

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

გრიგოლ ხარშილაძე

როტორზე მრავალფაზა აგზნების გრაგნილიანი მუდმივი
დენის ვენტილური ძრავის დამუშავება და კვლევა

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა „ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“, შიფრი 0405

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

ივლისი, 2016 წ

საავტორო უფლება © 2016 წელი, გრიგოლ ხარშილაძე

თბილისი

2016 წ

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით გრიგოლ ხარშილაძის მიერ შესრულებულ სადოქტორო ნაშრომს დასახელებით: “როტორზე მრავალფაზა აგზნების გრაგნილიანი მუდმივი დენის ვენტილური ძრავის დამუშავება და კვლევა”.

ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის საგამოცდო სადისერტაციო საბჭოზე მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი

ხელმძღვანელი:

პროფ. დემურ კობრეიძე

რეცენზენტი:

რეცენზენტი:

ავტორი: გრიგოლ ხარშილაძე

დასახელება: “როტორზე მრავალფაზა აგზნების გრაგნილიანი მუდმივი დენის ვენტილური ძრავის დამუშავება და კვლევა“.

ფაკულტეტი: ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: 2016 წლის

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

ავტორის ხელმოწერა

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

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

რეზიუმე

სადისერტაციო ნაშრომის ძირითად მიზანს წარმოადგენს მუდმივი დენის ვენტილური ძრავას შექმნა სხვადასხვა დანიშნულების მექანიზმების ელექტროამძრავებისათვის. ძრავა განხორციელებულია ფაზურროტორიანი ასინქრონული მანქანის ბაზაზე. სტატორის სამფაზა გრაგნილი იკვებება მუდმივი დენის ქსელიდან კომუტატორის საშუალებით. კომუტატორი შესრულებულია სამფაზა ბოგური სქემით სრულად მართვად ტირისტორებზე. განხილულია კომუტატორის შესრულება ჩვეულებრივ ტირისტორებზე კონდენსატორული კომუტაციით. როტორზე მოთავსებული აგზნების გრაგნილი იკვებება სამფაზა ძაბვის ქსელიდან. განსახილველ ვენტილურ ძრავას აქვს მუდმივი დენის მანქანის მსგავსად, სიჩქარის რეგულირების ფართო დიაპაზონი და ცვლადი დენის მანქანის საიმედოობა.

მოცემულ ნაშრომში გამოკვლეულია ვენტილური ძრავას მუშაობის სტატიკური, დინამიკური და ენერგეტიკული რეჟიმები.

აღსანიშნავია, რომ განსახილველი ძრავა მუდმივად იმყოფება ერთმანეთის მონაცვლეობით მიმდინარე არასიმეტრიულ რეჟიმში. პროცესების ანალიზისათვის გამოყენებულია გაანგარიშების ორი მეთოდიკა: ცვლადთა მყისი მნიშვნელობებით და გასაშუალოებული მნიშვნელობებით გაანგარიშება. ორივე მეთოდი შეთავსებულია კოორდინატთა გარდაქმნის მეთოდთან.

ცვლადთა მყისი მნიშვნელობებისათვის გამოყვანილი კომპლექსური განტოლებებით გაანგარიშებულია მანქანის მიმდინარე პროცესები დროის ცალკეულ ინტერვალებში. მიღებულია სიდიდეთა ზუსტი გამოსახულებები მანქანის ყველა პარამეტრის გათვალისწინებით. ამ მეთოდით ჩატარებულია ძრავას კომუტაციური პროცესის ანალიზი, როგორც დამყარებულ, ასევე გარდამავალ პროცესში კომპიუტერის გამოყენებით. ანალიზის შედეგების მიხედვით განისაზღვრება კომუტაციის კუთხე მანქანის ინდუქციური წინაღობების მხედველობაში მიღებით. ცალკე განხილულია შემთხვევა კონდენსატორული კომუტაციის არსებობისას. მიღებული გამოსახულებები სამართლიანია დროის საკომუტაციო და არასაკომუტაციო ინტერვალებისათვის. შედგენილია ამ ინტერვალების შესაბამისი ალგორითმები კომპიუტერზე შემდგომი პროგრამირებისა და ამოხსნისათვის. მოყვანილია კომუტაციური პროცესების შესაბამისი დენებისა და ძაბვების ოსცილოგრამები.

ვენტილური ძრავას ცვლადთა გასაშუალოებული მნიშვნელობებით შედგენილი კომპლექსური განტოლებებით შეიძლება გაანგარიშებულ იქნას მანქანის ინტეგრალური მახასიათებლები. აღნიშნული განტოლებები საერთოა დამყარებული და გარდამავალი პროცესებისათვის. დამყარებული რეჟიმის განტოლებებიდან მიღებულია მარბუნის მომენტი, სტატორისა და როტორის დენების გამოსახულებები, აგებულია მუშა

მახასიათებლები. მანქანის დინამიკური მახასიათებლები გაანგარიშებულია Matlab-ის პროგრამით. მოყვანილია სიდიდეთა დროში ცვლილების მრუდები ფარდობით ერთეულებში კონკრეტული ძრავასათვის.

ანალიზის შედეგებმა აჩვენა, რომ მათემატიკური მოდელი ადეკვატურად ასახავს ვენტილურ ძრავაში მიმდინარე ელექტრომექანიკურ პროცესებს. გაანგარიშების შედეგები წარმატებით შეიძლება გამოყენებულ იქნას რეგულირებადი ვენტილური ძრავების შესაქმნელად სხვადასხვა მექანიზმებისათვის.

განხილული ვენტილური ძრავა, თავისი რეგულირების თვისებებით წარმატებით შეიძლება გამოყენებულ იქნას, როგორც მართვადი ძალური რგოლი ავტომატური რეგულირების სისტემაში. ის პასუხობს მთელ რიგ მოთხოვნებს, როგორცაა სწრაფმოქმედება, რეგულირების მოქნილობა, ეკონომიურობა, საიმედოობა მუშაობაში და მომსახურების დიდი ვადა.

შემუშავებული ძრავა თავისი მახასიათებლებით მიზანშეწონილია გამოვიყენოთ სხვადასხვა დანიშნულების ელექტროამძრავებში, მაგალითად, ელექტროტრანსპორტზე, ლითონსაჭრელ ჩარხებზე, სხვადასხვა გამოსაცდელ სტენდებზე და ა.შ.

ცვლადი დენის მანქანებისაგან განსხვავებით კომპუტატორიან მანქანებში დროის ცალკეულ შუალედებში გრაგნილის ელემენტების გადართვა მბრუნავი მაგნიტური ველის მისაღებად მანქანას ანიჭებს ელექტრული და მექანიკური სიდიდეების ფართო დიაპაზონში რეგულირების თვისებას.

კომპუტატორიანი მანქანების დარგში წარმატება მნიშვნელოვნად განპირობებულია ძალური ელექტრონიკის მიღწევებით. დღეისათვის შექმნილი ნახევრადგამტარული გადამრთველები, როგორც სრულად მართვადი, ისე არასრულადმართვადი, საშუალებას იძლევა შეიქმნას სრულყოფილი ვენტილური მანქანები (ძრავები და გენერატორები), ელექტრულ და მექანიკურ სიდიდეთა ფართო დიაპაზონში რეგულირების თვისებით სხვადასხვა საპასუხისმგებლო მომხმარებლებისათვის.

აღსანიშნავია, რომ შემუშავებულ მოწყობილობაში თანამედროვე ინფორმაციული ტექნოლოგიების გამოყენება, მისი შესაძლებლობის გაფართოების მიზნით, შემუშავებულ ძრავაში, შედარებით მარტივად შეიძლება მოხდეს, მართვის სხვადასხვა კანონების რეალიზაცია, საჭირო ელექტრული და მექანიკური მახასიათებლების მისაღებად, რაც მის ბაზაზე შექმნილ ელექტრულ ამძრავს ანიჭებს გარკვეულ უნივერსალურ თვისებებს.

გამოკვლევულ ძრავას, როგორც ყველა ელექტრულ მანქანას, შეუძლია იმუშაოს გენერატორულ რეჟიმში და მიღებული შედეგები, შეიძლება გამოყენებულ იქნას მუდმივი დენის ვენტილური გენერატორის დაგეგმარებისას სხვადასხვა მომხმარებლებისათვის.

აღნიშნული გენერატორის გამოსავალი ძაბვის რეგულირება ნახევრადგამტარი გადამრთველების გაღების კუთხის მიხედვით საშუალებას გვაძლევს გენერატორი ჩაირთოს ავტომატური მართვის რთულ კომპლექსში, საწარმოო პროცესების ოპტიმალური მართვის

მიზნით. დატვირთვას შეიძლება ჰქონდეს აქტიურ-იმპულსური, აქტიურ-ინდუქციური ან აქტიურ-ტევადური ხასიათი. გამოკვლეული ვენტილური მანქანა ზოგიერთი კონსტრუქციული ცვლილებების გათვალისწინებით შეიძლება გამოყენებული იქნას ცვლადი დენის წყაროდ ავტონომიური ელექტრომომარაგების სისტემებში, ქარის ელექტროსადგურებში და სხვა დანადგარებში.

დისერტაციაში შემუშავებული მანქანის ელექტრომექანიკური პროცესების მოდელები საშუალებას იძლევა ჩატარდეს მანქანის ავტომატური გეგმარება პარამეტრების ოპტიმიზაციის გათვალისწინებით სხვადასხვა სიმძლავრის დანადგარებისათვის.

განხილული მანქანის სერიულ წარმოებაში ასათვისებლად გარდა ოპტიმალური დაგეგმარებისა აუცილებელია დამზადების თანამედროვე ტექნოლოგიის შემუშავება. შედეგად მივიღებთ მაღალეფექტურ მოწყობილობებს დიდი ეკონომიკური ეფექტით.

Summary

The main goal of the thesis is creation of gated motor of constant current for electric drives of mechanisms of various destination. The motor has been realized on the basis of phase rotor asynchronous machine. The three – phase winding of a stator is fed from the direct current network by means of commutator. The commutator is fulfilled by three-phase bridge scheme on the completely triggered thyristors. Fulfillment of the commutator on ordinary thyristors has been considered through the condensate commutation. The drive winding located on the rotor is fed from the network of three-phase voltage. The valve engine to be considered has a wide range of speed control and the reliability of the machine of alternative current like a machine of constant current.

In the given work the static, dynamic and energetic modes of the work of valve motor has been investigated.

It should be noted that the motor to be considered is always in asymmetric mode running alternately from each other. For analysis of the processes there are applied two methodics of calculation: calculation by instant values and the averaged values. Both these methods are compatible with the method of transformation of the coordinates.

By the complex equations derived for the instant values of the variables the current processes of the machine have been calculated in separated intervals of time. The precise image data of the magnitudes have been obtained with allowance of all parameters of the machine. By this method the analysis of commutative process of the motor has been carried out both in established and transient processes by using of the computer. In accord to the results of the analysis an angle of commutation has been defined taking into account the induction resistance of the machine. Separately has been considered a case during existence of condensing commutation. The obtained image data are valid (justified) for commutative and non-commutative intervals. The algorithms corresponding to these intervals have been compiled for further programming and solutions. The oscillograms of currents and voltages corresponding to commutation processes have been represented.

By means of complex equations compiled by averaged values of variables of electrical motor can be calculated the integral characteristics of the machine. The indicated equations are common for established and transient processes. From the equations of established equations it is obtained a rotational moment, image data of stator and rotor currents, the working characteristics have been constructed. The dynamic characteristics of the machine have been calculated by means of Matlab-Simulink programme. The curves of changes in time of values in relative units have been brought for specific motor.

The results of the analysis have shown that the mathematical model adequately reflects the electromechanical processes running in gated motor. The results of calculation can be successfully used for creation of gated motors for various mechanisms.

The reviewed gated motor by its peculiarities of regulation can be successfully used as a controlled power circle in the system of automatic regulation. It meets a number of requirements such are the quick action, elasticity of regulation, efficiency, reliability of work and great term of service.

It is expedient that the elaborated motor with its characteristics be used in electric drives of various destination, e.g., in electric transport, in metal cutters, on various testing stands, etc.

In comparison to machines of alternating current in commutator machines the changeover to winding elements in separate intervals of time for receiving of rotating magnetic field gives to the machine a property of regulation within the wide range of electric and mechanical magnitude.

The success in the field of machines with commutator is conditioned by achievements of power electronics. The semiconductor switches created for today, both completely controllable and incompletely controllable, give a possibility to be created the perfect gated engines (motors and generators), within a wide range of mechanical electric units having the property of regulation for various responsible customers.

It should be noted that using of modern informational technologies in the elaborated device formational technologies, with the aim of widening of its possibilities, is possible to occur relatively simply. Realization of various laws of control for receiving of required electric and mechanical characteristic which grants to electric drive created on its basis the definite universal properties.

The investigated motor, as all electrical machines is able to work in generator mode and the received results can be used during planning of a gated generator of constant current for various customers.

Regulation of output voltage of indicated generator according to the opening of semiconductor switches gives us a possibility that the generator were switched on in a complex of automatic control with the aim of optimal control of the production processes. The loading might be of active-pulse, active-induction or active – capacitive character. The investigated ventilator machine, with allowance of some constructional changes can be used as a source of alternative current in the systems of autonomous electric supply, in wind electric power stations and in other installations.

The models of electromechanical processes of the machine elaborated in the dissertation work (thesis) give a possibility to be carried out an automatic planning with allowance of optimization of the parameters for the installations of various power.

For assimilation of the discussed machine in serial production in addition to the optimal planning it is necessary to work out the modern technology for its fabrication. As result we'll receive the highly effective devices with great economical efficiency.

შინაარსი

| | |
|--|-----|
| შესავალი | 15 |
| თავი I ვენტილური ძრავას პრინციპული სქემა და მისი აღწერა | 19 |
| თავი II ვენტილურ ძრავებიანი ელექტროამძრავის სისტემები | 34 |
| 2.1 ვენტილური ძრავების ამძრავის სისტემების ანალიზი..... | 34 |
| 2.2 ვენტილური ძრავების მართვის ხერხები..... | 38 |
| 2.3 კომუტაციით მართვა..... | 41 |
| 2.4 როტორის მდგომარეობის განსაზღვრა..... | 50 |
| 2.5 ვექტორული მართვა..... | 50 |
| თავი III. ვენტილური ძრავის განტოლებები ცვლადთა მყისი მნიშვნელობებისათვის..... | 58 |
| 3.1 ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნა..... | 58 |
| 3.2 განტოლებები კომპლექსურ ცვლადებში..... | 60 |
| 3.3 კომპლექსური განტოლებების ამოხსნა | 64 |
| 3.4 ვენტილური მანქანა სტატორზე შეკრული გრაგნილის შემთხვევაში | 69 |
| თავი IV . ვენტილური ძრავას კომუტაციური პროცესების ანალიზი..... | 81 |
| 4.1. კომუტაციური პროცესების ანალიზი ცვლადთა მყისი მნიშვნელობებისათვის კომპლექსური სიდიდეების მიხედვით..... | 81 |
| 4.2 კომუტაცია დამყარებულ რეჟიმში განტოლებები, ნაკადუმბმის მუდმივობის პრინციპის გამოყენებით..... | 84 |
| 4.3. კომუტაცია გარდამავალ პროცესებში | 86 |
| 4.4. ვენტილური ძრავის კომპლექსური განტოლებები კონდენსატორული კომუტაციის გათვალისწინებით..... | 89 |
| თავი V . ვენტილური ძრავის განტოლებები ცვლადთა გასაშუალოებული მნიშვნელობებისათვის..... | 104 |
| 5.1 ვენტილური ძრავის განტოლებები გასაშუალოებულ ცვლადებში.... | 104 |

| | |
|--|-----|
| 5.2 ვენტილური ძრავას განტოლებები გარდამავალი რეჟიმებისათვის ... | 109 |
| 5.3 ვენტილური ძრავას განტოლებები დამყარებული რეჟიმებისათვის ... | 110 |
| 5.4 ვენტილური ძრავას მათემატიკური მოდელი. დინამიკური მახასიათებლების გაანგარიშება პროგრამა Matlab -ის საშუალებით..... | 114 |
| შდეგები და მათი განსჯა | 124 |
| დასკვნები | 125 |
| გამოყენებული ლიტერატურა..... | 127 |

ცხრილების ნუსხა

| | |
|---|------------|
| ცხრილი 1. მართვის მიკროსქემაში რეალიზებული ექვსბიჯიანი კომუტაცია | 52 |
| ცხრილი 2. კოეფიციენტები გადართვის ინტერვალებისათვის..... | 95 |
| ცხრილი 3. კომუტაციის მე-4 ინტერვალის კოეფიციენტები..... | 100 |
| ცხრილი 4. კომუტაციის მე-4 ინტერვალის დამახასიათებელი სიდიდეები..... | 102 |

ნახაზების ნუსხა

| | |
|--|-----------|
| <i>ნახ.1 მრავალანოდური ტირატრონებიანი ვენტილური ძრავა, კერნის სქემის მიხედვით</i> | 20 |
| <i>ნახ. 2 ალექსანდერსონის ძრავას სქემა.....</i> | 21 |
| <i>ნახ. 3 ვილლისის ვენტილური ძრავას სქემა</i> | 22 |
| <i>ნახ. 4 ტიხმენევის სქემის მიხედვით შესრულებული ვენტილური ძრავა.....</i> | 23 |
| <i>ნახ. 5 ზავალიშინი-ვეგნერის მიერ დამუშავებული ვენტილური ძრავას სქემა.....</i> | 24 |
| <i>ნახ. 6 ვენტილური ძრავას სქემის კლასიფიკაცია</i> | 33 |
| <i>ნახ 7 ვენტილური ძრავების სქემები</i> | 35 |
| <i>ნახ. 8 ვენტილური ძრავას ვექტორული დიაგრამა</i> | 39 |
| <i>ნახ.9 ვენტილური ძრავას გრაგნილებისა და ვექტორების მაგნიტური ღერძების სქემატური განლაგება</i> | 39 |
| <i>ნახ.10 რეზულტური მაგნიტური ნაკადის ფორმირება ვენტილური ძრავას როტორის მობრუნების კუთხეზე დამოკიდებულებაში</i> | 41 |
| <i>ნახ.11 ძრავას ფაზების მიერთების სქემა კომუტაციის სხვადასხვა ინტერვალზე.....</i> | 43 |
| <i>ნახ.12 კომუტატორისა და დახვევის სქემები კომუტაციის ინტერვალებისათვის</i> | 46 |
| <i>ნახ. 13 ვენტილური ძრავებისათვის თეორიული და ექსპერიმენტალური მექანიკური მახასიათებლები</i> | 48 |
| <i>ნახ 14. როტორის სიჩქარის ცვლილების მრუდი გაშვების მომენტში ..</i> | 48 |
| <i>ნახ. 15 ვენტილური ძრავას ფაზების დენები ძრავის გაშვების მომენტში.....</i> | 49 |
| <i>ნახ. 16 ძრავას სხვადასხვა ფაზების გრაგნილების შეერთების სქემა 12 ინტერვალისანი კომუტაციით.....</i> | 53 |
| <i>ნახ. 17 ვენტილური ძრავას მოდელი პროგრამა Matlab -ში</i> | 55 |

| | |
|--|------------|
| ნახ. 18 ელექტრომექანიკური ამძრავის გარდამავალი მახასიათებლები | 56 |
| ნახ. 19 ელექტრომექანიკური ამძრავის გარდამავალი მახასიათებლები ნომინალური დატვირთვის დროს | 57 |
| ნახ.20 მუდმივი დენის უკონტაქტო ძრავის საანგარიშო სქემა | 70 |
| ნახ. 21 ვენტილური ძრავა კომუტატორით სრულად მართვად ვენტილებზე..... | 81 |
| ნახ. 22 ვენტილური ძრავა კონდენსატორული კომუტაციის კომუტატორით | 82 |
| ნახ. 23 სქემის ელემენტებზე ძაბვების დენების ოსცილოგრამები, ამუშავების და დამყარებულ რეჟიმებში | 89 |
| ნახ. 24 ჩანაცვლების სქემები არაკომუტაციური და კომუტაციური ინტერვალებისათვის | 90 |
| ნახ.25 ძრავას მექანიკური მახასიათებლები იმპულსისკუთხური სიხშირის რეგულირებისას | 112 |
| ნახ. 26 ვენტილური ძრავას მომენტსა და სრიალს შორის დამოკიდებულება | 112 |
| ნახ. 27 ძრავას დენსა და სრიალს შორის დამოკიდებულება | 113 |
| ნახ. 28 დენების ოსცილოგრამა | 113 |
| ნახ. 29 ამოცანის ამოხსნის ალგორითმის ბლოკსქემა | 118 |

მადლიერება

მადლობას ვუხდის ჩემს სამეცნიერო ხელმძღვანელს, პროფესორ დემურ კობრიძეს, დისერტაციაზე მუშაობის პერიოდში გაწეული სამეცნიერო და პედაგოგიური შრომისათვის.

შესავალი

თანამედროვე ელექტროენერგეტიკის განვითარება განუხრელადაა დაკავშირებული ელექტრული მანქანების მაჩვენებლების თვისობრივ გაუმჯობესებასთან. ერთ-ერთი გზა ასეთი გაუმჯობესებისა დაკავშირებულია უკონტაქტო (ვენტილური) მანქანების შემუშავებასა და ფართო დანერგვასთან. ვენტილური მანქანები ხასიათდებიან გადიდებული ელექტრომაგნიტური და მექანიკური დატვირთვებით. შესაბამისად, გაუმჯობესებული მასა გამტარული მაჩვენებლებით. ამ მანქანებს შეუძლიათ იმუშაონ მაღალი ტემპერატურის, დაბალი წნევის პირობებში, ვაკუუმში, დიდი დინამიკური გადატვირთვების დროს, ქიმიურად აქტიური ნივთიერებების გარემოში და ა. შ. აღნიშნული მანქანები მზარდი ტემპით გამოიყენება: ტრანსპორტზე, საფრენ აპარატებში, ტექნოლოგიურ დანადგარებში, რობოტტექნიკაში, მედიცინაში და სხვა თანამედროვე ტექნიკის უმნიშვნელოვანეს სფეროებში.

უკონტაქტო ელექტრულ მანქანებში მექანიკური კონტაქტის არარსებობა მნიშვნელოვნად ზრდის მათი გამოყენების შესაძლებლობას.

აღნიშნული მანქანების ანალიზი და გაანგარიშება ძირითადად ემყარება ელექტრული მანქანების კლასიკურ თეორიას. გარდა ამისა, მათ გააჩნიათ განსაკუთრებული თვისებებიც, რაც დაკავშირებულია გაანგარიშების მეთოდუკასთან, ელექტრომაგნიტური, თბური და მექანიკური დატვირთვების სიდიდესთან, მუდმივი მაგნიტების ფართო გამოყენებასთან და სხვა.

ჩვენს ამოცანას წარმოადგენს დავამუშაოთ და გამოვიკვლიოთ მუდმივი დენის უკოლექტრო ძრავა, რომელიც აგებულია ფაზურ როტორიანი მანქანის ბაზაზე. მანქანის სტატორზე განთავსებულია ნახევრად გამტარული კომპუტატორი (ტირისტორებზე ან ტრანზისტორებზე). კომპუტატორის საშუალებით ხდება სტატორის ფაზების გარკვეული წესით გადართვა და მბრუნავი მაგნიტური ველის მიღება. ეს

ველი განჭოლავს როტორის გრაგნილს. როტორზე მოთავსებულია სამფაზა აგზნების გრაგნილი, რომელიც იკვებება სამფაზა ძაბვის წყაროდან. როტორის გრაგნილი თავის მხრივ ქმნის მბრუნავ მაგნიტურ ველს, რომელიც როტორთან ერთად ბრუნავს გარკვეული სიჩქარით. როტორისა და ამ ველის სიჩქარეები იკრიბება და ადგილი აქვს სტატორის მბრუნავ ველთან ურთიერთქმედებას. როტორზე წარმოიშვება მბრუნავი მომენტი. სტატორის ფაზების გადართვის კუთხური სიხშირე გარკვეული კანონით დაკავშირებულია როტორის ველთან. ძრავას გააჩნია მომენტისა და ბრუნვის სიხშირის რეგულირების საშუალება.

ნაშრომში გამოყენებულია საინჟინრო გამოთვლების მეთოდები. საკითხები გადაჭრილია ელექტრული ქსელების, ელექტრული მანქანების, მათემატიკური ანალიზისა და კომპიუტერული მოდელირების თეორიათა გამოყენებით. ვენტილური ძრავას კვლევისათვის გამოყენებულია ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდი, სიდიდეთა როგორც მყისი ისე საშუალო მნიშვნელობებისათვის. განტოლებების საშუალებით ხდება სტატიკური და დინამიკური რეჟიმების კვლევა და მანქანის ძირითადი მახასიათებლების გაანგარიშება.

ცვლადთა მყისი მნიშვნელობებისათვის გამოყვანილი კომპლექსური განტოლებებით გაანგარიშებულია მანქანის მიმდინარე პროცესები დროის ცალკეულ ინტერვალებში. მიღებულია სიდიდეთა ზუსტი გამოსახულებები მანქანის ყველა პარამეტრის გათვალისწინებით. ამ მეთოდით ჩატარებულია ძრავას კომუტაციური პროცესის ანალიზი, როგორც დამყარებულ, ასევე გარდამავალ პროცესში კომპიუტერის გამოყენებით. ანალიზის შედეგების მიხედვით განისაზღვრება კომუტაციის კუთხე მანქანის ინდუქციური წინაღობების მხედველობაში მიღებით. ცალკე განხილულია შემთხვევა კონდენსატორული კომუტაციის არსებობისას. მიღებული გამოსახულებები სამართლიანია დროის საკომუტაციო და არასაკომუტაციო ინტერვალებისათვის. შედგენილია ამ ინტერვალების შესაბამისი ალგორითმები კომპიუტერზე შემდგომი

პროგრამირებისა და ამოხსნისათვის. მოყვანილია კომპუტაციური პროცესების შესაბამისი დენებისა და ძაბვების ოსცილოგრამები.

ვენტილური ძრავას ცვლადთა გასაშუალოებული მნიშვნელობებით შედგენილი კომპლექსური განტოლებებით შეიძლება გაანგარიშებულ იქნას მანქანის ინტეგრალური მახასიათებლები. აღნიშნული განტოლებები საერთოა დამყარებული და გარდამავალი პროცესებისათვის. დამყარებული რეჟიმის განტოლებებიდან მიღებულია მაბრუნე მომენტი, სტატორისა და როტორის დენების გამოსახულებები, აგებულია მუშა მახასიათებლები.

დამუშავდა ვენტილური ძრავას დამყარებული და გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელი, რომელიც საშუალებას მოგვცემს გამოვიკვლიოთ ძრავას მუშაობის სახასიათო რეჟიმები.

განგარიშებათა საფუძველზე შეირჩა სქემის ელემენტების პარამეტრები.

დამუშავდა ძრავას ძალური სქემის მოდელი რეგულირების წესის გათვალისწინებით, რომელიც განისაზღვრება მომენტის, დენების და ძაბვების ხასიათით, გარდამავალ და დამყარებულ რეჟიმებში.

ვენტილური ძრავას კვლევისათვის გამოყენებული ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდი, სიდიდეთა როგორც მყისი ისე საშუალო მნიშვნელობებისათვის საშუალებას გვაძლევს ჩატარდეს ძრავას ყოველმხრივი გამოკვლევა სტაციონალურ და გარდამავალ რეჟიმებში, ოპტიმალური პარამეტრების დადგენის მიზნით, თანამედროვე რეგულირებადი ამძრავის შესაქმნელად სხვადასხვა დანიშნულების მექანიზმებისათვის.

ანალიზის შედეგებმა აჩვენა, რომ მათემატიკური მოდელი ადეკვატურად ასახავს ვენტილურ ძრავაში მიმდინარე ელექტრომექანიკურ პროცესებს.

განხილული ვენტილური ძრავა, თავისი რეგულირების თვისებებით წარმატებით შეიძლება გამოყენებულ იქნას, როგორც მართვადი ძალური რგოლი ავტომატური რეგულირების სისტემაში.

შემუშავებულ ძრავაში, შედარებით მარტივად შეიძლება მოხდეს, მართვის სხვადასხვა კანონების რეალიზაცია, საჭირო ელექტრული და მექანიკური მახასიათებლების მისაღებად, რაც მის ბაზაზე შექმნილ ელექტრულ ამძრავს ანიჭებს გარკვეულ უნივერსალურ თვისებებს.

გამოკვლევულ ძრავას, როგორც ყველა ელექტრულ მანქანას, შეუძლია იმუშაოს გენერატორულ რეჟიმში და მიღებული შედეგები, შეიძლება გამოყენებულ იქნას მუდმივი დენის ვენტილური გენერატორის დაგეგმარებისას სხვადასხვა მომხმარებლებისათვის.

თავი I . ვენტილური ძრავას პრინციპული სქემა და მათი აღწერა

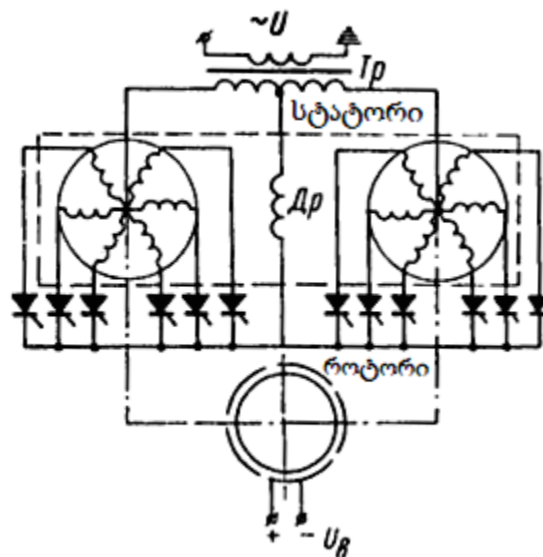
ძალური ნახევარგამტარული ტექნიკის განვითარებამ საშუალება მოგვცა მზრუნავი კოლექტორული ნაწილების შეცვლისა სტატიკური ვენტილური გარდამქმნელების საშუალებით.

ასეთი გარდამსახები უნდა იყვნენ საიმედონი და დაბალი მასა-გაბარიტული მახასიათებლებით. ასეთ ძრავებს მიეკუთვნებათ კერძოდ ვენტილური ელექტრული ძრავები, რომლებიც ხასიათდებიან სიჩქარის რეგულირების დიდი სპექტრით, ისევე როგორც მუდმივი დენების ძრავები.

დაიბეჭდა უამრავი ლიტერატურა სხვადასხვა სიმძლავრის, როგორც ცვლადი, ასევე მუდმივი დენის ვენტილური ძრავების შესახებ. თუმცა ვენტილური ძრავების მრავალფეროვანი მუშაობის რეჟიმების თეორია ჯერ კიდევ საფუძვლიანად შესწავლილი არ არის. პერსპექტივაში ასინქრონული ელექტრული მანქანები არა მარტო შეინარჩუნებენ დომინირებულ მდგომარეობას სხვა მანქანებთან შედარებით, არამედ დაიპყრობენ ახალ პოზიციებს ტრანსპორტში და საყოფაცხოვრებო მომსახურებაში. (მაგ. ელექტრომობილები, მოსახლეობის საყოფაცხოვრებო კომფორტული პირობების მნიშვნელოვანი გაუმჯობესება). მნიშვნელოვან ადგილს დაიკავებს ელექტროენერჯის ეკონომია. ამის მისაღწევად აუცილებელია მექანიზმების მუშაობის რეჟიმის გათვალისწინებით გამოყენებული იყოს დამზოგავი ამძრავის ისეთი სახეობები, როგორცაა ასინქრონულ პრინციპზე მომუშავე ვენტილური ძრავა. რეგულირებადი ელექტროამძრავის გამოყენებისას 21-ე საუკუნის დასაწყისში ასინქრონული ძრავები და მათ პრინციპზე მომუშავე ვენტილური მანქანები დაიკავებენ დომინირებულ მდგომარეობას ყველა სხვა ელექტრულ მანქანებს შორის. შეზღუდულია აგრეთვე ვენტილური ძრავების რაციონალური (ოპტიმალური) პარამეტრების მონაცემები და ანგარიში [1,2,3, 19].

პირველი ცდები მექანიკური კოლექტორის შეცვლისა უკონტაქტო გადამრთველებით ჩატარებული იყო 1930-იან წლებში. ვენტილურ ძრავებში უკონტაქტო გადამრთველების სახით გამოყენებული იყო იონური ხელსაწყოები, რომლებიც ახორციელებდნენ სტატორის გრაგნილის კომუტაციას, როტორის კუთხური მდგომარეობის მიხედვით. როტორზე განლაგებული იყო ძრავის აგზნების საპოლუსო სისტემა.

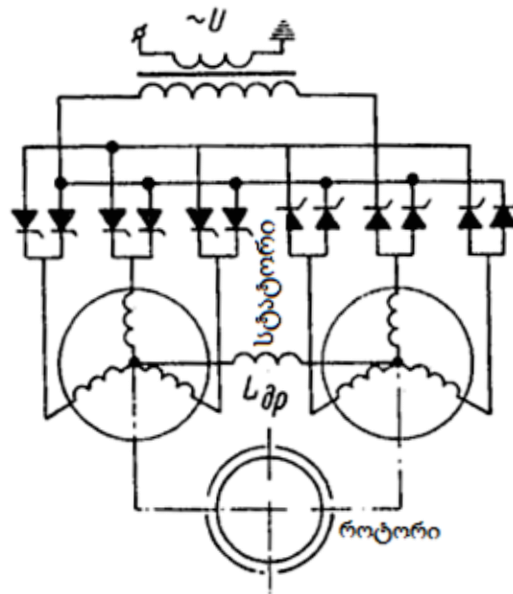
პირველი სქემა შემოთავაზებული იყო ინჟინერ კერნის მიერ (ნახ.1), რომელსაც ჰქონდა სტატორის გრაგნილის ძალიან მცირე გამოყენების კოეფიციენტი. ამ სქემაში სტატორის გრაგნილი შესრულებული იყო 12 ფაზის სახით და დროის ნებისმიერ მონაკვეთში დენი გადიოდა მხოლოდ ერთ გრაგნილში და მხოლოდ ერთი მიმართულებით [2].



ნახ.1 მრავალანოდური ტირატრონებიანი ვენტილური ძრავა, კერნის სქემის მიხედვით.

სტატორის გრაგნილის გამოყენების კოეფიციენტი K არის თნაფარდობა ვენტილური ძრავას სიმძლავრისა იმავე მანქანის სინქრინული ძრავას რეჟიმში სიმძლავრესთან, როდესაც $\cos \varphi = 1$, სიმძლავრის დანაკარგები ტოლია და სახეზეა ფაზების მყისიერი კომუტაცია. იგი შეადგენს 0,39.

სტატორის გრაგნილის გამოყენების კოეფიციენტი ბევრად უკეთესად მიიღწევა ალექს ანდერსონის სქემით (ნახ. 2) $K=0,67$. ეს სქემა სტატორის გრაგნილის სამფაზა ვარიანტის შესრულებით ხანგრძლივად გამოყენებული იყო 440 კვტ. სიმძლავრის ვენტილიატორის ამძრავი ძრავისათვის [2].



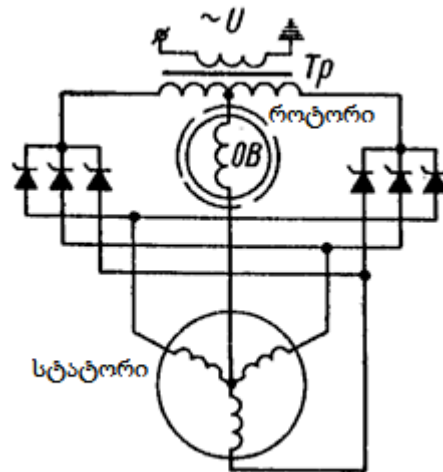
ნახ. 2 ალექსანდერსონის ძრავას სქემა.

სტატორის გრაგნილის ასეთივე სქემა გამოყენებული იყო ამერიკული ფირმა GEC ე.წ. ვილისის სქემა (ნახ. 3), ძრავის აგზნების გრაგნილი იკვებებოდა ნულოვანი გამტარის დენით და გამოყენებული იყო გამასწორებელი დროსელის სახით. ნებისმიერ მომენტში, კომუტაციის ინტერვალის გარდა მუშაობდა მხოლოდ ერთი ფაზა.

ზემოთ მოხსენიებული ავტორები შემოიფარგლნენ სქემის მუშაობის პრინციპების განხილვით, აგრეთვე თეორიული და ექსპერიმენტალური რეზულტატების პრაქტიკული თანაფარდობებით.

ვენტილური ძრავების თეორიული და ექსპერიმენტალური გამოკვლევა სსრკ-ში მიმდინარეობდა 1932 წლიდან საკავშირო ელექტროტექნიკურ ინსტიტუტში, ლენინგრადის პოლიტექნიკურ

ინსტიტუტში და სხვა. ამ სამუშაოების რეზულტატები საკმაო სიზუსტით აღწერილია ტიხმენოვის ნაშრომში „ტირისტორ-მოტორის მუშაობის თეორიული ანალიზი.“ [1,3,4,6] (ნახ. 4)



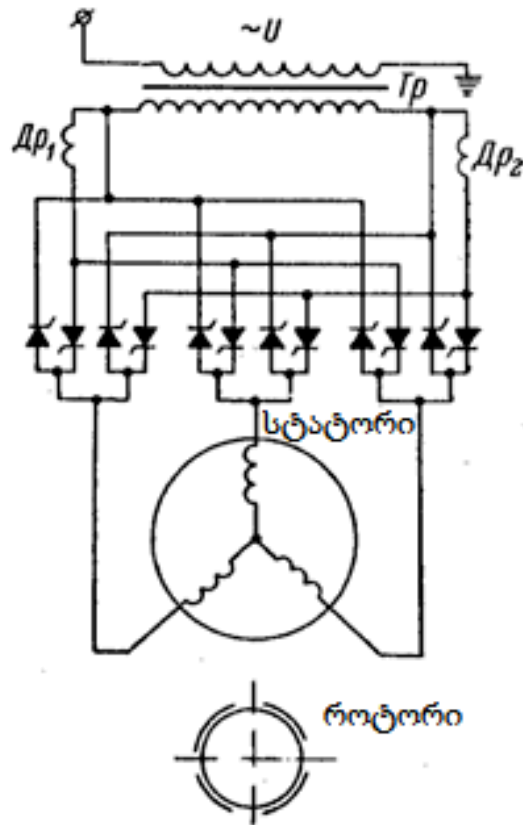
ნახ. 3 ვილდისის ვენტილური ძრავის სქემა

ძრავის სქემა წარმოადგენდა ბოგური (ხიდური) სქემების ერთობლიობას. ერთ ბოგური სქემების დიაგონალში ჩართული იყო კვების წყაროები, მეორე ბოგური სქემების დიაგონალში ჩართული იყო ძრავის ფაზური გრაგნილები. ყოველ ფაზაში გადიოდა ერთი მიმართულების დენი, რის გამოც ძრავას სტატორის გრაგნილი გამოიყენებოდა ნაწილობრივ (ცუდად).

იმ პერიოდის თეორიული გამოკვლევები ეხება კერძის 12 ფაზა ძრავას გამოკვლევას, რომელსაც ძალიან დაბალი გამოყენების კოეფიციენტი ჰქონდა. ზემოთ ჩამოთვლილ სქემებს აქვს მიმოხილვის ხასიათი.

არსებობს უამრავი სქემური გადაწყვეტა ვენტილური ძრავების დაპროექტების საქმეში, მაგალითად ტიხმენოვის მიერ (ნახ. 4) მოცემულია ჩვეულებრივი წარმოების სინქრონული ძრავა. ასეთი სქემის უარყოფითი

თვისება მდგომარეობს იმაში, რომ რექტორი მუშაობს „ცუდად“ მხოლოდ კვების წყაროს ნახევარი პერიოდის განმავლობაში [6].

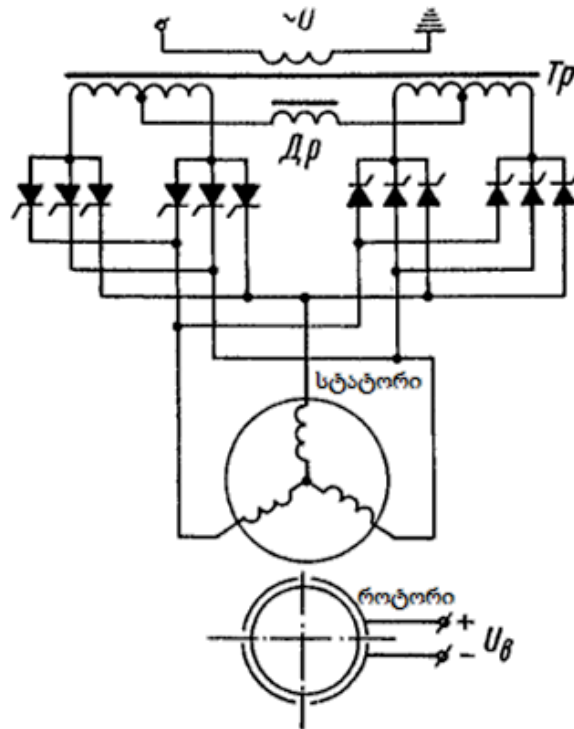


ნახ. 4 ტიხმენევის სქემის მიხედვით შესრულებული ვენტილური ძრავა.

გარდა ამისა ასეთი სქემის საიმედო მუშაობა მთლიანად დამოკიდებულია ვენტილის მართვის თვისებებზე, რომლის დარღვევის შემთხვევაში ტრანსფორმატორის მ.შ. გარდაუვალია. სქემის მეორე ვარიანტი შემოგვთავაზა ზავალიშინმა და ვეგნერმა (ნახ. 5). ეს სქემა გამოირჩევა დიდი საიმედოობით, ეკონომიურობით და მასწორებელი რექტორის ოპტიმალური გამოყენებით. ამ სქემაში ერთდროულად მუშაობს ძრავას ორივე ფაზა და გამორიცხულია ერთერთი ვენტილის დაზიანების შემთხვევაში გრაგნილი დარჩეს დენის გავლის გარეშე [4].

სქემა შეიძლება შესრულდეს ერთ და სამფაზა ვარიანტებად.

ვეგნერმა გადაწყვიტა მნიშვნელოვანი საკითხი, თუ რამდენი უნდა ყოფილიყო მინიმალური სექციების რიცხვი იმისათვის, რომ შექმნილიყო ოპტიმალური საექსპლუატაციო და ენერგეტიკული მონაცემები.



ნახ. 5 ზავალიშინი-ვეგნერის მიერ დამუშავებული ვენტილური ძრავას სქემა.

ელექტრომაგნიტური სიმძლავრის შედარების საფუძველზე სამფაზა ძრავასა და მრავალსექციიან ძრავს შორის, გაკეთდა დასკვნა, რომ დანაწევრება ძრავას სექციებისა ეფექტს არ იძლევა.

ზავალიშინი-ვეგნერის მიერ დამზადებულ 6,2 კვტ ვენტილურ ძრავაზე ჩატარებულმა გამოკვლევებმა ცხადყო, რომ სამფაზა გრაგნილი უზრუნველყოფს მაღალ ენერგეტიკულ მაჩვენებლებს და არ არის აუცილებელი სტატორის გრაგნილის მრავალ სექციებად დაყოფა [4].

ასე მაგალითად ნომინალური მომენტის დროს ვენტილური ძრავის მ.ქ.კ. იყო 0.78 , თუმცა აქტიური მასალების გამოყენება რამდენჯერმე უფრო ცუდი იყო, ვიდრე სინქრონულ რეჟიმში მომუშავე იგივე ძრავასი.

გარდა ამისა ვეგნერის მიერ განხილული იყო სიჩქარის რეგულირების ორი მეთოდი. 1) მაგნიტური ნაკადის ცვლილებით, და 2) ღუზაზე მოდებული ძაბვის ცვლილებით. თავის ნაშრომებში ო.გ. ვეგნერმა მოახდინა სხვადასხვა სქემების შედარებები (ნახ. 5).

კრიტიკურობად გამოყენებული იყო შემდეგი მონაცემები:

- 1) ძრავას გამოყენების კოეფიციენტი სიმძლავრის მიხედვით თანაბარი დანაკარგების შემთხვევაში.
- 2) მუშაობის საიმედოობა.
- 3) ფასი.

კვლევის რეზულტატებმა აჩვენეს, რომ ვეგნერ-ზავალიშინის ვენტილური ძრავას სქემა ყველაზე ეფექტურია ოპტიმალური მაღალი გამოყენების კოეფიციენტით.

ვეგნერის მიერ მიღებული რეზულტატები მოითხოვენ დაზუსტებას, თუმცა შეიძლება გამოყენებული იქნეს ვენტილური ძრავების, მასწორებელი ფილტრებისა და ვენტილების არჩევის შემთხვევაში.

ნაშრომში ვენტილური ძრავა გაანალიზებულია მთლიანად. ანალიზი ტარდებოდა ვილისის სქემის მიხედვით აწყობილ ვენტილურ ძრავზე. განხილულ ძრავზე სტატორის ფაზების ჩართვა ხდებოდა დისკრეტულად დამყარებული სიჩქარის რეჟიმში თანაბარი დროის ინტერვალებით როტორისა და სტატორის გრაგნილების გარკვეული ურთიერთ მდგომარეობის შემთხვევაში. უკანასკნელის უზრუნველყოფა ხდებოდა როტორის მდგომარეობის გადამწოდის საშუალებით [4].

როგორც ცნობილია, ვენტილური ძრავას მუშაობა შედგება ცალკეული ციკლებისაგან, რომლებიც წარმოიქმნებიან სტატორის ფაზების ორ თანმიმდევრულ კომუტაციას შორის, ამიტომ ვენტილური ძრავას

ანალიზის დროს, შეიძლება შემოვიფარგლოთ ერთი ციკლის ელექტრომაგნიტური პროცესით.

სამუშაოში გამოყვანილია ერთი ციკლის განმავლობაში ფაზური ამპლიტიდური დენის დამოკიდებულება ძრავას ზომებზე. ღუზის რეაქციის კვლევის პრინციპი დაფუძნებულია ფაზური დენის ფურიეს ჰარმონიკებად დაშლაზე. მიღებულია საშუალო მაბრუნე მომენტის ფორმულა ერთი ციკლის განმავლობაში [4].

პირველად მიღებულია ფორმულა, ამუშავების მომენტის თანაფარდობისა, როტორის ღერძსა და ჩართული ფაზის ღერძს შორის და ასევე გამოყვანილია მაქსიმალური მომენტის ფორმულა.

ამრიგად არსებობდა უამრავი სქემა ვენტილური ძრავების, რომლებიც ძირითადად განსხვავდებოდნენ სტატორის გრაგნილის და ვენტილების ჩართვის სხვადასხვა ვარიანტით.

თეორიული და პრაქტიკული გამოკვლევები დღემდე აქტუალურია და დღემდე არ კარგავს ფასს, თუმცა არარის შესწავლილი დამყარებული და გარდამავალი პროცესები ვენტილური ძრავების საიმედო კომუტაციის დროს. კერძოდ დანაკარგების შემცირებისა და საიმედოობის გაზრდის მიზნით რეკომენდებულია:

- 1) ინდუქციურობის შემცირება ერთდროულად სქემის დაცვა გადატვირთვისაგან და დენის ბიძგებისაგან.
- 2) საკომუტაციო კონდენსატორების გამოყენება.
- 3) გამოვიყენოთ ვენტილის დენზე კომუტაციის პროცესში მაღალი სიხშირის დენის ზედდება.
- 4) მაგნიტური წრედის მანქანაში გამოვიყენოთ თხელი ფურცლებისაგან დამზადებული მაგნიტოგამტარი, მინიმალური მაგნიტური დანაკარგებით.
- 5) გავითვალისწინოთ მთლიანი სადემფერო გრაგნილი. სადემფერო გრაგნილის აქტიური და რეაქტიული წინაღობა, უნდა იყოს მინიმალური სიდიდის. ამ რეკომენდაციების სიზუსტე დადგინდა (დადასტურდა) ექსპერიმენტალურად.

იმ დროისათვის არსებული იონური მართვადი ვენტილები არ იყვნენ საიმედო. ვერ უზრუნველყოფდნენ უავარიო მუშაობას, გარდა ამისა იყვნენ არა ეკონომიური და ჰქონდათ დიდი გაბარიტული ზომები. ამიტომ სამუშაოები ვენტილურ ძრავებზე შეწყდა, მანამ, სანამ არ გამოუშვეს საიმედო ახალი ტიპის ვენტილები - ტრანზისტორები და ტირისტორები. მძლავრი, მართვადი ვენტილები - ტირისტორები, რომელიც აითვისა წარმოებამ. რამაც საშუალება მოგვცა გადაგვეწყვიტა ვენტილურ ძრავებთან დაკავშირებული პრობლემები.

დღეისათვის დიდი რაოდენობით განიხილება მცირე სიმძლავრის (რამდენიმე ასეული ვატი) ვენტილური ძრავები ავტომატიკის წრედებისათვის, სადაც ვენტილებად გამოყენებულია ტრანზისტორები. ეს სქემები გამოირჩევიან იმით, რომ მთლიანად მართვადი ტრიოდები, ახორციელებენ ძრავის გრაფნილების ჩართვას მართვის სიგნალების მიხედვით.

განსაკუთრებულ ინტერესს იმსახურებენ როტორის მდგომარეობის განმსაზღვრელი მდებარეობის გადამწოდები.

მდგომარეობის გადამწოდები გამოიმუშავებენ ინფორმაციას როტორის სივრცული მდებარეობის შესახებ ელექტრონული იმპულსების სახით. არსებობს რამდენიმე ტიპი მიმწოდი ინფორმაციისა, მაგალითად: ტევადური, ელექტროდინამიური, ინდუქციური, ფოტოელექტრონული და ა.შ.

პრაქტიკამ გვაჩვენა, რომ ყველაზე ეფექტურია ტრანსფორმატორული, ინდუქციური, ფოტოელექტრონული მდგომარეობის გადამწოდები.

არსებობს ვენტილური ძრავები გადამწოდების გარეშე. ამასთან მართვა ხდება ან მაქსიმალური ველის მიხედვით ან ძრავის მომჭერებზე ფაზური ძაბვის მიხედვით. თუმცა, როგორც ცდებმა აჩვენეს (არაქელიანი - ჩილიკინი) ასეთ ძრავას როტორს მიდრეკილება აქვს ვიბრაციისაკენ [5].

ვენტილური ძრავების ელექტრომაგნიტური პროცესების ანალიზისათვის ხშირად იყენებენ მუდმივი დენის ძრავას გამოკვლევის მეთოდს.

ეს მეთოდი იძლევა დენის, ძაბვის მომენტის, სიჩქარის სიდიდეებს და ანალოგიურია მუდმივი დენის კოლექტორულ მანქანაში არსებული პროცესებისა. იგი საკმაოდ ზუსტია მცირე სიმძლავრის (რამდენიმე ასეული ვატი), და მრავალფაზა ჩაკეტილი გრაგნილნი ვენტილური ძრავებისთვის.

დიდი სიმძლავრის ვენტილური ძრავებისთვის ბევრი ავტორი იყენებს სამფაზა ცვლადი დენის ძრავების თეორიას. მაგალითად: არაქელიანი სხვა ავტორებთან ერთად ვენტილურ ძრავებს განიხილავს, როგორც ცვლადი დენის სინქრონულ მანქანას ვენტილურ გარდამქმნელთან ერთად.

გეომეტრული ანალიზის, ფაზური დენის მრუდის ანალიზის და პარკ-გორევის განტოლების თანახმად, მათ მიიღეს, დენის, ძაბვის, გადატვირთვის მომენტის, ძრავის მომენტის პულსაციის, დამატებით კარგების და სხვა მონაცემები.

მიღებულია მომენტის პულსაციის ზემოქმედება ვიბრაციაზე, ვენტილის წინსწრებადი β კუთხით ჩართვის ზემოქმედება და დატვირთვის უნარიანობა და ა.შ.

კუჩუმოვს განხილული აქვს სამფაზა ვენტილური ძრავას ელექტრომაგნიტური პროცესი მუდმივი სიჩქარის დროს და აქტიური წინაღობების უგულებელყოფის შემთხვევაში [2].

ძირითადად გამოყენებულია პარკ-გორევის განტოლებები, სადაც ზოგიერთი ფუნქცია გამოთვლილია ინტეგრალის საშუალებით - მუდმივი ნაკადშემის შემთხვევაში, შრომაში წარმოდგენილია მანქანის ვექტორული დიაგრამები, რის მიხედვითაც ანგარიშობენ მანქანის მონაცემებს დამყარებულ რეჟიმებში.

უცხოელი ავტორები ანალიზის დროს იყენებდნენ განზოგადოებული ელექტრული მანქანის ელექტრომაგნიტურ პროცესების მოდელებს [1,2,3,4,5,6].

ამ გამოკვლევებმა აჩვენეს, რომ დემფერული გრაგნილის გამოყენება საშუალებას იძლევა გავზარდოთ მუშა სიხშირის ზედა ზღვარი რეგულირების დროს, შევამციროთ კონდენსატორის ტევადობა ხელოვნური კომუტაციის დროს და შევქმნათ დამატებითი ამუშავების მომენტი, ორიგინალურად შეიძლება ჩაითვალოს ვენტილური ძრავას მდგრადობის კვლევა.

ამ მეთოდის საფუძველია ავტომატური რეგულირების თეორია. კერძოდ გურვიცის მდგრადობის კრიტერიუმი. ე.ი. არსებობს უამრავი მეთოდი ვენტილური ძრავების ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევისა. თუმცა არ არსებობს რეკომენდაციები, შედარებები და გამოყენების სფეროების ანალიზი.

ვენტილური ძრავის გარკვეული მაჩვენებლების გაუმჯობესების მიზნით ზოგიერთი ავტორები გვთავაზობენ გარკვეულ რეკომენდაციას ასე მაგალითად: გ. კრუგი, იმისათვის, რომ შევამციროთ ღუზის რეაქციის გავლენა, საჭიროა მაკომპენსირებელი გრაგნილი განვთავსოთ როტორზე და ვკვებოთ დატვირთვის მომენტის პროპორციული დენით, როგორც ავღნიშნეთ ვენტილური ძრავისათვის ერთ-ერთი საკითხია დენის კომუტაცია ფაზიდან ფაზაზე. ხელოვნური კომუტაციის პროცესის ხანგრძლივობა აფუჭებს ვენტილური ძრავის აქტიური მასალების გამოყენების მაჩვენებელს. ამიტომ გამართლებულია ზეგარდამავალი წინააღმდეგობის შემცირება ძრავაში.

სხვა მეთოდი კომუტაციის ხანგრძლივობის შემცირებისა, არის დამატებითი პოლუსების გამოყენება, კოლექტორული მუდმივი დენის მანქანების მსგავსად.

იძულებითი კომუტაციის დანერგვა ზრდის ძრავის გამოყენების მაჩვენებლებს, თუმცა ამ შემთხვევაში სქემები რთულდება და მასა

გაბარიტული ზომები ძრავისა იზრდება, რაც არაკონკურენტუნარიანს ხდის ძრავს სიხშირული რეგულირების სინქრონულ ძრავთან შედარებით.

წარმოების წამყვანი დარგების პროგრესი დამოკიდებულია ელექტროამძრავის რეგულირების გაუმჯობესებაზე.

მუდმივი დენის ძრავებში კომპუტაციური და მექანიკური შეზღუდვები ართულებენ საწარმოო მოწყობილობების ექსპლუატაციას. ყოველივე ამან გამოიწვია გაცხოველებული ინტერესი ცვლადი დენის რეგულირებადი ვენტილური ძრავების მიმართ.

ცვლადი დენის ვენტილური ძრავების ტექნიკურ ეკონომიური მაჩვენებლები ბევრად აღემატებიან მუდმივი დენის კოლექტორულ ძრავების მაჩვენებლებს.

ვენტილური ძრავები, მოქმედების პრინციპითა და მუშა მახასიათებლებით ძალიან გვანან მუდმივი დენის ვენტილურ ძრავებს. ვენტილური ძრავის სიჩქარე არ არის დამოკიდებული მკვებავი ქსელის სიხშირეზე და უზრუნველყოფს მუშაობას ოთხივე კვადრატში. მას არ გააჩნია კოლექტორი და ამიტომ საიმედოა, აქვს დიდი მუშაობის ხანგრძლივობა და არ მოითხოვს ექსპლუატაციის ხარჯებს. გარდა ამისა ვენტილურ ძრავს აქვს სიჩქარის რეგულირების ისეთი თვისება, რომელიც აქ გააჩნია არცერთ ძრავს. ეს არის სამზონიანი სიჩქარის რეგულირება (ძაბვით, აგზნება დენით, ვენტილის წინსწრებული ჩართვის კუთხით), ასევე ორი ფაზის რევერსით როტორის მდგომარეობის გადამწოდის ხარჯზე. ვენტილური ძრავას აქვს მდგომარეობის მაღალი ენერგეტიკული მახასიათებლები და გამშვიდებული მომენტი.

ვენტილური ძრავი დღეისათვის არის უნივერსალური ტიპის ამძრავი ყველაზე საუკეთესო რეგულირების და ენერგეტიკული მახასიათებლებით და გამოიყენება სხვადასხვა ამძრავებისათვის: მანქანებში და მიკრომანქანებში, დიდი და მცირე სიჩქარეებისთვის, სხვადასხვა პირობებში და რეჟიმებში.

ვენტილური ძრავა აჩენს ახალ გზებს და პერსპექტივებს მძლავრი და ზემძლავრი მანქანის შექმნისათვის დაბალი და მაღალი რეგულირებადი სიჩქარეებით, ვენტილური ძრავა უზრუნველყოფს მდორე გაშვების ნებისმიერ კანონს.

ვენტილურ ძრავებში ტირისტორების დინამიკური თვისებებს დიდი მოთხოვნები არ წარედგინება. მანქანური კომუტაციის ემ ძალის საშუალებით გამოყენება, საშუალებას გვაძლევს გავზარდოთ ინვერტორის ზღვრული სიმძლავრე, მისი საიმედოობა, გავამარტივოთ მისი ძალური წრედი და მართვის სისტემა, შევამციროთ ფასი. გარდა ამისა შესაძლებელია გავუშვათ სიმძლავრე ორივე მიმართულებით, რაც იოლად რეალიზებადია მართვის კუთხის ცვლილებით.

ვენტილური ძრავის ფაზათა რიცხვის შერჩევის დროს მოქმედებს ორი საწინააღმდეგო ფაქტორი: 1). ძრავას დასაშვები გახურება, 2). ოპტიმალური მასა გაბარიტული ზომები. სამფაზიდან ექვსფაზზე გადასვლის შემთხვევაში გამშვი მომენტი იზრდება 7% ით. მაგრამ რთულდება კომუტაცია. გამოყენების კოეფიციენტი იზრდება უმნიშვნელოდ, რადგან ქსელი სამფაზაა და წარმოებაში დამზადებული სინქრონული მანქანებიც სამფაზაა, მიზანშეწონილია სქემები დამზადდეს სამფაზა ბოგური გარდამსახებით. ეს სქემები გამოირჩევიან მომენტის მცირე პულსაციით, ტრანსფორმაციის მაღალი გამოყენების კოეფიციენტით და მცირე დანაკარგებით.

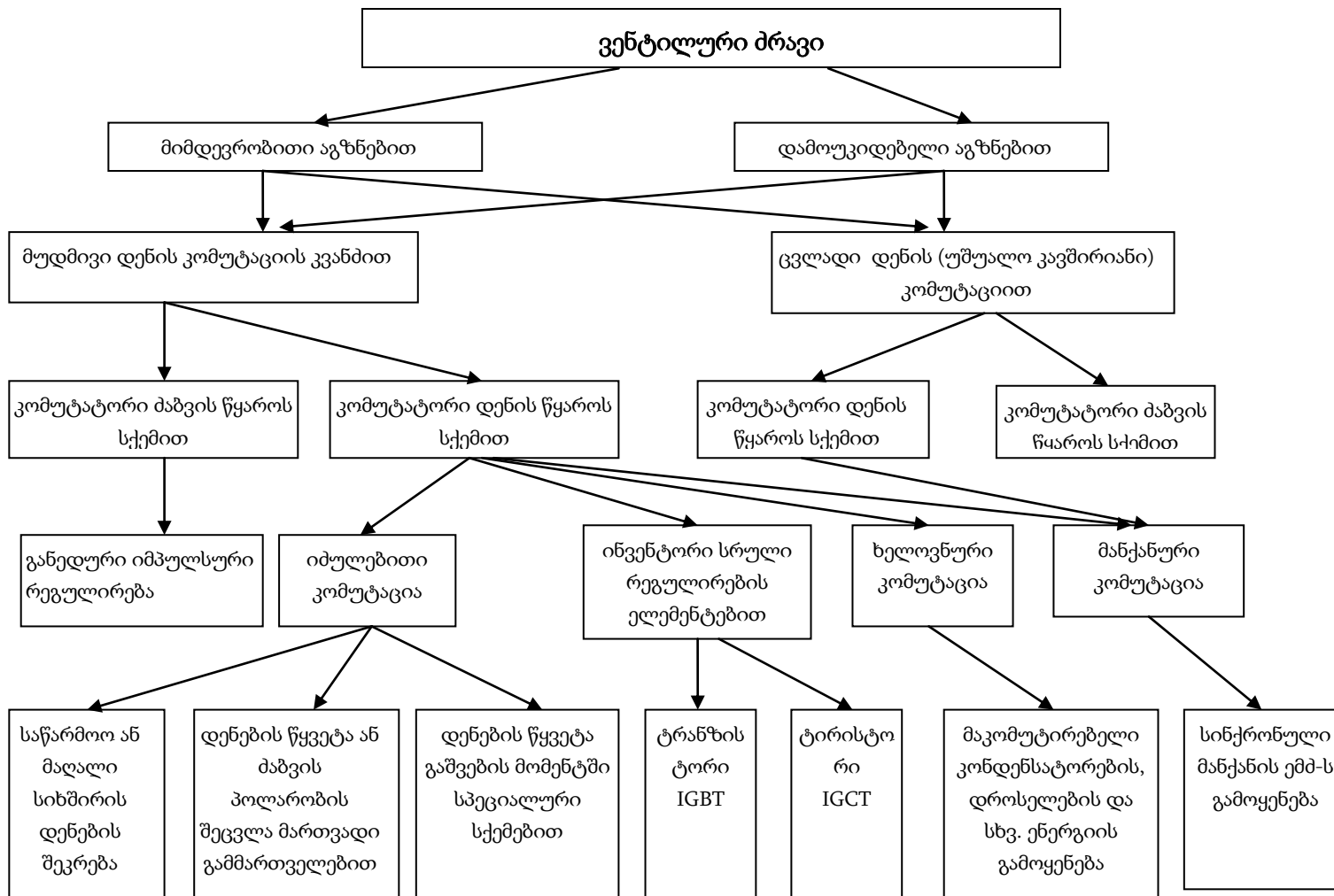
ასინქრონული და სინქრონული ძრავების რეგულირების სქემების დამუშავება დამუხრუჭებული იყო SCR ტიპის ნახევრადმართვადი ტირისტორების არადამაკმაყოფილებელი მახასიათებლების გამო.

ძალური ელექტრონიკის განვითარებამ და წინსვლამ ხელი შეუწყო ისეთი ტირისტორების შექმნას, რომლებიც ხასიათდებიან დიდი სიმძლავრეებით და მაღალი დონის კომუტირებადი ძაბვით, მცირე დანაკარგებით, მართვის მცირე მოთხოვნილი სიმძლავრეებით, მცირე მართვის (გადართვის) დროით და ა.შ.

GTO სრულად მართვადი ტირისტორები, IGBT ბიპოლარული ტრანზისტორები იზოლირებული ჩამკეტით, MOSFET სავლე ტრანზისტორი იზოლირებული ჩამკეტით, ფართოდ გამოიყენება მცირე და საშუალო სიმძლავრის ელექტროამძრავში დაბალი ძაბვის წრედებში. ტრადიციული SCR ტირისტორები, რომლებიც ხასიათდებიან მცირე დანაკარგებით და სიიფით, დღეისათვის წარმოდგენენ ელემენტებს გარდამქმნელებში ბუნებრივი კომუტაციით, განსაკუთრებით მაღალი ძაბვის სისტემაში.

ამგვარად, თანამედროვე ვენტილური ძრავები, მიუხედავად იმისა, რომ აქვთ უამრავი უარყოფითი თვისებები, ფლობენ უამრავ უპირატესობებს: უბრალო ამუშავება, სიჩქარის რეგულირება მდორედ დიაპაზონში, რევერსის შესაძლებლობა ძალური ქსელის გადართვის გარეშე და აქვთ მუდმივი დენის მანქანის ანალოგიური მახასიათებლები.

ლიტერატურის ანალიზის საფუძველზე შეიძლება შედგეს ვენტილური ძრავას კლასიფიკაციის სქემა (ნახ. 6) [1,2,3,4,5,6] .



ნახ. 6 ვენტილური ძრავის კლასიფიკაციის სქემა

თავი II. ვენტილურ ძრავებიანი ელექტროამძრავის სისტემები

2.1 ვენტილური ძრავების ამძრავის სისტემების ანალიზი

ვენტილურ ძრავაში სიხშირული გარგამქმნელის ინვენტორის მართვა ხორციელდება მართვის შიდა პრინციპით. კერძოდ სიხშირის გარდამქმნელის ინვერტორი მართვის იმპულსს იღებს როტორის მდგომარეობის გადამწოდის საშუალებით.

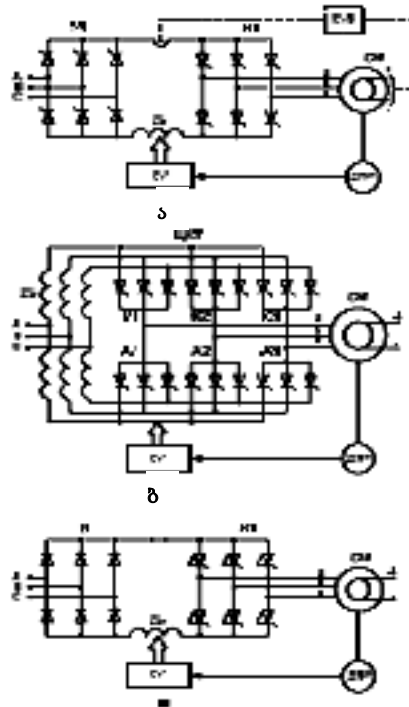
ვენტილურ ძრავას აქვს მუდმივი დენის ძრავას თვისებები და ამიტომ არქმევენ უკონტაქტო, ანუ ვენტილურ ძრავას, ნახევარგამტარული ინვერტორი, რომელიც იმართება ძრავას ლილვზე განლაგებული როტორის მდგომარეობის გადამწოდით ასრულებს ინვერტორის ვენტილი ასრულებს მუსებით კონტაქტის ფუნქციას.

ყველაზე დიდი გავრცელება მოიპოვა ვენტილურმა ძრავებმა მუდმივი დენის კვანძიანი გარდამსახებით (მუდმივი დენის ძრავები) და დენის წყაროს რეჟიმში, გარდამსახებთან უშუალო კავშირში მომუშავე ვენტილურმა ძრავებმა [3]. ე.ი. (ცვლადი დენის ვენტილური ძრავები) ნახ. 7.

ცნობილია, რომ ვენტილებს ირჩევენ კვების წყაროს მაქსიმალური ძაბვისა და დენის მიხედვით. ასინქრონული და სინქრონული მანქანების კვების წყაროების შერჩევა ძაბვების მიხედვით ანალოგიურია, ხოლო დენის მიხედვით საგრძნობლად განსხვავდებიან ერთიდაიგივე მომენტის, სიჩქარის და ძაბვის დროს.

ვენტილური ძრავები ასინქრონული და სინქრონული მანქანისგან განსხვავებით, გენერატორულ რეჟიმში არ საჭიროებს რეაქტიულ სიმძლავრეს, ამიტომ უკუდიოდების გამორთვის შემთხვევაში არ არის დიოდების მეორე ჯგუფის ჩართვის აუცილებლობა. ამიტომ, ერთიდაიგივე მართვადი გამმართველი შეიძლება მუშაობდეს, როგორც ენერჯის გაცემის ასევე ენერჯის მიღების რეჟიმში.

ამრიგად, ვენტილური ძრავას უნივერსალური რეგულირებადი ამძრავით შეცვლის შემთხვევაში, გარდამქმნელის სიმძლავრე თითქმის ორჯერ მცირდება, უფრო მეტად მცირდება მაკომპუტირებელი კონდენსატორისა და დროსელის სიმძლავრე.



ნახ 7. ვენტილური ძრავების სქემები.

სქემებზე გვაქვს შემდეგი აღნიშვნები: CY, CYB-აგზნების დენისა და ძაბვის მართვის სისტემები. DP-დროსელი; CM-სინქრონული მანქანა; ДПР-როტორის მდგომარეობის გადამწოდი; ЧПГ-გან განსხვავებით მუდმივი დენის ვენტილურ ძრავაში SCR ტიპის ტირისტორებზე (ნახ 7 ა, ბ) ინვერტორის კომუტაცია ხორციელდება ძრავას რეაქტიული ენერჯის ხარჯზე.

მუდმივი დენის ვენტილური ძრავებისათვის არსებობს ამუშავების შემდეგი მეთოდები: ასინქრონული, როგორც ჩვეულებრივ სინქრონული მანქანის შემთხვევაში; ხელოვნური ან კომუტაციით; უმართავი

გამმართველების და სრულად მართვადი ინვერტორების ძალოვანი ელემენტების IGBT და IGCT გამოყენებით [3] (ნახ 7 ბ).

პირველი მეთოდი გამოიყენება იმ ამძრავებში, სადაც არ ხდება ხშირი გაშვებები, მაგრამ თავის სიმარტივესთან ერთად მას აქვს სერიოზული ნაკლოვანებები, კერძოდ ქსელის გადართვა, ძრავის დამატებითი გადახურება, ძალოვანი სქემის გართულება და ა.შ. გაშვების მეორე მეთოდი ხორციელდება რამდენიმე გზით: მაკომპუტირებელი ელემენტების ენერჯის გამოყენებით, საწარმოო და ამალღებული სიხშირეების ზედდებით, დენის წყვეტით კომუტაციის სპეციალური სქემების საშუალებით, დენის წყვეტით, ან ძაბვის პოლარობის შეცვლით მართვადი გამმართველის გავრცელება, სადაც ხდება მართვის იმპულსების წყვეტა ან ხდება ციკლური გადასვლა გამმართველისა ინვერტორულ რეჟიმში როტორის მდგომარეობის გადამწოდებიდან მოსული მართვის იმპულსების სიხშირის მიხედვით [3,7,8].

კომუტატორის ტირისტორების ჩაკეტვის სქემებიდან შეიძლება გამოვიყოს ორი რეჟიმი: ბიჯური როცა სიხშირე $0 < f < f_{ბიჯ}$ და უწყვეტი $f_{ბიჯ} < f < f_{რ}$. ბიჯურ რეჟიმში კომუტაციის დროს სიჩქარე და დენი 0-ის ტოლია, ამ რეჟიმისათვის დამახასიათებელია მომენტის შემცირება (20÷30)%, რაც ითხოვს ძრავას სიმძლავრის გაზრდას გაშვების უზრუნველყოფისათვის [9]. გარდა ამისა ქსელის არასტაციონალური დატვირთვა რეაქტიული სიმძლავრით იწვევს მკვებავი ქსელის ძაბვის სუბჰარმონიკულ პულსაციას და გარდამსახის ვენტილების არათანაბარ დატვირთვას, ასევე ქსელის ტრანსფორმატორის გადატვირთვას.

ვენტილური ძრავა (ავტონომიური ინვერტორით) ხელოვნური კომუტაციით თავისუფალია მექანიკური კომუტაციის ნაკლოვანებებისგან. ასეთ ამძრავებში შესაძლებელია გასწრების ნულოვანი კუთხით მუშაობა მომენტის მცირე პულსაციის შემთხვევაში. გარდა ამისა შესაძლებელია რეჟიმი ჩამორჩენილი დენით, როცა ღუზის რეაქცია დამამაგნიტებელი ხასიათისაა. თუმცა ხელოვნური კომუტაცია ართულებს ძალოვან წრედებს

და მართვის სისტემებს, რაც ზრდის ფასს და ამცირებს ამძრავის საიმედოობას.

უმართავი გადამრთველები და სრულად მართვადი ძალოვანი ელემენტები IGBT ან IGCT) (ნახ 7 ბ) გამოიყენება ძრავას სტატორის ძაბვის იმპულსური რეგულირების დროს.

ყველაზე იოლად გაშვება ხორციელდება ციკლოკონვერტორით (ნახ. 7), სადაც გამმართველის და ინვერტორების ფუნქციას ასრულებს ერთიდაიგივე ტირისტორი, რითაც მიიღწევა კვების წყაროს ძაბვისა და სიხშირის გარდაქმნა. უშუალოდ ძრავას ძაბვაზე და სიხშირეზე ასეთი სისტემა შეიცავს უფრო მეტი რაოდენობის ტირისტორებს, ვიდრე მუდმივი დენის კვანძი, მაგრამ რადგან არ შეიცავს გამშვ მოწყობილობას, ენერგოეფექტურია და საიმედო [3, 7].

სამფაზა ბოგური ციკლოკონვერტორი შედგება ტირისტორების 6 ჯგუფისგან. ფაზის სხვადასხვა პოლარობის ტირისტორული ჯგუფები ჩაირთვებიან რიგრიგობით, რითაც გამოირიცხება დატვირთვაში გამათანაბრებელი დენის მუდმივი მდგენელის არსებობა.

ჯგუფების ჩართვის თანამიმდევრობა განისაზღვრება მდებარეობის სენსორით და დამოკიდებულია ბრუნვის მოცემულ მიმართულებაზე და ძრავას როტორის მდებარეობაზე სტატორის ფაზების მაგნიტური ღერძების მიმართ. ჯგუფის შიდა ტირისტორები იღებიან სიგნალებით, რომლებიც სინქრონიზებულია მკვებავი ქსელის სიხშირესთან. ყოველი ტირისტორის ჩართვათა რაოდენობა ჯგუფში დამოკიდებულია ქსელისა და ძაბვის სიხშირეთა თანაფარდობაზე. ძრავას სტატორის გრაგნილებში დენის გადინების წრედი იქმნება ორი ტრანზისტორის ერთდროული ჩართვით ქსელისა და სტატორის სხვადასხვა ფაზებში.

მოყვანილ სქემაში ბუნებრივი კომუტაცია ხორციელდება ვენტილური ძრავას ყველა სიჩქარულ დიაპაზონში, როგორც ერთი ჯგუფის ტირისტორებს შორის ასევე სხვადასხვა ჯგუფებისა. უკანასკნელს ადგილი აქვს დროის მიხედვით ქსელის ფაზებისა და ძრავას ფაზების გადამრთავი

სიგნალების დამთხვევისას, მანქანური კომუტაცია ხორციელდება ძრავას ემ ძალის დახმარებით ერთი პოლარული ჯგუფის ტირისტორებს შორის სიხშირეზე $f \geq f_{\text{კვ}}$. ვენტილურ ძრავიანი ელექტროამძრავების სისტემების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მეტი ენერგოეფექტურობა და საიმედოობა აქვს სქემებს კომუტაციით, რომლებიც მუშაობენ დენის წყაროს რეჟიმში ბუნებრივი და მექანიკური კომუტაციით.

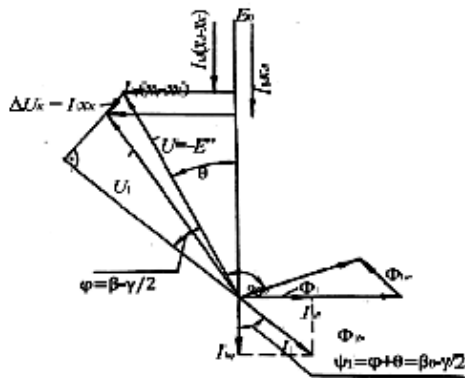
2.2 ვენტილური ძრავების მართვის ხერხები

როგორც ადრე იყო ნათქვამი, ვენტილურ ძრავას ბრუნვას უზრუნველყოფს სპეციალური მართვის ელექტრონული სისტემა. მისი ინვენტორი მოცემულ შემთხვევაში ეწოდება ელექტრონულ სისტემას, რომელიც ახორციელებს ძაბვის მოწოდებას, რომლის სიხშირე არ არის დამოკიდებული ძრავის გრაგნილებზე მიწოდებული მკვებავი ძაბვის სიხშირეზე.

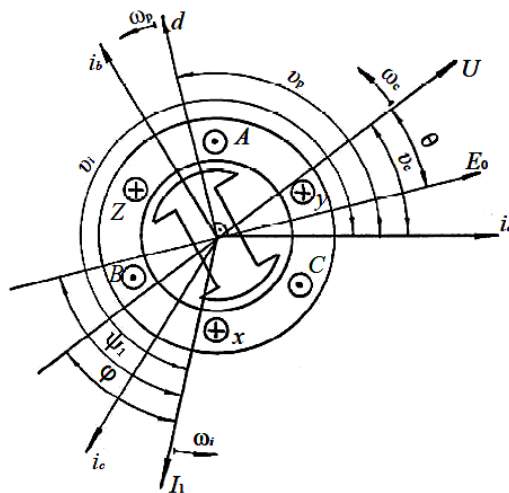
ინვენტორებით აღჭურვილია არა მარტო ასინქრონული ვენტილური ძრავები, არამედ სინქრონული ძრავებიც, როდესაც საჭიროა სიჩქარის რეგულირება. არსებობს ორი ძირითადი პრინციპი ვენტილური ძრავების მართვისა:

1. კომუტაციით მართვა (ექვს პულსიანი მართვა)
2. ვექტორული მართვა.

ნახ. 8 წარმოდგენილია ვექტორული დიაგრამა, ხოლო ნახ. 9 ნაჩვენებია ვენტილური ძრავას გრაგნილების მაგნიტური ღერძების და ვენტილური ძრავას დენური კომუტაციით ვექტორების სქემური განლაგება. კომუტაციის გამტარებლობის ზოლი დენსა და შესაბამისად მანქანის უქმი სვლის ემ ძალასა და ფაზას შორის. არსებობს ვენტილური ძრავას კომუტატორის მართვის სხვადასხვა ხერხები [3,7].



ნახ. 8 ვენტილური ძრავას ვექტორული დიაგრამა



ნახ.9 ვენტილური ძრავას გრაგნილებისა და ვექტორების მაგნიტური ღერძების სქემატური განლაგება

პირველი, ყველაზე მარტივი მართვის ხერხი მდგომარეობს წინსწრების $\beta_0 = const$ მნიშვნელობის შენარჩუნებაში. ამ დროს ძაბვის სინქრონიზაციის წყაროს წარმოადგენს როტორის მდებარეობის სენსორი. ვენტილური ძრავას ვექტორული დიაგრამიდან (ნახ.8) დენის პირველ ჰარმონიკასა და უქმი სვლის ემძ-ს შორის გამოისახება შემდეგნაირად [3,7]:

$$\psi_1 = \varphi + \theta = \beta_0 - \frac{\gamma}{2} \quad (2.1)$$

სადაც φ - არის დამვრის კუთხე დენის ძირითად ჰარმონიკასა და ფაზურ ძაბვას შორის;

θ დატვირთვის კუთხე;

γ კომუტაციის კუთხე

მეორე მართვის ხერხის დროს [3,7], მუდმივად შენარჩუნებულია წინსწრების β კუთხე $\beta_0 = \text{const}$. სინქრონიზაციის ძაბვის წყაროს წარმოადგენს სტატორის ძაბვის სენსორი. ამ შემთხვევაში გამოსახულება (2.1) მიიღება შემდეგ სახეს:

$$\psi_1 = \beta - \frac{\gamma}{2} + \theta \quad (2.2)$$

მესამე მართვის ხერხი მდგომარეობს თადარიგის კუთხის δ შენარჩუნებაში მუდმივი მნიშვნელობის მქონედ და მინიმალურ დონეზე [3,7].

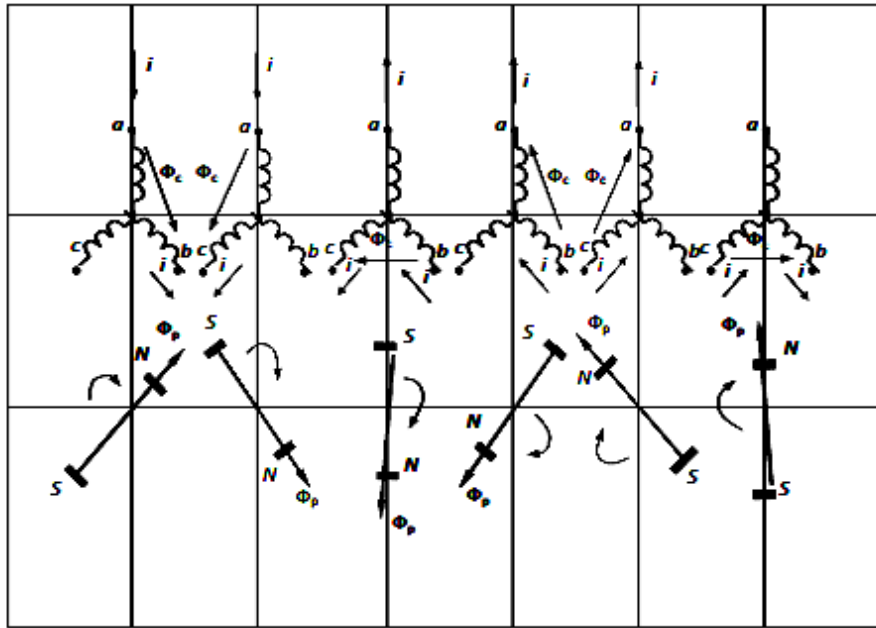
$$\beta_0 = \beta_{0min} = f(\gamma, \theta) \quad \text{ამასთან,} \quad \delta = \delta_{min} = \text{const} \quad (2.3)$$

$$\beta = \beta_{0min} = f(\gamma) \quad \text{ამასთან,} \quad \delta = \delta_{min} = \text{const} \quad (2.4)$$

$$\psi_1 = \frac{\gamma}{2} + \delta_{min} + \theta \quad (2.5)$$

ბოლო მართვის ხერხი საჭიროებს კომუტაციის და დატვირთვის კუთხეების ქონას.

მაგნიტური ნაკადის ფორმირება ვენტილური ძრავის როტორის მობრუნების კუთხისაგან დამოკიდებულებაში წარმოდგენილია ნახ. 10.



ნახ.10 რეზულტური მაგნიტური ნაკადის ფორმირება, ვენტილური ძრავას როტორის მობრუნების კუთხეზე დამოკიდებულებაში.

2.3 კომუტაციით მართვა

კომუტაციით მართვის დროს მუდმივი ძაბვა მიეწოდება ერთდროულად სტატორის მხოლოდ ორ გრაგნილს, მესამე გრაგნილი არ არის მიერთებული დენის წყაროსთან. ძრავის მუშაობის პროცესში, მართვის სისტემა უთვალთვალებს როტორის მდგომარეობას და შესაბამისად ორ გრაგნილს აძლევს განსაზღვრული პოლარობის ძაბვას, ისე, რომ სტატორის მაგნიტური ველი ქმნის მბრუნავ მაგნიტურ ველს და ატრიალებს როტორს.

როტორის ბრუნვის სიჩქარე რეგულირდება როტორის გრაგნილებში კომუტირებული მუდმივი ძაბვის საშუალებით.

ამასთან კომუტაციის სიხშირე კორექტირდება როტორის ბრუნვის სიჩქარის მიხედვით [10].

როტორის ბრუნვის სიჩქარე კი არ იცვლება მბრუნავი ველის სიხშირისაგან, არამედ მბრუნავი ველის სიხშირე იცვლება და კორექტირდება როტორის ბრუნვის სიჩქარის მიხედვით.

ინვენტორი არეგულირებს როტორის ბრუნვის სიჩქარეს ძრავას გრაგნილებში ძაბვასა და დენის კომუტაციის საშუალებით. ფაზების კომუტაციის პერიოდში ადგილი აქვს დენების შემცირებას და გაზრდას, რომელთა ხანგრძლივობა განპირობებულია ელექტრული ძრავას სიჩქრით, გრაგნილების ინდუქციური და აქტიური წინაღობით, ძალოვანი ტრანზისტორის მახასიათებლებით და მაშუნტებელი დიოდით.

გარდამავალი პროცესების ანგარიშის გამარტივების მიზნით მიღებულია დაშვება: ძალური ტრანზისტორი ან ტირისტორი და მაშუნტებელი დიოდი იდეალურია. ე.ი. ღია მდგომარეობაში ძაბვის ვარდნები მათზე ნულის ტოლია [10].

ასეთი დაშვება სამართლიანია მხოლოდ მცირე სიმძლავრის ვენტილური ძრავების შემთხვევაში, როდესაც გრაგნილების წინაღობები ათჯერ და ასჯერ აღემატება ღია ტრანზისტორის არხის წინააღობას.

ენერგეტიკული თვალსაზრისით ვენტლურ ძრავებში მიზანშეწონილია ორნახევარპერიოდიანი კომუტაცია, როდესაც ფაზაში კომუტაციის პერიოდში დენი იცვლის მიმართულებას.

იმდენად, რამდენადაც ვენტლურ ძრავებში ელექტრომაგნიტური პროცესები მეორდება 360° ელექტრული გრადუსებით, დენის არსებობა ორნახევარპერიოდიანი ექვსბიჯიანი კომუტაცია პერიოდში განისაზღვრება ფორმულით

$$t_i = 2 t_k \quad (2.6)$$

სადაც t_k - კომუტაციის ერთი ბიჯის ხანგრძლივობაა

$$t_k = 10/P \cdot n \quad (2.7)$$

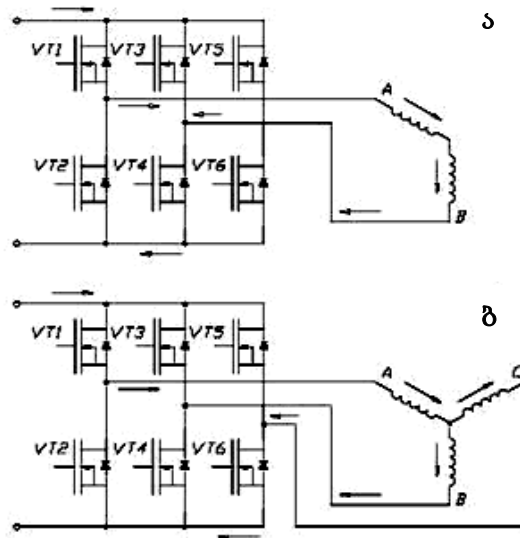
P - წყვილ პოლუსთა რიცხვია

n - როტორის ბრუნვის სიჩქარე ბრ/წთ.

ასეთი კომუტაციის შემთხვევაში ერთი ბიჯი შედგება ორი ინტერვალისაგან [11].

ერთ ინტერვალში (ნახ. 11 ა), დენი გადის მიმდევრობით ჩართულ ორ ფაზაში.

მეორე ინტერვალში ხდება დენის გაზრდა მიერთებულ ფაზაში, დენის ცვლილება მუშა ფაზაში და დენის შემცირება მუშა ფაზასთან მამუნტებელი დიოდით შეერთებულ ფაზაში.



ნახ.11 ძრავას ფაზების მიერთების სქემა კომუტაციის სხვადასხვა ინტერვალზე.

ნახ. 11 -დან ჩანს კომუტაციის პირველი ბიჯი, როდესაც VT1 და VT4 ტრანზისტორების საშუალებით A და B ფაზები ერთდებიან კვების წყაროსთან შესაბამისად.

როტორის მდგომარეობის მიმწოდის სიგნალის საშუალებით, მას შემდეგ რაც როტორი შემობრუნდება 60 ელექტრონული გრადუსით, ხდება VT6 ტრანზისტორის გახსნა და C ფაზის კვების წყაროსთან მიერთება.

A ფაზაზე შეიმჩნევა დენის ჩავარდნა. A ფაზის დენის მინიმალური და მაქსიმალური სიდიდე განისაზღვრება კომუტაციის მეორე ინტერვალის ხანგრძლივობით, რომლის დროსაც დენი მიედინება სამივე ფაზაში ერთდროულად (ნახ.11 ბ).

ძრავის გაშვების მომენტში ან დატვირთვის ცვლილებისას, ფაზაში საწყისი დენის სიდიდე და დენის სიდიდე ჩავარდნის შემდეგ, ერთმანეთისაგან განსხვავდებიან. დამყარებული რეჟიმის დროს ეს დენები ემთხვევიან ერთმანეთს.

დენების ბრუნთა რიცხვის და ელექტრომაგნიტური მომენტის მყისი სიდიდეების განსაზღვრისათვის საჭიროა დიფერენციალური განტოლებების სისტემის ამოხსნა. კომუტაციის ყოველ ინტერვალში, ტრანზისტორის ღია არხზე და მაშუნტებელ დიოდზე ძაბვის ვარდნის გათვალისწინებით.

კომუტაციის I ინტერვალში განტოლებების სისტემა შეიძლება გამოვსახოთ ნახ. 11 ა მეორე ინტერვალისათვის ნახ. 11 ბ.

$$\left\{ \begin{array}{l} 2 \frac{dI}{dt} \cdot (L + M) + 2 \cdot (R + R_{VT}) \cdot I + E_{AB} = U \\ J_{pr} \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{DB} - M_H - M_n \\ M_{DB} = 2 \cdot I_A \cdot Cm \\ \frac{d\alpha}{dt} = \omega \end{array} \right. \quad (2.8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (L + M) \cdot \left(\frac{dI_A}{dt} + \frac{dI_B}{dt} \right) + (R + R_{VT}) \cdot I_A + (R + R_{DVT}) \cdot I_B + E_{AB} = 0 \\ (L + M) \left(\frac{dI_A}{dt} + \frac{dI_C}{dt} \right) + (R + R_{VT}) \cdot I_A + I_C + E_{AC} = U \\ -I_A + I_B + I_C = 0 \\ J_{pr} \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{DB} - M_H - M_n \\ M_{DB} = 2 \cdot I_A \cdot Cm \\ \frac{d\alpha}{dt} = \omega \end{array} \right. \quad (2.9)$$

სადაც I_A, I_B, I_C – დენები A, B, C ფაზებში

E_{AB}, E_{AC} A-B და A-C ფაზებში დაინდუქცირებული ბრუნვის
ჯამური უკუ ე.მ.ძ-ებია შესაბამისად:

$L=L_A=L_B=L_C$ - ფაზების ინდუქციურობებია

M - ფაზების ურთიერთინდუქციის კოეფიციენტი.

$R=R_A=R_B=R_C$ - ფაზების აქტიური წინაღობებია

R_{VT}, R_{DVT} - ძალური ტრანზისტორის დია არხის და მაშუნტებელი
დიოდის აქტიური წინაღობებია შესაბამისად.

U - კვების ძაბვა.

J_{pr} - ლილვის და დატვირთვის დაყვანილი ინერციის მომენტი

C_m - მომენტის კოეფიციენტი

M_{DB} - ელექტრომაგნიტური მომენტი

M_H - ძრავის ლილვის დატვირთვის მომენტი

M_n - ძრავის დანაკარგების შესაბამისი მომენტი.

ძრავის მაგნიტოგამტარში და საკისრებზე დანაკარგების შესაბამისი
მომენტი შეიძლება ჩავწეროთ შემდეგნაირად:

$$M_n(\omega) = k_{CT} \cdot \omega^{0.5} + k_{საკ} \cdot \omega^{2/3} \quad (2.10)$$

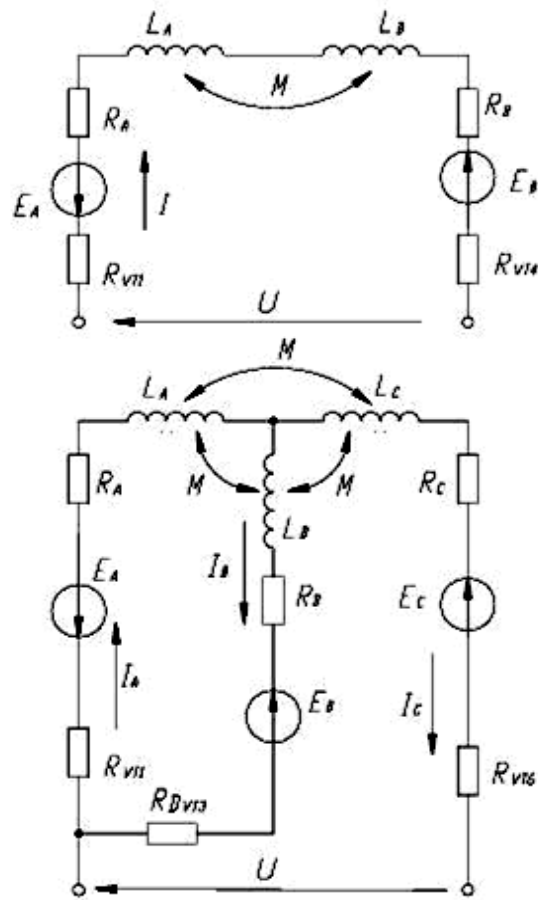
სადაც $K_{საკ}$ - დამოკიდებულია ძრავას მაგნიტოგამტარის გეომეტრიაზე,
მაგნიტურ თვისებებზე და დამუშავების ტექნოლოგიაზე.

$K_{საკ}$ - კოეფიციენტი დამოკიდებულია საკისრის ზომებზე, საპოხი
მასალის სიბლანტეზე და საკისარზე მოსულ მექანიკურ დატვირთვაზე. (2.8)
და (2.9) დიფერენციალური განტოლებების სისტემების ინტეგრირება
ხდება რუნგე-კუტას მეთოდით, ინტეგრირების ბიჯის შერჩევა ხდება
კომპუტაციის ერთი ბიჯის ხანგრძლივობის მიხედვით (2.7) განტოლებიდან.

საკმარისი სიზუსტის მისაღებად საკმარისია კომპუტაციის ერთ ბიჯზე
შევარჩიოთ 100 წერტილი. საწყის პირობებად მიღებულია დენის
სიდიდეები ყველა ფაზაში, კომპუტაციის წინა ინტერვალის ბოლოს.

ძრავის ჩართვის მომენტში დენები ფაზებში 0-ის ტოლია.

(2.8) და (2.9) დიფ. განტოლებების სისტემების შესაბამისი სქემები მოცემულია ნახ. 12-ზე.



ნახ.12 კომუტატორისა და დახვევის სქემები კომუტაციის ინტერვალებისათვის.

ნახ.12 კომუტატორისა და დახვევის სქემები კომუტაციის ინტერვალებისათვის, რომლებიც მოყვანილია ნახ. 11ა და 11 ბ-ზე

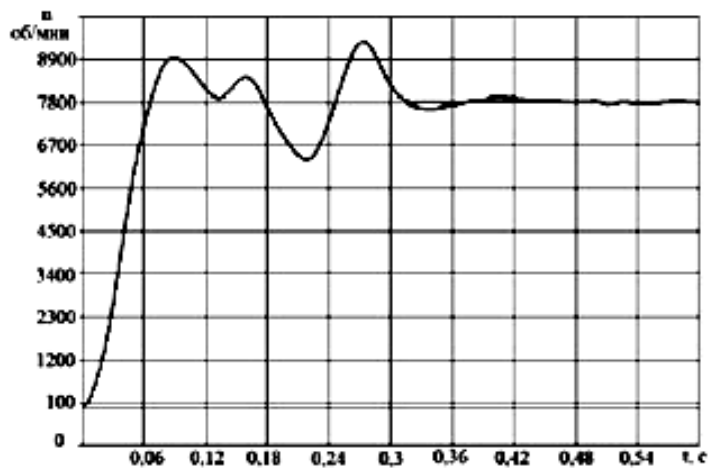
ნახ. 11 ა თანახმად კომუტაციის ინტერვალისათვის გვაქვს.

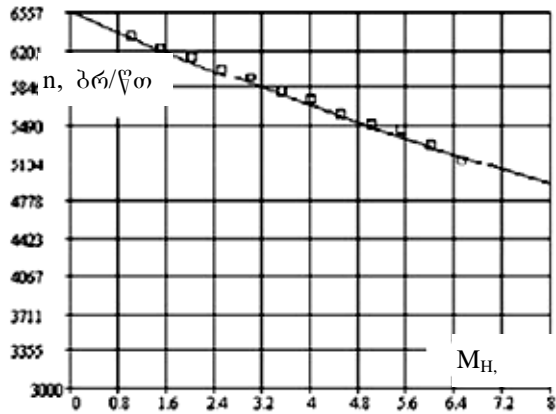
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI}{dt} = \frac{U - 2 \cdot (R + R_{VT}) \cdot I - E_{AB}}{2 \cdot (M + L)} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{2 \cdot I \cdot C_m - M_H - M_{\Pi}}{J_{pr}} \\ \frac{d\alpha}{dt} = \omega \end{array} \right. \quad (2.11)$$

და ნახაზი (11 ბ) -ს თანახმად კომპუტაციის ინტერვალისათვის გვაქვს (2.12).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_A}{dt} = -\frac{1}{3 \cdot (L+M)} [(R + R_{VT}) \cdot (2 \cdot I_A + I_c) + (R + R_{DVT}) \cdot I_B + E_{AC} + E_{AB} - U \\ \frac{dI_B}{dt} = -\frac{1}{3 \cdot (L+M)} [(R + R_{VT}) \cdot (2 \cdot I_A - I_c) + U - E_{AC} - 2 \cdot E_{AB} - 2 \cdot (R + R_{DVT}) \cdot I_B] \\ \frac{dI_C}{dt} = -\frac{1}{3 \cdot (L+M)} [2 \cdot U - 2E_{AC} + E_{AB} - (R + R_{VT}) \cdot (I_A + 2 \cdot I_c) + (R + R_{DVT}) \cdot I_B] \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{(2 \cdot I_A \cdot C_m) - M_H - M_{\Pi}}{J_{pr}} \\ \frac{d\alpha}{dt} = \omega \end{array} \right. \quad (2.12)$$

(2.11) და (2.12) დიფ. განტოლებების სისტემის ამონახსნები სხვადასხვა დატვირთვის დროს იძლევიან ვენტილური ძრავების მექანიკურ და მუშა მახასიათებლებს.





ნახ. 13 ვენტილური პრავებისათვის თეორიული და ექსპერიმენტალური მექანიკური მახასიათებლები.

მოცემულია თეორიული და ექსპერიმენტალური მექანიკური მახასიათებლები ვენტილური პრავებისათვის.

თეორიული მრუდი მოცემულია მთლიანი ნახაზით. ექსპერიმენტალური მრუდი მოცემულია წერტილთა ერთობლიობით. ნახ. 13-დან ჩანს, რომ საკმარისი სიზუსტით ემთხვევა თეორიულ და პრაქტიკულ მრუდები ერთმანეთს.



ნახ 14. როტორის სიჩქარის ცვლილების მრუდი გაშვების მომენტში



ნახ. 15 ვენტილური ძრავას ფაზების დენები ძრავის გაშვების მომენტში.

ნახ. 15-ზე მოცემულა ძრავის ფაზების დენები ძრავის გაშვების პროცესში.

ნაჩვენებია A და B ფაზების დენის ზრდის მრუდები. ამ დროს C ფაზაში დენი 0-ის ტოლია.

შემდეგ ჩანს კომუტაციის მეორე უბანი, სადაც ხდება დენის ზრდა მიერთებულ C ფაზაში და დენის შემცირება გამორთულ B ფაზაში.

A ფაზაში შეიმჩნევა დენის რხევები. ამის შემდეგ პროცესი მეორდება.

ნახ. 14-15-ზე მოცემული პროცესები გამოწვეულია ინდუქციის, ურთიერთინდუქციის წინააღობებით, ფაზების აქტიური წინააღობებით,

აგრეთვე ძალოვანი ტრანზისტორების და მაშუნტებელი დიოდის წინააღმდეგობით.

2.4 როტორის მდგომარეობის განსაზღვრა

არსებობს უამრავი მეთოდი მდგომარეობის განსაზღვრისა:

- ჰოლის გადამწოდის მეთოდი
- გადამწოდის გარეშე

როტორის მდგომარეობის ფიქსირებისათვის გამოიყენება თავისუფალი ფაზა, რომელშიც ინდუქცირდება თვითინდუქციის ე.მ.დ. მოცემულ მომენტში თავისუფალი ფაზა გამორთულია და ძაბვა არ მიეწოდება.

როტორის მოძრაობის დროს თავისუფალ ფაზაში დაინდუქტირებული ე.მ.დ. გადის ნულოვან ნიშნულს და ეს არის როტორის მდგომარეობის აღმნიშვნელი. მართვის ამ მეთოდის გამოყენების დროს, ძრავის გრაგნილებში გადის ტრაპეციის ფორმის დენები. მართვის ეს მეთოდი გამოირჩევა სიმარტივით, სიიაფით და გამოიყენება ვენტილურ ძრავებში, როგორც ახლო მანძილებზე, ასევე კილომეტრებით დაცილებული კვების წყაროების შემთხვევაში [11].

2.5 ვექტორული მართვა

ვექტორული მართვის არსი მდგომარეობს მართვის და ძრავას ზუსტი მათემატიკური მოდელის შექმნაში. იქმნება ძრავისა და მისი მართვის ზუსტი მათემატიკური მოდელი. ნებისმიერ მომენტში ძრავის ყველა ფაზის წრედში მიეწოდება მოდელირებული სიხშირის და სიდიდის დენები. მყისური სიდიდეები დროის ნებისმიერ მომენტში ძრავის ყველა ფაზაში ინდივიდუალურია და ისეთი სიხშირისაა და სიდიდის, რომ

უზრუნველყოფენ მაქსიმალურ მ.ქ.კ. და მაღალ ენერგეტიკულ მაჩვენებლებს [3,11,12].

მათემატიკური მოდელის გამოყენებით და საშუალებით დენები სინუსოიდალურია, ძვრის კუთხე როტორის და სტატორის მაგნიტურ ნაკადებს შორის 90° - თან ახლოსაა.

მცირე სიჩქარეების ინტერვალში ვენტილური ძრავების შესწავლა მოითხოვს მათემატიკური მოდელის დაზუსტებას და ელექტრონული კომუტატორის არაწრფივი ელემენტების გათვალისწინებას. ამ მიზნით მათემატიკური ანალიზი და მოდელები მოითხოვენ დაზუსტებას და კომპიუტერულ რეალიზაციას [12].

განსახილველი ვენტილური ძრავა წარმოადგენს სტატორის სამფაზა სამგრაგნილა ცვლადი დენის კლასიკური შესრულების ელექტრულ ძრავს. კომუტაცია ხორციელდება დისკრეტული მოქმედების მდგომარეობის გადამწოდების საშუალებით. შეკრული ციკლი ხორციელდება მართვის სისტემისა და ძალური ნახევარგამტარული გარდამქმნელის კომბინაციით.

მართვის მიკროსქემაში დაპროგრამებულია სამფაზა გრაგნილების მკვებავი ძაბვა, რომლის ფორმირება ხორციელდება როტორის მდგომარეობის გადამწოდის საშუალებით. კომუტაცია 6 ციკლისაგან შედგება. ვენტილური ძრავის გრაგნილების უწყვეტი კომუტაცია ხორციელდება ჩაკეტილი მართვის სისტემის საშუალებით.

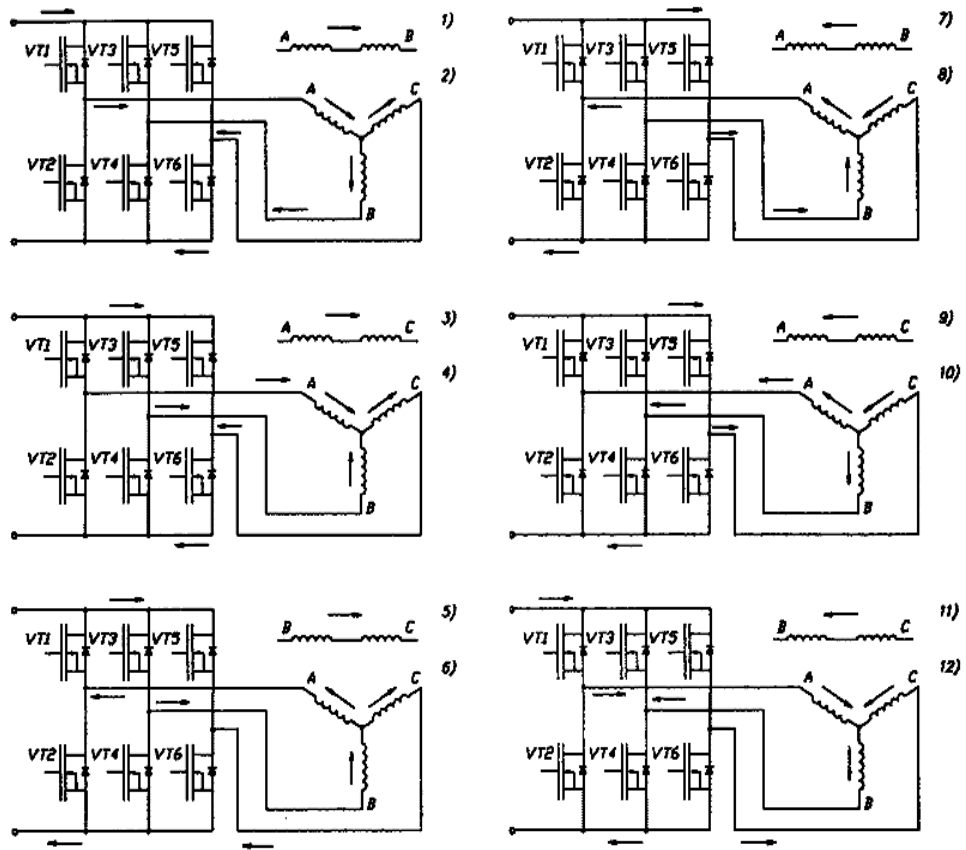
ვარსკვლავად შეერთებული სამფაზა გრაგნილის ორი ფაზა მუდმივად ერთდება კვების წყაროსთან. რაც შეეხება მესამე ფაზის გრაგნილს, იგი შეერთებულია მოკლედ ერთ-ერთი ფაზის გრაგნილთან მამუნტებელი დიოდის საშუალებით.

| ბრუნვის ტიპი | როტორის მდებარეობის მიმწოდ სიგნალი | | | „ქვედა“ ტრანზისტორების მდგომარეობა | | | „ზედა“ ტრანზისტორების მდგომარეობა | | |
|------------------|------------------------------------|----------------|----------------|------------------------------------|---|---|-----------------------------------|---|---|
| | S _A | S _B | S _C | A | B | C | A | B | C |
| პირდაპირი ბრუნვა | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| უკუ ბრუნვა | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |

ცხრილი 1. მართვის მიკროსქემაში რეალიზებული ექვსბიჯიანი კომუტაცია.

ენერგეტიკული თვალსაზრისით (მაქსიმალური მ.ქ.კ.; მინიმალური დანაკარგები, მაქსიმალური $\cos\phi$ და ა.შ.). ვენტილური ძრავებისათვის ყველაზე მიზანშეწონილია ორნახევარპერიოდის კომუტაცია, როცა დენი ფაზაში კომუტაციის პერიოდში იცვლის მიმართულებას. ასეთ შემთხვევაში მუშა ინტერვალი ორი პერიოდისაგან შედგება: კომუტაციის პერიოდი და არაკომუტაციის პერიოდი [11].

ა) უკომუტაციო ინტერვალის შემთხვევაში დენი გადის მიმდევრობით შეერთებულ ორ ფაზაში. ბ) კომუტაციის ინტერვალში ჩართული ფაზის გრაგნილში ხდება დენის გაზრდა, ხოლო მეორე ფაზაში დენის შემცირება.



ნახ. 16 ძრავას სხვადასხვა ფაზების გრაგნილების შეერთების სქემა 12 ინტერვალის კომუტაციით.

ნახ. 16-ზე მოცემულია ძრავას სხვადასხვა ფაზების გრაგნილების შეერთების სქემა 12 ინტერვალის კომუტაციით, ნახევარგამტარული ძალური გარდამქმნელისათვის როტორის მდებარეობის გადამწოდის სიგნალის ცვლილება ხდება ლუწი და კენტი ინტერვალის მიხედვით. ძრავის ამორთვის ობიექტის შეფასება ხდება სხვადასხვა დიფერენციალურ განტოლებების სისტემებით, რომელთა ცვლილება დამოკიდებულია როტორის მობრუნების ელექტრულ გრადუსებზე.

$$\left\{ \begin{array}{l}
(L+M) \cdot \left(k_{1,1} \frac{dI_A}{dt} + k_{1,2} \frac{dI_B}{dt} + k_{1,3} \frac{dI_C}{dt} + \right) + (R + R_{VT}) \cdot (k_{1,4} I_A + k_{1,5} I_B + \\
k_{1,6} I_C) + (R + R_{D_{VT}}) \cdot (k_{1,7} I_A + k_{1,8} I_B + k_{1,9} I_C) + k_{1,10} C_A E_A + k_{1,11} C_B E_B + \\
k_{1,12} C_C E_C = 0 \\
(L+M) \cdot \left(k_{2,1} \frac{dI_A}{dt} + k_{2,2} \frac{dI_B}{dt} + k_{2,3} \frac{dI_C}{dt} + \right) + (R + R_{VT}) \cdot (k_{2,4} I_A + k_{2,5} I_B + \\
k_{2,6} I_C) + k_{2,7} I_A + k_{2,8} I_B + k_{2,9} C_C E_C = U \\
k_{3,1} I_A + k_{3,2} I_B + k_{3,3} I_C = 0 \\
J_{Pr} \frac{d\omega_p}{dt} = M_{dB} - M_H - M_{\Pi} \quad (2.13) \\
M_{dB} = k_{3,4} C_A I_A + k_{3,5} C_B I_B + k_{3,6} C_C I_C \\
\frac{d\alpha}{dt} = \omega
\end{array} \right.$$

სადაც

$$C_A = C \cdot \Phi_m \sin(\varphi \cdot \alpha)$$

$$C_B = C \cdot \Phi_m \sin(\varphi \cdot (\alpha - 120^\circ)) \quad (2.14)$$

$$C_C = C \cdot \Phi_m \sin(\varphi \cdot (\alpha - 240^\circ))$$

(2.13) და (2.14) გამოყენებულია შემდეგი აღნიშვნები:

L-სტატორის გრაგნილის ინდუქციურობის კოეფიციენტი;

R-სტატორის გრაგნილის ფაზური წინაღობა, ომი

M-სტატორის გრაგნილების ურთიერთინდუქცია ჰნ.

M_d , R_{dvt} - ძალოვანი ტრანზისტორის და მაშუნტებელი დიოდის ღია მდგომარეობაში წინაღობა, ომი.

M_d -ძრავის ელექტრომაგნიტური მომენტი, ნ.მ.

K_{ij} - კოეფიციენტების მნიშვნელობები კომუტაციის სხვადასხვა პირობებისათვის მოცემულია ცხრილებში.

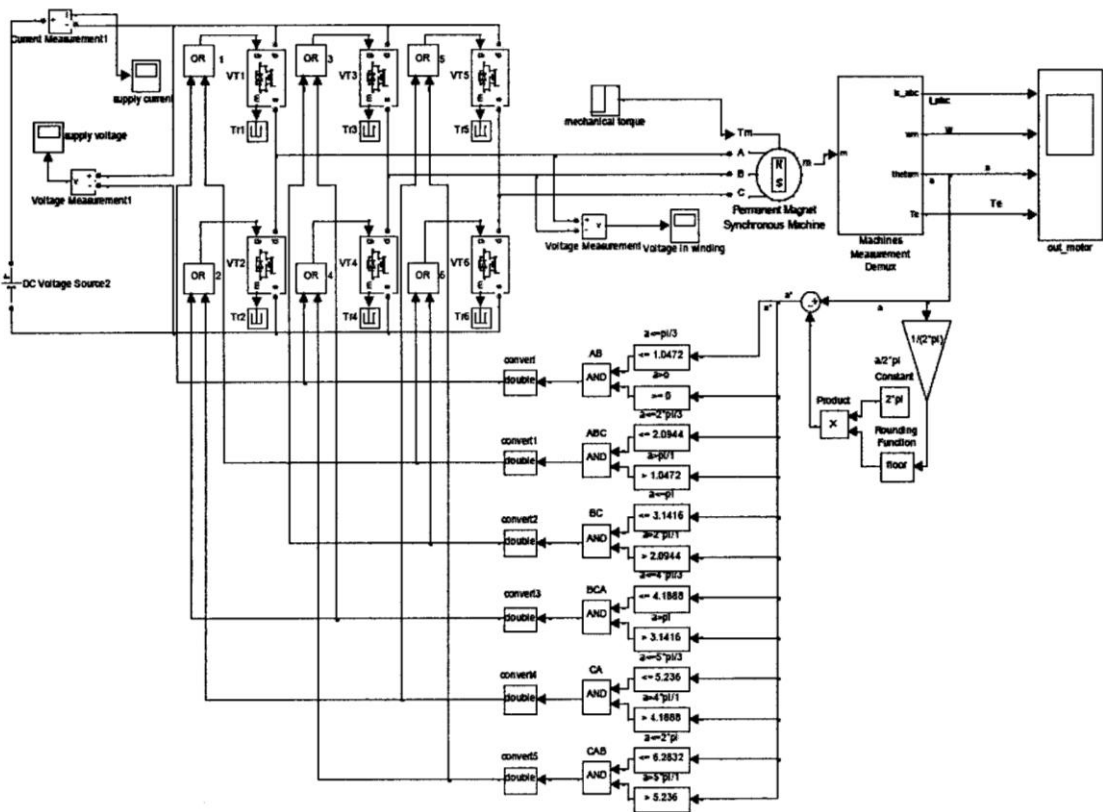
სამფაზა გრაგნილის ერთი ფაზის ე.მ.ძ - ის სიდიდე სინუსოიდალური მაგნიტური ინდუქციის შემთხვევაში გამოისახება შემდეგნაირად:

$$E_A = C_A \cdot W_P$$

$$E_B = C_B \cdot W_P$$

$$E_C = C_C \cdot W_P$$

Matlab -ის კომპიუტერული მოდელი შედგება ასინქრონული ძრავისაგან, რომლის კვება ხორციელდება ძალური ტრანზისტორული ბლოკისაგან და ნახევარგამტარული გარდამქმნელისაგან, კომპიუტერული მოდელის მნიშვნელოვანი კვანძებია: ლოგიკური ელემენტების ბლოკი და გრაფიკული ინფორმაციის ფაქტორი.



ნახ. 17 ვენტილური ძრავას მოდელი პროგრამა Matlab -ში

ელექტრომექანიკური ნაწილის მოდელირებისათვის გამოყენებულია შემდეგი პარამეტრები, კერძოდ სამფაზა გრაგნილის წინააღმდეგობები, ინდუქციორებები d და q ღერძების მიმართ; აგზნების გრაგნილის მაგნიტური გრაგნილის ნაკადი; როტორის ინერციის მომენტი; წყვილ პოლუსთა რიცხვი და ხახუნის კოეფიციენტი.

ძალოვანი ტრანზისტორების გარდამქმნელის მოდელირებისათვის გამოყენებულია იმიტაციის გასაღები უკუდიოდით [11].

როტორის მდებარეობის გადამწოდი წარმოდგენილია ლოგიკური ელემენტებით, რომელთა საშუალებით ხდება ძალური ნახევარგამტარული გარდამქმნელის მართვის ბრძანებების ფორმირება როტორის მობრუნების კუთხის მიხედვით.

მათემატიკური მოდელირებით მიღებულია ძრავის მახასიათებლები გარდამავალი პროცესების დროს. ცდები ჩატარებული იყო ძრავის გაშვების პროცესში. ძრავის ბრუნვის სიხშირის მართვისათვის გამოყენებული იყო პროპორციული დიფერენციალური კანონი

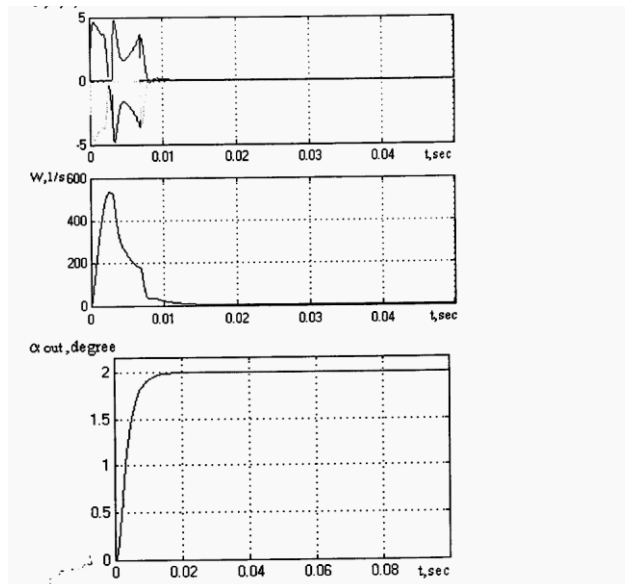
$$U = (\alpha_{პროგ.}(t) - \alpha_{ფაქტ}) \cdot k_{პროპ} - \frac{d\alpha_{ფაქტ}}{dt} \cdot k_{დიფ}$$

სადაც $\alpha_{პროგ.}(t)$ ამძრავის გამოსავალი კვანძის პროგრამული კანონის ცვლილების კოორდინატია [20].

$\alpha_{ფაქტ}$ - ამძრავის გამოსავალი კვანძის მიმდინარე კოორდინატია,

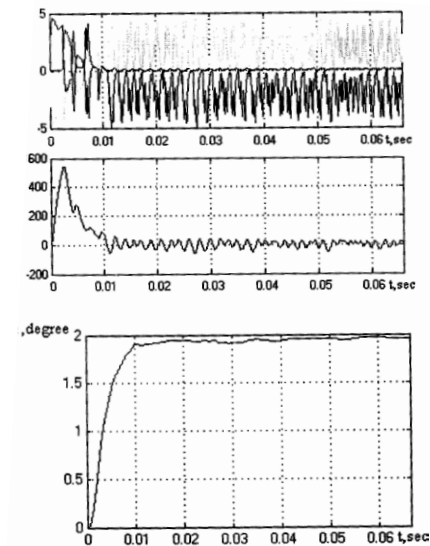
$k_{პროპ}$ - პროპორციული მდგენელის გაძლიერების კოეფიციენტი,

$k_{დიფ}$ - დიფერენციალური მდგენელის გაძლიერების კოეფიციენტი,



ნახ. 18 ელექტრომექანიკური ამძრავის გარდამავალი მახასიათებლები

ნახ. 18-ზე ნაჩვენებია ელექტრომექანიკური ამძრავის გარდამავალი მახასიათებლები, დატვირთვის გარეშე, 2 გრადუსიანი საფეხურიანი შემავალი ზემოქმედების შემთხვევაში.



ნახ. 19. ელექტრომექანიკური ამძრავის გარდამავალი მახასიათებლები ნომინალური დატვირთვის დროს

ნახ. 19 ელექტრომექანიკური ამძრავის გარდამავალი მახასიათებლები ნომინალური დატვირთვის დროს და 2 გრადუსიანი საფეხურიანი შემავალი ზემოქმედების შემთხვევაში.

თავი III. ვენტილური ძრავის განტოლებები ცვლადთა მყისი მნიშვნელობებისათვის

3.1 ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნა

ძალურ ნახევრადგამტარულ ტექნიკაში მიღწეულმა წარმატებებმა დიდი როლი შეასრულა კომპუტატორიანი ელექტრული მანქანების შექმნის საქმეში. მართვადი ნახევრადგამტარული კომპუტატორი (მნკ) ახორციელებს მანქანის გრაგნილის სექციების გადართვას განსაზღვრული კანონით. ფაზების გადართვა მანქანაში ხდება ტირისტორული ან ტრანზისტორული გადამრთველებით. აღნიშნულ მანქანებში ფაზების გადართვა ცვლის მაგნიტომამოძრავებელი ძალის (მმძ) სივრცულ განაწილებას, მანქანის პარამეტრებისა და ემ ძალების მნიშვნელობებს [12,13,14].

გარდამავალი პროცესის განხილვისას აუცილებელია დროის ცალკეულ შუალედებში განისაზღვროს სიდიდეთა მყისი მნიშვნელობები. დროის ამ ინტერვალებში მანქანაში მიმდინარეობს არასიმეტრიული გარდამავალი პროცესი უცვლელი მმძ-ების, ემ ძალების და მანქანის პარამეტრების მუდმივობის პირობებში. დროის ინტერვალიდან ინტერვალამდე გარდამავალი პროცესის ხასიათი იცვლება, რაც დაკავშირებულია საწყისი პირობების ცვლილებასთან. დროის გარკვეული პერიოდის შემდეგ საწყისი პირობები მეორდება და ვლებულობთ დამყარებულ რეჟიმს.

ვინაიდან დროის ცალკეულ შუალედში მანქანაში გვაქვს არასიმეტრიული გარდამავალი პროცესი, მიზანშეწონილია მნკ-იანი მანქანების გაანგარიშების მეთოდის დაფუძნებულ იქნას არასიმეტრიული გარდამავალი რეჟიმების თეორიაზე კომპუტატორის არსებობით გამოწვეული სპეციფიკის მხედველობაში მიღებით [14].

ნახევრადგამტარულ კომპუტატორიან მანქანებში დამყარებული და გარდამავალი რეჟიმების ანალიზი მიზანშეწონილია ჩატარდეს ცვლადთა

მყისი მნიშვნელობების მიხედვით. გაანგარიშებას მნიშვნელოვნად ამარტივებს კოორდინატთა გარდაქმნის მეთოდი. ფაზური ცვლადების (ძაბვების, დენების, ნაკადთშემების) მყისი მნიშვნელობებიდან კომპლექსურ ცვლადებზე გადასვლის მიზნით იყენებენ პირდაპირი გარდაქმნის მატრიცას [10, 12,15]:

$$[A] = e^{-j\theta_0} [e^{j\alpha_1} e^{j\alpha_2} \dots e^{j\alpha_m}]$$

სადაც $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ – ფაზების მაგნიტური ღერძებით განსაზღვრული კუთხეებია;

m – ფაზათა რიცხვი

$$\theta_0 = \int_0^t \omega_0 dt$$

(აქ ω_0 , კუთხური სიხშირეა, რომლის შერჩევით მიიღწევა განტოლებათა სისტემის გამარტივება).

გარდაქმნის შედეგად ახალი ცვლადთათვის მივიღებთ კომპლექსურ სიდიდეებს. მაგალითად დენებისათვის გვექნება

$$\bar{I} = [A][i], \quad \text{სადაც} \quad [i] = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \dots \\ i_m \end{bmatrix}$$

\bar{I} – დენის კომპლექსის მნიშვნელობაა.

კომპლექსური სიდიდეებიდან ნამდვილ ფაზურ სიდიდეებზე გადასვლისათვის გამოიყენება ურთიერთშეუღლებული სვეტური $[T]$ და $[T]^*$ მატრიცები:

$$[i] = \frac{1}{2}[T] \cdot \bar{I} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} * \\ * \\ * \end{bmatrix} \cdot I + [i_0], \quad [i_0] = \begin{bmatrix} i_{01} \\ i_{02} \\ \cdot \\ \cdot \\ i_{0m} \end{bmatrix},$$

სადაც i_0 – ნულოვანი დენების მატრიცაა.

ცვლადთა გარდაქმნის ფიზიკური შინაარსი მდგომარეობს ფაზური დენების, ძაბვების და ნაკადუმბების წარმოდგენაში ვექტორული სიდიდეების სახით. ამ ვექტორების მოდულები წარმოადგენენ სიდიდეთა მყის მნიშვნელობებს, ხოლო მიმართულებები განისაზღვრება მაგნიტური დერძებით მანქანაში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესი განისაზღვრება დენების, ძაბვების და ნაკადუმბების მაჯამებელი რეზულტატური ვექტორებით [10,15].

მაგალითის სახით განვიხილოთ ასინქრონული ტიპის ვენტილური ძრავას გარდამავალი პროცესების განტოლებები მყისი მნიშვნელობებისათვის.

3.2 განტოლებები კომპლექსურ ცვლადებში

სტატორისა და როტორის წრედების ელექტრული წონასწორობის განტოლებებს აქვს სახე:

$$u_k^s = r^s i_k^s + \frac{d\psi_k^s}{dt}, \quad (k=1,2)$$

$$u_k^r = r^n i_k^r + \frac{d\psi_k^r}{dt}, \quad (k=1,2,3) \quad (3.1)$$

$$d\psi_k^s = L_s^s i_k^s + \sum_{k=1}^3 M^{ss} i_t^s \cos(\alpha_t^s - \alpha_t^s) +$$

$$+ \sum_{k=1}^3 M^{sr} i_t^r \cos(\alpha_t^r - \alpha_k^r), \quad (k=1,2)$$

$$\psi_k^r = L_s^r i_k^r + \sum_{k=1}^3 M^{rr} i_t^r \cos(\alpha_t^r - \alpha_t^r) +$$

$$+ \sum_{t=1}^2 M^{st} i_t^s \cos(\alpha_t^s - \theta_r - \alpha_k^r), \quad (k=1,2,3)$$

სადაც r^s, r^r – სტატორისა და როტორის ფაზების აქტიური წინაღობებია;

$i_k^s, u_k^s, \psi_k^s, i_k^r, u_k^r, \psi_k^r$ – სტატორისა და როტორის წრედების დენების, ძაბვების და ნაკადუმბების მყისი მნიშვნელობებია;

L_s^s, L_s^r – სტატორისა და როტორის ფაზების ფანტვის ინდუქციურობებია;

M^{ss} – სტატორის ორ ფაზას შორის მაქსიმალური ურთიერთინდუქციურობაა;

M^{rr} – როტორის ორ ფაზას შორის მაქსიმალური ურთიერთინდუქციურობაა;

$M^{sr} = M^{rs}$ – სტატორის ერთ ფაზასა და როტორის ერთ ფაზას შორის მაქსიმალური ურთიერთინდუქციურობაა;

α_k^s – სტატორის გრაგნილის ფაზების მაგნიტურ ღერძებსა და სტატორის გრძივ ღერძს შორის კუთხეა;

α_k^r – როტორის გრაგნილის ფაზების მაგნიტური ღერძებსა და როტორის გრძივ ღერძს შორის კუთხეა;

$\theta_r = \int_0^t \omega_r dt$ – სტატორისა და როტორის გრძივ ღერძებს შორის კუთხეა;

ω_r – როტორის ბრუნვის კუთხური სიჩქარეა.

აღნიშვნებში ზედა ინდექსი „S“ მიუთითებს იმას, რომ ცვლადი ან პარამეტრი მიეკუთვნება სტატორს, ხოლო „r“, ინდექსი, შესაბამისად, როტორს. ქვედა ინდექსებით „k“ და „t“ აღნიშნულია შესაბამისი გრაგნილების ფაზების ნომრები.

ფაზური ცვლადების (ძაბვის, დენის, ნაკადუმბების) გადასაყვანად ახალ ცვლადებში (2.1)-ის თითოეული განტოლება გავამრავლოთ შესაბამისად $e^{j\alpha_k^s}$ და $e^{j\alpha_k^r}$ -ზე, მაშინ სტატორისა და როტორის გრაგნილებისათვის მივიღებთ ელექტრული წონასწორობის ვექტორულ (კომპლექსურ) განტოლებებს:

$$\begin{aligned}
u_k^s e^{j\alpha_k^s} &= r^s i_k^s e^{j\alpha_k^s} + \frac{d}{dt} \psi_k^s e^{j\alpha_k^s} \quad (k=1,2) \\
u_k^r e^{j\alpha_k^r} &= r^r i_k^r e^{j\alpha_k^r} + \frac{d}{dt} \psi_k^r e^{j\alpha_k^r} \quad (k=1,2,3)
\end{aligned} \tag{3.2}$$

ავჯამოთ (3.2) განტოლებები „k“-ს მიხედვით, მაშინ მაჯამებელი ვექტორებისათვის მივიღებთ განტოლებებს:

$$\begin{aligned}
\sum_{k=1}^2 u_k^s e^{j\alpha_k^s} &= r^s \sum_{k=1}^2 i_k^s e^{j\alpha_k^s} + \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^2 \psi_k^s e^{j\alpha_k^s} \\
\sum_{k=1}^3 u_k^r e^{j\alpha_k^r} &= r^r \sum_{k=1}^3 i_k^r e^{j\alpha_k^r} + \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^3 \psi_k^r e^{j\alpha_k^r}
\end{aligned} \tag{3.3}$$

სტატორის გრაგნილის ნულოვანი წერტილის პოტენციალი აღვნიშნოთ u_0^s -ით და მხედველობაში მივიღოთ ტოლობები

$$i_1^s = -i_2^s = i^s;$$

$$u_1^s = \frac{U}{2} - u_0^s; \quad \text{მაშინ მივიღებთ განტოლებებს:}$$

$$\begin{aligned}
u_2^s &= -\frac{U}{2} - u_0^s, & \sum_{k=1}^2 u_k^s e^{j\alpha_k^s} &= \frac{U}{2} (e^{j\alpha_1^s} - e^{j\alpha_2^s}) - u_0^s (e^{j\alpha_1^s} + e^{j\alpha_2^s}), \\
& & \sum_{k=1}^2 i_k^s e^{j\alpha_k^s} &= i_1^s e^{j\alpha_1^s} + i_2^s e^{j\alpha_2^s} = i^s (e^{j\alpha_1^s} - e^{j\alpha_2^s}).
\end{aligned}$$

სადაც U - კომუტატორზე მოდებული მუდმივი ძაბვაა.

ბოლო გამოსახულებების ჩასმით (2.3)-ში მივიღებთ:

$$\begin{aligned}
&\frac{U}{2} (e^{j\alpha_1^s} - e^{j\alpha_2^s}) - u_0^s (e^{j\alpha_1^s} + e^{j\alpha_2^s}) = r^s i^s (e^{j\alpha_1^s} - e^{j\alpha_2^s}) + \\
&+ \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^2 \psi_k^s e^{j\alpha_k^s}, \\
&\sum_{k=1}^2 u_k^r e^{j\alpha_k^r} = r^r \sum_{k=1}^2 u_k^r e^{j\alpha_k^r} + \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^3 \psi_k^r e^{j\alpha_k^r}.
\end{aligned} \tag{3.4}$$

(3.4) განტოლებათა სისტემის პირველი განტოლება შეიცავს სტატორის ნულოვანი წერტილის u_0^s პოტენციალს. ამ განტოლების შეუღლებული განტოლება გავამრავლოთ $e^{j(\alpha_1^s + \alpha_2^s)}$ -ზე და გამოვაკლოთ (3.4)-ის პირველ განტოლებას, მაშინ ამ განტოლებიდან გამოირიცხება u_0^s . ძაბვების, დენების და ნაკადთშემბების მაჯამებელი ვექტორებისათვის გვექნება განტოლებები:

$$\begin{aligned}\bar{U}^s &= 2r^s \bar{I}^s + \frac{d\bar{\psi}^s}{dt}, \\ \bar{U}^r &= r^r \bar{I}^r + \frac{d\bar{\psi}^r}{dt},\end{aligned}\tag{3.5}$$

სადაც

$$\begin{aligned}\bar{U}^s &= U(e^{j\alpha_1^s} - e^{j\alpha_2^s}) \bar{I}^s = i^s (e^{j\alpha_1^s} - e^{j\alpha_2^s}), \\ \bar{U}^r &= \sum_{k=1}^3 u_k^r e^{j\alpha_k^r}, \quad \bar{I}^r = \sum_{k=1}^3 i_k^r e^{j\alpha_k^r}, \\ \bar{\psi}^s &= \bar{\psi}_1^s - \bar{\psi}_2^s (e^{j\alpha_1^s} - e^{j\alpha_2^s}), \\ \bar{\psi}^r &= \sum_{k=1}^3 \psi_k^r e^{j\alpha_k^r}\end{aligned}$$

(3.5) განტოლებებში ვექტორები \bar{I}^s და $\bar{\psi}^s$ განსაზღვრულია სტატორის უძრავ კოორდინატა სისტემაში ds, $j\alpha_s$, ხოლო ვექტორები \bar{I}^r და $\bar{\psi}^r$ განსაზღვრულია როტორის dr, $j\alpha_r$ კოორდინატა სისტემაში. (3.5) სისტემის მეორე განტოლება გავამრავლოთ $e^{j\theta^r}$ -ზე, მაშინ ის განისაზღვრება სტატორის კოორდინატა სისტემაში და (3.5) სისტემა ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$\begin{aligned}
\bar{U}^s &= 2r^s \bar{I}^s + \frac{d\bar{\psi}^s}{dt}, \\
\bar{U}^r &= r^r \bar{I}^r + \frac{d\bar{\psi}^r}{dt} - j\omega_r \bar{\psi}^r, \\
\bar{\psi}^s &= (2L_s^s - 3M^{ss})\bar{I}^s + \frac{3}{2}M^{sr}\bar{I}^r - \frac{3}{2}M^{sr}e^{j(\alpha_1^s - \alpha_2^s)} I^{*r}, \\
\bar{\psi}^r &= (L_s^r + \frac{3}{2}M^{rr})\bar{I}^r + \frac{3}{2}M^{rs}\bar{I}^s
\end{aligned}
\tag{3.6}$$

სადაც

$$\bar{U}^r = e^{j\theta_r} \sum_{k=1}^3 u_k^r e^{j\alpha_k^r} = \frac{3}{2} U_m^r e^{j[\omega_r + \omega_2]t + \phi_0^r}$$

ϕ_0^r - როტორის სამფაზა ძაბვის ჩართვის ფაზაა,

ω_2 - როტორის ძაბვის კუთხური სიხშირეა,

U_m^r - როტორის ძაბვის ამპლიტუდაა.

3.3 კომპლექსური განტოლებების ამოხსნა

(3.6) განტოლებათა სისტემა ჩავწეროთ ფარდობით ერთეულებში სტატორზე დაყვანილი სიდიდეებისათვის: განტოლებები ოპერატორულ ფორმაში მიიღებენ სახეს:

$$\begin{aligned}
\bar{U}_{(p)}^s + \bar{U}_{0(p)}^s &= x_{11}^{ss}(p + \rho^s)\bar{I}_p^s + \frac{\mu^s}{2} x_{11}^{ss} e^{j(\alpha_1^s + \alpha_2^s)} P I^{*n}, \\
\bar{U}_{(p)}^r + \bar{U}_{0(p)}^r &= \mu^r x_{11}^{rr}(p - j\omega_r)\bar{I}_p^s + x_{11}^{rr}[(p + \rho^r) - j\omega_r]\bar{I}_{(p)}^r, \\
\bar{U}_{(p)}^r + \bar{U}_{0(p)}^r &= -\mu^r x_{11}^{rr}(p + j\omega_r)e^{-j(\alpha_1^s + \alpha_2^s)}\bar{I}_p^s + x_{11}^{rr}[(p + \rho^r) + j\omega_r]I_{(p)}^{*r}
\end{aligned}
\tag{3.7}$$

სადაც ძაბვების საწყის მნიშვნელობებს შეესაბამება ოპერატორული გამოსახულებები:

$$\begin{aligned}
\bar{U}_0^s(p) &= x_{11}^{ss} [p\bar{I}_0^s + \frac{\mu^s}{2} p\bar{I}_0^r - \frac{\mu^s}{2} e^{j(\alpha_1^s + \alpha_2^s)} P I^{*r}], \\
\bar{U}_0^r(p) &= x_{11}^{rr} (p\bar{I}_0^r + \mu^r \bar{I}_0^s), \\
U_0^{*r}(p) &= x_{11}^{pp} [p\bar{I}_0^r - \mu^r e^{-j(\alpha_1^s + \alpha_2^s)} p\bar{I}_0^s].
\end{aligned} \tag{3.8}$$

(3.7) და (3.8) განტოლებებში სტატორზე დაყვანილი ინდუქციური წინაღობებისათვის ფარდობით ერთეულებში გვაქვს გამოსახულებები:

$$\begin{aligned}
x_{11}^{ss} &= 2x_s^s + 3x_m; & x_{11}^{rr} &= x_s^r + \frac{3}{2} x_m; \\
x_{11}^{sr} &= 2[1 - \cos(\alpha_1^s - \alpha_2^s)]x_m; \\
x_{11}^{rs} &= \frac{3}{2} x_m; & \rho^s &= \frac{2r^s}{x_{11}^{ss}}; & \rho^r &= \frac{r^r}{x_{11}^{rr}}; \\
\mu^s &= \frac{x_{11}^{rs}}{x_{11}^{ss}}; & \mu^r &= \frac{x_{11}^{rs}}{x_{11}^{rr}};
\end{aligned}$$

სტატორისა და როტორის გრაგნილებს შორის მაგნიტური კავშირის კოეფიციენტია $\mu = \mu_s \mu_r$, ხოლო მაგნიტური ფანტვის კოეფიციენტი $\sigma = 1 - \mu$.

(3.7) განტოლებების ამოხსნას აქვს სახე:

$$\bar{I}^s(p) = \frac{\Delta_1(P)}{\Delta(P)}; \quad \bar{I}^r(p) = \frac{\Delta_2(P)}{\Delta(P)}; \quad \bar{I}^{*r}(p) = \frac{\Delta_3(P)}{\Delta(P)}; \tag{3.9}$$

$$\Delta_*(P) = \begin{vmatrix} x_{11}^{ss}(P + \rho^s) & \frac{\mu^s}{2} x_{11}^{s\delta} P & -\frac{\mu^s}{2} x_{11}^{ss} e^{j(\alpha_1^s + \alpha_2^s)} \cdot P \\ \mu^r x_{11}^{rr}(P - j\omega_r) & x_{11}^{pp} [(P + \rho^n) - j\omega_r] & 0 \\ -\mu^r x_{11}^{rr}(P + j\omega_r) e^{j(\alpha_1^s + \alpha_2^s)} & 0 & x_{11}^{rr} [(P + \rho^r) + j\omega_r] \end{vmatrix}$$

$$\Delta_1(P) = \begin{vmatrix} \bar{U}^s(p) + \bar{U}_0^s(p) & \frac{\mu^s}{2} x_{11} & -\frac{\mu^s}{2} x_{11}^{ss} e^{j(\alpha_1^s + \alpha_2^s)} \cdot P \\ \bar{U}^r(p) + \bar{U}_0^r(p) & x_{11}^{rr} [(P + \rho^r) - j\omega_r] & 0 \\ \bar{U}^{*r}(p) + \bar{U}_0^{*r}(p) & 0 & x_{11}^{rr} [(P + \rho^r) + j\omega_r] \end{vmatrix}$$

$$\Delta_2(P) = \begin{vmatrix} x_{11}^{ss} (P + \rho^s) & \bar{U}^s(p) + \bar{U}_0^s(p) & -\frac{\mu^s}{2} x_{11}^{ss} e^{j(\alpha_1^s + \alpha_2^s)} \cdot P \\ \mu^r x_{11}^{rr} (P - j\omega_r) & \bar{U}^r(p) + \bar{U}_0^r(p) & 0 \\ -\mu^r x_{11}^{rr} (P + j\omega_r) e^{j(\alpha_1^s + \alpha_2^s)} & \bar{U}^{*r}(p) + \bar{U}_0^{*r}(p) & x_{11}^{rr} [(P + \rho^r) + j\omega_r] \end{vmatrix}$$

$$\Delta_3(P) = \begin{vmatrix} x_{11}^{ss} (P + \rho^s) & \frac{\mu^s}{2} x_{11}^{ss} P & \bar{U}^s(p) + \bar{U}_0^s(p) \\ \mu^r x_{11}^{rr} (P - j\omega_r) & x_{11}^{rr} [(P + \rho^r) - j\omega_r] & \bar{U}^r(p) + \bar{U}_0^r(p) \\ -\mu^r x_{11}^{rr} (P + j\omega_r) e^{-j(\alpha_1^s + \alpha_2^s)} & 0 & \bar{U}^r(p) + \bar{U}_0^r(p) \end{vmatrix}$$

განტოლების მახასიათებელი

$$\Delta(p) = \sigma p^3 + [\rho^s + (1 + \sigma)\rho^r] p^2 + [(\rho^r)^2 + 2\rho^s \rho^r + \sigma\omega_r^2] p + \rho^s [(\rho^r)^2 + \omega_r^2] = 0$$

მიახლოებითი ფესვებია

$$p_1 = \frac{1}{\sigma} \rho^s, \quad p_{2,3} = -\frac{1 + \sigma}{2\sigma} \rho^r \pm j\omega_r$$

ვისარგებლოთ დამლის თეორემით და განვსაზღვროთ კომპლექსური დენები, როგორც დროის ფუნქციები. გვექნება შემდეგი გამოსახულებები:

$$\begin{aligned}\bar{I}^s(t) &= \bar{I}_\omega^s + \sum_{k=1}^3 \frac{\Delta_1(P_k)}{P_k \Delta'(P_k)} e^{P_k t} \\ \bar{I}^r(t) &= \bar{I}_\omega^r + \sum_{k=1}^3 \frac{\Delta_2(P_k)}{P_k \Delta'(P_k)} e^{P_k t} \\ \bar{I}^r(t) &= \bar{I}_\omega^r + \sum_{k=1}^3 \frac{\Delta_3(P_k)}{P_k \Delta'(P_k)} e^{P_k t}\end{aligned}\tag{3.10}$$

სადაც $P_k \Delta(p)=0$ მახასიათებელი განტოლების ფესვებია [10].

$\Delta'(p_k)$ - დენების ოპერატორული გამოსახულების მნიშვნელის წარმოებულია, რომელშიც ჩასმულია მახასიათებელი განტოლების ფესვების მნიშვნელობები.

$\bar{I}_\omega^s, \bar{I}_\omega^r, I_\omega^{*r}$ - დენების დამყარებული მნიშვნელობებია, რომლებიც განისაზღვრებიან ტოლობებით:

$$\bar{I}_\omega^s = \frac{\Delta_1(0)}{\Delta(0)}, \bar{I}_\omega^r = \frac{\Delta_2(0)}{\Delta(0)}, I_\omega^{*r} = \frac{\Delta_3(0)}{\Delta(0)}$$

დენების მყისი მნიშვნელობები განისაზღვრება ტოლობებით:

$$\begin{aligned}i^s &= \frac{1}{e^{j\alpha_1^s} - e^{j\alpha_2}} \bar{I}^s, \\ i_k^s &= \frac{2}{3} R_e [e^{-j(k-1)\frac{2\pi}{3}} e^{j\omega_r t} \bar{I}^r], (k=1,2,3)\end{aligned}$$

დენების კომპლექსებიდან შეიძლება განვსაზღვროთ მათი d, q შემდგენები შემდეგნაირად:

$$I_d^s = R_e(\bar{I}^s), I_q^s = I_m(\bar{I}^s), I_d^r = R_e(\bar{I}^r), I_q^r = I_m(\bar{I}^r).$$

აქ R_e - აღნიშნავს კომპლექსის ნამდვილ ნაწილს, ხოლო I_m - წარმოსახვით ნაწილს. მაგალითად, როტორის გრაგნილის ფაზების დენების მყისი მნიშვნელობები განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$i_1^r = \frac{2}{3} (I_d^r \cos \omega_r t - I_q^r \sin \omega_r t),$$

$$i_2^r = \frac{2}{3} [I_d^r \cos(\omega_r t - \frac{2\pi}{3}) - I_q^r \sin(\omega_r t - \frac{2\pi}{3})],$$

$$i_3^r = \frac{2}{3} [I_d^r \cos(\omega_r t - \frac{4\pi}{3}) - I_q^r \sin(\omega_r t - \frac{4\pi}{3})]$$

ზემოთ მოყვანილი გამოსახულებებიდან შეიძლება განვსაზღვროთ დენები დროის თითოეულ Δ შუალედში. როგორც განტოლებებიდან ჩანს დენები დამოკიდებულია α_1^s და α_2^s კუთხეებზე, რომლებიც იცვლებიან ნახევარგამტარ გადამრთველებზე მართვის იმპულსების მიწოდების მომენტის მიხედვით

$$\alpha_1^s = \alpha_0 + (n-1) \frac{2\pi}{3};$$

$$\alpha_2^s = \alpha_0 + (n-2) \frac{2\pi}{3};$$

კომუტატორის ბოგურ სქემაში α_1^s და α_2^s იცვლებიან არა ერთდროულად, ამიტომ გვაქვს:

$$\frac{\alpha_1^s + \alpha_2^s}{2} = \alpha_0 + (n-1) \frac{\pi}{3}. \quad \text{აქ } \alpha_0 \text{ არის მანქანის ეკვივალენტური ფაზის}$$

მაგნიტური ღერძის სტატორის გრძივ ღერძთან დროის საწყის მომენტში შედგენილი კუთხე.

შესაბამისად ბოგურ სქემაში გვექნება ფაზების ექვსჯერადი გადართვა და დროის შუალედში ეკვივალენტური ფაზის მაგნიტური ღერძის $\frac{\pi}{3}$ კუთხით შემობრუნდება.

$$\text{დავყოთ დრო } \Delta \text{ შუალედებად, მივიღებთ } t = (n-1)\Delta + \tau, 0 < \tau < \Delta.$$

დროის თითოეული შუალედისათვის თანმიმდევრულად გავიანარიშებთ დენების მყის მნიშვნელობებს და მათი ერთმანეთთან შეუღლებით მივიღებთ დროში გარდამავალი პროცესის სურათს.

3.4 ვენტილური მანქანა სტატორზე შეკრული გრაგნილის შემთხვევაში.

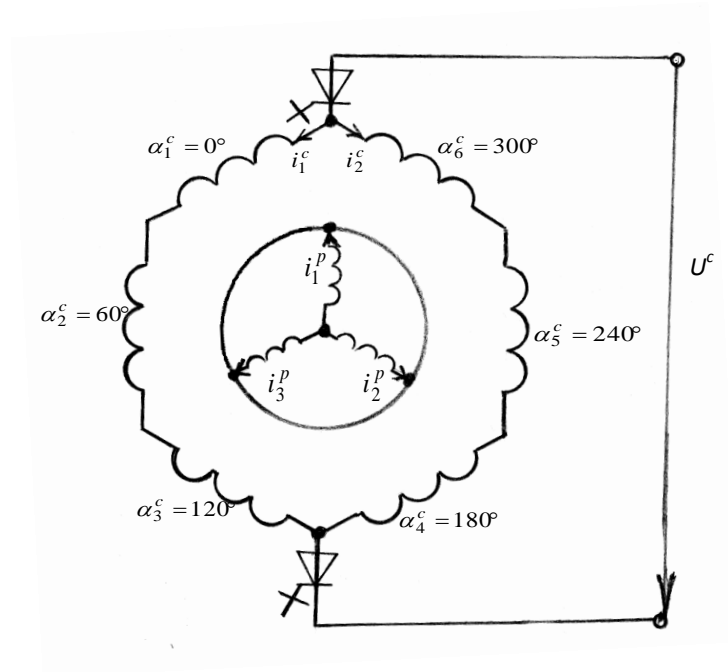
განხილულია მუდმივი დენის უკონტაქტო მანქანა ასინქრონული მბრუნავი როტორით. მანქანის ძალოვანი გრაგნილი მდებარეობს სტატორზე და იკვებება მუდმივი ძაბვის წყაროდან, ხოლო როტორი არის მოკლედ შერთული. მბრუნავი მაგნიტური ველი კი იქმნება ნახევარგამტარული კომუტატორის საშუალებით, მართვადი ტირისტორებით რომლებიც რიგრიგობით გადართავენ სტატორის გრაგნილის ფაზებს.

ასინქრონული მანქანის ანალოგიურად როტორი ამ შემთხვევაში ბრუნავს ნაკლები სიჩქარით ვიდრე სტატორის მბრუნავი მაგნიტური ველის სიჩქარე [18].

ასეთ მანქანაში ძალური გრაგნილი შეიძლება იყოს როგორც გახსნილი ასევე ჩაკეტილი, გახსნილი გრაგნილის შემთხვევაში კომუტატორის სქემა ან ბოგურია, ან ნულოვანი გამომყვანითაა, ხოლო მოკლედ შერთული გრაგნილისათვის მხოლოდ ბოგური.

თუ გადასართავი ფაზების რაოდენობა დიდია, მაშინ როტორისა და მაგნიტური ველის ბრუნვა გამოდის საკმაოდ მდორე თვით გადართვების დაბალი სიხშირის დროსაც კი, ფაზების რიცხვის შემდგომი გადიდება მიზანშეწონილი არ არის, რადგანაც მანქანის დამზადება დიდ სიმძლავრეებზე რთულია, იზრდება ნახევარგამტარულ ხელსაწყოთა რაოდენობა კომუტატორში, რაც თავის მხრივ ართულებს მართვის სისტემას, ხოლო მეორეს მხრივ ფაზების რიცხვის გადიდება ექვსზე მეტად არ იძლევა როტორის ბრუნვის თანაბრობის მიღწევად ეფექტს [10,15].

თუ ტირისტორებზე იმპულსებს მივაწოდებთ, მუდმივი დენის ძაბვას როტორის ასინქრონული ბრუნვით (ნახ.20), მაშინ, სტატორის გრაგნილის ორ პარალელურ შტოში იწყებს გავლას დენი. ძრავის საანგარიშო სქემა მოცემულია ნახ.20.



ნახ.20 მუდმივი დენის უკონტაქტო ძრავის საანგარიშო სქემა.

ცალკეული პარალელური შტოსათვის გვაქვს ელ. წონასწორობის განტოლება, რომელსაც აქვს შემდეგი სახე:

$$u^s = 3r^s i^s + \frac{d}{dt}(\psi_1^s + \psi_2^s + \psi_3^s) = 3r^s i_1^s + \frac{d}{dt} \psi_1^s, \quad (3.11)$$

$$u^s = 3r^s i_{II}^s + \frac{d}{dt}(\psi_4^s + \psi_5^s + \psi_6^s) = 3r^s i_{II}^s + \frac{d}{dt} \psi_{II}^s,$$

სადაც: U^s მანქანაზე მოდებული ძაბვის მყისი მნიშვნელობაა

$\psi_1^s \dots \dots \psi_6^s$ ფაზების ნაკადუმბეჭები

სტატორის გრაგნილის ერთი პარალელური შტოს საერთო ნაკადუმბეჭისათვის გვაქვს :

$$\begin{aligned} \psi_1^s = \psi_1^s + \psi_2^s + \psi_3^s = 3L_s i_1^s + 4M^{ss}(i_1^s + i_{II}^s) + \frac{1}{2}M^{sr}[e^{j\theta_r}(i_1^r e^{j\alpha_1^r} + \\ + i_2^r e^{j\alpha_2^r} + i_3^r e^{j\alpha_3^r})(e^{-j\alpha_1^s} + e^{-j\alpha_2^s} e^{-j\alpha_3^s}) + e^{-j\theta_r}(i_1^r e^{-j\alpha_1^r} + \\ + i_2^r e^{-j\alpha_2^r} + i_3^r e^{-j\alpha_3^r})(e^{-j\alpha_1^s} + e^{-j\alpha_2^s} + e^{-j\alpha_3^s})]. \end{aligned} \quad (3.12)$$

ანალოგიურად მეორე პარალელური შტოსთვის გვაქვს :

$$\begin{aligned} \psi_{\text{II}}^s = \psi_4^s + \psi_5^s + \psi_6^s = 3L_s^s i_{\text{II}}^s + 4M^{ss} (i_{\text{II}}^s + i_{\text{II}}^s) + \frac{1}{2} M^{sr} [e^{j\theta_r} (i_1^r e^{j\alpha_1^r} + \\ + i_2^r e^{j\alpha_2^r} + i_3^r e^{j\alpha_3^r}) (e^{-j\alpha_4^s} + e^{-j\alpha_5^s} e^{-j\alpha_6^s}) + e^{-j\theta_r} (i_1^r e^{-j\alpha_1^r} + \\ + i_2^r e^{-j\alpha_2^r} + i_3^r e^{-j\alpha_3^r}) (e^{-j\alpha_4^s} + e^{-j\alpha_5^s} + e^{-j\alpha_6^s})], \end{aligned}$$

სადაც:

L_s^s სტატორის ფაზის ფანტვის ინდუქციურობა

M^{ss} სტატორის ფაზათაშორისი მაქსიმალური ურთიერთინდუქციაა

M^{sr} სტატორისა და როტორის ფაზათაშორისი მაქსიმალური ურთიერთ ინდუქციურობაა

$$\alpha_k^s = (k-1) \frac{\pi}{3}, \quad (k=1,2,\dots,6) -$$

სტატორის ფაზების მაგნიტური ღერძის კუთხეები

$\alpha_1^r, \alpha_2^r, \alpha_3^r$ როტორის ფაზების მაგნიტური ღერძების კუთხეები

$$\theta_r = \int_0^t \omega_r dt$$

ω_r როტორის ბრუნვის კუთხის სიჩქარე.

სტატორის და როტორის გრაგნილებში ელექტრო მაგნიტური პროცესი განისაზღვრება: დენების, ძაბვების და ნაკადუმბების რეზულტატური ვექტორებით [10].

სტატორის გრაგნილის რეზულტიურ ვექტორებში გადასასვლელად განტოლება (3.11) უნდა გავამრავლოთ გადამყვან ოპერატორზე.

$$e^{j\alpha_1^s} + e^{j\alpha_2^s} + e^{j\alpha_3^s} = -(e^{j\alpha_4^s} + e^{j\alpha_5^s} + e^{j\alpha_6^s}) = e^{j\alpha_9^s}, \quad (3.13)$$

სადაც

$$a = \sqrt{3 + 2[\cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \cos(\alpha_2 - \alpha_3) + \cos(\alpha_3 - \alpha_1)]}$$

$$\alpha_9 = \operatorname{arctg} \frac{\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2 + \sin \alpha_3}{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2 + \cos \alpha_3},$$

ასეთი გადამყვანი ოპერატორი შეესაბამება მიმდევრობით შერთული ფაზების პარალელურ შტოებს, რომლებშიც გადის ერთი და იგივე დენი.

გამრავლების შემდეგ მივიღებთ კომპლექსურ ცვლადებიან განტოლებებს:

$$\dot{u}^s = 3r^s \dot{I}_I^s + \frac{d}{dt} \dot{\psi}_I^s \quad (3.14)$$

$$\dot{u}^s = 3r^s \dot{I}_{II}^s + \frac{d}{dt} \dot{\psi}_{II}^s$$

სადაც

$$\dot{u}^s = u^s \cdot ae^{j\alpha_s^s}, \quad \dot{\psi}^s = \psi \cdot ae^{j\alpha_s^s},$$

$$\dot{I}_I^s = i_1^s \cdot ae^{j\alpha_s^s}, \quad \dot{I}_{II}^s = i_{II}^s \cdot ae^{j\alpha_s^s}.$$

როტორის წონასწორობის ელექტრულ განტოლებებს აქვს შემდეგი სახე:

$$[0] = r^r [i^r] + \frac{d}{dt} [\psi^r], \quad [i^r] = \begin{bmatrix} i_1^r \\ i_2^r \\ i_3^r \end{bmatrix}, \quad [\psi^r] = \begin{bmatrix} \psi_1^r \\ \psi_2^r \\ \psi_3^r \end{bmatrix}. \quad (3.15)$$

როტორის რეზულტიური ვექტორების გასაღებად შემოგვაქვს გარდაქმნის მატრიცა:

$$A = [e^{j\alpha_1^r}, e^{j\alpha_2^r}, e^{j\alpha_3^r}] e^{j\theta_r}. \quad (3.16)$$

მამრავლი $e^{j\theta_r}$ შემოგვაქვს იმისთვის, რომ როტორის განტოლება იყოს სტატორის კოორდინატებში. (3.15) და (3.16) ნამრავლით ვღებულობთ განტოლებებს ახალ ცვლადებში:

$$0 = r^r \dot{I}^r + \frac{d}{dt} \dot{\psi}^r - j\omega_p \dot{\psi}^r, \quad (3.17)$$

სადაც

$$\dot{I}^r = e^{j\theta_r} (i_1^r e^{j\alpha_1^r} + i_2^r e^{j\alpha_2^r} + i_3^r e^{j\alpha_3^r}),$$

$$\dot{\psi}^r = e^{j\theta_r} (\psi_1^r e^{j\alpha_1^r} + \psi_2^r e^{j\alpha_2^r} + \psi_3^r e^{j\alpha_3^r}).$$

მანქანის ელექტრული წონასწორობის განტოლებას ახალ კომპლექსურ ცვლადებში აქვს სახე:

$$\dot{u}^s = u^s \dot{I}_I^s + \frac{d}{dt} \dot{\psi}_I^s, \quad \dot{u}^s = 3r^s \dot{I}_{II}^s + \frac{d}{dt} \dot{\psi}_{II}^s; \quad 0 = r^r \dot{I}^r + \frac{d}{dt} \dot{\psi}^r - j\omega_r \dot{\psi}^r, \quad (3.18)$$

სადაც

$$\dot{\psi}_I^s = 3L_s^s \dot{I}_I^s + 4M^{ss} (\dot{I}_{II}^s + \dot{I}_I^s) + \frac{1}{2} M^{sr} a^2 \dot{I}^r + \frac{1}{2} M^{sr} a^2 \dot{I}^r e^{j2\alpha_s^s},$$

$$\dot{\psi}_{II}^s = 3L_s^s \dot{I}_{II}^s + 4M^{ss} (\dot{I}_I^s + \dot{I}_{II}^s) + \frac{1}{2} M^{sr} a^2 \dot{I}^r + \frac{1}{2} M^{sr} a^2 \dot{I}^r e^{j2\alpha_s^s}$$

$$\dot{\psi}^r = L_s^s \dot{I}^s + \frac{3}{2} M^{rr} \dot{I}^r + \frac{3}{2} M^{sr} (\dot{I}_I^s + \dot{I}_{II}^s). \quad (3.19)$$

სისტემის პირველი და მეორე განტოლებების შეჯამებით, (3.18) და (3.19) გათვალისწინებით, საბოლოოდ ვღებულობთ :

$$\dot{u} = \frac{3}{2} r^s \dot{I}^s + \left(\frac{3}{2} L_s^s + 4M^{ss} \right) \frac{d}{dt} \dot{I}^s + \frac{1}{2} a^2 M^{sr} \frac{d}{dt} (\dot{I}^r + \dot{I}^r e^{j2\alpha_s^s}),$$

$$0 = r^r \dot{I}^s + \left(L_s^r + \frac{3}{2} M^{rr} \right) \frac{d}{dt} \dot{I}^r + \frac{3}{2} M^{rs} \frac{d}{dt} \dot{I}^s -$$

$$- j\omega_r \left[(L_s^r + M^{rr}) \dot{I}^r + \frac{3}{2} M^{rs} \dot{I}^s \right], \quad (3.20)$$

სადაც $\dot{I}^s = \dot{I}_I^s + \dot{I}_{II}^s$.

როტორის ფაზის პარამეტრების დასაყვანად სტატორის ფაზაზე გვაქვს:

$$x_s^{r'} = k^2 x_s^r, \quad r^{r'} = k^2 r^r, \quad x_m^{r'r} = k x_m^{r'r}$$

$$k = \frac{k_{g\sigma 1} \cdot W_1}{k_{g\sigma 2} \cdot W_2}$$

K დაყვანის კოეფიციენტია,

W_1, W_2 სტატორის და როტორის ფაზების ხვიათა რიცხვია,

$K_{g\sigma 1}, K_{g\sigma 2}$ სტატორისა და როტორის საგრანული კოეფიციენტებია.

დაყვანის შედეგად მივიღებთ რომ:

$$x_m^{ss} = x_m^{r'r} = x_m^{rs} = x_m^{sr} = x_m^r$$

(3.20) განტოლება ფარდობით ერთეულებში მატრიცულ ფორმაში მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_0^s + \dot{u}_0^s \\ \dot{u}_0^s \\ \dot{u}_0^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^{ss} & \frac{1}{2} Z^{sr} & \frac{1}{2} Z^{sr} e^{j2\alpha_s} \\ Z^{rs} & Z^{rr} & 0 \\ Z^{rs} e^{j2\alpha_s} & 0 & Z^{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_s \\ \dot{i}_r \\ \dot{I}_r^* \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

სადაც

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_0^s \\ \dot{u}_0^r \\ \dot{u}_0^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} px^{ss} & \frac{1}{2} px^{sr} & \frac{1}{2} px^{sr} e^{j2\alpha_s} \\ px^{rs} & px^{rr} & 0 \\ px^{rs} e^{-j2\alpha_s} & 0 & px^{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_s \\ \dot{i}_r \\ \dot{I}_r^* \end{bmatrix}$$

U_0^c, U_0^r სტატორისა და როტორის ძაბვების საწყისი მნიშვნელობებია,

$$Z^{ss} = (\rho^s + p)x^{ss} \quad x^{ss} = \frac{3}{2} x_s^s + 4x_m$$

$$Z^{sr} = px^{sx} \quad x^{sr} = a^2 x_m = 4x_m$$

$$Z^{rs} = [\rho - j(1-s)]x^{rs} \quad x^{rr} = x_s^r + \frac{3}{2} x_m$$

S როტორის სრიალია,

ω_1 ბაზისური კუთხური სიჩქარეა.

(3.21) განტოლებათა სისტემას თუ დავუმატებთ როტორის მოძრაობის განტოლებას მივიღებთ განტოლებათა სრულ სისტემას, მანქანაში ელექტრომექანიკური გარდამავალი და დამყარებული რეჟიმების გასაანგარიშებლად.

(3.21) განტოლებათა სისტემის გარდაქმნის შედეგად მივიღებთ:

$$Z^{ss} \dot{I}^s - Z^{sr} Z^{sr} \dot{I}^s = \dot{u}_s^s, \quad (3.22)$$

სადაც

$$Z^{sr} = \mu^r \frac{p^2 + p\rho^r + (1-s)^2}{(p + \rho^r)^2 + (1-s)^2}; \quad \mu^r = \frac{x^{rs}}{x^{rr}}; \quad \rho^r = \frac{r^r}{x^{rr}};$$

$$\dot{u}_s^s = \dot{u}^s + \dot{u}_0^s - \frac{u_0^r Z^{rr} + \dot{u}_0^r Z^{rr} e^{j2\alpha_s}}{Z^{rr} Z^{rr}}.$$

გამოვსახოთ Z^{ss} წინალობა შემდეგი სახით:

$$Z^{ss} = \frac{3}{2} r^s + \frac{3}{2} x_s^r p + 4x_m,$$

ან (3.22) განტოლების გათვალისწინებით ვღებულობთ

$$Z^{ss} = \frac{Z_1^{ss} Z_2^{ss}}{Z_1^{ss} + Z_E^{ss}} + Z_{12}^{ss} = Z_3^{ss} + Z_{12}^{ss}, \quad (3.23)$$

რაც შეესაბამება მუშა რეჟიმში სტატორის გრაგნილში ორი პარალელური შტოს წარმოქმნას.

(3.21) განტოლება მუდმივი სრილის შემთხვევაში $s = const$ გარდაიქმნება მუდმივ კოეფიციენტებიან განტოლებათა სისტემად.

ამ განტოლებათა სისტემის ამონახსნს აქვს შემდეგი სახე:

$$\begin{aligned}
\dot{i}^c = & \frac{2u^s}{3r^s}(1-e^{p_1t}) + j \frac{u^s \rho^r \mu}{\alpha^{ss}}(e^{p_2t} - e^{p_3t}) + I_0^s \left[\frac{1}{\sigma} e^{p_1t} - \frac{\mu}{2\sigma}(e^{p_2t} - e^{p_3t}) - \right. \\
& \left. - j\mu \frac{2\rho^s - (1+\sigma)\rho^r}{4\sigma^2(1-s)}(e^{p_2t} - e^{p_3t}) \right] + I_0^p \left\{ \frac{\mu^s}{2\sigma}(e^{p_1t} - e^{p_2t}) + j \left[\frac{\mu^s \rho^s}{2\sigma^2(1-s)} e^{p_1t} + \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{\mu\mu^s \rho^r - 4\mu^s \rho^s}{8\sigma^2(1-s)} e^{p_2t} - \frac{\mu\mu^s \rho^r}{8\sigma^2(1-s)} e^{p_3t} \right] \right\} + I_0^* e^{j2\alpha_s} \left\{ \frac{\mu^s}{2\sigma}(e^{p_1t} - e^{p_3t}) + \right. \\
& \left. + j \left[\frac{4\mu^s \rho^s - \mu\mu^s \rho^r}{8\sigma^2(1-s)} e^{p_3t} - \frac{\mu^s \rho^s}{2\sigma^2(1-s)} e^{p_3t} + \frac{\mu\mu^s \rho^r}{8\sigma^2(1-s)} e^{p_2t} \right] \right\}, \quad (3.24)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{i}^r = & \frac{2u^r}{3r^c} \mu^r (e^{p_1t} - 1) + j \frac{2u^s \rho^r \mu^r}{3r^c(1-s)}(1 - e^{p_1t}) - \frac{\mu\mu^r [2\rho^s - (1+\sigma)\rho^r]}{8\sigma^2(1-s)^2} e^{p_3t} + \\
& + j \left[\frac{\mu\mu^r}{4\sigma^2(1-s)^2} e^{p_3t} + \mu^r \frac{(1+\sigma)\rho^s - (\mu+2\sigma+2)\rho^s}{4\sigma^2(1-s)} e^{p_2t} + \mu^p \frac{\mu\rho^s - \sigma\rho^r}{\sigma^2(1-s)} e^{p_1t} \right] + \\
& + I_0^* \left\{ j \left[\frac{\mu}{\sigma} \frac{\rho^r + \rho^s \frac{1+\sigma}{\mu\sigma} - \frac{1}{2}}{1-s} e^{p_1t} - \frac{2\rho^s + \frac{\sigma(\mu-\sigma)+1}{2\sigma} \rho^r - \mu}{2\sigma(1-s)} e^{p_2t} + \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{[2\sigma(\mu+1) + 3(\sigma+1)]\rho^r - 2\rho^s}{4\sigma^2(1-s)} e^{p_3t} \right] + \frac{\mu}{\sigma} \left[\frac{\rho^s}{2\sigma(1-s)^2} - 1 \right] e^{p_1t} - \right. \\
& \left. - \frac{4\rho^s \mu - (1+\sigma)\rho^r}{8\sigma^2(1-s)^2} e^{p_2t} + \left[\frac{1}{\sigma(1-s)} - \frac{\mu\rho^r(1+\sigma)}{8\sigma^2(1-s)^2} \right] e^{p_3t} \right\} - \\
& - I_0^* e^{j2\alpha_s} \left\{ \frac{\mu}{2\sigma^2(1-s)^2} \left[\rho^s e^{p_1t} - \frac{(1+\sigma)\rho^r}{4} e^{p_2t} + \frac{(1+\sigma)\rho^r - 4\rho^s}{4} e^{p_3t} \right] + \right. \\
& \left. + \frac{\mu}{2\sigma} e^{p_1t} + j \frac{\mu}{2\sigma} \left[\frac{1-\rho^r}{1-s} e^{p_1t} + \frac{(1+\sigma)}{2\sigma(1-s)} e^{p_2t} - \frac{2\sigma - \mu\rho^r}{2\sigma(1-s)} e^{p_3t} \right] \right\},
\end{aligned}$$

სადაც $p_1 = -\frac{1}{\sigma} \rho^s$, $p_{2,3} = -\frac{1+\sigma}{2\sigma} \rho^r \pm (1-s)$ – მახასიათებელი განტოლების

ფესვებია

$\sigma = 1 - \mu$ – ფანტვის კოეფიციენტი

$\mu = \mu^s \mu^r = \frac{x^{sr} x^{rs}}{x^{ss} x^{rr}}$ – მაგნიტურ კავშირის კოეფიციენტი

$$\rho^s = \frac{3r^s}{2x^{ss}}$$

დენების მყისი მნიშვნელობების განსაზღვრისათვის

$$i^s = \frac{1}{ae^{j\alpha_s^s}} \dot{I}^s$$

$$i_k^r = \frac{2}{3} \operatorname{Re} \left[e^{-j(k-1)\frac{2\pi}{3}} e^{j(1-s)t} \dot{I}^r \right], \quad (k = 1, 2, 3). \quad (3.25)$$

როგორც (3.24) განტოლებიდან ჩანს, დენები დამოკიდებულია α_E^s -ზე, რომელიც იცვლება მართვის იმპულსების მიწოდების მომენტიდან.

კომუტატორის ბოგურ სქემაში α_s^r - თვის გვაქვს:

$$\alpha_E^s = \alpha_{E0}^s + (k-1)\frac{\pi}{6}.$$

შესაბამისად ბოგურ სქემაში გვაქვს ფაზების 12-ჯერადი გადართვა. თუ დროს დავყოფთ Δ_H ინტერვალებად, მივიღებთ

$$t = (k-1)\Delta_H + \tau$$

$$0 < \tau < \Delta_H, \quad \Delta_H = \frac{\pi}{6\omega_H},$$

ω_H – არის კომუტატორების გადართვის კუთხური სიჩქარე.

ყოველი ინტერვალის საწყისი დენების სიდიდე იღება წინა ინტერვალის დენების ანგარიშის მიხედვით.

(3.18) განტოლება აღწერს ძრავის არაკომუტაციური მუშაობის რეჟიმს, როცა კვების წყაროს ძაბვა კომუტატორის საშუალებით მიეწოდება სტატორის გრაგნილების დიამეტრალურად განლაგებულ კვანძებს.

თუ ვენტილების ანოდის და კათოდის ჯგუფების გადართვა ხდება სხვადასხვა დროს, გვაქვს ძრავების მუშაობის ისეთი რეჟიმი, როცა სტატორის გრაგნილის პარალელურ შტოებში ფააზთა სხვადასხვა რაოდენობაა:

$$\begin{aligned} \dot{u}^s &= 2r^c \dot{I}_{II}^s + \frac{d}{dt} \dot{\psi}_{II}^s & \dot{u}^s &= 4r^s \dot{I}_{III}^s + \frac{d}{dt} \dot{\psi}_{II}^s, \\ 0 &= r^r \dot{I}^r + \frac{d}{dt} \dot{\psi}^r - j\omega_r \psi^r, \end{aligned} \quad (3.26)$$

სადაც

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_I^s &= 2L_s \dot{I}_1^s + 3M^{ss} (\dot{I}_1^s + \dot{I}_{II}^s) + \frac{1}{2} M^{sr} a_1^2 \dot{I}^r + \frac{1}{2} M^{sr} a_1^2 \dot{I}^r e^{j2\alpha_{s1}^s}, \\ \dot{\psi}_{II}^s &= 4L_s \dot{I}_{II}^s + 3M^{ss} (\dot{I}_1^s + \dot{I}_{II}^s) + \frac{1}{2} M^{sr} a_1^2 \dot{I}^r + \frac{1}{2} M^{sr} a_1^2 \dot{I}^r e^{j2\alpha_{s1}^s}, \\ \dot{\psi}^r &= L_s^r \dot{I}^s + \frac{3}{2} M^{rr} \dot{I}^r + \frac{3}{2} M^{sr} (\dot{I}_1^s + \dot{I}_{II}^s). \end{aligned}$$

თუ (3.26) განტოლებას ჩავწერთ ოპერატორულ სახეში და გადავალთ ფარდობით ერთეულებზე, მაშინ (3.22) მიიღბს სახეს:

$$\dot{u}_s^s = Z_1^{ss} \dot{I}_1^s + Z_2^{ss} \dot{I}_{II}^s + Z_{22}^{ss} \dot{I}^s - Z^{sr} Z^{sr'} \dot{I}^s, \quad (3.27)$$

სადაც

$$Z_1^{ss} = r^s + px_s^s, \quad Z_2^{ss} = 2(r^s + px_s^s) = 2Z_1^{ss}, \quad Z_{22}^{ss} = 3x_m p.$$

გამარტვების შემდეგ დენებისათვის ++ გვაქვს:

$$\dot{i}^c = \frac{\dot{u}_s^s}{\frac{2}{3}Z_{11}^{ss} + Z_{22}^{ss} - Z^{sr}Z^{sr'}}. \quad (3.28)$$

დენებს - I_1^s , I_{II}^s , აქვს შემდეგი სახე:

$$I_1^s = \frac{2}{3}\dot{I}^s, \quad I_{II}^s = \frac{1}{3}\dot{I}^s.$$

ზემოთ მოცემული იყო გარდამავალი პროცესების განტოლებათა ამოხსნა მუდმივი სრიალის ($s = const$) დროს.

როცა მუდმივი დენის უკონტაქტო ძრავაში ადგილი აქვს გარდამავალ პროცესს, (3.21) განტოლება შეიძლება წარმოდგენილი იქნას d და q კოორდინატების საშუალებით, კომპიუტერზე გასანგარიშებლად.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} I_d^s &= \frac{1}{1-\mu} \left\{ \frac{u^s \cos \alpha_s^s}{x^{ss}} - \rho^s I_d^r - I_d^r \mu^s \cos \alpha_s^s [(1-s) \sin \alpha_s^s - \rho^r \cos \alpha_s^s] + \right. \\ &\quad \left. + I_q^r \mu^s \cos \alpha_s^s [(1-s) \cos \alpha_s^s + \rho^r \sin \alpha_s^s] \right\} \\ \frac{d}{dt} I_d^s &= -\frac{1}{1-\mu} \left\{ \frac{\mu^r u^s \cos \alpha_s^s}{x^{ss}} - \mu^p I_d^s - [\rho^s - (1-s)(1-\mu) \operatorname{tg} \alpha_s^s] - \right. \\ &\quad - I_d^r \left[\frac{1}{2} \mu(1-s) \sin 2\alpha_s^s - \rho^r (1-\mu \sin^2 \alpha_s^s) \right] + I_q^r \left[\frac{1}{2} \mu \rho^r \sin \alpha_s^s - \right. \\ &\quad \left. \left. -(1-s)(1-\mu \sin^2 \alpha_s^s) \right] \right\}, \quad (3.29) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} I_q^r &= -\frac{1}{1-\mu} \left\{ \frac{\mu^r u^s \sin \alpha_s^s}{x^{ss}} - \mu^r I_d^s - [\rho^s \operatorname{tg} \alpha_s^s + (1-s)(1-\mu)] - \right. \\ &\quad - I_d^r \left[(1-s)(1-\mu \cos^2 \alpha_s^s) - \frac{1}{2} \mu \rho^r \sin 2\alpha_s^s \right] + \\ &\quad \left. - I_q^r \left[\frac{1}{2} \mu(1-s) \sin 2\alpha_s^s + \rho^r (1-\mu \cos^2 \alpha_s^s) \right] \right\}, \end{aligned}$$

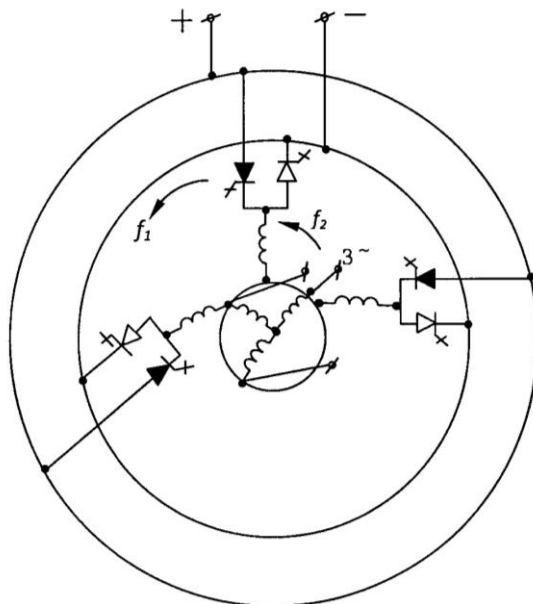
$$J \frac{ds}{dt} = M_B - M_{\vartheta},$$

$$M_{\vartheta} = \frac{3}{2} x_m I_d^s (I_{\vartheta}^r \operatorname{tg} \alpha_{\vartheta}^s - I_q^r).$$

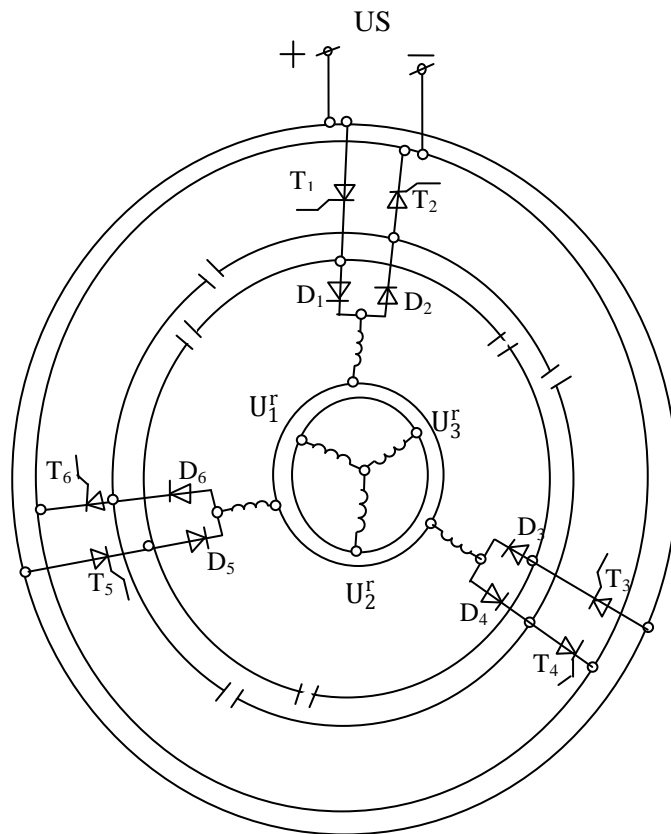
თავი IV . ვენტილური ძრავას კომუტაციური პროცესების ანალიზი

4.1. კომუტაციური პროცესების ანალიზი ცვლადთა მყისი მნიშვნელობებისათვის კომპლექსური სიდიდეების მიხედვით

ასინქრონული ტიპის ვენტილური მანქანის სტატორზე განლაგებულია ბოგური სქემით აწყობილი ტირისტორული კომუტატორი. კომუტატორის სრულად მართვადი ვენტილები იმართება როტორთან დაკავშირებული გადამწოდების სიგნალებით. მართვა შეიძლება განხორციელდეს სხვადასხვა კანონით [10,16]. როტორის სამფაზა გრაგნილს კვება მიეწოდება სამფაზა ძაბვის წყაროდან. ამ ძაბვის სიხშირე შეიძლება იყოს მუდმივი სიდიდე, ან იცვლებოდეს გარკვეულ ფარგლებში. განსახილველ ძრავაში მუშა პროცესი წარმოადგენს ორი ძირითადი რეჟიმის ერთობლიობას-არაკომუტაციურისა და კომუტაციურის.



ნახ. 21 ვენტილური ძრავა კომუტატორით სრულად მართვად ვენტილებზე



ნახ. 22 ვენტილური ძრავა კონდენსატორული კომუტაციის კომუტატორით.

არაკომუტაციურ რეჟიმში დენს ატარებს სტატორის გრაგნილის ორი ფაზა, ხოლო კომუტაციის პერიოდში სამი ფაზა. მაგალითად, სტატორის გრაგნილის მეორე ფაზიდან დენი გადადის მესამე ფაზაში. გარკვეული γ დროის ინტერვალის შემდეგ კომუტაციური პროცესი მთავრდება და დენს ატარებს ისევ ორი ფაზა და ა.შ. პროცესები მეორდება. კომუტაციური პროცესები შეიძლება განვიხილოთ გარდამავალ და დამყარებულ რეჟიმში ელექტრული მანქანის პარამეტრების მხედველობაში მიღებით. კომუტაციური პროცესების ანალიზისთვის შეიძლება გამოვიყენოთ მანქანის განტოლებები სიდიდეთა მყისი მნიშვნელობებისათვის. მიზანშეწონილია განტოლებების წარმოდგენა ვექტორული სახით

(კომპლექსური სახით) ცვლადთა გარდაქმნის მატრიცის გამოყენებით (3.1-3.2) [10,12,15].

ვუშვებთ, კომუტაციამდე დენს ატარებს სტატორის პირველი და მეორე ფაზა, ხოლო კომუტაციის დროს სამი ფაზა. დენი მეორე ფაზიდან გადადის მესამე ფაზაში. კომუტაციის პერიოდში სტატორისა და როტორის სამივე ფაზა ატარებს დენს. და ამის გამო გვაქვს ტოლობები:

$$\sum_{k=1}^3 e^{j2\alpha_k^s} = 0 ,$$

$$\sum_{k=1}^3 e^{j2\alpha_k^r} = 0 ,$$

სადაც α_k^s და α_k^r კუთხეები განსაზღვრავენ სტატორისა და როტორის ფაზების მაგნიტური ღერძების მდებარეობას სივრცეში. ამ შემთხვევაში კომუტაციური პროცესების განტოლებები მიზანშეწონილია ჩაიწეროს კომპლექსურ ფორმაში სტატორის გრაგნილის ხვიათა რიცხვზე დაყვანილი და ფარდობით ერთეულებში. ასინქრონული მანქანის დაყვანის კოეფიციენტი

$$k = \frac{K_{gr1} \cdot W_1}{K_{gr2} \cdot W_2}$$

სადაც W_1 და W_2 - შესაბამისად სტატორისა და როტორის ფაზების ხვიათა რიცხვებია; K_{gr1} და K_{gr2} - სტატორის და როტორის საგრაგნილე კოეფიციენტებია. სტატორზე დაყვანილი როტორის წრედის პარამეტრებისათვის გვაქვს გამოსახულებები:

$$X_s^r = K^2 X_s^r ,$$

$$r^r = K^2 X_r^r ,$$

$$X_m^{rr} = K X_m^{ss} ,$$

$$I_s^r = \frac{1}{K} I^{rr} ,$$

$$I_s^r = K V^r .$$

დაყვანის შედეგად ვღებულობთ:

$$X_m^{ss} = X_m^{rr} = X_m^{rs} = X_m ,$$

სადაც X_m არის ურთიერთინდუქციის მაქსიმალური წინაღობა. გამოსახულებებში s და r ინდექსები შეესაბამება შესაბამისად სტატორისა და როტორის მხარეს.

კომპუტაციური პროცესების განტოლებებს ფარდობით ერთეულებში აქვთ სახე:

$$\begin{aligned} V^s &= r^s I^s + \frac{d\psi^s}{dt}, \\ V^r &= r^r I^r + \frac{d\psi^r}{dt} - j\omega_r \psi^r, \\ \psi^s &= X_s^s I^s + \frac{3}{2} (X_m I^s + X_m I^r), \\ \psi^r &= X_s^r I^r + \frac{3}{2} (X_m I^r + X_m I^s), \\ V^s &= U^s e^{j\alpha_1^s}, \quad I^s = \sum_{k=1}^3 i_k^s e^{j\alpha_k^s}, \\ V^r &= \frac{3}{2} U_m e^{j[(\omega_1 + \omega_2)t + \varphi]} \end{aligned} \quad (4.1)$$

სადაც φ -როტორის ძაბვის ჩართვის ფაზაა.

(4.1) განტოლებათა სისტემის ამოხსნა გვამღევს სტატორისა და როტორის დენების კომპლექსებს. სტატორისა და როტორის დენების მყისი მნიშვნელობები განისაზღვრება შებრუნებული გარდაქმნის საშუალებით. დენების მყისი მნიშვნელობებისათვის გვაქვს გამოსახულებები:

$$\begin{aligned} I_s^k &= \frac{2}{3} \operatorname{Re} [I^s e^{-j(k-1)\frac{2\pi}{3}}], \\ I_k^r &= \frac{2}{3} \operatorname{Re} [I^r e^{-j(k-1)\frac{2\pi}{3}}]. \end{aligned} \quad (4.2)$$

სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით $t=0$, $I_2^s = I_{20}^s$,

$$t=\gamma, \quad I_2^s = 0, \quad (4.3)$$

4.2 კომპუტაცია დამყარებულ რეჟიმში განტოლებები, ნაკადშემზის მუდმივობის პრინციპის გამოყენებით

კომპუტაციური პროცესების განსაზღვრისათვის დამყარებულ რეჟიმში უნდა ვისარგებლოთ საკუთარ კოორდინატებში ჩაწერილი განტოლებებით, რომლებშიც არ არის ბრუნვის ე.მ. ძალა. ამ შემთხვევაში ვუშვებთ, რომ

$r^s = r^r = 0$. განტოლებებს აქვთ სახე [10]:

$$\begin{aligned} V^s &= \frac{d\psi^s}{dt} , \\ V^r &= \frac{d\psi^r}{dt} , \\ \psi^s &= X_s^s I^s + \frac{3}{2} (X_m I^s + X_m I^r) , \\ \psi^p &= \frac{3}{2} (X_m e^{-j\theta p} I^s + X^r I^r) \\ V^s &= U e^{j\alpha_1} , \\ V^r &= \frac{3}{2} U_m^r e^{j(\omega_2 t + \varphi)} . \end{aligned} \quad (4.4)$$

(4.4) განტოლებათა სისტემა ასე გადავწეროთ

$$\begin{aligned} \psi_0^s + \int_0^t V^c dt &= X^s I^s + \frac{3}{2} X_m I^r , \\ \psi_0^r + \int_0^t V^r dt &= \frac{3}{2} X_m e^{-j\theta p} I^s + X^r I^r \end{aligned} \quad (4.5)$$

V^s და V^r -ის მნიშვნელობების გათვალისწინებით გვაქვს შემდეგი განტოლებები:

$$\begin{aligned} \psi_0^s + Ut &= X^s I^s + X^{sr} I^r , \\ \psi_0^r + J \frac{3}{2} \frac{U_m^r}{\omega} e^{j(\omega_2 t + \varphi)} &= X^{rs} e^{-j\theta p} I^s + X^r I^r \end{aligned} \quad (4.6)$$

შემოვიღოთ აღნიშვნები:

$$\begin{aligned} \psi_1^s &= \psi_0^s + Ut , \\ \psi_2^s &= \psi_0^r - J \frac{3}{2} \frac{U_m^r}{\omega} e^{j(\omega_2 t + \varphi)} , \end{aligned} \quad (4.7)$$

სადაც

$$\begin{aligned} \psi_0^s &= X^s I_0^s + \frac{3}{2} X_m I_0^r \\ \psi_0^r &= \frac{3}{2} X_m e^{-j\theta_r^0} I_0^s + X^p I_0^r \end{aligned}$$

კომპლექსური დენები I^s და I^r განისაზღვრება შემდეგი სახით:

$$I^s = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{\Psi_1^s - \mu^s e^{-j\theta_r} \Psi_1^r}{X^s (1 - \mu e^{-j\theta_r})} ,$$

$$I^r = \frac{\Delta_2}{\Delta_1} = \frac{\Psi_1^r - \mu^{sr} e^{-j\theta_r} \Psi_1^s}{X^r (1 - \mu e^{-j\theta_r})}, \quad (4.8)$$

$$X^{sr} = X^{rs} = \frac{3}{2} X_m, \quad \mu^s = \frac{X^{sr}}{X^s}, \quad \mu^r = \frac{X^{sr}}{X^r}, \quad \mu = \mu^s \mu^r.$$

დენების მყისი მნიშვნელობები ასე განისაზღვრება:

$$I_k^s = \frac{2}{3} \operatorname{Re} [I^s e^{-j(k-1)\frac{2\pi}{3}}], \quad (4.9)$$

$$I_k^r = \frac{2}{3} \operatorname{Re} [I^r e^{-j(k-1)\frac{2\pi}{3}} e^{j\omega_r t}].$$

სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$t=0, \quad I_2^s = I_{20}^s, \quad (4.10)$$

$$t = \gamma, \quad I_2^s = 0.$$

ამ ტოლობებიდან განვსაზღვრავთ კომუტაციის γ კუთხეს ძრავას პარამეტრების მხედველობაში მიღებით.

4.3. კომუტაცია გარდამავალ პროცესებში

ზემოთ განხილული იყო კომუტაციური პროცესი დამყარებულ რეჟიმში. გარდამავალ პროცესში კომუტაციის გასაანგარიშებლად საჭიროა ამოიხსნას კომპლექსური განტოლებები მანქანის ყველა პარამეტრის გათვალისწინებით [10,14,15].

მაგალითის სახით განვიხილოთ კომუტაციური რეჟიმის განტოლებები მანქანის ამუშავების რეჟიმში, როცა აგზნების გრაგნილზე არ არის მიწოდებული ძაბვა:

$$(U^r = 0)$$

კომუტაციის კომპლექსურ განტოლებებს დროის აღნიშნულ ინტერვალში ექნება სახე:

$$U^s = r^s i^s + \frac{d\psi^s}{dt}, \quad 0 = r^r i^r + \frac{d\psi^r}{dt} - j\omega_r \psi^r$$

სადაც:

$$\psi^s = x_{11}^{ss} i^s + x_{11}^{sr} i^r, \quad \psi^r = x_{11}^{rr} i^r + x_{11}^{rs} i^s,$$

$$\dot{U}^s = \frac{U^s}{2} (e^{j\alpha_1^s} - e^{j\alpha_2^s} - e^{j\alpha_3^s}) , \quad (4.11)$$

$$i^s = \sum_{k=1}^3 i_k^s e^{j\alpha_k^s} ,$$

$$i^r = \sum_{k=1}^3 i_k^r e^{j\alpha_k^r} + \theta_r. \quad (k=1,2,3)$$

ინდუქციური წინაღობებისათვის გვაქვს:

$$x_{11}^{ss} = x_s^s + \frac{3}{2} x_m^{ss} = x_s^s + \frac{3}{2} x_m ,$$

$$x_{11}^{sr} = \frac{3}{2} x_m^{sr} = \frac{3}{2} x_m ,$$

$$x_{11}^{rr} = x_s^r + \frac{3}{2} x_m^{rr} = x_s^r + \frac{3}{2} x_m , \quad (4.12)$$

$$x_{11}^{rs} = \frac{3}{2} x_m^{rs} = \frac{3}{2} x_m ,$$

$$x_m^{ss} = x_m^{rr} = x_m^{sr} = x_m^{rs} = x_m$$

ეს განტოლებები ჩავწერთ d, q კოორდინატებში ეგმ-ზე ამოსახსნელად მოხერხებულ სახეში:

$$\frac{dI_d^s}{dt} = \frac{1}{1-\mu} \left[\frac{U_d^s}{x_{11}^{ss}} - \rho^s I_d^s + \rho^r \mu^s I_d^r + \omega_r (\mu^s I_q^r + \mu I_q^s) \right] ,$$

$$\frac{dI_q^s}{dt} = \frac{1}{1-\mu} \left[\frac{U_q^s}{x_{11}^{ss}} - \mu I_q^s + \rho^r \mu^s I_q^r - \omega_r (\mu^s I_d^r + \mu I_d^s) \right] ,$$

$$\frac{dI_d^r}{dt} = -\frac{1}{1-\mu} \left[\frac{\mu^r U_d^s}{x_{11}^{ss}} - \rho^s \mu^r I_q^s + \rho^r I_q^r - \omega_r (I_q^r + \mu^r I_q^s) \right] , \quad (4.13)$$

$$\frac{dI_q^r}{dt} = -\frac{1}{1-\mu} \left[\mu \frac{U_q^s}{x_{11}^{ss}} - \rho^s \mu^r I_q^s + \rho^r I_q^r - \omega_r (I_d^r + \mu^r I_d^s) \right] ,$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_B) , \quad M = \frac{3}{2} X_m (I_d^r I_q^s - I_q^r I_d^s) ,$$

$$i_1^r = \frac{2}{3} (I_d^r \cos\theta_r - I_q^r \sin\theta_r) ,$$

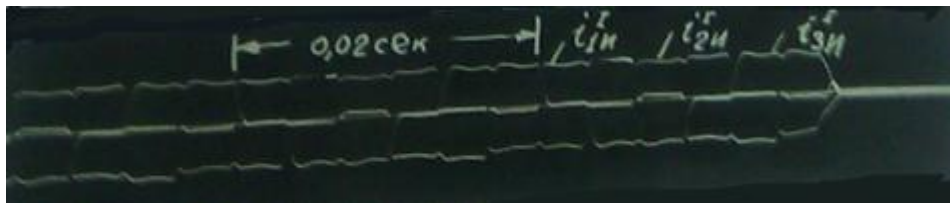
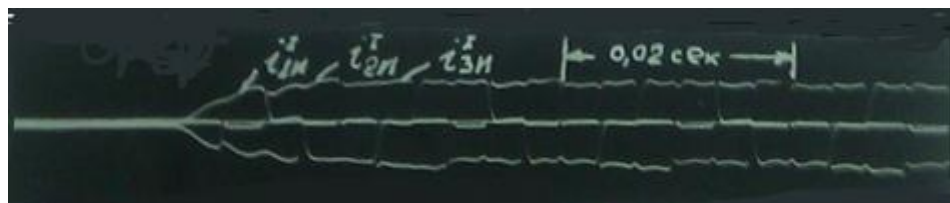
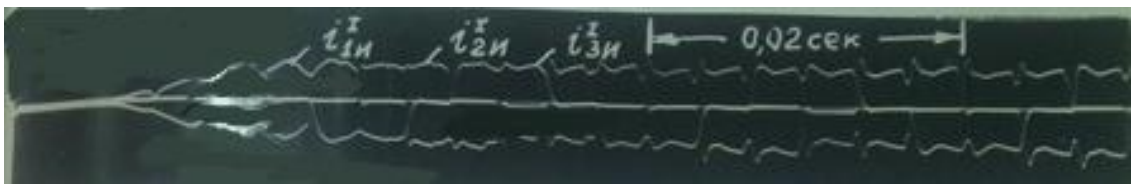
$$i_2^r = \frac{2}{3} \left(I_d^r \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) - I_q^r \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \right) ,$$

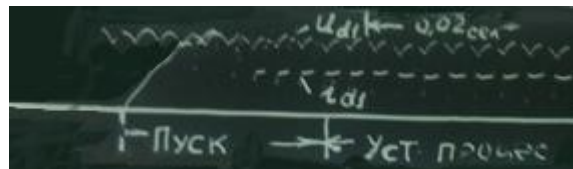
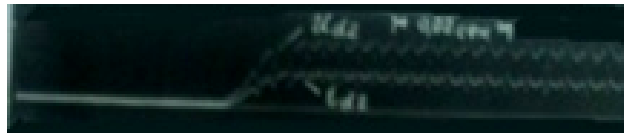
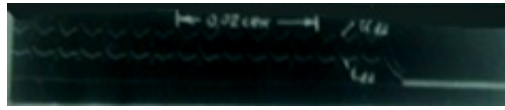
$$i_3^r = \frac{2}{3} \left(I_d^r \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) - I_q^r \sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \right) ,$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r .$$

სადაც J -ინერციის მომენტი; M -ელექტრომაგნიტური მომენტი; M_B -ლილვზე მოდებული გარე მომენტი.

ჩატარებული ანალიზი საშუალებას გვაძლევს გამოვიკვლიოთ კომპუტაციური რეჟიმები ვენტულურ მანქანებში ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდით სიდიდეთა მყისი მნიშვნელობებისათვის. განტოლებები ჩაიწერება სხვადასხვა საკოორდინატო სისტემაში. გარდამავალ რეჟიმში კომპუტაციის გასაანგარიშებლად მიზანშეწონილია განტოლებებში გავითვალისწინოთ მანქანის ყველა პარამეტრიც, ხოლო დამყარებულ რეჟიმში კომპუტაციური პროცესის ანალიზი წარმოებს აქტიური წინააღმდეგობის უგულვებელყოფით და კომპლექსური განტოლებების ჩაწერით საკუთარ კოორდინატებში. ამ შემთხვევაში განტოლებებში არ ფიგურირებს ბრუნვის ელექტრომომოდრავებელი ძალები.





ნახ. 23 სქემის ელემენტებზე ძაბვების დენების ოსცილოგრამები, ამუშავების და დამყარებულ რეჟიმებში

4.4 ვენტილური ძრავის კომპლექსური განტოლებები

კონდენსატორული კომუტაციის გათვალისწინებით.

სტატორის გრაგნილის მოცემული შეერთებისას კომუტატორის ფაზებთან დროის ცალკეულ ინტერვალში გაჩნიათ ორი რეჟიმი, რომელებიც მონაცვლეობენ ერთმანეთში: არაკომუტაციური, როდესაც დენი მიედინება ორ თანმიმდევრულად შეერთებულ დატვირთულ ფაზაში და კომუტაციური, როდესაც დენი ერთი ფაზიდან გადადის მეორეში [10,15].

| | I ქვეინტერვალი | II ქვეინტერვალი | III ქვეინტერვალი | IV ქვეინტერვალი |
|---------------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| I ინტერვალი | | | | |
| II ინტერვალი | | | | |
| III ინტერვალი | | | | |
| IV ინტერვალი | | | | |
| V ინტერვალი | | | | |
| VI ინტერვალი | | | | |

ნახ. 24 ჩანაცვლების სქემები არაკომუტაციური და კომუტაციური ინტერვალებისათვის

კომუტაციური და არაკომუტაციური ერთობლივი კვლევების პროცესები წარმოადგენს პირველადი მნიშვნელობის საკითხს ძრავის ნორმალური და მდგრადი მუშაობის უზრუნველყოფისათვის. ნახ. 24 მოცემულია ჩანაცვლების სქემები არაკომუტაციური და კომუტაციური ინტერვალებისათვის ტირისტორულ კომუტაციებს შორის გათიშული საწინააღმდეგო დიოდებით (D_7-D_{12}) [10,14,17].

დავუშვათ, რომ კომუტაციის წინ მუშაობენ T_1 და T_6 ტირისტორები და დენი მიედინება სტატორის გრაგნილში კომუტატორის ხაზებით, რომლებიც მოიცავენ T_1 და T_6 ტირისტორებსა და D_1 და D_6 დიოდებს, სურათი 1-ლი ინტერვალის 1-ლი ქვეინტერვალი).

ტირისტორ T_4 -ზე მართვის იმპულსის მიწოდების მომენტიდან იწყება კომუტაციური პროცესები.

კომუტაციის პირველი ეტაპი დგება ტირისტორ T_4 -ზე მართვის იმპულსის მიწოდების მომენტიდან და გრძელდება ტირისტორ T_6 -ში დენის შეწყვეტამდე (1-ლი ინტერვალის მე-2 ქვეინტერვალი)

კომუტაციის მეორე ეტაპი დგება ტირისტორ T_6 -ში დენის შეწყვეტის მომენტიდან და გრძელდება დატვირთვის ფაზაში დენის კომუტაციის დაწყებამდე (1-ლი ინტერვალის მე-3 ქვეინტერვალი).

კომუტაციის მესამე ეტაპი გრძელდება ძაბვის კონდენსატორის ნულზე გადასვლის მომენტიდან D_6 დიოდში დენის შეწყვეტამდე (1-ლი ინტერვალის მე-4 ქვეინტერვალი).

ცვლადების კომპლექსური გარდაქმნების გამოყენებით მყისი მნიშვნელობების მიხედვით დიფერენციალური განტოლებებიდან 1-ლი ქვეინტერვალისათვის, რომელებიც განეკუთვნებიან 1-ლ ინტერვალს, განტოლებათა გათვალისწინებით (არაკომუტაციური პროცესი), მიიღება:

$$i_1^s = -i_2^s = i^s$$

$$U_1^s = \frac{U^s}{2} - U_0^s$$

$$U_2^s = -\frac{U^s}{2} - U_0^s$$

მივიღებთ განტოლებას ახალი კომპლექსური ცვლადებით: ფორმულები

$$U^s - U_0^s = \left(r^s + \frac{r_d}{2} \right) I^s + \frac{d\psi^s}{dt} \quad (4.14)$$

$$0 = r^r I^r + \frac{d\psi^r}{dt} - j \omega_r \psi^r$$

$$\psi^s = (L_c^s + \frac{L_d}{2} + \frac{3}{2}M^{ss}) \dot{I}^s + M^{sr} \dot{I}^r (e^{j2a_1^s} + e^{j2a_2^s})$$

$$\psi^r = (L_s^r + \frac{3}{2}M^{rr}) \dot{I}^r + \frac{3}{2}M^{sr} \dot{I}^s$$

$$U^s = \frac{U^s}{2} (e^{ja_1^s} - e^{ja_2^s})$$

$$\dot{U}_0^s = U_0^s (e^{ja_1^s} + e^{ja_2^s})$$

$$U_s = U_s e^{ja_2^s}$$

$$\dot{I}^s = I^s (e^{ja_1^s} - e^{ja_2^s})$$

$$\dot{I}^s = \sum_{k=1}^3 i_k^r e^{j(a_k^r + \theta_r)}$$

$$\theta_r = \int_0^t \omega_r dt$$

4.14-დან პირველი განტოლება მოიცავს სტატორის გრაგნილის U_0^s ძაბვის ნულოვან წერტილს. თუ ამ განტოლებას გამოვაკლებთ მის შეკუმშულ განტოლებას გამრავლებულს $e^{j(a_1^s + a_2^s)}$ -ზე და გამარტივებით მივიღებთ:

$$\dot{U}^s = (2r^s + r_d)\dot{I}^s + \frac{d\psi^s}{dt}$$

$$0 = r^r \dot{I}^r + \frac{d\psi^r}{dt} - j\omega_r \psi^r$$

$$\dot{\psi}^s = x_{11}^{ss} \dot{I}^s + x_{11}^{sr} \dot{I}^r - x_{11}^{sr} \dot{I}^r e^{j(a_1^s + a_2^s)} \quad (4.15)$$

$$\dot{\psi}^r = x_{11}^{rr} \dot{I}^r + x_{11}^{rs} \dot{I}^s$$

$$U^s = U^s (e^{ja_1^s} - e^{ja_2^s})$$

$$\dot{I}^s = i^s (e^{ja_1^s} - e^{ja_2^s})$$

$$\dot{I}^r = \sum_{k=1}^3 i_k^r e^{j(a_k^r + \theta_r)}$$

ინდუქციური წინაღობებისათვის გვაქვს:

$$x_{11}^s = 2x_s^s + x_d + 3x_m^{ss} = 2x_s^s + x_d + 3x_m,$$

$$x_{11}^{sr} = \frac{3}{2}x_m^{sr} = \frac{3}{2}x_m \quad 4.16$$

$$x_{11}^{rr} = x_s^r + \frac{3}{2} x_m^{rr} = x_s^r + \frac{3}{2} x_m;$$

$$x_{11}^{rs} = \frac{3}{2} x_m^{rs} = \frac{3}{2} x_m;$$

$$x_m^{ss} = x_{11}^{rr} = x_{11}^{sr} = x_m^{rs} = x_m$$

4.15 განტოლების საფუძველზე ქვემოთ მოყვანილია განტოლება პირველი ქვეინტერვალისთვის კოორდინატებით d და q , რაც მოსახერხებელია კომპიუტერზე გასანგარიშებლად.

$$\begin{aligned} \frac{dI_d^s}{dt} = & \frac{1}{1-\mu} \left\{ \frac{U_d^s}{x_{11}^{ss}} (1 - \mu k_1^2) - (\rho^s - \mu \rho^s k_1^2 - \omega_r \mu k_2) I_d^s + \left[\frac{1}{\mu^r} (\rho^r - \rho^r \mu_1^2 + \right. \right. \\ & \left. \left. \omega_r \mu k_2) - \frac{r^r}{x_{11}^{rs}} (1 - \mu) \right] I_d^r + [\omega_r \mu^s (1 - \mu k_1^2) - \rho^r \mu^s k_2] I_q^r + [\omega_r \mu (1 - k_1^2) + \right. \\ & \left. \rho^s \mu k_2] I_q^s - \frac{U_{sq}}{x_{11}^{ss}} \mu k_2 \right\} \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} \frac{dI_q^s}{dt} = & \frac{1}{1-\mu} \left\{ \frac{U_q^s}{x_{11}^{ss}} (1 - \mu k_3^2) - (\rho^s - \mu \rho^s k_3^2 - \omega_r \mu k_2) I_q^s + \left[\frac{1}{\mu^p} (\rho^r - \rho^r \mu_3^2 - \right. \right. \\ & \left. \left. \omega_r \mu k_2) - \frac{r^r}{x_{11}^{rs}} (1 - \mu) \right] I_d^r - [\omega_r \mu^s (1 - k_3^2) + \rho^r \mu^s k_2] I_d^r - [\omega_r \mu (1 - k_3^2) - \right. \\ & \left. \rho^s \mu k_2] I_d^s - \frac{U_d^s}{x_{11}^{ss}} \mu k_2 - \frac{U_{sq}}{x_{11}^{ss}} (1 - \mu k_3^2) + \frac{U_{sd}}{x_{11}^{ss}} \mu k_2 \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dI_d^p}{dt} = & - \frac{1}{1-\mu} \left\{ \right. \\ & \frac{\mu^p U_d^s}{x_{11}^{ss}} (1 - \mu k_1^2) - \mu^p (\rho^s - \mu \rho^s k_1^2 - \omega_r \mu k_2) I_d^s - \omega_r \mu k_2 [\omega_r \mu k_2] I_d^s + \\ & (\rho^r - \rho^r \mu k_1^2 + \omega_r \mu k_2) I_d^r + [\omega_r (1 - \mu k_1^2) - \rho^r \mu k_2] I_q + \mu^r [\omega_r (1 - \mu k_1^2) + \\ & \left. \rho^s \mu k_2] I_q^s - \frac{U_q^s}{x_{11}^{ss}} \mu \mu^r k_2 - \frac{\mu^p U_{sd}}{x_{11}^{ss}} (1 - \mu k_1^2) + \frac{U_{sq}}{x_{11}^{ss}} \mu \mu^r k_2 \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dI_q^r}{dt} = & - \frac{1}{1-\mu} \left[\frac{\mu^r U_q^s}{x_{11}^{se}} (1 - \mu k_3^2) - \mu^r (\rho^s - \rho^s \mu k_3^2 + \omega_s \mu k_2) I_q^s + (\rho^r - \rho^r \mu k_3^2 - \right. \\ & \left. \omega_r \mu k_2) I_q^r - [\omega_r (1 - \mu k_3^2) + \rho^r \mu k_2] I_d^r - [\omega_r (1 - \mu k_3^2) + \rho^r \mu k_2] I_d^r - \right. \\ & \left. \mu^r [\omega_r (1 - \mu k_3^2) - \rho^s \mu k_3^2] I_d^s - \frac{U_q^s}{x_{11}^{se}} \mu \mu^r k_2 \right] \end{aligned}$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{j} (M - M_B), \quad M = \frac{3}{2} X_m (I_d^r I_q^s - I_q^r I_d^s),$$

$$i_1^r = \frac{2}{3} (I_d^r \cos\theta_r - I_q^r \sin\theta_r),$$

$$i_2^r = \frac{2}{3} \left[\left(I_d^r \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) - I_q^r \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \right) \right],$$

$$i_3^r = \frac{2}{3} \left[\left(I_d^r \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) - I_q^r \sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \right) \right],$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r .$$

4.15 განტოლებებში ρ^s და ρ^r წარმოადგენს მილევად კოეფიციენტებს:

$$\rho^s = \frac{2r^s + r_d}{x_{11}^{ss}}$$

$$\rho^r = \frac{r^r}{x_{11}^{rr}}$$

$\mu = \mu^s = \mu^r = \frac{x_{11}^{sr} x_{11}^{rs}}{x_{11}^{ss} x_{11}^{rr}}$ - სტატორისა და როტორის გრაგნილის მაგნიტური კავშირის კოეფიციენტი

j -ინერციის მომენტი, M - ელექტრომაგნიტური მომენტი, M_B -ლილვის გარე მომენტი.

ცხრილი 2 წარმოდგენილია $k_1, k_2, k_3, U_d^s, U_q^s, i^c$ -სიდიდეები, რომლებიც შედიან განტოლებებში 1-ქვეინტერვალისთვის.

| სიდი დეები | I ინტერვალი | II ინტერვალი | III ინტერვალი | IV ინტერვალი | V ინტერვალი | VI ინტერვალი |
|---------------|--|---|---|---|---|---|
| | $a_1^s = 30^\circ;$ $a_2^s = 150^\circ;$ | $a_1^s = 30^\circ;$ $a_3^s = 270^\circ;$ | $a_2^s = 150^\circ;$ $a_3^s = 270^\circ;$ | $a_1^s = 30^\circ;$ $a_2^s = 150^\circ;$ | $a_1^s = 30^\circ;$ $a_3^s = 270^\circ;$ | $a_2^s = 150^\circ;$ $a_3^s = 270^\circ;$ |
| k_1 | $\cos \frac{a_1^s + a_2^s}{2} = 0$ | $\cos \frac{a_1^s + a_3^s}{2} = -\frac{\sqrt{3}}{2}$ | $\cos \frac{a_2^s + a_3^s}{2} = -\frac{\sqrt{3}}{2}$ | $\cos \frac{a_1^s + a_2^s}{2} = 0$ | $\cos \frac{a_1^s + a_3^s}{2} = -\frac{\sqrt{3}}{2}$ | $\cos \frac{a_2^s + a_3^s}{2} = -\frac{\sqrt{2}}{2}$ |
| k_2 | $\sin(a_1^s + a_2^s) = 0$ | $\sin(a_1^s + a_3^s) = -\frac{\sqrt{3}}{2}$ | $\sin(a_2^s + a_3^s) = \frac{\sqrt{3}}{2}$ | $\sin(a_1^s + a_2^s) = 0$ | $\sin(a_1^s + a_3^s) = -\frac{\sqrt{3}}{2}$ | $\sin(a_2^s + a_3^s) = \frac{\sqrt{3}}{2}$ |
| k_3 | $\sin \frac{a_1^s + a_2^s}{2} = 1$ | $\sin \frac{a_1^s + a_3^s}{2} = \frac{1}{2}$ | $\sin \frac{a_2^s + a_3^s}{2} = -\frac{1}{2}$ | $\sin \frac{a_1^s + a_2^s}{2} = 1$ | $\sin \frac{a_1^s + a_3^s}{2} = \frac{1}{2}$ | $\sin \frac{a_2^s + a_3^s}{2} = -\frac{1}{2}$ |
| U_d^s | $+U^s(\cos a_1^s - \cos a_2^s) = +\sqrt{3}U^s$ | $+U^s(\cos a_1^s - \cos a_3^s) = +\frac{\sqrt{3}}{2}U^s$ | $+U^s(\cos a_2^s - \cos a_3^s) = -\frac{\sqrt{3}}{2}U^s$ | $+U^s(\cos a_1^s - \cos a_2^s) = -\sqrt{3}U^s$ | $+U^s(\cos a_1^s - \cos a_3^s) = -\frac{\sqrt{3}}{2}U^s$ | $+U^s(\cos a_2^s - \cos a_3^s) = +\frac{\sqrt{3}}{2}U^s$ |
| U_q^s | $+U^s(\sin a_1^s - \sin a_2^s) = 0$ | $+U^s(\sin a_1^s - \sin a_3^s) = \frac{3}{2}U^s$ | $+U^s(\sin a_2^s - \sin a_3^s) = \frac{3}{2}U^s$ | $+U^s(\sin a_1^s - \sin a_2^s) = 0$ | $+U^s(\sin a_1^s - \sin a_3^s) = -\frac{3}{2}U^s$ | $+U^s(\sin a_2^s - \sin a_3^s) = -\frac{3}{2}U^s$ |
| i^s | $\frac{1}{\cos a_1^s - \cos a_2^s} I_d^s = \frac{1}{\sqrt{3}}$ | $\frac{1}{\cos a_1^s - \cos a_3^s} I_d^s = -\frac{3}{\sqrt{3}}$ | $\frac{1}{\cos a_2^s - \cos a_3^s} I_d^s = -\frac{2}{\sqrt{3}} I_d^s$ | $\frac{1}{\cos a_1^s - \cos a_2^s} I_d^s = -\frac{1}{\sqrt{3}} I_d^s$ | $\frac{1}{\cos a_1^s - \cos a_3^s} I_d^s = -\frac{2}{\sqrt{3}} I_d^s$ | $\frac{1}{\cos a_2^s - \cos a_3^s} I_d^s = -\frac{2}{\sqrt{3}} I_d^s$ |

ცხრილი 2. კოეფიციენტები გადართვის ინტერვალებისათვის.

მეორე ქვეინტერვალის ხანგრძლივობა შეიძლება მხედველობაში არ მივიღოთ, გამომდინარე იქედან, რომ კომუტირებად კონტურში (ნახ. 24) ენერჯის მაგროვებელი ინდუქციობის სახით არ არსებობს, ხოლო კონტურის აქტიური წინაღობა ძალიან მცირეა.

დიფერენციალური განტოლებებიდან მე-3 ქვეინტერვალისათვის, რომელიც მიეკუთვნება 1-ლ ინტერვალს, ცვლადების კომპლექსური გარდაქმნის გამოყენებით მიიღება (კომუტაციური პროცესი):

$$i_2^s = -i_2^s = i^s$$

$$U_1^s = \frac{U^s}{2} - U_0^s$$

$$U_1^s = \frac{U^s}{2} - U_0^s + U_c \quad (4.18)$$

$$U_c = \frac{1}{c} \int_0^t i^s dt + U_c(0)$$

$$\dot{U}^s - \dot{U}_0^s + \dot{U}_c = \left(r^s + \frac{r_d}{2}\right) I^s + \frac{d\psi^s}{dt}$$

$$0 = r^r \dot{I}^r + \frac{d\psi^r}{dt} - j \omega_r \psi^r$$

სადაც

$$\psi^s = \left(L_s^s + \frac{L_d}{2} + \frac{3}{2}M^{ss}\right) I^s + M^{sr} \dot{I}^r (e^{j2a_1^s} + e^{j2a_2^s})$$

$$\psi^r = \left(L_c^r + \frac{3}{2}M^{rr}\right) \dot{I}^r + \frac{3}{2}M^{sr} I^s$$

$$\dot{U}^s = \frac{U^s}{2} (e^{ja_1^s} - e^{ja_2^s})$$

$$U_0^s = U_0^s (e^{ja_1^s} + e^{ja_2^s})$$

$$U_s = U_s e^{ja_2^s}$$

$$\dot{I}^s = I^s (e^{ja_1^s} - e^{ja_2^s})$$

$$\dot{I}^s = \sum_{k=1}^3 i_k^r e^{j(a_k^r + \theta_r)}$$

$$\theta_r = \int_0^t \omega_r dt$$

$U_c(0)$ - ძაბვა კონდენსატორზე მე-3 კომუტაციური ქვეინტერვალის დაწყების მომენტისათვის . $C_E = \frac{3}{2} C$ - ეკვივალენტური კონდენსატორების ტევადობა, რომლებიც მონაწილეობენ კომუტაციაში.

C - ერთი კომუტირებადი კონდენსატორის ტევადობა.

სისტემიდან პირველი განტოლება მოიცავს სტატორის გრაგნილის ძაბვის ნულოვან წერტილს თუ ამ განტოლებას გამოვაკლებთ თავის შეუღლებულ განტოლებას, ძაბვა ამ განტოლებიდან გამოირიცხება და ძაბვის, დენისა და ნაკადთშებმის ვექტორი სტატორის კოორდინატთა სისტემაში, ფარდებით ერთეულებში ჩაწერით მივიღებთ შემდეგ კომპლექსურ განტოლებებს:

$$\begin{aligned}
 U^s &= (2r^s + r_d)I^s + \frac{d\psi^s}{dt} + x_c \int_0^t I^s dt \\
 0 &= r^r I^r + \frac{d\psi^r}{dt} - j \omega_r \psi^r \\
 \psi^s &= x_{11}^{ss} I^s + x_{11}^{sr} I^r - x_{11}^{rr} I^r e^{j(a_1^s + a_2^s)} \quad (4.19) \\
 \psi^r &= x_{11}^{rr} I^r + x_{11}^{rs} I^s \\
 U^s &= \left[\frac{U^s}{2} - U_c(0) \right] (e^{ja_1^s} - e^{ja_2^s}) \\
 I^s &= \sum_{k=1}^3 i_k^r e^{j(a_k^r + \theta_r)}
 \end{aligned}$$

რეაქტიული წინაღობებისათვის გვაქვს:

$$\begin{aligned}
 x_c &= \frac{1}{\omega_\sigma c_\eta z_\delta} \\
 x_{11}^{ss} &= 2x_c^s + x_d + 3x_m^{ss} = 2x_c^s + x_d + 3x_m, \\
 x_{11}^{sr} &= \frac{3}{2}x_m^{sr} = \frac{3}{2}x_m \\
 x_{11}^{rr} &= x_c^r + \frac{3}{2}x_m^{rr} = x_c^r + \frac{3}{2}x_m; \\
 x_{11}^{rs} &= \frac{3}{2}x_m^{rs} = \frac{3}{2}x_m; \\
 x_m^{ss} &= x_{11}^{rr} = x_{11}^{sr} = x_m^{rs} = x_m
 \end{aligned}$$

4.19 განტოლებების საფუძველზე ქვემოთ მოყვანილია განტოლებები მე-3 ქვეინტერვალისათვის კოორდინატებით d, q რაც მოსახერხებელია მათი ამოხსნისათვის კომპიუტერზე გასაანგარიშებლად.

$$\begin{aligned} \frac{dI_d^s}{dt} = & \frac{1}{1-\mu} \left\{ \frac{U_d^s}{x_{11}^{ss}} (1 - \mu k_1^2) - (\rho^s - \mu \rho^s k_1^2 - \omega_r \mu k_2) I_d^s + \left[\frac{1}{\mu^r} (\rho^r - \rho^r \mu_1^2 + \right. \right. \\ & \left. \left. \omega_r \mu k_2) - \frac{r^r}{x_{11}^{rs}} (1 - \mu) \right] I_d^r + [\omega_r \mu^s (1 - \mu k_1^2) - \rho^r \mu^s k_2] I_q^r + [\omega_r \mu (1 - k_1^2) + \right. \\ & \left. \rho^s \mu k_2] I_q^s - \frac{U_{sd}}{x_{11}^{ss}} (1 - k_1^2) + \frac{U_{sq}}{x_{11}^{ss}} \mu k_2 \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dI_q^s}{dt} = & \frac{1}{1-\mu} \left\{ \frac{U_q^s}{x_{11}^{ss}} (1 - \mu k_3^2) - (\rho^s - \mu \rho^s k_3^2 - \omega_r \mu k_2) I_q^s + \left[\frac{1}{\mu^p} (\rho^r - \rho^r \mu_3^2 - \right. \right. \\ & \left. \left. \omega_r \mu k_2) - \frac{r^r}{x_{11}^{rs}} (1 - \mu) \right] I_d^r - [\omega_r \mu^s (1 - k_3^2) + \rho^r \mu^s k_2] I_d^r - [\omega_r \mu (1 - k_3^2) - \right. \\ & \left. \rho^s \mu k_2] I_d^s - \frac{U_d^s}{x_{11}^{ss}} \mu k_2 - \frac{U_{sq}}{x_{11}^{ss}} (1 - \mu k_3^2) + \frac{U_{sd}}{x_{11}^{ss}} \mu k_2 \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dI_d^p}{dt} = & - \frac{1}{1-\mu} \left\{ \right. \\ & \left. \frac{\mu^p U_d^s}{x_{11}^{ss}} (1 - \mu k_1^2) - \mu^p (\rho^s - \mu \rho^s k_1^2 - \omega_r \mu k_2) I_d^s - \omega_r \mu k_2) [\omega_r \mu k_2] I_d^s + \right. \\ & \left. (\rho^r - \rho^r \mu k_1^2 + \omega_r \mu k_2) I_d^r + [\omega_r (1 - \mu k_1^2) - \rho^r \mu k_2] I_q + \mu^r [\omega_r (1 - \mu k_1^2) + \right. \\ & \left. \rho^s \mu k_2] I_q^s - \frac{U_q^s}{x_{11}^{ss}} \mu \mu^r k_2 - \frac{\mu^p U_{sd}}{x_{11}^{ss}} (1 - \mu k_1^2) + \frac{U_{sq}}{x_{11}^{ss}} \mu \mu^r k_2 \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dI_q^p}{dt} = & - \frac{1}{1-\mu} \left\{ \frac{\mu^p U_q^s}{x_{11}^{ss}} (1 - \mu k_3^2) - \mu^p (\rho^s - \mu \rho^s k_3^2 - \omega_r \mu k_2) I_q^s + (\rho^r - \right. \\ & \left. \rho^r \mu k_3^2 - \omega_r \mu k_2) I_d^r + [\omega_r (1 - \mu k_3^2) + \rho^r \mu k_2] I_q + \mu^r [\omega_r (1 - \mu k_3^2) - \right. \\ & \left. \rho^s \mu k_2] I_d^s - \frac{U_d^s}{x_{11}^{ss}} \mu \mu^r k_2 - \frac{\mu^p U_{sq}}{x_{11}^{ss}} (1 - \mu k_3^2) + \frac{U_{sd}}{x_{11}^{ss}} \mu \mu^r k_2 \right\} \end{aligned}$$

$$\frac{dU_{sd}}{dt} = x_c I_d^s \quad (4.20)$$

$$\frac{dU_{sq}}{dt} = x_c I_q^s$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{j} (M - M_B), \quad M = \frac{3}{2} X_m (I_d^r I_q^s - I_q^r I_d^s),$$

$$i_1^r = \frac{2}{3} (I_d^r \cos \theta_r - I_q^r \sin \theta_r),$$

$$i_2^r = \frac{2}{3} \left[\left(I_d^r \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) - I_q^r \sin \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \right],$$

$$i_3^r = \frac{2}{3} \left[\left(I_d^r \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) - I_q^r \sin(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \right) \right],$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r .$$

ცხრილში 3 მოყვანილია $k_1, k_2, k_3, U_d^s, U_q^s, i^c$ -სიდიდეები, რომლებიც შედიან (4.21) განტოლებაში მე-3 ქვეინტერვალისათვის.

განტოლების დასკვნა მე-4 ქვეინტერვალისათვის ანალოგიურია მე-3 ქვეინტერვალისათვის განტოლების დასკვნისა, იმ განსხვავებით, რომ ამ ქვეინტერვალში მუშაობს ძრავის სტატორის გრაგნილის სამივე ფაზა და ხდება დენის კომპუტაცია ფაზებს შორის.

კომპლექსურ განტოლებებს მე-4 ქვეინტერვალისათვის სტატორის კოორდინატულ სისტემაში შეფარდებით ერთეულებში გააჩნიათ შემდეგი სახე.

$$\begin{aligned} U^s + U_c &= (r^s + r_d) I^s + \frac{d\psi^s}{dt} \\ 0 &= r^r I^r + \frac{d\psi^r}{dt} - j \omega_r \psi^r \\ \psi^s &= x_{11}^{ss} I^s + x_{11}^{sr} I^r \\ \psi^r &= x_{11}^{rr} I^r + x_{11}^{rs} I^s \\ U^s &= \left[\frac{U^s}{2} - U_c(0) \right] (e^{ja_1^s} - e^{ja_2^s} - e^{ja_3^s}) \\ U_c &= x_c \int_0^t i_k^s e^{ja_k^s} dt \\ I^s &= \sum_{k=1}^3 i_k^s e^{ja_k^s} \\ I^s &= \sum_{k=1}^3 i_k^r e^{j(a_k^r + \theta_r)} \quad (k=1,2,3) \end{aligned} \tag{4.21}$$

| იდი დეები | I ინტერვალი | II ინტერვალი | III ინტერვალი | IV ინტერვალი | V ინტერვალი | VI ინტერვალი |
|----------------|--|--|--|---|--|--|
| | $a_1^s = 30^\circ;$ $a_2^s = 150^\circ;$ | $a_1^s = 30^\circ;$ $a_3^s = 270^\circ;$ | $a_2^s = 150^\circ;$ $a_3^s = 270^\circ;$ | $a_1^s = 30^\circ;$ $a_2^s = 150^\circ;$ | $a_1^s = 30^\circ;$ $a_3^s = 270^\circ;$ | $a_2^s = 150^\circ;$ $a_3^s = 270^\circ;$ |
| k ₁ | $\cos \frac{a_1^s + a_2^s}{2} = 0$ | $\cos \frac{a_1^s + a_3^s}{2} = -\frac{\sqrt{3}}{2}$ | $\cos \frac{a_2^s + a_3^s}{2} = -\frac{\sqrt{3}}{2}$ | $\cos \frac{a_1^s + a_2^s}{2} = 0$ | $\cos \frac{a_1^s + a_3^s}{2} = -\frac{\sqrt{3}}{2}$ | $\cos \frac{a_2^s + a_3^s}{2} = -\frac{\sqrt{3}}{2}$ |
| k ₂ | $\sin(a_1^s + a_2^s) = 0$ | $\sin(a_1^s + a_3^s) = -\frac{\sqrt{3}}{2}$ | $\sin(a_2^s + a_3^s) = \frac{\sqrt{3}}{2}$ | $\sin(a_1^s + a_2^s) = 0$ | $\sin(a_1^s + a_3^s) = -\frac{\sqrt{3}}{2}$ | $\sin(a_2^s + a_3^s) = \frac{\sqrt{3}}{2}$ |
| k ₃ | $\sin \frac{a_1^s + a_2^s}{2} = 1$ | $\sin \frac{a_1^s + a_3^s}{2} = \frac{1}{2}$ | $\sin \frac{a_2^s + a_3^s}{2} = -\frac{1}{2}$ | $\sin \frac{a_1^s + a_2^s}{2} = 1$ | $\sin \frac{a_1^s + a_3^s}{2} = \frac{1}{2}$ | $\sin \frac{a_2^s + a_3^s}{2} = -\frac{1}{2}$ |
| U_d^s | $+ [U^s - U_c(0)](\cos a_1^s - \cos a_2^s) = +\sqrt{3} + [U^s - U_c(0)]$ | $+ [U^s - U_c(0)](\cos a_1^s - \cos a_3^s) = +\frac{\sqrt{3}}{2} [U^s - U_c(0)]$ | $+ [U^s - U_c(0)](\cos a_2^s - \cos a_3^s) = -\frac{\sqrt{3}}{2} [U^s - U_c(0)]$ | $+ [U^s - U_c(0)](\cos a_1^s - \cos a_2^s) = -\sqrt{3} [U^s - U_c(0)]$ | $+ [U^s - U_c(0)](\cos a_1^s - \cos a_3^s) = -\frac{\sqrt{3}}{2} [U^s - U_c(0)]$ | $+ [U^s - U_c(0)](\cos a_2^s - \cos a_3^s) = +\frac{\sqrt{3}}{2} [U^s - U_c(0)]$ |
| U_q^s | $+ [U^s - U_c(0)](\sin a_1^s - \sin a_2^s) = 0$ | $+ [U^s - U_c(0)](\sin a_1^s - \sin a_3^s) = \frac{3}{2} [U^s - U_c(0)]$ | $+ [U^s - U_c(0)](\sin a_2^s - \sin a_3^s) = \frac{3}{2} [U^s - U_c(0)]$ | $+ [U^s - U_c(0)](\sin a_1^s - \sin a_2^s) = 0$ | $+ [U^s - U_c(0)](\sin a_1^s - \sin a_3^s) = -\frac{3}{2} [U^s - U_c(0)]$ | $+ [U^s - U_c(0)](\sin a_2^s - \sin a_3^s) = -\frac{3}{2} [U^s - U_c(0)]$ |
| i ^s | $\frac{1}{\cos a_1^s - \cos a_2^s} \quad I_d^s = \frac{1}{\sqrt{3}}$ | $\frac{2}{\cos a_1^s - \cos a_3^s} \quad I_d^s = -\frac{2}{\sqrt{3}} I_d^s$ | $\frac{1}{\cos a_2^s - \cos a_3^s} \quad I_d^s = -\frac{2}{\sqrt{3}} I_d^s$ | $\frac{1}{\cos a_1^s - \cos a_2^s} \quad I_d^s = -\frac{1}{\sqrt{3}} I_d^s$ | $\frac{1}{\cos a_1^s - \cos a_3^s} \quad I_d^c = -\frac{2}{\sqrt{3}} I_d^s$ | $\frac{1}{\cos a_2^s - \cos a_3^s} \quad I_d^s = -\frac{1}{\sqrt{3}} I_d^s$ |

ცხრილი 3. კომუტაციის მე-4 ინტერვალის კოეფიციენტები

ინლუქციური წინარობებისათვის გვაქვს:

$$\begin{aligned}
 x_{11}^{ss} &= x_c^s + x_d + \frac{3}{2} x_m^{ss} = x_c^s + x_d + \frac{3}{2} x_m, \\
 x_{11}^{sr} &= \frac{3}{2} x_m^{sr} = \frac{3}{2} x_m \\
 x_c &= \frac{1}{\omega_\sigma c_\eta z_\delta} \\
 x_{11}^{rr} &= x_c^r + \frac{3}{2} x_m^{rr} = x_c^r + \frac{3}{2} x_m; \\
 x_1^{rs} &= \frac{3}{2} x_m^{rs} = \frac{3}{2} x_m; \\
 x_m^{ss} &= x_{11}^{rr} = x_{11}^{sr} = x_m^{rs} = x_m
 \end{aligned} \tag{4.22}$$

ქვემოთ მოყვანილია (4.21) განტოლება მე-4 ქვეინტერვალისთვის კოორდინატებით d და q , რაც მოსახერხებელია მათი პროგრამირებისათვის:

$$\begin{aligned}
 \frac{dI_d^s}{dt} &= \frac{1}{1-\mu} \left[\frac{U_d^s}{x_{11}^{ss}} - \rho^s I_d^s + \rho^r \mu^s I_d^r + \omega_r (\mu^s I_q^r + \mu I_q^s) + \frac{U_{sd}}{x_1^{se}} \right], \\
 \frac{dI_q^s}{dt} &= \frac{1}{1-\mu} \left[\frac{U_d^s}{x_{11}^{ss}} - \mu I_q^s + \rho^r \mu^s I_q^r - \omega_r (\mu^s I_d^r + \mu I_d^s) + \frac{U_{sq}}{x_{11}^{se}} \right], \\
 \frac{dI_d^r}{dt} &= -\frac{1}{1-\mu} \left[\frac{\mu^r U_d^s}{x_{11}^{ss}} - \rho^s \mu^r I_q^s + \rho^r I_q^r + \omega_r (I_q^r + \mu^r I_q^s) + \frac{\mu^r U_{sq}}{x_{11}^{se}} \right], \\
 \frac{dI_q^r}{dt} &= -\left[\frac{\mu^r U_{sq}}{x_{11}^{se}} - \rho^s \mu^r I_q^s + \rho^r I_q^r - \omega_r (I_d^r + \mu^r I_d^s) + \frac{\mu^r U_{sq}}{x_{11}^{se}} \right], \\
 \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1}{j} (M - M_B), \quad M = \frac{3}{2} X_m (I_d^r I_s^q - I_r^d I_d^s), \\
 i_1^r &= \frac{2}{3} (I_d^q \cos\theta_r - I_q^r \sin\theta_r), \\
 i_2^r &= \frac{2}{3} \left[(I_d^r \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) - I_q^r \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3})) \right], \\
 i_3^r &= \frac{2}{3} \left[(I_d^r \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) - I_q^r \sin(\theta_r - \frac{4\pi}{3})) \right], \\
 \frac{d\theta_r}{dt} &= \omega_r.
 \end{aligned} \tag{4.23}$$

| სიდი დეები | $a_1^s = 30^\circ; a_2^s = 150^\circ; a_3^s = 270^\circ;$ | | | | | |
|----------------------|--|--|--------------------------------------|--|--|--|
| | I ინტერვალი | II ინტერვალი | III ინტერვალი | IV ინტერვალი | V ინტერვალი | VI ინტერვალი |
| U_d^s | $+\frac{\sqrt{3}}{2}+[U^s - U_c(0)]$ | $+\frac{\sqrt{3}}{2}+[U^s - U_c(0)]$ | $+\frac{\sqrt{3}}{2}+[U^s - U_c(0)]$ | $-\frac{\sqrt{3}}{2}+[U^s - U_c(0)]$ | $-\frac{\sqrt{3}}{2}+[U^s - U_c(0)]$ | $-\frac{\sqrt{3}}{2}+[U^s - U_c(0)]$ |
| U_q^s | $-\frac{1}{2}[U^s - U_c(0)]$ | $-\frac{1}{2}[U^s - U_c(0)]$ | $-\frac{1}{2}[U^s - U_c(0)]$ | $+\frac{1}{2}[U^s - U_c(0)]$ | $+\frac{1}{2}[U^s - U_c(0)]$ | $+\frac{1}{2}[U^s - U_c(0)]$ |
| $\frac{du_{sd}}{dt}$ | $+\frac{x_c a_2^s \cos a_2^s}{\sqrt{3}} = +\frac{\sqrt{3}}{2} x_c a_2^s$ | $+\frac{x_c a_1^s \cos a_1^s}{\sqrt{3}} = +\frac{\sqrt{3}}{2} x_c a_1^s$ | $+x_c a_3^s \cos a_3^s = 0$ | $+\frac{x_c a_2^s \cos a_2^s}{\sqrt{3}} = +\frac{\sqrt{3}}{2} x_c a_2^s$ | $+\frac{x_c a_1^s \cos a_1^s}{\sqrt{3}} = +\frac{\sqrt{3}}{2} x_c a_1^s$ | $-x_c a_3^s \cos a_3^s = 0$ |
| $\frac{du_{sq}}{dt}$ | $+x_c a_2^s \sin a_2^s = +\frac{1}{2} x_c a_2^s$ | $+x_c a_1^s \sin a_1^s = +\frac{1}{2} x_c a_1^s$ | $+x_c i_3^s \sin a_3^s = -x_c a_3^s$ | $-x_c i_2^s \sin a_2^s = -\frac{1}{2} x_c a_2^s$ | $-x_c i_1^s \sin a_1^s = -\frac{1}{2} x_c a_1^s$ | $-x_c i_3^s \sin a_3^s = +\frac{1}{2} x_c a_3^s$ |
| i_1^s | $\frac{1}{\sqrt{3}} U_d^s$ | | | | | |
| i_2^s | $-\frac{1}{\sqrt{3}} U_d^s + \frac{1}{3} U_q^s$ | | | | | |
| i_3^s | $-\frac{2}{3} U_q^s$ | | | | | |

ცხრილი 4. კომუტაციის მე-4 ინტერვალის დამახასიათებელი სიდიდეები

ცხრილში 4 მოყვანილია -სიდიდეები, რომლებიც შედიან (4.19) განტოლებაში მე-4 ქვეინტერვალისთვის ინდუქციური წინაღობებისთვის.

ცხრილში 4 მოყვანილია $U_d^s, U_q^s, \frac{du_{sd}}{dt}, \frac{du_{sq}}{dt}, I_1^s, I_2^s, I_3^s$ -სიდიდეები, რომლებიც შედიან (4.19) განტოლებაში მე-4 ქვეინტერვალისთვის

(4.17), (4.20), (4.23) განტოლებების ამოხსნა საშუალებას იძლევა განვსაზღვროთ ძრავის გარდამავალი პროცესი ყოველი ცალკეული დროის ინტერვალში.

ზღვრული პირობების გათვალისწინებით მივიღებთ დროში გარდამავალი პროცესის სურათს. ეს განტოლებები გამოიყენება კომპიუტერზე გასაანგარიშებლად.

თავი V . ვენტილური ძრავის განტოლებები ცვლადთა გასაშუალოებული მნიშვნელობებისათვის

5.1 ვენტილური ძრავის განტოლებები გასაშუალოებულ ცვლადებში

მანქანის ინტეგრალური მახასიათებლების გასაანგარიშებლად მიზანშეწონილია ცვლადთა (დენის, ძაბვის, ნაკადთშემომის) გასაშუალოებული მნიშვნელობების გამოყენება სიდიდეთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდთან შეთავსებით (5.1) [10].

გამოვიყენოთ აღნიშნული მეთოდიკა ზემომოყვანილი ვენტილური ძრავისათვის არაკომუტაციურ რეჟიმში სტატორისა და როტორის წრედებისათვის ცვლადთა მყისი მნიშვნელობებისათვის გვაქვს შემდეგი წონასწორობის განტოლებები:

$$\begin{aligned} u_k^s &= r^c i_k^s + \frac{d\psi_k^s}{dt} \quad (k=1,2) \\ u_k^r &= r^n i_k^r + \frac{d\psi_k^r}{dt} \quad (k=1,2,3) \end{aligned} \quad (5.1)$$

სტატორისა და როტორის ფაზების ნაკადთშემომებისათვის გვაქვს:

$$\begin{aligned} \psi_k^s &= L_s^s i_k^s + \sum_{t=1}^2 M^{ss} i_t^s \cos(\alpha_t^s + \theta_s - \beta_k^s) + \\ &+ \sum_{t=1}^3 M^{sr} i_t^r \cos(\alpha_t^r + \theta_r - \beta_k^s), \quad (k=1,2) \\ \psi_k^r &= L_s^r i_k^r + \sum_{t=1}^3 M^{rr} i_t^r \cos(\alpha_t^r - \alpha_k^r) + \\ &+ \sum_{t=1}^2 M^{rs} i_t^s \cos(\alpha_t^s + \theta_s - \theta_r - \alpha_k^r), \quad (k=1,2,3) \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$\text{სადაც } \beta_k^s = \alpha_k^s + \theta_s = \alpha_k^s + (k-1)\frac{\pi}{3} = \alpha_k^s + (k-1)\omega_s \Delta_s$$

წარმოადგენს კუთხეს, რომელიც განსაზღვრავს სტატორის ექვივალენტური ფაზის მდებარეობას, რომლის მაგნიტური ღერძი ბრუნავს სივრცეში კომუტატორის გადართვის შედეგად.

ω_s - სტატორის გრაგნილის გადართვის კუთხური სიხშირეა;

$\Delta_s = \frac{\pi}{3\omega_s}$ - გადართვის შუალედი.

დრო t წარმოვადგინოთ შუალედების სახით, მივიღებთ

$$t = (k-1)\Delta_s + \tau, \quad -\frac{\Delta_s}{2} < \tau < \frac{\Delta_s}{2}, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

τ - შუალედის შიგნით დრო, რომელიც აითვლება თითოეული შუალედის დასაწყისიდან.

დროის თითოეული შუალედის შემდეგ სტატორის ექვივალენტური ფაზის მაგნიტური ღერძი ნახტომისებურად შემობრუნდება სივრცეში $\frac{\pi}{3}$ კუთხით. იგი დროის შუალედის განმავლობაში არ იცვლის თავის მდებარეობას. ვთვლით, რომ კომუტაცია ხდება მყისიერად.

ასეთი დაშვების გამო β_k^s დროის ერთი შუალედიდან მეორეზე გადასვლისას იცვლება ნახტომისებურად. მეორე მხრივ დენების, ძაბვებისა და ნაკადთშებმების მყისი მნიშვნელობები და როტორის მობრუნების θ_r კუთხე τ დროისაგან დამოკიდებულებით იცვლებიან უწყვეტად. გასაშუალების მეთოდის გამოყენებით Δ_s შუალედში დენის და ნაკადთშებმა ტოლია ამ სიდიდეთა საშუალო მნიშვნელობისა. მანქანის მომჭერებზე მოდებული მუდმივი ძაბვა გასაშუალოებას არ საჭიროებს. შუალედში სიდიდეთა გასაშუალოებული მნიშვნელობები იქნება [10,14]:

$$i_k^{sd} = \frac{1}{\Delta_s} \int_{-\frac{\Delta_s}{2}}^{+\frac{\Delta_s}{2}} \psi_k^s d\tau; \quad i_k^{rd} = \frac{1}{\Delta_s} \int_{-\frac{\Delta_s}{2}}^{+\frac{\Delta_s}{2}} i_k^{rd} d\tau;$$

$$\psi_k^{sd} = \frac{1}{\Delta_s} \int_{-\frac{\Delta_s}{2}}^{+\frac{\Delta_s}{2}} \psi_k^s d\tau; \quad \psi_k^{rd} = \frac{1}{\Delta_s} \int_{-\frac{\Delta_s}{2}}^{+\frac{\Delta_s}{2}} \psi_k^r d\tau;$$

მოვახდინოთ (4.1) და (4.2) განტოლებების თითოეული წევრის ინტეგრირება τ ცვლადით და შედეგები გავყოთ Δ_s -ზე, გასაშუალოებული სიდიდეებისათვის მივიღებთ (ინტეგრირებისას θ_s და θ_k^s მიჩნეულია მუდმივ სიდიდეებად):

$$u_k^{sd} = r^s i_k^{sd} + \left[\frac{d\psi_k^{sd}}{dt} \right]_{\beta_k^s} \quad (k=1,2) \quad (5.3)$$

$$u_k^{rd} = r^r i_k^{rd} + \frac{d\psi_k^{rd}}{dt} \quad (k=1,2,3)$$

$$\psi_k^{rd} = L_s^s i_k^{sd} + \sum_{t=1}^2 M^{ss} i_t^{sd} \cos(\alpha_t^s + \theta_s - \beta_k^s) +$$

$$+ \sum_{t=1}^3 K_1 M^{sr} i_t^{rd} \cos(\alpha_t^r + \theta_r - \beta_k^s), \quad (5.4)$$

$$\psi_k^{rd} = L_s^r i_k^{rd} + \sum_{t=1}^3 M^{rr} i_t^{rd} \cos(\alpha_t^r - \alpha_k^r) +$$

$$+ \sum_{t=1}^2 K_1 M^{rs} i_t^{sd} \cos(\alpha_t^s + \theta_s + \theta_r - \alpha_k^r),$$

სადაც
$$K_1 = \frac{\frac{1}{\Delta_s} \int_{-\frac{\Delta_s}{2}}^{+\frac{\Delta_s}{2}} \cos(\alpha_t^r + \theta_r - \beta_k^s) d\tau}{\cos(\alpha_t^r + \theta_r - \beta_k^s)} = \frac{\sin \omega_r \frac{\Delta_s}{2}}{\omega_r \frac{\Delta_s}{2}}$$

წარმოადგენს გასაშუალოების კოეფიციენტს.

მოვახდინოთ ნაკადთშებმების დიფერენცირება და შედეგებში ჩავსვათ $\beta_k^s = \alpha_k^s + \theta_s$.

შემდგომში გასაშუალოების α ინდექსი გამოტოვებულია და ცვლადებში ნაგულისხმებია მათი გასაშუალოებული მნიშვნელობა გადართვის შუალედში.

(5.3) და (5.4) განტოლებების მიმართ გამოვიყენოთ ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნა, მივიღებთ განტოლებებს ახალ კომპლექსური ცვლადებით. სტატორის კოორდინატთა სისტემაში.

$$\begin{aligned} \dot{U}^s - U_0^s &= r^s I^s + \frac{d\psi^s}{dt} + \gamma \omega_r \psi^{s1}, \\ \dot{U}^r &= r^r I^r - j(\omega_r - \omega_s) \psi^p, \\ \psi^s &= (L_s^s + \frac{3}{2} M^{ss}) I^s + K_1 M^{sr} I^r - \frac{1}{2} K_1 M^{sr} e^{j(\alpha_1^s + \alpha_2^s)} \\ \psi^{s'} &= \frac{1}{2} M^{ss} I^s + K_1 M^{sr} I^r + \frac{1}{2} K_1 M^{sr} e^{j(\alpha_1^s + \alpha_2^s)}, \\ \psi^r &= (L_s^r + \frac{3}{2} M^{rr}) I^r + \frac{3}{2} K_1 M^{rs} I^s \end{aligned} \quad (5.5)$$

სადაც

$$\begin{aligned} \dot{U}^s &= \frac{U^s}{2} (e^{j\alpha_1^s} - e^{j\alpha_2^s}), \quad I^s = i^s (e^{j\alpha_1^s} - e^{j\alpha_2^s}), \\ \dot{U}^r &= \sum_{k=1}^3 u_k^r e^{j(\alpha_k^r + \theta_r - \theta_s)} I^r = \sum_{k=1}^3 i_k^r e^{j(\alpha_k^r + \theta_r - \theta_s)}, \end{aligned}$$

$u_0^s = u_0^s (e^{j\alpha_1^s} + e^{j\alpha_2^s})$ - სტატორის გრაგნილის ნულოვანი წერტილის ძაბვის კომპლექსი.

განტოლებები ჩაწერილია სახელობით ერთეულებში და შეიცავს ნულოვანი წერტილის u_0^s ძაბვას. თუ (5.5) განტოლებათა სისტემის პირველ განტოლებას გამოვაკლებთ მის შეუღლებულ განტოლებას გამრავლებულს $e^{j(\alpha_1^s + \alpha_2^s)}$ -ზე, მაშინ u_0^s გამოირიცხება. ფარდობით ერთეულებში განტოლებები ოპერატორული სახით ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$\begin{bmatrix} u^s + u_0^s \\ u^r + u_0^r \\ u_0^r + u_0^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}^{ss} & Z_{11}^{sr} & Z_{12}^{sr} \\ Z_{11}^{rs} & Z_{11}^{rr} & 0 \\ Z_{11}^{rs} & 0 & Z_{11}^{rr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I^s \\ I^r \\ I^r \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

ოპერატორული წინაღობები ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$\begin{aligned} Z_{11}^{ss} &= (P + \rho_c) X_{11}^{ss} \\ Z_{12}^{sr} &= \frac{1}{2} k_1 X_{11}^{sr} [P + \gamma(\omega_r + \omega_s)] \\ Z_{12}^{rr} &= X_{11}^{rr} (P + \rho^p \gamma \omega_s) \\ Z_{11}^{rs} &= k_1 X_{11}^{rs} (P + j\omega_s) \\ Z_{12}^{rs} &= -k_1 X_{11}^{rs} (P - j\omega_s) e^{-j(\alpha_1^s + \alpha_2^s)} \end{aligned}$$

სადაც ინდუქციური წინაღობები ტოლია:

$$\begin{aligned} X_{12}^{ss} &= 2X_c^s + 3X_m^{ss} = 2X_c^3 + 3X_m \\ X_{11}^{sr} &= 2[1 - \cos(\alpha_1^s - \alpha_2^s)] X_m \\ X_{11}^{sr} &= \frac{3}{2} X_m \\ X_{11}^{rr} &= X_c^r + \frac{3}{2} X_m \\ X_m^{ss} &= X_m^{sr} = X_m^{rs} = X_m \end{aligned}$$

მილევის კოეფიციენტები ტოლია:

$$\rho^s = \frac{2r^s}{x_{11}^{ss}}; \quad \rho^r = \frac{r^r}{x_{11}^{rr}};$$

ძაბვისა და დენის კომპლექსები სტატორის კოორდინატთა სისტემაში ტოლია:

$$\begin{aligned} U^s &= U^s (e^{j\alpha_1^s} - e^{j\alpha_2^s}) = U_\alpha^s + jU_q^s \\ I^s &= i^s (e^{j\alpha_1^s} - e^{j\alpha_2^s}) = I_\alpha^s + jI_q^s; \end{aligned}$$

სადაც

$$U_{\alpha}^s = U^s (\cos \alpha_1^s - \cos \alpha_2^s);$$

$$I_{\alpha}^s = i^s (\cos \alpha_1^s - \cos \alpha_2^s);$$

$$I_q^s = u^s (\sin \alpha_1^s - \sin \alpha_2^s);$$

$$I_q^s = i^s (\sin \alpha_1^s - \sin \alpha_2^s);$$

(5.6) განტოლებებში საწყისი პირობებით განსაზღვრული კომპლექსები:

$$\dot{U}_0^s = P [X_{11}^{ss} I_0^s + \frac{1}{2} K_1 X_{11}^{sr} \dot{I}_0^r - \frac{1}{2} K_1 X_{11}^{sr} e^{j(\alpha_1^s + \alpha_2^s)}],$$

$$\dot{U}_0^{sr} = P (K_1 X_{11}^{rs} \dot{I}_0^s + X_{11}^{rr} \dot{I}_0^r),$$

$$U_0^{*r} = P [X_{11}^{rr} U_0^{*r} - K_1 X_{11}^{rs} e^{-j(\alpha_1^s + \alpha_2^s)} \dot{I}_0^s]$$

სადაც:

\dot{I}_0^s და \dot{I}_0^r - შესაბამისად სტატორისა და როტორის საწყისი დენების კომპლექსებია.

გასაშუალების კოეფიციენტისათვის გვაქვს გამოსახულება

$$K_1 = \frac{\sin \frac{\omega_r}{\omega_r + \omega_s} \cdot \frac{\pi}{m^s}}{\frac{\omega_r}{\omega_r + \omega_s} \cdot \frac{\pi}{m^s}}, \quad m^s = 6$$

შემდგომში ანალიზის გამარტივების მიზნით, ვუშვებთ, რომ

$$\alpha_d^s = \sqrt{3} u^s; \quad I_d^s = \sqrt{3} i^s;$$

$$U_q^s = 0; \quad I_q^s = 0;$$

5.2 ვენტილური ძრავას განტოლებები გარდამავალი რეჟიმებისათვის

ზემოთმოყვანილი განტოლებები შეიძლება წარმოდგენილი იქნას სკალარული სახით კომპიუტერზე გასაანგარიშებლად. კერძო შემთხვევისათვის, როდესაც $\dot{U}^r = 0$

განტოლებებს d, q კოორდინატებში კომპიუტერზე გაანგარიშებისათვის მოხერხებულ ფორმაში აქვს სახე:

$$\frac{dI_d^s}{dt} = \frac{1}{1-K_1^2 \mu} \left[\frac{U_d^s}{X_{11}^{ss}} \rho^s I_d^s + K_1 \mu^s \rho^r I_d^r - K_1 \mu^s (S-1) I_q^r \right],$$

$$\frac{dI_d^r}{dt} = \frac{1}{1-K_1^2 \mu} \left[\frac{K_1 \mu^r U_d^s}{X_{11}^{ss}} - K_1 \mu^r I_d^s + K_1 \mu^s \rho^s I_d^s + \rho^r I_d^r - [S_i (1 - K_1^2 \mu) + S - 1] I_q^r \right],$$

$$\frac{dI_d^r}{dt} = -K_1^2 \mu^r (S_i - 1 + S) I_d^s - \rho^r I_d^r - (S_i - 1 + S) I_q^r,$$

$$I \frac{dS}{dt} = M_B - M,$$

$$M = -X_m I_d^s I_q^r K_1,$$

$$\mu^s = \frac{K_1 X_{11}^{sr}}{X_{11}^{ss}}, \quad \mu^r = \frac{K_1 X_{11}^{pc}}{X_{11}^{rr}}, \quad \mu = \mu^s \mu^r$$

$$\frac{\omega_r}{\omega_1} = 1 - S, \quad \frac{s}{\omega_1} = S_i,$$

S – როტორის სრიალი; S_i – მართვის იმპულსის სიხშირეა ფარდობით ერთეულებში; ω_1 – სტატორის ველის ბრუნვის კუთხური სიხშირეა; M_B - გარე ძალების მომენტი.

5.3 ვენტილური ძრავას განტოლებები დამყარებული რეჟიმებისათვის

(5.6) განტოლებები საერთოა გარდამავალი და დამყარებული რეჟიმებისათვის. დამყარებული რეჟიმის გაანგარიშებისათვის განტოლებებში უნდა დავუშვათ $P=0$ ზოგიერთი გარდაქმნის შემდეგ შეიძლება ვიპოვოთ დენებისა და მომენტის მნიშვნელობები და ავაგოთ მანქანის მახასითებლები. ძრავას პარამეტრების გათვალისწინებით, ნახევარგამტარი კომუტატორის მართვის კანონების მხედველობაში მიღებით [10,12,14,15,17].

მაგალითის სახით განვიხილოთ ასინქრონული ძრავა სიმძლავრით 11,5 კვტ შემდეგი მონაცემებით: შეერთების სქემა Δ/λ , ძაბვა 220/380 ვ, სტატორის დენი

44/ 25,4, წყვილ პოლუსთა რიცხვი - 3, ექსპერიმენტულად განსაზღვრულ პარამეტრებს აქვს მნიშვნელობები (დაყვანილია სტატორზე): $r_1 = 0,406$ ომი, $r_2 = 0,526$ ომი; $x_1 = x_2 = 0,99$ ომი. ბაზისურად მივიღოთ სტატორის ძაბვისა და დენის მაქსიმალური ნომინალური სიდიდეები.

$$U_\delta = \sqrt{2}U_{\delta c} = 310 \text{ ვ}, \quad I_\delta = \sqrt{2}I_{\delta c} = \sqrt{2} \cdot 25,4 = 36 \text{ ა.}$$

ბაზისური წინაღობა $Z_\delta = \frac{U_\delta}{I_\delta} = \frac{310}{36} = 8,61$ ომი.

ბაზისურ დროდ მივიღოთ $t_\delta = \frac{1}{314}$ წმ.

სტატორის მხარეზე მიყვანილი წინაღობები ტოლია:

$$\frac{r_1}{Z_\delta} = \frac{0,406}{8,61} = 0,047,$$

$$r^r = \frac{r_2}{Z_\delta} = \frac{0,526}{8,61} = 0,061,$$

$$x_s^s = x_s^r = \frac{0,99}{8,61} = 0,011,$$

$$x_m = \frac{2}{3} \frac{x_\mu}{8,61} \cdot 3,33 = 5,717,$$

$$x_{11}^{ss} = 2x_s^s + 2x_m[1 - \cos(\alpha_1 - \alpha_2)] = 0,022 + 2 \cdot 5,77 \cdot (0,66) = 7,63,$$

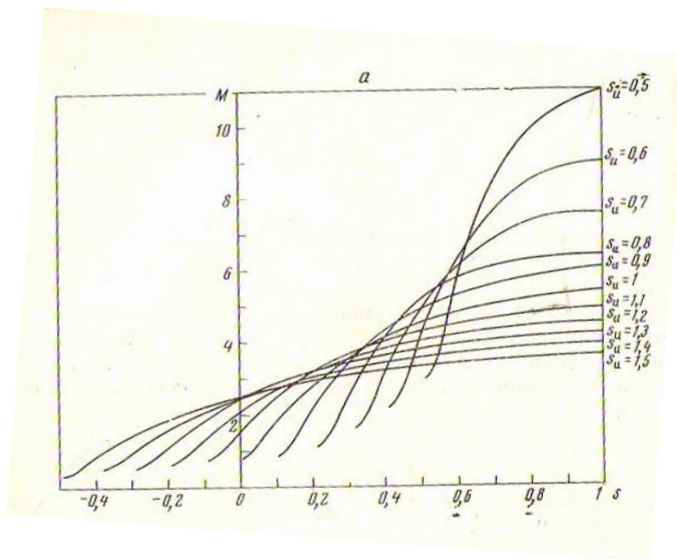
$$x_{11}^{sr} = 2x_m[1 - \cos(\alpha_1 - \alpha_2)] = 7,61,$$

$$x_{11}^{rs} = 0,66 \cdot 5,77 = 3,80,$$

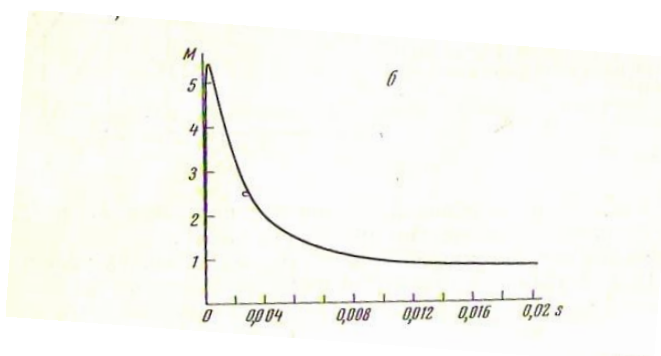
$$x_{11}^{rr} = x_s^r + \frac{3}{2}x_m = 0,011 + 8,65 = 8,66,$$

$$\rho^s = \frac{2r^s}{x_{11}^{ss}} = \frac{0,094}{7,63} = 0,012,$$

$$\rho^r = \frac{r^r}{x_{11}^{rr}} = \frac{0,061}{8,66} = 0,007.$$

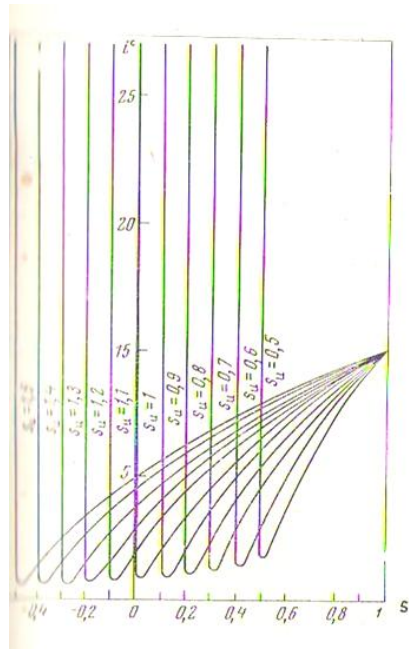


ნახ.25 ძრავას მექანიკური მახასიათებლები იმპულსისკუთხური სიხშირის რეგულირებისას



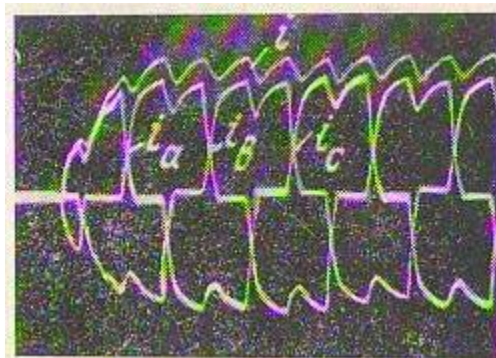
ნახ. 26 ვენტილური ძრავას მომენტსა და სრიალს შორის დამოკიდებულება

ნახ. 25-ზე წარმოდგენილია ძრავას მექანიკური მახასიათებლები, მართვის იმპულსისკუთხური სიხშირის რეგულირებისას უცვლელი კვების ძაბვის შემთხვევაში, ხოლო ნახ. 26 -ზე ძრავას დენის დამოკიდებულება სრიალისგან. აღნიშნული დამოკიდებულებები აგებულია ზემოთმოყვანილი გამოსახულებებით.



ნახ. 27 ძრავას დენსა და სრიალს შორის დამოკიდებულება

ნახ. 28 -ზე ნაჩვენებია გარდამავალ რეჟიმში დენების ოსცილოგრამა ამუშავების მომენტში.



ნახ. 28 დენების ოსცილოგრამა

5.4 ვენტილური ძრავას მათემატიკური მოდელი. დინამიკური მახასიათებლების გაანგარიშება პროგრამა Matlab -ის საშუალებით

$$\begin{bmatrix} U^s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11}^{ss} & z_{11}^{sr} & z_{12}^{sr} \\ z_{11}^{rs} & z_{11}^{rr} & 0 \\ z^{rs} & 0 & z_{11}^{rr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I^s \\ I^r \\ I^r \end{bmatrix} \begin{cases} I^s = I_d^s + jI_q^s \\ I^r = I_d^r + jI_q^r \\ U^s = U_d^s + jU_q^s \\ U^r = U_d^r + jU_q^r \end{cases}$$

$$U^r = U_d^r + jU = 0$$

$$z_{11}^{ss} = (\rho^s + p)x_{11}^{ss}, \quad z_{11}^{sr} = \frac{1}{2}k_1 x_{11}^{sr} (p + js_i)$$

$$z_{11}^{rs} = p + j[s_i - (1-s)]k_1 x_{11}^{rs}, \quad z_{12}^{sr} = \frac{1}{2}k_1 x_{11}^{sr} (p - js_i)$$

$$z_{11}^{rr} = \{\rho^p + p + j[s_i - (1-s)]\}k_1 x_{11}^{rr}$$

$$z^{rs} = \{p - j[s_i - (1-s)]\}k_1 x_{11}^{rs}$$

$$x_{11}^{ss} = 2x_s^s + 3x_m, \quad x_{11}^{sr} = 3x_m, \quad x_{11}^{rs} = \frac{2}{3}x_m$$

$$x_{11}^{rr} = x_s^r + \frac{3}{2}x_m, \quad \rho^s = \frac{2r^s}{x_{11}^{ss}}, \quad \rho^r = \frac{r^r}{x_{11}^{rr}}$$

$$k_1 = \frac{\sin \frac{1-s}{s_i} \frac{\pi}{6}}{\frac{1-s}{s_i} \frac{\pi}{6}} \begin{cases} U_s^\alpha = \sqrt{3} * U^s, & U_q^s = 0 \\ I_S^d = \sqrt{3} * i^s, & I_q^s = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} j = \sqrt{-1} \\ p = \frac{d}{dt} \end{cases}$$

$$\frac{\omega_r}{\omega_1} = 1 - S \frac{\omega_r}{\omega_1} = S_i \omega_1 = 3.14 \text{ რად/წმ}$$

$$\frac{dI_d^s}{dt} = \frac{1}{1-k_1^2\mu} \left[\frac{U_d^s}{x_{11}^{ss}} - \rho^s I_d^s + k_1 \mu^s (s-1) I_q^r \right]$$

$$\frac{dI_d^r}{dt} = -\frac{1}{1-k_1^2\mu} \left[\frac{k_1 \mu^r U_d^s}{x_{11}^{ss}} - k_1 \mu^r \rho^s I_d^s + \rho^r I_d^r - [s_i(1-k_1^2\mu) + s-1] I_q^r \right]$$

$$\frac{dI_q^r}{dt} = -k_1 \mu^r (s_i - 1 + s) I_d^s - \rho^r I_q^r - (s_i - 1 + s) I_d^s$$

$$J \frac{ds}{dt} = M_1 - M, \quad M = -x_m I_d^s I_q^r k_1, \quad \mu^s = \frac{x_{11}^{sp} k_1}{x_{11}^{ss}}, \quad \mu^r = \frac{x_{11}^{rs} k_1}{x_{11}^{rr}}$$

$$x_{11}^{sr} = 3x_m, \quad x_{11}^{ss} = 2x_s^s + 3x_m, \quad x_{11}^{rr} = x_s^r + 1,5x_m, \quad x_{11}^{rs} = 1,5x_m,$$

$$\mu = \mu^s \mu^r, \quad \sigma = 1 - \mu, \quad \rho^s = \frac{2r^c}{x_{11}^{ss}}, \quad \rho^r = \frac{r^{rc}}{x_{11}^{rr}},$$

$$k_1 = \frac{\sin \frac{1-s}{s_i} \frac{\pi}{6}}{\frac{1-s}{s_i} \frac{\pi}{6}} \quad \omega_r / \omega_1 = 1-s, \quad \omega_i / \omega_1 = s_i, \quad \omega_1 = 314 \text{ რად/წმ}$$

$$\mu^s = 0,974, \quad \mu^r = 0,968, \quad x_{11}^{ss} = 12,72, \quad x_m = 4,13, \quad x_{11}^{rs} = 6,2, \quad \mu = 0,94$$

$$x_{11}^{rr} = 6,4, \quad \rho^s = 0,0083, \quad \rho^r = 0,0076$$

ახლა შევადგინოთ საბოლოოდ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_d^s}{dt} = 16,66[0,076U_d^s - 0,0083I_d^s + 0,074I_q^r] \\ \frac{dI_d^r}{dt} = -16,66[0,073U_d^s - 0,968I_d^s + 0,0076I_q^r - 0,003I_q^r] \\ \frac{dI_q^r}{dt} = -0,484I_d^s - 0,0076I_q^r - 0,5I_d^r \end{array} \right.$$

ამის შემდეგ ვხსნით შემდეგ დიფერენციალურ განტოლებას:

$$\frac{ds}{dt} = 0,01(1 + 4,13I_d^s I_q^r) = 0,01 + 0,0413I_d^s I_q^r$$

შემდეგ ვითვლით

$$M = -4,13I_d^s I_q^r; \quad \omega_r = 1 - s,$$

დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემისთვის საწყის პირობებია

$$t = 0, I_d^s = I_d^r = I_q^r = 0, s = 1 \text{ განტოლებათა სისტემა ამოვხსნათ } U_d^s$$

პარამეტრის შემდეგი ხუთი მნიშვნელობისთვის $U_d^s = 0,5; 1; 1,5; 1,73; 2$.

დიფერენციალური განტოლებათა სისტემიდან ვეძებთ I_d^s, I_d^r, I_q^r , სიდიდეებს.

სიმარტივისათვის საძიებელი ცვლადებისათვის შემოვიღოთ შემდეგი აღნიშვნები

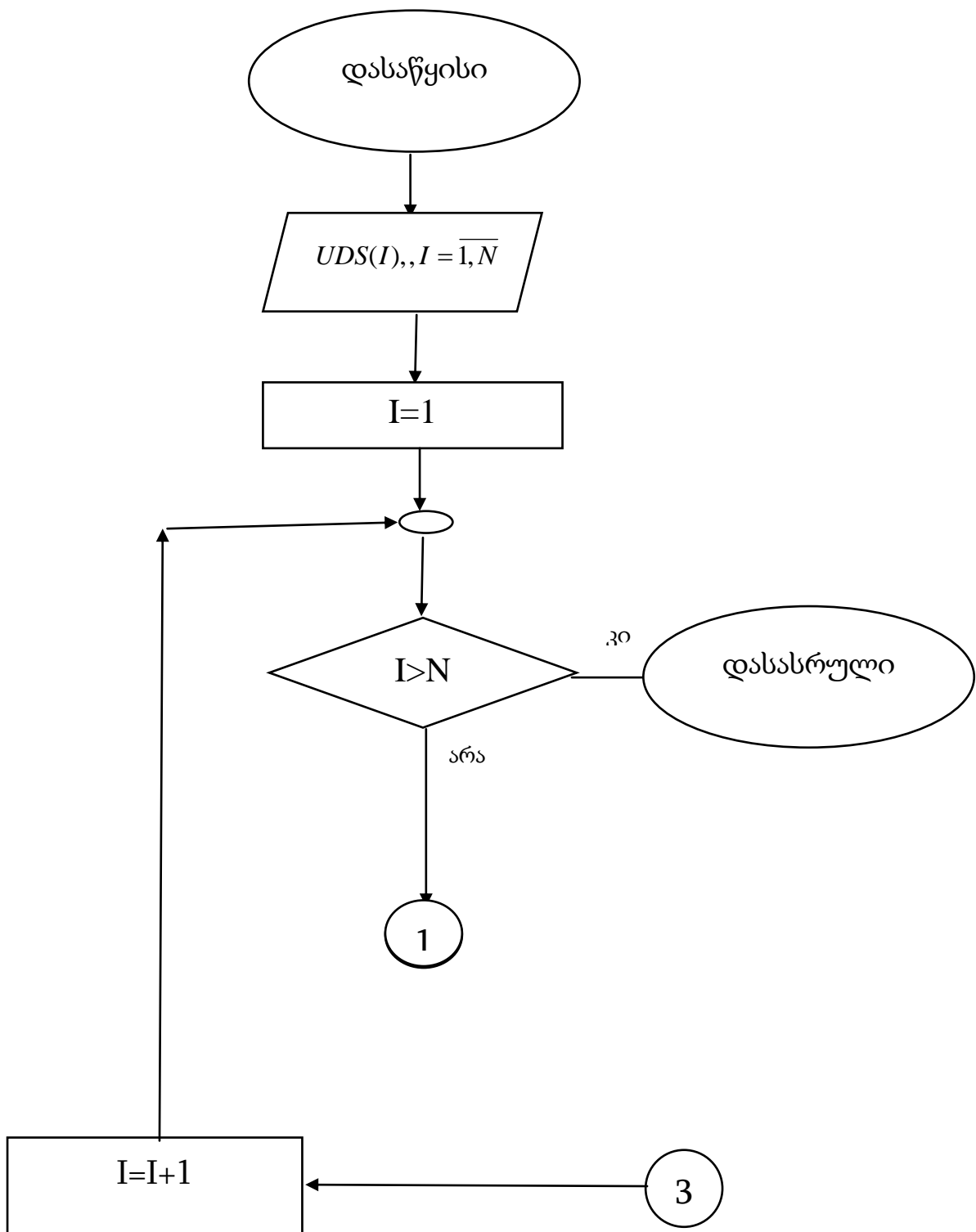
$$I_d^s \equiv x(t), I_d^r \equiv y(t), I_q^r \equiv z(t),$$

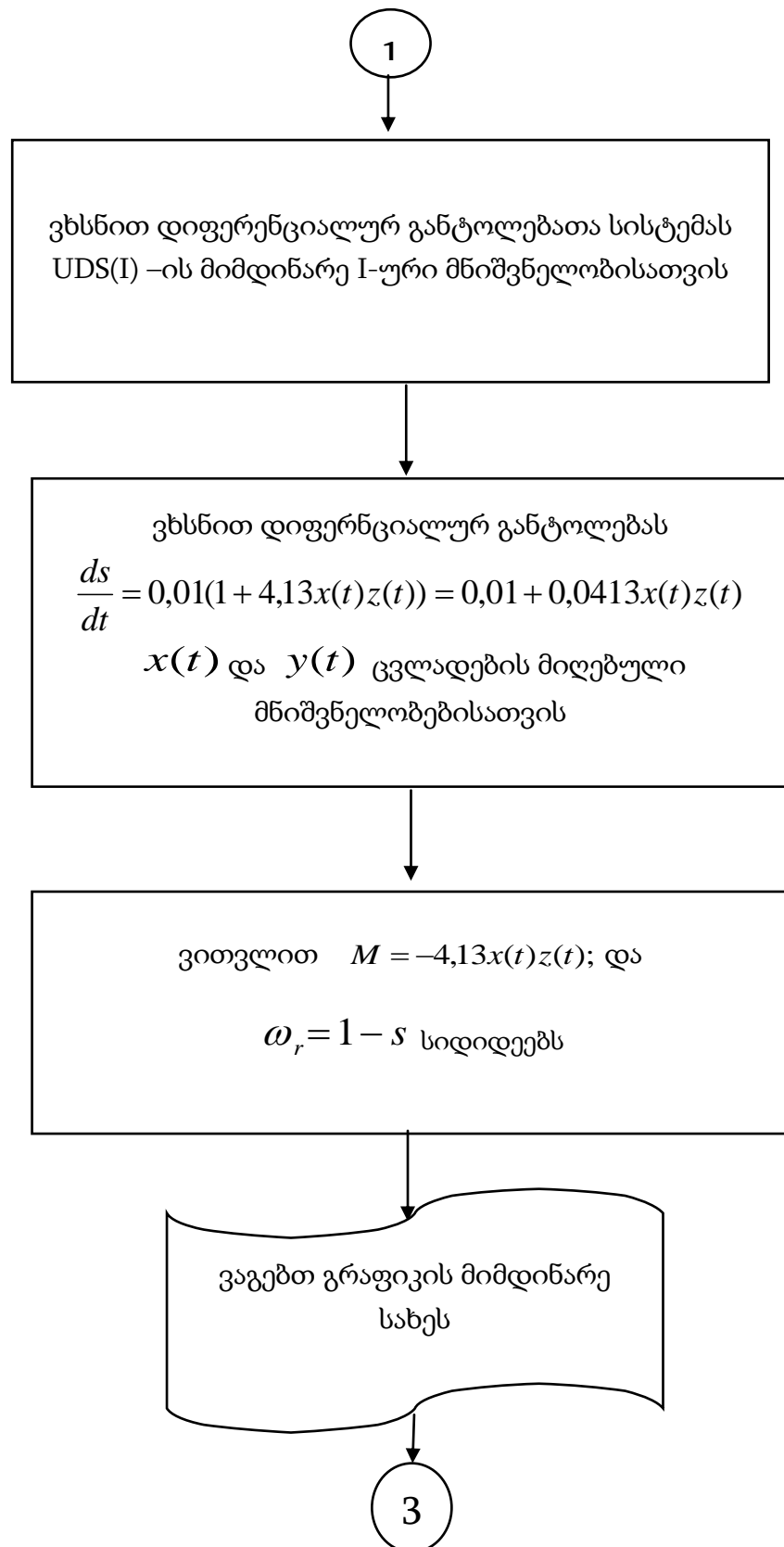
მაშინ ჩვენი დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა მიიღებს სახეს:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx(t)}{dt} = 16,66[0,076U_d^s - 0,0083x(t) + 0,074y(t)] \\ \frac{dy(t)}{dt} = -16,66[0,073U_d^s - 0,968x(t) + 0,0076y(t) - 0,003z(t)] \\ \frac{dz(t)}{dt} = -0,484x(t) - 0,0076z(t) - 0,5y(t) \end{array} \right.$$

$$\frac{ds}{dt} = 0,01(1 + 4,13x(t)z(t)) = 0,01 + 0,0413x(t)z(t)$$

ახლა ავაგოთ ამ ამოცანის ამოხსნის ალგორითმი და ბლოკსქემა:





ნახ. 29 ამოცანის ამოხსნის ალგორითმის ბლოკსქემა

პროგრამა და გრაფიკული შედეგები

```
>restart;cond:=x(0)=0,y(0)=0,z(0)=0:
```

```
>uds:=0.5;
```

uds := 0.5

```
>sys:=diff(x(t),t)=16.66*(0.076*uds-0.0083*x(t)-
0.074*y(t)),diff(y(t),t)=-16.66*(0.073*uds+0.968*x(t)-
0.0076*y(t)-0.003*z(t)),diff(z(t),t)=-0.484*x(t)-
0.0076*z(t)+0.5*y(t):
```

```
>F:=dsolve({sys,cond},[x(t),y(t),z(t)],numeric):
```

```
>with(plots):
```

```
>p1:=odeplot(F,[t,x(t)],-
0.5..0.5,color=blue,thickness=2,linestyle=5):
```

```
>p2:=odeplot(F,[t,y(t)],-
0.5..0.5,color=green,thickness=2):
```

```
>p3:=odeplot(F,[t,z(t)],-0.5..0.5,color=red,thickness=2):
```

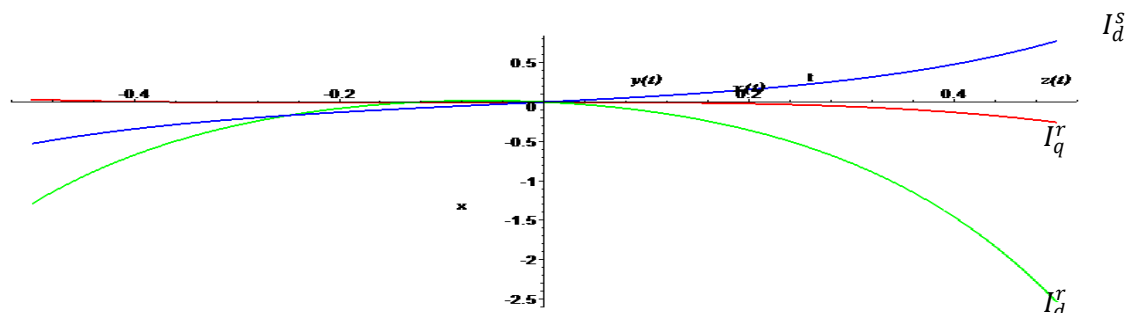
```
>p3:=odeplot(F,[t,z(t)],-0.5..0.5,color=red,thickness=2):
```

```
>p4:=textplot([0.2,0.2,"x(t)",font=[TIMES,ITALIC,12]):
```

```
>p5:=textplot([0.1,0.3,"y(t)",font=[TIMES,ITALIC,12]):
```

```
>p6:=textplot([0.5,0.3,"z(t)",font=[TIMES,ITALIC,12]):
```

```
>display(p1,p2,p3,p4,p5,p6):
```



```
>restart;cond:=x(0)=0,y(0)=0,z(0)=0:
```

```
>uds:=1;
```

uds := 1

```
>sys:=diff(x(t),t)=16.66*(0.076*uds-0.0083*x(t)-
0.074*y(t)),diff(y(t),t)=-16.66*(0.073*uds+0.968*x(t)-
0.0076*y(t)-0.003*z(t)),diff(z(t),t)=-0.484*x(t)-
0.0076*z(t)+0.5*y(t):
```

```
>F:=dsolve({sys,cond},[x(t),y(t),z(t)],numeric):
```

```
>with(plots):
```

```
>p1:=odeplot(F,[t,x(t)],0..1.5,color=blue,thickness=2,lin
estyle=5):
```

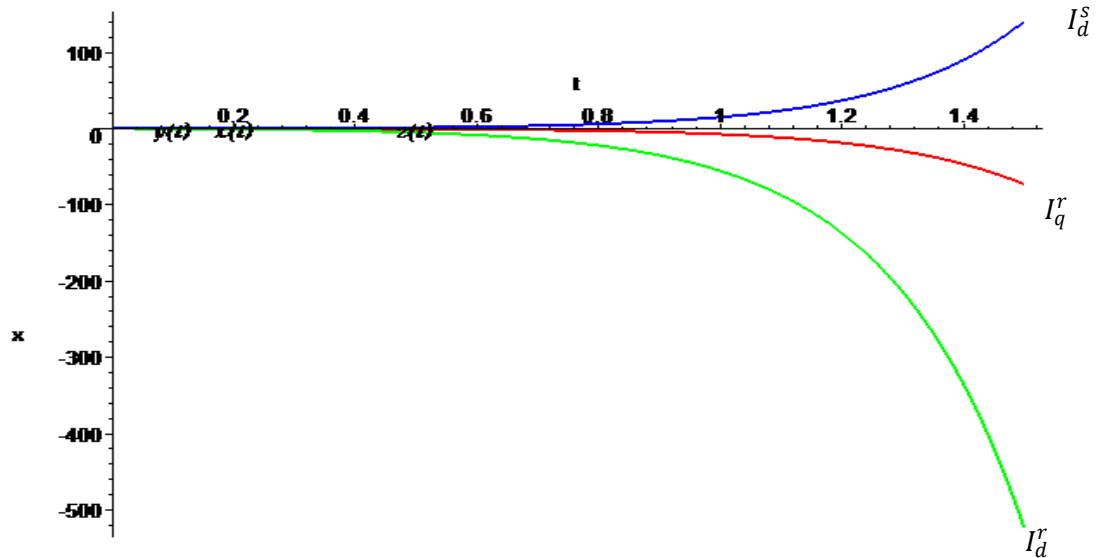
```
>p2:=odeplot(F,[t,y(t)],0..1.5,color=green,thickness=2):
```

```
>p3:=odeplot(F,[t,z(t)],0..1.5,color=red,thickness=2):
```

```

>p3:=odeplot(F, [t, z(t)], 0..1.5, color=red, thickness=2) :
>p4:=textplot([0.2, 0.2, "x(t)", font=[TIMES, ITALIC, 12]) :
>p5:=textplot([0.1, 0.3, "y(t)", font=[TIMES, ITALIC, 12]) :
>p6:=textplot([0.5, 0.3, "z(t)", font=[TIMES, ITALIC, 12]) :
>display(p1, p2, p3, p4, p5, p6) ;

```



```

>restart; cond:=x(0)=0, y(0)=0, z(0)=0 :
>uds:=1.5 ;

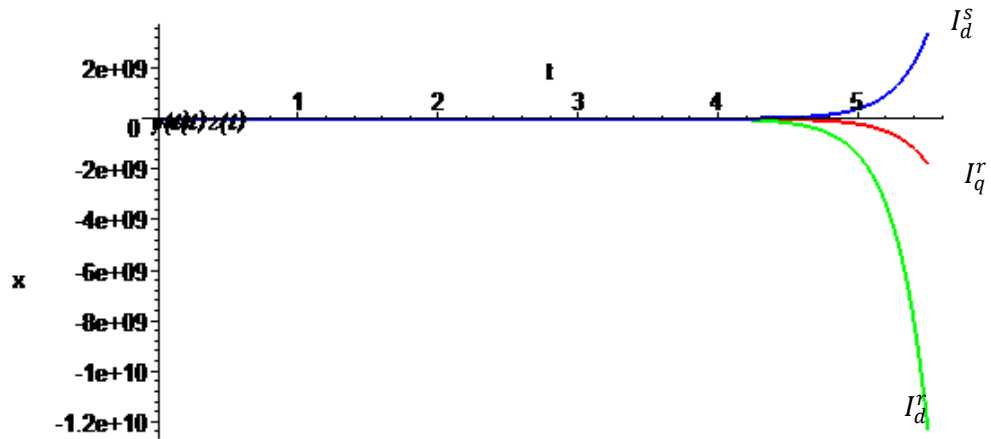
```

uds := 1.5

```

>sys:=diff(x(t), t)=16.66*(0.076*uds-0.0083*x(t) -
0.074*y(t)), diff(y(t), t)=16.66*(0.073*uds-0.968*x(t) -
0.0076*y(t)-0.003*z(t)), diff(z(t), t)=-0.484*x(t) -
0.0076*z(t)+0.5*y(t) :
>F:=dsolve({sys, cond}, [x(t), y(t), z(t)], numeric) :
>with(plots) :
>p1:=odeplot(F, [t, x(t)], 0..5.5, color=blue, thickness=2, lin
estyle=5) :
>p2:=odeplot(F, [t, y(t)], 0..5.5, color=green, thickness=2) :
>p3:=odeplot(F, [t, z(t)], 0..5.5, color=red, thickness=2) :
>p3:=odeplot(F, [t, z(t)], 0..5.5, color=red, thickness=2) :
>p4:=textplot([0.2, 0.2, "x(t)", font=[TIMES, ITALIC, 12]) :
>p5:=textplot([0.1, 0.3, "y(t)", font=[TIMES, ITALIC, 12]) :
>p6:=textplot([0.5, 0.3, "z(t)", font=[TIMES, ITALIC, 12]) :
>display(p1, p2, p3, p4, p5, p6) ;

```

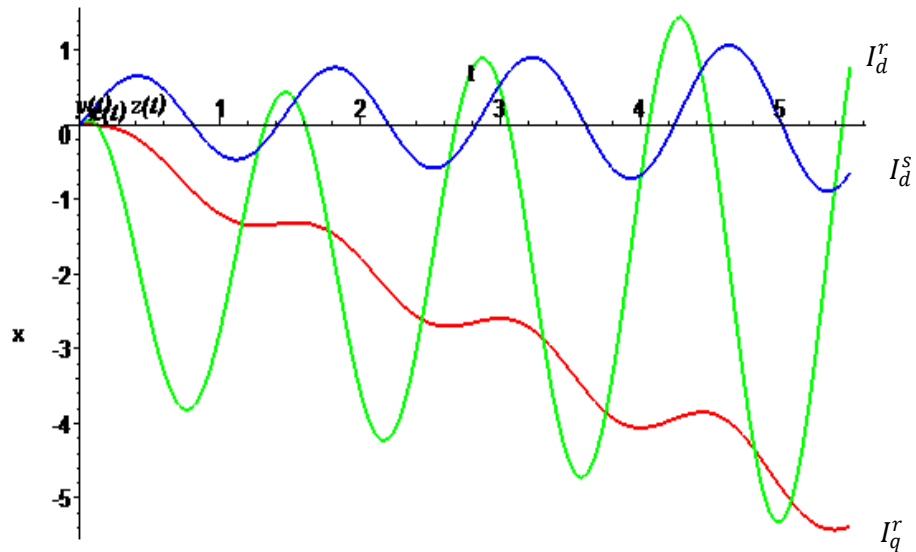



```

>restart;cond:=x(0)=0,y(0)=0,z(0)=0:
>uds:=1.73;
                                uds := 1.73

>sys:=diff(x(t),t)=16.66*(0.076*uds+0.0083*x(t)+0.074*y(t)
)>diff(y(t),t)=16.66*(0.073*uds-0.968*x(t)+0.0076*y(t)-
0.003*z(t)),diff(z(t),t)=-0.484*x(t)-
0.0076*z(t)+0.5*y(t):
>F:=dsolve({sys,cond},[x(t),y(t),z(t)],numeric):
>with(plots):
>p1:=odeplot(F,[t,x(t)],0..5.5,color=blue,thickness=2,lin
estyle=5):
>p2:=odeplot(F,[t,y(t)],0..5.5,color=green,thickness=2):
>p3:=odeplot(F,[t,z(t)],0..5.5,color=red,thickness=2):
>p3:=odeplot(F,[t,z(t)],0..5.5,color=red,thickness=2):
>p4:=textplot([0.2,0.2,"x(t)"],font=[TIMES,ITALIC,12]):
>p5:=textplot([0.1,0.3,"y(t)"],font=[TIMES,ITALIC,12]):
>p6:=textplot([0.5,0.3,"z(t)"],font=[TIMES,ITALIC,12]):
>display(p1,p2,p3,p4,p5,p6);

```

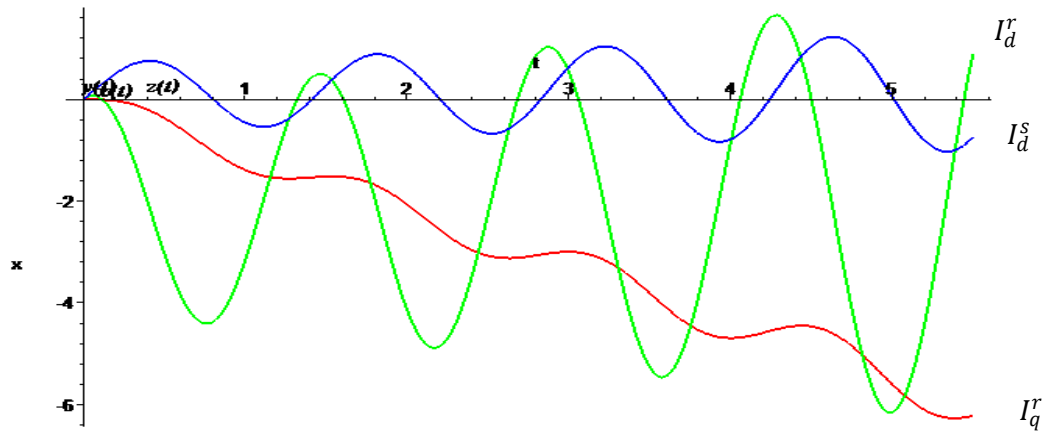


```

>restart;cond:=x(0)=0,y(0)=0,z(0)=0:
>uds:=2;
                                uds := 2

>sys:=diff(x(t),t)=16.66*(0.076*uds+0.0083*x(t)+0.074*y(
t)),diff(y(t),t)=16.66*(0.073*uds-0.968*x(t)+0.0076*y(t)-
0.003*z(t)),diff(z(t),t)=-0.484*x(t)-
0.0076*z(t)+0.5*y(t):
>F:=dsolve({sys,cond},[x(t),y(t),z(t)],numeric):
>with(plots):
>p1:=odeplot(F,[t,x(t)],0..5.5,color=blue,thickness=2,li
nestyle=5):
>p2:=odeplot(F,[t,y(t)],0..5.5,color=green,thickness=2):
>p3:=odeplot(F,[t,z(t)],0..5.5,color=red,thickness=2):
>p3:=odeplot(F,[t,z(t)],0..5.5,color=red,thickness=2):
>p4:=textplot([0.2,0.2,"x(t)",font=[TIMES,ITALIC,12]):
>p5:=textplot([0.1,0.3,"y(t)",font=[TIMES,ITALIC,12]):
>p6:=textplot([0.5,0.3,"z(t)",font=[TIMES,ITALIC,12]):
>display(p1,p2,p3,p4,p5,p6);

```



შედეგები და მათი განსჯა

ჩატარებულმა კვლევებმა საშუალება მოგვცა:

- დაგვედგინა, რომ გარდამავალი და დამყარებული რეჟიმების გაანგარიშება, მიზანშეწონილია ჩატარდეს გადართვის ინტერვალებში არასიმეტრიული გარდამავალი პროცესების განხილვის საფუძველზე.

- დაგვედგინა, ძრავაში მიმდინარე მიკროპროცესების გაანგარიშებისათვის საჭიროა, სიდიდეთა მყისი მნიშვნელობების მიხედვით ანალიზის ჩატარება კოორდინატთა გარდაქმნის მეთოდის გამოყენებით.

- შეგვექმნა მეთოდიკა, ცვლადთა გასაშუალოებული სიდიდეების მიხედვით მანქანის მუშა მახასიათებლების გასაანგარიშებლად.

- შეგვექმნა ვენტილური ძრავას მათემატიკური მოდელი, რომელიც დიდი სიზუსტით ასახავს არამარტო დამყარებულ, არამედ გარდამავალ პროცესსაც კომპიუტერზე გასაანგარიშებლად.

დასკვნები

- განხილულ ვენტილურ ძრავას გააჩნია ბრუნვის სიხშირის რეგულირების შესაძლებლობა მკვებავი ძაბვის სიდიდის ცვლილებით, აგზნების დენის რეგულირებით და კომუტატორის რეგულირების კუთხის ცვლილებით.

- მიღებული კომპიუტერული მოდელი საკმარისი სიზუსტით აღწერს ელექტრომაგნიტურ და ელექტრომექანიკურ გარდამავალ პროცესებს, რომლებიც მიმდინარეობენ მუდმივი დენის ვენტილურ ძრავებში და შეიძლება გამოყენებულ იქნას მანქანის დინამიკის ანალიზისა და მართვის კანონების სინთეზისათვის.

- ნახევრადგამტარული კომუტატორებით აღჭურვილ ელექტრულ მანქანებში მიზანშეწონილია არასტაციონალური რეჟიმების ზუსტი ანალიზი ჩატარდეს ცვლადთა მყისი მნიშვნელობებისათვის კოორდინატთა გარდაქმნის მეთოდის გამოყენებით. გარდაქმნის პირდაპირი და შებრუნებული-მატრიცების გამოყენება საშუალებას გვაძლევს გავიანგარიშოთ ნებისმიერი არასიმეტრიული გარდამავალი რეჟიმი კომუტატორიან მანქანებში.

- მიღებული შედეგები საშუალებას გვაძლევს გავიანგარიშოთ პროცესები მყისი კომუტაციის დროს, კომუტაციური რეჟიმი და შევარჩიოთ საკომუტაციო ელემენტების პარამეტრები.

- გამოყვანილი კომპლექსური განტოლებები შეიცავენ მანქანის ექვივალენტურ პარამეტრებს კომუტატორით გადართვების მხედველობაში მიღებით, რაც ზრდის გაანგარიშების სიზუსტეს. განტოლებების სკალარულ სახეში ჩაწერა მოხერხებულია პროცესების კომპიუტერის გამოყენებით გაანგარიშებისათვის.

- კვლევების შედეგად დადგინდა, რომ მუშა და გარდამავალი რეჟიმების გაანგარიშება მიზანშეწონილია ჩატარდეს არასიმეტრიული

გარდამავალი პროცესების განხილვის საფუძველზე დროის ცალკეულ შუალედებში, რაც მნიშვნელოვნად ზრდის გაანგარიშებათა სიზუსტეს.

- ექსპერიმენტული მასალების ანალიზმა აჩვენა მათი კარგი დამთხვევა ანგარიშის შედეგებთან და მიღებული დაშვებების დასაბუთება.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Завалишин Д.А. Ионный преобразователь частоты для регулирования скорости асинхронных двигателей . «Электричество», 1939, №4, с. 10-14.
2. Завалишин Д.А., Схема плавного преобразования частоты переменного тока. Авт. свидет. №48776, 1936.
3. Закладной А.Н., Закладной О.А. Энергоэффективный электропривод с вентильными двигателями. Киев. «Либра», 2012, с. 187.
4. Завалишин Д.А., О. Г. Вегнер. Теория и основы расчета вентильного двигателя, коммутируемого с помощью тиристорных. Ленинград. индустр. инстит. 1936, №5. с. 245.
5. Аракелян А.К. Вентильный электропривод с синхронным двигателем и зависимым инвертором. М.: «Энергия» , 1977, с. 224.
6. Тихменев Б.Н. Новые схемы вентильного двигателя. «Электричество», 1935, №12, с. 39-46.
7. Тихменева Б.Н. Вентильные двигатели и их применение на электроподвижном составе. М.: «Транспорт», 1976, с. 280.
8. Невелев Л.И. Ряд комплектных тиристорных электроприводов переменного тока серии ПЧВН на базе вентильного двигателя . «Электротехническая промышленность», Сер. Электропривод, 1982, вып. 1(99), с. 15-16.
9. Родкин Д.И. Особенности режима пуска вентильного двигателя со звеном постоянного тока. Л.: ВНИИИЭлектромаш, 1980, с 116-125.
10. Лутидзе Ш. И., Кохреидзе Т. К., Кохреидзе Д. К., Кутателадзе Э. Ш. Бесконтактные электрические двигатели постоянного тока. «Сабчота Сакартвело», 1986, с. 203.
11. Гетя А.Н., Финкельштейн В.Б. Расчет характеристик вентильных электродвигателей с учетом переходных процессов. Электротехника и электромеханика. 2005, №2, с.15-18.
12. Кохреидзе Д.К.. Математическая модель вентильного электродвигателя с возбуждением трёхфазным переменным током со стороны ротора. Приборы и системы №7, 2014, Из-во «Научтехлитиздат», г. Москва, с. 5.

13. დ. კობრეიძე. სამფაზა ასინქრონული ძრავა ნახევარგამტარული მართვით. თბილისი, სტუ, 2015, 57 გვ. , 621.313.335/5 , CD 2262.
14. დ. კობრეიძე. ელექტრული მანქანების მუშაობა მკვებავი ქსელის არასტაციონალურ რეჟიმებში. თბილისი, სტუ, 2013, 87 გვ., 621.313 12, CD 1359.
15. Кохреидзе Д.К., Математическая модель переходных процессов двигателя постоянного тока с трёхфазным возбуждением ротора. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2015, №7, Из-воо ООО «Научтехлитиздат», г. Москва, с.10-14.
16. დ. კობრეიძე, ზოგადი ელექტრომექანიკა, თბილისი, სტუ, 2014, 81 გვ. 621.313(02) 70, CD 1797.
17. დ. კობრეიძე, სინქრონული გენერატორები, თბილისი, სტუ, 2012, 87 გვ. 621.373.42 8, CD 820.
18. ა. ზამკოვი, კ.წერეთელი, თ. ნათენაძე ელექტრული მანქანები მე-3 ნაწილი . საქართველოს ტექ. უნივ., თბილისი, 2013.
19. ე. გერსამია. ელექტრული მანქანების წარმოების ტექნოლოგია. თბილისი, 2014, 108-118 გვ.
20. MatLab. Language of Technical Computing. Version 6. The Math-Works. 2002.