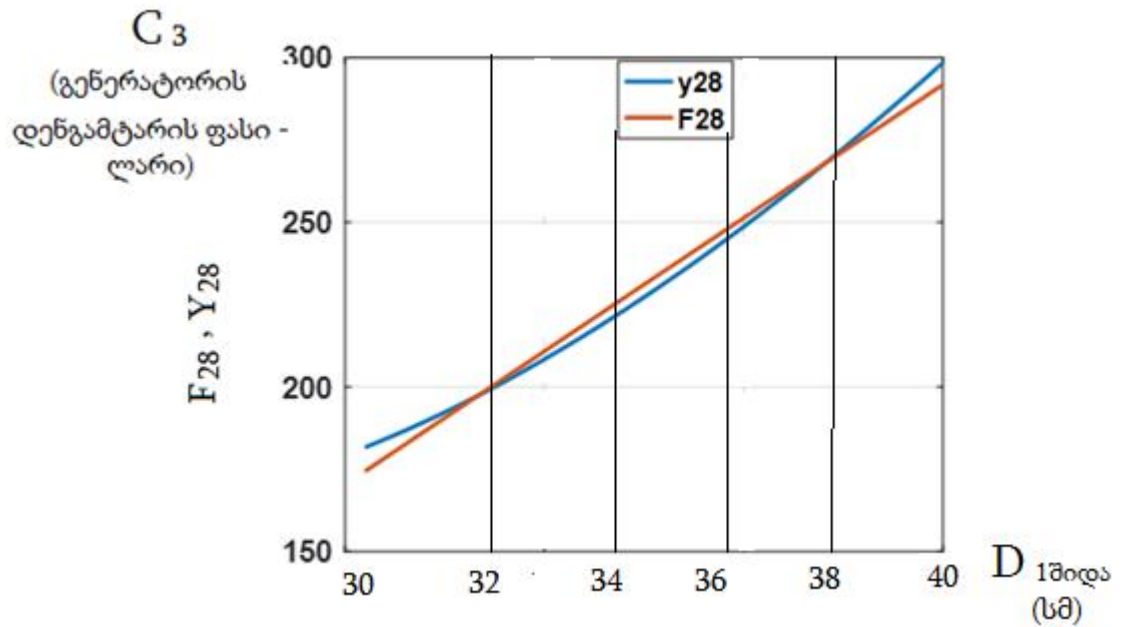


ნახ.4.10. C_2 ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით

28-ე ცვლადის (C_3) კვლევის შედეგია:

$$F_{28} = -6.0546 \cdot x_1 + 3.5603 \cdot x_4 ;$$

სადაც F_{28} არის C_3 ცვლადი, z_1 არის $D1sh$, ხოლო $z_4 - A1stat$;

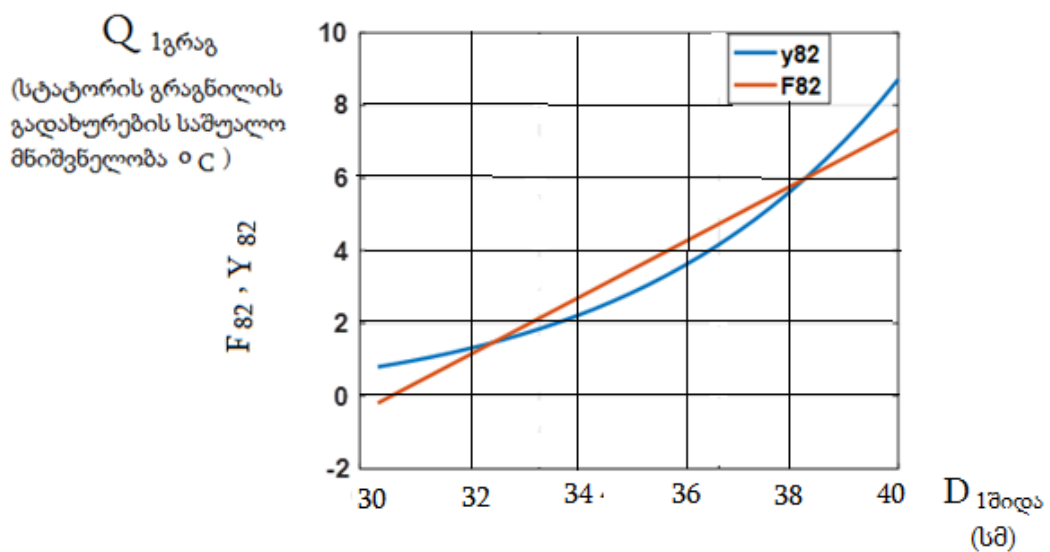


ნახ.4.11. C_3 ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით

34-ე ცვლადის $Q_{1გრ}$ კვლევის შედეგია:

$$F_{34} = -1.5252 \cdot x_1 + 0.4556 \cdot x_4 ;$$

სადაც F_{34} არის $Q_{1გრ}$ ცვლადი, z_1 არის $D1sh$, ხოლო $z_4 - A1stat$;



ნახ.4.12. $Q_{1გრ}$ ცვლადის აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელი

4.7. გამოსასვლელ ცვლადებს შორის რეგრესიული ანალიზი

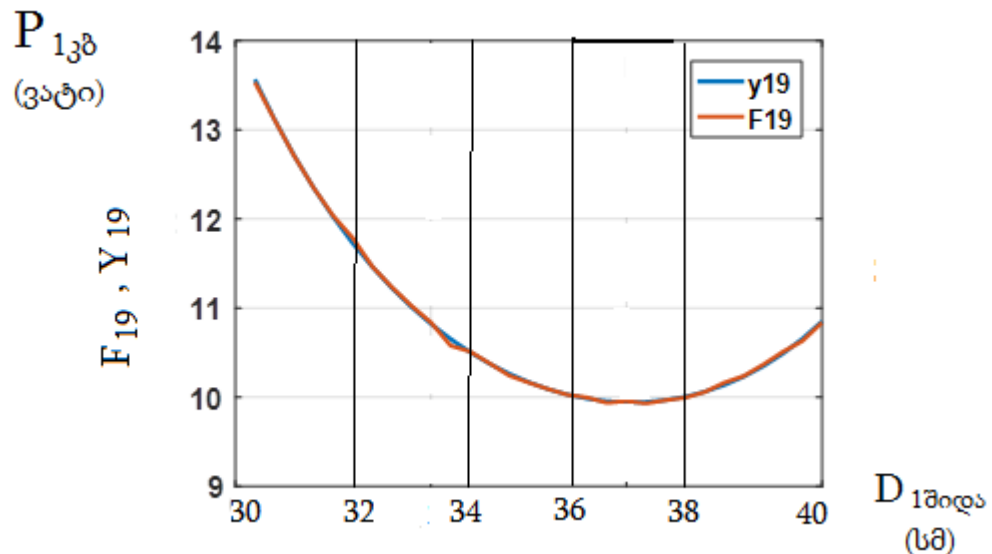
გამოვიკვლიოთ გამოსასვლელი რამოდენიმე ცვლადის დამოკიდებულება და რეგრესიული მოდელები.

ავირჩიოთ შემდეგი ცვლადი $P_{1კბ}$, აღვნიშნოთ f_{19} და ვიპოვოთ მისი დამოკიდებულება $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ ცვლადებთან.

მიღებულია შემდეგი რეგრესიული მოდელი:

$$F_{19} = -18.7788 + 380.9500 * x_1 - 345.6309 * x_2 + 38.3809 * x_3 + 0.7069 * x_4 + 232.7819 * x_5 - 2.0291 * x_6 + 23.0479 * x_7 + 397.5326 * x_8$$

აპროქსიმაციის მრული ნაჩვენებია შემდეგ ნახაზზე: 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29, 4.30, 4.31, 4.32, 4.33, 4.34, 4.35, 4.36, 4.37, 4.38, 4.39, 4.40



ნახ.4.13. $P_{1კბ}$ ცვლადის $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ ცვლადებზე დამოკიდებულების აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით

მნიშვნელობები ისე ახლოსაა ერთმანეთთან, რომ გრაფიკები დაემთხვა. ავირჩიოთ ცვლადი I_1 , აღვნიშნოთ $f1$ და ვიპოვოთ მისი დამოკიდებულება $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ ცვლადებთან.

მივიღეთ:

$$f1 = -0.6003 + 18.0339 \cdot x_1 - 17.7045 \cdot x_2 + 5.9993 \cdot x_3 + 2.9425 \cdot x_4 - \dots - 1.7053 \cdot x_5 + 0.2237 \cdot x_6 + 2.8781 \cdot x_7 + 3.5158 \cdot x_8$$

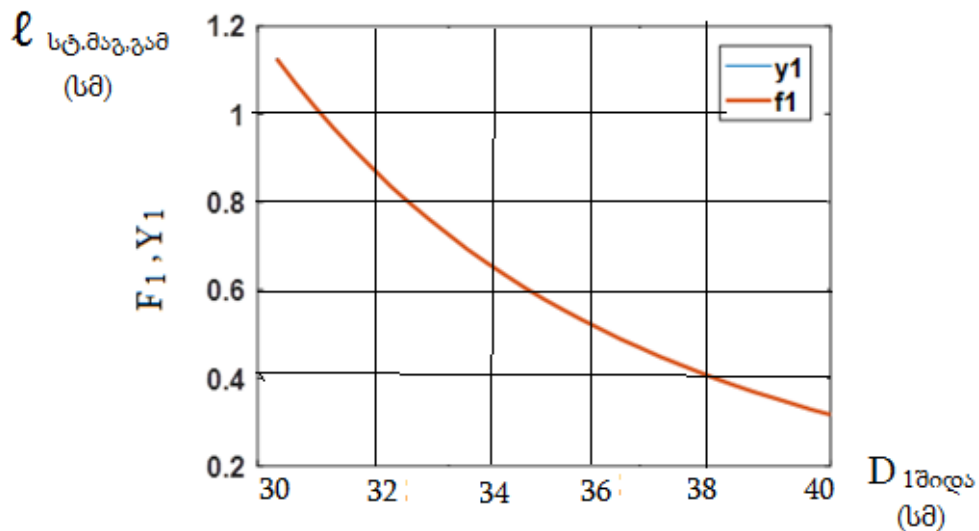
ცვლადის მიღებული მნიშვნელობებია:

$f1 = 1.1257, 1.0690, 1.0163, 0.9671, 0.9208, 0.8775, 0.8344, 0.7963, 0.7601, 0.7260, 0.6920, 0.6618, 0.6331, 0.6049, 0.5790, 0.5550, 0.5321, 0.5104, 0.4885, 0.4695, 0.4497, 0.4327, 0.4153, 0.3983, 0.3830, 0.3682, 0.3551, 0.3417, 0.3282, 0.3169;$

თუ შევადარებთ საწყის მნიშვნელობებს:

$y1 = [1.1258, 1.0694, 1.0165, 0.9669, 0.9203, 0.8765, 0.8352, 0.7964, 0.7598, 0.7253, 0.6928, 0.6621, 0.6330, 0.6056, 0.5796, 0.5551, 0.5318, 0.5097, 0.4887, 0.4689, 0.4500, 0.4321, 0.4150, 0.3988, 0.3834, 0.3687, 0.3548, 0.3414, 0.3287, 0.3166], \ell$

დავინახავთ, რომ ცვლილება ძალიან მცირეა, ამიტომ გრაფიკები ემთხვევა ერთმანეთს.

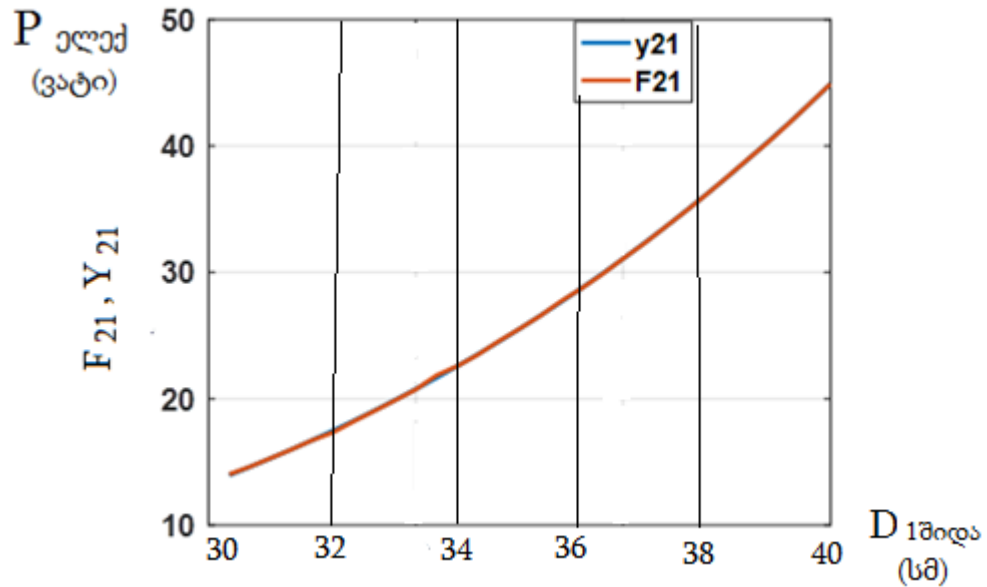


ნახ. 4. 14. I_1 ცვლადის $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ცვლადებზე დამოკიდებულების აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით

ავირჩიეთ ცვლადი $P_{ელექ}$, აღვნიშნოთ F_{21} და ვიპოვეთ მისი დამოკიდებულება $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ცვლადებთან.

მივიღეთ:

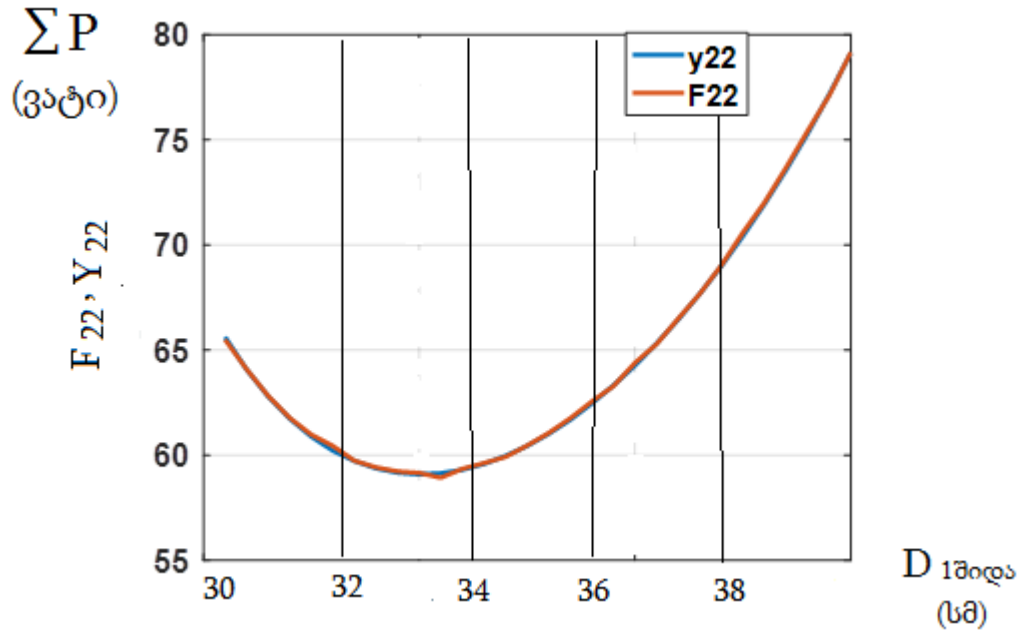
$$F_{21} = -13.4198 + 356.0099 \cdot x_1 - 252.1834 \cdot x_2 - 144.4443 \cdot x_3 - 0.7702 \cdot x_4 + 494.5485 \cdot x_5 - 392.4214 \cdot x_6 + 508.0212 \cdot x_7 - 584.6207 \cdot x_8;$$



ნახ. 4.15. $P_{ელექ}$ ცვლადის $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ცვლადებზე დამოკიდებულების აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით

$\sum P$ ცვლადისათვის მივიღეთ:

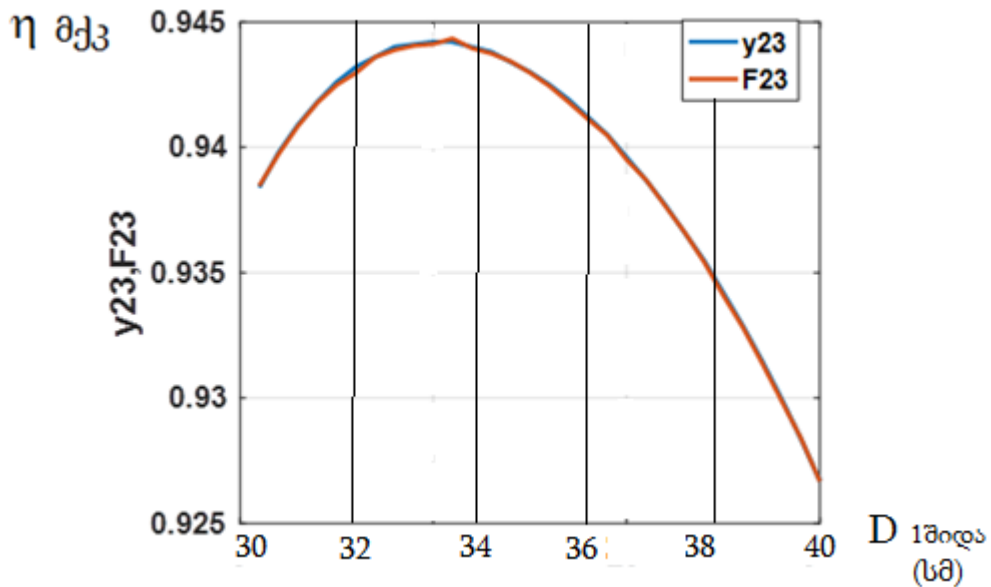
$$F_{22} = -88.6 + 1855.9 \cdot x_1 - 1632.5 \cdot x_2 + 94.4 \cdot x_3 + 3.5 \cdot x_4 + 1218 \cdot x_5 - 274.2 \cdot x_6 + 355.5 \cdot x_7 + 1491.7 \cdot x_8 ;$$



ნახ. 4.16. ΣP ცვლადის $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ცვლადებზე დამოკიდებულების აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით

η ცვლადისათვის მივიღეთ:

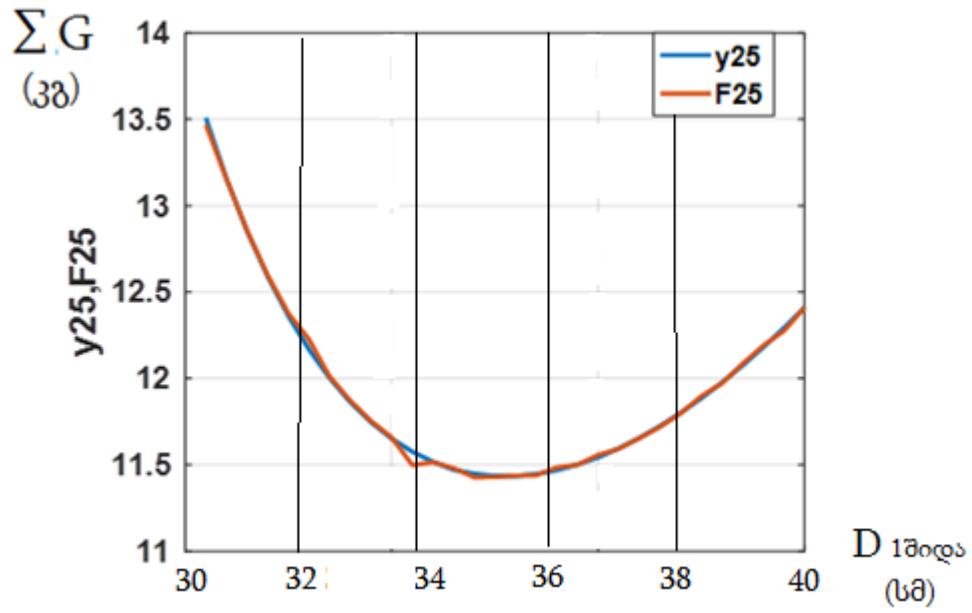
$$F_{23} = 1.0632 - 1.5206 \cdot x_1 + 1.3400 \cdot x_2 - 0.0832 \cdot x_3 - 0.0027 \cdot x_4 - 0.9625 \cdot x_5 + 0.3274 \cdot x_6 - 0.4877 \cdot x_7 - 0.9378 \cdot x_8;$$



ნახ.4. 17. η ცვლადის $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ცვლადებზე დამოკიდებულების აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით

ΣG ცვლადისათვის მივიღეთ:

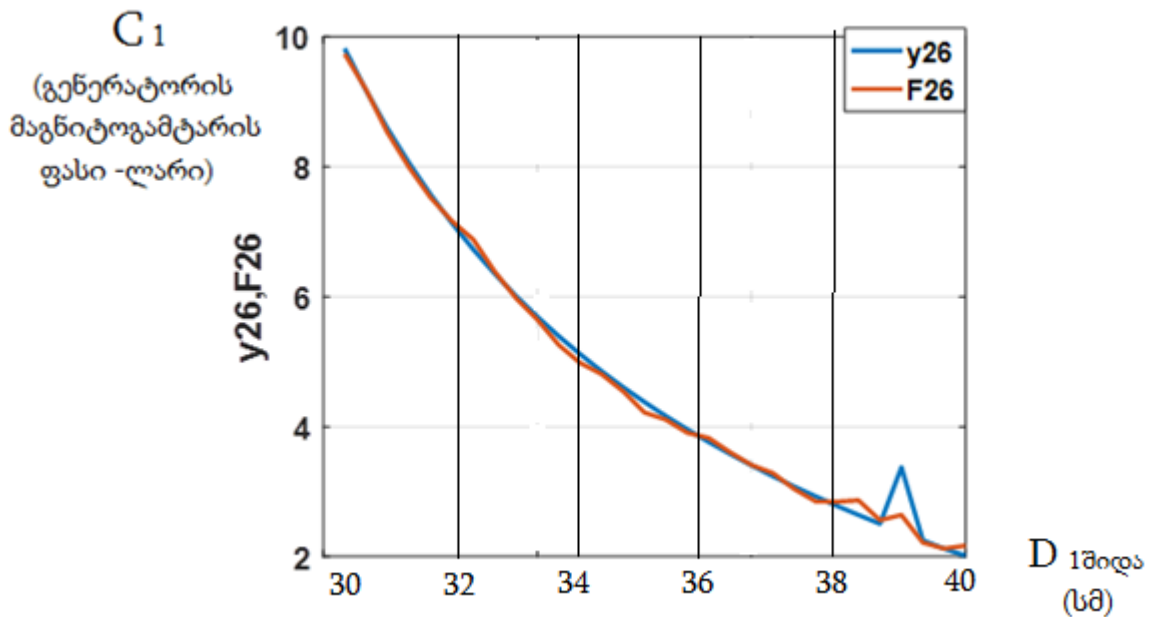
$$F_{25} = -4.8562 + 225.8251 \cdot x_1 - 206.5528 \cdot x_2 + 41.3981 \cdot x_3 + 0.8418 \cdot x_4 + 81.3281 \cdot x_5 + 33.3043 \cdot x_6 - 41.6982 \cdot x_7 + 342.9634 \cdot x_8;$$



ნახ. 4.18. ΣG ცვლადის $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ცვლადებზე დამოკიდებულების აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით

C_1 ცვლადისათვის მივიღეთ:

$$F26 = 17.1 - 11.1 \cdot x_1 - 13.5 \cdot x_2 + 25.8 \cdot x_3 + 9.6 \cdot x_4 - 248.3 \cdot x_5 - 1766.8 \cdot x_6 + 1273.5 \cdot x_7 + 1791.9 \cdot x_8;$$



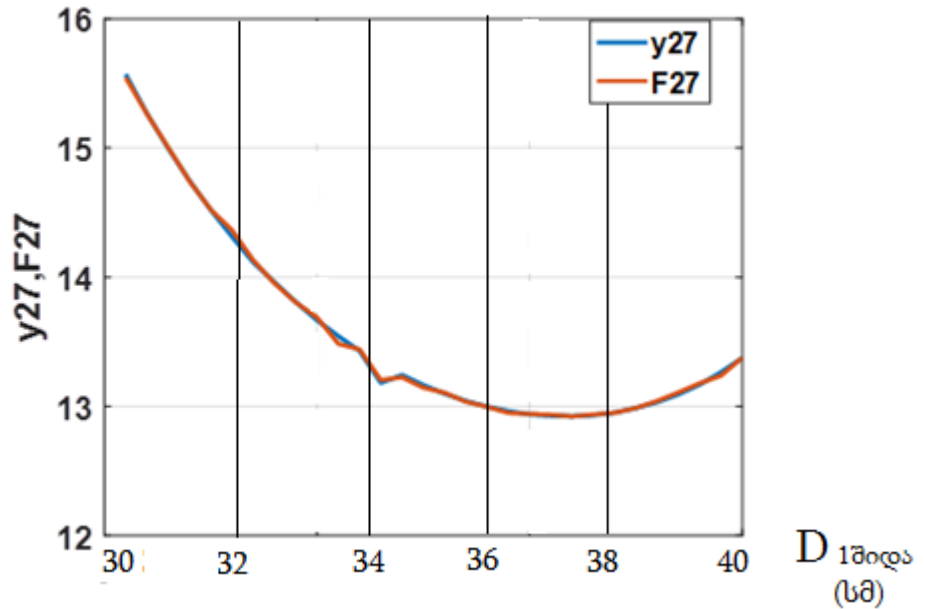
ნახ.4.19. C_1 ცვლადის $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ცვლადებზე დამოკიდებულების აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით

C_2 ცვლადისათვის მივიღეთ:

$$F27 = -0.576 + 147.659 \cdot x_1 + 45.887 \cdot x_2 + 30.483 \cdot x_3 + 0.312 \cdot x_4 + 14.133 \cdot x_5 + 253.033 \cdot x_6 + 132.457 \cdot x_7$$

$$+219.668 \cdot x_8;$$

C_2
(მაგნიტის ფასი
- ლარი)

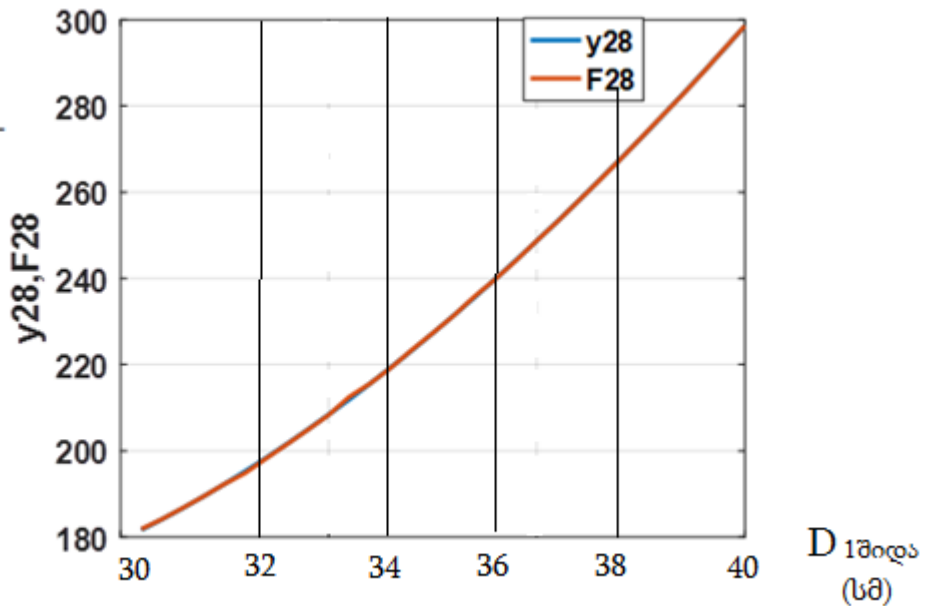


ნახ. 4.20. C_2 ცვლადის $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ცვლადებზე დამოკიდებულების აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით

C_3 ცვლადისათვის მივიღეთ:

$$F28=104.9+995.9 \cdot x_1-655.3 \cdot x_2-432.4 \cdot x_3-2.2 \cdot x_4+1306.3 \cdot x_5-1137.1 \cdot x_6+1452.4 \cdot x_7-1789.9 \cdot x_8;$$

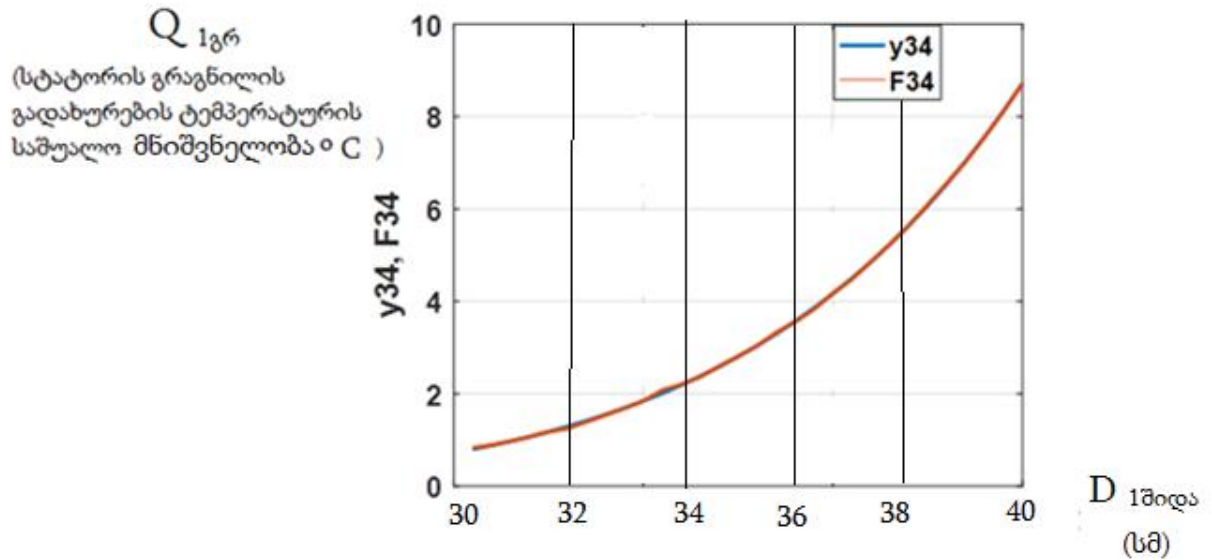
C_3
(გენერატორის
დენგამტარის ფასი -
ლარი)



ნახ.4.21. C_3 ცვლადის $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ცვლადებზე დამოკიდებულების აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით

$Q_{1გრ}$ ცვლადისათვის მივიღეთ:

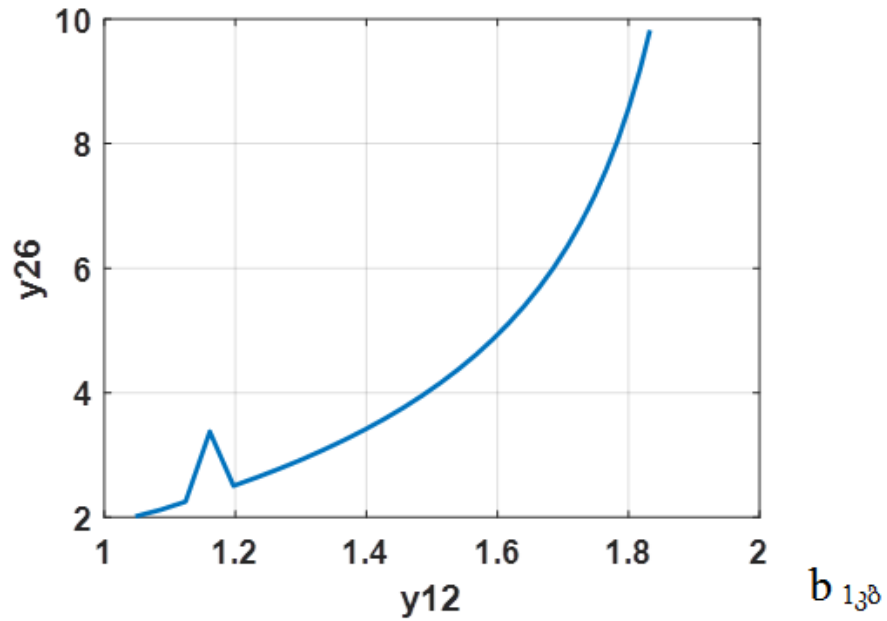
$$F_{34} = -24.3905 + 300.5746 \cdot x_1 - 247.9604 \cdot x_2 - 53.8170 \cdot x_3 - 0.2700 \cdot x_4 + 346.9379 \cdot x_5 - \dots \\ 174.8429 \cdot x_6 + 252.8561 \cdot x_7 - 137.9668 \cdot x_8;$$



ნახ. 4.22. $Q_{1გრ}$ ცვლადის $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ცვლადებზე დამოკიდებულების აპროქსიმაცია რეგრესიის მოდელით

ექსპერიმენტის მონაცემების გამოყენებით ავაგეთ რამოდენიმე დამოკიდებულების გრაფიკი.

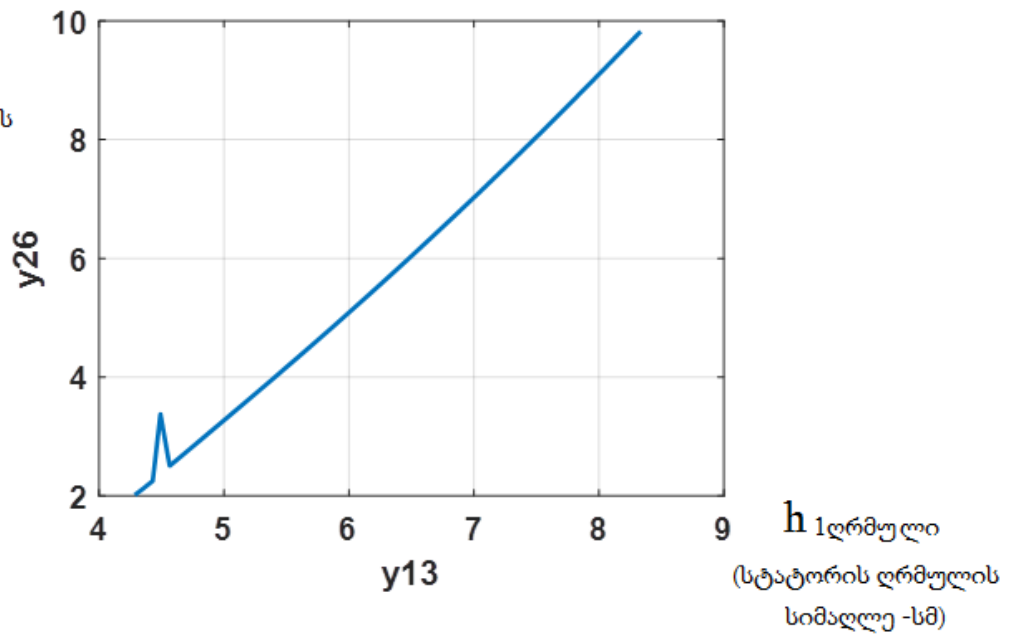
C_1
(გენერატორის
მაგნიტოგამტარის
ფასი - ლარი)



(მაგნიტური დასანაკარგები
სტატორის
მაგნიტოგამტარის კბილში
- ვატი)

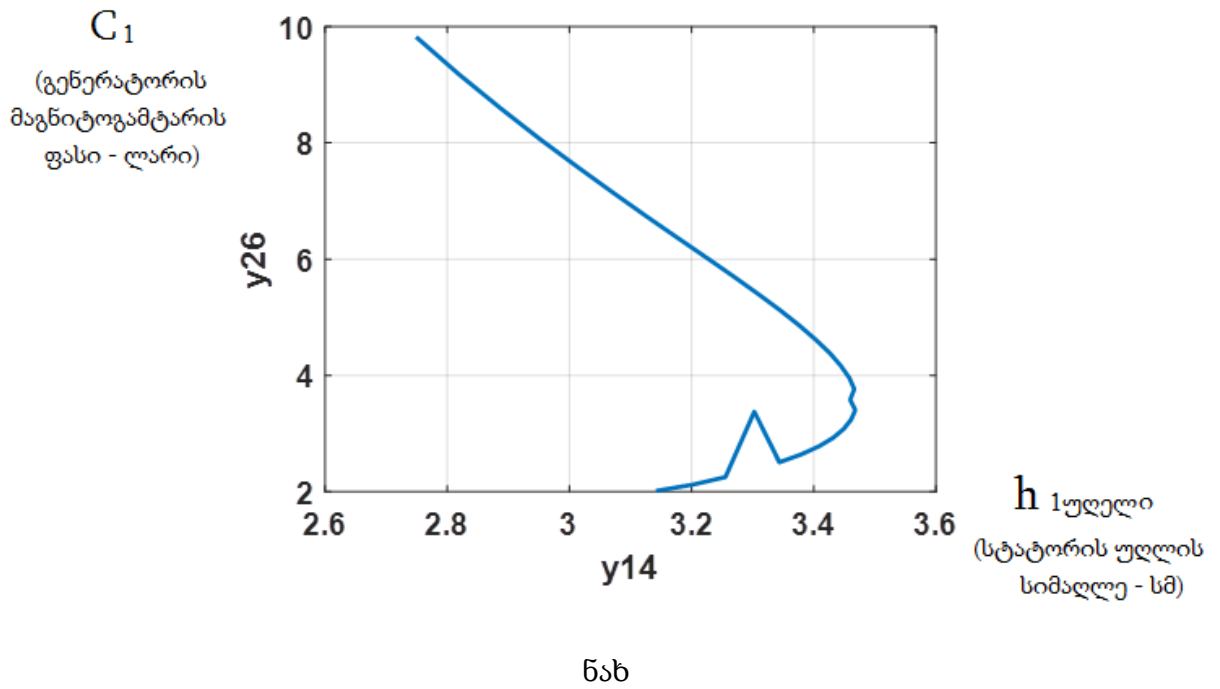
ნახ.4. 23. C_1 (y_{26}) ცვლადის $b_{1კბ}$ (y_{12}) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი

C_1
(გენერატორის
მაგნიტოგამტარის
ფასი - ლარი)

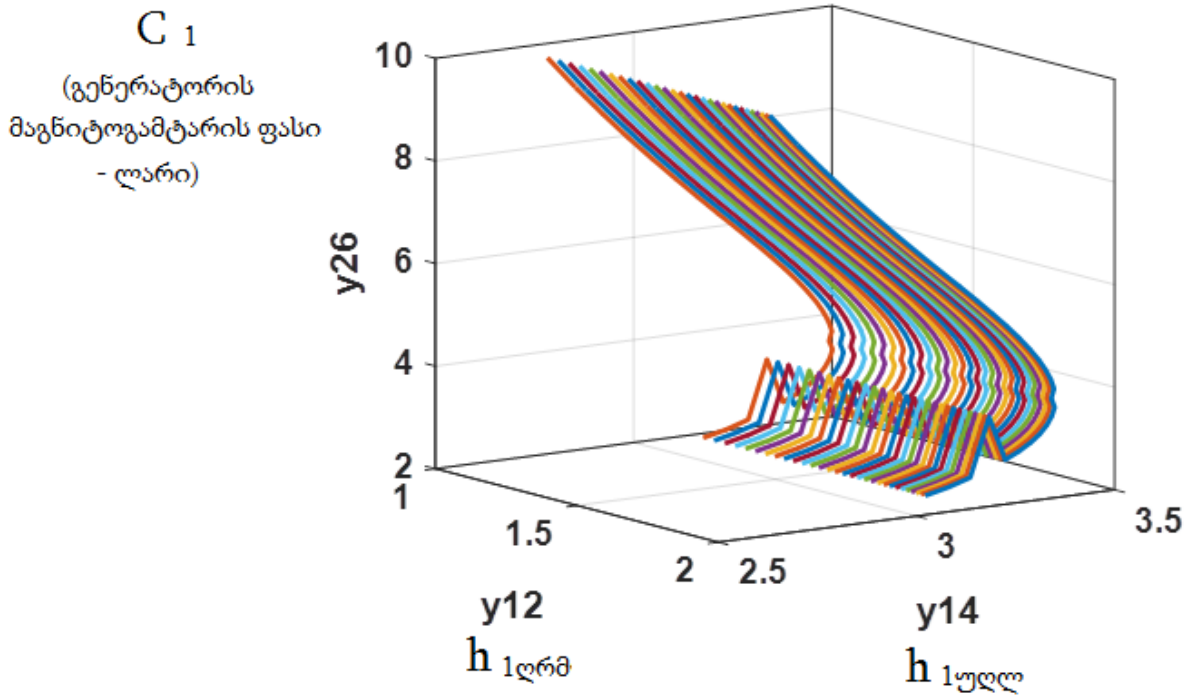


(სტატორის ღრმულის
სიმაღლე -სმ)

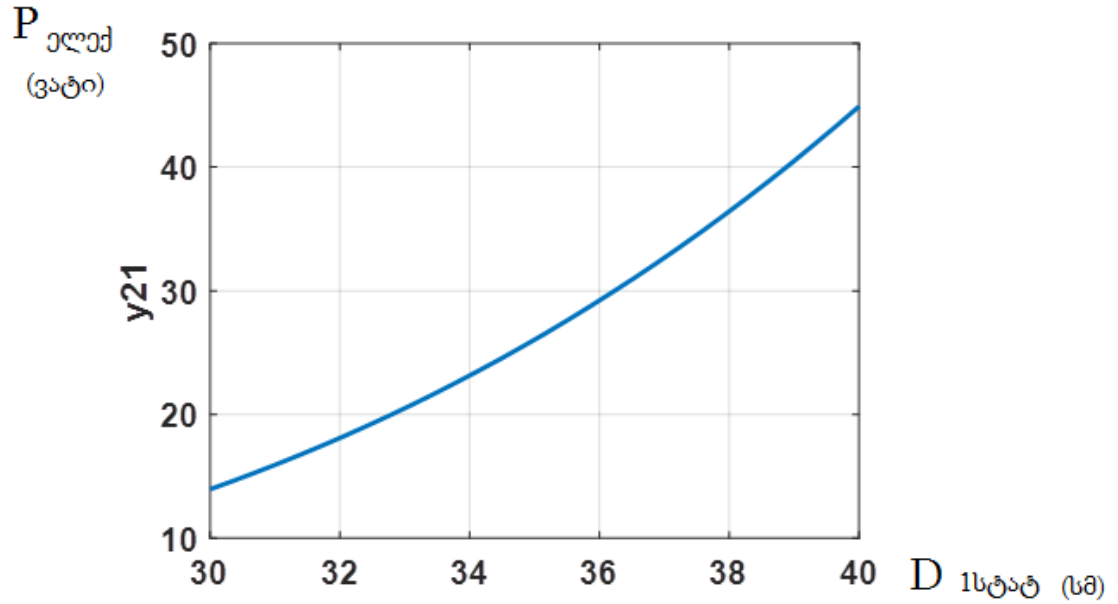
ნახ. 4.24. C_1 (y_{26}) ცვლადის $h_{1ღრმ}$ (y_{13}) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი



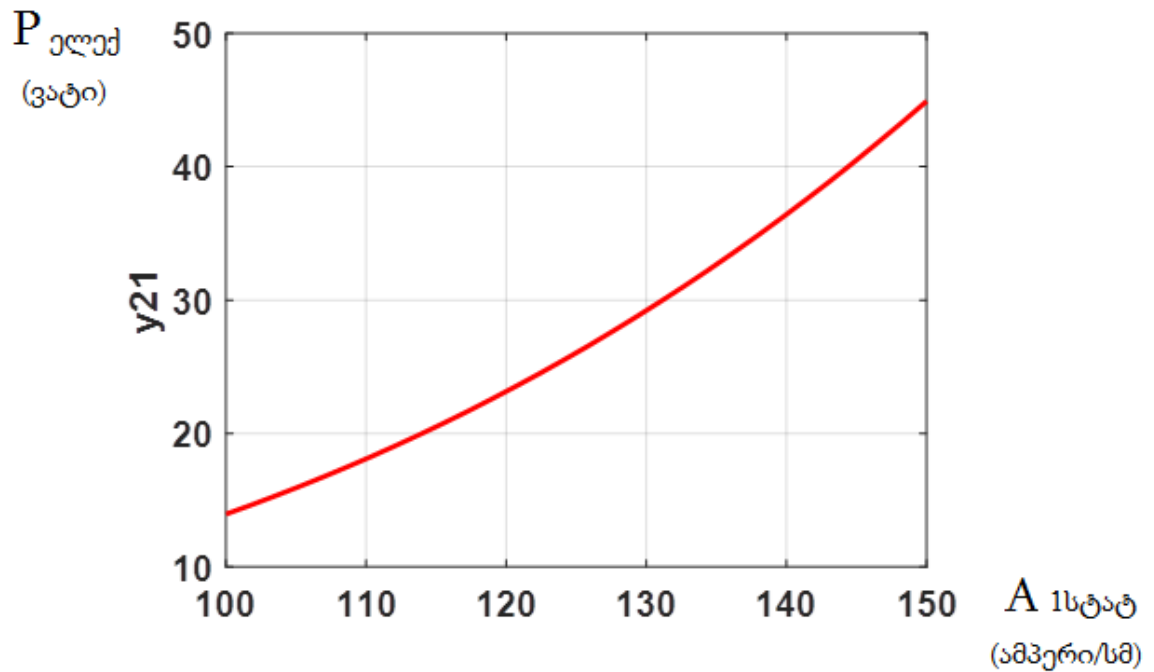
4. 25. C_1 (y_{26}) ცვლადის $h_{1\text{უღელი}}$ (y_{14}) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი



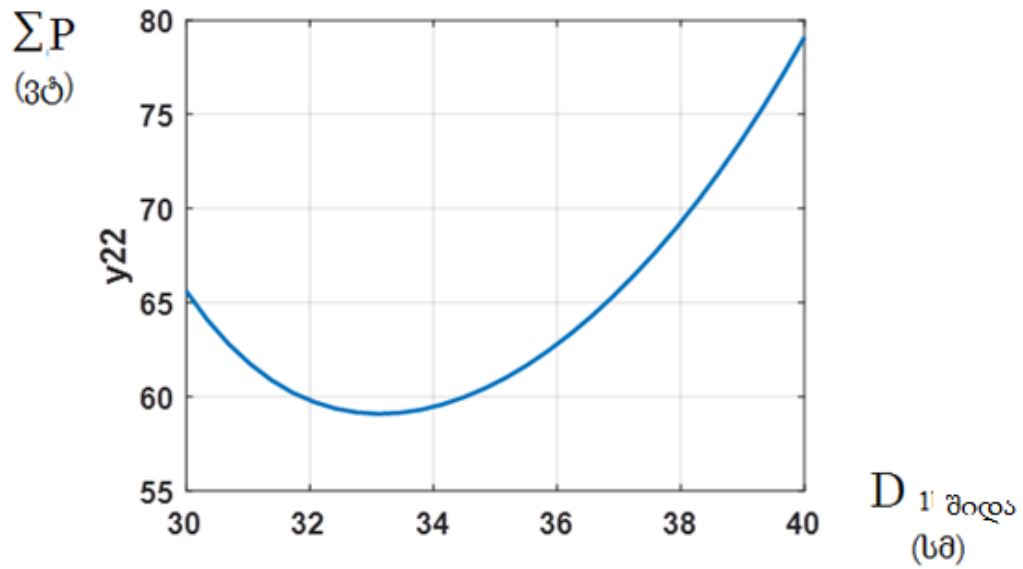
ნახ.4. 26. C_1 (y26) ცვლადის $h_{1\text{უღლ}}$ (y14) და $h_{1\text{ღრმ}}$ (y13) ცვლადებზე დამოკიდებულების ზედაპირი



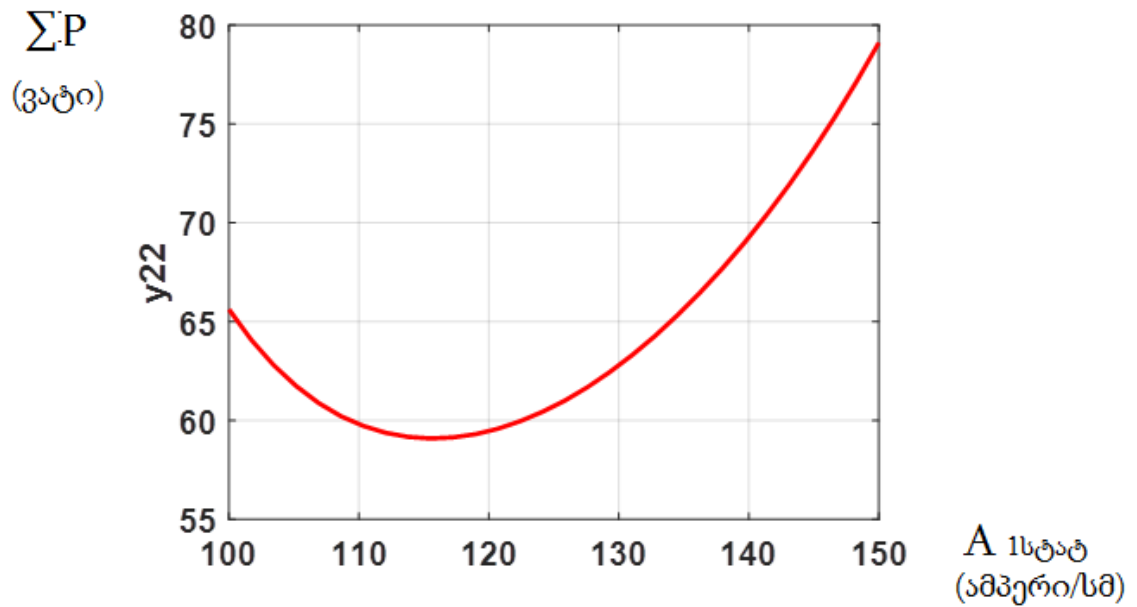
ნახ. 4.27. $P_{\text{ელექ}}$ (y21) ცვლადის $D_{1\text{შიდა}}$ (y1) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი



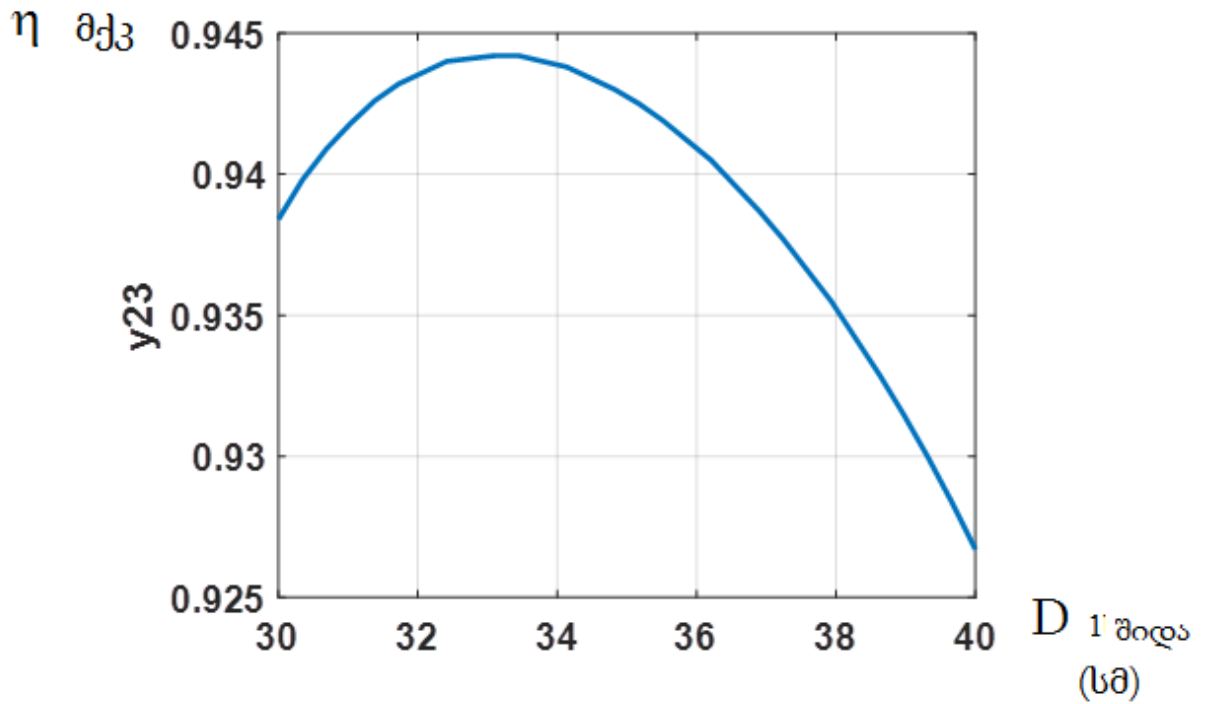
ნახ. 4.28. $P_{ელექ}$ (y_{21}) ცვლადის $A_{1სტატ}$ (y_4) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი



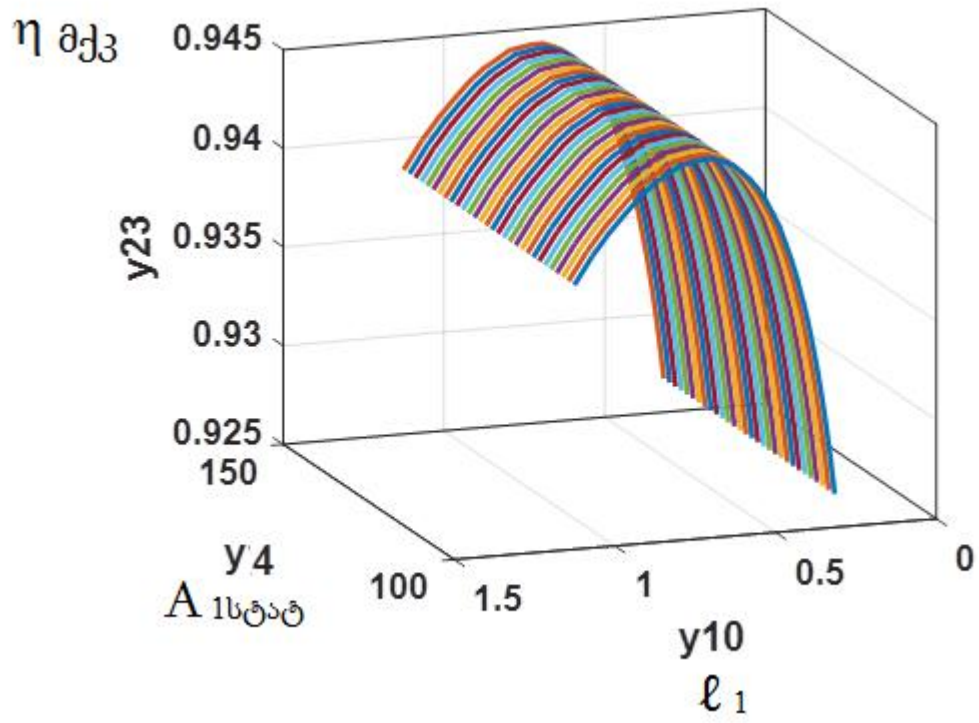
ნახ. 4.29. ΣP (y_{22}) ცვლადის D_1 (y_1) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი



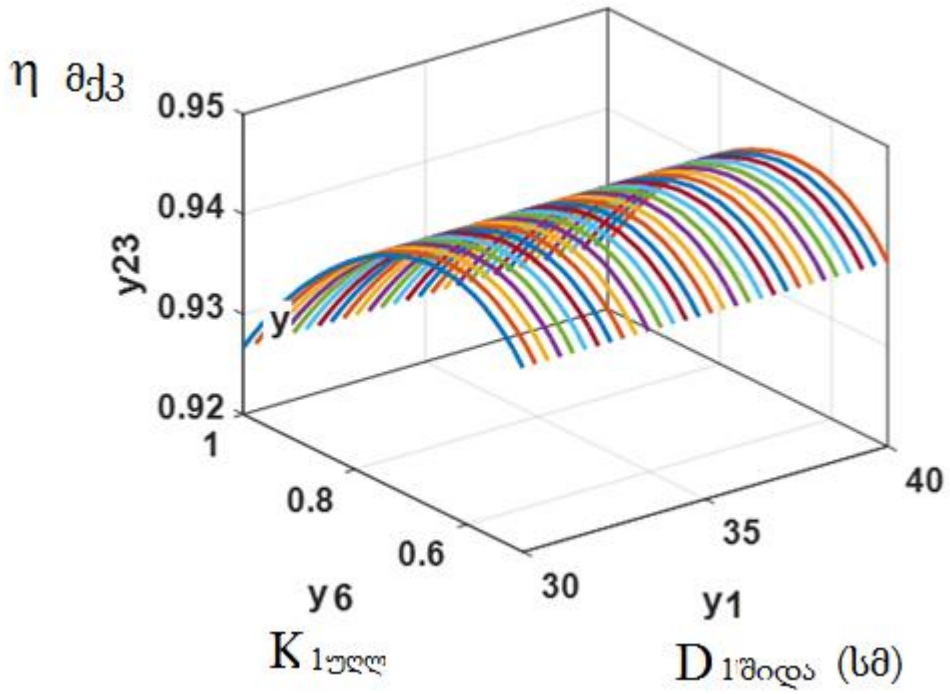
ნახ. 4.30. $\sum P(y_{22})$ ცვლადის $A_{1\text{სტატ}}$ (y_4) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი



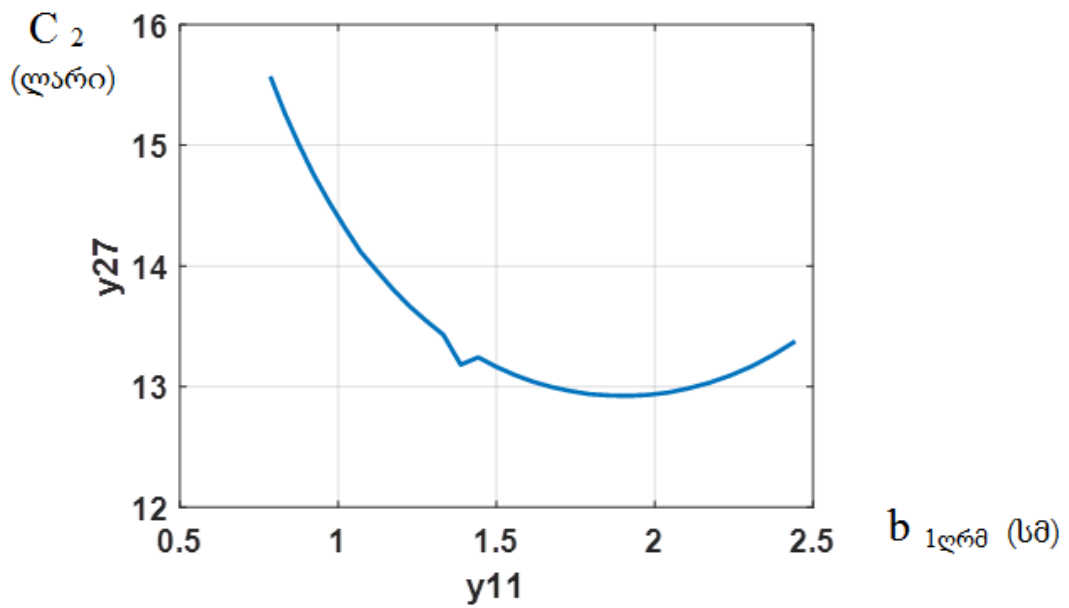
ნახ.4. 31. η (y_{23}) ცვლადის $D_1(y_1)$ ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი



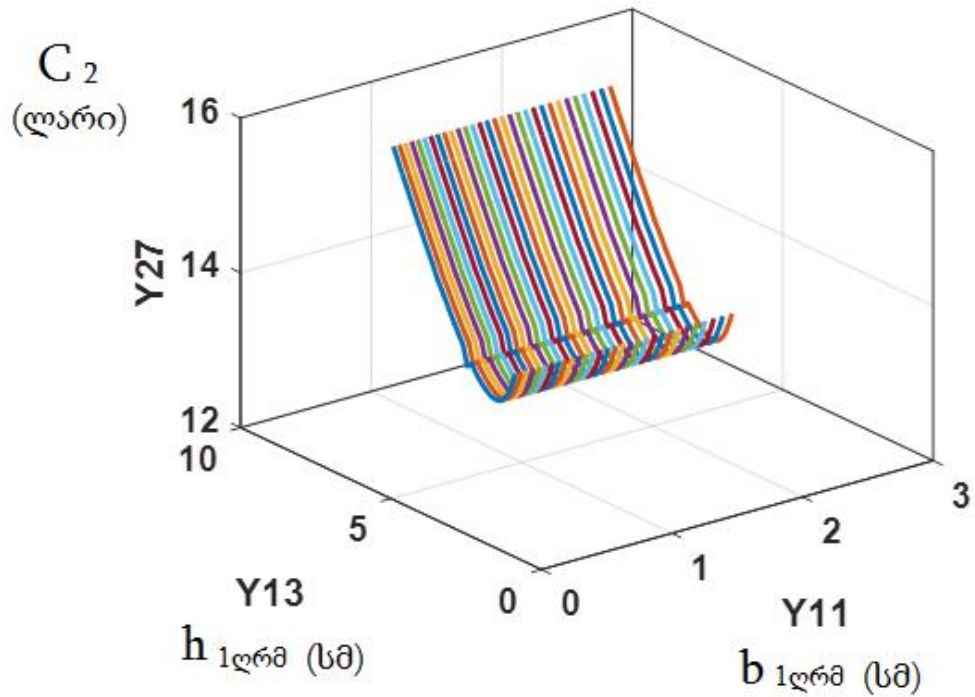
ნახ. 4.32. η (y_{23}) ცვლადის $A_{1სტატ}$ (y_4) და l_1 (y_{10}) ცვლადებზე დამოკიდებულების გრაფიკი



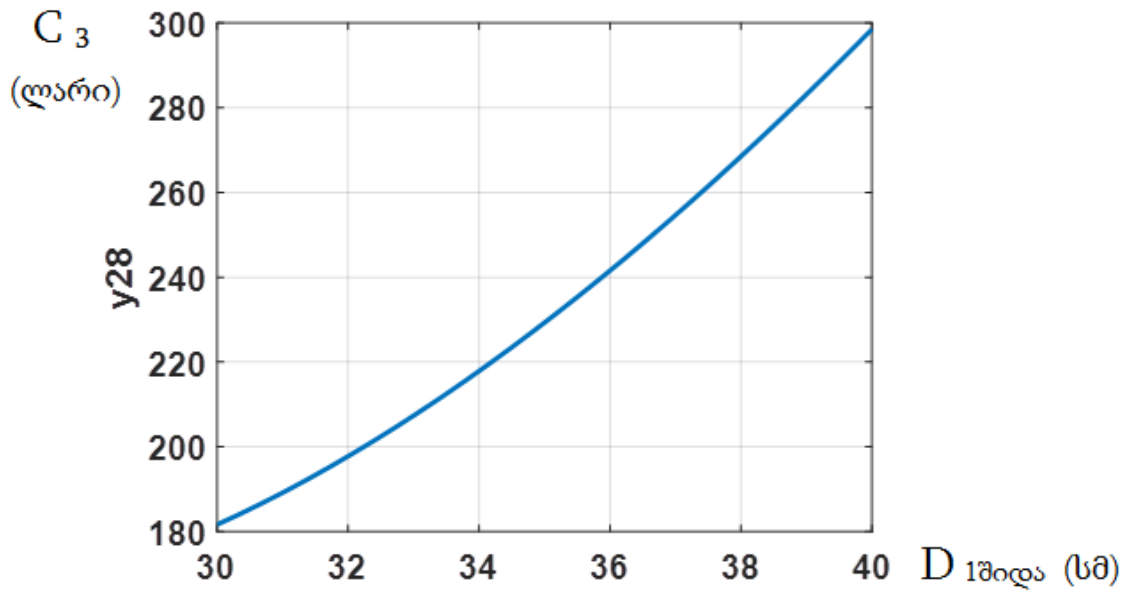
ნახ. 4.33. η (y_{23}) ცვლადის $D_{1შიდა}(y_1)$ და $K_{1ულ}(y_6)$ ცვლადებზე დამოკიდებულების გრაფიკი



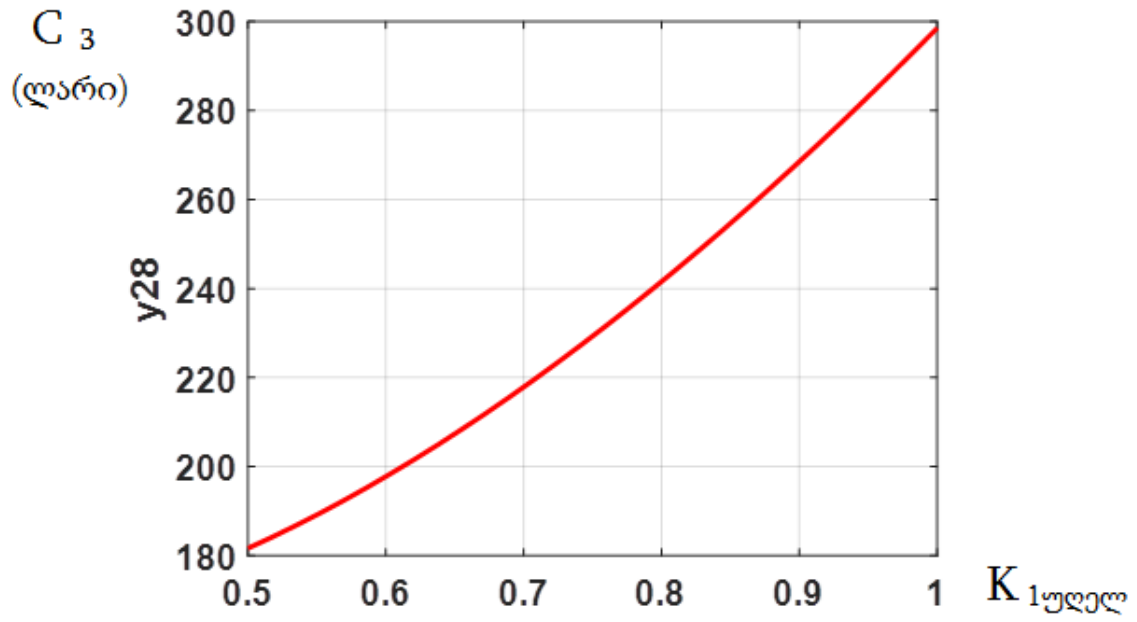
ნახ. 4.34. C_2 (y_{27}) ცვლადის $b_{1ლრმ}(y_{11})$ ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი



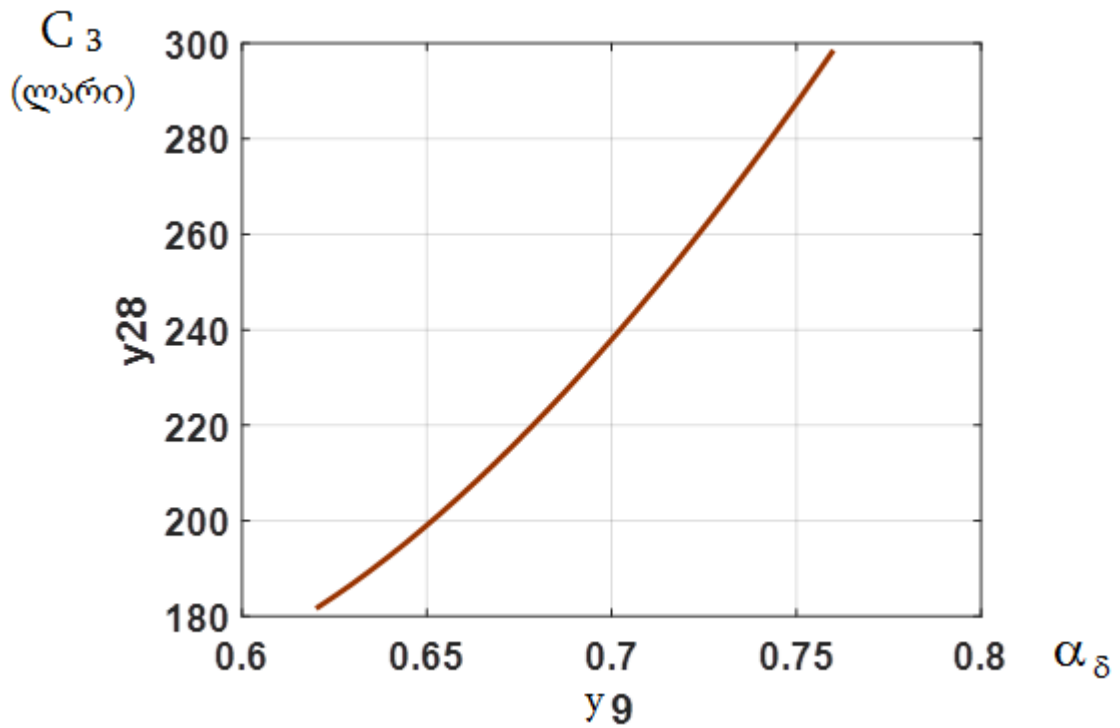
ნახ.4. 35. C_2 (y27) ცვლადის $b_{1ლრმ}$ (y11) და $h_{1ლრმ}$ (y13) ცვლადებზე დამოკიდებულების გრაფიკი



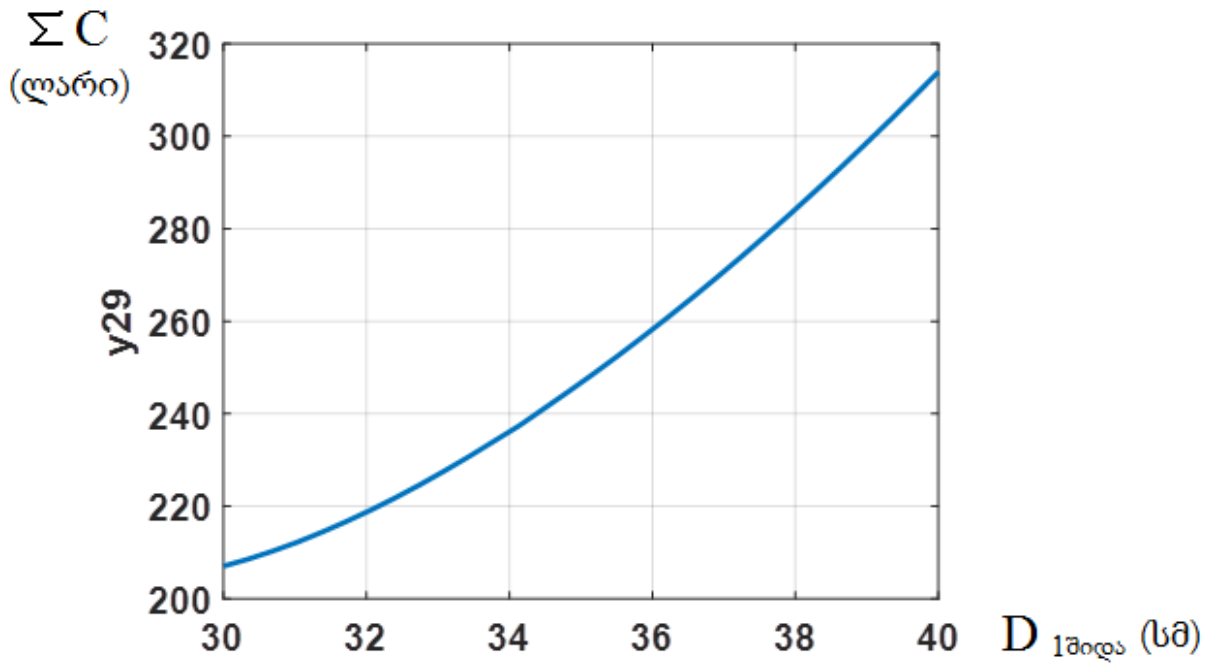
ნახ.4 36. C_3 (y28) ცვლადის $D_{1შიდა}$ (y1) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი



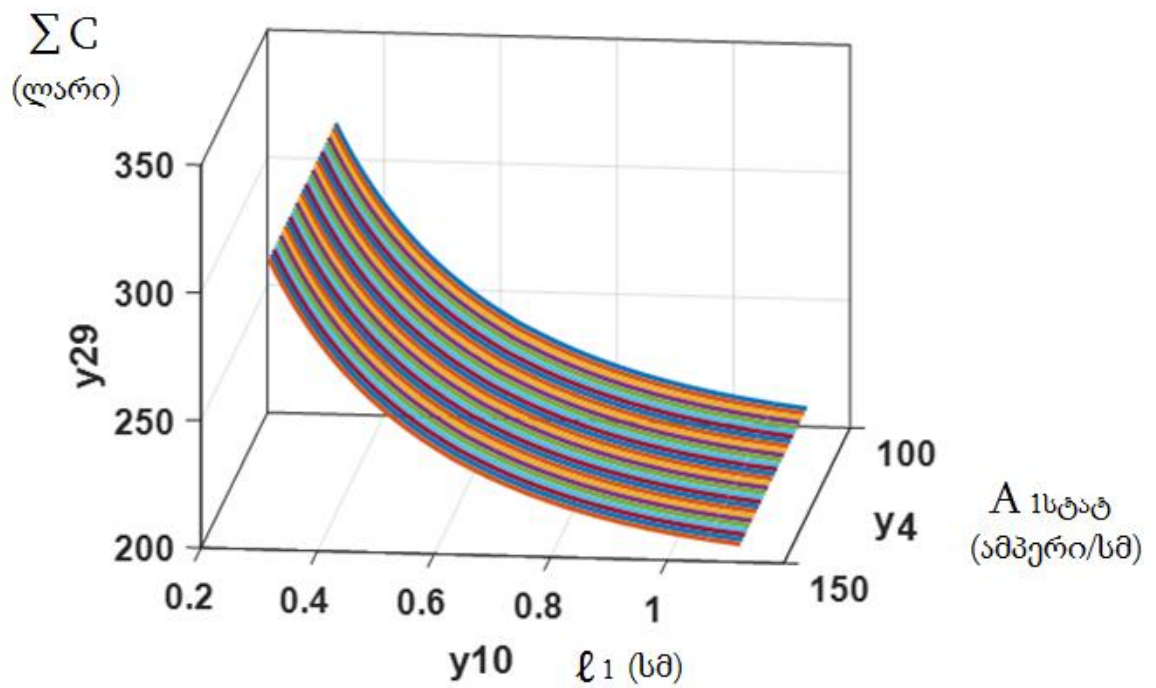
ნახ. 4.37. C_3 (y_{28}) ცვლადის $K_{1უღელ}$ (y_6) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი



ნახ. 4.38. C_3 (y28) ცვლადის α_8 (y9) ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი



ნახ. 4.39. Σc (y29) ცვლადის $D_{1შიდა}(y1)$ ცვლადზე დამოკიდებულების გრაფიკი



ნახ. 4.40. $\sum C$ (y29) ცვლადის $A_{1სტატ}$ (y4) და I_1 (y10) ცვლადებზე დამოკიდებულების გრაფიკი

თავი V

ძრავა-გენერატორის გამოსაკვლევი უნივერსალური სტენდი

ძრავა-გენერატორის გამოსაცდელი უნივერსალური სტენდი შედგება რამდენიმე ბლოკისაგან ესენია:

1. მუდმივი დენის შერეული აგზნების ძრავა.
2. რეგულირებადი კვების წყარო.

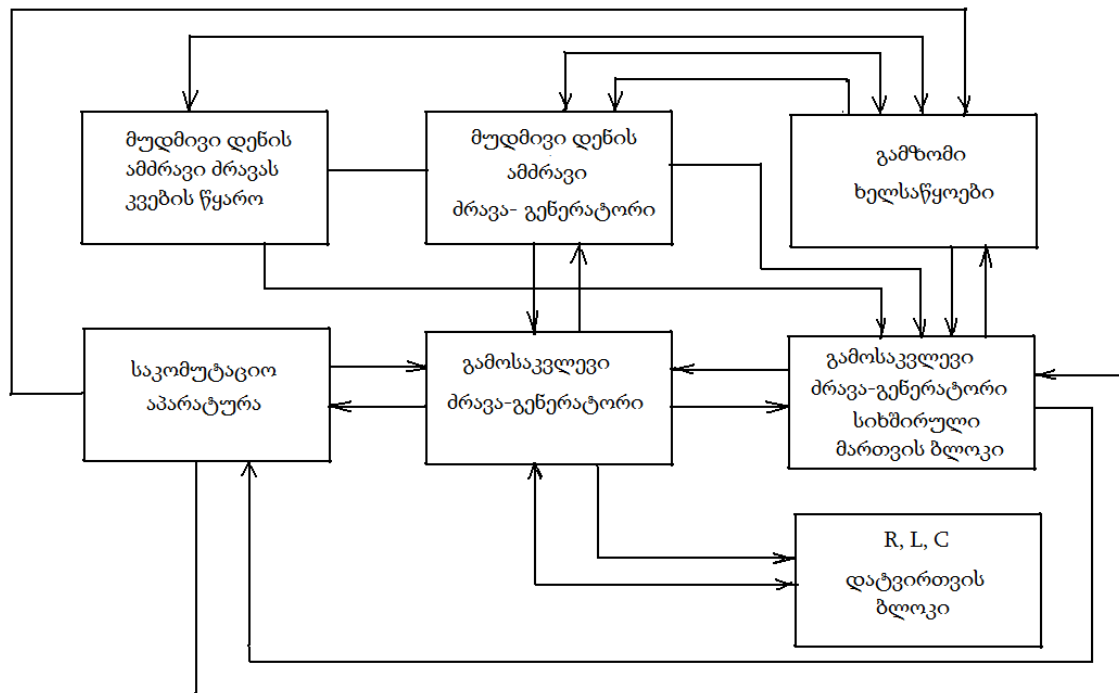
ძრავას შეუძლია იმუშაოს როგორც ძრავას, ასევე ელექტრომაგნიტური მუხრუჭის რეჟიმში. კერძოდ, დამოუკიდებელი აგზნების რეჟიმში, თუ მუდმივი დენის ძრავს დავტვირთავთ აქტიური წინააღმდეგობით და დავაფიქსირებთ დამუხრუჭებულ მომენტს, მივიღებთ მომენტის საზომ ხელსაწყოს.

როდესაც საჭიროა ძრავა-გენერატორის გამოკვლევა გენერატორულ რეჟიმში, საკომუტაციო ბლოკის საშუალებით ამძრავ მუდმივი დენის ძრავას ვაწვდით კვებას, მოგვყავს ბრუნვის მოძრაობაში და ვაფიქსირებთ ჩვენთვის საჭირო პარამეტრებს.

თუ გვჭირდება გამოსაცდელი ძრავა-გენერატორის გამოკვლევა ძრავას რეჟიმში, ამისათვის შესაბამისი კვების წყაროს საკომუტაციო ბლოკის საშუალებით ძრავს ვკვებავთ სიხშირული კვების ბლოკით, მუდმივი დენის ძრავა გადაგვყავს გენერატორულ რეჟიმში, ვტვირთავთ შესაბამისი აქტიური დატვირვით და ვაფიქსირებთ ჩვენთვის საინტერესო პარამეტრებს.

1. მუდმივი დენის კვების წყაროს ბლოკი. მისი დანიშნულებაა მუდმივი დენის ამძრავი ძრავას აგზნების და ღუზის წრედის კვება გამართული ძაბვით. ძაბვის სიდიდის რეგულირება ხდება 'ძაბვის ლაბორატორიული ავტოტრანსფორმატორების და გამმართველების საშუალებით.

2. ცვლადი დენის, ცვლადი სიხშირის ინვესტორული ბლოკი, რომელიც გამოიყენება გამოსაცდელი ძრავა-გენერატორის კვების წყაროსათვის ძრავას რეჟიმში და უზრუნველყოფს სიხშირისა და ძაბვის თანაფარდობის მუდმივობას.
3. დატვირთვის წინააღმდეგობების ბლოკი შედგება სამი სხვადასხვა ტიპის, აქტიური, ინდუქციური და ტევადური წინააღმდეგობების წყობილისაგან, რომელთა საშუალებითაც შესაძლებელია გამოსაცდელი გენერატორი დავტვირთოთ ერთფაზა, ორფაზა, სამფაზა აქტიური, ინდუქციური და ტევადური დატვირთვით ან შერეული RL, RC, RLC, Le ხასიათის დატვირთვით და გამოვიკვლიოთ შესაბამისი პროცესები.
4. გამზომი ხელსაწყოების ბლოკი, ესენია სტაციონარულად ჩართული ან გადასატანი ტიპის ხელსაწყოები, რომლებიც მუდმივად ან ლოკალურად აფიქსირებენ როგორც ამძრავი მექანიზმის, ასევე გამოსაცდელი ძრავა-გენერატორის გამოსავალ პარამეტრებს. გამზომი ხელსაწყოების ჩამონათვალი მოცემულია დანართ II – ში.
5. საკომპუტაციო ბლოკის დანიშნულებაა გადავიყვანოთ ამძრავი მექანიზმი ძრავას რეჟიმიდან გენერატორულ რეჟიმში და შესაბამისად გამოსაცდელი ძრავა-გენერატორი გადავიყვანოთ გენერატორულ რეჟიმიდან ძრავას რეჟიმში.



ნახ. 5.0. ძრავა-გენერატორის გამოსაცდელი უნივერსალური სტენდის ბლოკური სქემა

5.1 ძრავა-გენერატორის კვლევის მეთოდთა გამოსაცდელი უნივერსალური სტენდის საშუალებით.

ძრავას და გენერატორის გამოსაკვლევი შემაჯავალი და გამოსავალი პარამეტრები შეიძლება დავყოთ ორ ჯგუფად:

1. პარამეტრები, რომლებიც თვისობრივად განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან.
2. პარამეტრები, რომლებიც თვისობრივად არ განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან.

პარამეტრები, რომლებიც თვისობრივად არ განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან ფიქსირდებიან ერთი და იგივე გამზომი ხელსაწყოების საშუალებით. ასეთებია ძრავა – გენერატორის კორპუსის, გრაგნილის, მაგნიტოგამტარების ცალკეული ნაწილების და ა. შ. ტემპერატურები, ვიბრაცია x, y, z ღერძების მიმართ, გეომეტრიული ზომები, მასა, ხმაურის სიდიდე ძრავას და გენერატორული რეჟიმების დროს, ბრუნვის სიჩქარე, საიმედობის პარამეტრები, ძაბვა, დენი, აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრე და ა. შ.

თვისობრივად განსხვავებულ პარამეტრებს მიეკუთვნება ძრავას გამშვი მომენტი (არსებობს მრავალსაფეხურიანი გაშვება, სადაც თითოეული საფეხურის ხანგრძლივობა შეირჩევა მოთხოვნილების მიხედვით).

გაშვების დროის ჯამური ხანგრძლივობა,

მაქსიმალური გამშვი მომენტი, მაქსიმალური გამშვი დენი, დარტყმის დენი, გენერატორის შემთხვევაში გამომუშავებული ელექტროენერჯის ხარისხი, ფორმა, ძაბვის სტაბილიზაციის ინტერვალი.

ცნობილია, რომ ძრავას მექანიკური მახასიათებლის გადასაღებად და გამშვი მომენტის გასაზომად გამოიყენება სხვადასხვა ტიპის მომენტაიმერები: ინდუქციური, მაგნიტური ფხვნილიანი, იმისდა მიხედვით თუ როგორ სიჩქარესთან გვაქვს საქმე. სტენდის უნივერსალურობა მდგომარეობს, იმაში, რომ მომენტირების მაგივრად გამოყენებულია მუდმივი დენის, შერეული აგზნების ძრავა, რომელიც მუშაობს, როგორც ძრავას, ასევე გენერატორული რეჟიმით.

თუ გამოსაცდელი მოდელის ნიმუში მუშაობს გენერატორულ რეჟიმში, მაშინ სტენდის ამძრავი ძრავა მუშაობს ძრავას რეჟიმში და პირიქით, თუ გამოსაცდელი ნიმუში მუშაობს ძრავას რეჟიმში მაშინ სტენდის ამძრავი გადაგვყავს გენერატორულ რეჟიმში. ამ შემთხვევაში წინასწარ ხდება ამძრავი ძრავას წინასწარი ტარირება და საკუთარი დანაკარგების გათვალისწინებით იანგარიშება მომენტები სტაციონალური და გარდამავალი რეჟიმებისათვის.

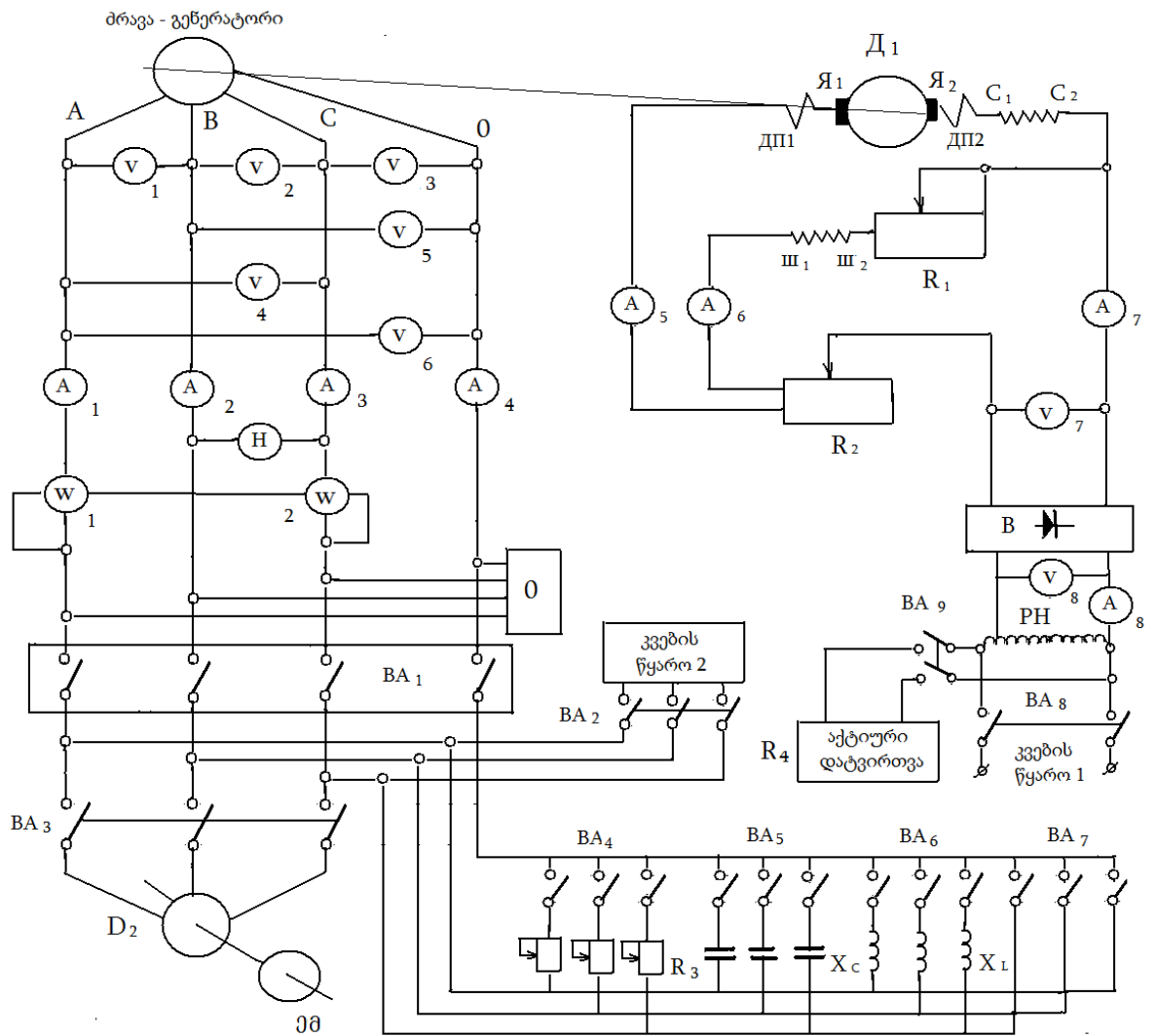
გამოსაცდელი უნივერსალური სტენდის საერთო ხედი და პრინციპული სქემა მოცემულია ნახ. 5.1 და 5.2-ზე – ზე. იგი შედგება ორი ძირითადი ნაწილისაგან: 1. გამოსაცდელი ძრავა-გენერატორის გამზომი ხელსაწყოებისა და დატვირთვის კომპლექსისაგან; 2. შერეული აგზნების მუდმივი დენის ამძრავისაგან, რომელიც იძლევა საშუალებას ვარეგულიროთ მექანიკური მახასიათებლები . კერძოდ მომენტი $M=0 \div M_{ნომ}$ და ბრუნვის სიჩქარე $n=0 \div n_{ნომ}$ აგრეთვე შევცვალოთ მუშაობის რეჟიმი. ძრავას რეჟიმიდან გადავიყვანოთ გენერატორულ რეჟიმში და პირიქით.



ნახ. 5.1. ცვლადი დენის სამფაზა ძრავა-გენერატორის გამოსაკვლევ უნივერსალური სტენდი

პრინციპული ნახაზიდან ჩანს, რომ ძრავა – გენერატორის ბაზური და ბაზური ძრავების ფიქსაცია ხდება V_1, V_2, \dots, V_6 ვოლტმეტრების საშუალებით, დენების გაზომვა ხორციელდება A_7, \dots, A_9 ამპერმეტრებით. აქტიურ სიმძლავრის სიდიდეს იძლევა ორი ვატმეტრის მეთოდი W_{11}, W_{12} ძრავა - გენერატორის გამოსავალი პარამეტრების მრუდების ფორმების გადასაღებად და ანალიზისათვის გამოყენებულია მრავალსხივიანი ოსცილოგრამი, რომელიც გვაძლევს საშუალებას ერთდროულად ვაკონტროლოთ დიდი რაოდენობის სიდიდეები, საჭიროების შემთხვევაში.

ძრავა-გენერატორის გენერატორულ რეჟიმში მუშაობისათვის გამოყენებულია BA_1 ოთხი ცალფაზა ავტომატური ამომრთველი. ერთი სამპოლუსა BA_3 ავტომატური ამომრთველი. შერეული (LR) სიმეტრიული დატვირთვისათვის და BA_4, BA_5, BA_6 ცალფაზა ავტომატური ამომრთველების კომპლექტი, რომლებიც საშუალებას იძლევიან დავტვირთოთ ძრავა-გენერატორი გენერატორულ სიმეტრიულ და ასიმეტრიულ რეჟიმებში, გარდა ამისა ვცვალოთ დატვირთვის ხასიათი LCR ჩვენთვის სასურველ კომბინაციების მიხედვით. გარდა ამისა BA_7 სამი ცალფაზა ავტომატური ამომრთველების საშუალებით შეიძლება ჩავატაროთ ერთი, ორი და სამფაზა მოკლე ჩართვის რეჟიმები.



ნახ.5.2. ძრავა-გენერატორის გამოსაცდელი უნივერსალური სტენდის ელექტრო სქემა

ასე მაგალითად, იმისათვის, რომ ჩავატაროთ ერთფაზა მოკლეხართვის ცდა, საჭიროა გამოირთოს BA2, BA3, BA4, BA5, BA6. ავტომატური ამომრთველები და ჩაირთოს BA7 ერთფაზა ავტომატური ამომრთველების ჯგუფიდან ერთერთი ავტომატური ამომრთველი (ან A ან B ან C ფაზის) შესაბამისად მივიღებთ ერთერთი ფაზის მოკლე ჩართვას.

BA1,BA2,...,BA9 – ავტომატური ამომრთველები, V1,V2,...,V8 – შესაბამისად მუდმივი და ცვლადი ძაბვის ვოლტმეტრები, A1,A2,...,A8 შესაბამისად მუდმივი და ცვლადი დენის ამპერმეტრები, W1,W2 – ცვლადი კვების წყაროს სიმძლავრის გამზომი ხელსაწყოები – ვატმეტრები R1,R2,R3,R4 – აქტიური წინააღმდეგობები, Xc,XL – ტევადური

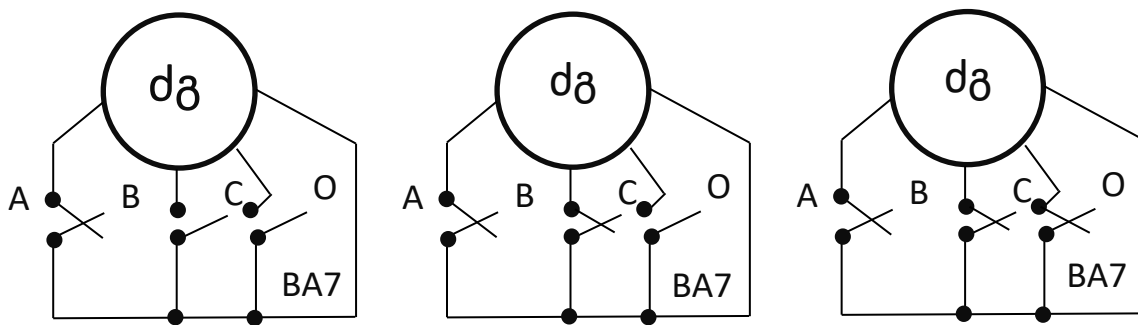
და ინდუქტიური წინააღმდეგობათა წყობილი O – ოსცილოგრაფი, კვების წყარო 1, კვების წყარო 2, D_2 ასინქრონული სამფაზა, მოკლედშერთულროტორიანი ძრავა სიმეტრიული LR დატვირთვის იმიტაციისათვის, ემ – ელექტრომაგნიტური მუხრუჭი,

D_1 – მუდმივი დენის შერეული აგზნების ძრავა,

$\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$ – ღუზის გრაგნილი, C_1-C_2 – მიმდევრობითი აგზნების გრაგნილი, $\text{III}_1-\text{III}_2$ – პარალელური აგზნების გრაგნილი, ДП1-ДП2 დამატებითი პოლუსების აგზნების გრაგნილები.

B – გამმართველი, ДГ – გამოსაკვლევ ძრავგენერატორი.

სქემატურად ერთი, ორი ან სამფაზა მოკლე შერთვის ფრაგმენტები გამოსახულია ნახაზ 5.3 – ზე.



ნახ. 5.3. ძრავა-გენერატორის ა) ერთფაზა, ბ) ორფაზა და გ) სამფაზა მოკლექართვის რეჟიმების სქემები

ძრავა-გენერატორის გენერატორულ რეჟიმში მუშაობისას საჭიროა დავიცვათ მანიპულაციების შემდეგი თანმიმდევრობა:

1. მუდმივი დენის ამძრავი ძრავის მარეგულირებელი აქტიური წინააღმდეგობები R_1 და R_2 დავაყენოთ მაქსიმალური წინააღმდეგობების სიდიდეზე.
2. ჩავრთოთ BA8 ავტომატური ამომრთველი და PH ერთფაზა ცვლადი დენის რეგულატორის საშუალებით ვარეგულიროთ 1 კვების წყაროს ძაბვის სიდიდე.

3. პარალელური აგზნების გრაგნილის დენი ვარეგულიროთ R1 რეოსტატის საშუალებით, ხოლო ღუზის დენი ვცვალოთ R2 რეოსტატის საშუალებით.

4. მივიღოთ სასურველი მაბრუნნი მომენტი და ბრუნვის სიჩქარე.

Д1 ამძრავი ძრავი მექანიკურ კავშირშია გამოცდილ ДГ ძრავა-გენერატორთან. შესაბამისად ძრავა-გენერატორის ბრუნვის შემთხვევაში მის A,B,C,D მომჭერებზე გაჩნდება ძაბვა, რომლის სიდიდე და სიხშირე დამოკიდებული იქნება ამძრავი Д1 ძრავის მექანიკურ მახასიათებელზე $M=f(n)$ და R, X_c , X_L , RLC ჩვენს მიერ შერჩეული დატვირთვების კომბინაციებზე.

ძრავა-გენერატორის გენერატორულ რეჟიმში მუშაობის დროს BA2 კვების წყარო 2 – ის ავტომატური ამომრთველი აუცილებლად უნდა იყოს გამორთული.

გენერატორის დატვირთვის მახასიათებლების გადასაღებად საჭიროა BA1 ავტომატური გამომრთველი ჩაირთოს,

BA7 – ის სამივე ერთპოლუსა ავტომატური გამომრთველი გამოირთოს და BA3,BA4,BA5,BA6 ავტომატური ამომრთველი ჩაირთოს იმის და მიუხედავად თუ როგორი ხასიათის ექსპერიმენტს ვატარებთ. კერძოდ: სიმეტრიულს თუ არასიმეტრიულთ – სუფთა აქტიური, ტევადური, ინდუქციური, თუ შერეული ხასიათის დატვირთვებით.

ძრავა-გენერატორში ძრავას რეჟიმში გამოცდისათვის, საჭიროა D1 ამძრავი ძრავის სქემა მოვამზადოთ გენერატორული რეჟიმისათვის, კერძოდ:

1. გამოვრთოთ კვების წყარო 1 – ის BA8 ავტომატური გამომრთველი,
2. R4 აქტიური დატვირთვის ბლოკი მოვიყვანოთ ნულოვან მდგომარეობაში და ჩავრთოთ BA9 ავტომატი
3. ჩავრთოთ კვების წყარო 2 – ის BA2 ავტომატური ამომრთველი.
4. ჩავრთოთ BA1 ავტომატური ამომრთველი კვების წყარო 2 წარმოადგენს სამფაზა ცვლადი დენის რეგულირებად კვების წყაროს, რომელიც იძლევა საშუალებას სიხშირისა და ძაბვის თანაფარდობა შეინარჩუნოს მუდმივი $f/u = \text{const}$.

იმისათვის, რომ ძრავა-გენერატორი დავტვირთოთ ძრავას რეჟიმში, საჭიროა R4 აქტიური დატვირთვის წინააღმდეგობების ცვლა შესაბამისი სიდიდეებით.

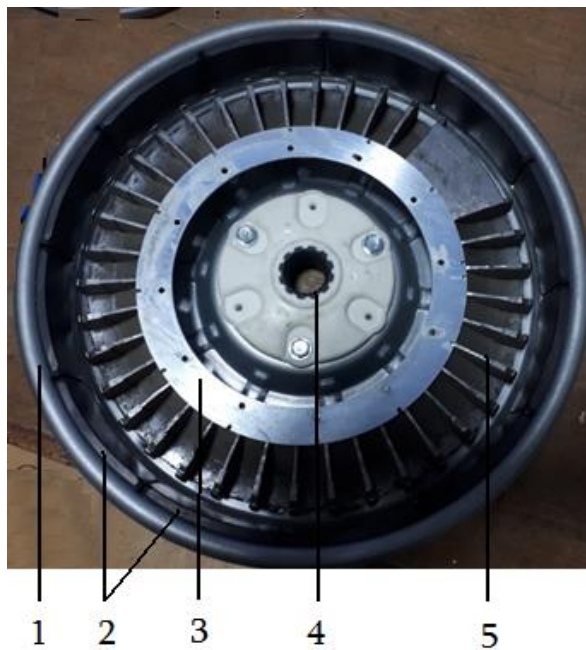
5.2. ცვლადი დენის სამფაზა, მუდმივმაგნიტებიანი კლასიკური შესრულების გენერატორის ექსპერიმენტული კვლევა

ექსპერიმენტალური კვლევის ობიექტს წარმოადგენს ცვლადი დენის სამფაზა, მუდმივმაგნიტებიანი აგზნების კლასიკური შესრულების, ავტონომიურ რეჟიმში მომუშავე გენერატორი. ცნობილია, რომ მძლავრ სისტემასთან პარალელურ რეჟიმში მომუშავე გენერატორები, რომელთა სიმძლავრე არათანაზომადია სისტემის სიმძლავრესთან, სისტემის ენერგეტიკულ პარამეტრებზე, როგორცაა დაბვა, სიხშირე, სიმძლავრის კოეფიციენტი, მკვებავი ძბვის მრუდის ფორმა და ა.შ. ზეგავლენას ვერ ახდენენ, რადგანაც მათი წილობრივი მაჩვენებელი უმნიშვნელოა.

სხვა სურათთან გვაქვს ადგილი, როდესაც თანაზომადი სიმძლავრის გენერატორები მუშაობენ პარალელურ და ავტონომიურ რეჟიმში. გამზომი ხელსაწყოების ეკრანზე ნათლად აისახება დაბვისა და დენის მრუდების ფორმის ცვლილება სინუსოიდალურ ფორმასთან შედარებით სხვადასხვა ხასიათის დატვირთვის შემთხვევაში.

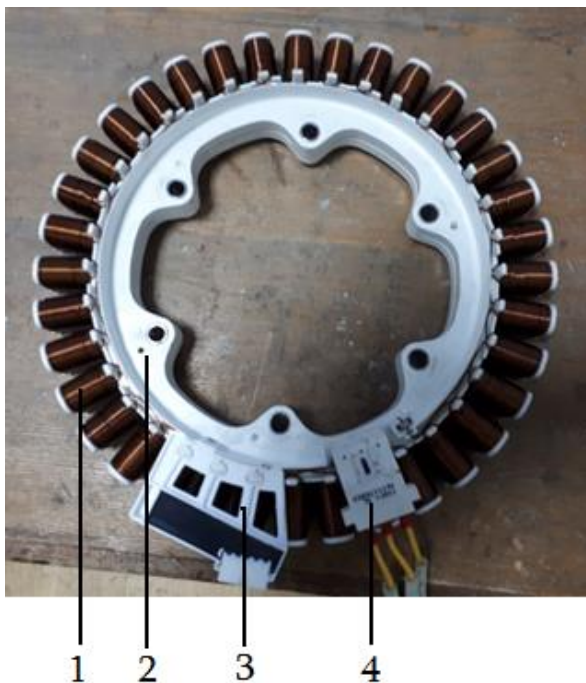
გენერატორის გამოსავალი დაბვის სიდიდე მერყეობს დიდ ფარგლებში რაც დამახასიათებელია მუდმივმაგნიტებიანი აგზნების გენერატორებისათვის. დატვირთვის დენის ზრდასთან ერთად გარკვეულწიკლად ხდება მუდმივმაგნიტებიანი აგზნების სისტემის განმაგნიტება, რაც იწვევს საჰაერო ღრეჩოში მაგნიტური ველის საგრძნობ შემცირებას. მაგნიტური ველის შესუსტება გამოწვეულია აგრეთვე გენერატორის მუშა გრაგნილის შიდა აქტიურ წინააღმდეგობაზე დაბვის ვარდნით. საბოლოო ჯამში ამ ორი ძირითადი მიზეზის გამო ხდება გენერატორის გამოსავალი დაბვის შემცირება. გენერატორებში სადაც გამოყენებულია ელექტრომაგნიტური ან კომბინირებული აგზნების სისტემა, ეს ხარვეზები აღმოიფხვრება ძალზედ იოლად, კერძოდ აგზნების გრაგნილში გამავალი აგზნების დენის შესაბამისი სიდიდის გაზრდით. მუდმივმაგნიტებიანი გენერატორის შემთხვევაში ასეთ ხერხს ვერ გამოვიყენებთ. ამიტომ არსებობს სხვა ხერხები გამოსავალი დაბვის სტაბილიზაციისა. კერძოდ ვოლტდამამატებელი ტრანსფორმატორების გამოყენება, კონდენსატორული წყობილის ჩართვა, ინვერტორული ბლოკის მიერთება და სხვა.

ნახ. 5.4-ზე და ნახ. 5.5-ზე წარმოდგენილია ექსპერიმენტალური მუდმივმაგნიტებიანი ძრავა-გენერატორის როტორისა და სტატორის კვანძები.



ნახ. 5.4. ძრავა - გენერატორის როტორი:

1 - როტორის გარე კორპუსი; 2 - მუდმივი მაგნიტები; 3 - როტორის შიდა კორპუსი; 4 - როტორის ღერძი; 5 - როტორის კორპუსის ტიხრები



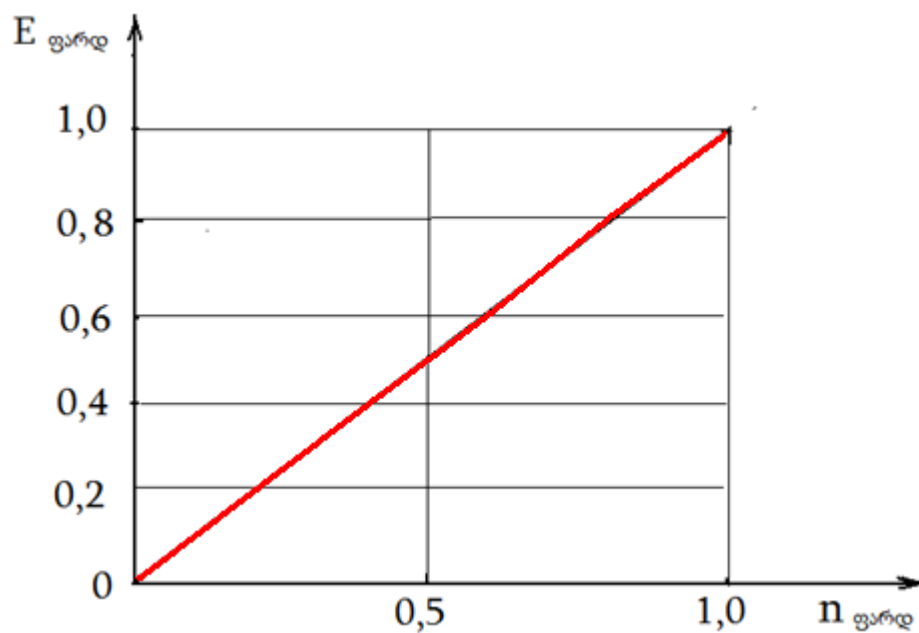
ნახ. 5.5 ძრავა - გენერატორის სტატორი:

1 - ელექტრო გრაგნილები; 2 - სტატორის კორპუსი; 3- ; 4- გარდა ამისა შესაძლებელია ტექნოლოგიური და კონსტრუქციული ხერხების გამოყენებით თავიდან ავიცილოთ კვების წყაროს სინუსოიდალური ფორმის დამახინჯება. კერძოდ,

გავზარდოთ საჰაერო ღრეჩო მკაცრი კანონზომიერებით (მათემატიკური კვლევის საფუძველზე მივცეთ მკაცრად განსაზღვრული სიმრუდის რადიუსი).

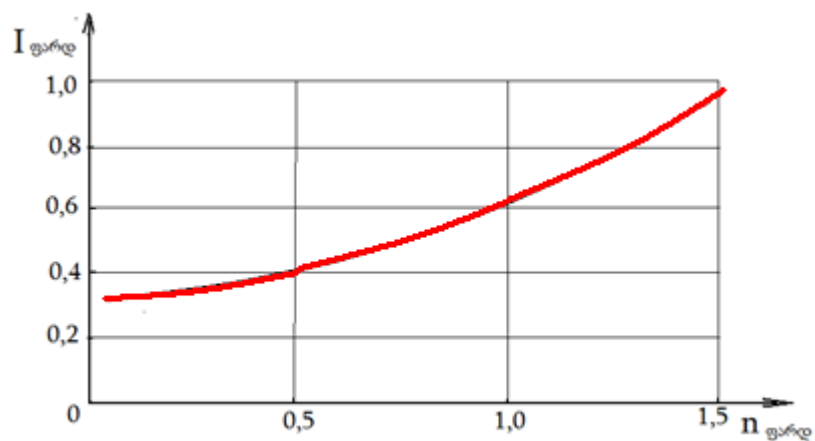
ეს უკანასკნელი გარკვეული კანონზომიერებით მიუახლოებს მაგნიტური ველის ფორმას საჰაერო ღრეჩოში სინუსოიდალურ მრუდს, შეამცირებს დამაგნიტების მრუდის უკანდაბრუნების კუთხეს.

ნახ. 5.6-ზე მოცემულია გენერატორის ელექტრომამოძრავებელი ძალის დამოკიდებულების მრუდი ბრუნვათა სიხშირეზე ფარდობით ერთეულებში. ფარდობითი ერთეულები იანგარიშება ნომინალურ სიდიდეებთან მიმართებაში.

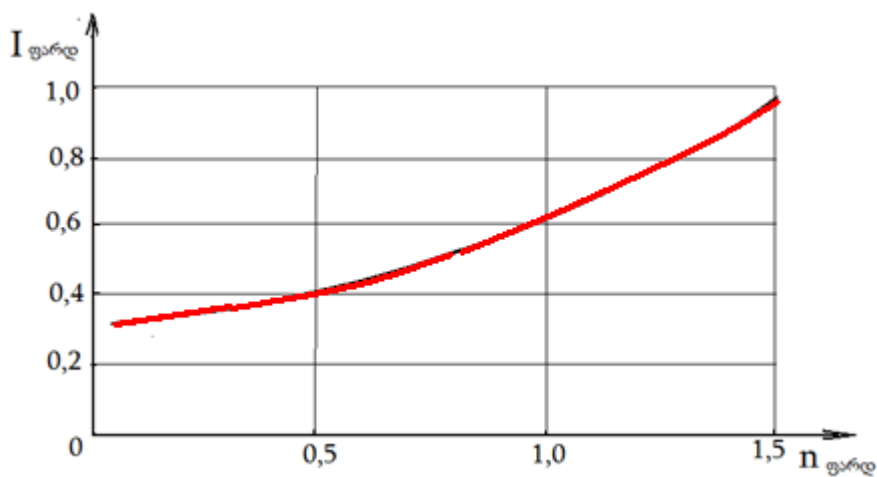


ნახ. 5.6. ემძ-ს დამოკიდებულების გრაფიკი ბრუნვათა სიხშირეზე

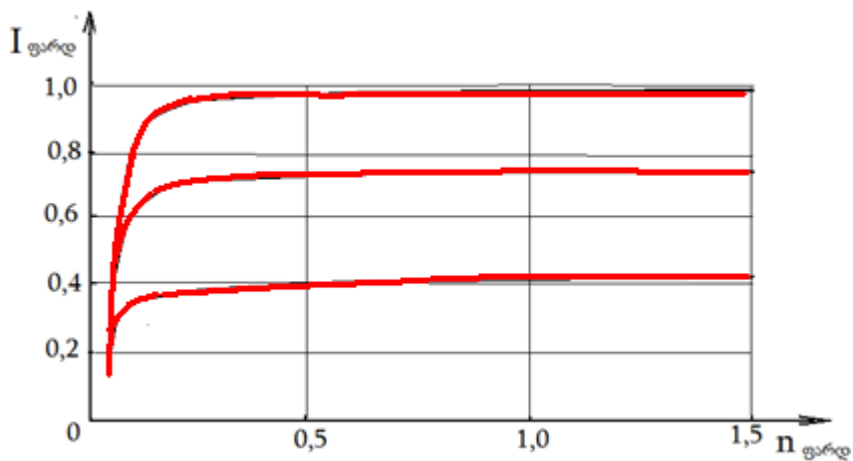
ნახ. 5.7, 5.8 და 5.9 -ზე მოცემულია ექსპერიმენტალური მრუდები დატვირთვის დენისა და გენერატორის შიდა ომური წინააღმდეგობის დამოკიდებულებისა ბრუნვათა სიხშირესთან ფარდობით ერთეულებში. გენერატორის შიდა წინააღმდეგობის ფარდობითი სიდიდეები იანგარიშება მაქსიმალურ ომურ წინააღმდეგობასთან მიმართებაში. დატვირთვის წინააღმდეგობები ატარებენ აქტიურ, აქტიურ-ინდუქტიურ, აქტიურ-ტევადურ ხასიათს.



ნახ. 5.7. დატვირთვის დენის დამოკიდებულება ბრუნვათა სიხშირესთან ფარდობით ერთეულებში აქტიური დატვირთვის შემთხვევაში

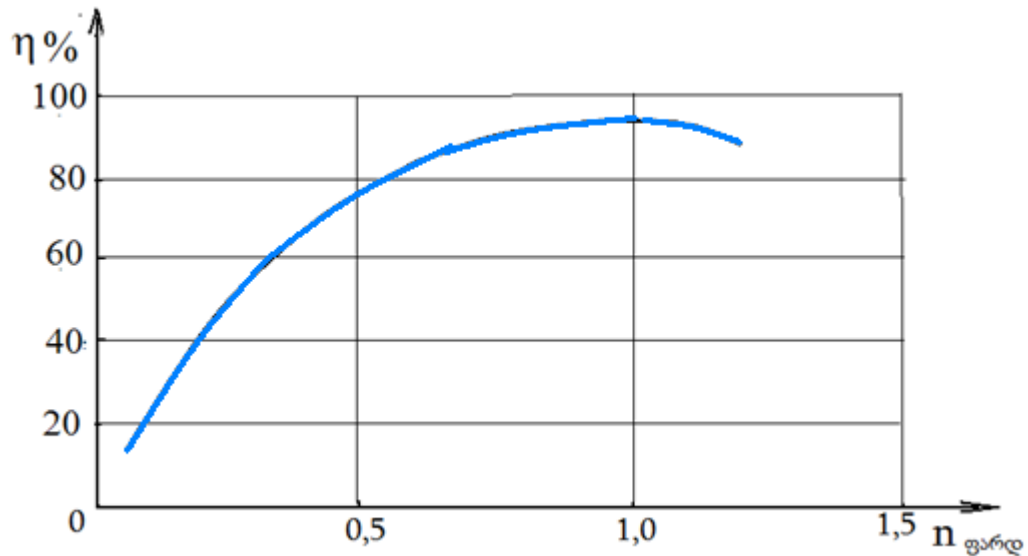


ნახ.5.8. დატვირთვის დენის დამოკიდებულება ბრუნვათა სიხშირესთან ფარდობით ერთეულებში აქტიურ-ინდუქტიური დატვირთვის შემთხვევაში



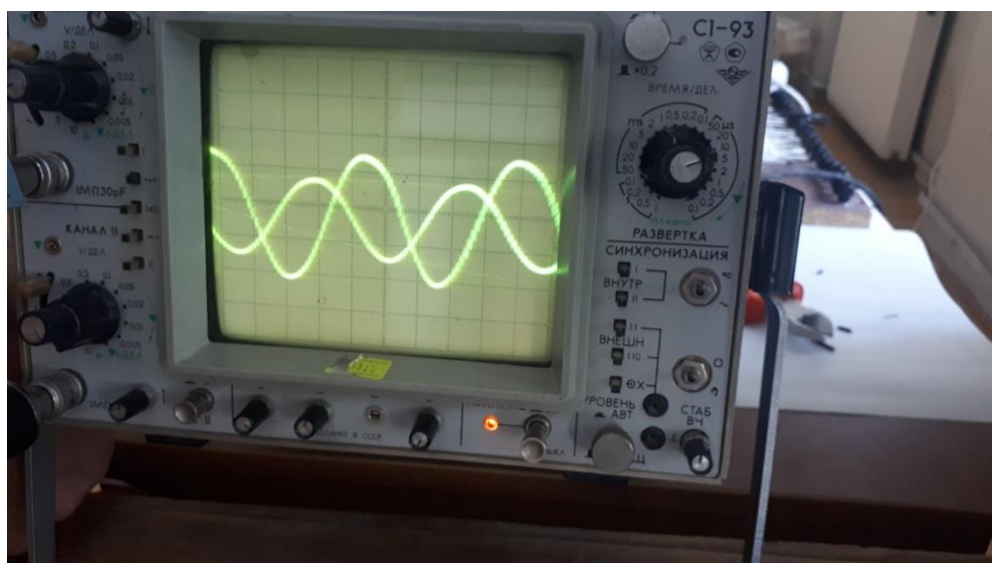
ნახ. 5.9. გენერატორის დატვირთვის დენის დამოკიდებულება ბრუნვათა სიხშირესთან სხვადასხვა სიდიდის შიდა წინააღმდეგობის შემთხვევაში

ნახ. 5.10. -ზე მოცემულია გენერატორის მქკ ბრუნვათა სიხშირესთან დამოკიდებულებით ფარდობით ერთეულებში

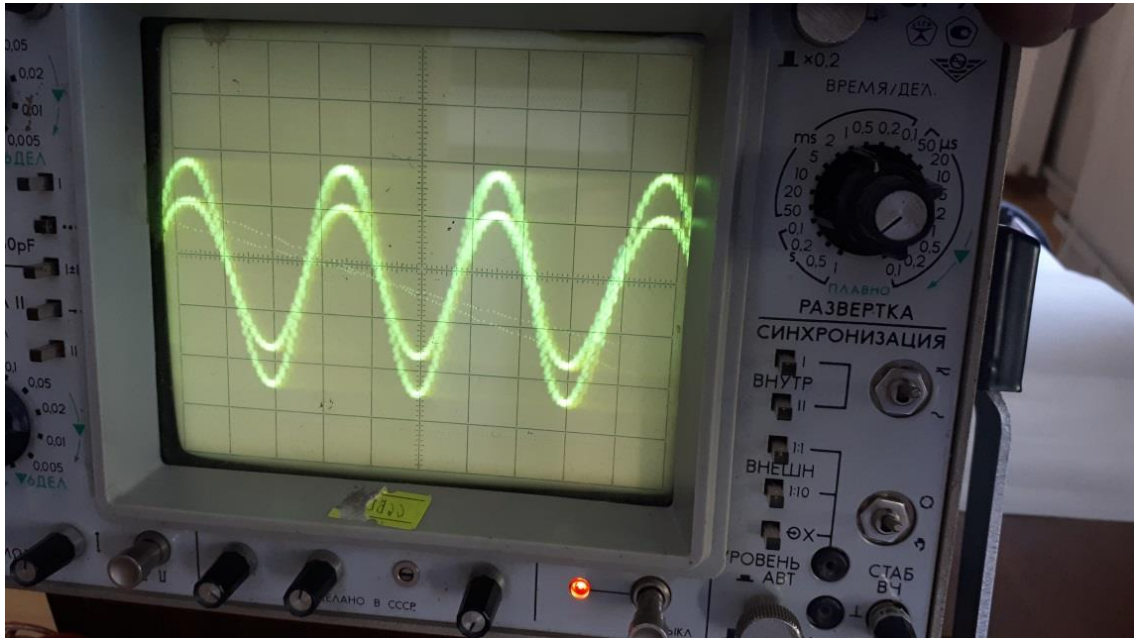


ნახ.5.10. გენერატორის მქკ აქტიური დატვირთვის შემთხვევაში

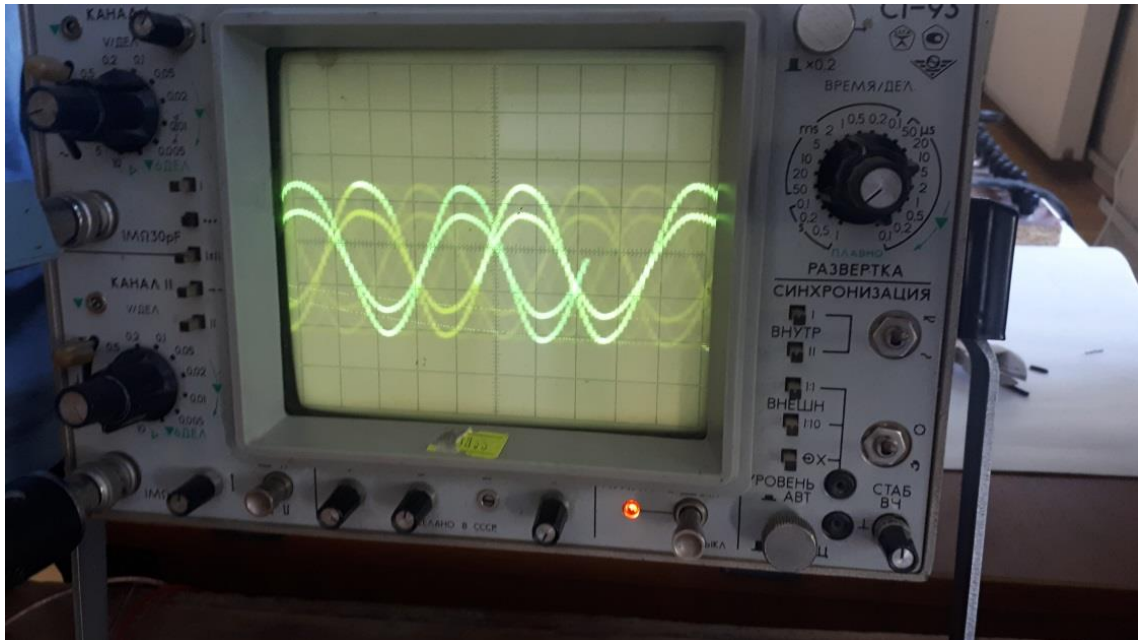
გარდა გასაშუალებური სიდიდეებისა ექსპერიმენტის მსვლელობის დროს ჩაწერილი იქნა გენერატორის მიერ გამომუშავებული ძაბვისა და დენის მყისიერი მნიშვნელობები სინუსოიდალური მრუდების სახით რომლებიც მოცემულია ნახ. 5.11, 5.12 და 5.13-ზე.



ნახ. 5.11. ცვლადი დენის სამფაზა გენერატორის გამოსავალი ძაბვისა და დატვირთვის დენის მყისა მნიშვნელობის მრუდები შერეული დატვირთვის შემთხვევაში



ნახ. 5.12. ცვლადი დენის სამფაზა გენერატორის გამოსავალი ძაბვისა და დატვირთვის დენის მყისა მნიშვნელობის მრუდები აქტიური დატვირთვის შემთხვევაში



ნახ. 5.13. ცვლადი დენის სამფაზა გენერატორის გამოსავალი ძაბვისა და დატვირთვის დენის მყისა მნიშვნელობის მრუდები A და B ფაზისათვის აქტიური დატვირთვის შემთხვევაში

გენერატორის დენისა და ძაბვის მრუდებზე ნათლად ჩანს, აქტიურ-ინდუქციური, აქტიური დატვირთვის შემთხვევაში მრუდების ძვრის კუთხეები.

გარდა ზემოთ ჩამოთვლილი მრუდებისა გადაღებული იქნა გენერატორის სამივე ფაზის ძაბვისა და დენის მრუდები სიმეტრიული და არასიმეტრიული დატვირთვის შემთხვევაში. დაფიქსირებული იქნა უქმი სვლისა და დატვირთვის ძაბვის სიდიდეები არასიმეტრიული დატვირთვის შემთხვევაში. ჩატარდა ვიბრაციების სიდიდეების დაზუსტება x , y და z ღერძების გასწვრივ სხვადასხვა არასიმეტრიული დატვირთვის შემთხვევაში. ჩატარდა ტემპერატურის გაზომვა გენერატორის სხვადასხვა უბნებზე. კერძოდ, შუბლურ ნაწილებში, მაგნიტოგამტარში და ღრმულის სხვადასხვა ჭრილებში.

5.3. ჩატარებული ექსპერიმენტების შედეგები

ძრავა-გენერატორული მოწყობილობის გენერატორული რეჟიმის ექსპერიმენტის მონაცემები ნომინალური დატვირთვის შემთხვევაში წარმოდგენილია ცხრილში 5.1

ცხრილი 5.1

პარამეტრის დასახელება	განზომილება	რივხვითი მნიშვნელობა
ნომინალური ძაბვა U	ვოლტი	230
ნომინალური დატვირთვის დენი I	ამპერი	1,5
ბრუნვათა სიხშირე n	ბრ/წთ	1000
სიმძლავრის კოეფიციენტი	-	1
მაგნიტოგამტარის ტემპერატურა	$^{\circ}C$	90
გრაგნილის შუბლური ნაწილის ტემპერატურა	$^{\circ}C$	85

დრუმი მდებარე გრაგნილის ტემპერატურა	°C	98
--	----	----

ძირითადი დასკვნები

სადისერტაციო ნაშრომის „საავიაციო აირტურბინული ძრავებისათვის ელექტროძრავა-გენერატორული მოწყობილობების პარამეტრების ოპტიმიზაცია“ ძირითადი მიზანია საჰაერო ხომალდების აირტურბინულ ძრავებში გამოყენებული ელექტროძრავა-გენერატორული მოწყობილობების ალტერნატიული ვარიანტის დაპროექტება და დამზადება რომელიც გამორჩეული იქნება გაუმჯობესებული მახასიათებლებით, კერძოდ მაღალი საიმედოობით, მცირე მასა-გაბარიტებით, ნაკლები თვითღირებულებით და სხვა. აქედან გამომდინარე შესრულებული სამუშაოს მიხედვით შეიძლება გაკეთდეს შემდეგი ძირითადი დასკვნები:

- საავიაციო აირტურბინული ძრავების ტექნიკურ და საექსპლუატაციო მახასიათებლების შემდგომი გაუმჯობესების მიზნით მიზანშეწონილია განხორციელდეს გაშვების სისტემის და გენერატორული მოწყობილობების ინტეგრირება ძრავების ვენტილატორის და კომპრესორების კვანძებში (როტორებში და მათ შესაბამის კორპუსებში) რითაც უზრუნველყოფილი იქნება საჭირო ენერგეტიკული სიმძლავრეების რეალიზაცია მექანიკური დანაკარგების გარეშე;

- საავიაციო მოწყობილობების ოპტიმალური პროექტირების ერთ-ერთ ძირითად მოთხოვნას წარმოადგენს მასა - გაბარიტების მიმომიზაცია. ძრავა-გენერატორის მასა-გაბარიტების ჯამურ მაჩვენებლებში ელექტროტექნიკურ მასალებს როგორცაა დენგამტარი და მაგნიტოგამტარის სისტემები მნიშვნელოვანი წილი უკავია. შესაბამისად სადოქტორო ნაშრომში დიდი ყურადღება აქვს დათმობილი ოპტიმალური პროექტირების საკითხებს, რომლებიც ეხება ძრავა-გენერატორის შექმნას მინიმალური ელექტროტექნიკური მასალების დანახარჯებით;

- ძრავა-გენერატორული მოწყობილობის მასა შეიძლება წარმოვადგინოთ პოზინომიალური ფუნქციების ჯამით. ასეთი ფუნქციის ექსტრემალური სიდიდეების მიება ყველაზე მოსახერხებელია გეომეტრიული პროგრამირების საშუალებით.

გეომეტრიული პროგრამირების მეთოდი საშუალებას იძლევა ძრავა-გენერატორის დამახასიათებელი გამოსავალი ფუნქციები გამოვსახოთ ცვლადი სიდიდეების ნამრავლისა და გეომეტრიული პროგრამირების ხარისხის მაჩვენებლების საშუალებით;

- ხარისხის მაჩვენებლების მიერ დაგროვებული ინფორმაცია შეიძლება

გავავრცელოთ სხვადასხვა სიმძლავრის მსგავსი კონსტრუქციის ძრავა-გენერატორულ მოწყობილობებზე. გარდა ამისა პროექტირების წინასწარ ეტაპზე შესაბამისი ხარისხის მაჩვენებლების გამოყენება საგრძნობლად აიოლებს ოპტიმალური ვარიანტის მოძებნის პროცესს, ამცირებს ძიების ინტერვალს და იძლევა შემავალი პარამეტრების წინასწარი ფიქსაციის საშუალებას;

- გეომეტრიული პროგრამირების, ექსპერიმენტის დაგეგმვისა და რეგრესიული ანალიზის საშუალებით შექმნილია ძრავა-გენერატორის ოპტიმალური ვარიანტის ძიების მეთოდოლოგია;

- დასაპროექტებელი ობიექტის წარმოდგენა მატრიცული ფორმით ახალი მრავალფუნქციური ხასიათის დამოკიდებულებით აიოლებს და აფართოებს ძრავა-გენერატორის ოპტიმალური პროექტირების შესაძლებლობას;

- იმასთან დაკავშირებით, რომ როგორც მუდმივი დენის ასევე ცვლადი დენის ძრავა-გენერატორულ მოწყობილობების მაღალი საექსპლუატაციო მახასიათებლების მისაღებად მნიშვნელოვანი როლი აკისრიათ მუდმივ მაგნიტებს ამიტომ მოცემულ სადოქტორო ნაშრომში დიდი ყურადღება აქვს დათმობილი არსებული მუდმივი მაგნიტების შედარებით ანალიზს როლებიც დამზადებული არიან როგორც იშვიათ მიწათა (ნეოდიმ-რკინა-ბორი Nd-Fe-B, სამარიუმ-კობალტის SmCo) ასევე იშვიათ მიწათა მეტალების არშემცველ ელემენტებისაგან კერძოდ, კობალტის ნანომავთულების ბაზაზე შემუშავებული ახალი ტექნოლოგიებით (ქიმიური დალექვის მეთოდი და დარტმითი ტალღით ცხლად დაწნევის მეთოდი);

უნივერსალურ სტენდზე ექსპერიმენტალური ძრავა-გენერატორის გამოცდების შედეგად აგებული იქნა შემდეგი მახასიათებლები:

- ელექტრო მამოძრავებელი ძალის E , დატვირთვის დენის I და მარგი ქმედების კოეფიციენტის η დამოკიდებულება ბრუნვათა სიხშირეზე n ;

- მოხსნილი იქნა დატვირთვის დენისა I და გამოსავალი ძაბვის U მყისა მნიშვნელობები სინუსოიდალური მრუდების სახით;

- მოხსნილი იქნა გადახურების ტემპერატურული მონაცემები ძრავა-გენერატორის სხვადასხვა ადგილას კერძოდ შუბლურ ნაწილში და ღრმულში.

თეორიულ და ექსპერიმენტალურ მონაცემებს შორის განსხვავება პროექტირების პირველ ეტაპზე არ აღემატება 15-20 % რაც სრულიად დასაშვებია.

გამოყენებული ლიტერატურა

[1] Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин. Москва. «Высшая школа» 1987 г., 248с.

[2] Копылов И. П. , Клоков В. К. , Морозкин В. П. , Токарев Б.Ф, Проектирование электрических машин – М „Высшая школа” 2002- 757 с

[3] Т. Кенио, С .Нагамори „Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами” Москва ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1989

[4] A. Maisuradze, L. Maisuradze, Z. Gobianidze
PROCEEDINGS OF MECHANICS 2016 The International Conference on Mechanics
2016 OPTIMIZATION OF DESIGN SCHEMES AND PARAMETERS OF
MOTOR-GENERATORS FOR AVIATION GAS TURBINE ENGINES (163-170)

[5] ა. მაისურაძე, ლ.მაისურაძე პატენტი გამოგონებაზე GE P 2017 6732 B „სამკონტურიაწი ტურბორეაქტიული ძრავა”

Левин А. В. , Алексеев И. И. , Лившиц Э. Я. Стартер- генераторная система со встроенным в авиадвигатель электромашиным агрегатом для полностью электрофицированного самолета // Авиационная промышленность. – 2007. - №1. –с.59-52.

[6] А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий ..Газотурбинные двигатели.. ОАО ..Авиадвигатель.. г.Пермь 2005г.

[7] А. КОЛЕН (FR) ПАТЕНТ №RU2490497 C2 (2006г) „Турбореактивный двигатель с электрическим генератором расположенный в вентиляторе”

[8] О.А., Гришанов Д.Г. Федорченко, С.И. Карасин, Ю.М. Ануров, Т.М. Лазоренко, Г.М. Хуторецкий ПАТЕНТ №РФ2252316 „Газотурбинный двигатель” 2006 г

[9] Левин А. В. , Алексеев И. И. , Полностью электрофицированный самолет – от концепции к реализации // Авиационная промышленность -2006 - №2 –с.24-31.

[10] Левин А. В. , Алексеев И. И. , Лившиц Э. Я. Стартер- генераторная система со встроенным в авиадвигатель электромашиным агрегатом для полностью электрофицированного самолета // Авиационная промышленность. – 2007. - №1. –с.59-52.

[11] С.Воронович, В. Каргопольцев, В. Кутахов „АВИА ПАНОРАМА" март-апрель 2009 „ПОЛНОСТЬЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ САМОЛЕТ" стр.14-17

[12] А.Матусевич В, А. Н. Гетья, Ю. В. Шарабан. „ Применение Высококоэрцитивных постоянных магнитов в самолетных агрегатах” (Г П Харьковское агрегатное конструкторское бюро) Електротехніка і Електромеханіка 2006 №1 стр. 33-35

[13] В. Кузьмичев „ГЕНЕРАТОР В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ САМОЛЕТА С ПОВЫШЕННЫМ УРОВНЕМ ЭЛЕКТРОФИКАЦИИ” ОАО „ОКБ Сухого” 2012

[14] T.Maurer, T.Ott, G.Chaboussant, Y.Soumare, J.-Y.Pique mal, G.Viau, “Magnetic nanowires as permanent magnet materials”, Applied Physics Letters, Vol. 91, pp. 172501 (2007).

[15] W.Fang, I.Panagiotopoulos, F.Ott, F.Boué, K.Ait-Atmane, J.-Y.Piquemal, G.Viau, F.Dalmas, “Optimization of the magnetic properties of aligned Co nanowires/polymer composites for the fabrication of permanent magnets”, Journal of nanoparticle research, Vol. 16, No. 2, pp. 2265 (2014).

[16] I.Panagiotopoulos, W.Fang, F.Ott, F.Boué, K.Ait-Atmane, J.-Y.Piquemal, G.Viau, “Packing fraction dependence of the coercivity and the energy product in nanowire based permanent magnets”, Journal of Applied Physics, Vol. 114, No. 14, pp. 143902 (2013).

[17] S.Ener, E.Anagnostopoulou, I.Dirba, L.-M.Lacroix, F.Ott, T.Blon, J.-Y.Piquemal, K.P.Skokov, O.Gutfleisch, G.Viau. “Consolidation of cobalt nanorods: A new route for rare-earth free nanostructured permanent magnets”, Acta Materialia, Vol. 145, pp. 290-297 (2018).

[18] T.Gegechkori, G.Mamniashvili, E.Kutelia, L.Rukhadze, N.Maisuradze, B.Eristavi, D.Gventsadze, A.Akhalkatsi, T.Gavasheli, D.Daraselia, D.Japaridze, A.Shengelaya, “Technology for production of magnetic carbon nanopowders doped with iron and cobalt nanoclusters”, J. Magn. Mater. Vol. 373, 1 January, pp. 200-206 (2015).

[19] B.Godibadze, A.Dgebuadze, E.Chagelishvili, G.Mamniashvili, A.Peikrishvili, "Dynamic consolidation and investigation of nanostructural W-Cu/WY cylindrical billets", Journal of Physics: Conference Series 2018 Mar (Vol. 987, No. 1, p. 012027). IOP Publishing.

[20] T.Gavasheli, G.Mamniashvili, M.Nadareishvili, T.Zedginidze, "Electroless Technology for the Production of Cobalt Magnetic and Photocatalytic Nanopowders and Nanowires", TechConnect Briefs June 17, 42-45 (2019).

[21] G. I. Mamniashvili, D. I. Gventsadze, L. N. Rukhadze, L. A. Maisuradze

WORLD JOURNAL OF CONDENSED MATTER PHYSICS

Fabrication of polymer magnetic nanocomposites containing carbon nanoparticles doped with cobalt nanostructures and study their conductivity, self-healing and adhesion properties 2020

[22] მაკა ცერცვაძე „მუდმივმაგნიტებიანი ამძრავი მობილური სასოფლო-სამეურნეო მანქანებისათვის“ - დისერტაცია აგროინჟინერიის დოქტორის ხარისხის მოსაპოვებლად თბილისი 2011 წელი სიპ-საქართველოს აგრარული უნივერსიტეტი

[23] <https://newatlas.com/military/rolls-royce-advanced-jet-engine-power-tempest-fighter/> Rolls-Royce

[24] докторант Лаша Маисурадзе, Зураб Гобиფидзе „Вопросы предварительного расчета оптимального электромеханического преобразователя энергии с помощью степенных показателей геометрического программирования“ ENERGY №3(91) თბილისი, (30-32)

[25] «ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ СПРАВОЧНИК» / под ред. Ю. М. Пятина. — М.: Энергия, 1980 Куневич А. В., Подольский А. В. Сидоров И. Н. Ферриты: Энциклопедический справочник. Магниты и магнитные системы. Том 1. — М.: Лик, 2004.

[26] Z. A. Maisuradze, L. Maisuradze, Z. Gobianidze

„OPTIMIZACION OF DESIGN SCHEMES AND PARAMETRES OF MOTOR-GENERATORS FOR AVIATION GAS TURBINE ENGINES“ AIR TRANSPORT Aviation University of Georgia №1(12)/2017 TBILISI (79-89)

[27] ნ. მჭედლიშვილი, თ. ხუციშვილი, ი. დავითაშვილი მოდელირების ინსტრუმენტული საშუალება MATLAB/SIMULINK თბილისი: ტექნიკური უნივერსიტეტი, 2013. 138 გვ. გვ.5-66; 004.414.23(02)/1

[28] ნ. მჭედლიშვილი, ი. დავითაშვილი, იმიტაციური მოდელირების სისტემები თბილისი: ტექნიკური უნივერსიტეტი, 2013. 107 გვ. გვ. 3-97.

[29] ზ. ბაიაშვილი Matlab პროგრამული პაკეტის გამოყენების საფუძვლები თბილისი: ტექნიკური უნივერსიტეტი, 2010. 134 გვ.

[30] Дьяконов В.П. MATLAB7.* /R2006/R2007 Самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2008. 768 с.

[31] პატენტი WO2015/191017A1 (17.12.2015) „საჭაერო ხომალდებისათვის ზეგამტარიანი ელექტროძრავა ვენტილატორით“