

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

გრიგოლ ფრანგიშვილი

წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების ნახევარგამტარულ
გარდამქმნელ სისტემებში პროცესების მოდელირება

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა: ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია
შიფრი: 0405

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

თებერვალი, 2018 წელი

საავტორო უფლება, © 2018 წელი, გრიგოლ ფრანგიშვილი

თბილისი

2018 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავცანით გრიგოლ ფრანგიშვილის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „წვეის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების ნახევარგამტარულ გარდამქმნელ სისტემებში პროცესების მოდელირება“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თებერვალი, 2018 წელი

ხელმძღვანელი: ----- პროფესორი გ. კოხრეიძე

რეცენზენტი: -----

რეცენზენტი: -----

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2017 წელი

ავტორი: ფრანგიშვილი გრიგოლ

დასახელება: წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების
ნახევარგამტარულ გარდამქმნელ სისტემებში
პროცესების მოდელირება

ფაკულტეტი: ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

ხარისხი: აკადემიური დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: თებერვალი, 2018 წ.

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

(ავტორის ხელმოწერა)

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

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

რ ე ზ ი უ მ ე

სადოქტორო დისერტაციის ნაშრომში წარმოდგენილია თემის აქტუალობა; სამუშაოს მიზანი და კვლევის ამოცანები; კვლევის მეთოდები; ნაშრომის ძირითადი შედეგები და მეცნიერული სიახლე; შედეგების გამოყენების სფერო, პუბლიკაციები, სამუშაოს აპრობაცია და დისერტაციის სტრუქტურა. გაშუქებულია დისერტაციის შინაარსი, ნაჩვენებია შესავალში განხილული საკითხები.

პირველ თავში დამუშავებულია საკითხები: წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების მართვად გამმართველ აგრეგატებში პროცესების მოდელირება; წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების მართვად გამმართველ გარდამქმნელ სისტემებში არასიმეტრიული გარდამავალი და სტაციონალური პროცესების მიმდინარეობის ხასიათი; წევის სამფაზა მართვად გამმართველ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების გაანგარიშების მათემატიკური მოდელირება; წევის სამფაზა მართვად გამმართველ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების კომპიუტერული მოდელირება; წევის სამფაზა მართვად გამმართველებში კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის პირობების დადგენა; წევის სამფაზა მართვად გამმართველებში გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემების აგება; წევის სამფაზა გამმართველებში მკვებავი დენის მრუდში მაღალი ჰარმონიკები; სიმძლავრის კოეფიციენტი.

იმ შემთხვევაში, თუ წევის ქვესადგურში გარდამქმნელ სისტემას განვიხილავთ, როგორც ნახევარგამტარულ აგრეგატებს, ასევე საკონტაქტო ქსელისა, ლიანდაგებისა და ელმავლის წევის ძრავის ერთიან სისტემას იმპულსური მოდულაციით, მაშინ ელექტრული მანქანების (მზრუნავი ნაწილის) არსებობის გამო სისტემა ხასიათდება დროში ცვალებადი პარამეტრებით. ამიტომ ფაზური ცვლადების მიმართ დაწერილი განტოლებები, როგორც ცნობილია, დაიყვანება ამოსახსნელად მეტად რთულ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემაზე. ამ გარემოებამ გამოიწვია მყისა ფაზური ცვლადების გამოყენებაზე უარის თქმა და განტოლებების გასამარტივებლად ახალი კომპლექსური რეზულტირებული საგრაგნილო ცვლადების (დენები, ძაბვები და ნაკადუმბები) შემოყვანა. ეს ცვლადები ჩაიწერება სხვადასხვა კოორდინატთა სისტემაში, ჩვენს შემთხვევაში $d, q, 0$ სისტემაში. ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის გამოყენება იწვევს ისეთ მუდმივ კოეფიციენტებიან მარტივ დიფერენციალურ განტოლებების მიღებას, რომელთა ამოხსნა შესაძლებელია ანალიზურად. ვენტილურ ელექტრულ წრედებში გამოყენებულია ცვლადების სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნის მეთოდი.

ჩატარებული სამუშაოების შედეგებიდან გამომდინარე ამ ორი მეთოდის შერწყმის საფუძველზე მიღებულია გარდამქმნელი სისტემის სტაციონალური და გარდამავალი პროცესების გაანგარიშებისა და

ანალიზის ახალი მოდერნიზებული მეთოდი, რომელშიც გამოიყენება ცვლადთა კომპლექსური და სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნა. ეს მეთოდი საშუალებას იძლევა ერთდროულად გათვალისწინებული იქნას ტრანსფორმატორის ძირითადი პარამეტრები და ნახევარგამტარულ გარდამქმნელებში კომუტაციური და არასაკომუტაციო განზოგადებული ინტერვალები კომუტაციური ფუნქციების მწკრივებად დაშლის გათვალისწინებით.

ჩატარებულია სამფაზა მართვად გამმართველ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების გაანგარიშების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება.

დადგენილია მართვად გამმართველებში კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის პირობები, გამომდინარე საძიებელი დენების წარმოებულების მიმართ შედგენილი მატრიცული განტოლებათა სისტემის ამოხსნისათვის შესაბამისი დეტერმინანტის ნულისაგან განსხვავებულობის დაცვით.

აგებულია წევის სამფაზა მართვად გამმართველებში გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები. გათვალისწინებულია მათემატიკური ოპერაციების სტრუქტურული მოდელის ელემენტები და მათი თვისებები.

მიღებულია რეკურენტული სხვაობითი განტოლება, რომელიც იოლად ექვემდებარება კომპიუტერული პროგრამებით ამოცანის ამოხსნას.

მიღებულია კომუტაციური ფუნქციის საფუძველზე დენის მრუდის დამახინჯების კოეფიციენტის გამოსახულება და მის საფუძველზე კი მართვადი სამფაზა ბოგური გამმართველის სიმძლავრის კოეფიციენტის ზოგადი გამოსახულება რეგულირების და კომუტაციის კუთხეებზე დამოკიდებულებით.

ყველაზე სასურველ შემთხვევაში, როცა რეგულირების და კომუტაციის კუთხეები ნულის ტოლი არიან, მაშინ სიმძლავრის კოეფიციენტის მნიშვნელობა აღწევს მაქსიმუმს: 0,9554-ს.

სიმძლავრის კოეფიციენტის მაქსიმალური მნიშვნელობიდან გამომდინარე მიღებულია დამოკიდებულება რეგულირების და კომუტაციის კუთხეებს შორის.

მეორე თავში ჩატარებულია წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების ცვლადი დენის მიმღები ქსელის მიმყოფ ინვერტორულ აგრეგატებში პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება;

მიღებულია ინვერტორულ აგრეგატებში მიმღები ცვლადი დენის ქსელის რეზულტირებული დენების d, q მდგენელების და ინვერტორის შესავალში მუდმივი დენის მიმართ ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების საანგარიშო მათემატიკური მოდელი.

ჩატარებულია სამუშაოების შედეგად აგებულია წევის სამფაზა ქსელის მიმყოფ ინვერტორებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები.

დადგენილია წევის სამფაზა ქსელის მიმყოლ ინვერტორებში კომპუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის პირობები.

ჩატარებულია წევის სამფაზა ქსელის მიმყოლ ინვერტორებში მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნა დატვირთვის რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმში.

მიღებულია რეკურენტული სხვაობითი განტოლება, რომელიც იოლად ექვემდებარება კომპიუტერული პროგრამებით ამოცანის ამოხსნას.

მესამე თავში ჩატარებულია წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების მართვადი გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატების შემხვედრ-პარალელური მუშაობის ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების, როგორც მათემატიკური, ასევე კომპიუტერული მოდელირება ელექტრომომარაგი შემადგენლობის (ე.მ.შ) რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში; სრულად არის გადაწყვეტილი შემდეგი ძირითადი საკითხები მუდმივი დენის ელექტროფიცირებული რკინიგზის წევის ტრანსფორმატორულ ქვესადგურებში, საკონტაქტო, სალიანდაგო წრედებისა და ელმავალში არსებული მუდმივი დენის მიმდევრობით აღზნებიანი წევის ძრავების პარამეტრების გათვალისწინებით: შემხვედრ-პარალელურად ჩართული უკუ მართვადი გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატების პრინციპული ელექტრული სქემის დამუშავება წევის ძრავების რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში. მუდმივი დენის წევის ქვესადგურებში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში; შემხვედრ-პარალელურად ჩართულ უკუ მართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელირება;

თუ მიღებულ მათემატიკურ მოდელს დავუმატებთ გენერატორულ რეჟიმში გადასული წევის ძრავის როტორის (ლუზის) მოძრაობის განტოლებას, მივიღებთ ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების ანალიზისათვის საჭირო სრულ განტოლებათა სისტემას (მათემატიკურ მოდელს).

დამუშავებულია უკუ გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატის პრინციპული ელექტრული სქემა დროის, როგორც არასაკომუტაციო, ასევე საკომუტაციო ინტერვალში წევის ძრავის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში; უკუ მართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების კომპიუტერული მოდელირება. უკუ მართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემების აგება; წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების მართვადი გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატების შემხვედრ-პარალელური მუშაობის პირობებში კომპუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის პირობების დადგენა. უკუ მართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების

მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნა დატვირთვის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში; შემხვედრ-პარალელურად ჩართულ უკუმართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელირება. ამ უკანასკნელი საკითხის გადაწყვეტის შედეგად ელექტრომაგნიტური დამამუხრუჭებელი მომენტის განზოგადებული გამოსახულების მისაღებად შემოყვანილია შემდეგი დროში ცვალებადი პარამეტრები: წევის ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილისა და გამმართველ გრაგნილებს შორის ცვლადი ურთიერთ ინდუქციურობების d, q მდგენელების განზოგადებული გამოსახულება; წევის ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილისა და ინვერტორულ გრაგნილებს შორის ცვლადი ურთიერთინდუქციურობა; წევის ტრანსფორმატორის გამმართველისა და ინვერტორულ გრაგნილებს შორის ცვლადი ურთიერთინდუქციურობა; წევის ტრანსფორამტორის გამართველის გრაგნილების ექვივალენტური ცვლადი სრული ინდუქციურობა; წევის ტრანსფორმატორის ინვერტორული გრაგნილების ექვივალენტური ცვლადი სრული ინდუქციურობა.

Summary

In the doctoral dissertation thesis one presents the actuality of the topic; aim of the work and tasks of the research; methods of research; main results and scientific news of the work; scope of result usage, publication, work approbation and dissertation structure; one covers the dissertation content and shows the questions discussed into the introduction.

In the first chapter there are following questions: modeling the processes in the managing aggregations of electric supply in the traction sub-stations; character of non-symmetric transmission and ongoing of stationary processes in the managing transmitting system of the traction sub-stations; mathematical modeling of calculating electric-magnetic transmitting processes in the traction threefold managing aggregations; computer modeling of electric-magnetic transmitting processes in the traction threefold managing aggregations; establishing the optimization terms of computer over tension in the threefold managing tuners; setting up the structural schedule of the transmitting process model in the traction threefold managing tuners; higher harmonics in nourishing power curve in the traction threefold managing tuners; power coefficient;

If we discuss the transmitting system in the traction sub-stations, as semi-transmitting aggregations, as the united system of contact web, railways and locomotive traction power with impulsive modulation, then because of existence the electronic machines (circulating part) the system is characterized with the parameters, changing periodically from time to time. That's why equations towards the phase variables, as it is known, are brought to the very difficult differential equations system. This circumstance has caused refusal to use the physical variables and bringing of new complex resulted scrolling variables for simplifying the equations (power, voltage). These variables will be written in the system of different coordinates, in our case in d,q,o system. Using the complex transmission of the variables may cause such simple differential equation with stable coefficients, solution of which is possible analytically. In the valve electric circles one uses structural-operator transmission method of the variables.

Following from the results of the works, on the basis of joining these two methods, there exists a new modernized method of calculating and analyzing the stationary and transmitting processes, in which one uses complex and spectral-operator transmission of the variables. This method gives the opportunity to foresee simultaneously general parameters of transformer and commutation and non-commutation generalized intervals in semiconductor converters.

One has done mathematical and computer modeling of calculating the electric-magnetic transmission and joined processes in threefold managing tuner aggregations.

One has established optimization terms of commutation over tension in managing tuners, following from protecting the difference from determinant zero suitable for explaining the matrix equation system, done towards the lookup electricity.

One has done the structural schedules of the transmission process model in the traction threefold structural tuners. One has foreseen the elements of structural model of mathematical operations and their characters.

There exists the reversal difference equation, which easily becomes the subject of making the task by the computer programs.

One has got the expression of distortion coefficient of power curve on the basis of commutation function and on its basis – general expression of power coefficient of managing threefold tuner, depending on the regulation and commutation corners.

In the most desirable case, when the regulation and commutation corners are equal to zero, then meaning of the power coefficient reaches the maximum: 0,9554.

Following from the maximal meaning of power coefficient one has got the attitude between the regulation and commutation corners.

In the second chapter one has done mathematical and computer modeling of the processes in the inverter aggregations of receive network the variable power of electric supply of the traction sub-stations;

One has got the mathematical model of calculating the united processes of electric-magnetic transmission and united processes towards the permanent power in the inverter preface and d,q compilers of resulted power of variable power web in the inverter aggregations.

As a result of done works one has set up the structural schedules in the inverters following to the united processes in the traction threefold.

One has established the optimization terms of commutation over tension in the inverters following to the traction threefold web.

One has made the matrix equation of condition variables in the inverters following to the traction threefold web in the regime of load recuperation braking.

One has got the variance equation in which it's easy to solve the task by the computer programming.

In the third chapter one has done mathematical as well computer modeling of electric-magnetic and electric-mechanical united processes of counter-parallel working of managing tuner-inverter aggregations of the traction sub-station electric supply in the terms of recuperative braking of electrical rolling train; one has fully decided the following main questions in the electrified railway traction transformative sub-stations of the permanent power, in the sequence of the permanent power in the contact, railway circles and locomotive: elaborating the principal electric schedule of counter tuner-inverter aggregations, being turned on counter-parallel way in the terms of recuperation braking of traction motors; compensation of reactive power in the permanent power traction sub-stations in the terms of recuperation braking; mathematical modeling of electric-magnetic and electric-mechanical transitional processes in the counter managing tuner-inverter aggregations, being turned on counter-parallel way;

If we add the rotor movement equation of traction motor being in the generator regime to this mathematical model, we would get the total equation system necessary for analyzing the electric-mechanical transmitting processes (mathematical model).

One has elaborated the principal electric schedule of counter tuner-inverter aggregations in the terms of traction motor recuperative braking in non-communication as well communication interval; computer modeling of electric-magnetic transitional processes in the counter tuner-inverter aggregations; to set up the structural schedules of electric-magnetic transitional process model in the counter managing tuner-inverter aggregations; to establish the optimization terms of commutation over tension in the terms of counter-parallel working of tuner-inverter aggregations managing the electric supply of the traction sub-stations; to solve the matrix equations of the variables of electric-magnetic transitional processes in the counter-managing tuner-inverter aggregations in the terms of load recuperation

braking; mathematical modeling of electric-magnetic transitional processes in the counter managing tuner-inverter aggregations being turned on counter-parallel way. As a result of solving this latest question, to take the expression of electric-magnetic braking moment, we have brought the following changeable parameters: generalized expression of d,q compilers of variable inter-induction between the tuner scrolls and the initial scroll of the traction transformer; variable inter-induction between the inverter scrolls and traction transformer tuner; total induction of the equivalent variable of the traction transformer tuner scrolls; total induction of equivalent variable of traction transformer inverter scrolls.

შ ი ნ ა ა რ ს ი

შესავალი.....	16
ლიტერატურული მიმოხილვა.....	24
შედეგები და მათი განსჯა.....	33
თავი 1. წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების მართვად გამმართველ აგრეგატებში პროცესების მოდელირება.....	33
1.1. წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების მართვად გამმართველ გარდამქმნელ სისტემაში არასიმეტრიული გარდამავალი და სტაციონალური პროცესების მიმდინარეობის ხასიათი	33
1.2. წევის სამფაზა მართვად გამმართველ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების გაანგარიშების მათემატიკური მოდელირება.....	35
1.3. წევის სამფაზა მართვად გამმართველ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების კომპიუტერული მოდელირება.....	49
1.4. წევის სამფაზა მართვად გამმართველებში კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის პირობების დადგენა.....	53
1.5. წევის სამფაზა მართვად გამმართველებში გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემების აგება.....	54
1.6. წევის სამფაზა მართვად გამმართველ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნა დატვირთვის გაშვებისა და წევის რეჟიმებში.....	57
1.7. წევის სამფაზა გამმართველებში მკვებავი დენის მრუდში მაღალი ჰარმონიკები. სიმძლავრის კოეფიციენტი.....	62
თავი 2. წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების ცვლადი დენის ქსელის მიმყოლ ინვერტორულ აგრეგატებში პროცესების მოდელირება.....	65
2.1. სამფაზა ქსელის მიმყოლ ინვერტორებში ელექტრომაგნიტური პროცესების გაანგარიშების მათემატიკური მოდელირება.....	65

2.2 წევის სამფაზა ქსელის მიმყოლ ინვერტორებში ელექტრომაგნიტური პროცესების გაანგარიშების კომპიუტერული მოდელირება.....72

2.3. წევის სამფაზა ქსელის მიმყოლ ინვერტორებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემის აგება.....74

2.4. წევის სამფაზა ქსელის მიმყოლ ინვერტორებში კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის პირობების დადგენა78

2.5. წევის სამფაზა ქსელის მიმყოლ ინვერტორებში მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნა დატვირთვის რეკუპერაციული.....79

თავი 3. წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების მართვადი გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატების შემხვედრ-პარალელური მუშაობის ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების მოდელირება რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში.....83

3.1. წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების ცვლადი დენის ქსელის მიმყოლ ინვერტორულ აგრეგატებში პროცესების მოდელირება.....83

3.2.მუდმივი დენის წევის ქვესადგურებში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში.....87

3.3. შემხვედრ-პარალელურად ჩართული უკუ მართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელირება.....89

3.3-1. დროის $t_{n-1} = \frac{1}{\omega} (n - 1) \left(\frac{\pi}{3} - \gamma \right)$ –დან $t_n = \frac{1}{\omega} n \left(\frac{\pi}{3} - \gamma \right)$ –მდე არასაკომუტაციო ინტერვალებში (ნახ.16).....89

3.3-2. დროის $t_n = \frac{1}{\omega} n \left(\frac{\pi}{3} - \gamma \right)$ –დან $t_{n+1} = \frac{1}{\omega} \left[n \left(\frac{\pi}{3} - \gamma \right) + \gamma \right]$ –მდე (ნახ.17).....102

3.4. უკუ მართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების კომპიუტერული მოდელირება.....113

3.4-1. დროის $t_{n-1} = \frac{1}{\omega} (n - 1) \left(\frac{\pi}{3} - \gamma \right)$ –დან $t_n = \frac{1}{\omega} n \left(\frac{\pi}{3} - \gamma \right)$ –მდე არასაკომუტაციო ინტერვალებში.....113

3.4-2. დროის $t_n = \frac{1}{\omega} n \left(\frac{\pi}{3} - \gamma \right)$ –დან $t_{n+1} = \frac{1}{\omega} \left[n \left(\frac{\pi}{3} - \gamma \right) + \gamma \right]$ –მდე საკომუტაციო ინტერვალებში.....	115
3.5. უკუ მართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემების აგება.....	118
3.6. წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების მართვადი გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატების შემხვედრ-პარალელური მუშაობის პირობებში კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის პირობების დადგენა.....	120
3.6-1. დროის $t_{n-1} = \frac{1}{\omega} (n-1) \left(\frac{\pi}{3} - \gamma \right)$ –დან $t_n = \frac{1}{\omega} n \left(\frac{\pi}{3} - \gamma \right)$ –მდე არასაკომუტაციო ინტერვალებში.....	122
3.6-2. დროის $t_n = \frac{1}{\omega} n \left(\frac{\pi}{3} - \gamma \right)$ –დან $t_{n+1} = \frac{1}{\omega} \left[n \left(\frac{\pi}{3} - \gamma \right) + \gamma \right]$ –მდე საკომუტაციო ინტერვალებში.....	120
3.7. უკუ მართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნა დატვირთვის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში.....	121
3.8. შემხვედრ-პარალელურად ჩართულ უკუმართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელირება.....	126
დასკვნა.....	132
გამოყენებული ლიტერატურა.....	136

ნახაზების ნუსხა

- ნახ. 1. სამფაზა მართვადი გამმართველიანი გარდამქმნელის სქემა.....36
- ნახ. 2. კომუტაციური ფუნქციების გრაფიკი.....40
- ნახ. 3. მართვად გამმართველ გარდამქმნელის გაშვებისას გამართული ძაბვისა $u_a(t)$ და $i_a(t)$ გამართული დენის გარდამავალი პროცესების მრუდები: 1-ექსპერიმენტალური; 2- გაანგარიშებით.....49
- ნახ. 4. გარდამქმნელი სისტემის ექვივალენტური ცვლადი პარამეტრების მოდელის სტრუქტურული სქემა [(ნახ.4-6)-ზე მოყვანილი სქემის ბლოკში ნაჩვენები პარამეტრების ქვედა H –ინდექსები აღნიშნავს დატვირთვის პარამეტრებს].....54
- ნახ. 5. გარდამქმნელი სისტემის ექვივალენტური ცვლადი პარამეტრების მოდელის სტრუქტურული სქემა.....55
- ნახ. 6. გამმართველი გარდამქმნელი სისტემის გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა.....56
- ნახ. 7. მართვადი სამფაზა გამმართველის დენების მატრიცების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა.....60
- ნახ. 8. სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის მიმყოლი ინვერტორის ბოგური სქემა შესაბამისი მოცემული პარამეტრებით: ა) ძაბვებისა და $T_1 - T_6$ ტირისტორებში დენების ერთდროულად გატარების თანამიმდევრობის გრაფიკები ბ).....66
- ნახ. 9. ქსელის მიმყოლი სამფაზა ინვერტორის კომუტაციური ფუნქციები.....68
- ნახ. 10. მათემატიკური ოპერაციების სტრუქტურული მოდელის ელემენტები და მათი თვისებები.....75
- ნახ.11. (138)-(143) გამოსახულებების საფუძველზე ექვივალენტური ცვლადი კოეფიციენტების ფორმირების მოდელის სტრუქტურული სქემა. (ნახ. 11-13)-ზე ზედა c – ინდექსები აღნიშნავენ მიმდებ ქსელისთვის პარამეტრებს, ხოლო $-H$ აღნიშნავს ინვერტორისთვის სიხშირეს და პარამეტრებს.....76
- ნახ. 12. სამფაზა ქსელის მიმყოლი ინვერტორის ელექტრული სიდიდეების მყისა მნიშვნელობების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა77

- ნახ. 13. ქსელის მიმყოლი ინვერტორის დენების მატრიცების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა.....81
- ნახ. 14. უკუ გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატის პრინციპული ელექტრული სქემა წევის ძრავის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში.....84
- ნახ. 15. სამფაზა წევის ტრანსფორმატორის გრაგნილების ფაზური ძაბვები-ა, ბ; გენერატორულ რეჟიმში წევის ძრავის ე.მ. ძალა-გ; ინვერტორის და უკუ გამმართველის ტირისტორების მუშაობის თანმიმდევრობა-დ.ე.....85
- ნახ. 16. უკუ გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატის პრინციპული ელექტრული სქემა დროის არასაკომუტაციო ინტერვალში $t_{n-1} = \frac{1}{\omega}(n-1)\left(\frac{\pi}{3} - \gamma\right)$ –დან $t_n = \frac{1}{\omega}n\left(\frac{\pi}{3} - \gamma\right)$ –მდე წევის ძრავის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში; მუგ-მართვადი უკუ გამმართველი; ქმი-ქსელის მიმყოლი ინვერტორი.....92
- ნახ. 17. უკუ გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატის პრინციპული ელექტრული სქემა დროის საკომუტაციო ინტერვალში $t_n = \frac{1}{\omega}n\left(\frac{\pi}{3} - \gamma\right)$ –დან $t_{n+1} = \frac{1}{\omega}[n\left(\frac{\pi}{3} - \gamma\right) + \gamma]$ –მდე წევის ძრავის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში. მუგ-მართვადი უკუგამმართველი; ქმი-ქსელის მიმყოლი ინვერტორი.....104
- ნახ. 18. (279),(287)-ინტეგრალური გამოსახულებების საფუძველზე აგებული დენების მატრიცების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები უნიფიცირებულ ფორმაში.....119

შესავალი

უკანასკნელ პერიოდში გაზრდილია ინტერესი ინოვაციური გზით მუდმივი დენის წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების ნახევარგამტარულ ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მდგრადობისა და იმედიანობის უზრუნველყოფისათვის.

ელექტრული ენერჯის ნახევარგამტარული გარდამქმნელები წარმოადგენენ რთულ არაწრფივ ვენტილურ წრედებს. ასეთი წრედები მრავალ რთულ ტექნიკურ სისტემებში, როგორცაა ელექტროფიცირებული რკინიგზა, გამოიყენებიან როგორც ცალკეული ძალური ელემენტი, ისე ავტომატური რეგულირებისა და მართვის ორგანო. გარდამქმნელი ერთიანი სისტემის გამოკვლევისა და დამუშავების დასრულებულ ძირითად ამოცანას წარმოადგენს მუშაობის საჭირო რეჟიმების უზრუნველყოფა და გამომავალი პარამეტრების ოპტიმალური მნიშვნელობების მიღება.

ამ პრობლემის გადაწყვეტა შეუძლებელია მუდმივი დენის წევის ქვესადგურებში შემოყვანილი ცვლადი დენის ქსელის, ძალური სამფაზა წევის ტრანსფორმატორის, საკონტაქტო ქსელის, სალიანდაგო წრედის და მუდმივი დენის წევის ძრავების, როგორც ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის შესაბამისი ექვივალენტური პარამეტრების გაუთვალისწინებლად მართვადი გამმართველი და მიმღები ცვლადი დენის ქსელის მიმყოლი ინვერტორული აგრეგატების ელექტრომაგნიტური პროცესების ღრმა გამოკვლევების გარეშე. ასეთი პროცესები შეისწავლება, როგორც სტაციონალურ, ასევე დინამიურ რეჟიმებში.

ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის გაშვებისას, დატვირთვების მკვეთრი ცვალებადობისას, კვების წყაროსა და სქემის ცალკეული პარამეტრების ცვალებადობისას გამოწვეულმა გარდამავალმა პროცესებმა

შეიძლება დიდი დაუშვებელი შეცდომები გამოიწვიოს, როგორც თვით გარდამქმნელ აგრეგატე

ზე, ასევე ერთიან გარდამქმნელ სისტემაზე. აუცილებელია გარდამქმნელი აგრეგატების სხვადასხვა გარდამავალ პროცესებში მუშაობის რეჟიმების მდგრადობის შეფასება. მუშაობის მდგრადობა უშუალოდ განსაზღვრავს მთლიანი სისტემის მუშაობის მდგრადობას და იმედიანობას.

მუდმივი დენის წევის ქვესადგურებში ვენტილური გარდამქმნელი აგრეგატების სქემების სირთულე და მრავალსახეობა არსებითად ართულებს ენერჯის წყაროდან წევის ძრავებიან დატვირთვამდე სტაციონალურ და გარდამავალი ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური პროცესების ანალიზის ამოცანას. ასეთი რთული გარდამქმნელი ერთიანი სისტემის გამოკვლევა დაკავშირებულია საკმაოდ რთულ ამოცანასთან. დღესდღეობით, პრაქტიკულად, თუ არ ჩავთვლით წინამდებარე სადისერტაციო დასრულებულ სამუშაოს, არ არსებობს მეთოდები ვენტილურ გარდამქმნელებში რეალური მახასიათებლების გათვალისწინებით მოგვცეს ზოგად სახეში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების დინამიკის გამოკვლევებისათვის საჭირო ანალიზური გამოსახულებები.

წევის ქვესადგურების სამფაზა ნახევარგამტარულ გარდამქმნელებში ძალოვან ტრანსფორმატორებში მიმდინარე პროცესების განსაკუთრებულობა ჩვეულებრივ სამფაზა ტრანსფორმატორებთან შედარებით მდგომარეობს იმაში, რომ ნახევარგამტარ ტირისტორულ გადამრთველებზე მართვადი იმპულსის მიწოდების მომენტიდან წარმოებს ტრანსფორმატორის გრაგნილთა ფაზების პერიოდული გადართვები. ეს დროის ინტერვალიდან ინტერვალამდე, თავის მხრივ იწვევს მაგნიტომამომრავებელი ძალების (მმძ) სივრცით განაწილებას, აგრეთვე ტრანსფორმატორის პარამეტრების და მოქმედი ელექტრომამომრავებელი ძალების (ემძ) ცვლილებას. დროში სტაციონალური და გარდამავალი პროცესების განხილვისათვის მყისა მნიშვნელობების გაანგარიშების

მეთოდის თანახმად, აუცილებელია გაანგარიშებული იქნას სიდიდეების მყისა მნიშვნელობები დროის ინტერვალების მიხედვით. თითოეულ ამ ცალკეულ ინტერვალებში ძალოვანი ტრანსფორმატორი იმყოფება გარდამავალ არასიმეტრიულ რეჟიმში სივრცეში მმ და ემმ-ს განაწილების კანონის შეუცვლელად ტრანსფორმატორის ერთი და იგივე პარამეტრებისას. საწყისი პირობების დროში შეცვლისას გარდამავალი პროცესი იცვლება დროის ინტერვალიდან ინტერვალამდე. განსაზღვრული დროის შემდეგ საწყისი პირობები პერიოდულად მეორდება. გარდამავალი პროცესი მყარდება და ამ რეჟიმში საკმარისია განხილული იქნას მხოლოდ პროცესის განმეორებადობის ინტერვალი.

სტატიკურ გარდამქმნელებში გარდამავალი პროცესების აღმწერ განტოლებებს ჩვეულებრივ ადგენენ უშუალოდ ფაზური ცვლადების მყისა მნიშვნელობების მიმართ. ეს განტოლებები დაიყვანებიან მუდმივ კოეფიციენტებიან დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემაზე. იმ შემთხვევაში, თუ წევის ქვესადურში გარდამქმნელ სისტემას განვიხილავთ, როგორც ნახევარგამტარულ აგრეგატებს, ასევე საკონტაქტო ქსელისა, ლიანდაგებისა და ელმავლის წევის ძრავის ერთიან სისტემას იმპულსური მოდულაციით, მაშინ ელექტრული მანქანების (მბრუნავი ნაწილის) არსებობის გამო სისტემა ხასიათდება დროში პერიოდულად ცვალებადი პარამეტრებით. ამიტომ ფაზური ცვლადების მიმართ დაწერილი განტოლებები, როგორც ცნობილია, დაიყვანება ამოსახსნელად მეტად რთულ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემაზე. ამ გარემოებამ გამოიწვია განტოლებების გასამარტივებლად ახალი კომპლექსური რეზულტირებული საგრაგნილო ცვლადების (დენები, ძაბვები და ნაკადშემები) შემოყვანა. ეს ცვლადები ჩაიწერება სხვადასხვა კოორდინატთა სისტემაში, ჩვენს შემთხვევაში $d, q, 0$ სისტემაში. ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის გამოყენება იწვევს ისეთ მუდმივ კოეფიციენტებიან მარტივ დიფერენციალურ განტოლებების მიღებას, რომელთა ამოხსნა შესაძლებელია ანალიზურად. ვენტილურ ელექტრულ

წრედებში გამოყენებულია ცვლადების სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნის მეთოდი.

ჩვენს მიერ ჩატარებული სამუშაოების შედეგებიდან გამომდინარე ამ ორი მეთოდის შერწყმის საფუძველზე მიღებულია გარდამქმნელი სისტემის სტაციონალური და გარდამავალი პროცესების გაანგარიშებისა და ანალიზის ახალი მოდერნიზებული მეთოდი, რომელშიც გამოიყენება ცვლადთა კომპლექსური და სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნა. ეს მეთოდი საშუალებას იძლევა ერთდროულად გათვალისწინებული იქნას ტრანსფორმატორის ძირითადი პარამეტრები და ნახევარგამტარულ გარდამქმნელებში კომუტაციური და არასაკომუტაციო განზოგადებული ინტერვალები კომუტაციური ფუნქციების მწკრივებად დაშლის გათვალისწინებით.

სადისერტაციო ნაშრომში დამუშავებულია წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების მართვად გამართველ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება ცვლადთა კომპლექსური და სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნების უნივერსალური მეთოდით. გამოყენებულია ვენტილური გარდამქმნელი აგრეგატების შესავალი და გამოსავალი ელექტრული სიდიდეების მყისა მნიშვნელობებს შორის კავშირის განტოლებები, წარმოდგენილი ფურიეს მწკრივების სახით რეგულირების და კომუტაციის კუთხეების გათვალისწინებით. მიღებულია რეზულტირებული კომპლექსური სიდიდეების მიმართ განტოლებები და მის საფუძველზე ჩატარებულია კომპიუტერული მოდელირება. მიღებულია საძიებელი დენების ინტეგრალური გამოსახულებები და შესაბამისი ექვივალენტური პარამეტრები. დენების წარმოებულების ანალიზური გამოსახულებების საფუძველზე დადგენილია წევის სამფაზა მართვად გამართველებში კომუტაციური გადამაბვების ოპტიმიზაციის პირობები ექვივალენტურ პარამეტრებზე დამოკიდებული ანალიზური გამოსახულებებით.

კომპიუტერული მოდელირების ჩატარების საფუძველზე დადგენილია წევის სამფაზა მართვად გამმართველებში გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემების სახეები.

შესრულებულია წევის სამფაზა მართვად გამმართველ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ანალიზური ამოხსნა დატვირთვის გაშვებისა და წევის რეჟიმებში. მიღებულია სხვაობითი რეკურენტული განტოლება, რომელიც იოლად ექვემდებარება კომპიუტერული პროგრამებით ამოცანის ამოხსნას.

შესწავლილია მკვებავი დენის მრუდში მაღალი რიგის ჰარმონიკები და დადგენილია სიმძლავრის კოეფიციენტის მაქსიმალური შესაძლო მნიშვნელობა 0.9554. დადგენილია მართვადი გამმართველის ექსპლუატაციისას სიმძლავრის კოეფიციენტის მაქსიმალური მნიშვნელობების მისაღწევად კომუტაციური კუთხის აღებული მნიშვნელობებისათვის, როგორც უნდა იყოს შესაბამისი რეგულირების კუთხე. მაგალითისათვის, როცა $\gamma = 20^\circ$, მაშინ $\alpha = 2^\circ 40'$.

ჩატარებულია წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების ცვლადი დენის მიმღები ქსელის მიმყოფ ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება ცვლადთა კომპლექსური და სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნების უნივერსალური მეთოდის გამოყენებით. დადგენილია ინვერტორულ აგრეგატში მართვადი ტირისტორების გაღება-ჩაკეტვის ალგორითმი და შესაბამისი კომუტაციური ფუნქციები.

მიღებულია პერიოდული კოეფიციენტებიანი სრული დიფერენციალური კომპლექსური განტოლებათა სისტემა მატრიცულ ფორმაში. დადგენილია და აგებულია წევის სამფაზა ქსელის მიმყოფ ინვერტორებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები. დადგენილია წევის სამფაზა ქსელის მიმყოფ

ინვერტორებში კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის პირობების ანალიზური გამოსახულება ექვივალენტურ პარამეტრებზე დამოკიდებულებით. შედგენილია სამფაზა ქსელის მიმყოფ ინვერტორებში მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებები და ჩატარებულია მათი ამოხსნა დატვირთვის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში. მიღებულია რეკურენტული სხვაობითი განტოლება, რომელიც იოლად ექვემდებარება კომპიუტერული პროგრამებით ამოცანის ამოხსნას.

ენერგეტიკასა და ელექტროინჟინერიაში პირველად ჩატარდა წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების მართვადი გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატების შემხვედრ-პარალელური მუშაობის ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში. შედგენილი და დამუშავებულია შესაბამისი საანგარიშო ელექტრული სქემა წევის ძრავის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში. ამ სქემაში ნაჩვენებია გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში რეკუპერაციული დამუხრუჭების პროცესების სრულყოფა, ქსელის მიმყოფი ძაბვის ინვერტორის გარე მახასიათებლის გაუმჯობესება, რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია და სიმძლავრის კოეფიციენტის გაზრდის შესაძლებლობა მართვადი უკუ გამმართველის გამოყენებით. დამუშავებულ უნივერსალურ სქემაში შესაბამისად დადგენილია ქსელის მიმყოფი ინვერტორის და უკუ მართვადი გამმართველის ტირისტორების ერთდროული მუშაობის ალგორითმი.

განხილული და დამუშავებულია მუდმივი დენის წევის ქვესადგურებში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციის საკითხი რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში.

შედგენილია უკუ გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატის საანგარიშო პრინციპული ელექტრული სქემა დროის არასაკომუტაციო ინტერვალებში წევის ძრავის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში.

ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების ანალიზისათვის საჭირო სრულ განტოლებათა სისტემას ემატება გენერატორულ რეჟიმში გადასული წევის ძრავის როტორის (ღუზის) მოძრაობის განტოლება. ამ განტოლებაში ფიგურირებს ღუზის ლილვზე განვითარებული მექანიკური მომენტი, რომლის ანალიზური გამოსახულების საფუძველზე ჩანს, რომ იგი პირდაპირპროპორციულია მოძრავი შემადგენლობის მასისა და აჩქარების ნამრავლისა, საწყისი და დახრილ პროფილში სიჩქარეების ჯამისა და უკუპროპორციულია ღუზის კუთხური სიჩქარისა. აგრეთვე ფიგურირებს გენერატორულ რეჟიმში გადასული წევის ძრავის ელექტრომაგნიტური მომენტი, მიმართული ღუზის ბრუნვის მიმართულების საწინააღმდეგოდ. დამამუხრუჭებელი ელექტრომაგნიტური მომენტი დაიძლევა პირველადი ძრავით რომელიც უზრუნველყოფს გენერატორის ღუზის ბრუნვას. ანალიზურად ელექტრომაგნიტური მომენტი გამოისახება სქემით გამმართველ და ინვერტორულ გრაგნილებში შესაბამისი ნაკადუმბებისა და დენების ნამრავლთა ჯამით.

წარმოდგენილი საანგარიშო ელექტრული სქემის სპეციფიკურობიდან გამომდინარე რეზულტირებული კომპლექსური დენების მიმართ დამტკიცდა თეორემა კირხჰოფის პირველი კანონის მოდიფიკაციის შესახებ, რომლის თანახმადაც: წევის ტრანსფორმატორის მეორად გამმართველ გრაგნილში რეზულტირებული კომპლექსური დენი უკუ გამმართველ გრაგნილში კომპლექსური რეზულტირებული დენისა და რეგულირების და წინსწრების კუთხეების სხვაობის ტოლი კუთხით დადებითი მიმართულებით შემობრუნებული ინვერტორულ გრაგნილში რეზულტირებული კომპლექსური დენის ჯამის ტოლია. აღნიშნული თეორემის საფუძველზე ზუსტად წარმოებს გაერთიანებული გარდამქმნელი სისტემის მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება და მიღებულია ექვივალენტური ცვლადი პარამეტრები, რაც დიდ გამოყენებას პოულობს პროცესების კომპიუტერულ მოდელირებაში.

განგარიშებისა და ანალიზის საფუძველზე აგებულია უკუ მართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები.

დადგენილია კომპუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის პირობების ანალიზური გამოსახულება ექვივალენტურ პარამეტრებზე დამოკიდებულებით.

შედგენილია პროცესების მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებები და ჩატარებულია მათი ამოხსნა დატვირთვის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში.

მიღებულია რეკურენტული სხვაობითი განტოლებები. ჩატარებულია ელექტრომექანიკური გარდამავალი და დამყარებული პროცესების მათემატიკური მოდელირება.

ლიტერატურის მიმოხილვა

მუდმივი და ცვლადი დენის ელექტროფიცირებული რკინიგზის წვევისა და ტრანსფორმატორული ქვესადგურების ელექტრომოწყობილობებისა და სარელო დაცვის შესახებ ძირითადი ცნობები, ელექტრული შეერთებების თანამედროვე სქემების აღწერა მოცემულია ფუნდამენტურ წიგნში [1].

ელექტრომომარაგების სისტემების განხილვა, მოწყობილობების მუშაობის მაჩვენებლების წარმოდგენა, სისტემის მუშაობის რეჟიმების შესწავლა, ძირითადი პარამეტრების შერჩევა, წვევის სქემების მოკლე შერთვის დენებისაგან დაცვის მეთოდები და ექსპლუატაციის განსაკუთრებულობა წარმოდგენილია სახელმძღვანელოში [2].

ელექტროფიცირებულ რკინიგზაზე მოძრავი შემადგენლობის წვევის ძალისა და დამუხრუჭების რეალიზაციის პროცესი, მოძრაობის წინააღმდეგობის ძალები, წვევისა და სამუხრუჭე რეჟიმების მახასიათებლები, მატარებლის მოძრაობის მრუდების გათვლა და აგება მოცემულია ფუნდამენტალურ სახელმძღვანელოში [3].

მუდმივი და პულსირებული დენის წვევის ელექტრული მანქანების და აგრეთვე წვევის ტრანსფორმატორების ძირითადი მდგომარეობები და მუშაობის პირობების საკითხები გაშუქებულია წიგნში [4].

წვევის ელექტრომომარაგების სისტემის შემდგომი სრულყოფა, მისი დატვირთვის უნარიანობის ამაღლება, ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლების ამაღლების საკითხები და წვევის სალიანდაგო ქსელებში დენების გაანგარიშების მეთოდიკა მოცემულია შრომათა კრებულში [5].

მართვადი ნახევარგამტარული კომპუტატორიანი სრულიად ახალი კლასის მუდმივი და ცვლადი დენის წვევის ელექტრული მანქანების თეორიის საფუძვლები წარმოდგენილია ფუნდამენტალურ მონოგრაფიაში [6].

სხვადასხვა გარდამქმნელ მოწყობილობებში გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემების შედგენის მეთოდის, დაფუძნებული ცალკეული ელემენტარული მათემატიკური ოპერაციების მოდელირების ელემენტების ნაკრებზე, მოცემულია სტატიაში [7].

გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატებისათვის გამმართველისა და ინვერტორების ძირითადი სქემები, მათი მუშაობის რეჟიმების შესწავლა, ძაბვის რეგულირების ხერხები, მართვის სისტემების განხილვა, გადამაბევისაგან დაცვის სქემები, მოკლე შერთვისა და გადატვირთვის დენებისგან დაცვა, არასიმეტრიული რეჟიმების შესწავლა და აგრეგატების ძირითადი პარამეტრების შერჩევის მეთოდის გამოყენებულია წიგნში [8].

მომრავი შემადგენლობის წევის ძრავის ბრუნვათა რიცხვის რეგულირების საკითხები ნახევარგამტარული გარდამქმნელი მოწყობილობების მეშვეობით, დაფუძნებული განივ-იმპულსურ მოდულაციაზე, განხილულია წიგნში [9].

ელექტრული წევის სხვადასხვა სისტემების ელექტრომომარაგების სქემებისა და მოწყობილობების აღწერა; ელექტრომომრავი შემადგენლობის წევის და გარე ელექტრომომარაგებებს შორის ურთიერთმოქმედების საკითხების განხილვა; ძაბვის რეჟიმების გავლენა წევის ქსელში ელექტროლოკომოტივისა და ელექტრო რკინიგზის მუშაობაზე წარმოდგენილია წიგნში [10].

წევის ქვესადგურების მოწყობა და სქემები, მათი ექსპლუატაციის თანამედროვე მეთოდები, უწყისრიგობების აღმოჩენა და მათი აღმოფხვრის ხერხები მოყვანილია ცნობარში [11].

ელექტრული წევის ქვესადგურების მოწყობილობებში სტატიკური ნახევარგამტარული გარდამქმნელების შერჩევის, მუშაობის რეჟიმების, ავარიული და არანორმალური რეჟიმების შესწავლის საკითხები წარმოდგენილია წიგნში [12].

სხვადასხვა ტიპის ელექტრული მანქანებისათვის დამახასიათებელი საერთო რთული პროცესები და მუშაობის რეჟიმების სპეციალური

საკითხები შესწავლილია და გადმოცემულია ფუნდამენტალური დამხმარე სახელმძღვანელოში [13].

მუდმივი დენის წევის ქსელებში მიმდინარე გარდამავალი პროცესების განსაკუთრებულობის სპეციფიკური ანალიზის საფუძველზე მის მიმართ წაყენებული დაცვის მოთხოვნების გათვალისწინება და შესრულება გაშუქებულია წიგნში [14].

სარელეო დაცვისა და ავტომატიკის მოწყობილობებში ნახევარგამტარული ხელსაწყოების გამოყენების საკითხები, ძირითადი ფუნქციონალური და ლოგიკური ელემენტების აგების პრინციპები და მათი გაანგარიშება წარმოდგენილია მონოგრაფიაში [15].

გარდამქმნელ სისტემებში დამყარებული და გარდამავალი პროცესების ანალიზის ერთიანი მეთოდიკა, მანქანურ-ნახევარგამტარული სისტემების განტოლებები რეზულტირებული კომპლექსური ცვლადების მიმართ წარმოდგენილია მონოგრაფიაში [16].

წევის ქვესადგურებში მოწყობილობები, გარდამქმნელი აგრეგატები, აპარატურები, დამხმარე მოწყობილობები, ელექტრული შეერთების სქემები, რელეები და სარელეო დაცვები, პროცესების ავტომატიკა და ტელემართვა მოცემულია სახელმძღვანელოში [17].

სივრცითი-დროითი დამოკიდებულებანი ელექტრომაგნიტურ ველებში და ელექტრულ წრედებში; ფიზიკური სიდიდეების გარდამქმნელები ელექტროტექნიკაში; ზეგამტარი ტრანსფორმატორები, დენის შემზღვევლები, სწრაფმოქმედი ავტომატები წარმოდგენილია მონოგრაფიაში [18].

ელექტრომაგნიტური ველის, ელექტრული და მაგნიტური წრედების თეორიის ძირითადი ცნებები და კანონები, წრფივი ელექტრული წრედების თეორია, არაწრფივი ელექტრული და მაგნიტური წრედების თეორია, ელექტრომაგნიტური ველის თეორია მოცემულია ფუნდამენტალურ სახელმძღვანელოში [19].

ელექტრული ენერჯის სხვადასხვა სტატიკური გარდამქმნელისაგან შემდგარი ძალური ვენტილურ წრედებში ელექტრომაგნიტური პროცესების დინამიკის ანალიზი და თეორია დაფუძნებული სპექტრალურ-ოპერატორულ მეთოდზე, მოცემულია მონოგრაფიაში [20].

ელექტრომომარაგების მდგომარეობების კონტროლისა და იზოლაციის მახასიათებლების გაზომვების მეთოდები მოყვანილია წიგნში [21].

ელექტროდანადგართა მოწყობის წესები და ელექტრომომარაგების იმედიანობის უზრუნველყოფის ზოგადი მითითებები მოცემულია საყოველთაოდ ცნობილ წიგნში [22].

სამფაზა მართვადი დინამიკის ანალიზი ტრანსფორმატორის ყველა ძირითადი პარამეტრების გათვალისწინებით, დაფუძნებული „ცვლადთა კომპლექსურ-სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნის ახალ მეთოდზე, წარმოდგენილია საკავშირო ჟურნალში გამოქვეყნებულ სტატიაში [23].

სამფაზა დენის ავტონომიური ინვერტორისაგან, სამფაზა შემათანხმებელი ძალური ტრანსფორმატორისაგან და არასიმეტრიული სტატიკური დატვირთვისაგან შემდგარი გარდამქმნელი სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების დინამიკის გამოკვლევისა და გაანგარიშების ახალი ანალიზური მეთოდი გამოქვეყნებულია სტატიაში [24].

ელექტრომომრავი შემადგენლობის კოლექტორული წვევის ძრავზე გამართული ძაბვის რეგულირების ახალი პრინციპი წარმოდგენილია სტატიაში [25].

წვევის ქვესადგურების ნახევარგამტარული გარდამქმნელის ელექტრული პრინციპული სქემა „ორი შებრუნებული ვარსკვლავი გამათანაბრებელი რეაქტორით“, დამუშავებული ავტორების მიერ, გაშუქებულია სტატიაში [26].

ნახევარგამტარული გარდამქმნელი დანადგარების პროგრამული მოდელირება, ჩატარებული ავტორების მიერ, წარმოდგენილია სტატიაში [27].

გამართვიდან ინვერტირებაზე და პირიქით გადართვების რეჟიმების რეგულირება ენერჯის რეკუპერაციისას ნაჩვენებია სტატიაში [28].

წევის ქვესადგურის ნახევარგამტარულ გარდამქმნელებში კომუტაციური პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების საკითხები გაშუქებულია სტატიაში [29].

ნახევარგამტარულ გარდამქმნელებში არასაკომუტაციო პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების საკითხი მოცემულია სტატიაში [30].

წევის ქვესადგურის ნახევარგამტარული გარდამქმნელების დამუშავება და გარდამავალი პროცესების კომპიუტერული მოდელირებით ანალიზი წარმოდგენილია ელექტრონულ სტატიაში [31].

განედურ-იმპულსური მართვით მუდმივი დენის წევის ძრავიანი სამფაზა ბოგური გამმართველ-ინვერტორული გარდამქმნელის მუშაობის რეჟიმები დაძვრის, წევის და რეკუპერაციული დამუხრუჭების გათვალისწინებით მოცემულია ელექტრონულ სტატიაში [32].

მუდმივი დენის ძრავის გაშვებისა და წევის რეჟიმების გამოკვლევა წევის ქვესადგურის სამფაზა ბოგური გამმართველ-ინვერტორული გარდამქმნელის გათვალისწინებით წარმოდგენილია სტატიაში [33].

გამმართველ-ინვერტორული გარდამქმნელის ერთიანი სისტემა სამფაზა ბოგური სქემით, დატვირთული განედურ-იმპულსური მართვადი ელმავლის მუდმივი დენის წევის ძრავით უზრუნველყოფს ძრავის რეჟიმების მენეჯმენტს და ყველაფერი ეს გაშუქებულია გამოქვეყნებულ სტატიაში [34].

ერთიანი გარდაქმნელი სისტემის ელექტრომაგნიტური პროცესების გაანგარიშება და ანალიზი კომპიუტერული პროგრამების საშუალებით მოითხოვს კომპიუტერული მოდელირების მიზნით პროცესების აღმწერი

დიფერენციალური განტოლებათა სისტემის გარდაქმნას რეკურენტული სხვაობითი განტოლებებად მატრიცულ ფორმაში. სხვაობითი განტოლებები და მათი გამოყენება ავტომატური რეგულირების იმპულსური სისტემების და ელექტრონული სქემების ანალიზისათვის განხილულია დამხმარე დახელმძღვანელოში და მონოგრაფიაში [35, 36].

ცვლადი სტრუქტურის ნახევარგამტარული ვენტილური გარდაქმნელების გაანგარიშება, მათემატიკური მოდელირება, სიხშირის ძალოვანი ნახევარგამტარული გარდაქმნელებში პროცესების მართვა, რეგულირება და ყველა შესაძლო მახასიათებლების დადგენა მოცემულია მონოგრაფია [37].

ელექტროტექნიკურ მოწყობილობებში და ნახევარგამტარულ გარდაქმნელ სისტემებში პროცესების კომპიუტერული მოდელირება MATLAB-ში განხილულია დამხმარე სახელმძღვანელოებში [38,39].

ნაშრომში [40,41,42] განხილულია მატარებლის გაშვებისა და წვევის რეჟიმებში პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება არასაკომუტაციო და კომუტაციური დროის განზოგადებულ ინტერვალებში; განხილულია მატარებლის რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმებში პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება დროის არასაკომუტაციო და კომუტაციური განზოგადებული ინტერვალებისათვის. წარმოდგენილია ერთიანი გარდაქმნილი სისტემის მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნა მატარებლის გაშვებისა და წვევითი რეჟიმების არასაკომუტაციო განზოგადებული დროის ინტერვალებისათვის და მატარებლის რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმის დროის კომუტაციური განზოგადებული ინტერვალებისათვის. გამოყენებულია წარმოებადი გამოსახულებების ტეილორის მწკრივებად დაშლა და მიღებულია ამონახსნის სახით ცვლადების სხვაობითი განტოლებები, რომლებიც შეთავსებადია კომპიუტერული პროგრამებით ამოცანის შემდგომი გაანგარიშებისათვის.

[43] დამუშავებულია სამფაზა ინვერტორულ გარდამქმნელ სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება.

სტატიაში [44] მოცემულია წევის ქვესადგურის ელექტრომომარაგების მართვად გამმართველ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება.

ნაშრომში [45] წარმოდგენილია წევის ქვესადგურის ელექტრომომარაგების გარდამქმნელ სისტემაში მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება.

სტატიაში [46] მოცემულია ნახევარგამტარულ გარდამქმნელ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური ტექნოლოგიური პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება.

ნაშრომში [47] დამუშავებულია გემის მუდმივი დენის ნახევარგამტარულ გარდამქმნელებში პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება.

სტატიაში [48] განხილულია წევის ქვესადგურებში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში. წარმოდგენილია შესაბამისი მოდერნიზებული საანგარიშო სქემა.

უცხოურ ჟურნალში გამოქვეყნებულ სტატიაში [49] წარმოდგენილია სიმძლავრის კოეფიციენტის ამაღლების შესაძლებლობა რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში და ნაჩვენებია მისი მაქსიმალური მნიშვნელობის სიდიდე.

სტატიაში [50] წარმოდგენილია უკუ გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელირება დროის საკომუტაციო ინტერვალებში წევის ძრავის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში.

ნაშრომში [51] დამტკიცებულია თეორემა კირხჰოფის პირველი კანონის მოდიფიკაციის შესახებ წევის ქვესადგურის ელექტრომომარაგების

მართვადი უკუ გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატების შემხვედრ-პარალელური მუშაობის პირობებში. აქ ნათლად ჩანს რეგულირებისა და წინსწრების კუთხეების ურთიერთგავლენა პროცესებზე.

სტატიაში [52] წარმოდგენილია წევის ქვესადგურებში ქსელის მიმყოლი სამფაზა ინვერტორების მუშაობის რეჟიმები შემხვედრ-პარალელურად მიერთებული უკუ მართვადი გამმართველის პირობებში.

ნაშრომში [53] მოცემულია შემხვედრ-პარალელურად ჩართულ უკუ მართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელირება.

სტატიაში [54] დამუშავებულია შემხვედრ-პარალელურად ჩართულ უკუ მართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების გაანგარიშების მეთოდიკა და მიღებულია გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები.

ნაშრომში [55] შემოთავაზებულია შემხვედრ-პარალელურად შეერთებულ გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების კომპიუტერული მოდელირება. მიღებულია სხვაობითი რეკურენტული განტოლებები, რომლებიც იოლად ემორჩილებიან კომპიუტერული პროგრამებით ამოცანის შემდგომ გაანგარიშებას.

სტატიაში [56] დამუშავებულია წევის ქვესადგურების ნახევარგამტარულ ერთიან გარდამქმნელ სისტემებში პროცესების მოდელირების ანალიზური და რიცხვითი მეთოდების მათემატიკური თეორია რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში.

სტატიაში [57] წარმოდგენილია გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ცვლადთა მდგომარეობის მატრიცული განტოლებათა სისტემის ამოხსნის მეთოდიკა რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში.

სამეცნიერო შრომაში [58] დამუშავებულია ინვერტორული სიხშირული რეგულირების ასინქრონულ წევის ძრავიან გაერთიანებულ მართვად გარდამქმნელ სისტემაში პროცესების მათემატიკური მოდელირება და წარმოდგენილია შესაბამისი ანალიზი. სიხშირული მართვა წარმოებს IGBT- ტრანზისტორულ მოდულებზე აწყობილი ძაბვის ინვერტორის ბაზაზე.

თეორიულ გამოკვლევებში [59] წარმოდგენილია გამმართველ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების გაანგარიშების მათემატიკური მოდელირება კომუტაციური ფუნქციების გამოყენებით. მიღებულია მართვად გამმართველ გარდამქმნელის გაშვებისას გამართული ძაბვის და დენის გარდამავალი პროცესების მრუდები თეორიული და ექსპერიმენტული გაანგარიშებით. ჩატარებულია პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება.

კოლოქვიუმ-2-ში [60] განხილულია წევის სამფაზა ქსელის მიმყოლ ინვერტორებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელირება. ჩატარებულია პროცესების კომპიუტერული მოდელირება. მიღებულია თითოეული დენების ინტეგრალური გამოსახულებები დროში ცვალებადი ექვივალენტური კოეფიციენტებით. მიღებულია ინვერტორის შესავალში ჩართული რეაქტორის ინდუქციურობის ძალური ტრანსფორმატორის პარამეტრებზე დამოკიდებულების ფორმულა, რომლის განხორციელების შემთხვევაში ინვერტორში კომუტაციურ გადაძაბვებს ადგილი არ აქვს.

თეორიულ გამოკვლევებში [61] დამუშავებულია შემხვედრ-პარალელურად ჩართული უკუ მართვადი გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატების პრინციპული ელექტრული სქემა წევის ძრავების რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში. დადგენილია ექსპლუატაციაში მუშაობის მოქმედების პრინციპი. განხილულია მუდმივი დენის წევის ქვესადგურებში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში.

შედეგები და მათი განსჯა

თავი 1. წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების მართვად გამმართველ აგრეგატებში პროცესების მოდელირება.

1.1. წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების მართვად გამმართველ გარდამქმნელ სისტემაში არასიმეტრიული გარდამავალი და სტაციონალური პროცესების მიმდინარეობის ხასიათი.

წევის ქვესადგურების სამფაზა ნახევარგამტარულ გარდამქმნელებში ძალურ ტრანსფორმატორებში მიმდინარე პროცესების განსაკუთრებულობა ჩვეულებრივი სამფაზა ტრანსფორმატორებთან შედარებით მდგომარეობს იმაში, რომ ნახევარგამტარ ტირისტორულ გადამრთველებზე მართვადი იმპულსის მიწოდების მომენტიდან წარმოებს ტრანსფორმატორის გრაგნილთა ფაზების პერიოდული გადართვები. ეს დროის ინტერვალიდან ინტერვალამდე, თავის მხრივ იწვევს მაგნიტომამოძრავებელი ძალების (მმძ) სივრცით განაწილებას, აგრეთვე ტრანსფორმატორის პარამეტრების და მოქმედი ელექტრომამოძრავებელი ძალების (ემძ) ცვლილებას. დროში სტაციონალური და გარდამავალი პროცესების განხილვისათვის მყისა მნიშვნელობების გაანგარიშების მეთოდის თანახმად, აუცილებელია გაანგარიშებული იქნას სიდიდეების მყისა მნიშვნელობები დროის ინტერვალების მიხედვით. თითოეულ ამ ცალკეულ ინტერვალებში ძალოვანი ტრანსფორმატორი იმყოფება გარდამავალ არასიმეტრიულ რეჟიმში სივრცეში მმძ და ემძ-ს განაწილების კანონის შეუცვლელად ტრანსფორმატორის ერთი და იგივე პარამეტრებისას. საწყისი პირობების დროში შეცვლისას გარდამავალი პროცესი იცვლება დროის

ინტერვალიდან ინტერვალამდე. განსაზღვრული დროის შემდეგ საწყისი პირობები პერიოდულად მეორდებიან. გარდამავალი პროცესი მყარდება და ამ რეჟიმში საკმარისია განხილული იქნას მხოლოდ პროცესის განმეორებადობის ინტერვალი [1,2,3].

სტატისტიკურ გარდამქმნელებში გარდამავალი პროცესების აღმწერ განტოლებებს ჩვეულებრივ ადგენენ უშუალოდ ფაზური ცვლადების მყისა მნიშვნელობების მიმართ. ეს განტოლებები დაიყვანებიან მუდმივ კოეფიციენტებიან დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემაზე. იმ შემთხვევაში, თუ წევის ქვესადგურში გარდამქმნელ სისტემას განვიხილავთ, როგორც ნახევარგამტარულ აგრეგატებს, ასევე საკონტაქტო ქსელისა, ლიანდაგებისა და ელმავლის წევის ძრავის ერთიან სისტემას იმპულსური მოდულაციით, მაშინ ელექტრული მანქანების (მბრუნავი ნაწილის) არსებობის გამო სისტემა ხასიათდება დროში პერიოდულად ცვალებადი პარამეტრებით. ამიტომ ფაზური ცვლადების მიმართ დაწერილი განტოლებები, როგორც ცნობილია, დაიყვანება ამოსახსნელად მეტად რთულ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემაზე. ამ გარემოებამ გამოიწვია მყისა ფაზური ცვლადების გამოყენებაზე უარის თქმა და განტოლებების გასამარტივებლად ახალი კომპლექსური რეზულტირებული საგრაგნილო ცვლადების (დენები, ძაბვები და ნაკადუმბები) შემოყვანა. ეს ცვლადები ჩაიწერება სხვადასხვა კოორდინატთა სისტემაში, ჩვენს შემთხვევაში d, q, o სისტემაში. ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის გამოყენება იწვევს ისეთ მუდმივ კოეფიციენტებიან მარტივ დიფერენციალურ განტოლებების მიღებას, რომელთა ამოხსნა შესაძლებელია ანალიზურად [4,5,6]. ვენტილურ ელექტრულ წრედებში გამოყენებულია ცვლადების სპექტალურ-ოპერატორული გარდაქმნის მეთოდი.

ჩვენს მიერ ჩატარებული სამუშაოების შედეგებიდან გამომდინარე ამ ორი მეთოდის შერწყმის საფუძველზე მიღებულია გარდამქმნელი სისტემის

სტაციონალური და გარდამავალი პროცესების გაანგარიშებისა და ანალიზის ახალი მოდერნიზებული მეთოდი, რომელშიც გამოიყენება ცვლადთა კომპლექსური და სპექტალურ-ოპერატორული გარდაქმნა. ეს მეთოდი საშუალებას იძლევა ერთდროულად გათვალისწინებული იქნას ტრანსფორმატორის ძირითადი პარამეტრები და ნახევარგამტარულ გარდამქმნელებში კომუტაციური და არასაკომუტაციო განზოგადებული ინტერვალები კომუტაციური ფუნქციების მწკრივებად დაშლის გათვალისწინებით.

**1.2. წევის სამფაზა მართვად გამმართველ აგრეგატებში
ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების გაანგარიშების
მათემატიკური მოდელირება.**

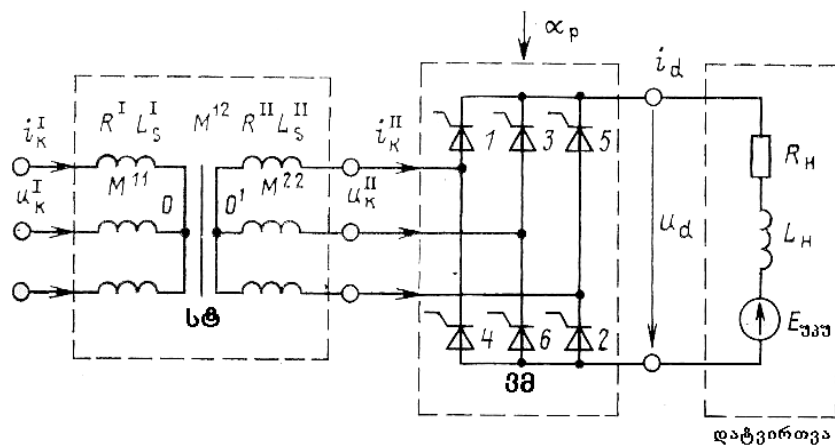
წევის ტრანსფორმატორებიდან მკვებავი სამფაზა ბოგური გამმართველები წარმოადგენენ რთულ ელექტრულ არაწრფივ ვენტილურ წრედებს. დამყარებულ და გარდამავალ ელექტრომაგნიტურ პროცესებს, ასეთ წრედებში ანგარიშობენ მეტად რთული და შრომატევადი "აკინძვის" მეთოდით [7,8,9].

ამ პარაგრაფში წარმოდგენილია სამფაზა მართვად გამმართველებში ელექტრომაგნიტური პროცესების დინამიკის ანალიზი, წევის ტრანსფორმატორის ძირითადი პარამეტრების გათვალისწინებით. ანალიზი დაფუძნებულია ნახევარგამტარულ კომუტატორიან ელექტრული მანქანების ფაზური სიდიდეების კომპლექსური გარდაქმნის გამოყენებაზე [6] და ვენტილური ელექტრული წრედების თეორიაში დამუშავებულ ცვლადთა სპექტრალურ-ოპერატორულ გარდაქმნების გამოყენებაზე [10,11]. ზოგადად მიღებული დაშვებების გათვალისწინებით და ერთდროულად ამ

ორი გარდაქმნის გამოყენება საშუალებას იძლევა არაწრფივი ამოცანა დავიყვანოთ წრფივზე და მიღებული იქნას დიფერენციალური განტოლებათა სისტემა ცვლადი კოეფიციენტებით. ყოველივე ამის შედეგად მარტივდება გარდამავალი პროცესების გაანგარიშება მართვად გამმართველიან რთულ სისტემაში [12].

გარდამქმნელ სისტემაში ავარიული და გარდამავალი პროცესების გაანგარიშებისას აუცილებელია გათვალისწინებული იქნას ტრანსფორმატორის აქტიური წინაღობები და არასიმეტრიული რეჟიმისგან გამოწვეული პარამეტრების შესაძლო ცვლილებები. ამასთან დაკავშირებით, ტრანსფორმატორის განტოლებების განხილვისას მიზანშეწონილი ხდება ფაზური ცვლადებიდან კომპლექსურზე გადასვლა, რაც ამარტივებს საწყის განტოლებებს, იძლევა საშუალებას გათვალისწინებული იქნას ფანტკის ინდუქციურობები და ტრანსფორმატორის გრაგნილების ომიური წინაღობები.

გარდამქმნელი სქემა (ნახ. 1) შედგება შემდეგი ძირითადი ელემენტებისაგან: სამფაზა ტრანსფორმატორისაგან (სტ), რომლის პირველადი გრაგნილები მიერთებულია მკვებავ ქსელთან, ვენტილურ მოწყობილობისაგან (ვმ) და ემმ-იანი აქტიურ-ინდუქციური დატვირთვისგან.



ნახ.1. სამფაზა მართვადი გამმართველიანი გარდამქმნელის სქემა.

სქემაში მიღებულია შემდეგი აღნიშვნები:

$R^I, R^{II}, L_S^I, L_S^{II}$ - სტ-ს პირველადი და მეორადი გრაგნილების წინაღობები და ფანტვის ინდუქციურობები; $E_{\text{ავ}}, R_{\text{გ}}, L_{\text{გ}}$ - დატვირთვის ე.მ.ძ., აქტიური წინაღობა და ინდუქციურობა; $i_k^I, i_k^{II}, u_k^I, u_k^{II}, (k = 1, 2, 3)$ - სტ-ს პირველადი და მეორადი გრაგნილების ფაზური დენები და ძაბვები; i_d, u_d - გარდამქმნელის გამართული დენი და ძაბვა; $M^{11}, M^{22}, M^{12} = M^{21}$ - შესაბამისად, ტრანსფორმატორის პირველადი ორი ფაზის გრაგნილებს შორის, მეორადი ორი ფაზის გრაგნილებს შორის, და პირველადი გრაგნილის ერთ ფაზასა და მეორადი გრაგნილის ერთ ფაზას შორის მაქსიმალური ურთიერთინდუქციურობები.

ანალიზისას მიღებულია შემდეგი დაშვებები: ვენტილები იდეალურია, გარდამქმნელის კომუტაციის კუთხე იცვლება $0 \leq \gamma \leq \frac{\pi}{3}$ შუალედში. გარდამქმნელის გაშვებისას გარდამავალ პროცესში ვენტილების რეგულირების კუთხე მუდმივია ($\alpha_p = \text{const}$), გამმართველი სისტემა მიერთებულია ძაბვის სამფაზა წყაროსთან:

$$u_k^I = U_m \sin[\omega t - (k-1)\frac{2\pi}{3} + \psi_u], (k = 1, 2, 3)$$

ფაზური სიდიდეების (სტ-ს პირველადი და მეორადი გრაგნილების ძაბვის, დენის, ნაკადუმბმის) მყისა მნიშვნელობებიდან ახალ ცვლადებზე გადასვლისათვის შემოგვყავს პირდაპირი გარდაქმნის სტრიქონული მატრიცები:

$$[A^n] = [e^{j\alpha_1^n}, e^{j\alpha_2^n}, e^{j\alpha_3^n}], n = I, II, \quad (1)$$

სადაც $\alpha_k^n = \alpha_0^n + (k-1)\frac{2\pi}{3}, (k = 1, 2, 3)$ - სტ-ს პირველადი და მეორადი გრაგნილების ფაზების მაგნიტური ღერძების განმსაზღვრელი კუთხეებია; $\alpha_0^n (n = I, II)$ - სტ-ს შესაბამისი გრაგნილების პირველადი ფაზისათვის ძვრის საწყისი ფაზაა.

გარდაქმნის შედეგად ახალი ცვლადებისათვის მივიღებთ კომპლექსურ სიდიდეებს. დენების, ძაბვების და ნაკადუმბების კომპლექსური მნიშვნელობებისათვის შესაბამისად გვაქვს:

$$\dot{i}^n = [A^n][i^n]; \dot{U}^n = [A^n][u^n]; \dot{\psi}^n = [A^n][\psi^n], \quad (2)$$

სადაც

$$[i^n] = [i_1^n i_2^n i_3^n]^T; [u^n] = [u_1^n u_2^n u_3^n]^T; [\psi^n] = [\psi_1^n \psi_2^n \psi_3^n]^T; (n = I, II) \quad (3)$$

აქ სიმბოლო T ნიშნავს ტრანსპონირებულ მატრიცას.

კომპლექსური სიდიდეებიდან ნამდვილი ფაზურ სიდიდეებზე უკუ გარდაქმნისათვის აუცილებელია შემოღებული იქნას ურთიერთ შეუღლებული სვეტური მატრიცები $[T]$ და $[T]^*$ []:

$$[i^n] = \frac{1}{2}[T^n]\dot{i}^n + \frac{1}{2}[T^{*n}]\dot{i}^{*n}; [u^n] = \frac{1}{2}[T^n]\dot{U}^n + \frac{1}{2}[T^{*n}]\dot{U}^{*n}; n = I, II \quad (4)$$

$$\text{სადაც} \quad [T^n] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} e^{-j\alpha_1^n} \\ e^{-j\alpha_2^n} \\ e^{-j\alpha_3^n} \end{bmatrix}; \quad [T^{*n}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} e^{+j\alpha_1^n} \\ e^{+j\alpha_2^n} \\ e^{+j\alpha_3^n} \end{bmatrix}; \quad n = I, II. \quad (5)$$

გამოვიყენოთ ეს გარდაქმნები სამფაზა ტრანსფორმატორისა და ვენტოლური მოწყობილობის რეზულტირებული კომპლექსური განტოლებების მისაღებად.

სამფაზა ტრანსფორმატორისათვის გვაქვს შემდეგი განტოლებათა სისტემა:

$$\left. \begin{aligned} u_k^I &= R^I i_k^I + \frac{d\psi_k^I}{dt} \\ -u_k^{II} &= R^{II} i_k^{II} + \frac{d\psi_k^{II}}{dt}, k = 1, 2, 3 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

(6) განტოლებათა სისტემაში ტოლობის ორივე მხარე გავამრავლოთ შესაბამისად $e^{j\alpha_k^I}$, $e^{j\alpha_k^{II}}$ -ზე, მივიღებთ კომპლექსურ ფორმაში განტოლებათა სისტემას:

$$\left. \begin{aligned} u_k^I e^{j\alpha_k^I} &= R^I i_k^I e^{j\alpha_k^I} + \frac{d}{dt}(\psi_k^I e^{j\alpha_k^I}); \\ -u_k^{II} e^{j\alpha_k^{II}} &= R^{II} i_k^{II} e^{j\alpha_k^{II}} + \frac{d}{dt}(\psi_k^{II} e^{j\alpha_k^{II}}), k = 1, 2, 3 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

(7)-ში ნაკადუმებების მყისა მნიშვნელობები ψ_k^I, ψ_k^{II} განისაზღვრებიან, როგორც განსახილველ ფაზის მაგნიტურ ღერძზე დენებისგან გამოწვეული ნაკადუმებების ვექტორების გეგმილების ჯამი:

$$\left. \begin{aligned} \psi_k^I &= L_S^I i_k^I + \sum_{n=1}^3 [M^{11} \cos(\alpha_n^I - \alpha_k^I) i_n^I + M^{12} \cos(\alpha_n^{II} - \alpha_k^I) i_n^{II}]; \\ \psi_k^{II} &= L_S^{II} i_k^{II} + \sum_{n=1}^3 [M^{22} \cos(\alpha_n^{II} - \alpha_k^{II}) i_n^{II} + M^{12} \cos(\alpha_n^I - \alpha_k^{II}) i_n^I], k = 1, 2, 3 \end{aligned} \right\} (8)$$

(7), (8) განტოლებები გამოსახულია ვექტორულ სიდიდეებში, რომელთა მოდულები განისაზღვრებიან დენების, ძაბვების და ნაკადუმებების მყისა მნიშვნელობებით, ხოლო მიმართულებები - ფაზების მაგნიტური ღერძებით. ეს განტოლებები აღწერენ სტ-ში ელექტრომაგნიტურ პროცესებს მისი ძირითადი პარამეტრების გათვალისწინებით.

გამოვიყენებთ რა ცვლადთა სპექტრალურ-ოპერატორულ გარდაქმნას, ვწერთ ვმ-ის შესავალი და გამოსავალი ელექტრული სიდიდეების მყისა მნიშვნელობებს შორის კავშირის განტოლებას [23]:

$$i_k^{II} = \rho_{ik}(t) i_d; \quad (9)$$

$$u_d = \sum_{k=1}^3 \rho_{uk}(t) u_k^{II}, k = 1, 2, 3 \quad (10)$$

სადაც $\rho_{ik}(t), \rho_{uk}(t)$ -შესაბამისად დენისა და ძაბვის მიხედვით კომუტაციური ფუნქციებია (ნახ. 2).

(7)-(10) განტოლებები წარმოადგენენ გამოსაკვლევ ვარდამქმნელი სისტემის მათემატიკურ მოდელს. ამ განტოლებების უშუალოდ ანალიზური ამოხსნა შეუძლებელია (9), (10) განტოლებების არაწრფივობის გამო, რომელშიც კომუტაციური ფუნქციები დამოკიდებულნი არიან ვენტილების კომუტაციის კუთხეზე, ხოლო კომუტაციის კუთხე, თავის მხრივ, დამოკიდებულია ვენტილებში გამავალ დენზე [13,14,15].

მიღებული (7)-(10) სისტემის მიახლოებით ანალიზური ამოხსნისათვის მივიღოთ, რომ კომუტაციის კუთხე $\gamma \leq 60^\circ$ (განვიხილავთ ვენტილური ბოგირის მუშაობის ნორმალურ რეჟიმს) და

გარდამავალი პროცესის დროს $\alpha_p = const.$ ამით კომუტაციის კუთხის ცვლილების გავლენას გარდამავალ პროცესზე უგულვებელყოფთ. ეს დაშვება, როგორც მრავალრიცხოვან გაანგარიშებამ და სხვა შედეგებთან შედარებამ გვიჩვენა, პრაქტიკულად არ ცვლის გარდამავალი პროცესების გაანგარიშების სიზუსტეს [16, 23].

დენისა და ძაბვის მიხედვით კომუტაციური ფუნქციები წარმოვადგინოთ ფურიეს მწკრივების სახეში, შესაბამისად მივიღებთ:

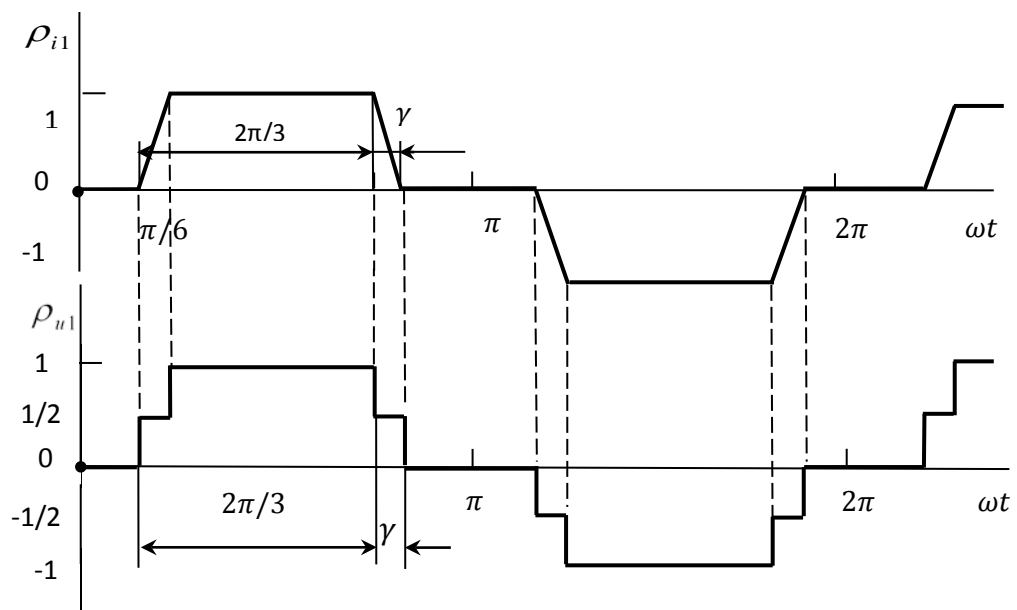
$$\rho_{ik}(t) = \frac{8}{\pi\gamma} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos \frac{n\pi}{6} \sin \frac{n\gamma}{2} \sin n(\omega t - \varphi_k); \quad (9)$$

$$\rho_{uk}(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \cos m \frac{\pi}{6} \sin \frac{m\gamma}{2} \sin m(\omega t - \varphi_k); \quad (10)$$

სადაც $k = 1, 2, 3$; n, m - ყველა კენტი რიცხვებია;

$$\varphi_1 = \alpha_p + \frac{\gamma}{2}; \quad \varphi_2 = \alpha_1 + \frac{2\pi}{3}; \quad \varphi_3 = \varphi_2 + \frac{2\pi}{3};$$

საწყისი განტოლებათა სისტემის ამოხსნისას შეიძლება გავითვალისწინოთ კომუტაციური ფუნქციების ჰარმონიკების ნებისმიერი რიცხვი, მაგრამ ჩაწერის მოცულობის შემცირებისათვის შემოვიფარგლოთ მხოლოდ ამ მწკრივების პირველი რიგის ჰარმონიკით, ე.ი. გაანგარიშება ვაწარმოოთ გამართული დენის საშუალო მნიშვნელობის მიხედვით. ამ დროს, როგორც ნაჩვენებია [20] მაღალი ჰარმონიკების უგულვებელყოფის გამო გაანგარიშების ცდომილება უმნიშვნელოა.



ნახ. 2. კომუტაციური ფუნქციების გრაფიკი

კომპუტაციური ფუნქციების ძირითადი ჰარმონიკების გათვალისწინებით (9), (10) კავშირის განტოლებები დებულობენ სახეს:

$$i_k'' = \frac{2\sqrt{3} \sin \gamma / 2}{\pi \gamma / 2} i_d \sin \left[\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right]; \quad (11)$$

$$u_d = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} \sum_{k=1}^3 u_k'' \sin \left[\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right], k = 1, 2, 3 \quad (12)$$

დატვირთვის კონტურისათვის გვაქვს

$$u_d = i_d R_{\Sigma} + L_{\Sigma} \frac{di_d}{dt} + E_{\Sigma} \quad (13)$$

მიღებული განტოლებების უშუალო ამოხსნა დენებისა და ძაბვების მყისა მნიშვნელობების მიმართ შრომატევადია. ამოხსნის გამარტივებისათვის ვიყენებთ ცვლადთა (1)-(5) კომპლექსურ გარდაქმნას. ამ შემთხვევაში სისტემაში ელექტრომაგნიტური პროცესები ხასიათდებიან პირველადი და მეორადი გრაგნილთა დენების, ძაბვებისა და ნაკადუმბების რეზულტირებული ვექტორებით:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}^I &= \sum_{k=1}^3 i_k^I e^{j\alpha_k^I}; \dot{I}^{II} = \sum_{k=1}^3 i_k^{II} e^{j\alpha_k^{II}}; \\ \dot{U}^{II} &= \sum_{k=1}^3 u_k^{II} e^{j\alpha_k^{II}}; \\ \dot{U}^I &= \sum_{k=1}^3 u_k^I e^{j\alpha_k^I} = \frac{3}{2} U_m e^{j(\omega t + \psi_u)}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

თუ (7) და (8)-დან განვსაზღვრავთ თითოეული $k = 1, 2, 3$

მნიშვნელობებისათვის u_k და ψ_k სიდიდეებს, ავჯამავთ მათ შესაბამისად და ψ_k -ს

მიღებულ გამოსახულებებს ჩავსვავთ u_k -ს განტოლებებში, მაშინ მივიღებთ:

$$\frac{3}{2} U_m e^{j(\omega t + \psi_u)} = R^I \dot{I}^I + (L_S^I + \frac{3}{2} M^{11}) \frac{d\dot{I}^I}{dt} + \frac{3}{2} M^{12} \frac{d\dot{I}^{II}}{dt}; \quad (15)$$

$$-\dot{U}^{II} = R^{II} \dot{I}^{II} + (L_S^{II} + \frac{3}{2} M^{22}) \frac{d\dot{I}^{II}}{dt} + \frac{3}{2} M^{12} \frac{d\dot{I}^I}{dt}; \quad (16)$$

ამგვარად, სამფაზა ტრანსფორმატორისათვის ცვლადთა გარდაქმნის მეშვეობით ექვსი განტოლების მაგივრად გვაქვს ორი განტოლება დენებისა და ძაბვების რეზულტირებული ვექტორების მიმართ.

(11)გავამრავლოთ $e^{j\alpha_k''}$ -ზე, ავჯამოთ k -ს მიმართ და გავითვალისწინოთ (14), რიგი გამარტივებების შემდეგ მივიღებთ:

$$j'' = \frac{3\sqrt{3} \sin \gamma / 2}{j\pi \gamma / 2} i_d e^{j(\omega t - \frac{\gamma}{2} - \alpha_p)} \quad (17)$$

(17) გამოსახულება ამყარებს კავშირს დატვირთვის დენის მყისა მნიშვნელობასა და შესავალი დენის რეზულტირებულ კომპლექსურ მნიშვნელობას შორის. (12)-ში ტრანსფორმატორის გამოსავალზე ფაზური ძაბვები შევცვალოთ რეზულტირებული ვექტორით. ამისათვის (14) გადავწეროთ შემდეგ სახეში:

$$\begin{aligned} u_1'' e^{j\alpha_1''} &= \dot{U}'' - u_2'' e^{j\alpha_2''} - u_3'' e^{j\alpha_3''}; \\ u_2'' e^{j\alpha_2''} &= \dot{U}'' - u_1'' e^{j\alpha_1''} - u_3'' e^{j\alpha_3''}; \\ u_3'' e^{j\alpha_3''} &= \dot{U}'' - u_1'' e^{j\alpha_1''} - u_2'' e^{j\alpha_2''}; \end{aligned} \quad (18)$$

(18) სისტემის თითოეული განტოლებები გავამრავლოთ შესაბამისად გამოსახულებაზე $e^{-j\alpha_k''} \sin[\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} - (k-1)\frac{2\pi}{3}]$, $k=1,2,3$ და მიღებული გამოსახულებები ავჯამოთ, ზოგიერთი გამარტივებების შემდეგ ვღებულობთ:

$$\sum_{k=1}^3 u_k'' \sin[\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} - (k-1)\frac{2\pi}{3}] = \frac{1}{2} [\dot{U}'' e^{-j(\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})} + U'' e^{j(\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})}] \quad (19)$$

(19) ჩავსვათ (12)-ში და გავითვალისწინოთ, რომ (19)-ში მარჯვენა მხარე წარმოადგენს კომპლექსურად შეუღლებული სიდიდეების ჯამს, შედეგად მივიღებთ:

$$u_d = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} \operatorname{Re} [U'' e^{-j(\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})}] \quad (20)$$

ამგვარად, მივიღეთ გამართული ძაბვის მყისა მნიშვნელობასა და სამფაზა ტრანსფორმატორის გამოსავალზე რეზულტირებულ კომპლექსურ ძაბვას შორის დამაკავშირებელი განტოლება.

(13) განტოლება და რეზულტირებული კომპლექსური სიდიდეების მიმართ მიღებული განტოლებები (15-17), (20) წარმოადგენენ გამოსაკვლევი გარდამქმნელი სისტემის სრულ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემას.

ამ განტოლებათა სისტემის ამოხსნა გვაძლევს საშუალებას განვსაზღვროთ რეზულტირებელი კომპლექსური სიდიდეები $i^I, i^{II}, \dot{U}^{II}$. თუ გამოვიყენებთ უკუგარდაქმნის მატრიცებს (4), (5), მივიღებთ შესაბამის ფაზური ცვლადების მყისა მნიშვნელობებს.

(13), (15)-(17), (20) განტოლებათა სისტემაში გამოვიყენოთ ლაპლასის ოპერატორული გარდაქმნა და ზოგიერთი ელემენტარული გარდაქმნების შემდეგ მივიღებთ გარდამქმნელი სისტემის მათემატიკურ მოდელს ოპერატორულ ფორმაში [23]:

$$\frac{3}{2} \cdot \frac{U_m e^{j\psi_u}}{P-j\omega} = Z^I(P) \cdot i^I(P) + \frac{3}{2} M^{12} P i^{II}(P); \quad (21)$$

$$-\dot{U}^{II}(P) = Z^{II}(P) \cdot i^{II}(P) + \frac{3}{2} M^{12} P i^I(P); \quad (22)$$

$$-i^{II} = \frac{3\sqrt{3} \sin \gamma / 2}{j\pi \frac{\gamma}{2}} e^{-j(\alpha_p + \frac{\gamma}{2})} I_d(p-j\omega); \quad (23)$$

$$U_d(P) = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} [e^{j(\alpha_p + \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{2})} \cdot \dot{U}^{II}(p+j\omega) + e^{-j(\alpha_p + \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{2})} \cdot \dot{U}^{II}(p-j\omega)]; \quad (24)$$

$$U_d(P) = Z_{\text{გ}}(P) \cdot I_d(P) + \frac{E_{\text{გკვ}}}{p}; \quad (25)$$

სადაც

$$\left. \begin{aligned} Z^I(P) &= R^I + (L_s^I + \frac{3}{2} M^{11})P; \\ Z^{II}(P) &= R^{II} + (L_s^{II} + \frac{3}{2} M^{22})P; \\ Z_{\text{გ}}(P) &= R_{\text{გ}} + L_{\text{გ}}(P); \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

ამ ოპერატორული განტოლებებიდან გამოვრიცხოთ უცნობები $i^{II}(P), \dot{U}^{II}(P)$.

ამისათვის (23) ჩავსვათ (21), (22)-ში და მივიღებთ:

$$\frac{3}{2} \cdot \frac{U_m e^{j\psi_u}}{P-j\omega} = Z^I(P) \cdot i^I(P) + \frac{9\sqrt{3} \sin \gamma / 2}{j2\pi \frac{\gamma}{2}} e^{-j(\alpha_p + \frac{\gamma}{2})} M^{12} P I_d(p-j\omega); \quad (27)$$

$$-\dot{U}^{II}(P) = \frac{3\sqrt{3} \sin \gamma / 2}{j\pi \frac{\gamma}{2}} e^{-j(\alpha_p + \frac{\gamma}{2})} Z^{II}(P) I_d(p-j\omega) + M^{12} P i^I(P); \quad (28)$$

(28)-დან \dot{U}^{II} გამოსახულებისათვის გვაქვს:

$$-\dot{U}^{II}(P) = Z^{II}(P) \frac{3\sqrt{3} \sin \gamma / 2}{\gamma / \pi \frac{\gamma}{2}} e^{j(\alpha_p + \frac{\gamma}{2})} I_d(P+j\omega) + \frac{3}{2} M^{12} P i^I(P); \quad (29)$$

(28)-ში P შევცვალოთ $P + j\omega$ -თი, ხოლო (29)-ში კი $P - j\omega$ -თი, შესაბამისად მივიღებთ:

$$\dot{U}''(P + j\omega) = -Z''(P + j\omega) \frac{3\sqrt{3}}{j\pi} \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2} e^{-j(\alpha_p + \gamma/2)} I_d(P) - \frac{3}{2} M^{12}(P + j\omega) I'(P + j\omega); \quad (30)$$

$$U^{*''}(P - j\omega) = Z''(P - j\omega) \frac{3\sqrt{3}}{j\pi} \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2} e^{j(\alpha_p + \gamma/2)} I_d(P) - \frac{3}{2} M^{12}(P - j\omega) I^{*'}(P - j\omega); \quad (31)$$

(30), (31) ჩავსვათ (24)-ში და არა რთული გარდაქმნის შემდეგ ვღებულობთ:

$$U_d(P) = -\frac{18}{\pi^2} \frac{\sin \gamma}{\gamma} Z'' P I_d(P) + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} \cos \frac{\gamma}{2} [e^{j(\alpha_p + \gamma/2 - \pi/2)} (P + j\omega) I'(P + j\omega) + e^{-j(\alpha_p + \gamma/2 - \pi/2)} (P - j\omega) I^{*'}(P - j\omega)]; \quad (32)$$

(27) განტოლების შეუღლებული განტოლებისათვის გვაქვს:

$$\frac{3}{2} \frac{U_m e^{-j\psi_m}}{P + j\omega} = Z'(P) \cdot I^{*'}(P) - \frac{9\sqrt{3}}{j2\pi} \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2} e^{j(\alpha_p + \gamma/2)} M^{12} P I_d(P + j\omega); \quad (33)$$

ამგვარად, (25), (27), (32), (33) ოპერატორულ განტოლებებში გამორიცხულია $i''(P), \dot{U}''(P)$ ოპერატორული სიდიდეები. ამ განტოლებათა სისტემის ამოხსნისათვის აუცილებელია ეს განტოლებათა სისტემა დაყვანილი იქნას ჯერ ერთ უცნობიან განტოლებაზე. ამ მიზნისათვის მოსახერხებელია (25), (27), (32), (33) განტოლებები გამოსახულნი იყვნენ მეტად ნელა ცვალებადი სიდიდის მიმართ, კერძოდ გამართული ძაბვის ან დენის მიმართ. ამისათვის (27)-ში p შევცვალოთ $P + j\omega$ -თი და (33)-ში კი $P - j\omega$ -ით, შესაბამისად გვაქვს:

$$I'(P + j\omega) = \frac{3}{2} \frac{U_m e^{j\psi_m}}{PZ'(P + j\omega)} - \frac{9\sqrt{3}}{j2\pi} e^{-j(\alpha_p + \gamma/2)} \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2} \frac{M^{12}(P + j\omega)}{Z'(P + j\omega)} I_d(P); \quad (34)$$

$$I^{*'}(P - j\omega) = \frac{3}{2} \frac{U_m e^{-j\psi_m}}{PZ'(P - j\omega)} + \frac{9\sqrt{3}}{j2\pi} e^{j(\alpha_p + \gamma/2)} \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2} \frac{M^{12}(P - j\omega)}{Z'(P - j\omega)} I_d(P); \quad (35)$$

სადაც

$$Z'(P + j\omega) = R' + (L'_s + \frac{3}{2} M^{11})(P + j\omega);$$

$$Z'(P - j\omega) = R' + (L'_s + \frac{3}{2} M^{11})(P - j\omega);$$

(34) და (35) ჩავსვათ (32)-ში და მიღებული განტოლებები (25)-თან ერთად ამოვხსნათ, არა რთული გარდაქმნების შედეგად მივიღებთ შემდეგ ოპერატორულ გამოსახულებებს:

$$U_d(P) = \frac{\sum_{k=0}^3 P^k (U_m a_k + E_{\text{მეშ}} b_k)}{P \sum_{k=0}^3 A_k P^k}; \quad (36)$$

$$I_d(P) = \frac{\sum_{k=0}^3 P^k (U_m c_k + E_{\text{მეშ}} d_k)}{P \sum_{k=0}^3 A_k P^k}; \quad (37)$$

(36) და (37)-ში შემავალი ექვივალენტური პარამეტრებისათვის გვაქვს შემდეგი გამოსახულებები:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} \omega M^{12} R_{\text{გ}} Z' \cos \frac{\gamma}{2} \cos(\varphi' - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} - \psi_u); \\ a_1 &= \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} \cos \frac{\gamma}{2} [R' R_{\text{გ}} \sin(\alpha_p + \frac{\gamma}{2} + \varphi_u) + \omega L_{\text{გ}} Z' \cos(\varphi' - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} - \psi_u)]; \\ a_2 &= \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} (L' R_{\text{გ}} + L_{\text{გ}} R') \cos \frac{\gamma}{2} \sin(\alpha_p + \frac{\gamma}{2} + \psi_u); \\ a_3 &= \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} L' L_{\text{გ}} \cos \frac{\gamma}{2} \sin(\alpha_p + \frac{\gamma}{2} + \psi_u); \\ c_0 &= \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} Z' \cos \frac{\gamma}{2} \sin(\varphi' - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} - \psi_u); \\ c_1 &= \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} L' \cos \frac{\gamma}{2} \sin(\alpha_p + \frac{\gamma}{2} + \psi_u); \\ d_0 &= (Z')^2; d_1 = 2R' L'; d_2 = (L')^2; L' = L'_s + \frac{3}{2} M^{11}; L'' = L''_s + \frac{3}{2} M^{22}; \\ \varphi_1 &= \arctg \frac{\omega L'}{R'}; Z' = \sqrt{(R')^2 + (\omega L')^2}; \\ b_0 &= \frac{18}{\pi^2} \frac{\sin \gamma}{\gamma} [(\frac{3}{2} \omega M^{12})^2 R' + (\omega L')^2 R'']; \\ b_1 &= \frac{18}{\pi^2} \frac{\sin \gamma}{\gamma} [2R' L' R'' + (\omega L')^2 L'' + (\frac{3}{2} \omega M^{12})^2 L']; \\ b_2 &= \frac{18}{\pi^2} \frac{\sin \gamma}{\gamma} [R'' (L')^2 + 2R' L' L'' - (\frac{3}{2} M^{12})^2 R']; \\ b_3 &= \frac{18}{\pi^2} \frac{\sin \gamma}{\gamma} [L' L'' - (\frac{3}{2} M^{12})^2 L']; \\ A_0 &= R_{\text{გ}} (Z')^2 + \frac{18}{\pi^2} \frac{\sin \gamma}{\gamma} [R'' (Z')^2 + R' (\frac{3}{2} \omega M^{12})^2]; \\ A_1 &= 2R' R_{\text{გ}} L' + L_{\text{გ}} (Z')^2 + \frac{18}{\pi^2} \frac{\sin \gamma}{\gamma} [2R' L' R'' + L'' (Z')^2 - (\frac{3}{2} \omega M^{12})^2 L']; \\ A_2 &= 2R' L' L_{\text{გ}} + R_{\text{გ}} (L')^2 + \frac{18}{\pi^2} \frac{\sin \gamma}{\gamma} [2R' L' L'' + (L')^2 R'' - (\frac{3}{2} M^{12})^2 R']; \\ A_3 &= (L')^2 L_{\text{გ}} + \frac{18}{\pi^2} \frac{\sin \gamma}{\gamma} L' [L' L'' - (\frac{3}{2} M^{12})^2]; \end{aligned}$$

ამგვარად, მიღებულია საწყისი დიფერენციალური განტოლებების ამონახსნი ოპერატორულ ფორმაში. (36), (37)-ში დაშლის თეორემის გამოყენება მოგვცემს საშუალებას განვსაზღვროთ გამართული ძაბვა და გამართული დენი, როგორც გარდამავალ, ასევე დამყარებულ რეჟიმებში წრედის ყველა ძირითადი პარამეტრების გათვალისწინებით. (36), (37)-ში ვისარგებლოთ ლაპლასის ზღვრული თეორემით და მივიღებთ გამართული ძაბვისა და გამართული დენის გამოსახულებებს დამყარებული რეჟიმისათვის:

$$U_{d, \text{დაბყ}} = U_{d^0} \frac{\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)}{2 \left(\frac{kZ'}{\frac{3}{2}\omega M^{12}} + \frac{k_s R_s}{R_g} \right)} + E_{\text{მპმ}} \frac{\frac{2}{3}k_s \left[\left(\frac{\frac{3}{2}\omega M^{12}}{Z'} \right)^2 R' + \left(\frac{\omega L'}{Z'} \right)^2 R'' \right]}{R_g + \frac{2}{3}k_s \left[\left(\frac{\frac{3}{2}\omega M^{12}}{Z'} \right)^2 R' + R'' \right]}; \quad (38)$$

$$I_{d, \text{დაბყ}} = U_{d^0} \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2 \left(\frac{kZ' R_g}{\frac{3}{2}\omega M^{12}} + k_s R_s \right)} - \frac{E_{\text{მპმ}}}{R_g} \cdot \frac{R_g + \frac{2}{3}k_s R'' \left[1 - \left(\frac{\omega L'}{Z'} \right)^2 \right]}{R_g + \frac{2}{3}k_s R'' \left[1 + \frac{R'}{R''} \left(\frac{\frac{2}{3}\omega M^{12}}{Z'} \right)^2 \right]}; \quad (39)$$

სადაც

$$\left. \begin{aligned} k_s &= \frac{27 \sin \gamma}{\pi^2 \gamma}; R_s = R' \frac{\omega M^{12}}{Z'}; k = 1 + \frac{2}{3}k_s \frac{R''}{R_g} \\ \alpha &= \alpha_p + \varphi_u - \varphi'; U_{d^0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_m \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

φ', Z' -ის მნიშვნელობები მოცემულია ექვივალენტური პარამეტრების გამოსახულებებთან ერთად. ბევრ პრაქტიკულ შემთხვევაში $R' \ll \omega L', L'_s \ll \frac{3}{2}M^{11}, R'' \ll \omega L'', L''_s \ll \frac{3}{2}M^{22}$ და (38), (39) გამოსახულებები შეიძლება გამარტივდეს:

$$U_{\text{დაბყ}} = \mu U_{d^0} \cdot \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2}; \quad (41)$$

$$U_{\text{დაბყ}} = \mu \frac{V_{d^0}}{R_g} \cdot \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2} - \frac{E_{\text{მპმ}}}{R_g}; \quad (42)$$

(41), (42)-ში μ კოეფიციენტი ახასიათებს გარდამქმნელი ტრანსფორმატორის გრაგნილებს შორის მაგნიტურ კავშირს: $\mu = M^{12}/M^{11}$;

თუ განვიხილავთ ზღვრულ შემთხვევას, როცა სამფაზა ტრანსფორმატორის პირველადი და მეორადი კონტურები განთავსებულია იმდენად ახლოს, რომ

ურთიერთინდუქციისა და თვითინდუქციის ნაკადები პირველად მხარეში ურთიერთ კომპენსირდება, მაშინ (41), (42)-ში შეიძლება დავუშვათ $\mu = 1$ და მაშინ მივიღებთ [17]:

$$U_{\text{დაჰყ}} = U_{d^0} \cdot \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2}; \quad (43)$$

$$I_{\text{დაჰყ}} = \frac{U_{d^0}}{R_{\text{გ}}} \cdot \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2} - \frac{E_{\text{დაჰყ}}}{R_{\text{გ}}}; \quad (44)$$

(43), (44) გამოსახულებები სრულიად ემთხვევიან ტრანსფორმატორის პარამეტრების გარეშე მიღებულ ცნობილ გამოსახულებებს [21, 22].

ამგვარად, მიღებულია მართვადი ვენტილებიანი გარდამქმნელი სისტემის დენებისა და ძაბვების ზოგადი ანალიზური გამოსახულებები ტრანსფორმატორის დიფერენციალური განტოლებებისა და ძირითადი პარამეტრების გათვალისწინებით [24, 25].

მოვახდინოთ მიღებული თეორიული შედეგების პრაქტიკული გაანგარიშებისათვის გამოყენების ილუსტრაცია კონკრეტულ მაგალითი 1-ზე:

განვიხილოთ გარდამქმნელი სისტემის გაშვებისას გარდამავალი პროცესების გაანგარიშება შემდეგი პარამეტრების გათვალისწინებით:

$$R^I = 0.878 \text{ომ}; \quad R^{II} = 0.561 \text{ომ}; \quad L_S^I = 732 \cdot 10^{-5} \text{ჰნ};$$

$$L_S^{II} = 251 \cdot 10^{-5} \text{ჰნ}; \quad M^{11} = M^{22} = M^{12} = 579 \cdot 10^{-5} \text{ჰნ};$$

$$R_{\text{გ}} = 16 \text{ომ}; \quad L_{\text{გ}} = 115 \cdot 10^{-3} \text{ჰნ}; \quad E_{\text{დაჰყ}} = 34 \text{ვ}; \quad \alpha_p = \frac{\pi}{9};$$

$$\psi_u = \frac{\pi}{6}; \quad \gamma = \frac{\pi}{18}; \quad U_m = \sqrt{2}U = \sqrt{2} \cdot 200 \approx 310 \text{ვ};$$

გაანგარიშების შემდეგ ვღებულობთ ექვივალენტური პარამეტრების (კოეფიციენტების) მნიშვნელობებს:

$$a_0 = 16 \cdot 10^{+5}; \quad a_1 = 1.15 \cdot 10^4; \quad a_2 = 16.2; \quad a_3 = 0.12;$$

$$b_0 = 19.3 \cdot 10^4; \quad b_1 = 1.55; \quad b_2 = 1.9; \quad b_3 = 0;$$

$$A_0 = 11.83 \cdot 10^5; \quad A_1 = 8.28 \cdot 10^3; \quad A_2 = 14.3;$$

$$A_3 = 0.09; \quad C_0 = 10.1 \cdot 10^4; \quad C_2 = 1; \quad C_2 = 1.02;$$

$$d_0 = 73.9 \cdot 10^3; \quad d_1 = 1.5; \quad d_2 = 0.75; \quad L^I = L^{II} = 0.87;$$

$$\psi^I = \frac{\pi}{2}; \quad Z^I = 272.7 \text{ომ}; \quad k_S = 2.7; \quad k = 1.06;$$

$$R_s = 0.6 \text{ომ}; \quad U_{d0} = 512.3$$

ამ მნიშვნელობების ჩასმა (36), (37)-ში გვაძლევს:

$$U_d(p) = \frac{413p^3 + 56,5 \cdot 10^3 p^2 + 40 \cdot 10^6 p + 55,8 \cdot 10^8}{p(p^3 + 159p^2 + 92 \cdot 10^3 p + 131,4 \cdot 10^5)}; \quad (45)$$

$$I_d(p) = \frac{3 \cdot 10^3 p^2 + 3 \cdot 10^3 p + 32 \cdot 10^7}{p(p^3 + 159p^2 + 92 \cdot 10^3 p + 131,4 \cdot 10^5)}; \quad (46)$$

(45), (46)-ში მახასიათებელი განტოლების ფესვებისათვის გვაქვს შემდეგი მნიშვნელობები:

$$p_0 = 0; \quad p_1 = -145,9 \frac{1}{\text{წმ}};$$

$$p_{2,3} = -\delta \pm j\beta = -6.5 \pm j300 \frac{1}{\text{წმ}}; \quad (47)$$

(45), (46) გამოსახულებებისათვის გამოვიყენოთ დაშლის თეორემა და გავითვალისწინოთ (47), შესაბამისად არა რთული გარდაქმნების შემდეგ მივიღებთ:

$$i_d(t) = 24.35 - 24.34e^{p_1 t} - 1.29e^{-\delta t} \cos(\beta t - \frac{\pi}{2}); \quad (48)$$

$$u_d(t) = 424.7 - 19.6e^{p_1 t} - 36.6e^{-\delta t} \cos(\beta t - \frac{\pi}{6}); \quad (49)$$

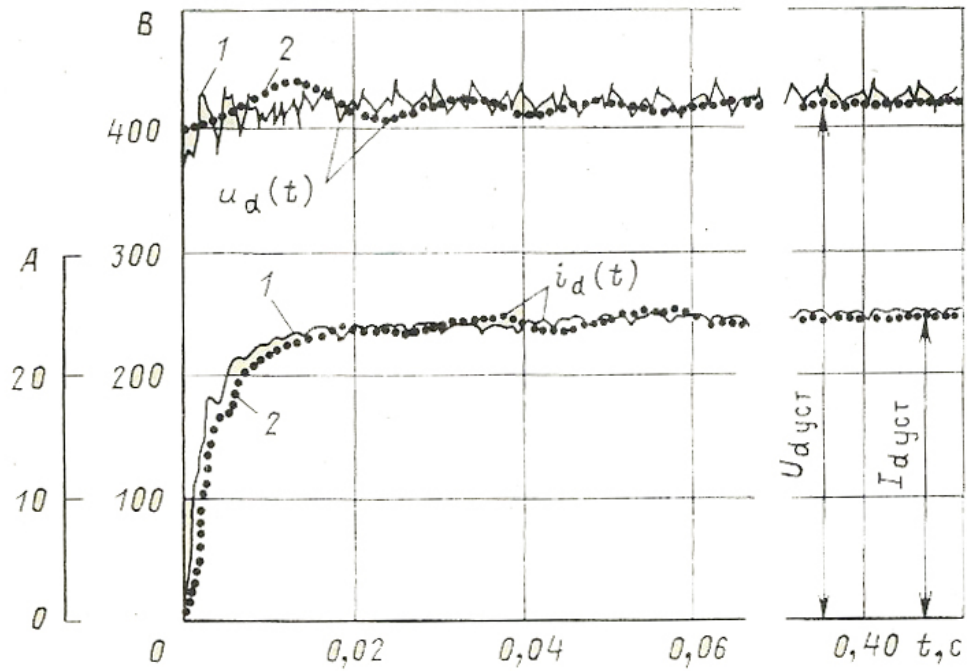
$$\text{სადაც } \delta = 6.5 \frac{1}{\text{წმ}}; \quad \beta = 300 \frac{1}{\text{წმ}};$$

(48), (49)-დან $t=0$ მომენტისათვის გვაქვს $V_d(0) = 413\text{ვ}; \quad i_d(0) = 0$; ხოლო $t = \infty$ მომენტისათვის (დამყარებულ რეჟიმში) გვაქვს

$$u_d(\infty) = u_{d\text{დაბ.}} = 427.7\text{ვ}; \quad i_d(\infty) = i_{d\text{დაბ.}} = 24.35\text{ა};$$

როგორც (48), (49)-დან ჩანს, წრედის განსაზღვრული პარამეტრებისათვის დანადგარის გაშვებისას გამართული ძაბვა და დენი გარდამავალ პროცესში ახასიათებენ მიღევად რხევით პროცესებს.

ნახ. 3-ზე ნაჩვენებია გარდამავალი პროცესების საანგარიშო მრუდები-2 და შესაბამის ოსცილოგრამული მრუდები, გადაღებული ექსპერიმენტულად - 1. [23].



ნახ.3. მართვად გამმართველ გარდამქმნელის გაშვებისას გამართული ძაბვის $u_d(t)$ და გამართული $i_d(t)$ დენის გარდამავალი პროცესების მრუდები: 1-ექსპერიმენტალური; 2-გაანგარიშებით.

1.3. წევის სამფაზა მართვად გამმართველ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების კომპიუტერული მოდელირება.

(11÷20) განტოლებების ზოგიერთი მათემატიკური გარდაქმნების საფუძველზე ვღებულობთ რეზულტირებული ცვლადების d , q მდგენელების მიმართ შემდეგ განტოლებათა სისტემას მატრიცულ ფორმაში:

$$\left\| \begin{array}{l} \frac{3}{2} U_m \cos(\omega t + \psi_u) - R^l I_d^l - X_m^y \cos(\omega t - \frac{\gamma}{2} - \alpha_p) i_d \\ \frac{3}{2} U_m \sin(\omega t + \psi_u) - R^l I_q^l - X_m^y \sin(\omega t - \frac{\gamma}{2} - \alpha_p) i_d \\ E_{\text{მავ}} + R_{\text{გ}}^y i_d \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{ccc} L^l & 0 & M_y^{12} \sin(\omega t - \frac{\gamma}{2} - \alpha_p) \\ 0 & L^l & -M_y^{12} \cos(\omega t - \frac{\gamma}{2} - \alpha_p) \\ -M_{yd}^{12} \cos(\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2}) & -M_{yd}^{12} \sin(\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2}) & -L_{\text{გ}}^y \end{array} \right\| \times \left\| \begin{array}{l} dI_d^l / dt \\ dI_q^l / dt \\ di_d / dt \end{array} \right\| \quad (50)$$

სადაც (50)-ში შემავალი ექვივალენტური პარამეტრებისათვის გვაქვს შემდეგი გამოსახულებები:

$$\begin{aligned} R_{\text{გ}}^y = R_{\text{გ}} &= -\frac{18}{\pi^2} \frac{\sin \gamma}{\gamma} R''; & M_{yd}^{12} &= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} M^{12}; & L^l &= L_s^l + \frac{3}{2} M^{11}; \\ L_{\text{გ}}^y = L_{\text{გ}} &+ \frac{18}{\pi^2} \frac{\sin \gamma}{\gamma} (L_s^l + \frac{3}{2} M^{22}); & X_m^y &= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2} \omega (L_s^l + \frac{3}{2} M^{22}); \\ M_y^{12} &= \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2} M^{12}; \end{aligned} \quad (51)$$

(50) განტოლებათა სისტემის ამოხსნა დენის წარმოებულების მიმართ გვაძლევს შემდეგ დიფერენციალურ გამოსახულებებს მატრიცულ ფორმაში :

$$\left\| \begin{array}{l} \frac{dI_d^l}{dt} \\ \frac{dI_q^l}{dt} \\ \frac{di_d}{dt} \end{array} \right\| = \frac{1}{\Delta(t)} \left\| \begin{array}{ccc} -R^l a_1(t) & R^l b_1(t) & -[X_m^y \sqrt{a_1^2(t) + b_1^2(t)} \cdot \cos(\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} + \arctg \frac{b_1(t)}{a_1(t)} + R_{\text{გ}}^y c_1(T))] \\ -R^l b_2(t) & -R^l a_2(t) & c_2(t) \\ -R^l b_3 & -R^l c_3(t) & d_1 \end{array} \right\| \times \left\| \begin{array}{l} I_d^l \\ I_q^l \\ i_d \end{array} \right\| + \frac{E_{\text{მავ}}}{\Delta(t)} \left\| \begin{array}{l} -c_1(t) \\ 0 \\ (L^l)^2 \end{array} \right\| + \frac{3}{2} \cdot \frac{U_m}{\Delta(t)} \left\| \begin{array}{l} \sqrt{a_1^2(t) + b_1^2(t)} \cdot \cos[\omega t + \psi_u + \arctg \frac{b_1(t)}{a_1(t)}] \\ \sqrt{a_2^2(t) + b_2^2(t)} \cdot \sin[\omega t + \psi_u + \arctg \frac{b_2(t)}{a_2(t)}] \\ a_3 \end{array} \right\|, \quad (52)$$

სადაც (52)-ში ექვივალენტური დროში ცვლადი კოეფიციენტებისათვის ვღებულობთ შემდეგ საანგარიშო მნიშვნელობებს :

$$\left. \begin{aligned} a_1(t) &= -L^l L_{\text{გ}}^y - M_y^{12} M_{yd}^{12} \cdot \frac{1}{2} \sin 2(\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2}); \\ a_2(t) &= \frac{1}{2} M_y^{12} M_{yd}^{12} \sin 2(\omega t - \frac{\gamma}{2} - \alpha_p) - L^l L_{\text{გ}}^y; \\ a_3 &= L^l M_{yd}^{12} \cos(\psi_u + \alpha_p + \frac{\gamma}{2}); \end{aligned} \right\} \quad (53)$$

$$\left. \begin{aligned} b_1(t) &= M_y^{12} M_{yd}^{12} \sin^2(\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2}); \\ b_2(t) &= M_y^{12} M_{yd}^{12} \cos^2(\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2}); \\ b_3(t) &= L' M_{yd}^{12} \cos(\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2}); \end{aligned} \right\} \quad (54)$$

$$c_1(t) = L' M_y^{12} \sin(\omega t - \frac{\gamma}{2} - \alpha_p);$$

$$c_2(t) = L' \sqrt{(L_g^y \cdot X_m^y)^2 + (M_y^{12} \cdot R_H^y)^2} \cdot \sin(\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} - \arctg M_y^{12} \frac{R_g^y}{X_m^y L_g^y}) + M_y^{12} M_{yd}^{12} X_m^y \times \\ \times \cos 2(\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2}) \cos(\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2});$$

$$c_3(t) = L' M_{yd}^{12} \sin(\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2});$$

$$d_1 = L' (L' R_g^y - X_m^y M_{yd}^{12}); \quad (55)$$

(52)-ში სისტემის განმსაზღვრელი $\Delta(t)$ წარმოადგენს (50) სისტემის დეტერმინანტს :

$$\Delta(t) = \begin{vmatrix} L' & 0 & M_y^{12} \sin(\omega t - \frac{\gamma}{2} - \alpha_p) \\ 0 & L' & -M_y^{12} \cos(\omega t - \frac{\gamma}{2} - \alpha_p) \\ -M_{yd}^{12} \cos(\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2}) & -M_{yd}^{12} \sin(\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2}) & -L_g^y \end{vmatrix} = -(L')^2 L_g^y \quad (56)$$

(52), (56)-დან ჩანს, რომ $\Delta(t)$ არ არის დროზე დამოკიდებული , არასოდეს იგი ნულის ტოლი არ შეიძლება გახდეს და შესაბამისად ექსპლუატაციის პირობებში დენის წარმოებულები უსასრულო დიდი სიდიდეები არ ხდებიან. ეს იმას ნიშნავს , რომ მართვად სამფაზა გამმართველებში ვენტილების კომუტაციისას კომუტაციურ გადაძაბვებს ადგილი არ აქვს.

(52)-დან თითოეული დენებისათვის ვლემულობთ დენების შემდეგ ინტეგრალურ გამოსახულებებს:

$$I_d^i(t) = \frac{1}{\Delta(t)} \int_0^t \{ -R' a_1(t) I_d^i(t) + R' b_1(t) I_d^i(t) - \\ - [X_m^y \sqrt{a_1^2(t) + b_1^2(t)} \cos(\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} + \arctg \frac{b_1(t)}{a_1(t)}) + R_g^y \cdot c_1(t)] i_d(t) - E_{\text{კვთ}} \cdot c_1(t) + \frac{3}{2} U_m \sqrt{a_1^2(t) + b_1^2(t)} \times \\ \times \cos[\omega t + \psi_u + \arctg \frac{b_1(t)}{a_1(t)}] \} dt + I_d^i(0); \quad (57)$$

$$I'_d(t) = \frac{1}{\Delta(t)} \int_0^t \left\{ -R^l b_2(t) I'_d(t) - R^l a_2(t) I'_q(t) + c_2(t) i_d(t) + \frac{3}{2} U_m \sqrt{a_2^2(t) + b_2^2(t)} \sin[\omega t + \psi_u + \arctg \frac{b_2(t)}{a_2(t)}] \right\} \times dt + I'_q(0); \quad (58)$$

$$i_d(t) = \frac{1}{\Delta(t)} \int_0^t \left\{ -R^l b_3(t) I'_d(t) - R^l \cdot c_3(t) I'_q(t) + d_1 i_d(t) + E_{\text{გაგ}} (L')^2 + \frac{3}{2} U_m \cdot a_3 \right\} dt + i_d(0); \quad (59)$$

ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის თანახმად წევრის გამმართველი ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილების ფაზური დენების მყისა მნიშვნელობებისათვის გვაქვს შემდეგი გამოსახულებები :

$$i'_k(t) = \frac{2}{3} [I'_d(t) \cos \alpha'_k + I'_q(t) \sin \alpha'_k], (k=1,2,3...) \quad (60)$$

სადაც k - ფაზათა ნომერია.

(57)-(59) -ში ჩაწერის შემოკლების მიზნით ექვივალენტური ცვლადი პარამეტრებისათვის შემოვიღოთ შემდეგი აღნიშვნები :

$$a'_d(t) = R^l a_1(t); \quad a'_q(t) = R^l b_1(t);$$

$$a_d(t) = [X_m^y \sqrt{a_1^2(t) + b_1^2(t)} \cdot \cos(\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} + \arctg \frac{b_1(t)}{a_1(t)} + R_{\text{გ}}^y \cdot c_1(t)];$$

$$a_E(t) = c_1(t); \quad a_u(t) = \sqrt{a_1^2(t) + b_1^2(t)} \cdot \cos(\omega t + \psi_u + \arctg \frac{b_1(t)}{a_1(t)}]; \quad (61)$$

$$b'_d(t) = R^l b_2(t); \quad b'_q(t) = R^l a_2(t); \quad b_d(t) = c_2(t);$$

$$b_u(t) = \sqrt{a_2^2(t) + b_2^2(t)} \sin[\omega t + \psi_u + \arctg \frac{b_2(t)}{a_2(t)}]; \quad (62)$$

$$c'_d(t) = R^l b_3(t); \quad c'_q(t) = R^l c_3(t); \quad c_d(t) = d_1; \quad c_E(t) = (L')^2; \quad c_u(t) = a_3; \quad (63)$$

(61)-(63) -ის გათვალისწინებით (57)-(59) გამოსახულებები ჩაიწერება შემდეგ სახეში:

$$I'_d(t) = \frac{1}{\Delta(t)} \int_0^t [-a'_d(t) \cdot I'_d(t) + a'_q(t) I'_q(t) - a_d(t) \cdot i_d(t) - a_E(t) E_{\text{გაგ}} + \frac{3}{2} U_m \cdot a_u(t)] dt + I'_d(0); \quad (64)$$

$$I'_q(t) = \frac{1}{\Delta(t)} \int_0^t [-b'_d(t) I'_d(t) - b'_q(t) I'_q(t) + b_d(t) \cdot i_d(t) + \frac{3}{2} U_m b_u(t)] dt + I'_q(0); \quad (65)$$

$$i_d(t) = \frac{1}{\Delta(t)} \int_0^t [-c'_d(t) \cdot I'_d(t) - c'_q(t) I'_q(t) + c_d(t) i_d(t) + E_{\text{გაგ}} c_E(t) + \frac{3}{2} U_m c_u(t)] dt + i_d(0); \quad (66)$$

(16)-ში შემოვიღოთ აღნიშვნა :

$$\rho_k^B(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \sin[\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} - (k-1) \frac{2\pi}{3}]; \quad (67)$$

მაშინ ტრანსფორმატორის მეორადი გრგნილების ფაზური დენებისათვის გვაქვს :

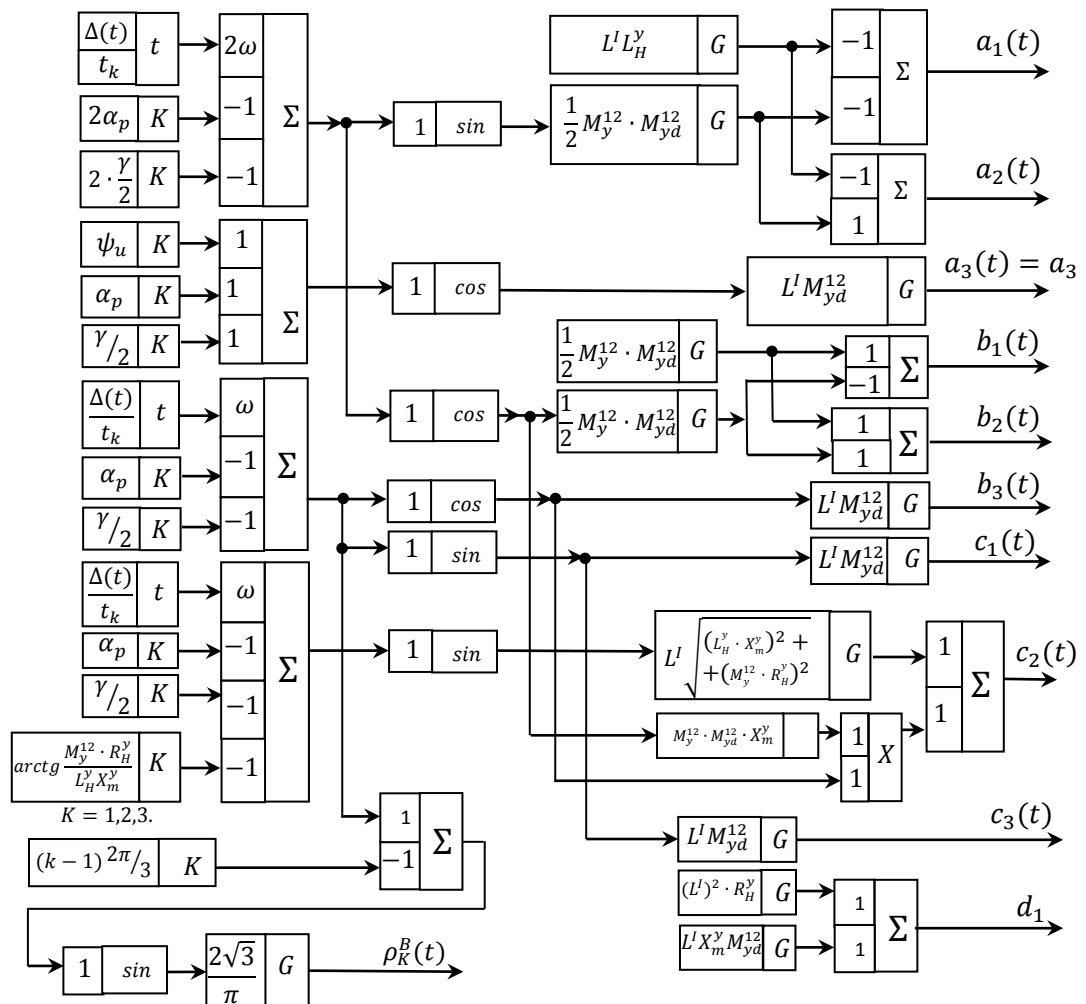
$$i_k''(t) = \rho_k^B(t) i_d(t); \quad (68)$$

1.4. წევის სამფაზა მართვად გამმართველებში კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის პირობების დადგენა.

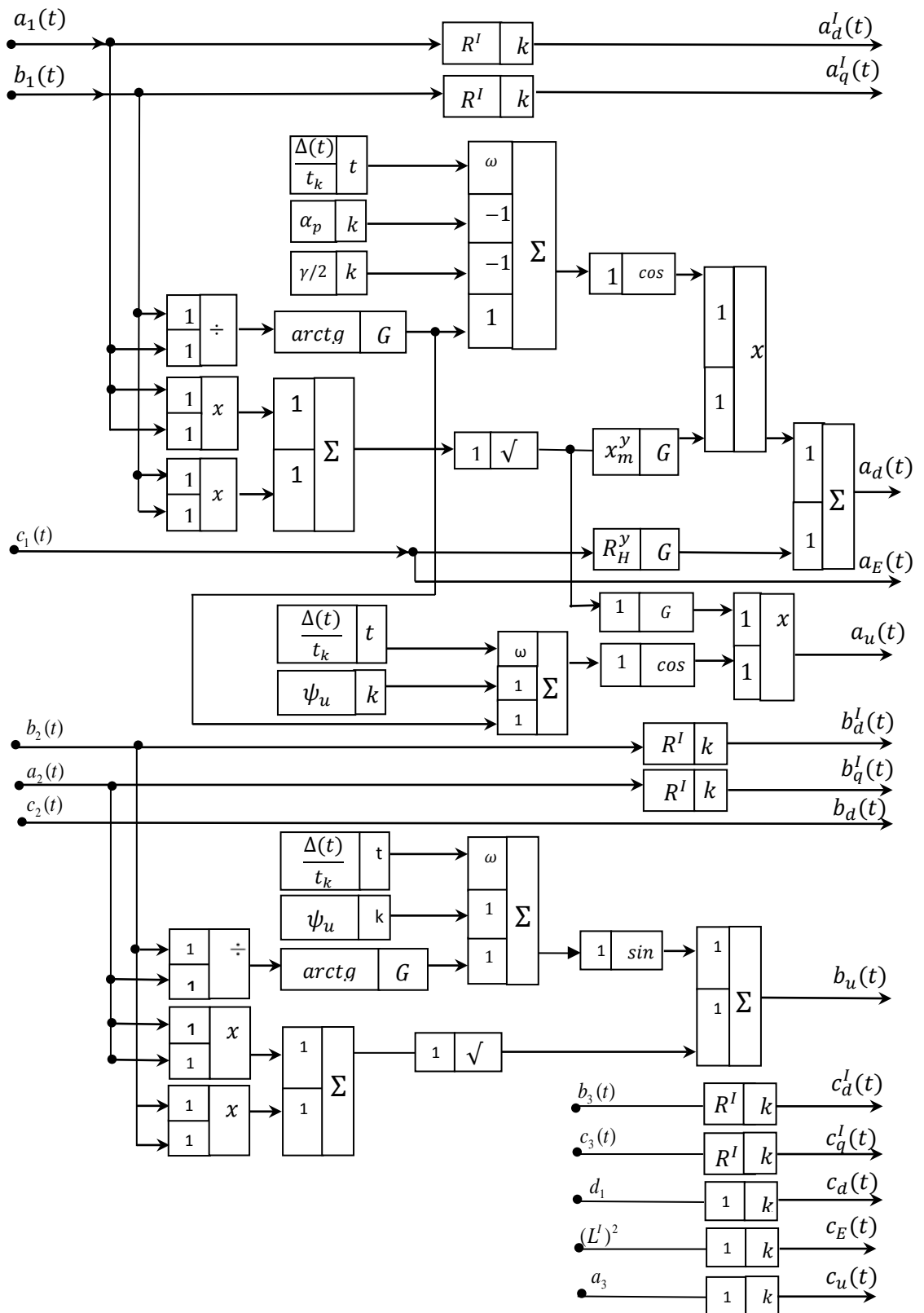
გამმართველ აგრეგატებში კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის სასურველი პირობების დადგენისათვის საჭიროა მთელი გარდამქმნელი სისტემისათვის შედგეს ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის საფუძველზე განტოლებათა სისტემა რეზულტირებული კომპლექსური დენების მიმართ (50). ამის შემდეგ ამოიხსნას (50) განტოლება დენების წარმოებულების მიმართ, როგორც უცნობები. შედეგად მივიღებთ დენების წარმოებულების (52) გამოსახულებებს. მასში შემავალი სისტემის $\Delta(t)$ განმსაზღვრელი ზოგადად არ უნდა იყოს ნულის ტოლი, წინააღმდეგ შემთხვევაში დენების წარმოებულები ხდებიან უსასრულო დიდი სიდიდეების. შესაბამისად სათანადო ინდუქციურობებზე ნამრავლიც გვადლევს გადაძაბვების უსასრულო სიდიდეებს. ჩვენს შემთხვევაში, როცა საქმე გვაქვს გამმართველ აგრეგატებთან, (56) გამოსახულების თანახმად $\Delta(t) = -(L')^2 \cdot L_{\Sigma}^y \neq 0$ ე.ი. კომუტაციურ გადაძაბვებს ადგილი არ აქვს [26,27].

1.5. წევის სამფაზა მართვად გამმართველებში გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემების აგება.

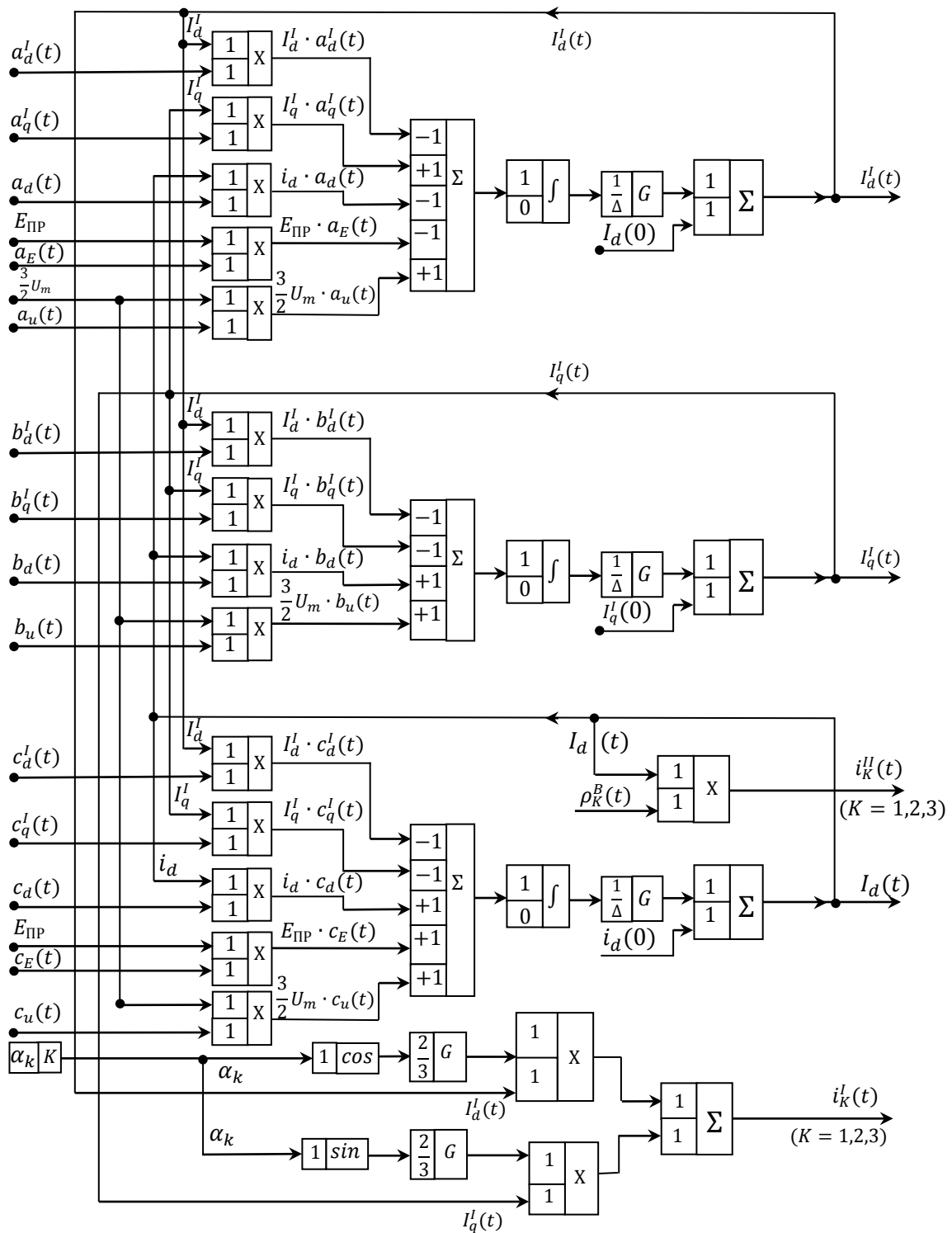
(64)-(68) გამოსახულებებში გავითვალისწინოთ მათემატიკური ოპერაციების სტრუქტურული მოდელის ელემენტები და მათი თვისებები. ამით შევძლებთ ექვივალენტური ცვლადი პარამეტრების და კოეფიციენტების მოდელის სტრუქტურული სქემების აგებას. საბოლოოდ შესაძლებელია ავაგოთ საძიებელი ელექტრული სიდიდეების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა. (ნახ.4-ნახ.6).



ნახ. 4. გარდამქმნელი სისტემის ექვივალენტური ცვლადი პარამეტრების მოდელის სტრუქტურული სქემა[(ნახ.4-6)-ზე მოყვანილი სქემის ბლოკებში ნაჩვენები პარამეტრების ქვედა H ინდექსები აღნიშნავს დატვირთვის პარამეტრებს].



ნახ. 5. გარდამქმნელი სისტემის ექვივალენტური ცვლადი პარამეტრების მოდელის სტრუქტურული სქემა.



ნახ. 6. გამმართველი გარდამქმნელი სისტემის გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა.

**1.6. წევის სამფაზა მართვად გამმართველ აგრეგატებში
ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მდგომარეობათა
ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნა დატვირთვის გაშვებისა
და წევის რეჟიმებში.**

(64)-(66) ინტეგრალური გამოსახულებების გაწარმოებით ვღებულობთ:

$$\left\| \frac{dI^B(t)}{dt} \right\| = \|A^B(t)\| \times \|I^B(t)\| + \|B^B(t)\| E_{\text{გაგ}} + \|C^B(t)\| \frac{3}{2} U_m^c; \quad (69)$$

სადაც (69)- ში შემავალი მატრიცებისათვის გვაქვს :

$$\left\| \frac{dI^B(t)}{dt} \right\| = \left\| \begin{array}{c} dI_d^I(t)/dt \\ dI_q^I(t)/dt \\ di_d(t)/dt \end{array} \right\|; \quad \|I^B(t)\| = \left\| \begin{array}{c} I_d^I(t) \\ I_q^I(t) \\ i_d(t) \end{array} \right\|; \quad \|B^B(t)\| = \left\| \begin{array}{c} -a_E(t) \\ \Delta(t) \\ 0 \\ c_E(t) \\ \Delta(t) \end{array} \right\|;$$

$$\|C^B(t)\| = \left\| \begin{array}{c} a_u(t)/\Delta(t) \\ b_u(t)/\Delta(t) \\ c_u(t)/\Delta(t) \end{array} \right\|; \quad \|A^B(t)\| = \left\| \begin{array}{ccc} -\frac{a_d^I(t)}{\Delta(t)} & \frac{a_q^I(t)}{\Delta(t)} & -\frac{a_d(t)}{\Delta(t)} \\ -\frac{b_d^I(t)}{\Delta(t)} & -\frac{b_q^I(t)}{\Delta(t)} & \frac{b_d(t)}{\Delta(t)} \\ -\frac{c_d^I(t)}{\Delta(t)} & -\frac{c_q^I(t)}{\Delta(t)} & \frac{c_d(t)}{\Delta(t)} \end{array} \right\| \quad (70)$$

(69) მატრიცული განტოლების ამოხსნას ვეძებთ ასეთ სახეში :

$$\|I^B(t)\| = e^{\|A^B(t)\|t} \cdot \|K^B(t)\|; \quad (71)$$

(71)-ში $K^B(t)$ არის დროის ნამდვილი ცვლადის ფუნქცია. ჩავსვათ (71) გამოსახულება (69) განტოლებაში , შესაბამისად მივიღებთ:

$$\frac{d\|K^B(t)\|}{dt} = -\|F^B(t)\| \cdot \|K^B(t)\| + \|\phi^B(t)\|; \quad (72)$$

სადაც (72)-ში $\|F^B(t)\|$ და $\|\phi^B(t)\|$ ცვლადი ექვივალენტური კოეფიციენტებისათვის გვაქვს:

$$\|F^B(t)\| = \frac{d\|A^B(t)\|}{dt} t; \quad \|\phi^B(t)\| = e^{-\|A^B(t)\|t} \cdot [\|B^B(t)\| E_{\text{გაგ}} + \|C^B(t)\| \cdot \frac{3}{2} U_m^c]; \quad (73)$$

(72)-ში ჩაწერის შემოკლების მიზნით მარჯვენა ნაწილი აღვნიშნოთ $\|f^B(t)\|$ -თი:

$$\|f^B(t)\| = -\|F^B(t)\| \cdot \|K^B(t)\| + \|\phi^B(t)\|; \quad (74)$$

(74)-ის გათვალისწინებით(72) გადაიწერება შემდეგნაირად:

$$\frac{d\|K^B(t)\|}{dt} = \|f^B(t)\|; \quad (75)$$

$\|f^B(t)\|$ ფუნქცია (74)-ის გათვალისწინებით დავშალოთ ტეილორის (მაკლერონის) მწკრივად $t = t_0 = 0$ წერტილის ირგვლივ და შევჩერდეთ პირველი სამ წევრზე, შესაბამისად მივიღებთ:

$$\|f^B(t)\| = \|f_0^B\| + \|f_1^B\| \cdot t + \frac{1}{2} \|f_2^B\| \cdot t^2 + \dots; \quad (76)$$

$$\text{სადაც } \|f_0^B\| = \|B^B(t)\|_{t=0} \cdot E_{\text{მკმ}} + \|C^B(t)\|_{t=0} \cdot \frac{3}{2} U_m^c; \quad (77)$$

(77)-ში გავითვალისწინოთ (70)-(61), (63), და შესაბამისად მივიღებთ:

$$\|f_0^B\| = \begin{Bmatrix} c_1(0) \\ 0 \\ (L')^2 \end{Bmatrix} \cdot \frac{E_{\text{მკმ}}}{(L')^2 L_g^y} - \begin{Bmatrix} \sqrt{a_1^2(0) + b_1^2(0)} \cdot \cos[\psi_u + \arctg \frac{b_1(0)}{a_1(0)}] \\ \sqrt{a_2^2(0) + b_2^2(0)} \cdot \sin[\psi_u + \arctg \frac{b_2(0)}{a_2(0)}] \end{Bmatrix} \cdot \frac{3}{2} U_m^c / (L')^2 L_g^y; \quad (78)$$

სადაც (78)-ში გვაქვს:

$$a_1(0) = -L' L_g^y + \frac{1}{2} M_y^{12} M_{yd}^{12} \sin 2(\alpha_p + \frac{\gamma}{2});$$

$$a_2(0) = -L' L_g^y - \frac{1}{2} M_y^{12} M_{yd}^{12} \sin 2(\alpha_p + \frac{\gamma}{2});$$

$$b_1(0) = M_y^{12} M_{yd}^{12} \sin^2(\alpha_p + \frac{\gamma}{2});$$

$$b_2(0) = M_y^{12} M_{yd}^{12} \cos^2(\alpha_p + \frac{\gamma}{2});$$

$$c_1(0) = -L' M_y^{12} \sin(\alpha_p + \frac{\gamma}{2}); \quad (79)$$

(76) გამოსახულების მარჯვენა ნაწილის მეორე წევრი (70) და (74)-ის გათვალისწინებით მიიღებს სახეს:

$$\|f_1^B\| = -\|\mu_1^B(t)\|_{t=0} + \|\mu_2^B(t)\|_{t=0} - \|\mu_3^B(t)\|_{t=0} + \|\mu_4^B(t)\|_{t=0}; \quad (80)$$

სადაც (80)-ში გვაქვს:

$$\|\mu_1^B(t)\| = \left(\frac{d^2 \|A^B(t)\|}{dt^2} \cdot t + \frac{d \|A^B(t)\|}{dt} \right) \cdot e^{-\|A^B(t)\| \cdot t} \cdot \|I^B(t)\|; \quad (81)$$

$$\|\mu_2^B(t)\| = \|F^B(t)\| \cdot \left[\left(\frac{d \|A^B(t)\|}{dt} \cdot t + \|A^B(t)\| \right) \cdot e^{-\|A^B(t)\| \cdot t} \cdot \|I^B(t)\| - e^{-\|A^B(t)\| \cdot t} \cdot \frac{d \|I^B(t)\|}{dt} \right]; \quad (82)$$

$$\|\mu_3^B(t)\| = \left[\frac{d\|A^B(t)\|}{dt} \cdot t + \|A^B(t)\| \right] \cdot e^{-\|A^B(t)\|t} \cdot [\|B^B(t)\| \cdot E_{\text{საშ}} - \|C^B(t)\| \frac{3}{2} U_m]; \quad (83)$$

$$\|\mu_4^B(t)\| = e^{-\|A^B(t)\|t} \left[\frac{d\|B^B(t)\|}{dt} E_{\text{საშ}} + \frac{d\|C^B(t)\|}{dt} \cdot \frac{3}{2} U_m \right]; \quad (84)$$

(76) გამოსახულების მარჯვენა ნაწილის მესამე წევრი (70) და (74)-ის გათვალისწინებით მიიღებს სახეს :

$$\|f_2^B\| = - \left. \frac{d\|\mu_1^B(t)\|}{dt} \right|_{t=0} + \left. \frac{d\|\mu_2^B(t)\|}{dt} \right|_{t=0} - \left. \frac{d\|\mu_3^B(t)\|}{dt} \right|_{t=0} + \left. \frac{d\|\mu_4^B(t)\|}{dt} \right|_{t=0}; \quad (85)$$

(76)-ის გათვალისწინებით (75)-დან ვღებულობთ:

$$\frac{d\|K^B(t)\|}{dt} = \|f_0^B\| + \|f_1^B\|t + \frac{1}{2}\|f_2^B\|t^2; \quad (86)$$

(81)-(84) გამოსახულებებში შემავალი ზოგიერთი ცვლადი კოეფიციენტებისათვის $t=0$ მომენტში ვღებულობთ შემდეგ გამოსახულებებს:

$$\|A^B(t)\|_{t=0} = \frac{R^I}{\Delta(t)} \left\| \begin{array}{ccc} -a_1(t) & b_1(t) & -a_1(t) \\ -b_2(t) & -a_2(t) & b_2(t) \\ -b_3(t) & -c_3(t) & b_3(t) \end{array} \right\|_{t=0}; \quad (87)$$

$$\left. \frac{d\|A^B(t)\|}{dt} \right|_{t=0} = \frac{R^I}{\Delta(t)} \cdot \left. \frac{d}{dt} \left\| \begin{array}{ccc} -a_1(t) & b_1(t) & -a_1(t) \\ -b_2(t) & -a_2(t) & b_2(t) \\ -b_3(t) & -c_3(t) & b_3(t) \end{array} \right\| \right|_{t=0}; \quad (88)$$

$$\left. \frac{d^2\|A^B(t)\|}{dt^2} \right|_{t=0} = \frac{R^I}{\Delta(t)} \cdot \left. \frac{d^2}{dt^2} \left\| \begin{array}{ccc} -a_1(t) & b_1(t) & -a_1(t) \\ -b_2(t) & -a_2(t) & b_2(t) \\ -b_3(t) & -c_3(t) & b_3(t) \end{array} \right\| \right|_{t=0}; \quad (89)$$

$$\|B^B(t)\|_{t=0} = \frac{1}{\Delta(t)} \left\| \begin{array}{c} -c_1(t) \\ 0 \\ (L^I)^2 \end{array} \right\|_{t=0}; \quad (90)$$

$$\left. \frac{d\|B^B(t)\|}{dt} \right|_{t=0} = \frac{1}{\Delta(t)} \cdot \left. \frac{d}{dt} \left\| \begin{array}{c} -c_1(t) \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\| \right|_{t=0}; \quad (91)$$

$$\|C^B(t)\|_{t=0} = \frac{1}{\Delta(t)} \begin{vmatrix} a_u(t) \\ b_u(t) \\ c_u(t) \end{vmatrix}_{t=0} ; \quad (92)$$

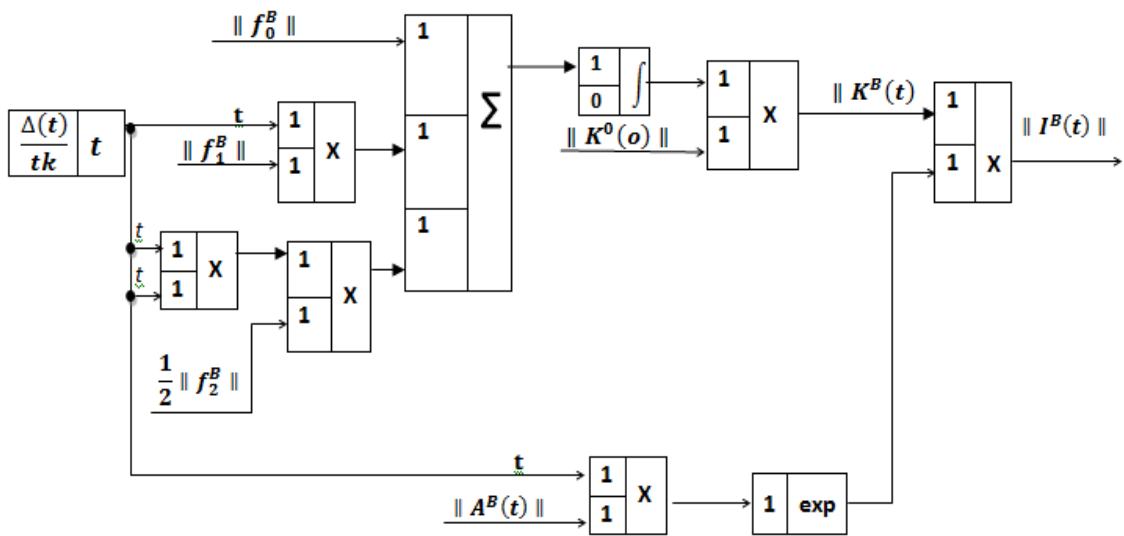
$$\frac{d\|C^B(t)\|}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{1}{\Delta(t)} \cdot \frac{d}{dt} \begin{vmatrix} a_u(t) \\ b_u(t) \\ c_u(t) \end{vmatrix}_{t=0} ; \quad (93)$$

$$\|F^B(t)\|_{t=0} = 0; \quad (94)$$

$$\|I^B(t)\|_{t=0} = \|K^B(t)\|_{t=0} = \|I(0)\|; \quad (95)$$

სადაც (87)-(93) -ში ცვლადი პარამეტრები განისაზღვრებიან (51) და (53)-(55) გამოსახულებით.

(71) და (86) გამოსახულებების საფუძველზე მართვადი გამმართველის ქსელური გრაგნილების $I_d^I(t)$, $I_q^I(t)$ დენების და გამართული $i_d(t)$ დენის $\|I(t)\|$ მატრიცების გარდამავალი პროცესის მოდელის სტრუქტურულ სქემას აქვს შემდეგი სახე (ნახ.7):



ნახ.7. მართვადი სამფაზა გამმართველის დენების მატრიცების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა.

$K^B(t)$ განისაზღვრება, თუ (86) განტოლებიდან ამოვიღებთ ინტეგრალს t_0 -დან t -მდე ჩავთვლით და მათ შორის მიმდინარე დრო ავლნიშნავთ τ -თი, შესაბამისად მივიღებთ [28, 29]:

$$\|K^B(t)\| = \int_0^t (\|f_0^B\| + \|f_1^B\|\tau + \frac{1}{2}\|f_2^B\|\tau^2) d\tau + K^B(t_0); \quad (96)$$

მაშინ (71) და (96) განტოლებებიდან გვაქვს :

$$\|I^B(t)\| = e^{\|A^B(t)\|t} [\int_0^t (\|f_0^B\| + \|f_1^B\|\tau + \frac{1}{2}\|f_2^B\|\tau^2) d\tau + \|K^B(t_0)\|]; \quad (97)$$

(95)-ის გათვალისწინებით (97)-ში გვადლევს :

$$\|I^B(t)\| = e^{\|A^B(t)\|t} [\int_0^t (\|f_0^B\| + \|f_1^B\|\tau + \frac{1}{2}\|f_2^B\|\tau^2) d\tau + \|I^B(0)\|]; \quad (98)$$

(98)-დან ინტეგრალის ამოღება გვადლევს:

$$\|I^B(t)\| = e^{\|A^B(t)\|t} (\|f_0^B\|\tau + \frac{1}{2}\|f_1^B\|\tau^2 + \frac{1}{6}\|f_2^B\|\tau^3) + e^{\|A^B(t)\|t} \cdot \|I^B(0)\|; \quad (99)$$

(99) გამოსახულება წარმოადგენს (70) განტოლების ზუსტ ამონახსნს, მაგრამ მას აქვს მოუხერხებელი ფორმა კომპიუტერული პროგრამებით ანგარიშისათვის. კომპიუტერული პროგრამების საფუძველზე $\|I^B(t)\|$ დენების მატრიცებს განსაზღვრავთ მხოლოდ t -ს რაიმე დისკრეტული მნიშვნელობისათვის . ჩვეულებრივ $\|I^B(t)\|$ -ს ვანგარიშობთ $t = kT$ სიდიდეებისათვის, სადაც k - მთელი რიცხვია, ხოლო T - განსაზღვრული გარემოებით შერჩეული დროის ინტერვალია. რამდენადაც დაშვებულია, რომ შესავალი ვექტორი ცნობილია ყველა k - სათვის, მაშინ ჩვენ გვრჩება განვსაზღვროთ კავშირი $\|I^B(k+1)T\|$ - ს და შესავალ ვექტორს შორის და მეორეს მხრივ $\|I^B(kT)\|$ -ს შორის.

ასეთი კავშირი აღიწერება სხვაობითი განტოლების კერძო სახით. სხვაობითი განტოლების მიღების შემდეგ მაშინვე შეიძლება მიმდევრობით გამოვიანგარიშოთ $\|I^B(kT)\|$ ყველა k - სათვის.

(99) განტოლებაში ჩავსვათ $t_0 = kT = 0$ და $t = (k+1)T$, მაშინ (99)- დან მივიღებთ:

$$\|I^B[(k+1)T]\| = e^{\|A^B(T)\|T} \cdot \|I^B(kT)\| + e^{\|A^B(k+1)\tau\|(k+1)T} (\|f_0^B\| \cdot \tau + \frac{1}{2}\|f_1^B\|\tau^2 + \frac{1}{6}\|f_2^B\|\tau^3); \quad (100)$$

(100) წარმოადგენს (99) განტოლების სხვაობითი განტოლებას. (100) განტოლება წარმოადგენს რეკურენტულ განტოლებას. ეს განტოლება იოლად ექვემდებარება კომპიუტერული პროგრამებით ამოცანის ამოხსნას [30].

1.7. წევის სამფაზა გამმართველებში მკვებავი დენის მრუდში მაღალი ჰარმონიკები. სიმძლავრის კოეფიციენტი

(9)÷(10) გამოსახულებიდან ჩანს, რომ წევის სამფაზა მართვადი გამმართველის მუშაობისას წევის ტრანსფორმატორის მკვებავი $i_k^I(t)$ დენის მრუდს აქვს არასინუსოიდური ფორმა. იგი შეიცავს ქსელის სიხშირის ტოლი ω სიხშირის ძირითად ჰარმონიკას (11) და მაღალი რიგის განსაზღვრული სპექტრის ჰარმონიკებს. (11)-დან ჩანს, რომ $i_k^I = \frac{1}{k} \cdot i_k^{II}$ დენის პირველი რიგის ჰარმონიკული შემდგენელი დაძრულია მკვებავი ფაზური ძაბვისაგან $\varphi_1 = \alpha + \frac{\gamma}{2}$ კუთხით, სადაც, k ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი, α -რეგულირების და γ -კომუტაციის კუთხეებია [31].

გამმართველის სიმძლავრის k_b კოეფიციენტი განისაზღვრება მის მიერ მოთხოვნილი აქტიური p -სიმძლავრის ფარდობით სრულ მოთხოვნილი S -სიმძლავრესთან.

$$k_b = \frac{P}{S} = \frac{U^I I_1 \cos \varphi_1}{U^I \sqrt{I_1^2 + \sum I_n^2}} = \nu \cdot \cos \varphi_1, \quad (101)$$

სადაც ν , $i_k^I, (k=1,2,3)$ დენის მრუდის დამახინჯების კოეფიციენტი

$$\nu = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + \sum I_n^2}}. \quad (103)$$

ნახ.2-ზე წარმოდგენილი კომუტაციური ρ_{i1} – ფუნქციის საფუძველზე დენის მრუდის დამახინჯების კოეფიციენტი დამაკმაყოფილებელი სიზუსტით გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$v = \frac{3}{\pi} \left(1 + \frac{\gamma}{4\pi} - \frac{\gamma^2}{24} \right). \quad (103)$$

საბოლოოდ , (101) ,(103) გამოსახულებების საფუძველზე მართვადი სამფაზა ბოგური გამმართველის სიმძლავრის k_b კოეფიციენტისათვის გვაქვს:

$$k_b = \frac{3}{\pi} \left(1 + \frac{\gamma}{4\pi} - \frac{\gamma^2}{24} \right) \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right), \quad (104)$$

თუ (104)-ში $\alpha = 0, \gamma = 0$, მაშინ სიმძლავრის კოეფიციენტი ყველაზე მაქსიმუმია და ტოლია:

$$k_b = \frac{3}{\pi} \approx 0.9554. \quad (105)$$

ზოგადად, (104)-დან სიმძლავრის კოეფიციენტის მაქსიმალური მნიშვნელობის დამოკიდებულება α და γ -ზე შეიძლება განისაზღვროს მისი α -თი, ან γ -თი წარმოებულის ნულთან განტოლების პირობიდან [32]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial k_b}{\partial \alpha} &= 0 \\ \frac{\partial k}{\partial \gamma} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (106)$$

(106) გამოსახულების პირველი განტოლებიდან (104) -ის გათვალისწინებით , როცა $\alpha \neq 0$ და $\gamma \neq 0$. ვღებულობთ γ -ს შემდეგ გამოსახულებას :

$$\gamma = \frac{3}{\pi} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{8}{3}\pi^2} \right), \quad (107)$$

ხოლო (106) -ის მეორე განტოლებიდან , ანალოგიური მსჯელობით ვღებულობთ :

$$\alpha = -\frac{\gamma}{2} + \arctg \frac{3 - \pi\gamma}{6\pi + \frac{3}{2}\gamma - \frac{\pi}{4}\gamma^2}. \quad (108)$$

(108) გამოსახულება საშუალებას იძლევა მართვადი გამმართველის ექსპლუატაციისას სიმძლავრის კოეფიციენტის მაქსიმალური მნიშვნელობის მისაღწევად γ -კომპუტაციის კუთხის აღებული მნიშვნელობებისათვის როგორი უნდა იყოს შესაბამისი რეგულირების α -კუთხე. მაგალითისათვის, როცა $\gamma = 20^\circ$, მაშინ $\alpha = 2^\circ 40'$.

თავი 2. წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების ცვლადი დენის ქსელის მიმყოლ ინვერტორულ აგრეგატებში პროცესების მოდელირება

2.1. სამფაზა ქსელის მიმყოლი ინვერტორებში ელექტრომაგნიტური პროცესების გაანგარიშების მათემატიკური მოდელირება

აღნიშნულ გარდაქმნელ სისტემაში პროცესების მათემატიკური მოდელირებისათვის ვლებულობთ ცნობილ დაშვებებს: ვენტილები იდეალურია, ძალური წევის ტრანსფორმატორები და შესაბამისი დროსელები განიხილება, როგორც წრფივი ელემენტები, რეგულირების კუთხე $\alpha_p = const$, ვენტილების კომუტაციის კუთხე $\gamma \leq \frac{\pi}{3}$ [33, 34].

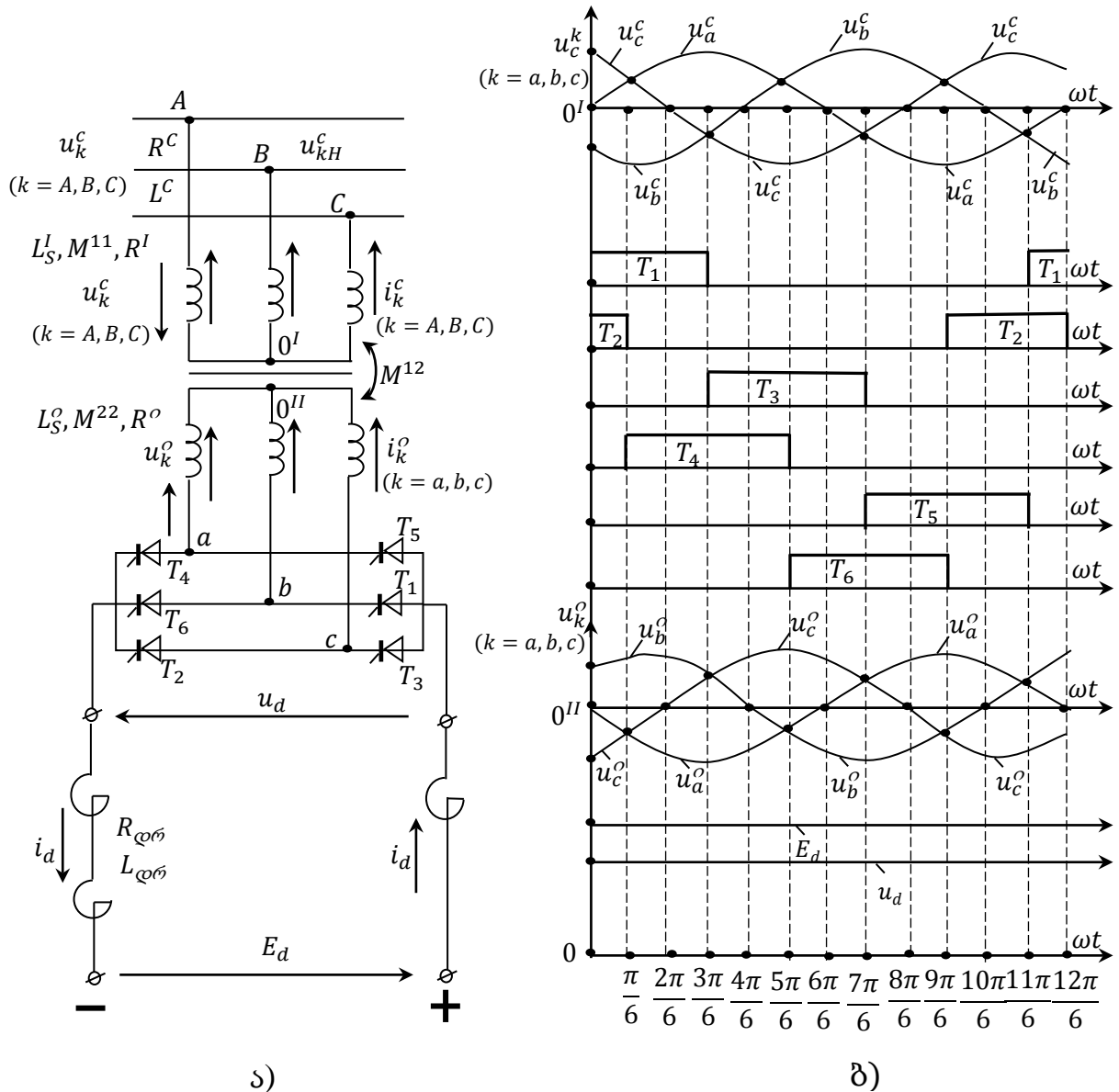
ნახ.8-ზე წარმოდგენილ სქემაში მიღებულია შემდეგი აღნიშვნები:

$R_{\text{დრ}}, R^l, R^o, R_k^c, (k = A, B, C), L_{\text{დრ}}, L_S^o, L_S^l, L_k^c$ - დროსელების, სამფაზა წევის ტრანსფორმატორის და ცვლადი დენის ქსელის აქტიური წინაღობები და ინდუქციურობები; E_d, i_d - წევის ქვესადგურის ინვერტორული აგრეგატის შესავალი ძაბვა და დენი; $i_k^o, u_k^o, i_{k0}^c, u_{k0}^c (k = a, b, c; k_0 = A, B, C)$ - ძალური ტრანსფორმატორის პირველადი და მეორადი გრაგნილების ფაზური დენებისა და ძაბვების მყისა მნიშვნელობები; M^{11}, M^{22}, M^{12} - შესაბამისად ტრანსფორმატორის პირველადი და მეორადი გრაგნილების ორ ფაზას შორის და პირველადი გრაგნილის ერთ ფაზასა და მეორადი გრაგნილის ერთ ფაზას შორის მაქსიმალური ურთიერთ ინდუქციურობები; u_d - ქსელის მიმყოლი ინვერტორის შესავალი ძაბვაა.

წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების სამფაზა ქსელის მიმყოლი ინვერტორის გარდაქმნელ სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და სტაციონალური პროცესების გაანგარიშების, გამოკვლევის

და ანალიზის მიზნით ვადგენთ სრულ მათემატიკურ მოდელს ელექტრული სიდიდეების მყისა მნიშვნელობების მიმართ.

ამისთვის ვწერთ ელექტრომაგნიტური წონასწორობის დიფერენციალურ განტოლებებს ინვერტორის შესავალის მხრიდან, სამფაზა წევის ტრანსფორმატორისათვის და სამფაზა ცვლადი დენის ქსელისათვის აქტიური და რექტიული პარამეტრების გათვალისწინებით:



ნახ.8. სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის მიმყოლი ინვერტორის ბოჭური სქემა შესაბამისი მოცემული პარამეტრებით (ა), ძაბვებისა და $T_1 \div T_6$ ტირისტორებში დენების ერთდროულად გატარების თანმიმდევრობის გრაფიკები (ბ).

$$E_d = 3R_{\text{გრ}} i_d + 3L_{\text{გრ}} \frac{di_d}{dt} + u_d; \quad (109)$$

$$-u_k^c = (R^c + R^l) i_k^c + \frac{d\psi_k^c}{dt}; (k = A, B, C); \quad (110)$$

$$u_k^o = R^o + i_k^o + \frac{d\psi_k^o}{dt}; (k = a, b, c); \quad (111)$$

$$u_{k,\text{ფ.}}^c = i_k^c R_k^c + L_k^c \frac{di_k^c}{dt}; (k = A, B, C); \quad (112)$$

$$u_k^c = u_0 + u_{k,\text{ფ.}}^c; (k = A, B, C); \quad (113)$$

სადაც (112),(113)-ში $u_{k,\text{ფ.}}^c$, $k = A, B, C$ წერტილებსა და ნახ. 8-ზე ქსელის ნეიტრალურ უხილავი O წერტილს შორის ფაზური ძაბვებია, R_k^c, L_k^c - შესაბამისად სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის აქტიური წინაღობები და ინდუქციურობებია. U_0 - წევის ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის ნეიტრალურ წერტილსა და სამფაზა ქსელის ნეიტრალურ O წერტილს შორის ძაბვაა. ψ_k^c და ψ_k^o ნაკადშეზღვევის გვაქვს გამოსახულებები:

$$\psi_k^c = L_s^l i_k^c + \sum_{n=1}^3 M^{11} \cos(\alpha_n^c - \alpha_k^c) i_n^c + \sum_{m=1}^3 M^{12} \cos(\alpha_m^o - \alpha_k^c) i_m^o, k = A, B, C. \quad (114)$$

$$\psi_k^o = L_s^o i_k^o + \sum_{n=1}^3 M^{22} \cos(\alpha_n^o - \alpha_k^o) i_n^o + \sum_{m=1}^3 M^{12} \cos(\alpha_m^o - \alpha_k^c) i_k^c, k = a, b, c. \quad (115)$$

სადაც, (114), (115)-ში α_k^c, α_k^o -წევის ძალური სამფაზა ტრანსფორმატორის ქსელური და ინვერტორული გრაგნილების ფაზების მაგნიტური ღერძების განმსაზღვრელი კუთხეებია:

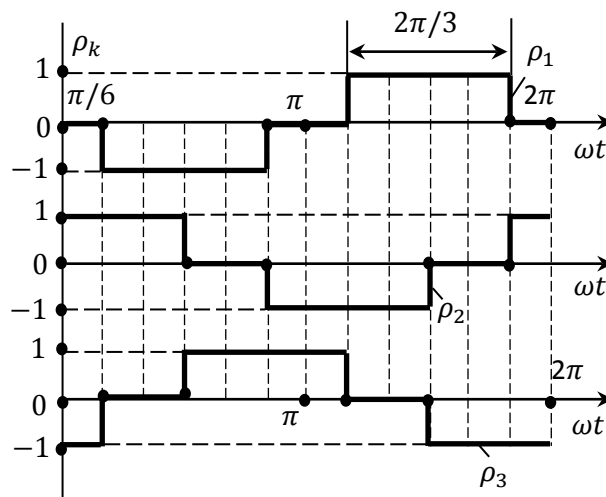
$$\alpha_k^z = (k-1) \frac{2\pi}{3}, (k = A, B, C; a, b, c; z = c, o).$$

ქსელის მიმყოლი სამფაზა ინვერტორის შესავალ და გამოსავალ ელექტრულ სიდიდეებს შორის კავშირი გამოისახება შემდეგი განტოლებებით:

$$\left. \begin{aligned} i_k^o &= i_d \cdot \rho_k(t); \\ u_d &= \sum_{k=1}^3 u_k^o \cdot \rho_k(t), \end{aligned} \right\} \quad (116)$$

სადაც $k = a, b, c$; $\rho_k(t)$ ($k = a, b, c$) -ინვერტორის კომუტაციური ფუნქციებია (ნახ.9).

(109)÷(116) განტოლებათა სისტემა წარმოადგენს საანგარიშო გარდამქმნელი სისტემის სრულ მათემატიკურ მოდელს. მიღებული განტოლების ანალიზური ამოხსნისათვის კომუტაციური ფუნქციები (116)-ში წარმოიდგინება ფურიეს მწკრივების სახით. საწყისი სისტემის ამოხსნისათვის შეიძლება გათვალისწინებული იქნას კომუტაციური ფუნქციების ჰარმონიკის ნებისმიერი რიცხვი, მაგრამ მოცულობის შემცირების მიზნით ჩაწერას ვზღუდავთ მხოლოდ პირველი (ძირითადი) ჰარმონიკით. ეს იმას აღნიშნავს, რომ ანგარიში იწარმოება ცვლადთა საშუალო მნიშვნელობების მიმართ, ე. ი. პულსაციის გათვალისწინების გარეშე [35, 36, 37].



ნახ.9 ქსელის მიმყოლი სამფაზა ინვერტორის კომუტაციური ფუნქციები

კომუტაციური ფუნქციების ძირითადი ჰარმონიკების გათვალისწინებით (116) კავშირის განტოლებები მიიღებენ სახეს:

$$\left. \begin{aligned} i_k^o &= -\frac{2\sqrt{3}}{\pi} i_d \cdot \sin\left[\omega^o t - (k-1)\frac{2\pi}{3}\right]; \\ u_d &= -\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \sum_{k=1}^3 u_k^o \cdot \sin\left[\omega^o t - (k-1)\frac{2\pi}{3}\right]; \end{aligned} \right\} \quad (117)$$

$$k = a, b, c; a = 1; b = 2; c = 3.$$

კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის საფუძველზე შემოგვყავს ახალი ცვლადები - სამფაზა წევის ძალური ტრანსფორმატორის ქსელური და ინვერტორული გრაგნილების რეზულტირებული კომპლექსური დენები და ძაბვები :

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}^z &= \sum_{K=1}^3 u_k^I e^{j\alpha_k^I}, \quad \dot{I}^z = \sum_{K=1}^3 i_k^z e^{j\alpha_k^z}, \quad z = c, o, \\ k &= A, B, C; \quad A = 1, \quad B = 2, \quad C = 3, \text{თუ } z = c \\ k &= a, b, c; \quad a = 1, \quad b = 2, \quad c = 3, \text{თუ } z = o. \end{aligned} \right\} \quad (118)$$

რეზულტირებული კომპლექსური სიდიდეებიდან ნამდვილი ფაზური მნიშვნელობებზე უკუ გადმოსვლისათვის აუცილებელია გამოყენებულ იქნას შემდეგი გამოსახულებები:

$$\left. \begin{aligned} u_k^z &= \frac{1}{3} (\dot{U}^z e^{-j\alpha_k^z} + U^z e^{j\alpha_k^z}); \\ i_k^z &= \frac{1}{3} (\dot{I}^z e^{-j\alpha_k^z} + I^z e^{j\alpha_k^z}). \end{aligned} \right\} \quad (119)$$

(119)-ში გამოვსახოთ რეზულტირებული კომპლექსური სიდიდეები მათი d, q მდგენელების მიმართ, შესაბამისად გვექნება:

$$\left. \begin{aligned} u_k^z &= \frac{2}{3} (U_d^z \cos \alpha_k^z + U_q^z \sin \alpha_k^z), \\ i_k^z &= \frac{2}{3} (I_d^z \cos \alpha_k^z + I_q^z \sin \alpha_k^z). \\ k &= 1, 2, 3; \quad z = c, o. \end{aligned} \right\} \quad (120)$$

(118) და (119)-ის გამოსახულების გათვალისწინებით (109)-(115) და (117) განტოლებები არა რთული გარდაქმნების შემდეგ რეზულტირებული კომპლექსური ელექტრული სიდიდეების მიმართ წარმოიდგინება შემდეგ სახეში:

$$E_d = 3R_{\text{ფრ.}} i_d + 3L_{\text{ფრ.}} \frac{di_d}{dt} + u_d; \quad (121)$$

$$\dot{U}^o = R^o \dot{I}^o + (L_S^o + \frac{3}{2} M^{22}) \frac{d\dot{I}^o}{dt} + \frac{3}{2} M^{12} \frac{d\dot{I}^c}{dt}; \quad (122)$$

$$-\dot{U}^c = R^l \dot{I}^c + (L_S^l + \frac{3}{2} M^{11}) \frac{d\dot{I}^c}{dt} + \frac{3}{2} M^{12} \frac{d\dot{I}^o}{dt}; \quad (123)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}^c = & \frac{1}{3} \left(\sum_{k=1}^3 R_k^c \right) \dot{I}^c + \frac{1}{3} \left(\sum_{k=1}^3 R_k^c e^{j2\alpha_k^c} \right) \dot{I}^c + \frac{1}{3} \left(\sum_{k=1}^3 L_k^c \right) \frac{d\dot{I}^c}{dt} + \\ & + \frac{1}{3} \left(\sum_{k=1}^3 L_k^c e^{j2\alpha_k^c} \right) \frac{d\dot{I}^c}{dt}; \end{aligned} \quad (124)$$

$$\dot{U}^c = u_0 \left(\sum_{k=1}^3 e^{j\alpha_k^c} \right) + \dot{U}_H^c = \dot{U}_H^c; \quad (125)$$

$$u_d = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \left[\dot{U}^o e^{-j(\omega^o t - \frac{\pi}{2})} + U^* e^{j(\omega^o t - \frac{\pi}{2})} \right]; \quad (126)$$

$$\left. \begin{aligned} i_d = & -\frac{\sqrt{3}\pi}{9} \dot{I}^o e^{-j(\omega^o t - \frac{\pi}{2})} \\ \dot{U}_H^c = & \sum_{k=1}^3 u_{kH}^c e^{j\alpha_k^c}, \sum_{k=1}^3 e^{j\alpha_k^c} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (127)$$

მიღებული (121)-(127) განტოლებები წარმოადგენენ პერიოდული კოეფიციენტებიან სრულ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემას კომპლექსურ ფორმაში.

(67)- (73)- ში გამოვრიცხოთ შუალედური უცნობები და დავიყვანოთ შვიდი განტოლებიანი შემდგარი სისტემა ინვერტორის შესავალი i_d დენისა და ქსელის რეზულტირებული \dot{I}^c, I^c დენების მიმართ სამ განტოლებაზე. ამისათვის (126) ჩავსვათ (121)-ში და (122), (127)-ის გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$E_d = R_1 \cdot i_d + L_1 \frac{di_d}{dt} + M_1 e^{-j(\omega^o t - \frac{\pi}{2})} \frac{d\dot{I}^c}{dt} + M_1 e^{j(\omega^o t - \frac{\pi}{2})} \frac{d I^c}{dt}. \quad (128)$$

მეორეს მხრივ, (123), (124)-ში გავითვალისწინოთ (125) , (127) და მივიღებთ:

$$0 = -\omega^0 M_2 e^{j\omega^0 t} \cdot i_d + M_2 e^{j(\omega^0 t - \frac{\pi}{2})} \frac{di_d}{dt} + \underline{R}_2 i^c + \underline{L}_2 \frac{di^c}{dt}. \quad (129)$$

სამფაზა ქსელის ძაბვის რეზულტირებული კომპლექსური მნიშვნელობა წარმოვადგინოთ სახეში :

$$\dot{U}^c = \frac{3}{2} U_m^c e^{j(\omega^c t + \psi_u^c)} \quad (130)$$

(123), (127)–ში გავითვალისწინოთ (130) და სამფაზა ცვლადი დენის ქსელისათვის მივიღებთ განტოლებას :

$$\frac{3}{2} U_m^c e^{j(\omega^c t + \psi_u^c)} = -R^I i^I - (L_S^I + L^c + \frac{3}{2} M^{11}) \frac{di^c}{dt} + \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} \omega^0 e^{j(\omega^0 t - \frac{\pi}{2})} i_d; \quad (131)$$

აქ შემოვიღოთ შემდეგი აღნიშვნები:

$$R_{\text{მშ}}^c = R^I; L_{\text{მშ}}^c = L_S^I + L^c + \frac{3}{2} M^{11}; M_2 = \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12}; \quad (132)$$

მაშინ (132) -ის გათვალისწინებით (131) გადაიწერება ასე :

$$\frac{3}{2} U_m^c e^{j(\omega^c t + \psi_u^c)} = -R_{\text{მშ}}^c i^c - L_{\text{მშ}}^c \frac{di^c}{dt} + \omega^0 M_2 e^{j(\omega^0 t - \frac{\pi}{2})} i_d; \quad (133)$$

(128), (129) განტოლებებში გამოყენებულია შემდეგი აღნიშვნები:

$$R_1 = 3R_{\text{ფრ}} - \frac{18}{\pi^2} R^0; L_1 = 3L_{\text{ფრ}} - \frac{18}{\pi^2} (L_S^0 + \frac{3}{2} M^{22}); M_1 = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} M^{12}; \\ R_2 = R^I + \frac{1}{3} (\sum_{k=1}^3 R_k^c) + \frac{1}{3} (\sum_{k=1}^3 R_k^c e^{j2\alpha_k^c}); \underline{L}_2 = L_S^I + \frac{3}{2} M^{11} + \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 L_k^c + \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 L_k^c e^{j2\alpha_k^c}. \quad (134)$$

(132), (134) დან ქსელის სიმეტრიული აქტიური და ინდუქციური პარამეტრებისას გვაქვს:

$$R_2 = \underline{R}_2 = R^I + R^c; L_2 = \underline{L}_2 = L_S^I + L^c + \frac{3}{2} M^{11}. \quad (135)$$

(128), (129) და (133)-დან დენებისა და ძაბვების d და q ღერძების მიმართ მდგენელისათვის ვღებულობთ შემდეგ განტოლებათა სისტემას მატრიცულ ფორმაში:

$$\begin{aligned} & \left\| \begin{array}{c} E_d - R_1 i_d \\ 3\omega^\circ M_1 \sin \omega^\circ t \cdot i_d - R_2 I_q^c \\ \frac{3}{2} U_m^c \cos(\omega^c t + \psi_u^c) + R_3 I_d^c - 3\omega^\circ M_1 \sin \omega^\circ t \cdot i_d \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{ccc} L_1 & 2M_1 \sin \omega^\circ t & -2M_1 \cos \omega^\circ t \\ -3M_1 \cos \omega^\circ t & 0 & L_2 \\ 0 & -L_3 & 0 \end{array} \right\| \times \\ & \times \begin{array}{c} \left\| di_d / dt \right\| \\ \left\| dI_d^c / dt \right\| \\ \left\| dI_q^c / dt \right\| \end{array} \end{aligned} \quad (136)$$

მიღებული (117), (120) და (136) განტოლებათა სისტემა წარმოადგენს სამფაზა ქსელის მიმყოლ ინვერტორებში ელექტრომაგნიტური პროცესების საანგარიშო სრულ მათემატიკურ მოდელს.

2.2. წევის სამფაზა ქსელის მიმყოლ ინვერტორებში ელექტრომაგნიტური პროცესების გაანგარიშების კომპიუტერული მოდელირება

კომპიუტერული მოდელირების მათემატიკურ საფუძველს წარმოადგენს ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების აღმწერი (136) განტოლებათა სისტემის ამოხსნა დენების წარმოებულების მიმართ. შესაბამისად ვღებულობთ:

$$\begin{aligned} & \left\| \begin{array}{c} di_d / dt \\ dI_d^c / dt \\ dI_q^c / dt \end{array} \right\| = \frac{1}{\Delta(t)} \left\| \begin{array}{ccc} a_1(t) & a_2(t) & -a_3(t) \\ b_1(t) & -b_2(t) & 0 \\ c_1(t) & c_2(t) & -c_3(t) \end{array} \right\| \times \left\| \begin{array}{c} i_d \\ I_d^c \\ I_q^c \end{array} \right\| + \frac{1}{\Delta(t)} \left\| \begin{array}{cc} a_0 & a_4(t) \\ 0 & -b_3(t) \end{array} \right\| \times \left\| \begin{array}{c} E_d \\ U_m^c \end{array} \right\|, \Delta(t) \neq 0; \quad (137) \end{aligned}$$

სადაც (137) -ში შემავალი ცვლადი კოეფიციენტებისათვის გვაქვს შემდეგი გამოსახულებები :

$$\Delta(t) = \delta_0 - \delta_1 \cos 2\omega^\circ t; \quad (138)$$

$$a_0 = k_0; a_1(t) = k_1 \cos(2\omega^\circ t - \frac{\pi}{4}) - k_1 \cos \frac{\pi}{4}; a_2(t) = k_2 \sin 2\omega^\circ t; a_3(t) = k_3 \cos \omega^\circ t; \quad (139)$$

$$a_4(t) = k_4 \sin[(\omega^\circ - \omega^c)t - \psi_u^c] + k_4 \sin[(\omega^\circ + \omega^c)t + \psi_u^c]; \quad (140)$$

$$\left. \begin{aligned} b_1(t) &= m_1 \sin \omega^o t - \mu_2 \cos \omega^o t - \mu_3 \sin 2\omega^o t; \\ b_2(t) &= m_2 - \mu_4 \cos 2\omega^o t; \\ b_3(t) &= m_3 \cos(\omega^c t + \psi_u^c) - \mu_5 \cos[(2\omega^o - \omega^c)t - \psi_u^c] - \\ &\quad - \mu_5 \cos[(2\omega^o + \omega^c)t + \psi_u^c]; \end{aligned} \right\} \quad (141)$$

$$\left. \begin{aligned} c_0(t) &= n_0 \cos \omega^o t; \\ c_1(t) &= m_1 \sin \omega^o t - \mu_6 \cos \omega^o t + \mu_7 \cos 3\omega^o t; \\ c_2(t) &= m_4 \sin 2\omega^o t; \\ c_3(t) &= m_5; c_4(t) = \mu_5 \sin[(2\omega^o - \omega^c)t - \psi_u^c] + \\ &\quad + \mu_5 \sin[(2\omega^o + \omega^c)t + \psi_u^c]. \end{aligned} \right\} \quad (142)$$

(138)-(142)-ში შემავალი ექვივალენტური პარამეტრებისათვის გვაქვს შემდეგი გამოსახულებები:

$$\begin{aligned} \delta_0 &= L_9^c (L_9^c L_1 - 3M_1^2); \quad \delta_1 = 3L_9^c M_1^2; \quad k_0 = (L_s^l + L^c + \frac{3}{2}M^{11})^2; \\ k_1 &= \frac{81\sqrt{2}}{4\pi^2} \omega^o (M^{12})^2 (L_s^l + L^c + \frac{3}{2}M^{11}); \quad \mu_1 = k_0 (3R_{\text{გვ.}} - \frac{18}{\pi^2} R^o); \\ k_2 &= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} R^l M^{12} (L_s^l + L^c + \frac{3}{2}M^{11}); \quad k_3 = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (R^l + R^c) M^{12} (L_s^l + L^c + \frac{3}{2}M^{11}); \\ k_4 &= \frac{9\sqrt{3}}{4\pi} M^{12} (L_s^l + L^c + \frac{3}{2}M^{11}); \\ m_1 &= \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} \omega^o M^{12} (L_s^l + L^c + \frac{3}{2}M^{11}) [3L_{\text{გვ.}} - \frac{18}{\pi^2} (L_s^o + \frac{3}{2}M^{22})]; \\ \mu_2 &= 27\sqrt{3} \left(\frac{3M^{12}}{2\pi} \right)^3 \omega^o; \quad \mu_3 = \frac{1}{2} \mu_2; \\ m_2 &= R^l \left\{ (L_s^l + L^c + \frac{3}{2}M^{11}) [3L_{\text{გვ.}} - \frac{18}{\pi^2} (L_s^o + \frac{3}{2}M^{22})] - \frac{81}{4\pi^2} (M^{12})^2 \right\}; \\ \mu_4 &= \frac{81}{4\pi^2} R^l (M^{12})^2; \quad m_3 = m_2 \cdot \frac{3}{2R^l}; \quad \mu_5 = \frac{243}{16\pi^2} (M^{12})^2; \quad n_0 = 2 \cdot k_4; \\ M_6 &= \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} (L_s^l + L^c + \frac{3}{2}M^{11}) (3R_{\text{გვ.}} - \frac{18}{\pi^2} R^o) + \frac{1}{2} \left(\frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} \right)^3 \omega^o; \end{aligned} \quad (143)$$

$$\mu_7 = \frac{3}{2}\mu_2; \quad m_4 = \mu_4; \quad m_5 = m_1 \cdot \frac{2\pi(R^I + R^c)}{9\sqrt{3}\omega^0 M^{12}};$$

(137) განტოლებათა სისტემის ინტეგრირება 0-დან t_k -მდე გვაძლევს შემდეგ

ინტეგრალურ გამოსახულებებს $i_d(t), I_d^c(t), I_q^c(t)$ -დენების მიმართ :

$$i_d(t) = \int_0^{t_k} \left[\frac{a_1(t)}{\Delta(t)} i_d(t) + \frac{a_2(t)}{\Delta(t)} I_d^c(t) - \frac{a_3(t)}{\Delta(t)} I_q^c(t) + \frac{a_0(t)}{\Delta(t)} E_d + \frac{a_4(t)}{\Delta(t)} U_m^c \right] dt + i_d(0); \quad (144)$$

$$I_d^c(t) = \int_0^{t_k} \left[\frac{b_1(t)}{\Delta(t)} i_d(t) - \frac{b_2(t)}{\Delta(t)} I_d^c(t) - \frac{b_3(t)}{\Delta(t)} U_m^c \right] dt + I_d^c(0); \quad (145)$$

$$I_q^c(t) = \int_0^{t_k} \left[\frac{c_1(t)}{\Delta(t)} i_d(t) + \frac{c_2(t)}{\Delta(t)} I_d^c(t) - \frac{c_3(t)}{\Delta(t)} I_q^c(t) + \frac{c_0(t)}{\Delta(t)} E_d + \frac{c_4(t)}{\Delta(t)} U_m^c \right] dt + I_q^c(0); \quad (146)$$

(117)-ში შემოვიღოთ აღნიშვნა :

$$\rho_k^0(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \sin[\omega^0 t - (k-1)\frac{2\pi}{3}]; \quad (147)$$

მაშინ ტრანსფორმატორის ტირისტორული გრაგნილების ფაზური დენებისათვის გვაქვს:

$$i_k^{II}(t) = -i_d(t)\rho_k^0(t). \quad (148)$$

ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების კომპიუტერული მოდელირების შედეგად ვღებულობთ შესაბამისი პროცესების მოდელის სტრუქტურულ სქემებს [38, 39].

2.3. წვეის სამფაზა ქსელის მიმყოლ ინვერტორებში ელექტრომაგნიტური

გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემების აგება

განვიხილოთ (114)-(148) ინტეგრალურ გამოსახულებებში ოპერაციების

სტრუქტურული მოდელების ელემენტები და მათი თვისებები (ნახ. 10).

ნახ. 10-ზე წარმოდგენილი სტრუქტურული მოდელის ელემენტების თვისებების გათვალისწინება გვაძლევს მოცემული პარამეტრების მიხედვით შესაბამისი ექვივალენტური ცვლადი პარამეტრებისა და საძიებელი ცვლადი ელექტრული სიდიდეების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურულ სქემებს (ნახ. 11,12) [7, 40, 41].

- 1)

$\frac{\Delta(t)}{t_k}$	t
-------------------------	-----

 → $0 \leq t \leq t_k$ – დროის მონაცემები, Δt - დროის ინტერვალი გარდამავალი პროცესების რიცხვითი მეთოდით ანგარიშისას, t_k - გაანგარიშების დამთავრების დრო;
- 2)

x_1	k_2	Σ
x_2	k_3	

 → $y = k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3$ – ამჯამაზი, k_1, k_2 და k_3 – მუდმივი კოეფიციენტები, x_1, x_2 და x_3 – შესავალი ცვლადებია;
- 3)

x	k	\sin
-----	-----	--------

 → $y = \sin kx$ – სინუსოიდური ფუნქციის მაფორმირებელი, მუდმივი კოეფიციენტი, x - შესავალი ცვლადებია;
- 4)

x	k	G
-----	-----	-----

 → $y = kx$ – x ცვლადისა და k - მუდმივის ნამრავლი;
- 5)

x	k	\int
y_0	y_0	

 → $y = k \int_0^t x dt + y_0$ – ინტეგრატორი, x - შესავალი ცვლადებია; k - მუდმივი კოეფიციენტი და y_0 – ფუნქციის საწყისი მნიშვნელობა;
- 6)

k	k
-----	-----

 → $y = k$ – მუდმივის მოცემა, შესავალი ცვლადი არ არსებობს;
- 7)

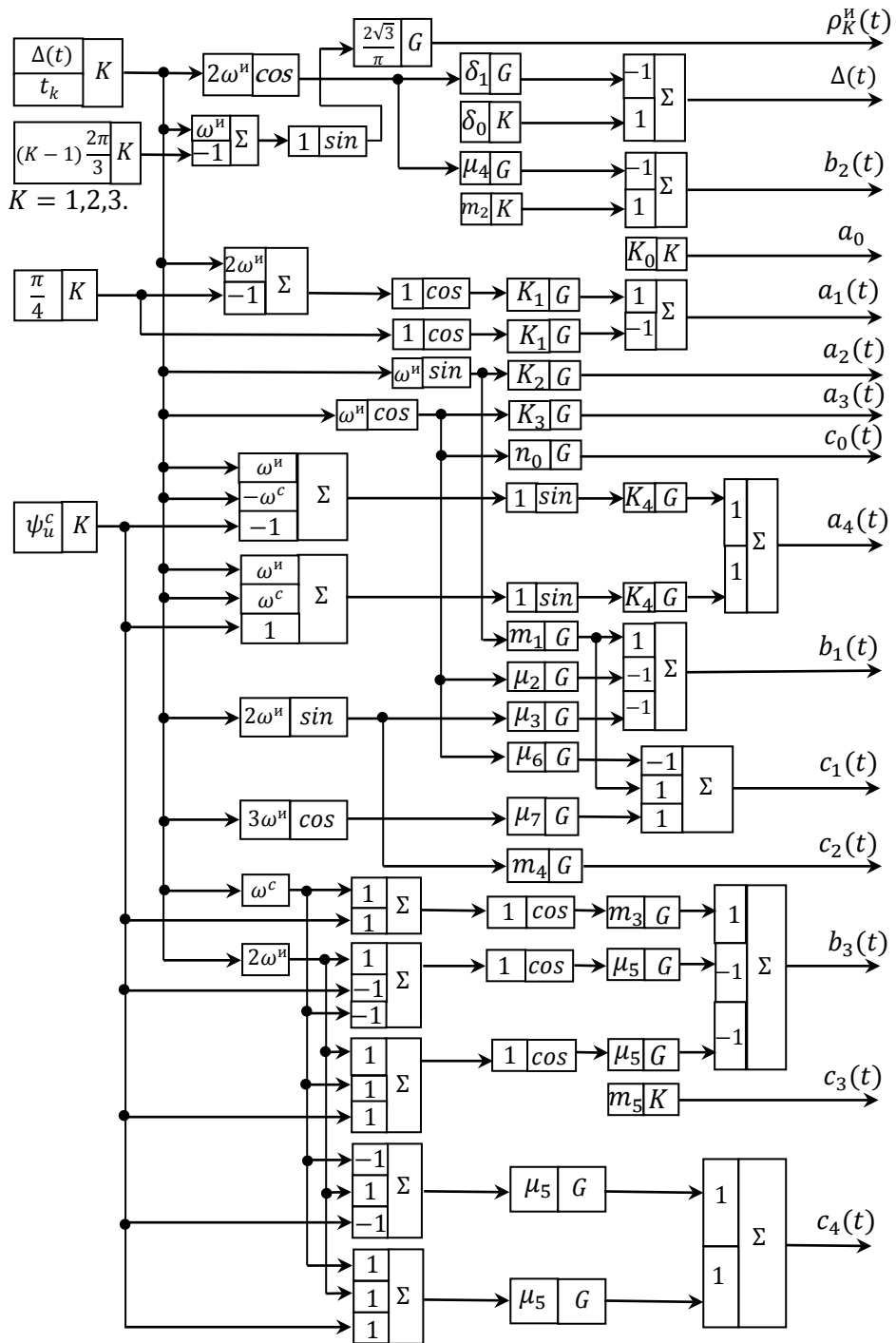
x_1	K_1	\div
x_2	K_2	

 → $y = \frac{k_1 x_1}{k_2 x_2}$ – გაყოფის ელემენტები; x_1, x_2 – შესავალი ცვლადებია;
- 8)

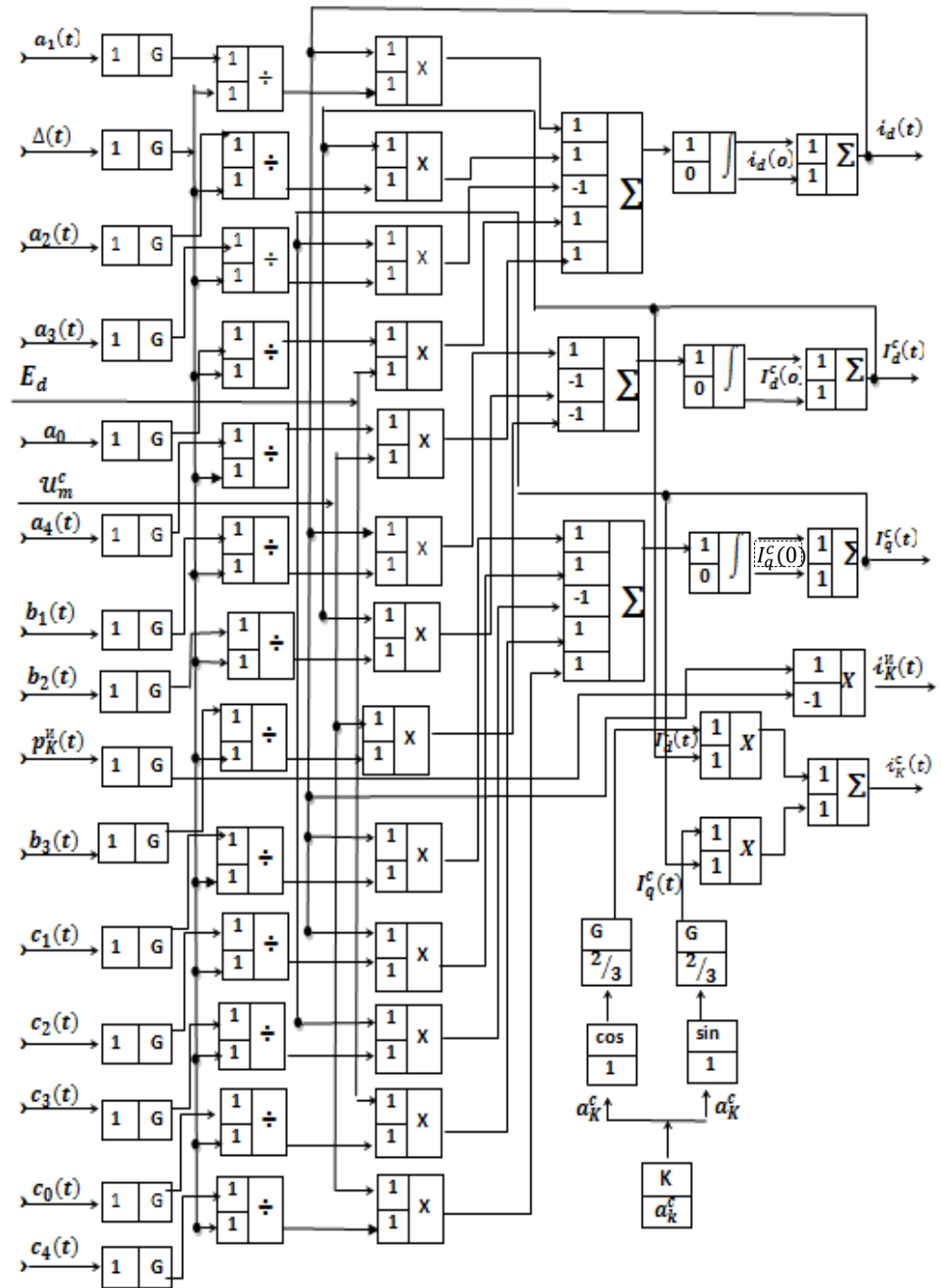
x_1	X
x_2	

 → $y = k_1 x_1 \cdot k_2 x_2$ – გამრავლების ელემენტები, x_1, x_2 – შესავალი ცვლადებია, k_1, k_2 – მუდმივი კოეფიციენტები.

ნახ.10. მათემატიკური ოპერაციების სტრუქტურული მოდელის ელემენტები და მათი თვისებები.



ნახ.11. (138)-(143) გამოსახულებების საფუძველზე ექვივალენტური ცვლადი კოეფიციენტების ფორმირების მოდელის სტრუქტურული სქემა. (ნახ.11-13) -ზე ზედა c-ინდექსები აღნიშნავენ მიმღებ ქსელისთვის პარამეტრებს. ხოლო- n აღნიშნავს ინვერტორისთვის სიხშირეს და პარამეტრებს.



ნახ.12. სამფაზა ქსელის მიმყოლი ინვერტორის ელექტრული სიდიდეების მყისა მნიშვნელობების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა.

2.4. წევის სამფაზა ქსელის მიმყოლ ინვერტორებში კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის პირობების დადგენა.

(136) განტოლებათა სისტემის $\Delta(t)$ -განმსაზღვრელისათვის გვაქვს შემდეგი გამოსახულება:

$$\Delta(t) = \begin{vmatrix} L_1 & 2M_1 \sin \omega^o t & -2M_1 \cos \omega^o t \\ -3M_1 \cos \omega^o t & 0 & L_2 \\ 0 & -L_s & 0 \end{vmatrix} = L_s(L_s L_1 - 6M_1^2 \cos^2 \omega^o t). \quad (149)$$

(136) სისტემის ამონახსნი ბევრადაა დამოკიდებული (137) განმსაზღვრელის მნიშვნელობაზე .იმ მომენტებში,როცა $\Delta(t) = 0$, (136)-ში მონაწილე დენების წარმოებულები ღებულობენ უსასრულო დიდი მნიშვნელობებს და შესაბამისი ექვივალენტური ინდუქციურობებზე ნამრავლი იძლევა დიდ კომუტაციურ გადაძაბვებს. შედეგად ამისა, ვენტილების კომუტაციის პროცესებში, ადგილი აქვს ფაზური ძაბვებისა და დენების დროში ცვალებადობის მრუდებში მაღალი სიდიდის გადაძაბვების შესაბამისი იმპულსების ზედდებას.

რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმში კომუტაციური გადაძაბვების თავიდან აცილების მიზნით აუცილებელი და საკმარისი პირობაა

$$\Delta(t) \neq 0 . \quad (150)$$

(132), (134)-ის გათვალისწინება (150)-ში გვამლევს მეტად საჭირო დამოკიდებულებას რეაქტორის ინდუქციურობასა და მთელი გარდამქმნელი სისტემის პარამეტრებს შორის :

$$L_{\text{გრ.}} \neq \frac{6}{\pi^2} (L_s^o + \frac{3}{2} M^{22}) + \frac{27}{2\pi^2} \cdot \frac{(M^{12})^2}{L^c + L_s^l + \frac{3}{2} M^{11}} ; \quad (151)$$

მიღებული (151) გამოსახულება წარმოადგენს წევის სამფაზა ქსელის მიმყოლ ინვერტორებში კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის პირობას [42].

2.5. წვეის სამფაზა ქსელის მიმყოლ ინვერტორებში მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნა დატვირთვის რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმში

(144)-(146) ინტეგრალური გამოსახულებების გაწარმოებით ვღებულობთ [43, 44]:

$$\left\| \frac{dI^o(t)}{dt} \right\| = \|A^o(t)\| \cdot \|I^o(t)\| + \|B^o(t)\| \cdot E_d + \|C^o(t)\| \cdot U_m^c, \quad (151)$$

სადაც (151)-ში შემავალი კოეფიციენტების მატრიცებისათვის გვაქვს :

$$\|A^o(t)\| = \frac{1}{\Delta(t)} \begin{vmatrix} a_1(t) & a_2(t) & -a_3(t) \\ b_1(t) & -b_2(t) & 0 \\ c_1(t) & c_2(t) & -c_3(t) \end{vmatrix}; \quad \|B^o(t)\| = \frac{1}{\Delta(t)} \begin{vmatrix} a_0 \\ 0 \\ c_0(t) \end{vmatrix};$$

$$\|C^o(t)\| = \frac{1}{\Delta(t)} \begin{vmatrix} a_4(t) \\ -b_3(t) \\ c_4(t) \end{vmatrix}; \quad \left\| \frac{dI^o(t)}{dt} \right\| = \begin{vmatrix} di_d(t)/dt \\ dI_d^c(t)/dt \\ dI_q^c(t)/dt \end{vmatrix}; \quad \|I^o(t)\| = \begin{vmatrix} di_d(t) \\ dI_d^c(t) \\ dI_q^c(t) \end{vmatrix}; \quad (152)$$

(152) - ში შემავალი $\Delta(t)$ განისაზღვრება (149) გამოსახულებით, ხოლო ცვლადი კოეფიციენტები განისაზღვრებიან (139) –(143) გამოსახულებით.

(151) მატრიცული განტოლების ამოხსნას ვეღებთ ასეთ სახეში [45]:

$$\|I^o(t)\| = e^{\|A^o(t)\|t} \cdot \|K^o(t)\|; \quad (153)$$

(153) -ში $\|K^o(t)\|$ -არის დროის ნამდვილი ცვლადის ფუნქცია.

ჩავსვათ (153) გამოსახულება (151) განტოლებაში , შესაბამისად მივიღებთ:

$$\frac{d\|K^o(t)\|}{dt} = -\|F^o(t)\| \cdot \|K^o(t)\| + \|\Phi^o(t)\|; \quad (154)$$

სადაც (154) - ში :

$$\|F^o(t)\| = \frac{d\|A^o(t)\|}{dt} t; \quad \|\Phi^o(t)\| = e^{-\|A^o(t)\|t} \cdot [\|B^o(t)\| \cdot E_d + \|C^o(t)\| \cdot U_m^c]; \quad (155)$$

(154)-ში ჩაწერის შემოკლების მიზნით მარჯვენა ნაწილი აღვნიშნოთ $\|f^o(t)\|$

მატრიცით:

$$\|f^o(t)\| = -\|F^o(t)\| \cdot \|K^o(t)\| + \|\Phi^o(t)\|; \quad (156)$$

(156) გამოსახულების გათვალისწინებით (154) გადაიწერება შემდეგნაირად :

$$\frac{d\|K^{\circ}(t)\|}{dt} = \|f^{\circ}(t)\|. \quad (157)$$

$\|f^{\circ}(t)\|$ ფუნქცია (156)-დან დავშალოთ ტეილორის (მაკლერონის) მწკრივად $t=t_0=0$ წერტილის ირგვლივ და შევჭერდეთ პირველი სამ წევრზე, შესაბამისად მივიღებთ:

$$\|f^{\circ}(t)\| = \|f_0^{\circ}\| + \|f_1^{\circ}\| \cdot t + \frac{1}{2}\|f_2^{\circ}\| \cdot t^2 + \dots, \quad (158)$$

სადაც (158) – ში :

$$\|f_0^{\circ}\| = \|B^{\circ}(t)\|_{t=0} \cdot E_{\text{ვკვ}} + \|C^{\circ}(t)\|_{t=0} U_m^c. \quad (159)$$

$$\|f_1^{\circ}\| = -\|\mu_1^{\circ}(t)\|_{t=0} + \|\mu_2^{\circ}(t)\|_{t=0} - \|\mu_3^{\circ}(t)\|_{t=0} + \|\mu_4^{\circ}(t)\|_{t=0}. \quad (160)$$

(160) -ში შესაბამისად გვაქვს:

$$\|\mu_1^{\circ}(t)\| = \left(\frac{d^2\|A^{\circ}(t)\|}{dt^2} \cdot t + \frac{d\|A^{\circ}(t)\|}{dt} \right) \cdot e^{-\|A^{\circ}(t)\|t} \cdot \|I^{\circ}(t)\|; \quad (161)$$

$$\|\mu_2^{\circ}(t)\| = \|F^{\circ}(t)\| \cdot \left[\left(\frac{d\|A^{\circ}(t)\|}{dt} \cdot t + \|A^{\circ}(t)\| \right) \cdot e^{-\|A^{\circ}(t)\|t} \cdot \|I^{\circ}(t)\| - e^{-\|A^{\circ}(t)\|t} \cdot \frac{d\|I^{\circ}(t)\|}{dt} \right]; \quad (162)$$

$$\|\mu_3^{\circ}(t)\| = \left[\frac{d\|A^{\circ}(t)\|}{dt} \cdot t + \|A^{\circ}(t)\| \right] \cdot e^{-\|A^{\circ}(t)\|t} \cdot \left[\|B^{\circ}(t)\| \cdot E_{\text{ვკვ}} - \|C^{\circ}(t)\| \cdot U_m^c \right]; \quad (163)$$

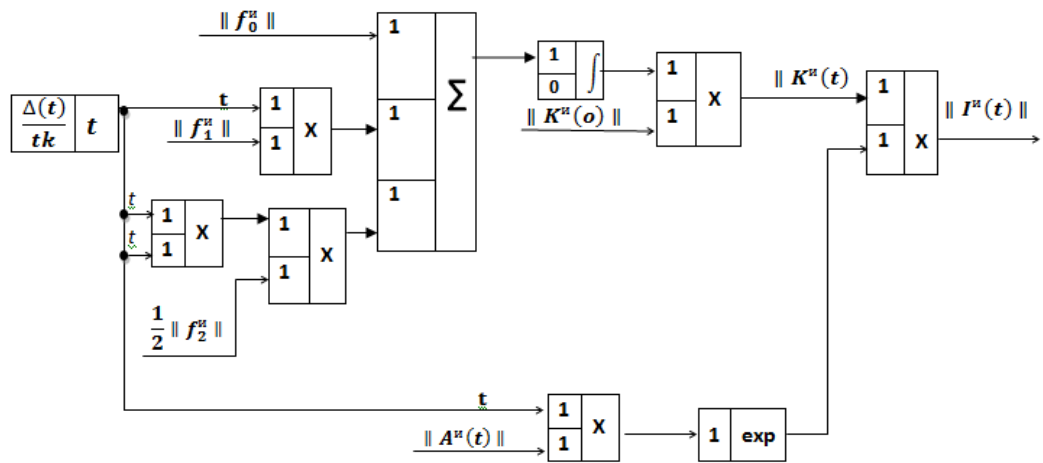
$$\|\mu_4^{\circ}(t)\| = e^{-\|A^{\circ}(t)\|t} \cdot \left[\frac{d\|B^{\circ}(t)\|}{dt} \cdot E_{\text{ვკვ}} + \frac{d\|C^{\circ}(t)\|}{dt} \cdot U_m^c \right]; \quad (164)$$

$$\|f_2^{\circ}\| = -\left. \frac{d\|\mu_1^{\circ}(t)\|}{dt} \right|_{t=0} + \left. \frac{d\|\mu_2^{\circ}(t)\|}{dt} \right|_{t=0} - \left. \frac{d\|\mu_3^{\circ}(t)\|}{dt} \right|_{t=0} + \left. \frac{d\|\mu_4^{\circ}(t)\|}{dt} \right|_{t=0}; \quad (165)$$

(158)-ის გამოსახულების გათვალისწინებით (154)-დან ვღებულობთ:

$$\frac{d\|K^{\circ}(t)\|}{dt} = \|f_0^{\circ}\| + \|f_1^{\circ}\| \cdot t + \frac{1}{2}\|f_2^{\circ}\| \cdot t^2; \quad (166)$$

(153), (166)-გამოსახულებების საფუძველზე ქსელის მიმყოლი ინვერტორის დენების მატრიცების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურულ სქემას აქვს შემდეგი სახე (ნახ.13.) [46]:



ნახ. 13 . ქსელის მიმყოლი ინვერტორის დენების მატრიცების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა.

(166) განტოლებიდან ამოვიღოთ ინტეგრალი $t_0 = 0$ - დან t - მდე და ჩავთვალოთ , რომ მათ შორის მიმდინარე დრო აღინიშნება τ -თი, შესაბამისად მივიღებთ:

$$\|K^o(t)\| = \int_0^t (\|f_0^o\| + \|f_1^o\| \cdot \tau + \frac{1}{2} \|f_2^o\| \cdot \tau^2) \cdot d\tau + \|K^o(t_0)\|, \quad (167)$$

მაშინ (153) და (167) განტოლებებიდან გვაქვს :

$$\|I^o(t)\| = e^{\|A^o(t)\|t} \cdot [\int_0^t (\|f_0^o\| + \|f_1^o\| \cdot \tau + \frac{1}{2} \|f_2^o\| \cdot \tau^2) \cdot d\tau + \|K^o(t_0)\|]. \quad (168)$$

(153)-დან $\|K^o(t_0)\| = e^{-\|A^o(t_0)\|t_0} \cdot \|I^o(t_0)\|.$

თუ ამ გამოსახულებაში მივიღებთ, რომ $t_0 = 0$, მაშინ ვღებულობთ:

$$\|K^o(0)\| = \|I^o(0)\|. \quad (169)$$

(165) – ის გათვალისწინება (164) -ში გვაძლევს:

$$\|I^o(t)\| = e^{\|A^o(t)\|t} \cdot [\int_0^t (\|f_0^o\| + \|f_1^o\| \cdot \tau + \frac{1}{2} \|f_2^o\| \cdot \tau^2) \cdot d\tau + e^{\|A^o(t)\|t} \|I^o(0)\|]. \quad (170)$$

(166) - დან ინტეგრალის ამოღება გვაძლევს:

$$\|I^o(t)\| = e^{\|A^o(t)\|t} \cdot (\|f_0^o\| \cdot \tau + \frac{1}{2} \|f_1^o\| \cdot \tau^2 + \frac{1}{6} \|f_2^o\| \cdot \tau^3) + e^{\|A^o(t)\|t} \cdot \|I^o(0)\|. \quad (171)$$

(171) გამოსახულება წარმოადგენს (153) განტოლების ზუსტ ამონახსნს, მაგრამ მას, ანალოგიურად (145) გამოსახულებისა, აქვს მოუხერხებელი ფორმა კომპიუტერული პროგრამებით ანგარიშისათვის. კომპიუტერული პროგრამების საფუძველზე $\|I^\circ(t)\|$ დენების მატრიცებს შევძლებთ გავიანგარიშოთ მხოლოდ t -ს რაიმე დისკრეტული მნიშვნელობისათვის. ჩვეულებრივ $\|I^\circ(t)\|$ -ს ვანგარიშობთ $t = KT$ სიდიდეებისათვის, სადაც K -მთელი რიცხვია, ხოლო T - განსაზღვრული გარემოებით შერჩეული დროის ინტერვალია. რამდენადაც დაშვებულია, რომ შესავალი ვექტორი ცნობილია ყველა k - სთვის, მაშინ ჩვენ გვრჩება განვსაზღვროთ კავშირი $\|I^\circ[(K+1)T]\|$ -ს და შესავალ ვექტორს შორის და მეორეს მხრივ $\|I^\circ(KT)\|$ -ს შორის. ასეთი კავშირი აღიწერება სხვაობათა განტოლების კერძო სახით. როგორც კი მივიღებთ სხვაობათა განტოლებას, მაშინვე შეიძლება მიმდევრობით გავიანგარიშოთ $\|I^\circ(KT)\|$ -დენების მატრიცა ყველა K -სათვის [47].

(171) განტოლებაში ჩავსვათ $t_0 = KT = 0$ და $t = (K+1)T$, მაშინ მივიღებთ:

$$\|I^\circ[(K+1)T]\| = e^{\|A^\circ(T)\|T} \cdot \|I^\circ(KT)\| + e^{\|A^\circ(K+1)T\|(K+1)T} \cdot (\|f_0^\circ\| \cdot \tau + \frac{1}{2}\|f_1^\circ\| \cdot \tau^2 + \frac{1}{6}\|f_2^\circ\| \cdot \tau^3). \quad (172)$$

(172) წარმოადგენს (171) განტოლების სხვაობათა განტოლებას, ანუ რეკურენტულ განტოლებას, რომელიც იოლად ექვემდებარება კომპიუტერული პროგრამებით ამოცანის ამოხსნას.

(172) რეკურენტულ განტოლებაში თუ ცნობილია $\|I^\circ(0)\|$ -ის მნიშვნელობა, მაშინ ნებისმიერი $K = 0, 1, 2, 3, \dots$ მთელი რიცხვებისათვის ვიპოვიით $\|I^\circ(1T)\|$, $\|I^\circ(2T)\|$, $\|I^\circ(3T)\|$... $\|I^\circ(KT)\|$ - დენების მნიშვნელობებს $1T, 2T, 3T, \dots, KT$ ქვეინტერვალებისათვის.

**თავი 3. წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების
მართვადი გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატების
შემხვედრ-პარალელური მუშაობის ელექტრომაგნიტური და
ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების მოდელირება
რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში.**

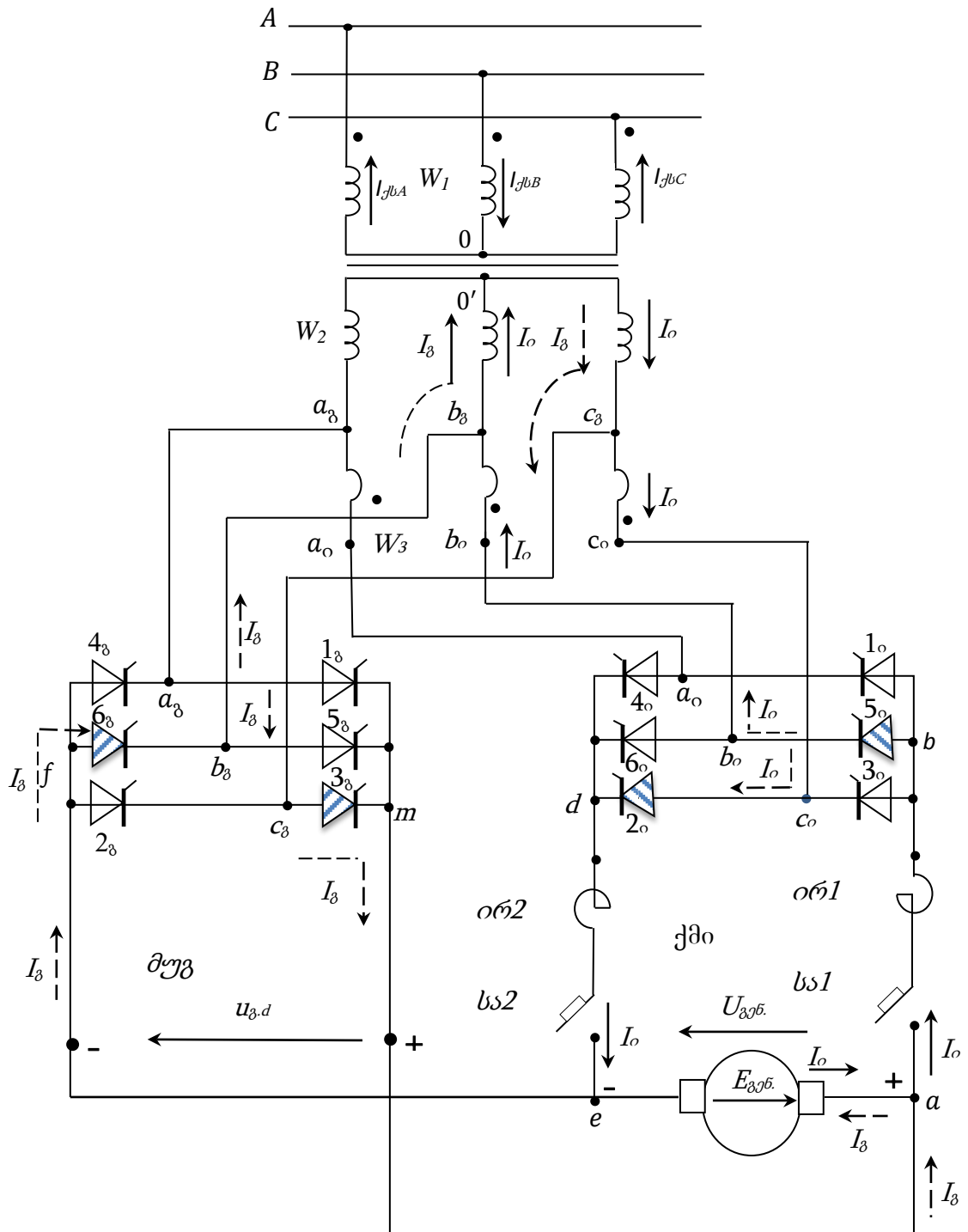
**3.1. შემხვედრ-პარალელურად ჩართული უკუმართვადი გამმართველ-
ინვერტორული აგრეგატების პრინციპული ელექტრული სქემის
დამუშავება წევის ძრავების რეკუპერაციული დამუხრუჭების
პირობებში.**

გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში რეკუპერაციული დამუხრუჭების პროცესების სრულყოფა, ქსელის მიმყოფი ძაბვის ინვერტორის გარე მახასიათებლის გაუმჯობესება, რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია და სიმძლავრის კოეფიციენტის გაზრდა შესაძლებელია მართვადი უკუ გამმართველის გამოყენებით [47, 48].

ჩვენს შემთხვევაში (ნახ.14) რეკუპერაციული დამუხრუჭებისას გამმართველი აგრეგატის გამოურთავად მუდმივი დენის ქსელში ძაბვის მომატებისას ჩაირთვება სა1, სა2 სწრაფმოქმედი ამომრთველები. გამმართველი აღმოჩნდება შემხვედრ-პარალელურად მიერთებული ქსელის მიმყოფ ინვერტორთან და იღებს უკუ გამმართველის ფუნქციას. უკუ გამმართველი ინვერტორის გამოსავლიდან სიმძლავრეს აძლევს მუდმივი დენის კვების წყაროს და ასრულებს დამატებითი აქტიური დატვირთვის როლს. ეს დატვირთვა ამაღლებს ინვერტორის გამოსავალში სიმძლავრის კოეფიციენტს $\cos\varphi_{B1}$, რაც იწვევს ინვერტორის განტვირთვისას გამომავალი ძაბვის შემცირებას. უკუ გამმართველის გარეშე $\cos\varphi_{B1}$ სიმძლავრის კოეფიციენტი იქნებოდა მცირე და შესაბამისად ინვერტორის გამოსავალზე ძაბვა იქნებოდა მაღალი [49].

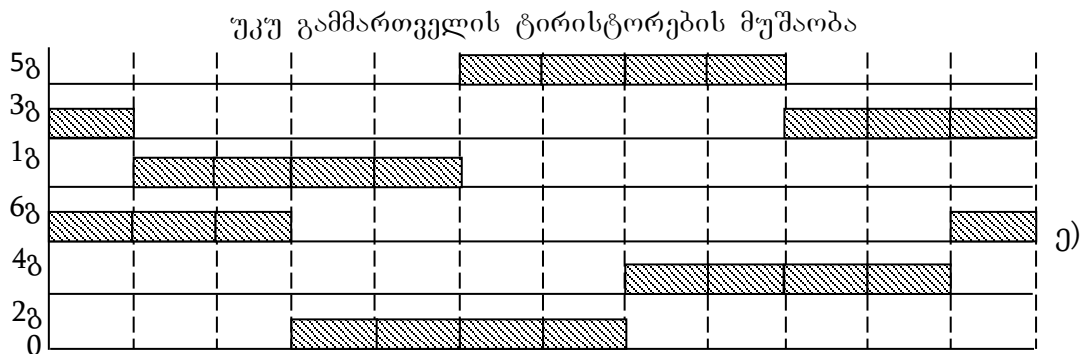
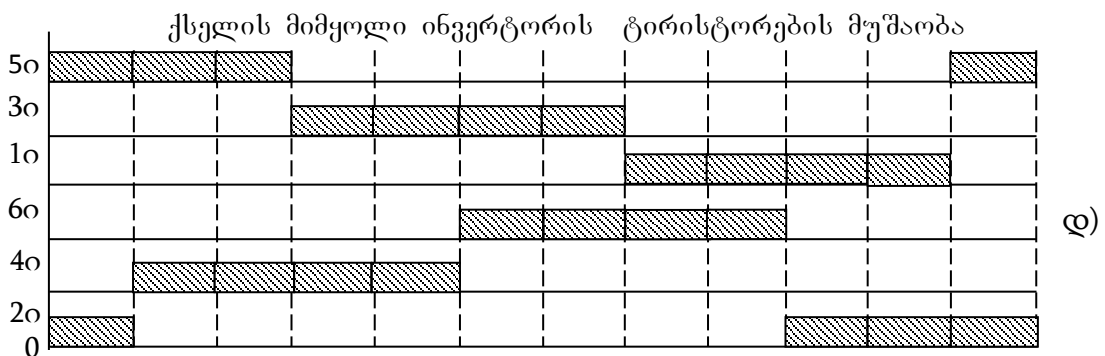
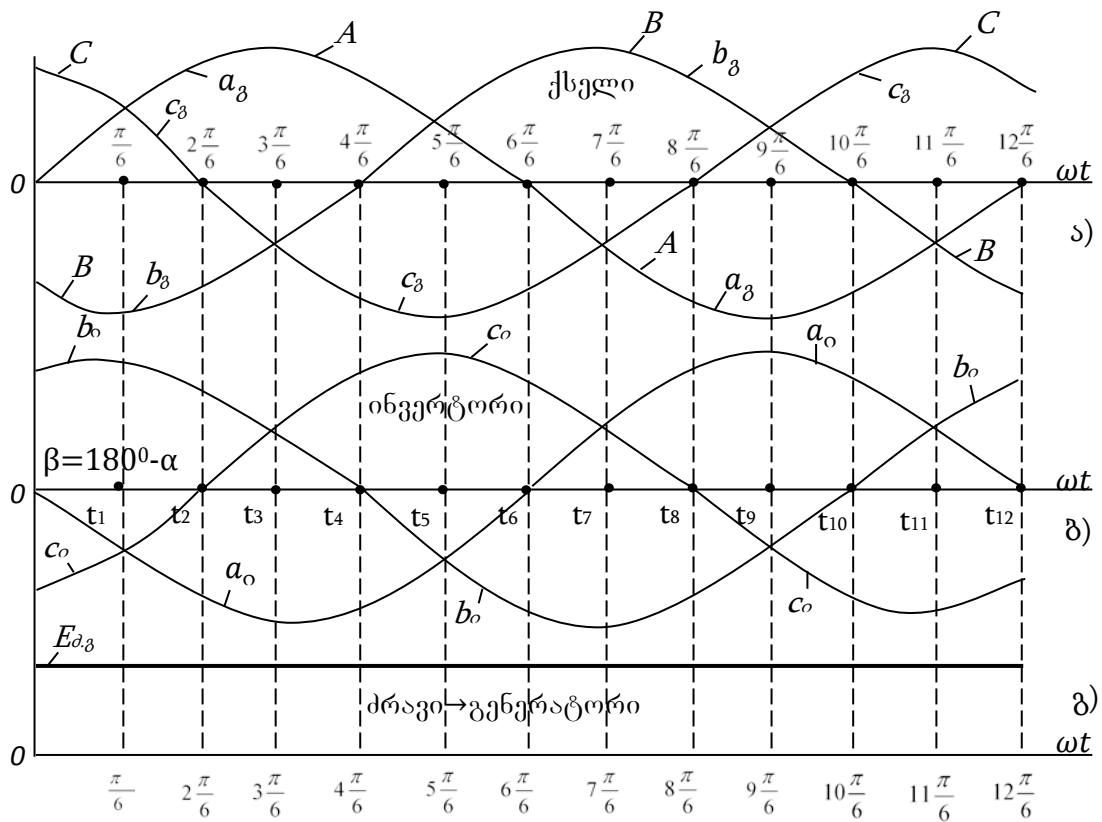
დროის $0 \leq t < t_1$ ინტერვალში (ნახ.15 ა,ბ) შემხვედრ-პარალელურად ჩართული ორი გარდამქმნელი აგრეგატის მართვა ხდება ერთდროულად, შესაბამისი მართვის იმპულსების მიწოდებით. იმპულსების ფაზირება შეესაბამება გამართვის რეჟიმისათვის c_g

გრაგნილიდან b_{β} გრაგნილისაკენ. ამ დროს ღიაა 3_{β} და 6_{β} უკუ გამმართველის ტირისტორები. ინვერტორული რეჟიმისათვის b_o გრაგნილიდან c_o გრაგნილისაკენ. ამ დროს ღიაა 5_o და 2_o ტირისტორები. ერთდროული შეთანხმებული მართვისას $\alpha_{\beta} + \alpha_o = \pi$, ე.ი. $\alpha_{\beta} = \beta$, სადაც α_{β} და α_o – შესაბამისად უკუ გამმართველის და ინვერტორის მართვის კუთხეებია (ნახ.15. დ,ე).



ნახ. 14 უკუ გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატის პრინციპული ელექტრული სქემა წვეის ძრავის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში.

ასეთი მართვისას უკუ გამმართველის გამართული ძაბვის და ინვერტორის შესავალზე გენერირებული მუდმივი ძაბვის მყისა მნიშვნელობები ურთიერთ საწინააღმდეგოდაა მიმართული;



ნახ. 15. სამფაზა წვეის ტრანსფორმატორის გრაგნილების ფაზური ძაბვები -ა,ბ; გენერატორულ რეჟიმში წვეის ძრავის ე.მ.ძალა -გ; ინვერტორის და უკუ გამმართველის ტირისტორების მუშაობის

ირ1, ირ2 ინვერტორის რეაქტორების გამო გამმართველ-ინვერტორულ კონტურში გამათანაბრებელი დენის გავლა ინვერტორის რეაქტორებში შეზღუდულია. რეაქტორის ინდუქციურობებს ირჩევენ ისეთი სიდიდებით, რომ გამათანაბრებელმა დენმა არ გადააჭარბოს ნომინალური დენის 10%-ს. [50].

ამის შედეგად წვეის ტრანსფორმატორის მეორადი გამმართველი გრაგნილის c_g ფაზაში გამავალი $i_{g,d}$ დენი მიმართულებით თანხვედრილია ინვერტორული გრაგნილის c_o ფაზაში გამავალი $i_{o\delta}$ დენისა. ანალოგიურად b_g ფაზაში გამავალი $i_{g,d}$ დენი ემთხვევა b_o ფაზაში გამავალ $i_{o\delta}$ დენს. ინვერტორული დენი $i_{o\delta}$ იკვრება კონტურში, რომელიც გადის შემდეგ კვანძებში (ნახ.16): $a, b, 5_o, b_o, b_g, 0', c_g, c_o, 2_o, d, e, a$; ხოლო უკუ გამართვის $i_{g,d}$ დენი კი შემდეგ კვანძებზე: $c_g, 3_g, m, a, e, f, 6_g, b_g, 0', c_g$. ამის გამო W_2 ხვიების რიცხვის მქონე გამმართველის გრაგნილში გამავალი დენი ტოლია $i_{o\delta} + i_{g,d}$, ხოლო W_3 ხვიის რიცხვის მქონე გრაგნილში გამავალი დენი ტოლია $i_{o\delta}$ -ის. ამის შედეგად ინვერტორის ფაზური ძაბვა მეტია გამართვის ფაზურ ძაბვაზე; რეკუპერაციული სიმძლავრე ინვერტორის მეშვეობით შედის ტრანსფორმატორის მეორად გრაგნილში და გადაეცემა ცვლადი დენის ქსელს. გენერატორის რეჟიმში არსებული წვეის ძრავში ინვერტორისა და უკუ გამართვის შესაბამისი დენები $i_{o\delta}$, $i_{g,d}$ ურთიერთსაწინააღმდეგოდაა მიმართული, იქმნება უარყოფითი მობრუნის მომენტი, გენერატორი იკვებება საწინააღმდეგო მიმართულების მუდმივი დენით $i_{g,d}$. ამის გამო, რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში უმჯობესდება ელექტროდინამიური დამუხრუჭება. გენერატორში გადის შემცირებული ჯამური დენი და გენერატორის ბრუნთა რიცხვი ავტომატურად ინარჩუნებს სტაბილურ მნიშვნელობას და გენერატორის დაბალი დატვირთვის პირობებში რეკუპერაციული დამუხრუჭება მიმდინარეობს სასურველი შედეგებით [51, 52].

ანალოგიურ პროცესებს აქვს ადგილი აგრეგატების მუშაობის დროის დანარჩენ მომდევნო ინტერვალებში: $t_1 \leq t < t_2$; $t_2 \leq t < t_3$;

$t_3 \leq t < t_4$; ..., $t_{11} \leq t < t_{12}$.

3.2 მუდმივი დენის წევის ქვესადგურებში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში

აღნიშნულ ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციას მიყვავართ სიმძლავრის კოეფიციენტის ამადლებასთან. არსებობს სიმძლავრის კოეფიციენტის ამადლების დონისძიებების სამი ჯგუფი [53, 54]:

1. დონისძიება, რომელიც არ ითვალისწინებს მაკომპენსირებელი მოწყობილობების დაყენებას და არ ითხოვს დამასაბუთებელ გაანგარიშებებს;
2. დონისძიება, რომელიც დაკავშირებულია მაკომპენსირებელი მოწყობილობების გამოყენებასთან და ითხოვს დამასაბუთებელ ტექნიკურ-ეკონომიკურ გაანგარიშებებს;
3. დონისძიება, რომელიც დასაშვებია გამონაკლისის სახით და დასაბუთებული უნდა იქნას ტექნიკურ-ეკონომიკური გაანგარიშებით [3].

გამმართველი აგრეგატის სიმძლავრის კოეფიციენტი ტოლია :

$$K_{\delta} = \frac{p_1}{s_1} = \frac{3U_{1\phi} I_{1(1)} \cos\varphi_{(1)}}{3U_{1\phi} I_1} = \frac{I_{1(1)}}{I_1} \cos\varphi_{(1)} = K_{\phi} \cos\varphi_{(1)}. \quad (173)$$

სადაც: $I_1, I_{1(1)}$ – შესაბამისად ტრანსფორმატორის პირველადი დენის და მისი პირველადი (ძირითადი) ჰარმონიკის მოქმედი მნიშვნელობაა; $\varphi_{(1)}$ – ფაზათა ძვრის კუთხეა $I_{1(1)}$ დენსა და ქსელის ძაბვას შორის. მართვადი გამმართველის შემთხვევაში $\varphi_{(1)} = \alpha$. კომუტაციის პროცესის გამო დამატებით წარმოებს $I_{1(1)}$ დენის ფაზათა ძვრა ქსელის ძაბვის მიმართ $\frac{\gamma}{2}$ კუთხით. შესაბამისად ვღებულობთ:

$$K_{\delta} = K_{\phi} \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right) \quad (174)$$

სადაც $K_{\phi} = \frac{I_{1(1)}}{I_1}$ – დენის დამახინჯების კოეფიციენტი, α – გამმართველის მართვადი ვენტილების რეგულირების კუთხეა.

გამმართველში გამართული ძაბვის ღრმა რეგულირებისას ქსელიდან მოითხოვება მნიშვნელოვანი რეაქტიული სიმძლავრე:

$$Q_1 = P_1 \operatorname{tg} \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right),$$

სადაც: $P_1 = 3U_{1\phi} \cdot I_{1(1)} \cos \varphi_{(1)}$ – ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის მიერ ქსელიდან მოთხოვნილი აქტიური სიმძლავრეა. Q_1 – რეაქტიული სიმძლავრე იწვევს ქსელის ძაბვის შემცირებას. თუ გამმართველის სიმძლავრე თანაზომადია ქსელის მოკლე შერთვის სიმძლავრესთან, მაშინ ძაბვის ეს შემცირება შეიძლება იყოს მნიშვნელოვანი. ცვლადი დენის ქსელის მიმართ გამმართველი აგრეგატი წარმოადგენს დენის მაღალი რიგის ჰარმონიკების წყაროს.

ქსელის მიმყოფ ინვერტორში აქტიური სიმძლავრე გადაეცემა ცვლადი დენის ქსელს და ეს სიმძლავრე უარყოფითია. (173)-ში უნდა იქნას გათვალისწინებული P_1 –ის და $\cos \varphi_{(1)}$ –ის აბსოლუტური მნიშვნელობები. თუ მივიღებთ მხედველობაში [55]

$$\beta = \pi - \alpha, \quad (175)$$

მაშინ ვღებულობთ

$$k_o = k_{\phi} \cos \left(\beta - \frac{\gamma}{2} \right) \quad (176)$$

k_o –ის ამადლებისათვის საჭიროა ინვერტორი მუშაობდეს მცირე β – კუთხით, თავის მხრივ β – კუთხის შემცირება იწვევს δ – კუთხის შემცირებას ($\delta = \beta - \gamma$) და (4)-ის თანახმად ინვერტორის მდგრადობის შემცირებას. (175), (176)-დან გვაქვს:

$$k_o = k_{\phi} \cos \left(\pi - \alpha - \frac{\gamma}{2} \right) = -k_{\phi} \cos \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \quad (177)$$

(174), (177) –დან გამომდინარეობს, რომ

$$k_g = -k_o = k_{\phi} \cos \left(\alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \quad (178)$$

(178)-ში ნიშანი „-“ აღნიშნავს იმას, რომ გენერატორისათვის ცვლადი დენის ქსელიდან გამმართველით შემოსული აქტიური სიმძლავრე დადებითია, ხოლო ინვერტორიდან ცვლადი დენის ქსელში გადაცემული აქტიური სიმძლავრე უარყოფითი. [56].

3.3. შემხვედრ-პარალელურად ჩართული უკუ მართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელირება.

3.3-1. დროის $t_{n-1} = \frac{1}{\omega}(n-1)(\frac{\pi}{3} - \gamma)$ -დან $t_n = \frac{1}{\omega}n(\frac{\pi}{3} - \gamma)$ -მდე არასაკომუტაციო ინტერვალებში (ნახ.16)

წარმოდგენილი უკუ-გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატის ერთიან გარდამქმნელ პრინციპულ ელექტრულ სქემაზე აღნიშნულია შემდეგი პარამეტრები და ელექტრული სიდიდეები:

$$R^I, R^{II}, R^{III}; L_S^I, L_S^{II}, L_S^{III}; W_1, W_2, W_3; M^{11}, M^{22}, M^{33}; M^{12} = M^{21}, M^{13} = M^{31},$$

$M^{23} = M^{32}$; –შესაბამისად: სამფაზა ძალური ტრანსფორმატორის პირველადი, მეორადი გამმართველის და ინვერტორის გრაფილების აქტიური წინაღობის, ფანტვის ინდუქციურობის, ხვიათა რიცხვის და ურთიერთ ინდუქციურობების მნიშვნელობებია;

$R_{ორ.1}, R_{ორ.2}; L_{ორ.1}, L_{ორ.2}$ –ქსელის მიმყოფ ინვერტორის წრედში ჩართული რეაქტორების აქტიური წინაღობა და ინდუქციურობაა;

$R_{გლ.}, L_{გლ.}$ –სამფაზა ელექტრული ქსელის აქტიური წინაღობა და ინდუქციურობაა;

$E_{გენ.}$ –გენერატორულ რეჟიმში გადასული წვის ძრავის ე.მ. ძალაა. $u_k^I (k = 1,2,3)$ ძალური ტრანსფორმატორის პირველად გრაფილზე მოდებული სამფაზა ქსელის ფაზური ძაბვების მყისა მნიშვნელობებია:

$$u_k^I = U_m^I \cos \left[\omega_1 t - (k-1) \frac{2\pi}{3} + \varphi \right], (k = 1,2,3) \quad (179)$$

$i_k^I (k = 1,2,3), i_k^{II} (k = 2,3)$ – წვევის ძალური ტრანსფორმატორის პირველადი და მეორადი გრაფილების ფაზური დენების მყისა მნიშვნელობებია;

$u_k^{II}(k=2,3), u_{ok}^{III}(k=2,3)$ – წვევის ძალური ტრანსფორმატორის მეორადი გამმართველი და ინვერტორული გრაგნილების ფაზური ძაბვების მყისა მნიშვნელობებია $0'$ -ნეიტრალური წერტილის მიმართ;

$i_{o5k}(k=2,3), i_{gk}(k=2,3)$ – ქსელის მიმყოლი სამფაზა ძაბვის ინვერტორის გამოსავალზე და სამფაზა უკუ გამმართველის შესავალში ფაზური დენების მყისა მნიშვნელობებია.

უნდა აღინიშნოს, რომ აღნიშნულ არასაკომუტაციო ინტერვალში:
 $i_{g2} = i_{g3} = i_{g,d}$ და $i_{o52} = i_{o53} = i_{o5,d}$.

მათემატიკური მოდელირებისას მიღებულია ისეთი დაშვებები, როგორებიცაა თავ 1-სა და თავ 2-ში.

წარმოდგენილ ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელირების ძირითად საფუძველს წარმოადგენს: ფაზური ცვლადების მყისა მნიშვნელობების მიმართ კირსჰოფის კანონების საფუძველზე დაწერილი განტოლებათა სისტემა; ნახევარ გამტარული გარდამქმნელი აგრეგატების შესავალ და გამოსავალ ელექტრულ სიდიდეებს (ფაზური ძაბვები და დენები; გამართული ძაბვა და დენი) შორის, შესაბამისი კომუტაციური ფუნქციებით დამაკავშირებელი განტოლებები; კომუტაციური ფუნქციების ფურიეს მწკრივებად დაშლა; გენერატორულ რეჟიმში გადასული წვევის ძრავის მოძრაობის განტოლება; გენერატორის ელექტრომაგნიტური მომენტისა და მის ლილვზე წინაღობის მომენტის შესაბამისი რეზულტირებული დენების d, q მდგენელებზე დამოკიდებულების განტოლებები [57].

სამფაზა წვევის ტრანსფორმატორის პირველადი, მეორადი გამმართველი და ინვერტორული გრაგნილებისათვის გვაქვს ელექტრული წონასწორობის დიფერენციალური განტოლებები:

$$\left. \begin{aligned} u_k^I &= R^I i_k^I + \frac{d\psi_k^I}{dt}, (k = 1,2,3) \\ -u_k^{II} &= R^{II} i_k^{II} + \frac{d\psi_k^{II}}{dt}, (k = 2,3) \\ -u_{o\delta,k}^{III} &= R^{III} i_k^{III} + \frac{d\psi_{o\delta,k}^{III}}{dt}, (k = 2,3) \end{aligned} \right\} \quad (180)$$

ნაკადშებმების მყისა მნიშვნელობები $\psi_k^I, \psi_k^{II}, \psi_{o\delta,k}^{III}$, განისაზღვრებიან, როგორც განსახილველ ფაზის მაგნიტურ ღერძზე $i_n^I, i_m^{II}, i_{o\delta,m}^{III}$ დენებისაგან გამოწვეული ნაკადშებმების ვექტორების გეგმილების ჯამი

$$\psi_k^I = L_s^I i_k^I + \sum_{n=1}^3 M^{11} \cos(\alpha_n^I - \alpha_k^I) i_n^I + \sum_{m=2}^3 [M^{12} \cos(\alpha_m^{II} - \alpha_k^I) i_m^{II} + M^{13} \cos(\alpha_m^{III} - \alpha_k^I) i_{o\delta,m}^{III}], \quad (181)$$

$$\psi_k^{II} = L_s^{II} i_k^{II} + \sum_{m=2}^3 [M^{22} \cos(\alpha_m^{II} - \alpha_k^{II}) i_m^{II} + M^{23} \cos(\alpha_m^{III} - \alpha_k^{II}) i_{o\delta,m}^{III}] + \sum_{n=1}^3 M^{12} \cos(\alpha_n^I - \alpha_k^{II}) i_n^I, \quad (182)$$

$$\psi_{o\delta,k}^{III} = L_s^{III} i_{o\delta,k}^{III} + \sum_{m=2}^3 [M^{33} \cos(\alpha_m^{III} - \alpha_k^{III}) i_{o\delta,m}^{III} + M^{23} \cos(\alpha_m^{II} - \alpha_k^{III}) i_m^{II}] + \sum_{n=1}^3 M^{13} \cos(\alpha_n^I - \alpha_k^{III}) i_n^I, \quad (183)$$

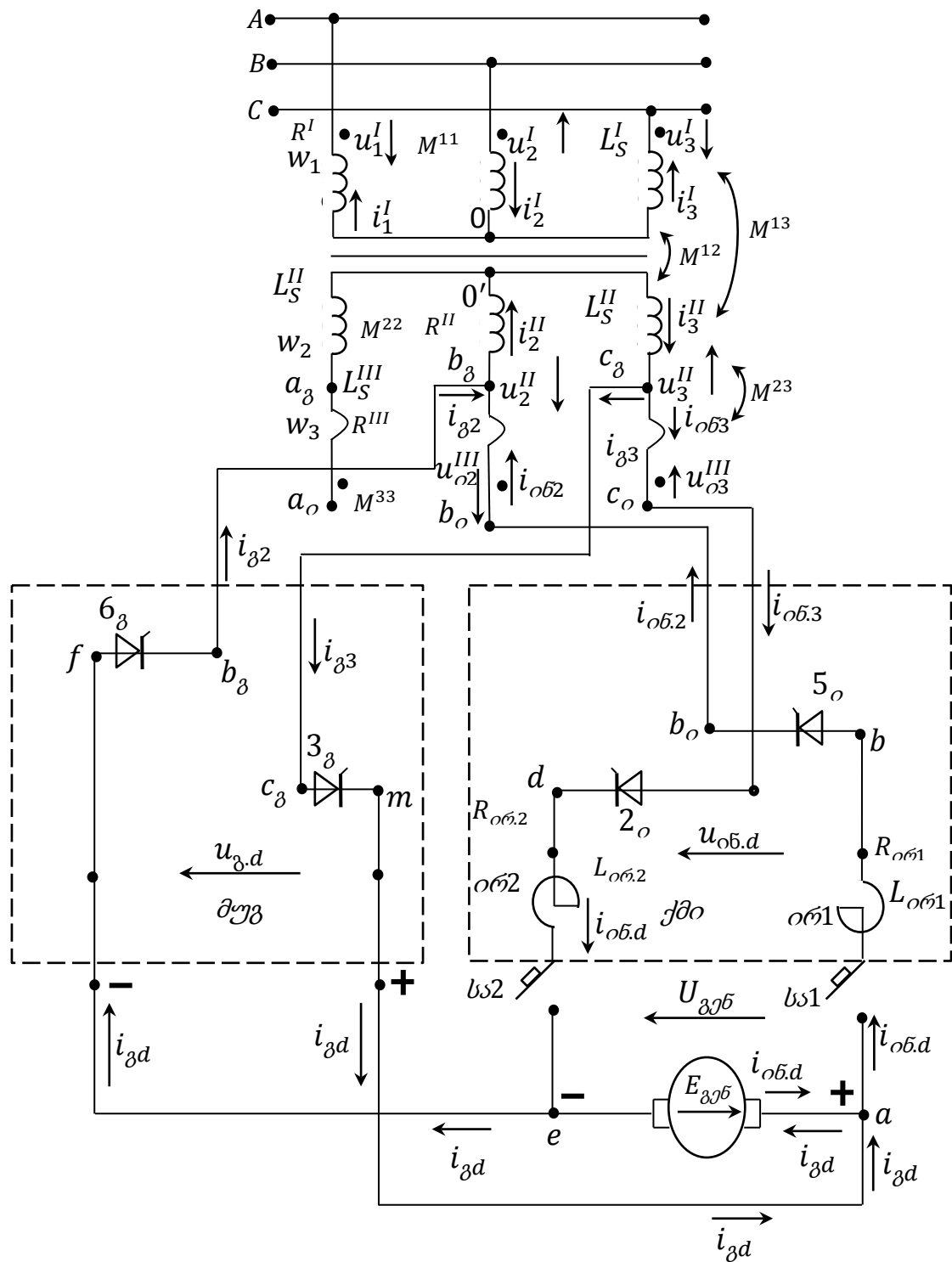
(181)-(183)-ში სამფაზა წევის ძალური ტრანსფორმატორის ფაზების მაგნიტური ღერძების განმსაზღვრელი კუთხეებისათვის გვაქვს:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1^I &= \alpha_1^{II} = \alpha_p, & \alpha_1^{III} &= \beta \\ \alpha_2^I &= \alpha_2^{II} = \alpha_p + 120^0, & \alpha_2^{III} &= \beta + 120^0 \\ \alpha_3^I &= \alpha_3^{II} = \alpha_p + 240^0, & \alpha_3^{III} &= \beta + 240^0 \end{aligned} \right\} \quad (184)$$

(184)-ში α_p გამმართველი აგრეგატის ტირისტორების რეგულირების კუთხეა, β -ინვერტორული აგრეგატის ტირისტორების წინსწრების კუთხე. კავშირი მათ შორის ასეთია:

$$\alpha_p + \beta = \pi, \quad \beta \geq \gamma + \delta, \quad (185)$$

სადაც (185)-ში γ -კომუტაციის კუთხეა, ხოლო δ -ტირისტორების მართვის თვისების ადგენის კუთხე.



ნახ. 16. უკუ გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატის პრინციპული ელექტრული სქემა დროის არასაკომუტაციო ინტერვალში $t_{n-1} = \frac{1}{\omega}(n-1)\left(\frac{\pi}{3} - \gamma\right)$ -დან $t_n = \frac{1}{\omega}n\left(\frac{\pi}{3} - \gamma\right)$ -მდე წევის ძრავის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში. მუგ-მართვადი უკუ გამმართველი; ქმი-ქსელის მიმყოლი ინვერტორი.

უნდა აღინიშნოს, რომ ფაზური ძაბვების მყისა მნიშვნელობები წარმოადგენენ შესაბამის კვანძებს შორის პოტენციალთა სხვაობებს (ნახ.16) [58, 59]:

$u_k^I (k = 1,2,3) - A, B, C$ – კვანძებსა და 0 – კვანძს შორის,

$u_k^{II} (k = 1,2,3) - a_\beta, b_\beta, c_\beta$ – კვანძებსა და 0' – კვანძს შორის,

$u_{o\delta k}^{III} (k = 1,2,3) - a_o, b_o, c_o$ – კვანძებსა და 0' – კვანძს შორის,

$u_{o\delta d}$ - b წერტილსა და d წერტილს შორის;

$u_{\beta d}$ - m -წერტილსა და f -წერტილს შორის.

ქსელის მიმყოფ სამფაზა ძაბვის ინვერტორის შესავალ და გამოსავალ ელექტრულ სიდიდეებს შორის კავშირი გამოსახება შემდეგი განტოლებებით:

$$\left. \begin{aligned} i_{o\delta k} &= i_{o\delta d} \cdot \rho_k^{o\delta}(t), k = (2,3) \\ u_{o\delta d} &= \sum_{k=2}^3 u_{o\delta k}^{III} \cdot \rho_k^{o\delta}(t), k = (2,3) \end{aligned} \right\} \quad (186)$$

სადაც $\rho_k^{o\delta}(t)$ $k = (2,3)$ -ინვერტორის კომუტაციური ფუნქციებია (ნახ. 9)

კომუტაციური ფუნქციების ძირითადი ჰარმონიკების გათვალისწინებით (186) კავშირის განტოლებები ღებულობენ შემდეგ სახეს:

$$\left. \begin{aligned} i_{o\delta k} &= -\frac{2\sqrt{3}}{\pi} i_{o\delta d} \sin[\omega^o t - (k-1)\frac{2\pi}{3} - \beta], k = (2,3) \\ u_{o\delta d} &= -\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \sum_{k=2}^3 u_{o\delta k}^{III} \sin[\omega^o t - (k-1)\frac{2\pi}{3} - \beta], k = (2,3) \end{aligned} \right\} \quad (187)$$

უკუ მართვადი გამმართველის შესავალ და გამოსავალ ელექტრულ სიდიდეებს შორის კავშირი გამოსახება(9'), (10')

განტოლებებით. კომუტაციური ფუნქციების ძირითადი ჰარმონიკების გათვალისწინებით გვაქვს

$$\left. \begin{aligned} i_{\vartheta,k} &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2} i_{\vartheta,d} \sin[\omega^{\vartheta}t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} - (k-1)\frac{2\pi}{3}], k = (2,3) \\ u_{\vartheta,k} &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \cos \frac{\gamma}{2} \sum_{k=2}^3 u_k'' \sin[\omega^{\vartheta}t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} - (k-1)\frac{2\pi}{3}] \end{aligned} \right\} \quad (188)$$

ქსელის მიმყოლი ინვერტორის შესავალის და უკუ გამმართველის გამოსავალის გენერატორულ რეჟიმში მყოფი წვევის ძრავის a და e წერტილებში პარალელურად გაერთიანებისას მიღებული კონტურებისათვის გვაქვს ელექტრული წონასწორობის შემდეგი განტოლებები:

$$u_{o\delta d} = -i^c \cdot R^c - L^c \frac{di^c}{dt} - M^{cp} \frac{di^p}{dt} + u_{\delta d}, \quad (189)$$

$$u_{\delta d} = E_{\beta\beta} - i^p \cdot R^p - L^p \frac{di^p}{dt} - M^{cp} \frac{di^c}{dt}, \quad (190)$$

სადაც (189) ,(190) –ში ზედა ინდექსები c, p აღნიშნავენ შესაბამისად სტატორის (აღზნების) და როტორის (ღუზის) წრედის პარამეტრებს:

$$\begin{aligned} i^c &= i_{o\delta d}, & i^p &= i_{o\delta d} - i_{\delta d}, & R^c &= R_{o\delta r1} + R_{o\delta r2}, \\ L^c &= L_{o\delta r1} + L_{o\delta r2}, & R^p &= R_{\varrho}, & L^p &= L_{\varrho}, \end{aligned} \quad (191)$$

M^{cp} –არის აღზნების გრაგნილსა და ღუზის გრაგნილს შორის ურთიერთ ინდუქციურობა.

მიღებული (180)-(190) განტოლებები წარმოადგენენ შემხვედრ-პარალელურად ჩართულ უკუმართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკურ მოდელს გამართული ძაბვის, დენის და ფაზური ელექტრული სიდიდეების მყისა მნიშვნელობების მიმართ.

თუ აღნიშნული მათემატიკური მოდელის შესაბამის (180)-(190) განტოლებებს დაემატებთ გენერატორულ რეჟიმში გადასული წვევის ძრავის როტორის (ღუზის) მოძრაობის განტოლებას

$$J \frac{d\omega_{\varrho}}{dt} = M_{\varrho} - M_{\varrho\text{ელ}}, \quad (192)$$

მივიღებთ ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების ანალიზისათვის საჭირო სრულ განტოლებათა სისტემას.

(192)-ში M_{ϱ} - არის ღუზის ლილვზე განვითარებული მექანიკური მომენტი

$$M_{\varrho} = \frac{P}{\omega_{\varrho}}, \quad (193)$$

სადაც P - არის მექანიკური ძალა, განპირობებული m -მასის მქონე მოძრავი შემადგენლობის v - სიჩქარით მოძრაობისას გარდაქმნილი კინეტიკური ენერჯიის დროში წარმოებულით.

$$P = \frac{d}{dt} \left(\frac{mv^2}{2} \right) = \frac{d}{dt} \left[\frac{m}{2} (v_0 + at)^2 \right] = ma(v_0 + at) \quad (194)$$

(194) ჩავსვათ (193)-ში და მივიღებთ

$$M_{\varrho} = \frac{ma}{\omega_{\varrho}} (v_0 + at) \quad (195)$$

(195)-ში t - არის დადმართში მოძრაობის დრო; a - დადმართში თანაბარი აჩქარება მ/წმ², v_0 - დადმართის დასაწყისში მოძრავი შემადგენლობის საწყისი სიჩქარე მ/წმ.

$M_{\varrho\text{ელ}}$ - არის გენერატორულ რეჟიმში გადასული წვევის ძრავის ელექტრომაგნიტური მომენტი, მიმართული ღუზის ბრუნვის მიმართულების საწინააღმდეგოდ. დამამუხრუჭებელი ელექტრომაგნიტური მომენტი დაიძლევა პირველადი ძრავით, რომელიც უზრუნველყოფს გენერატორის ღუზის ბრუნვას.

$$M_{\text{კლ}} = \frac{1}{2}(\psi_2^{II} i_2^{II} + \psi_3^{II} i_3^{II}) + \frac{1}{2}(\psi_2^{III} i_2^{III} + \psi_3^{III} i_3^{III}). \quad (196)$$

ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის გამოყენება (180)÷(184) განტოლებებისათვის, ზოგიერთი ტრიგონომეტრიული გარდაქმნების საფუძველზე, გვაძლევს წევრის ძალური ტრანსფორმატორის გრაგნილების ელექტრული წონასწორობის განტოლებებს საგრაგნილე რეზულტირებული კომპლექსური ელექტრული სიდიდეების მიმართ:

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} U_m e^{j(\omega t + \varphi + \alpha_p)} &= R^I i^I + \frac{d\psi^I}{dt}, \\ -\dot{U}^{II} &= R^{II} i^{II} + \frac{d\psi^{II}}{dt}, \end{aligned} \quad (197)$$

$$-U_{\text{ობ.}}^{III} = R^{III} i_{\text{ობ.}}^{III} + \frac{d\psi_{\text{ობ.}}^{III}}{dt}.$$

$$\psi^I = (L_s^I + \frac{3}{2} M^{11}) i^I + \frac{3}{2} M^{12} i^{II} + \frac{3}{2} M^{13} i_{\text{ობ.}}^{III},$$

$$\psi^{II} = (L_s^{II} + M^{22}) i^{II} + M^{23} i_{\text{ობ.}}^{III} + M^{12} i^I, \quad (198)$$

$$\psi_{\text{ობ.}}^{III} = M^{13} i^I + M^{23} i^{II} + (L_s^{III} + M^{33}) i_{\text{ობ.}}^{III},$$

სადაც რეზულტირებული კომპლექსური საგრაგნილო ელექტრული სიდიდეებისათვის გვაქვს შემდეგი გამოსახულებები:

$$i_{\text{ობ.}}^{II} = \sum_{K=2}^3 i_{\text{ობ.},k}^{II} e^{j\alpha_k^{II}}, \quad \dot{U}_{\text{ობ.}}^{II} = \dot{U}^{II},$$

$$\dot{U}^{II} = \sum_{K=2}^3 u_k^{II} e^{j\alpha_k^{II}}, \quad \dot{U}_{\text{ობ.}}^{III} = \sum_{K=2}^3 u_{\text{ობ.},k}^{III} e^{j\alpha_k^{III}},$$

$$\psi^I = \sum_{K=1}^3 \psi_k^I e^{j\alpha_k^I}, \quad \psi^{II} = \sum_{K=2}^3 \psi_k^{II} e^{j\alpha_k^{II}}, \quad (199)$$

$$\psi_{\text{ობ.}}^{III} = \sum_{K=2}^3 \psi_{\text{ობ.},k}^{III} e^{j\alpha_k^{III}}, \quad i^I = \sum_{K=1}^3 i_k^I e^{j\alpha_k^I},$$

$$i^{II} = \sum_{K=2}^3 i_k^{II} e^{j\alpha_k^{II}}, \quad i_{\text{ობ.}}^{III} = \sum_{K=2}^3 i_{\text{ობ.},k}^{III} e^{j\alpha_k^{III}},$$

(198)-ის ჩასმა (197)-ში გვაძლევს წვეის ძალური სამფაზა ტრანსფორმატორის ელექტრომაგნიტური წონასწორობის განტოლებათა სისტემის რეზულტირებული კომპლექსური ელექტრული სიდიდეების მიმართ:

$$\frac{3}{2}U_m e^{j(\omega t + \alpha_p + \varphi)} = R^I i^I + (L_S^I + \frac{3}{2}M^{11}) \frac{di^I}{dt} + \frac{3}{2}M^{12} \frac{di^{II}}{dt} + \frac{3}{2}M^{13} \frac{di_{\text{of.}}^{III}}{dt}, \quad (200)$$

$$-\dot{U}^{II} = M^{12} \frac{di^I}{dt} + R^{II} i^{II} + (L_S^{II} + M^{22}) \frac{di^{II}}{dt} + M^{23} \frac{di_{\text{of.}}^{III}}{dt}, \quad (201)$$

$$-\dot{U}_{\text{of.}}^{III} = M^{13} \frac{di^I}{dt} + M^{23} \frac{di^{II}}{dt} + R^{III} i_{\text{of.}}^{III} + (L_S^{III} + M^{33}) \frac{di_{\text{of.}}^{III}}{dt}, \quad (202)$$

(187) განტოლებები კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის საფუძველზე გვაძლევს $i_{\text{of.}}^{III}$ და $i_{\text{of.},d}$ დენებს შორის შემდეგ კომპლექსურ დამოკიდებულებას:

$$i_{\text{of.}}^{III} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} i_{\text{of.},d} [2e^{j(\omega^o t + \frac{\pi}{2})} + e^{-j(\omega^o t - 2\beta - \frac{\pi}{2})}], \quad (203)$$

აგრეთვე $\dot{U}_{\text{of.}}^{III}$ და $u_{\text{of.},d}$ ძაბვებს შორის ანალოგიურ დამოკიდებულებას:

$$u_{\text{of.},d} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} [e^{-j(\omega^o t + \frac{\pi}{2})} \dot{U}_{\text{of.}}^{III} - e^{j(\omega^o t - \frac{\pi}{2})} \dot{U}_{\text{of.}}^{III*}], \quad (204)$$

ანალოგიური გრდაქმნების საფუძველზე (188) განტოლებიდან ვღებულობთ შემდეგ კომპლექსურ დამოკიდებულებებს:

$$i_{\delta}^{II} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} i_{\delta,d} [2e^{j(\omega^{\delta} t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})} + e^{-j(\omega^{\delta} t - 2\alpha_p - \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{2})}], \quad (205)$$

$$u_{\delta,d} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} [e^{-j(\omega^{\delta} t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})} \dot{U}_{\text{of.}}^{II} - e^{j(\omega^{\delta} t - \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{2})} \dot{U}_{\text{of.}}^{II*}], \quad (206)$$

კირხჰოფის პირველი კანონის თანახმად b_{δ}, c_{δ} კვანძებისათვის გვაქვს:

$$i_k^{II} = i_{\text{of.},k} + i_{\delta,k}, \quad (k = 2,3) \quad (207)$$

დავამტკიცოთ თეორემა:

$$\dot{I}^{II} = \dot{I}_{\delta}^{II} + \dot{I}_{\text{of.}}^{III} \cdot e^{j(\alpha_p - \beta)}, \quad (208)$$

მართლაც გვაქვს:

$$\left. \begin{aligned} i_2'' &= i_{\delta 2} + i_{\delta 62} \\ i_3'' &= i_{\delta 3} + i_{\delta 63} \end{aligned} \right\} \quad (209)$$

გავამრავლოთ (203)-ის პირველი განტოლების ორივე მხარე $e^{j\alpha_2''}$ -ზე, ხოლო მეორე განტოლების ორივე მხარე კი- $e^{j\alpha_3''}$ -ზე, მივიღებთ:

$$i_2'' e^{j\alpha_2''} = i_{\delta 2} e^{j\alpha_2''} + i_{\delta 62} e^{j\alpha_2''}, \quad (210)$$

$$i_3'' e^{j\alpha_3''} = i_{\delta 3} e^{j\alpha_3''} + i_{\delta 63} e^{j\alpha_3''} \quad (211)$$

შევკრიბოთ (210), (211) განტოლებები წევრობრივ, მივიღებთ:

$$i_2'' e^{j\alpha_2''} + i_3'' e^{j\alpha_3''} = (i_{\delta 2} e^{j\alpha_2''} + i_{\delta 3} e^{j\alpha_3''}) + (i_{\delta 62} e^{j\alpha_2''} + i_{\delta 63} e^{j\alpha_3''}) \quad (212)$$

(199)-ის გათვალისწინებით (206)-ში გვაძლევს:

$$I'' = I_{\delta}'' + i_{\delta 62} e^{j\alpha_2''} + i_{\delta 63} e^{j\alpha_3''}, \quad (213)$$

(184)-დან გვაქვს:

$$\alpha_2'' = \alpha_p + 120^\circ, \quad \alpha_2''' = \beta + 120^\circ, \quad (214)$$

$$\alpha_3'' = \alpha_p + 240^\circ, \quad \alpha_3''' = \beta + 240^\circ, \quad (215)$$

(214)-დან გვაქვს:

$$120^\circ = \alpha_2'' - \alpha_p, \quad 120^\circ = \alpha_2''' - \beta, \quad \text{ანუ}$$

$$\alpha_2'' - \alpha_p = \alpha_2''' - \beta, \quad \text{საიდანაც:}$$

$$\alpha_2'' = \alpha_p - \beta + \alpha_2''', \quad (216)$$

ანალოგიურად (209)-დან ვღებულობთ:

$$\alpha_3'' = \alpha_p - \beta + \alpha_3''', \quad (217)$$

(216), (217) ჩავსვათ (213)-ში, მივიღებთ:

$$I'' = I_{\delta}'' + i_{\delta 62} e^{j(\alpha_p - \beta + \alpha_2''')} + i_{\delta 63} e^{j(\alpha_p - \beta + \alpha_3''')}, \quad \text{ანუ}$$

$$I'' = I_{\delta}'' + e^{j(\alpha_p - \beta)} (e^{j\alpha_2'''} i_{\delta 62} + e^{j\alpha_3'''} i_{\delta 63}), \quad (218)$$

გავითვალისწინოთ (199)-ის ბოლო გამოსახულება (218)-ში და მივიღებთ:

$$\dot{I}^{\text{II}} = \dot{I}_{\delta}^{\text{II}} + \dot{I}_{\text{o6.}}^{\text{III}} \cdot e^{j(\alpha_p - \beta)}, \quad (219)$$

ამგვარად, აღნიშნული თეორემა დამტკიცებულია.

რადგან გვაქვს ტოლობა: $\alpha_p + \beta = \pi$ მაშინ მეორენაირად (219) გადაიწერება ასე:

$$\dot{I}^{\text{II}} = \dot{I}_{\delta}^{\text{II}} + \dot{I}_{\text{o6.}}^{\text{III}} \cdot e^{j(2\alpha_p - \pi)}, \quad (220)$$

(190) ჩავსვათ (189)-ში მივიღებთ:

$$u_{\text{o6.d}} = -i^c \cdot R^c - (L^c + M^{cp}) \frac{di^c}{dt} - (L^p + M^{cp}) \frac{di^p}{dt} - i^p \cdot R^p + E_{\text{o66}}. \quad (221)$$

(187) ÷ (221) გამოსახულებებიდან ტრიგონომეტრიული გარდაქმნების შედეგად ვღებულობთ ნახ.16-ზე ნაჩვენებ ერთიანი გარდამქმნელი სისტემისათვის, ელექტრული წონასწორობის განტოლებათა სისტემას რეზულტირებული კომპლექსური ელექტრული სიდიდეების მიმართ:

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} U_m e^{j(\omega t + \alpha_p + \varphi)} = R^I i^I + (L_S^I + \frac{3}{2} M^{11}) \frac{di^I}{dt} + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2} [2e^{j(\omega^I t - \frac{\gamma}{2} \frac{\pi}{2})} + e^{-j(\omega^I t - 2\alpha_p - \frac{\gamma}{2} \frac{\pi}{2})}] \times \\ \times \frac{di_{\delta,d}}{dt} + j\omega^{\delta} \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2} M^{12} [2e^{j(\omega^I t - \frac{\gamma}{2} \frac{\pi}{2})} - e^{-j(\omega^I t - 2\alpha_p - \frac{\gamma}{2} \frac{\pi}{2})}] i_{\delta,d} + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} [e^{j(\alpha_p - \beta)} M^{12} + M^{13}] \times \\ \times [2e^{j(\omega^I t + \frac{\pi}{2})} + e^{-j(\omega^I t - 2\beta - \frac{\pi}{2})}] \frac{di_{\text{o6.d}}}{dt} + j\omega^0 \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} [e^{j(\alpha_p - \beta)} M^{12} + M^{13}] [2e^{j(\omega^I t + \frac{\pi}{2})} - e^{-j(\omega^I t - 2\beta - \frac{\pi}{2})}] i_{\text{o6.d}}, \end{aligned} \quad (222)$$

$$\begin{aligned} E_{\text{o66}} = -\frac{\sqrt{3}}{\pi} e^{-j(\omega^I t + \frac{\pi}{2})} M^{13} \frac{di^I}{dt} + \frac{\sqrt{3}}{\pi} e^{j(\omega^I t - \frac{\pi}{2})} M^{13} \frac{dI^*}{dt} - \frac{\sqrt{3}}{\pi} e^{-j(\omega^I t + \frac{\pi}{2})} M^{23} \frac{di^{II}}{dt} + \\ + \frac{\sqrt{3}}{\pi} e^{j(\omega^I t - \frac{\pi}{2})} M^{23} \frac{dI^*}{dt} - \frac{\sqrt{3}}{\pi} e^{-j(\omega^I t + \frac{\pi}{2})} (L_S^{III} + M^{33}) \frac{di_{\text{o6}}^{III}}{dt} + \frac{\sqrt{3}}{\pi} e^{j(\omega^I t - \frac{\pi}{2})} (L_S^{III} + M^{33}) \frac{dI_{\text{o6}}^{*III}}{dt} + \\ + (L_{\text{o6.o61}} + L_{\text{o6.o62}} + L_{\text{გ}} + 2M^{cp}) \frac{di_{\text{o6.d}}}{dt} - (L_{\text{გ}} + M^{cp}) \frac{di_{\delta,d}}{dt} - \frac{\sqrt{3}}{\pi} e^{-j(\omega^I t + \frac{\pi}{2})} R^{III} i_{\text{o6}}^{III} + \\ + \frac{\sqrt{3}}{\pi} e^{j(\omega^I t - \frac{\pi}{2})} R^{III} I_{\text{o6}}^{*III} + (R_{\text{o6.o61}} + R_{\text{o6.o62}} + R_{\text{გ}}) i_{\text{o6.d}} - R_{\text{გ}} i_{\delta,d}, \end{aligned} \quad (223)$$

$$\begin{aligned}
E_{\delta\sigma\delta} = & -\frac{\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} e^{-j(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})} M^{12} \frac{dI^I}{dt} + \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} e^{j(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{2})} M^{12} \frac{dI^I}{dt} - \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} e^{-j(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})} R^{II} I^{II} + \\
& + \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} e^{-j(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{2})} R^{II} I^{II} - \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} e^{-j(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})} (L_s^{II} + M^{22}) \frac{dI^{II}}{dt} + \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} e^{-j(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{2})} \times \\
& \times (L_s^{II} + M^{22}) \frac{dI^{II}}{dt} - \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} e^{-j(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})} M^{23} \frac{dI^{III}}{dt} + \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} e^{j(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{2})} M^{23} \frac{dI^{III}}{dt} + (L_\sigma + M^{cp}) \times \\
& \times \frac{di_{\delta\sigma\delta}}{dt} - L_\sigma \frac{di_{\delta\sigma\delta}}{dt} + R_\sigma i_{\delta\sigma\delta} - R_\sigma i_{\delta\sigma\delta}
\end{aligned} \tag{224}$$

(203), (205), (219) გამოსახულებები ჩავსვათ (222), (223) და (224) კომპლექსურ განტოლებებში, მიღებული განტოლებები დავეშალოთ ნამდვილ და წარმოსახვით d, q მდგენელებად, რის შედეგად მივიღებთ ოთხი განტოლებისაგან შემდგარ სისტემას, სადაც უცნობებად მიღებულია $I_d^I, I_q^I, i_{\delta d}$ და $i_{\sigma\delta d}$ დენები. ჩაწერის შემოკლების მიზნით მიღებული სკალარული განტოლებათა სისტემა წარმოვადგინოთ მატრიცულ სახეში:

$$\begin{aligned}
& \begin{vmatrix} L_d^I & 0 & M_{\delta d}^d(t) & M_{\sigma\delta d}^d(t) \\ 0 & L_q^I & -M_{\delta d}^q(t) & M_{\sigma\delta d}^q(t) \\ M_d^I(t) & -M_q^I(t) & M_{\delta d}^d(t) & M_{\sigma\delta d}^d(t) \\ -M_d^{II}(t) & M_q^{II}(t) & -L_{\delta d}(t) & -L_{\sigma\delta d}(t) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} dI_d^I / dt \\ dI_q^I / dt \\ di_{\delta d} / dt \\ di_{\sigma\delta d} / dt \end{vmatrix} = \\
& = \begin{vmatrix} \frac{3}{2} U_m \cos(\omega t + \alpha_p + \varphi) \\ \frac{3}{2} U_m \sin(\omega t + \alpha_p + \varphi) \\ E_{\delta\sigma\delta} \\ E_{\sigma\delta} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} -R^I & 0 & -X_{\delta d}^d(t) & X_{\sigma\delta d}^d(t) \\ 0 & -R^I & -X_{\delta d}^q(t) & -X_{\sigma\delta d}^q(t) \\ 0 & 0 & -X_{\delta d}^d(t) & -R_{\sigma\delta d}^d(t) \\ 0 & 0 & R_{\delta d}(t) & -R_{\sigma\delta d}^q(t) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I_d^I \\ I_q^I \\ \dot{i}_{\delta d} \\ \dot{i}_{\sigma\delta d} \end{vmatrix}
\end{aligned} \tag{225}$$

სადაც, ექვივალენტური ცვლადი კოეფიციენტებისათვის გვაქვს შემდეგი გამოსახულებები:

$$L_d^I = L_s^I + \frac{3}{2} M^{11}, \quad M_{\delta d}^d(t) = M_1 f_{1d}(t), \quad M_{\sigma\delta d}^d(t) = M_2 f_{3d}(t) + M_3 f_{5d}(t),$$

$$X_{\delta d}^d(t) = \omega^\delta M_1 f_{2q}(t), \quad X_{\sigma\delta d}^d(t) = \omega^\sigma M_2 f_{4q}(t) + \omega^\sigma M_3 f_{6q}(t), \quad L_q^I = L_d^I,$$

$$M_{\delta d}^q(t) = M_1 f_{1q}(t); \quad M_{\sigma\delta d}^q(t) = M_2 f_{3q}(t) + M_3 f_{5q}(t),$$

$$X_{\delta d}^q(t) = \omega^\delta M_1 f_{2d}(t), \quad X_{\sigma\delta d}^q(t) = \omega^\sigma [M_2 f_{4d}(t) + M_3 f_{6d}(t)],$$

$$M_d^I(t) = 2M_4 \sin \omega^\sigma t, \quad M_q^I(t) = 2M_4 \cos \omega^\sigma t,$$

$$\begin{aligned}
M_{\delta,d}(t) &= 2K_4M_5 \sin \omega^0 t \cdot f_{1d}(t) + 2K_4M_5 \cos \omega^0 t \cdot f_{1q}(t) - (L_{\varrho} + M^{cp}), \\
M_{\delta 6,d}(t) &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} L_3 \sin \omega^0 t \cdot f_{2d}(t) - \frac{2\sqrt{3}}{\pi} L_3 \cos \omega^0 t \cdot f_{2q}(t) + L_{\delta 6,\delta 1} + L_{\delta 6,\delta 2} + L_{\varrho} + 2M^{cp}, \\
X_{\delta,d}(t) &= \omega^{\delta} [2K_4M_5 \sin \omega^0 t \cdot f_{7d}(t) + 2K_4M_5 \cos \omega^0 t \cdot f_{7q}(t)] - R_{\varrho},
\end{aligned} \tag{226}$$

$$\begin{aligned}
R_{\delta 6,d}^d(t) &= \frac{6}{\pi^2} [\sin \omega^0 t \cdot f_{6d}(t) - \cos \omega^0 t \cdot f_{5q}(t)] R^{III} + R_{\delta 6,\delta 1} + R_{\delta 6,\delta 2} + R_{\varrho}, \\
M_d^{II}(t) &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} \sin(\omega^{\delta} t - \frac{\gamma}{2}) M^{12}, \quad M_q^{II}(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} \cos(\omega^{\delta} t - \frac{\gamma}{2}) M^{12}, \\
L_{\delta,d}(t) &= L_{\varrho} + \frac{6}{\pi^2} \cdot \frac{\sin \gamma}{\gamma} (L_S^{II} + M^{22}) f_{1d}(t) \sin(\omega^{\delta} t - \frac{\gamma}{2}), \\
L_{\delta 6,d}(t) &= \frac{6}{\pi^2} \cos \frac{\gamma}{2} \left\{ (L_S^{II} + M^{22}) f_{3d}(t) \sin(\omega^{\delta} t - \frac{\gamma}{2}) + M^{23} [f_{2d}(t) \sin(\omega^{\delta} t - \frac{\gamma}{2}) + \right. \\
&\quad \left. + f_{2q}(t) \cos(\omega^{\delta} t - \frac{\gamma}{2}) \right\} + L_{\varrho} + M^{cp}, \\
R_{\delta,d}(t) &= \frac{6}{\pi^2} \cdot \frac{\sin \gamma}{\gamma} [R^{II} f_{1d}(t) + \omega^{\delta} (L_S^{II} + M^{22}) f_{2q}(t)] \sin(\omega^{\delta} t - \frac{\gamma}{2}) + R_{\varrho}, \\
R_{\delta 6,d}^q(t) &= R_{\varrho} + \frac{6}{\pi^2} \cos \frac{\gamma}{2} (L_S^{II} + M^{22}) \omega^{\delta} [f_{4q}(t) \sin(\omega^{\delta} t - \frac{\gamma}{2}) - f_{4d}(t) \cos(\omega^{\delta} t - \frac{\gamma}{2})].
\end{aligned}$$

(226) გამოსახულებებში შემავალი ექვივალენტური ურთიერთ ინდუქციურობებისათვის და სრული ინდუქციურობისათვის გვაქვს შემდეგი გამოსახულებები:

$$\begin{aligned}
M_1 &= \frac{2\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2}, \quad M_2 = \frac{2\sqrt{3}}{2\pi} M^{12}, \quad M_3 = \frac{2\sqrt{3}}{2\pi} M^{13}, \quad M_4 = \frac{\sqrt{3}}{\pi} M^{13}, \\
M_5 &= \frac{\sqrt{3}}{\pi} M^{23}, \quad L_3 = \frac{\sqrt{3}}{4} (L_S^{III} + M^{33}), \quad K_4 = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2},
\end{aligned} \tag{227}$$

ცვლადი ტრიგონომეტრიული $f_{kd}(t), f_{kq}(t), (k = 1, 2, 3, \dots, 7)$ ფუნქციებისათვის გვაქვს შემდეგი გამოსახულებები:

$$\begin{aligned}
f_{1d}(t) &= 2 \sin(\omega^{\delta} t - \frac{\gamma}{2}) - \sin(\omega^{\delta} t - 2\alpha_p - \frac{\gamma}{2}), \\
f_{1q}(t) &= 2 \cos(\omega^{\delta} t - \frac{\gamma}{2}) + \cos(\omega^{\delta} t - 2\alpha_p - \frac{\gamma}{2}), \\
f_{2d}(t) &= 2 \sin(\omega^{\delta} t - \frac{\gamma}{2}) + \sin(\omega^{\delta} t - 2\alpha_p - \frac{\gamma}{2}),
\end{aligned}$$

$$f_{2q}(t) = 2 \cos(\omega^{\circ}t - \frac{\gamma}{2}) - \cos(\omega^{\circ}t - 2\alpha_p - \frac{\gamma}{2}), \quad (228)$$

$$f_{3d}(t) = \cos(\alpha_p - \beta)[\sin(\omega^{\circ}t - 2\beta) - 2 \sin \omega^{\circ}t] - \sin(\alpha_p - \beta)[\cos(\omega^{\circ}t - 2\beta) + 2 \cos \omega^{\circ}t],$$

$$f_{3q}(t) = \sin(\alpha_p - \beta)[\sin(\omega^{\circ}t - 2\beta) - 2 \sin \omega^{\circ}t] + \cos(\alpha_p - \beta)[\cos(\omega^{\circ}t - 2\beta) + 2 \cos \omega^{\circ}t],$$

$$f_{4d}(t) = \cos(\alpha_p - \beta)[2 \sin \omega^{\circ}t + \sin(\omega^{\circ}t - 2\beta)] - \sin(\alpha_p - \beta)[2 \cos \omega^{\circ}t - \cos(\omega^{\circ}t - 2\beta)],$$

$$f_{4q}(t) = \cos(\alpha_p - \beta)[2 \cos \omega^{\circ}t - \cos(\omega^{\circ}t - 2\beta)] + \sin(\alpha_p - \beta)[2 \sin \omega^{\circ}t + \sin(\omega^{\circ}t - 2\beta)],$$

$$f_{5d}(t) = -[2 \sin \omega^{\circ}t + \sin(\omega^{\circ}t - 2\beta)], \quad f_{5q}(t) = 2 \cos \omega^{\circ}t + \cos(\omega^{\circ}t - 2\beta),$$

$$f_{6d}(t) = -[2 \sin \omega^{\circ}t - \sin(\omega^{\circ}t - 2\beta)], \quad f_{6q}(t) = 2 \cos \omega^{\circ}t - \cos(\omega^{\circ}t - 2\beta),$$

$$f_{7d}(t) = 2 \sin(\omega^{\circ}t - \frac{\gamma}{2}) - \sin(\omega^{\circ}t - 2\alpha_p - \frac{\gamma}{2}), \quad f_{7q}(t) = 2 \cos(\omega^{\circ}t - \frac{\gamma}{2}) + \cos(\omega^{\circ}t - 2\alpha_p - \frac{\gamma}{2}),$$

მიღებული (225)-(228) განტოლებები და ცვლადი კოეფიციენტები წარმოადგენენ ნახ.16-ზე ნახვენები შემხვედრ-პარალელურად ჩართული უკუ მართვადი გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში პროცესების მათემატიკურ მოდელს ელექტრომაგნიტური გარდამავალი დროის $t_{n-1} = \frac{1}{\omega} (n-1)(\frac{\pi}{3} - \gamma)$ -დან $t_n = \frac{1}{\omega} n(\frac{\pi}{3} - \gamma)$ -მდე არასაკომუტაციო ინტერვალებში.

3.3-2 დროის $t_n = \frac{1}{\omega} n(\frac{\pi}{3} - \gamma)$ -დან $t_{n+1} = \frac{1}{\omega} [n(\frac{\pi}{3} - \gamma) + \gamma]$ -მდე (ნახ.17)

ამ ინტერვალებში წარმოებს კომუტაცია ინვერტორულ აგრეგატში 2_o და 4_o მართვად ტირისტორებს შორის და გამმართველ აგრეგატში 1_g და 3_g ტირისტორებს შორის. შესაბამისად მოკლედ არის შეერთებული c_g და a_g -მომჭერები და c_o და a_o -მომჭერები. 2_o - ტირისტორი გადის მუშაობიდან, ხოლო 4_o - ტირისტორი შემოდის მუშაობაში. ასევე 3_g - ტირისტორი გადის მუშაობიდან, ხოლო 1_g - ტირისტორი შემოდის მუშაობაში. დაუშვათ, რომ ინვერტორულ და გამმართველ აგრეგატებში კომუტაციის კუთხეები ერთნაირია და ტოლია γ -ს.

სქემაზე აღნიშნული პარამეტრები და ელექტრული სიდიდეები უცვლელია.

წევს ტრანსფორამტორის პირველადი, მეორადი გამმართველი და ინვერტორული გრაგნილებისათვის გვაქვს აღნიშნულ საკომუტაციო

ინტერვალებში ელექტრული წონასწორობის შემდეგი დიფერენციალური განტოლებები:

$$\left. \begin{aligned} u_k^I &= R^I i_k^I + \frac{d\psi_k^I}{dt}, (k=1,2,3), \\ -u_k^{II} &= R^{II} i_k^{II} + \frac{d\psi_k^{II}}{dt}, (k=1,2,3), \\ -u_{o6.k}^{III} &= R^{III} i_{o6.k}^{III} + \frac{d\psi_{o6.k}^{III}}{dt}, (k=1,2,3), \end{aligned} \right\} \quad (229)$$

ნაკადშებმების მყისა მნიშვნელობები $\psi_k^I, \psi_k^{II}, \psi_{o6.k}^{III}$ ($k=1,2,3$) განისაზღვრებიან (181)-(183) გამოსახულებების ანალოგიურად სამ-სამი წევრების აჯამების გათვალისწინებით:

$$\psi_k^I = L_s^I i_k^I + \sum_{n=1}^3 M^{11} \cos(\alpha_n^I - \alpha_k^I) i_n^I + \sum_{m=1}^3 [M^{12} \cos(\alpha_m^{II} - \alpha_k^I) i_m^{II} + M^{13} \cos(\alpha_m^{III} - \alpha_k^I) i_{o6.m}^{III}], (k=1,2,3) \quad (230)$$

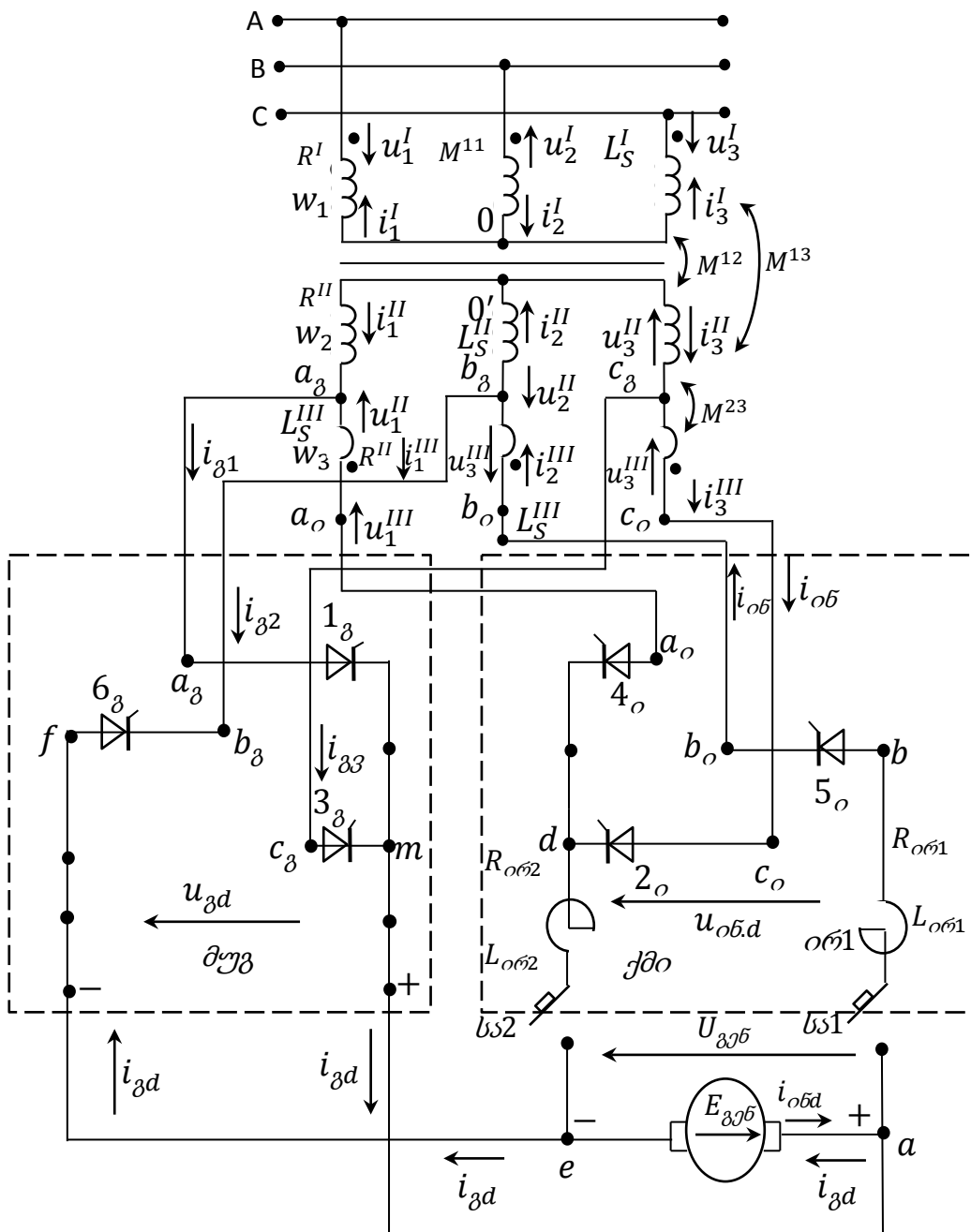
$$\psi_k^{II} = L_s^{II} i_k^{II} + \sum_{m=1}^3 [M^{22} \cos(\alpha_m^{II} - \alpha_k^{II}) i_m^{II} + M^{23} \cos(\alpha_m^{III} - \alpha_k^{II}) i_{o6.m}^{III}] + \sum_{n=1}^3 M^{12} \cos(\alpha_k^I - \alpha_k^{II}) i_n^I, (k=1,2,3) \quad (231)$$

$$\psi_{o6.k}^{III} = L_s^{III} i_{o6.k}^{III} + \sum_{m=1}^3 [M^{33} \cos(\alpha_m^{III} - \alpha_k^{III}) i_{o6.m}^{III} + M^{23} \cos(\alpha_m^{II} - \alpha_k^{III}) i_m^{II}] + \sum_{n=1}^3 M^{13} \cos(\alpha_n^I - \alpha_k^{III}) i_n^I, (k=1,2,3) \quad (232)$$

ფაზების მაგნიტური ღერძების განმსაზღვრელი კუთხეები აღნიშნულ ინტერვალში გამოისახება (184) ფორმულებით.

ძაბვების და დენების კომუტაციური ფუნქციების გათვალისწინებით ინვერტორის და გამმართველის შესავალ და გამოსავალ სიდიდეებს შორის დამოკიდებულება გამოისახება ფორმულებით:

$$\left. \begin{aligned} i_{o6.k}^{III} &= -\frac{2\sqrt{3}}{\pi} i_{o6.d} \sin[\omega^o t - (k-1)\frac{2\pi}{3} - \beta], (k=1,2,3) \\ u_{o6.d} &= -\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \sum_{k=1}^3 u_{o6.k}^{III} \sin[\omega^o t - (k-1)\frac{2\pi}{3} - \beta], (k=1,2,3) \end{aligned} \right\} \quad (233)$$



ნახ. 17. უკუ გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატის პრინციპული ელექტრული სქემა დროის საკომუტაციო ინტერვალში $t_n = \frac{1}{\omega} n \left(\frac{\pi}{3} - \gamma \right)$ -დან $t_{n+1} = \frac{1}{\omega} \left[n \left(\frac{\pi}{3} - \gamma \right) + \gamma \right]$ -მდე წევის ძრავის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში. მუგ-მართველი უკუგამმართველი; კმი-ქსელის მიმყოლი ინვერტორი.

$$\left. \begin{aligned} i_{\delta,k} &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} i_{\delta,d} \sin[\omega^{\delta} t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} - (k-1) \frac{2\pi}{3}], (k=1,2,3) \\ u_{\delta,d} &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} \cdot \sum_{k=1}^3 u_k'' \sin[\omega^{\delta} t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} - (k-1) \frac{2\pi}{3}], (k=1,2,3) \end{aligned} \right\} \quad (234)$$

$u_{\delta,d}$, $u_{\delta,d}$ ძაბვებისათვის დატვირთვის კონტურში ელექტრული წონასწორობის განტოლებებს აქვს ზუსტად (189), (190) განტოლებების ანალოგიური სახე.

ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების გაანგარიშებისათვის საჭიროა ამ ინტერვალში მიღებულ მათემატიკურ მოდელს დაეუმატოთ (192) განტოლება (195), (196) გამოსახულებების გათვალისწინებით.

ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის გამოყენება (189), (190) და (229)-(234) განტოლებებისათვის, ზოგიერთი ტრიგონომეტრიული გარდაქმნის საფუძველზე, გვაძლევს დროის აღნიშნულ საკომუტაციო ინტერვალში წვევის ძალური ტრანსფორმატორის გრაგნილების ელექტრული წონასწორობის განტოლებებს საგრაგნილე რეზულტიური კომპლექსური ელექტრული სიდიდეების მიმართ:

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} U_m e^{j(\omega t + \alpha_p + \varphi)} &= R^I \dot{I}^I + \frac{d\psi^I}{dt}, \\ -\dot{U}^{II} &= R^{II} \dot{I}^{II} + \frac{d\psi^{II}}{dt}, \end{aligned} \quad (235)$$

$$-\dot{U}_{\delta 6}^{III} = R^{III} \dot{I}_{\delta 6}^{III} + \frac{d\psi_{\delta 6}^{III}}{dt},$$

$$\dot{\psi}^I = (L_s^I + \frac{3}{2} M^{11}) \dot{I}^I + \frac{3}{2} M^{12} \dot{I}^{II} + \frac{3}{2} M^{13} \dot{I}_{\delta 6}^{III},$$

$$\dot{\psi}^{II} = (L_s^{II} + \frac{3}{2} M^{22}) \dot{I}^{II} + \frac{3}{2} M^{23} \dot{I}_{\delta 6}^{III} + \frac{3}{2} M^{12} \dot{I}^I, \quad (236)$$

$$\dot{\psi}_{\delta 6}^{III} = \frac{3}{2} M^{13} \dot{I}^I + \frac{3}{2} M^{23} \dot{I}^{II} + (L_s^{III} + \frac{3}{2} M^{33}) \dot{I}_{\delta 6}^{III},$$

(235), (236)-ში რეზულტირებული კომპლექსური საგრაგნილე ელექტრული სიდიდეებისათვის გვაქვს შემდეგი გამოსახულებები:

$$\dot{U}^{II} = \sum_{K=1}^3 u_k'' e^{j\alpha_k''}, \quad \dot{U}_{\delta 6}^{III} = \sum_{K=1}^3 u_{\delta 6,k}^{III} e^{j\alpha_k^{III}},$$

$$\dot{\psi}^I = \sum_{K=1}^3 \psi_k^I e^{j\alpha_k^I}, \quad \dot{\psi}^{II} = \sum_{K=1}^3 \psi_k^{II} e^{j\alpha_k^{II}}, \quad \dot{\psi}_{\delta 6}^{III} = \sum_{K=1}^3 \psi_{\delta 6,k}^{III} e^{j\alpha_k^{III}},$$

$$i^I = \sum_{K=1}^3 i_k^I e^{j\alpha_k^I}, \quad i^{II} = \sum_{K=1}^3 i_k^{II} e^{j\alpha_k^{II}}, \quad i_{\text{of.}}^{III} = \sum_{K=1}^3 i_{\text{of.},k}^{III} e^{j\alpha_k^{III}},$$

$$i_{\text{ფ}}^{II} = \sum_{K=1}^3 i_{\text{ფ},k}^{II} e^{j\alpha_k^{II}}, \quad \dot{U}_{\text{ფ}}^{II} = \dot{U}^{II} \quad (237)$$

(236)-ის ჩასმა (235)-ში გვაძლევს განტოლებათა სისტემას რეზულტირებული კომპლექსური ელექტრული სიდიდეების მიმართ:

$$\frac{3}{2} U_m e^{j(\omega t + \alpha_p + \varphi)} = R^I i^I + (L_S^I + \frac{3}{2} M^{11}) \frac{di^I}{dt} + \frac{3}{2} M^{12} \frac{di^{II}}{dt} + \frac{3}{2} M^{13} \frac{di_{\text{of.}}^{III}}{dt}, \quad (238)$$

$$-\dot{U}^{II} = \frac{3}{2} M^{12} \frac{di^I}{dt} + R^{II} i^{II} + (L_S^{II} + \frac{3}{2} M^{22}) \frac{di^{II}}{dt} + \frac{3}{2} M^{23} \frac{di_{\text{of.}}^{III}}{dt}, \quad (239)$$

$$-\dot{U}_{\text{of.}}^{III} = \frac{3}{2} M^{13} \frac{di^I}{dt} + \frac{3}{2} M^{23} \frac{di^{II}}{dt} + R^{III} i_{\text{of.}}^{III} + (L_S^{III} + \frac{3}{2} M^{33}) \frac{di_{\text{of.}}^{III}}{dt}, \quad (240)$$

(233), (234) გამოსახულებები ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნით მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$i_{\text{of.}}^{III} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} i_{\text{of.},d} e^{j(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})}, \quad (241)$$

$$i_{\text{ფ}}^{II} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} i_{\text{ფ},d} e^{j(\omega^0 t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})}, \quad (242)$$

$$u_{\text{of.},d} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} [e^{-j(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})} \dot{U}_{\text{of.}}^{III} + e^{j(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})} U_{\text{of.}}^{III*}], \quad (243)$$

$$u_{\text{ფ},d} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} [e^{-j(\omega^0 t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})} \dot{U}^{II} + e^{j(\omega^0 t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})} U^{II*}], \quad (244)$$

კირხჰოფის პირველი კანონის თანახმად დენების მყისა მნიშვნელობების მიმართ გვაქვს განტოლება:

$$i_k^{II} = i_{\text{of.},k}^{II} + i_{\text{ფ},k}^{II}, \quad (k = 1, 2, 3) \quad (245)$$

ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის საფუძველზე (245)-დან ვღებულობთ:

$$\dot{I}^{\text{II}} = \dot{I}_{\text{ფ}}^{\text{II}} + i_{\text{ფ.1}} e^{j\alpha_1^{\text{II}}} + i_{\text{ფ.2}} e^{j\alpha_2^{\text{II}}} + i_{\text{ფ.3}} e^{j\alpha_3^{\text{II}}} \quad (246)$$

(17)-დან გამომდინარეობს, რომ:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1^{\text{II}} &= \alpha_p - \beta + \alpha_1^{\text{III}} \\ \alpha_2^{\text{II}} &= \alpha_p - \beta + \alpha_2^{\text{III}} \\ \alpha_3^{\text{II}} &= \alpha_p - \beta + \alpha_3^{\text{III}} \end{aligned} \right\} \quad (247)$$

(247)-ის გათვალისწინება (246)-ში გვაძლევს:

$$\dot{I}^{\text{II}} = \dot{I}_{\text{ფ}}^{\text{II}} + i_{\text{ფ.}}^{\text{III}} e^{j(\alpha_p - \beta)}, \quad (248)$$

რაც (208) გამოსახულების ანალოგიურია .

ე.ი (208) გამოსახულების შესაბამისი თეორემა სამართლიანია როგორც არასაკომპუტაციო, ისე კომპუტაციური დროის ინტერვალებშიც.

(241), (242) ჩავსვათ (248) –ში და გარდაქმნის შემდეგ მივიღებთ:

$$\dot{I}^{\text{II}} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cdot i_{\text{ფ.დ}} e^{j(\omega^{\circ}t + \alpha_p - \beta + \frac{\pi}{2})} + \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} i_{\text{ფ.დ}} e^{j(\omega^{\circ}t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})}, \quad (249)$$

(243)-ის შეუღლებული გამოსახულება არის:

$$I^{\text{II}*} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cdot i_{\text{ფ.დ}} e^{-j(\omega^{\circ}t + \alpha_p - \beta + \frac{\pi}{2})} + \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} i_{\text{ფ.დ}} e^{-j(\omega^{\circ}t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})}, \quad (250)$$

(241)-დან გვაქვს:

$$I_{\text{ფ.}}^{\text{III}*} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} i_{\text{ფ.დ}} e^{-j(\omega^{\circ}t + \frac{\pi}{2})}, \quad (251)$$

(249)-(251)- დან გვაქვს:

$$\begin{aligned} \frac{dI^{\text{II}}}{dt} &= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} e^{j(\omega^{\circ}t + \alpha_p - \beta + \frac{\pi}{2})} \frac{di_{\text{ფ.დ}}}{dt} + \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} e^{j(\omega^{\circ}t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})} \frac{di_{\text{ფ.დ}}}{dt} + \\ &+ \frac{3\sqrt{3}}{\pi} j\omega^{\circ} i_{\text{ფ.დ}} e^{j(\omega^{\circ}t + \alpha_p - \beta + \frac{\pi}{2})} + \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} j\omega^{\circ} i_{\text{ფ.დ}} e^{j(\omega^{\circ}t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})}, \end{aligned} \quad (252)$$

$$\begin{aligned} \frac{dI^{*II}}{dt} = & \frac{3\sqrt{3}}{\pi} e^{-j(\omega^0 t + \alpha_p - \beta + \frac{\pi}{2})} \frac{di_{o6,d}}{dt} + \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2} e^{-j(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} \frac{\pi}{2})} \frac{di_{\delta,d}}{dt} - \\ & - \frac{3\sqrt{3}}{\pi} j\omega^0 i_{o6,d} e^{-j(\omega^0 t + \alpha_p - \beta + \frac{\pi}{2})} - \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2} j\omega^\delta i_{\delta,d} e^{-j(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} \frac{\pi}{2})}, \end{aligned} \quad (253)$$

$$\frac{dI^{III}}{dt} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} e^{j(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})} \frac{di_{o6,d}}{dt} + \frac{3\sqrt{3}}{\pi} j\omega^0 e^{j(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})} i_{o6,d}, \quad (254)$$

$$\frac{dI_{o6}^{*III}}{dt} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} e^{-j(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})} \frac{di_{o6,d}}{dt} - \frac{3\sqrt{3}}{\pi} j\omega^0 e^{-j(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})} i_{o6,d}, \quad (255)$$

(240) ჩავსვათ (243)-ში და გავითვალისწინოთ (249)-(255) გამოსახულებები, ზოგიერთი ტრიგონომეტრიული გარდაქმნების შედეგად ვღებულობთ:

$$\begin{aligned} u_{o6,d} = & \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} M^{13} e^{-j(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})} \frac{dI^I}{dt} + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} M^{13} e^{j(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})} \frac{dI^{*I}}{dt} + \frac{9}{\pi^2} [2(L_S^{III} + \frac{3}{2}M^{33}) + \\ & + 3M^{23} \cos(\alpha_p - \beta)] \frac{di_{o6,d}}{dt} + \frac{9}{\pi^2} [2R^{III} - 3\omega^0 M^{23} \sin(\alpha_p - \beta)] i_{o6,d} + \\ & + \frac{27}{\pi^2} M^{23} \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2} \cos[(\omega^0 - \omega^\delta)t + \frac{\gamma}{2} + \pi] \frac{di_{\delta,d}}{dt} + \frac{27}{\pi^2} \omega^\delta M^{23} \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2} i_{\delta,d} \sin[(\omega^0 - \omega^\delta)t + \pi + \frac{\gamma}{2}], \end{aligned} \quad (256)$$

(191)-ის გათვალისწინებით (221) გამოსახულება გადაიწერება ასე:

$$\begin{aligned} u_{o6,d} = & -(R_{o6,o61} + R_{o6,o62} + R_{\mathcal{L}}) i_{o6,d} - (L_{o6,o61} + L_{o6,o62} + L_{\mathcal{L}} + M^{cp}) \frac{di_{o6,d}}{dt} + (L_{\mathcal{L}} + M^{cp}) \frac{di_{\delta,d}}{dt} + \\ & + R_{\mathcal{L}} \cdot i_{\delta,d} + E_{\delta o6}, \end{aligned} \quad (257)$$

(257)-ის გათვალისწინება (256)-ში გვაძლევს:

$$\begin{aligned} E_{\delta o6} = & \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} M^{13} e^{-j(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})} \frac{dI^I}{dt} + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} M^{13} e^{j(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})} \frac{dI^{*I}}{dt} + \\ & + \{L_{o6,o61} + L_{o6,o62} + L_{\mathcal{L}} + M^{cp} + \frac{9}{\pi^2} [2(L_S^{III} + \frac{3}{2}M^{33}) + 3M^{23} \cos(\alpha_p - \beta)]\} \frac{di_{o6,d}}{dt} + \\ & + \{ \frac{27}{\pi^2} M^{23} \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2} \cos[(\omega^0 - \omega^\delta)t + \pi + \frac{\gamma}{2}] - (L_{\mathcal{L}} + M^{cp}) \} \frac{di_{\delta,d}}{dt} + \{R_{o6,o61} + R_{o6,o62} + R_{\mathcal{L}} + \frac{9}{\pi^2} \times \\ & \times [2R^{III} - 3\omega^0 M^{23} \sin(\alpha_p - \beta)]\} i_{o6,d} + \{ \frac{27}{\pi^2} \omega^\delta M^{23} \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2} \sin[(\omega^0 - \omega^\delta)t + \pi + \frac{\gamma}{2}] - R_{\mathcal{L}} \} i_{\delta,d}, \end{aligned} \quad (258)$$

(191)-ის გათვალისწინებით (190)-დან გვაქვს:

$$u_{\delta,d} = E_{\delta\delta} - (L_S + M^{cp}) \frac{di_{\delta,d}}{dt} + L_S \frac{di_{\delta,d}}{dt} - R_S i_{\delta,d} + R_S i_{\delta,d}, \quad (259)$$

(239)-დან გვაქვს:

$$U^{*II} = -\frac{3}{2} M^{12} \frac{dI^I}{dt} - R^{II} I^{*II} - (L_S^{II} + \frac{3}{2} M^{22}) \frac{dI^{*II}}{dt} - \frac{3}{2} M^{23} \frac{dI_{\delta,d}^{*III}}{dt}, \quad (260)$$

$$\dot{U}^{II} = -\frac{3}{2} M^{12} \frac{d\dot{I}^I}{dt} - R^{II} \dot{I}^{II} - (L_S^{II} + \frac{3}{2} M^{22}) \frac{d\dot{I}^{II}}{dt} - \frac{3}{2} M^{23} \frac{d\dot{I}_{\delta,d}^{III}}{dt}, \quad (261)$$

(241), (249), (250) და (251) ჩავსვით (260), (261)-ში, შესაბამისად მივიღებთ

$$\begin{aligned} \dot{U}^{II} = & -\frac{3}{2} M^{12} \frac{d\dot{I}^I}{dt} - \frac{3\sqrt{3}}{\pi} [(L_S^{II} + \frac{3}{2} M^{22}) e^{j(\omega^0 t + \alpha_p - \beta + \frac{\pi}{2})} + \frac{3}{2} M^{23} e^{j(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})}] \frac{d\dot{i}_{\delta,d}}{dt} - \\ & - \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (L_S^{II} + \frac{3}{2} M^{22}) \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} e^{j(\omega^0 t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})} \cdot \frac{d\dot{i}_{\delta,d}}{dt} - \{ \frac{3\sqrt{3}}{\pi} j\omega^0 (L_S^{II} + \frac{3}{2} M^{22}) \times \\ & \times e^{j(\omega^0 t + \alpha_p - \beta + \frac{\pi}{2})} + j\omega^0 \cdot \frac{3}{2} M^{23} \frac{3\sqrt{3}}{\pi} e^{j(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})} + R^{II} \frac{3\sqrt{3}}{\pi} e^{j(\omega^0 t + \alpha_p - \beta + \frac{\pi}{2})} \} \dot{i}_{\delta,d} - \\ & - [\frac{3\sqrt{3}}{\pi} R^{II} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} e^{j(\omega^0 t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})} + j\omega^0 (L_S^{II} + \frac{3}{2} M^{22}) \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} e^{j(\omega^0 t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})}] \dot{i}_{\delta,d}, \end{aligned} \quad (262)$$

$$\begin{aligned} U^{*II} = & -\frac{3}{2} M^{12} \frac{dI^{*I}}{dt} - \frac{3\sqrt{3}}{\pi} [(L_S^{II} + \frac{3}{2} M^{22}) e^{-j(\omega^0 t + \alpha_p - \beta + \frac{\pi}{2})} + \frac{3}{2} M^{23} e^{-j(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})}] \frac{d\dot{i}_{\delta,d}}{dt} - \\ & - \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (L_S^{II} + \frac{3}{2} M^{22}) \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} e^{-j(\omega^0 t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})} \frac{d\dot{i}_{\delta,d}}{dt} + \{ \frac{3\sqrt{3}}{\pi} j\omega^0 (L_S^{II} + \frac{3}{2} M^{22}) \times \\ & \times e^{-j(\omega^0 t + \alpha_p - \beta + \frac{\pi}{2})} + j\omega^0 \cdot \frac{3}{2} M^{23} \frac{3\sqrt{3}}{\pi} e^{-j(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})} + R^{II} \frac{3\sqrt{3}}{\pi} e^{-j(\omega^0 t + \alpha_p - \beta + \frac{\pi}{2})} \} \dot{i}_{\delta,d} - \\ & - [\frac{3\sqrt{3}}{\pi} R^{II} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} e^{-j(\omega^0 t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})} - j\omega^0 (L_S^{II} + \frac{3}{2} M^{22}) \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} e^{-j(\omega^0 t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})}] \dot{i}_{\delta,d}, \end{aligned} \quad (263)$$

(262), (263) ჩავსვით (244)-ში და ზოგიერთი გარდაქმნების შედეგად $u_{\delta,d}$ - დახვევისათვის ვღებულობთ:

$$\begin{aligned}
u_{\delta,d} = & -\frac{\sqrt{3}}{\pi} M^{12} \cos \frac{\gamma}{2} \cos(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2}) \frac{dI_d^I}{dt} - \frac{\sqrt{3}}{\pi} M^{12} \cos \frac{\gamma}{2} \sin(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2}) \frac{dI_q^I}{dt} - \\
& - \left\{ \frac{18}{\pi} \cos[(\omega^\circ - \omega^\delta)t + \alpha_p + \frac{\gamma}{2} - \beta + \pi] (L_S^{\prime\prime} + \frac{3}{2} M^{22}) + \right. \\
& + \frac{27}{\pi} M^{23} \cos[(\omega^\circ - \omega^\delta)t + \frac{\gamma}{2} + \pi] \cos \frac{\gamma}{2} \left. \frac{di_{o6,d}}{dt} - \frac{18}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} (L_S^{\prime\prime} + \frac{3}{2} M^{22}) \times \right. \\
& \times \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} \frac{di_{\delta,d}}{dt} + \left. \left\{ \frac{6\sqrt{3}}{\pi} [\omega^\circ (L_S^{\prime\prime} + \frac{3}{2} M^{22}) \sin((\omega^\circ - \omega^\delta)t + \alpha_p - \beta - \frac{\gamma}{2} + \pi) + \right. \right. \\
& + R^{\prime\prime} \cos((\omega^\circ - \omega^\delta)t + \alpha_p - \beta + \frac{\gamma}{2} + \pi)] + \left. \frac{9\sqrt{3}}{\pi} M^{23} \sin[(\omega^\circ - \omega^\delta)t - \frac{\gamma}{2} + \pi] \right\} i_{o6,d} - \\
& - \frac{6\sqrt{3}}{\pi} R^{\prime\prime} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} i_{\delta,d},
\end{aligned} \tag{264}$$

(190) და (264)-დან (191)-ის გათვალისწინებით გვაქვს შემდეგი განტოლება:

$$\begin{aligned}
E_{\delta\delta^6} = & -\frac{\sqrt{3}}{\pi} M^{12} \cos \frac{\gamma}{2} \cos(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2}) \frac{dI_d^I}{dt} - \frac{\sqrt{3}}{\pi} M^{12} \cos \frac{\gamma}{2} \sin(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2}) \frac{dI_q^I}{dt} - \\
& - \left\{ \frac{18}{\pi} \cos[(\omega^\circ - \omega^\delta)t + \alpha_p + \frac{\gamma}{2} - \beta + \pi] (L_S^{\prime\prime} + \frac{3}{2} M^{22}) + \right. \\
& + \frac{27}{\pi} M^{23} \cos[(\omega^\circ - \omega^\delta)t + \frac{\gamma}{2} + \pi] \cos \frac{\gamma}{2} - (L_{\mathcal{G}} + M^{pc}) \left. \right\} \frac{di_{o6,d}}{dt} - \\
& - \left[\frac{18}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} (L_S^{\prime\prime} + \frac{3}{2} M^{22}) \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} + L_{\mathcal{G}} \right] \frac{di_{\delta,d}}{dt} + \left\{ \frac{6\sqrt{3}}{\pi} [\omega^\circ (L_S^{\prime\prime} + \frac{3}{2} M^{22}) \times \right. \\
& \times \sin((\omega^\circ - \omega^\delta)t + \alpha_p - \beta - \frac{\gamma}{2} + \pi) + R^{\prime\prime} \cos((\omega^\circ - \omega^\delta)t + \alpha_p - \beta + \frac{\gamma}{2} + \pi)] + \\
& + \left. \frac{9\sqrt{3}}{\pi} M^{23} \sin[(\omega^\circ - \omega^\delta)t - \frac{\gamma}{2} + \pi] + R_{\mathcal{G}} \right\} i_{o6,d} - (R_{\mathcal{G}} + \frac{6\sqrt{3}}{\pi} R^{\prime\prime} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}}) i_{\delta,d},
\end{aligned} \tag{265}$$

(258) განტოლება გადაიწერება ასეთნაირად:

$$\begin{aligned}
E_{\delta\delta^6} = & \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} M^{13} \cos(\omega^\circ t + \frac{\pi}{2}) \frac{dI_d^I}{dt} + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} M^{13} \sin(\omega^\circ t + \frac{\pi}{2}) \frac{dI_q^I}{dt} + \\
& + \{ L_{o6,o61} + L_{o6,o62} + L_{\mathcal{G}} + M^{cp} + \frac{9}{\pi^2} [2(L_S^{\prime\prime} + \frac{3}{2} M^{33}) + 3M^{23} \cos(\alpha_p - \beta)] \} \frac{di_{o6,d}}{dt} + \\
& + \left\{ \frac{27}{\pi^2} M^{23} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} \cos[(\omega^\circ - \omega^\delta)t + \frac{\gamma}{2} + \pi] - (L_{\mathcal{G}} + M^{cp}) \right\} \frac{di_{\delta,d}}{dt} + \{ R_{o6,o61} + R_{o6,o62} + R_{\mathcal{G}} + \frac{9}{\pi^2} \times \\
& \times [2R^{\prime\prime\prime} - 3\omega^\circ M^{23} \sin(\alpha_p - \beta)] \} i_{o6,d} + \{ -R_{\mathcal{G}} + \frac{27}{\pi^2} \omega^\delta M^{23} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} \sin[(\omega^\circ - \omega^\delta)t + \pi + \frac{\gamma}{2}] \} i_{\delta,d},
\end{aligned} \tag{266}$$

(241) და (249) ჩავსვათ (238)-ში, შესაბამისი გარდაქმნების შემდეგ მივიღებთ:

$$\begin{aligned}
\frac{3}{2}U_m e^{j(\omega t + \alpha_p + \varphi)} &= R^I I^I + (L'_S + \frac{3}{2}M^{11}) \frac{dI^I}{dt} + \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} [M^{12} e^{j(\omega^0 t + \alpha_p - \beta + \frac{\pi}{2})} + M^{13} e^{j(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})}] \frac{di_{06.d}}{dt} + \\
&+ \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} e^{j(\omega^0 t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})} \frac{di_{\delta.d}}{dt} + j\omega^0 [e^{j(\omega^0 t + \alpha_p - \beta + \frac{\pi}{2})} M^{12} + M^{13} e^{j(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})}] i_{06.d} + \\
&+ j\omega^0 e^{j(\omega^0 t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})} M^{12} i_{\delta.d},
\end{aligned} \tag{267}$$

(267) განტოლებიდან, ტრიგონომეტრიული გარდაქმნების შედეგად, შესაძლებელია მიღებული იქნას ქსელის რეზულტირებული კომპლექსური \dot{U}^I ძაბვის და \dot{I}^I -დენის d, q მდგენელების მიმართ შესაბამისი სკალარული განტოლებები:

$$\begin{aligned}
\frac{3}{2}U_m \cos(\omega t + \alpha_p + \varphi) &= R^I I'_d + (L'_S + \frac{3}{2}M^{11}) \frac{dI'_d}{dt} + \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} [M^{12} \cos(\omega^0 t + \alpha_p - \beta + \frac{\pi}{2}) + \\
&+ M^{13} \cos(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})] \frac{di_{06.d}}{dt} + \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} \cos(\omega^0 t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2}) \frac{di_{\delta.d}}{dt} - \\
&- \omega^0 [M^{12} \sin(\omega^0 t + \alpha_p - \beta + \frac{\pi}{2}) + M^{13} \sin(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})] i_{06.d} - \omega^0 M^{12} \sin(\omega^0 t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2}) i_{\delta.d},
\end{aligned} \tag{268}$$

$$\begin{aligned}
\frac{3}{2}U_m \sin(\omega t + \alpha_p + \varphi) &= R^I I'_q + (L'_S + \frac{3}{2}M^{11}) \frac{dI'_q}{dt} + \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} [M^{12} \sin(\omega^0 t + \alpha_p - \beta + \frac{\pi}{2}) + \\
&+ M^{13} \sin(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})] \frac{di_{06.d}}{dt} + \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} \sin(\omega^0 t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2}) \frac{di_{\delta.d}}{dt} + \\
&+ \omega^0 [M^{12} \cos(\omega^0 t + \alpha_p - \beta + \frac{\pi}{2}) + M^{13} \cos(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})] i_{06.d} + \omega^0 M^{12} \cos(\omega^0 t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2}) i_{\delta.d},
\end{aligned} \tag{269}$$

(268), (269), (265) და (266) სკალარული დიფერენციალური განტოლებები, ექვივალენტური პარამეტრების შემოყვანის გათვალისწინებით, შესაძლებელია წარმოდგენილი იქნას (225)-ის ანალოგიურ მატრიცულ განტოლებათა სისტემა:

$$\begin{aligned}
&\begin{pmatrix} L_d^{kk} & 0 & M_{\delta.d}^{dk}(t) & M_{06.d}^{dk}(t) \\ 0 & L_d^{kk} & M_{\delta.d}^{qk}(t) & M_{06.d}^{qk}(t) \\ -M_d^{lk}(t) & -M_q^{lk}(t) & -L_{\delta.d}^k(t) & -L_{06.d}^k(t) \\ M_d^{lk}(t) & M_q^{lk}(t) & M_{\delta.d}^k(t) & M_{06.d}^k(t) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} dI'_d / dt \\ dI'_q / dt \\ di_{\delta.d} / dt \\ di_{06.d} / dt \end{pmatrix} = \\
&= \begin{pmatrix} \frac{3}{2} U_m \cos(\omega t + \alpha_p + \varphi) \\ \frac{3}{2} U_m \sin(\omega t + \alpha_p + \varphi) \\ E_{\delta\delta 6} \\ E_{\delta\delta 6} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -R^I & 0 & X_{\delta.d}^{dk}(t) & X_{06.d}^{dk}(t) \\ 0 & -R^I & -X_{\delta.d}^{qk}(t) & -X_{06.d}^{qk}(t) \\ 0 & 0 & R_{\delta.d}^k(t) & -R_{06.d}^{qk}(t) \\ 0 & 0 & -X_{\delta.d}^k(t) & -R_{06.d}^{dk}(t) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I'_d \\ I'_q \\ i_{\delta.d} \\ i_{06.d} \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{270}$$

მიღებულ (270) განტოლებათა სისტემა, ჩაწერილი მატრიცულ სახეში, წარმოადგენს ნახ.17-ზე წარმოდგენილი ერთიანი გარდაქმნელი სისტემის სრულ მათემატიკურ მოდელს.

ექვივალენტური ცვლადი კოეფიციენტებისა და პარამეტრებისათვის გვაქვს შემდეგი გამოსახულებები:

$$\begin{aligned}
X_{\delta,d}^{dk}(t) &= \omega^\delta M^{12} \sin(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2}); \\
X_{\delta,d}^{dk}(t) &= \omega^0 [M^{12} \sin(\omega^0 t + \alpha_p - \beta + \frac{\pi}{2}) + M^{13} \sin(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})]; \quad L_d^k = L_d^l = L_s^l + \frac{3}{2} M^{11}; \\
M_{\delta,d}^{dk}(t) &= \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} \cos(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2}); \\
M_{\delta,d}^{dk}(t) &= \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} [M^{12} \cos(\omega^0 t + \alpha_p - \beta + \frac{\pi}{2}) + M^{13} \cos(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})]; \\
M_{\delta,d}^{qk}(t) &= \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} \sin(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2}); \\
X_{\delta,d}^{qk}(t) &= \omega^\delta M^{12} \cos(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2}); \\
X_{\delta,d}^{qk}(t) &= \omega^0 [M^{12} \cos(\omega^0 t + \alpha_p - \beta + \frac{\pi}{2}) + M^{13} \cos(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})]; \\
M_{\delta,d}^{qk}(t) &= \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} \sin(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2}); \\
M_{\delta,d}^{qk}(t) &= \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} [M^{12} \sin(\omega^0 t + \alpha_p - \beta + \frac{\pi}{2}) + M^{13} \sin(\omega^0 t + \frac{\pi}{2})]; \\
X_{\delta,d}^k(t) &= -R_\varrho + \frac{27}{\pi^2} \omega^\delta M^{23} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} \sin[(\omega^0 - \omega^\delta)t + \pi + \frac{\gamma}{2}]; \\
R_{\delta,d}^{dk}(t) &= R_{\delta,\delta,1} + R_{\delta,\delta,2} + R_\varrho + \frac{9}{\pi^2} [2R^{III} - 3\omega^0 M^{23} \sin(\alpha_p - \beta)]; \\
M_d^{lk}(t) &= \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} M^{13} \cos(\omega^0 t + \frac{\pi}{2}); \quad M_q^{lk}(t) = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} M^{13} \sin(\omega^0 t + \frac{\pi}{2}); \\
M_{\delta,d}^k(t) &= \frac{27}{\pi^2} M^{23} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} \cos[(\omega^0 - \omega^\delta)t + \frac{\gamma}{2} + \pi] - (L_\varrho + M^{cp}); \\
M_{\delta,d}^k(t) &= L_{\delta,\delta,1} + L_{\delta,\delta,2} + L_\varrho + M^{cp} + \frac{9}{\pi^2} [2(L_s^{II} - \frac{3}{2} M^{33}) + 3M^{23} \cos(\alpha_p - \beta)]; \\
R_{\delta,d}^k(t) &= R_\varrho + \frac{6\sqrt{3}}{\pi} R^{II} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}}; \\
R_{\delta,d}^{qk}(t) &= \frac{6\sqrt{3}}{\pi} [\omega^0 (L_s^{II} + \frac{3}{2} M^{22}) \sin((\omega^0 - \omega^\delta)t + \alpha_p - \beta - \frac{\gamma}{2} + \pi) + \\
&+ R^{II} \cos((\omega^0 - \omega^\delta)t + \alpha_p - \beta + \frac{\gamma}{2} + \pi)] + \frac{9\sqrt{3}}{\pi} \omega^0 M^{23} \sin[(\omega^0 - \omega^\delta)t - \frac{\gamma}{2} + \pi] + R_\varrho; \\
M_d^{lk}(t) &= \frac{\sqrt{3}}{\pi} M^{12} \cos \frac{\gamma}{2} \cos(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2}); \quad M_q^{lk}(t) = \frac{\sqrt{3}}{\pi} M^{12} \cos \frac{\gamma}{2} \sin(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2}); \\
L_{\delta,d}^k(t) &= L_\varrho + \frac{18}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} (L_s^{II} + \frac{3}{2} M^{22}) \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}}; \\
L_{\delta,d}^k(t) &= \frac{18}{\pi} \cos[(\omega^0 - \omega^\delta)t + \alpha_p + \frac{\gamma}{2} - \beta + \pi] (L_s^{II} + \frac{3}{2} M^{22}) + \\
&+ \frac{27}{\pi} M^{23} \cos[(\omega^0 - \omega^\delta)t + \frac{\gamma}{2} + \pi] \cos \frac{\gamma}{2} - (L_\varrho + M^{pc});
\end{aligned} \tag{271}$$

3.4. უკუ მართვად გამმართოველ-ინვერტორულ აგრეგატებში
ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების
კომპიუტერული მოდელირება

3.4-1. დროის $t_{n-1} = \frac{1}{\omega}(n-1)(\frac{\pi}{3} - \gamma)$ -დან $t_n = \frac{1}{\omega}n(\frac{\pi}{3} - \gamma)$ -მდე
არასაკომუტაციო ინტერვალებში.

კომპიუტერული მოდელირების საფუძველს წარმოადგენს (225)

განტოლებათა სისტემის ამოხსნა $I_d^I, I_q^I, i_{\gamma,d}, i_{o6,d}$ დენების წარმოებულების მიმართ.

შესაბამისი გარდაქმნების, აღნიშვნების შემოტანის და (225) სისტემის ამოხსნის შედეგად ვღებულობთ შემდეგ მატრიცულ განტოლებათა სისტემას $dI_d^I/dt, dI_q^I/dt, di_{\gamma,d}/dt, di_{o6,d}/dt$ -დენების წარმოებულების მიმართ:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} dI_d^I/dt \\ dI_q^I/dt \\ di_{\gamma,d}/dt \\ di_{o6,d}/dt \end{pmatrix} &= \frac{1}{\Delta(t)} \left\{ \begin{pmatrix} \frac{3}{2} U_m \|\delta_{11}(t)\| \cdot \cos(\omega t + \alpha_p + \varphi) \\ -\frac{3}{2} U_m \|\delta_{21}(t)\| \cdot \cos(\omega t + \alpha_p + \varphi) \\ \frac{3}{2} U_m \|\delta_{31}(t)\| \cdot \cos(\omega t + \alpha_p + \varphi) \\ -\frac{3}{2} U_m \|\delta_{41}(t)\| \cdot \cos(\omega t + \alpha_p + \varphi) \end{pmatrix} + \right. \\ &+ \begin{pmatrix} \Delta_{E_{\gamma 6}}^{1d}(t) \cdot E_{\gamma 6} - \frac{3}{2} U_m \cdot \|\delta_{12}(t)\| \cdot \sin(\omega t + \alpha_p + \varphi) \\ \Delta_{E_{\gamma 6}}^{1q}(t) \cdot E_{\gamma 6} + \frac{3}{2} U_m \cdot \|\delta_{22}(t)\| \cdot \sin(\omega t + \alpha_p + \varphi) \\ \Delta_{E_{\gamma 6}}^{2d}(t) \cdot E_{\gamma 6} - \frac{3}{2} U_m \cdot \|\delta_{32}(t)\| \cdot \sin(\omega t + \alpha_p + \varphi) \\ \Delta_{E_{\gamma 6}}^{2q}(t) \cdot E_{\gamma 6} + \frac{3}{2} U_m \cdot \|\delta_{42}(t)\| \cdot \sin(\omega t + \alpha_p + \varphi) \end{pmatrix} + \\ &+ \left. \begin{pmatrix} -R^I \|\delta_{11}(t)\| & R^I \|\delta_{12}(t)\| & \Delta_{\gamma,d}^{1d}(t) & \Delta_{o6,d}^{1d}(t) \\ R^I \|\delta_{21}(t)\| & -R^I \|\delta_{22}(t)\| & \Delta_{\gamma,d}^{1q}(t) & \Delta_{o6,d}^{1q}(t) \\ -R^I \|\delta_{31}(t)\| & R^I \|\delta_{32}(t)\| & \Delta_{\gamma,d}^{2d}(t) & \Delta_{o6,d}^{2d}(t) \\ R^I \|\delta_{41}(t)\| & -R^I \|\delta_{42}(t)\| & \Delta_{\gamma,d}^{2q}(t) & \Delta_{o6,d}^{2q}(t) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_d^I \\ I_q^I \\ i_{\gamma,d} \\ i_{o6,d} \end{pmatrix} \right\}; \quad (272) \end{aligned}$$

სადაც:

$$\Delta(t) = \begin{vmatrix} L_d^I & 0 & M_{\delta,d}^d(t) & M_{o6,d}^d(t) \\ 0 & L_q^I & -M_{\delta,d}^q(t) & M_{o6,d}^q(t) \\ M_d^I(t) & -M_q^I(t) & M_{\delta,d}^d(t) & M_{o6,d}^d(t) \\ -M_d^II(t) & M_q^II(t) & -L_{\delta,d}(t) & -L_{o6,d}(t) \end{vmatrix} \quad (273)$$

(272)-ში $\|\delta_{ij}(t)\|$ –მატრიცები არის (273)-ში i –სვეტისა და j –სტრიქონის გადაკვეთის ადგილზე მდებარე ელემენტის მინორები;

$$\begin{vmatrix} \Delta_{\delta,d}^{1d}(t) \\ \Delta_{o6,d}^{1d}(t) \\ \Delta_{E_{o6}}^{1d}(t) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -X_{\delta,d}^d(t) & X_{\delta,d}^q(t) & -X_{\delta,d}(t) & -R_{\delta,d}(t) \\ X_{o6,d}^d(t) & X_{o6,d}^q(t) & -R_{o6,d}^d(t) & R_{o6,d}^q(t) \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} \delta_{11}(t) \\ \delta_{12}(t) \\ \delta_{13}(t) \\ \delta_{14}(t) \end{vmatrix}, \quad (274)$$

$$\begin{vmatrix} \Delta_{\delta,d}^{1q}(t) \\ \Delta_{o6,d}^{1q}(t) \\ \Delta_{E_{o6}}^{1q}(t) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} X_{\delta,d}^d(t) & -X_{\delta,d}^q(t) & -X_{\delta,d}(t) & R_{\delta,d}(t) \\ -X_{o6,d}^d(t) & -X_{o6,d}^q(t) & R_{o6,d}^d(t) & -R_{o6,d}^q(t) \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} \delta_{21}(t) \\ \delta_{22}(t) \\ \delta_{23}(t) \\ \delta_{24}(t) \end{vmatrix}, \quad (275)$$

$$\begin{vmatrix} \Delta_{\delta,d}^{2d}(t) \\ \Delta_{o6,d}^{2d}(t) \\ \Delta_{E_{o6}}^{2d}(t) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -X_{\delta,d}^d(t) & X_{\delta,d}^q(t) & -X_{\delta,d}(t) & -R_{\delta,d}(t) \\ X_{o6,d}^d(t) & X_{o6,d}^q(t) & -R_{o6,d}^d(t) & R_{o6,d}^q(t) \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} \delta_{31}(t) \\ \delta_{32}(t) \\ \delta_{33}(t) \\ \delta_{34}(t) \end{vmatrix}, \quad (276)$$

$$\begin{vmatrix} \Delta_{\delta,d}^{2q}(t) \\ \Delta_{o6,d}^{2q}(t) \\ \Delta_{E_{o6}}^{2q}(t) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} X_{\delta,d}^d(t) & -X_{\delta,d}^q(t) & X_{\delta,d}(t) & R_{\delta,d}(t) \\ -X_{o6,d}^d(t) & -X_{o6,d}^q(t) & R_{o6,d}^d(t) & -R_{o6,d}^q(t) \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} \delta_{41}(t) \\ \delta_{42}(t) \\ \delta_{43}(t) \\ \delta_{44}(t) \end{vmatrix}, \quad (277)$$

(274)–(277)გამოსახულებებში $\delta_{ij}(t)$ ($i = 1,2,3,4; j = 1,2,3,4$)

წარმოადგენენ $\|\delta_{ij}(t)\|$ –მინორების შესაბამის მნიშვნელობებს.

კომპიუტერული მოდელირებისას გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემების აგების სიმარტივისათვის (272)-ში შემოვიღოთ შემდეგი აღნიშვნები:

$$\|I_{d,q}^{\delta,o}\| = \begin{vmatrix} I_d^I \\ I_q^I \\ i_{\delta,d} \\ i_{o6,d} \end{vmatrix}, \quad \|\delta_{k1}(t)\| = \begin{vmatrix} \|\delta_{11}(t)\| \\ -\|\delta_{21}(t)\| \\ \|\delta_{31}(t)\| \\ -\|\delta_{41}(t)\| \end{vmatrix},$$

$$\|\Delta_{E_{\text{ფ6}}}^{k,d,q}(t)\| = \begin{Bmatrix} \|\Delta_{E_{\text{ფ6}}}^{1d}(t)\| \\ \|\Delta_{E_{\text{ფ6}}}^{1q}(t)\| \\ \|\Delta_{E_{\text{ფ6}}}^{2d}(t)\| \\ \|\Delta_{E_{\text{ფ6}}}^{2q}(t)\| \end{Bmatrix}, \quad \|\delta_{k2}(t)\| = \begin{Bmatrix} \|\delta_{12}(t)\| \\ \|\delta_{22}(t)\| \\ \|\delta_{32}(t)\| \\ \|\delta_{42}(t)\| \end{Bmatrix}, \quad (278)$$

$$\|R^d(t)\| = \begin{Bmatrix} -R^I \|\delta_{11}(t)\| & R^I \|\delta_{12}(t)\| & \Delta_{\text{ფ},d}^{1d}(t) & \Delta_{\text{ფ6},d}^{1d}(t) \\ R^I \|\delta_{21}(t)\| & -R^I \|\delta_{22}(t)\| & \Delta_{\text{ფ},d}^{1q}(t) & \Delta_{\text{ფ6},d}^{1q}(t) \\ -R^I \|\delta_{31}(t)\| & R^I \|\delta_{32}(t)\| & \Delta_{\text{ფ},d}^{2d}(t) & \Delta_{\text{ფ6},d}^{2d}(t) \\ R^I \|\delta_{41}(t)\| & -R^I \|\delta_{42}(t)\| & \Delta_{\text{ფ},d}^{2q}(t) & \Delta_{\text{ფ6},d}^{2q}(t) \end{Bmatrix}, \quad \|I_{d,q}^{\text{ფ},o}(0)\| = \begin{Bmatrix} I_d'(0) \\ I_q'(0) \\ i_{\text{ფ},d}(0) \\ i_{\text{ფ6},d}(0) \end{Bmatrix}.$$

(272) განტოლებათა სისტემის ინტეგრირება t_{n-1} -დან t_n -მდე დროის ინტერვალებში (278)-ის გათვალისწინებით გვაძლევს დენების მიმართ ინტეგრალურ გამოსახულებებს:

$$\|I_{d,q}^{\text{ფ},o}\| = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \left\{ \frac{1}{\Delta(t)} \left[\frac{3}{2} U_m \cos(\omega t + \alpha_p + \varphi) \cdot \|\delta_{k1}(t)\| + E_{\text{ფ6}} \cdot \|\Delta_{E_{\text{ფ6}}}^{k,d,q}(t)\| + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{3}{2} U_m \sin(\omega t + \alpha_p + \varphi) \cdot \|\delta_{k2}(t)\| + \|R^d(t)\| \cdot \|I_{d,q}^{\text{ფ},o}\| \right] \right\} dt + \|I_{d,q}^{\text{ფ},o}(0)\|. \quad (279)$$

მიღებული (279) მატრიცული გამოსახულება წარმოადგენს აღნიშნულ არასაკომპუტაციო ინტერვალებში ელექტრომაგნიტური პროცესების კომპიუტერული მოდელირების საფუძველს [60].

3.4-2. დროის $t_n = \frac{1}{\omega} n(\frac{\pi}{3} - \gamma)$ -დან $t_{n+1} = \frac{1}{\omega} [n(\frac{\pi}{3} - \gamma) + \gamma]$ -მდე საკომპუტაციო ინტერვალებში

შესაბამისი გარდაქმნების, აღნიშვნების შემოტანის და (270) სისტემის ამოხსნის შედეგად ვღებულობთ შემდეგ მატრიცულ განტოლებათა სისტემას შესაბამისი დენების წარმოებულების მიმართ:

$$\begin{aligned}
& \left\| \begin{array}{l} dI_d^I / dt \\ dI_q^I / dt \\ di_{\delta,d} / dt \\ di_{o6,d} / dt \end{array} \right\| = \frac{1}{\Delta^k(t)} \left\{ \begin{array}{l} \frac{3}{2} U_m \|\delta_{11}^k(t)\| \cdot \cos(\omega t + \alpha_p + \varphi) \\ -\frac{3}{2} U_m \|\delta_{21}^k(t)\| \cdot \cos(\omega t + \alpha_p + \varphi) \\ \frac{3}{2} U_m \|\delta_{31}^k(t)\| \cdot \cos(\omega t + \alpha_p + \varphi) \\ -\frac{3}{2} U_m \|\delta_{41}^k(t)\| \cdot \cos(\omega t + \alpha_p + \varphi) \end{array} \right\} + \\
& + \left\| \begin{array}{l} \Delta_{E_{\delta\delta6}}^{1dk}(t) \cdot E_{\delta\delta6} - \frac{3}{2} U_m \cdot \|\delta_{12}^k(t)\| \cdot \sin(\omega t + \alpha_p + \varphi) \\ \Delta_{E_{\delta\delta6}}^{1qk}(t) \cdot E_{\delta\delta6} + \frac{3}{2} U_m \cdot \|\delta_{22}^k(t)\| \cdot \sin(\omega t + \alpha_p + \varphi) \\ \Delta_{E_{\delta\delta6}}^{2dk}(t) \cdot E_{\delta\delta6} - \frac{3}{2} U_m \cdot \|\delta_{32}^k(t)\| \cdot \sin(\omega t + \alpha_p + \varphi) \\ \Delta_{E_{\delta\delta6}}^{2qk}(t) \cdot E_{\delta\delta6} + \frac{3}{2} U_m \cdot \|\delta_{42}^k(t)\| \cdot \sin(\omega t + \alpha_p + \varphi) \end{array} \right\} + \\
& + \left\{ \begin{array}{l} -R^I \|\delta_{11}^k(t)\| \quad R^I \|\delta_{12}^k(t)\| \quad \Delta_{\delta,d}^{1dk}(t) \quad \Delta_{o6,d}^{1dk}(t) \\ R^I \|\delta_{21}^k(t)\| \quad -R^I \|\delta_{22}^k(t)\| \quad \Delta_{\delta,d}^{1qk}(t) \quad \Delta_{o6,d}^{1qk}(t) \\ -R^I \|\delta_{31}^k(t)\| \quad R^I \|\delta_{32}^k(t)\| \quad \Delta_{\delta,d}^{2dk}(t) \quad \Delta_{o6,d}^{2dk}(t) \\ R^I \|\delta_{41}^k(t)\| \quad -R^I \|\delta_{42}^k(t)\| \quad \Delta_{\delta,d}^{2qk}(t) \quad \Delta_{o6,d}^{2qk}(t) \end{array} \right\} \cdot \left\| \begin{array}{l} I_d^I \\ I_q^I \\ i_{\delta,d} \\ i_{o6,d} \end{array} \right\} \quad (280)
\end{aligned}$$

სადაც, (280)-ში $\Delta^k(t)$ გამოსახულებისათვის გვაქვს:

$$\Delta^k(t) = \left\| \begin{array}{cccc} L_d^{lk} & 0 & M_{\delta,d}^{dk}(t) & M_{o6,d}^{dk}(t) \\ 0 & L_d^{lk} & M_{\delta,d}^{qk}(t) & M_{o6,d}^{qk}(t) \\ -M_d^{lk}(t) & -M_q^{lk}(t) & -L_{\delta,d}^k(t) & -L_{o6,d}^k(t) \\ M_d^{lk}(t) & M_q^{lk}(t) & M_{\delta,d}^k(t) & M_{o6,d}^k(t) \end{array} \right\| \quad (281)$$

(280)-ში $\|\delta_{ij}^k(t)\|$ -მატრიცები არის (281)-ში i -სვეტისა და j -სტრიქონების გადაკვეთის ადგილზე მდებარე ელემენტის მინორები;

$$\left\| \begin{array}{l} \Delta_{\delta,d}^{1dk}(t) \\ \Delta_{o6,d}^{1dk}(t) \\ \Delta_{E_{\delta\delta6}}^{1dk}(t) \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{cccc} X_{\delta,d}^{dk}(t) & X_{\delta,d}^{qk}(t) & R_{\delta,d}^k(t) & X_{\delta,d}^k(t) \\ X_{o6,d}^{dk}(t) & X_{o6,d}^{qk}(t) & -R_{o6,d}^{qk}(t) & R_{o6,d}^{qk}(t) \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{array} \right\| \cdot \left\| \begin{array}{l} \delta_{11}^k(t) \\ \delta_{12}^k(t) \\ \delta_{13}^k(t) \\ \delta_{14}^k(t) \end{array} \right\|, \quad (282)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta_{\delta,d}^{1qk}(t) \\ \Delta_{o6,d}^{1qk}(t) \\ \Delta_{E_{\delta\delta^6}}^{1qk}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -X_{\delta,d}^{dk}(t) & -X_{\delta,d}^{qk}(t) & -R_{\delta,d}^k(t) & -X_{\delta,d}^k(t) \\ -X_{o6,d}^{dk}(t) & -X_{o6,d}^{qk}(t) & R_{o6,d}^{qk}(t) & -R_{o6,d}^{dk}(t) \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_{21}^k(t) \\ \delta_{22}^k(t) \\ \delta_{23}^k(t) \\ \delta_{24}^k(t) \end{pmatrix}, \quad (283)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta_{\delta,d}^{2dk}(t) \\ \Delta_{o6,d}^{2dk}(t) \\ \Delta_{E_{\delta\delta^6}}^{2dk}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{\delta,d}^{dk}(t) & X_{\delta,d}^{qk}(t) & R_{\delta,d}^k(t) & X_{\delta,d}^k(t) \\ X_{o6,d}^{dk}(t) & X_{o6,d}^{qk}(t) & -R_{o6,d}^{qk}(t) & R_{o6,d}^{dk}(t) \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_{31}^k(t) \\ \delta_{32}^k(t) \\ \delta_{33}^k(t) \\ \delta_{34}^k(t) \end{pmatrix}, \quad (284)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta_{\delta,d}^{2qk}(t) \\ \Delta_{o6,d}^{2qk}(t) \\ \Delta_{E_{\delta\delta^6}}^{2qk}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -X_{\delta,d}^{dk}(t) & -X_{\delta,d}^{qk}(t) & -R_{\delta,d}^k(t) & -X_{\delta,d}^k(t) \\ -X_{o6,d}^{dk}(t) & -X_{o6,d}^{qk}(t) & R_{o6,d}^{qk}(t) & -R_{o6,d}^{dk}(t) \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_{41}^k(t) \\ \delta_{42}^k(t) \\ \delta_{43}^k(t) \\ \delta_{44}^k(t) \end{pmatrix}, \quad (285)$$

(282)–(285) გამოსახულებებში $\delta_{ij}^k(t)$ ($i = 1,2,3,4; j = 1,2,3,4$)

წარმოადგენს $\|\delta_{ij}^k(t)\|$ – მინორების შესაბამის მნიშვნელობებს.

(280)-ში შემოვიღოთ შემდეგი აღნიშვნები:

$$\begin{aligned} \|I_{d,q}^{\delta,o,k}\| &= \begin{pmatrix} I_d^I \\ I_q^I \\ i_{\delta,d} \\ i_{o6,d} \end{pmatrix}, & \|\delta_{k1}^k(t)\| &= \begin{pmatrix} \|\delta_{11}^k(t)\| \\ -\|\delta_{21}^k(t)\| \\ \|\delta_{31}^k(t)\| \\ -\|\delta_{41}^k(t)\| \end{pmatrix}, \\ \|\Delta_{E_{\delta\delta^6}}^{k,d,q,k}(t)\| &= \begin{pmatrix} \Delta_{E_{\delta\delta^6}}^{1dk}(t) \\ \Delta_{E_{\delta\delta^6}}^{1qk}(t) \\ \Delta_{E_{\delta\delta^6}}^{2dk}(t) \\ \Delta_{E_{\delta\delta^6}}^{2qk}(t) \end{pmatrix}, & \|\delta_{k2}^k(t)\| &= \begin{pmatrix} -\|\delta_{12}^k(t)\| \\ \|\delta_{22}^k(t)\| \\ -\|\delta_{32}^k(t)\| \\ \|\delta_{42}^k(t)\| \end{pmatrix}, & (286) \\ \|I_{d,q}^{\delta,o,k}(0)\| &= \begin{pmatrix} I_d^I(0) \\ I_q^I(0) \\ i_{\delta,d}(0) \\ i_{o6,d}(0) \end{pmatrix}, & \|R^{dk}(t)\| &= \begin{pmatrix} -R^I\|\delta_{11}^k(t)\| & R^I\|\delta_{12}^k(t)\| & \Delta_{\delta,d}^{1dk}(t) & \Delta_{o6,d}^{1dk}(t) \\ R^I\|\delta_{21}^k(t)\| & -R^I\|\delta_{22}^k(t)\| & \Delta_{\delta,d}^{1qk}(t) & \Delta_{o6,d}^{1qk}(t) \\ -R^I\|\delta_{31}^k(t)\| & R^I\|\delta_{32}^k(t)\| & \Delta_{\delta,d}^{2dk}(t) & \Delta_{o6,d}^{2dk}(t) \\ R^I\|\delta_{41}^k(t)\| & -R^I\|\delta_{42}^k(t)\| & \Delta_{\delta,d}^{2qk}(t) & \Delta_{o6,d}^{2qk}(t) \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

(280) განტოლებათა სისტემის ინტეგრირება t_n -დან t_{n+1} -მდე დროის ინტერვალში (286)-ის გათვალისწინებით გვაძლევს დენების მიმართ ინტეგრალურ გამოსახულებებს:

$$\begin{aligned} \|I_{d,q}^{i.o.k}\| = \int_{t_n}^{t_{n+1}} & \left\{ \frac{1}{\Delta^k(t)} \left[\frac{3}{2} U_m \cos(\omega t + \alpha_p + \varphi) \cdot \|\delta_{k1}^k(t)\| + E_{\text{გან}} \cdot \|\Delta_{E_{\text{გან}}}^{k,d,q,k}(t)\| + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{3}{2} U_m \sin(\omega t + \alpha_p + \varphi) \cdot \|\delta_{k2}^k(t)\| + \|R^{dk}(t)\| \cdot \|I_{d,q}^{i.o.k}\| \right] \right\} dt + \|I_{d,q}^{i.o.k}(0)\|. \end{aligned} \quad (287)$$

მიღებული (287) მატრიცული გამოსახულება წარმოადგენს აღნიშნულ საკომუტაციო ინტერვალში ელექტრომაგნიტური პროცესების კომპიუტერული მოდელირების საფუძველს.

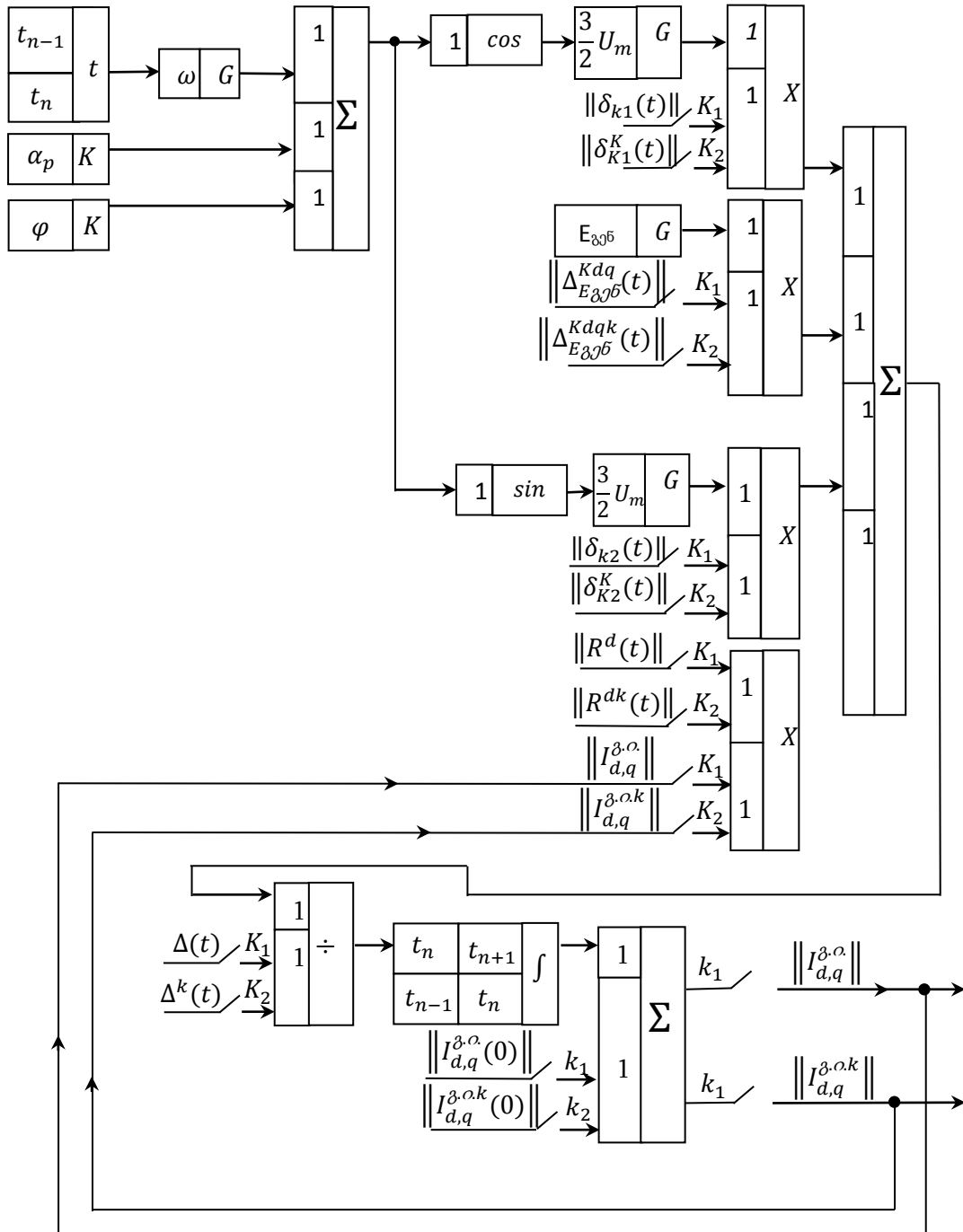
3.5. უკუ მართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემების აგება.

განვიხილოთ (279), (287) გამოსახულებებში მათემატიკური ოპერაციების სტრუქტურული მოდელის ელემენტები და მათი თვისებები (ნახ.10). შესაბამისების გათვალისწინება გვაძლევს საძიებელი ცვლადი ელექტრული სიდიდეების მატრიცების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურულ სქემებს (ნახ.18). აღნიშნული სქემა წარმოადგენილია ერთი უნიფიცირებული გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემით დროის $t_{n-1} \leq t_k \leq t_n$ - არასაკომუტაციო ინტერვალისათვის (მხოლოდ k_1 -არის ჩართული) და $t_n \leq t_k \leq t_{n+1}$ - საკომუტაციო ინტერვალისათვის (მხოლოდ k_2 -არის ჩართული).

აღნიშნულ ინტერვალში (272) განტოლებათა სისტემის ამონახსნიბევრადაა დამოკიდებული (273) განმსაზღვრელის მნიშვნელობაზე. ვეძებთ ექვივალენტურ პარამეტრებს შორის იმ დამოკიდებულებას, რომლის დროსაც $\Delta(t)$ -დებულობს არანულოვან მნიშვნელობებს.

მართლაც (273)- ის გაშლა გვაძლევს ოთხი დადებითი ექვივალენტური პარამეტრების ნამრავლისაგან შემდგარ, შვიდი დადებითი წევრის და

სხვა ოთხი დადებითი ექვივალენტური პარამეტრების ნამრავლისაგან შემდგარ ექვს უარყოფით წევრთა ალგებრულ ჯამს.



ნახ.18 (279), (287)-ინტეგრალური გამოსახულებების საფუძველზე აგებული დენების მატრიცების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები უნიფიცირებულ ფორმაში.

3.6 წვევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების მართვადი გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატების შემხვედრ-პარალელური მუშაობის პირობებში კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის პირობების დადგენა.

3.6-1. დროის $t_{n-1} = \frac{1}{\omega}(n-1)(\frac{\pi}{3} - \gamma)$ -დან $t_n = \frac{1}{\omega}n(\frac{\pi}{3} - \gamma)$ -მდე არასაკომუტაციო ინტერვალებში.

ამის გამო ანალიზი გვიჩვენებს, რომ $\Delta(t)$ არ ღებულობს ნულოვან მნიშვნელობას. შედეგად ამისა (272)- გამოსახულებები (დენების წარმოებულები) არ ხდებიან უსასრულოდ დიდი სიდიდეები. ყოველივე ეს ნიშნავს იმას, რომ $L \frac{di}{dt} \neq \infty$ და კომუტაციურ გადაძაბვებს შესაძლებელია ადგილი არ ჰქონდეს.

ანალიზი გვიჩვენებს, რომ გადაძაბვების ოპტიმიზაციის პირობა ბევრად და მოკიდებული ექვივალენტურ პარამეტრებში შემავალი ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის ფიზიკური პარამეტრებისა და $\alpha, \beta, \gamma, \delta, L_{\text{ორ},1}, L_{\text{ორ},2}$ - პარამეტრებს შორის კომპიუტერული გზით მიღებულ დამოკიდებულებაზე.

3.6-2. დროის $t_n = \frac{1}{\omega}n(\frac{\pi}{3} - \gamma)$ -დან $t_{n+1} = \frac{1}{\omega}[n(\frac{\pi}{3} - \gamma) + \gamma]$ -მდე საკომუტაციო ინტერვალებში.

წინა ინტერვალებში განხილული საკითხის ანალოგიურად, (280)- ში შემავალი (281)- $\Delta^k(t)$ განმსაზღვრელის გაშლა გვაძლევს შვიდი დადებითი და ექვსი უარყოფითი წევრების ალგებრულ ჯამს. ამის გამო, ამ შემთხვევაშიც, $\Delta^k(t)$ არ ღებულობს ნულოვან მნიშვნელობას. შედეგად ამისა დენის წარმოებულები არ ხდებიან უსასრულოდ დიდი სიდიდეები; რაც ნიშნავს იმას, რომ $L \frac{di}{dt} \neq \infty$ და კომუტაციურ გადაძაბვებს შესაძლებელია ადგილი არ ჰქონდეს.

3.7 უკუ მართვადი გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნა დატვირთვის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში.

(272), (273) და (280), (281)- განტოლებათა სისტემებში მიღებული, შესაბამისად არა საკომუტაციო განზოგადებული დროის $t_{n-1} = \frac{1}{\omega}(n-1)(\frac{\pi}{3} - \gamma)$ -დან $t_n = \frac{1}{\omega}n(\frac{\pi}{3} - \gamma)$ -მდე და საკომუტაციო განზოგადებული დროის $t_n = \frac{1}{\omega}n(\frac{\pi}{3} - \gamma)$ —დან $t_{n+1} = \frac{1}{\omega}[n(\frac{\pi}{3} - \gamma) + \gamma]$ -მდე ინტერვალებისათვის, შემოვიღოთ შემდეგი უნიფიცირებული აღნიშვნები, რომლებიც სამართლიანი იქნება ზოგადად ორივე სახის განზოგადებული ინტერვალებისათვის:

$$\|dI/dt\| = \|A(t)\| \cdot \|I\| + \|B(t)\| \cdot \|u(t)\| + E_{\delta\gamma\delta} \|A_1(t)\|, \quad (288)$$

სადაც, (288)-ში გვაქვს:

$$\begin{aligned} \left\| \frac{dI}{dt} \right\| &= \begin{Bmatrix} dI_d^I/dt \\ dI_q^I/dt \\ di_{\gamma,d}^I/dt \\ di_{\delta,d}^I/dt \end{Bmatrix}, & \|I\| &= \begin{Bmatrix} I_d^I \\ I_q^I \\ i_{\gamma,d}^I \\ i_{\delta,d}^I \end{Bmatrix}, & \|A_1(t)\| &= \frac{1}{\Delta(t)} \begin{Bmatrix} \Delta_{E\delta\gamma\delta}^{1d}(t) \\ \Delta_{E\delta\gamma\delta}^{1q}(t) \\ \Delta_{E\delta\gamma\delta}^{2d}(t) \\ \Delta_{E\delta\gamma\delta}^{2q}(t) \end{Bmatrix}, \\ \|A(t)\| &= \frac{1}{\Delta(t)} \begin{Bmatrix} -R^I \|\delta_{11}(t)\| & R^I \|\delta_{12}(t)\| & \Delta_{\gamma,d}^{1d}(t) & \Delta_{\delta,d}^{1d}(t) \\ R^I \|\delta_{21}(t)\| & -R^I \|\delta_{22}(t)\| & \Delta_{\gamma,d}^{1q}(t) & \Delta_{\delta,d}^{1q}(t) \\ -R^I \|\delta_{31}(t)\| & R^I \|\delta_{32}(t)\| & \Delta_{\gamma,d}^{2d}(t) & \Delta_{\delta,d}^{2d}(t) \\ R^I \|\delta_{41}(t)\| & -R^I \|\delta_{42}(t)\| & \Delta_{\gamma,d}^{2q}(t) & \Delta_{\delta,d}^{2q}(t) \end{Bmatrix}, & \|B_1(t)\| &= \begin{Bmatrix} \|\delta_{11}(t)\| \\ -\|\delta_{21}(t)\| \\ \|\delta_{31}(t)\| \\ -\|\delta_{41}(t)\| \end{Bmatrix}, \\ \|B_2(t)\| &= \begin{Bmatrix} -\|\delta_{12}(t)\| \\ \|\delta_{22}(t)\| \\ -\|\delta_{32}(t)\| \\ \|\delta_{42}(t)\| \end{Bmatrix}, & \|B(t)\| &= \frac{3}{2} U_m \{ (\|B_1(t)\|)^2 + (\|B_2(t)\|)^2 \}^{1/2} \cdot \frac{1}{\Delta(t)}, \\ \|u(t)\| &= \frac{3}{2} U_m \cos(\omega t + \alpha_p + \varphi - \arctg \frac{\|B_2(t)\|}{\|B_1(t)\|}). \end{aligned} \quad (289)$$

(288)-მატრიცული განტოლების ამოხსნას ვეძებთ ასეთ სახეში:

$$\|I(t)\| = e^{\|A(t)\|t} \cdot \|k(t)\|. \quad (290)$$

(290)-ში $\|A(t)\|$ -მატრიცა და $k(t)$ -არიან დროის ნამდვილი ცვლადის ფუნქცია.

ჩავსვათ (290) გამოსახულება (288) განტოლებაში, შესაბამისად მივიღებთ:

$$\frac{d\|k(t)\|}{dt} = e^{-\|A(t)\|t} \cdot \|B(t)\| \cdot \|u(t)\| + e^{-\|A(t)\|t} \cdot \|A_1(t)\| \cdot E_{\text{გაბ.}} \quad (291)$$

(291)- განტოლების გამოყვანის პროცესში გათვალისწინებულია $\|A(t)\| \cdot t$ და $e^{-\|A(t)\|t}$ - გამოსახულების ტეილორის მწკრივებად დაშლა:

$$\|A(t)\| \cdot t = \|A(0)\| \cdot t + \|A'(0)\| \cdot t^2 + \frac{1}{2} \|A''(0)\| \cdot t^3 + \frac{1}{6} \|A'''(0)\| \cdot t^4 + \dots, \quad (292)$$

$$\begin{aligned} (e^{\|A(t)\|t})' &= [\|A(0)\| + 2\|A'(0)\| + \frac{3}{2}\|A''(0)\| + \frac{2}{3}\|A'''(0)\| + \dots] \times \\ &\times e^{[\|A(0)\|t + \|A'(0)\|t^2 + \frac{1}{2}\|A''(0)\| \cdot t^3 + \frac{1}{6}\|A'''(0)\| \cdot t^4 \dots]}, \end{aligned} \quad (293)$$

(292), (293)-ში A -ს ზედა შტრიხები ნიშნავს წარმოებულის რიგს.

(292), (293) გამოსახულების გათვალისწინება საშუალებას გვაძლევს შევჩერდეთ ისეთ წევრთა რაოდენობაზე, როდესაც ადგილი ექნება ტოლობას:

$$\|A(t)\| \cdot e^{\|A(t)\|t} \approx (e^{\|A(t)\|t})' \quad (294)$$

(291)-დან t_{n-1} -დან t_n -მდე (არასაკომუტაციო ინტერვალისათვის) ან t_n -დან t_{n+1} -მდე (საკომუტაციო ინტერვალისათვის) ინტერვალის საზღვრებში ინტეგრალის ამოღება გვაძლევს:

$$\|k(t)\| = \int_{t_{n-1}}^{t_n} e^{-\|A(\tau)\|\tau} \cdot \|B(\tau)\| \cdot \|u(\tau)\| \cdot d\tau + \int_{t_{n-1}}^{t_n} e^{-\|A(\tau)\|\tau} \cdot \|A_1(\tau)\| \cdot E_{\text{გაბ.}} \cdot d\tau + \|k(t_{n-1})\|, \quad (295)$$

$$\|k(t)\| = \int_{t_n}^{t_{n+1}} e^{-\|A(\tau)\|\tau} \cdot \|B(\tau)\| \cdot \|u(\tau)\| \cdot d\tau + \int_{t_n}^{t_{n+1}} e^{-\|A(\tau)\|\tau} \cdot \|A_1(\tau)\| \cdot E_{\text{გაბ.}} \cdot d\tau + \|k(t_n)\|, \quad (296)$$

როგორც ჩანს (295) სამართლიანია არასაკომუტაციო ინტეგრალებისათვის, ხოლო (296)-კი საკომუტაციო ინტეგრალებისათვის. (295) და (296) ჩავსვათ (290)-ში და მივიღებთ:

$$\|I(t)\| = e^{\|A(t)\|t} \left[\int_{t_{n-1}}^{t_n} e^{-\|A(\tau)\|\tau} \cdot \|B(\tau)\| \cdot \|u(\tau)\| \cdot d\tau + \int_{t_{n-1}}^{t_n} e^{-\|A(\tau)\|\tau} \cdot \|A_1(\tau)\| \cdot E_{\text{ფ.}} \cdot d\tau + \|K(t_{n-1})\| \right], \quad (297)$$

$$t_{n-1} \leq t \leq t_n,$$

$$\|I(t)\| = e^{\|A(t)\|t} \left[\int_{t_n}^{t_{n+1}} e^{-\|A(\tau)\|\tau} \cdot \|B(\tau)\| \cdot \|u(\tau)\| \cdot d\tau + \int_{t_n}^{t_{n+1}} e^{-\|A(\tau)\|\tau} \cdot \|A_1(\tau)\| \cdot E_{\text{ფ.}} \cdot d\tau + \|K(t_n)\| \right], \quad (298)$$

$$t_n \leq t \leq t_{n+1},$$

(297) და (298) გამოსახულებებში შესაბამისად $K(t_{n-1})$ და $K(t_n)$ - ის განსაზღვრისათვის (290)-ში ჩავსვათ $t = t_{n-1}$ და $t = t_n$, მივიღებთ:

$$\|k(t_{n-1})\| = e^{-\|A(t_{n-1})\|t_{n-1}} \cdot \|I(t_{n-1})\|, \quad (299)$$

$$t_{n-1} \leq t \leq t_n,$$

$$\|k(t_n)\| = e^{-\|A(t_n)\|t_n} \cdot \|I(t_n)\|, \quad (300)$$

$$t_n \leq t \leq t_{n+1}$$

ამგვარად, (288) განტოლების ამონახსნს აქვს შემდეგი სახე:

$$\|I(t)\| = e^{\|A(t)\|t} \left[\int_{t_{n-1}}^{t_n} e^{-\|A(\tau)\|\tau} \cdot \|B(\tau)\| \cdot \|u(\tau)\| \cdot d\tau + \int_{t_{n-1}}^{t_n} e^{-\|A(\tau)\|\tau} \cdot \|A_1(\tau)\| \cdot E_{\text{ფ.}} \cdot d\tau + e^{-\|A(t_{n-1})\|t_{n-1}} \cdot \|I(t_{n-1})\| \right], \quad (301)$$

$$t_{n-1} \leq t \leq t_n,$$

$$\|I(t)\| = e^{\|A(t)\|t} \left[\int_{t_n}^{t_{n+1}} e^{-\|A(\tau)\|\tau} \cdot \|B(\tau)\| \cdot \|u(\tau)\| \cdot d\tau + \int_{t_n}^{t_{n+1}} e^{-\|A(\tau)\|\tau} \cdot \|A_1(\tau)\| \cdot E_{\text{ფ.}} \cdot d\tau + e^{-\|A(t_n)\|t_n} \cdot \|I(t_n)\| \right], \quad (302)$$

$$t_n \leq t \leq t_{n+1},$$

(301), (302) ტოლობებში $\|A(t)\|$, $\|A(t_{n-1})\|$ და $\|A(t_n)\|$ მატრიცების ტეილორის მწკრივებად დაშლაში შევარჩევთ ისეთ წევრთა რიცხვს, რომლის დროსაც $\|A(t)\| \approx \|A(t_{n-1})\|$, $(t_{n-1} \leq t \leq t_n)$ ან $\|A(t)\| \approx \|A(t_n)\|$, $(t_n \leq t \leq t_{n+1})$. მაშინ (301) და (302) გადაიწერება ასეთ სახეში:

$$\|I(t)\| = e^{\|A(t)\|t} \left[\int_{t_{n-1}}^{t_n} e^{-\|A(\tau)\|\tau} \cdot \|B(\tau)\| \cdot \|u(\tau)\| \cdot d\tau + \int_{t_{n-1}}^{t_n} e^{-\|A(\tau)\|\tau} \cdot \|A_1(\tau)\| \cdot E_{\text{აგ}} \cdot d\tau \right] + e^{\|A(t)\|(t-t_{n-1})} \cdot \|I(t_{n-1})\|, \quad (303)$$

$$\|I(t)\| = e^{\|A(t)\|t} \left[\int_{t_n}^{t_{n+1}} e^{-\|A(\tau)\|\tau} \cdot \|B(\tau)\| \cdot \|u(\tau)\| \cdot d\tau + \int_{t_n}^{t_{n+1}} e^{-\|A(\tau)\|\tau} \cdot \|A_1(\tau)\| \cdot E_{\text{აგ}} \cdot d\tau \right] + e^{\|A(t)\|(t-t_n)} \cdot \|I(t_n)\|, \quad (304)$$

მიღებული (303), (304) ტოლობები წარმოადგენენ (288) განტოლების ზუსტ ამონახსნებს შესაბამისად არასაკომპუტაციო და კომპუტაციურ ინტერვალებისათვის. მიუხედავად ამისა მათ აქვთ მოუხერხებელი ფორმა კომპიუტერულ ტექნოლოგიებში გამოყენებისათვის. თუ გამოვიყენებთ კომპიუტერულ ტექნოლოგიებს, ჩვენ შეგვიძლია გავიანგარიშოთ $\|I(t)\|$, მხოლოდ t -ს რომელიმე დისკრეტული მნიშვნელობებისათვის. ჩვეულებრივ ანგარიშობენ $\|I(t)\|$, -მატრიცას $t = kT$ -მნიშვნელობისათვის, სადაც k -მთელი რიცხვია, ხოლო T -განსაზღვრული გარემოებით შერჩეული დროის ქვეინტერვალი. რამდენადაც საგარაუდოა, რომ შემავალი ვექტორი $\|u(kT)\|$ ცნობილია ყველა k -რიცხვისათვის, მაშინ ჩვენ გვრჩება გავარკვიოთ კავშირები $\|I[(k+1)T]\|$ -ს და $\|u(kT)\|$ -ს შორის და $\|I[(k+1)T]\|$ -ს და $\|I(kT)\|$ -ს შორის. ასეთი კავშირები აღიწერება სხვაობითი განტოლების კერძო სახით. როგორც კი მივიღებთ სხვაობით განტოლებას, მაშინვე შეიძლება მიმდევრობით გამოითვალოს $\|I(kT)\|$ ყველა k -ს მთელი რიცხვისათვის [61].

(303) განტოლებაში ჩავსვათ $t_{n-1} = kT$ და $t = t_n = (k+1)T$, მაშინ

$$\|I[(k+1)T]\| = e^{\|A(k+1)T\|T} \cdot \|I(kT)\| + e^{\|A(k+1)T\|(k+1)T} \left[\int_{kT}^{(k+1)T} e^{-\|A(\tau)\|\tau} \cdot \|B(\tau)\| \cdot \|u(\tau)\| \cdot d\tau + \int_{kT}^{(k+1)T} e^{-\|A(\tau)\|\tau} \cdot \|A_1(\tau)\| \cdot E_{\text{აგ}} \cdot d\tau \right], (k = 0, 1, 2, 3, \dots). \quad (305)$$

ანალოგიურ სხვაობით განტოლებას ვღებულობთ (304) განტოლებიდან.

(305)-ში $\|u(\tau)\| = \|u(KT)\|$ დროის $kT \leq \tau \leq (k+1)T$ ქვეინტერვალებში წარმოადგენს ნაჭერ-ნაჭერ მუდმივ სიდიდეს, ხოლო $E_{\text{ავ6}}$ წარმოადგენს მუდმივ სიდიდეს თითოეულ დროის ქვეინტერვალებში. აგრეთვე ექსპონენტები $e^{\|A(k+1)T\| \cdot (k+1)T}$ და $e^{-\|A(\tau)\| \cdot \tau}$ წარმოადგენენ ნაჭერ-ნაჭერ მუდმივ სიდიდეებს შესაბამისი ქვეინტერვალებისათვის.

(305)-ში გამოვიყენოთ ტოლობა:

$$\int_0^t e^{\|A\| \cdot \tau} d\tau = \|A\|^{-1} \cdot (e^{\|A\| \cdot t} - 1) = (e^{\|A\| \cdot t} - 1) \cdot \|A\|^{-1}. \quad (306)$$

ამ უკანასკნელის გათვალისწინება (305)-ში გვაძლევს საძიებელ სხვაობით მატრიცულ განტოლებას, რომელიც წარმოადგენს რეკურენტულ ფორმულას და ადვილად ექვემდებარება კომპიუტერული ტექნოლოგიებით ამოცანის ამოხსნას:

$$\|I[(k+1)T]\| = e^{\|A(k+1)T\| \cdot T} \cdot \|I(kT)\| + (e^{\|A(k+1)T\| \cdot (k+1)T} - 1) \cdot \|A(k+1)T\|^{-1} \cdot [\|B(\tau)\| \cdot \|u(\tau)\| + \|A_1(\tau)\| \cdot E_{\text{ავ6}}]. \quad (307)$$

(307)-ში გამოვიყენოთ ტეილორის მწკრივებად დაშლა, რომლის თანახმადაც გვექნება:

$$\begin{aligned} (e^{\|A(k+1)T\| \cdot (k+1)T} - 1) \cdot \|A(k+1)T\|^{-1} &= [(1 + \|A(k+1)T\| \cdot T + \frac{1}{2!} \|A(k+1)T\|^2 \cdot T^2 + \dots) - 1] \cdot \|A(k+1)T\|^{-1} = \\ &= \|1\| \cdot T + \frac{1}{2!} \|A(k+1)T\| \cdot T^2 + \frac{1}{3!} \|A(k+1)T\|^2 \cdot T^3 + \dots \end{aligned} \quad (308)$$

(308)-ში საყურადღებოა ის გარემოება, რომ არ გვესაჭიროება $\|A(k+1)T\|^{-1}$ - შებრუნებული მატრიცის გამოთვლა.

(308)-ის ჩასმა (307)-ში მოგვცემს:

$$\|I[(k+1)T]\| = e^{\|A(k+1)T\| \cdot T} \cdot \|I(kT)\| + [\|1\| \cdot T + \frac{1}{2!} \|A(k+1)T\| \cdot T^2 + \frac{1}{3!} \|A(k+1)T\|^2 \cdot T^3 + \dots] \times [\|B(\tau)\| \cdot \|u(\tau)\| + \|A_1(\tau)\| \cdot E_{\text{ავ6}}]. \quad (309)$$

(309) განტოლება იძლევა $\|I(kT)\|$ -სთვის ზუსტ ამონახნს, მხოლოდ $\|u(t)\|$ -ფუნქციის კერძო შემთხვევისათვის, გამოსახული (185) ფორმულით.

(309)-ში თუ ცნობილია $\|I(0)\|$ -ის მნიშვნელობა, მაშინ ნებისმიერი $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ მოელი რიცხვებისათვის ვიპოვით $\|I(1T)\|, \|I(2T)\|, \|I(3T)\|, \dots, \|I(kT)\|$, დენების მნიშვნელობებს $1T, 2T, 3T, \dots, kT$ ქვეინტერვალებისათვის.

3.8. შემხვედრ-პარალელურად ჩართულ უკუმართვად გამმართველი-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელირება.

განვიხილოთ შემთხვევა დროის $t_{n-1} = \frac{1}{\omega} (n-1) \left(\frac{\pi}{3} - \gamma \right)$ -დან $t_n = \frac{1}{\omega} n \left(\frac{\pi}{3} - \gamma \right)$ -მდე არასაკომუტაციო ინტერვალებში (ნახ.16).

გენერატორულ რეჟიმში გადასული მუდმივი დენის წევის ძრავის მუშაობის რეჟიმი განისაზღვრება ერთის მხრივ (225) სკალარული განტოლებათა სისტემით, ხოლო მეორეს მხრივ- როტორის მოძრაობის (192) განტოლებით. ეს განტოლება შეიცავს ძრავის ელექტრომაგნიტურ მომენტს $M_{\text{ელ.}}$. რეჟიმის სრული მახასიათებელი შეიძლება მოცემული იქნეს, თუ ცნობილია ელექტრომაგნიტური მომენტის გამოსახულება (225) სისტემაში შემავალი ძრავის მთლიანი წრედის $I_d', I_q', i_{\text{გ.დ}}$ და $i_{\text{გ.დ}}$ დენების მიმართ.

ელექტრომაგნიტური მომენტი გამოისახება წევის ძალური ტრანსფორმატორის მეორადი გამმართვისა და ინვერტორული გრაგნილების ნაკადშემბების და დენების მეშვეობით:

$$M_{\text{ელ.}} = \frac{1}{2} (\psi_2'' i_2'' + \psi_3'' i_3'') + \frac{1}{2} (\psi_2''' i_2''' + \psi_3''' i_3'''). \quad (310)$$

(310)-გამოსახულება ანალოგიურია (196) გამოსახულების.

გამოსახვით (310)-ში შემავალი ნაკადშემბებისა და დენების მყისა ფაზური სიდიდეები შესაბამისი რეზულტირებული ნაკადშემბებისა და დენების d, q -მდგენელების მიმართ, ვისარგებლოთ (203), (205), (219), (222 ÷ 224) გამოსახულებებით და ზოგიერთი გარდაქმნების შედეგად ვღებულოთ $M_{\text{კლ.}}$ -ის შემდეგ გამოსახულებას:

$$\begin{aligned}
 M_{\text{კლ.}} = & \frac{2}{9} \{ [(L_S^{\text{II}} + M^{22})I_d^{\text{II}} + M^{23}I_{\text{o6.d}}^{\text{III}} + M^{12}I_d^{\text{I}}] \cdot [(\frac{3}{2} - \cos^2 \alpha_p)I_d^{\text{II}} - \frac{1}{2} \sin 2\alpha_p I_q^{\text{II}}] + \\
 & + [(L_S^{\text{II}} + M^{22})I_q^{\text{II}} + M^{23}I_{\text{o6.q}}^{\text{III}} + M^{12}I_q^{\text{I}}] \cdot [(\frac{1}{2} + \cos^2 \alpha_p)I_q^{\text{II}} - \frac{1}{2} I_d^{\text{II}} \sin 2\alpha_p] + \\
 & + [M^{13}I_d^{\text{I}} + M^{23}I_d^{\text{II}} + (L_S^{\text{III}} + M^{33})I_{\text{o6.d}}^{\text{III}}] \cdot [(\frac{3}{2} - \cos^2 \beta)I_{\text{o6.d}}^{\text{III}} - \frac{1}{2} \sin 2\beta \cdot I_{\text{o6.q}}^{\text{III}}] + \\
 & + [M^{13}I_q^{\text{I}} + M^{23}I_q^{\text{II}} + (L_S^{\text{III}} + M^{33})I_{\text{o6.q}}^{\text{III}}] \cdot [(\frac{1}{2} + \cos^2 \beta)I_{\text{o6.q}}^{\text{III}} - \frac{1}{2} \sin 2\beta \cdot I_{\text{o6.d}}^{\text{III}}] - \frac{1}{2} [(L_S^{\text{II}} + M^{22})I_d^{\text{II}} + \\
 & + M^{23}I_{\text{o6.d}}^{\text{III}} + M^{12}I_d^{\text{I}}] I_q^{\text{II}} \sin 2\alpha_p - \frac{1}{2} [(L_S^{\text{II}} + M^{22})I_q^{\text{II}} + M^{23}I_{\text{o6.q}}^{\text{III}} + M^{12}I_q^{\text{I}}] I_d^{\text{II}} \sin 2\alpha_p - \\
 & - \frac{1}{2} [M^{13}I_d^{\text{I}} + M^{23}I_d^{\text{II}} + (L_S^{\text{III}} + M^{33})I_{\text{o6.d}}^{\text{III}}] \cdot I_{\text{o6.q}}^{\text{III}} \cdot \sin 2\beta - \frac{1}{2} [M^{13}I_q^{\text{I}} + M^{23}I_q^{\text{II}} + (L_S^{\text{III}} + M^{33})I_{\text{o6.q}}^{\text{III}}] \times \\
 & \times I_{\text{o6.d}}^{\text{III}} \sin 2\beta \}.
 \end{aligned} \tag{311}$$

(311) გამოსახულებაში შემავალი რეზულტირებული დენების d, q -მდგენელების მიმართ გვაქვს შემდეგი გამოსახულებები:

$$\begin{aligned}
 I_d^{\text{II}} = & \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2} i_{\text{o6.d}} [2 \cos(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2}) + \cos(\omega^\delta t - 2\alpha_p - \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{2})] + \\
 & + \frac{\sqrt{3}}{\pi} i_{\text{o6.d}} \{ \cos(\alpha_p - \beta) [2 \cos(\omega^\circ t + \frac{\pi}{2}) + \cos(\omega^\circ t - 2\beta - \frac{\pi}{2})] - \sin(\alpha_p - \beta) [2 \sin(\omega^\circ t + \frac{\pi}{2}) - \\
 & - \sin(\omega^\circ t - 2\beta - \frac{\pi}{2})] \},
 \end{aligned} \tag{312}$$

$$\begin{aligned}
 I_q^{\text{II}} = & \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2} i_{\text{o6.d}} [2 \sin(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2}) - \sin(\omega^\delta t - 2\alpha_p - \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{2})] + \\
 & + \frac{\sqrt{3}}{\pi} i_{\text{o6.d}} \{ \sin(\alpha_p - \beta) [2 \cos(\omega^\circ t + \frac{\pi}{2}) + \cos(\omega^\circ t - 2\beta - \frac{\pi}{2})] + \cos(\alpha_p - \beta) [2 \sin(\omega^\circ t + \frac{\pi}{2}) - \\
 & - \sin(\omega^\circ t - 2\beta - \frac{\pi}{2})] \},
 \end{aligned} \tag{313}$$

$$I_{\text{o6.d}}^{\text{III}} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} [2 \cos(\omega^\circ t + \frac{\pi}{2}) + \cos(\omega^\circ t - 2\beta - \frac{\pi}{2})] \cdot i_{\text{o6.d}}, \tag{314}$$

$$I_{\text{o6.q}}^{\text{III}} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} [2 \sin(\omega^\circ t + \frac{\pi}{2}) - \sin(\omega^\circ t - 2\beta - \frac{\pi}{2})] \cdot i_{\text{o6.d}}. \tag{315}$$

ამგვარად, (192), (195), (225), (311)÷(315) განტოლებები წარმოადგენენ განსახილველ ინტერვალში ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების სრულ მათემატიკურ მოდელს.

(192)-დან ვღებულობთ:

$$\omega_{\text{ღ.}}(t) = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \left(\frac{1}{J} M_{\text{ღ.}} - \frac{1}{J} M_{\text{კლ.}} \right) dt + \omega_{\text{ღ.}}(t_{n-1}) \quad (316)$$

ანალოგიური გზით შესაძლებელია განისაზღვროს ელექტრომაგნიტური მომენტი დროის $t_n = \frac{1}{\omega} n \left(\frac{\pi}{3} - \gamma \right)$ -დან $t_{n+1} = \frac{1}{\omega} \left[n \left(\frac{\pi}{3} - \gamma \right) + \gamma \right]$ -მდე საკომპუტაციო ინტერვალისათვის (ნახ.17).

(310) გამოსახულების ანალოგიურ გამოსახულებას აღნიშნულ ინტერვალში აქვს ასეთი სახე:

$$M_{\text{კლ.}} = \frac{1}{2} \left(\sum_{k=1}^3 \psi_k'' i_k'' + \sum_{k=1}^3 \psi_k''' i_k''' \right). \quad (317)$$

(231) ÷ (234) გამოსახულებების საფუძველზე (317) გამოსახულებიდან მივიღებთ დროის აღნიშნულ ინტერვალისათვის ელექტრომაგნიტური მომენტისათვის (311)÷(315) გამოსახულებების მსგავს გამოსახულებას (270) სისტემაში შემავალი ძრავის მთლიანი წრედის $I_d^I, I_q^I, i_{\gamma,d}, i_{\text{ინ.დ}}$ დენების მიმართ. ელექტრომაგნიტური მომენტის მიღებული გამოსახულება (სამუშაოს მოცულობის შემცირების მიზნით აღნიშნული გამოსახულება არ არის ნაჩვენები) და (270) სკალარული განტოლებათა სისტემა მატრიცულ ფორმაში წარმოადგენენ ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების სრულ მათემატიკურ მოდელს დროის საკომპუტაციო ინტერვალში.

(312)÷(315) ჩავსვათ (311)-ში და ზოგიერთი ელემენტარული ტრიგონომეტრიული გარდაქმნების შემდეგ ელექტრომაგნიტური დამამუხრუჭებელი მომენტისათვის ($M_{\text{კლ.}}$) გვაქვს შემდეგი გამოსახულება:

$$M_{\text{კლ.}} = \frac{1}{2}[M_d^{I,\delta}(t)I_d^I + M_q^{I,\delta}(t)I_q^I] \cdot i_{\delta,d} + \frac{1}{2}[M_d^{I,\delta\delta}(t)I_d^I + M_q^{I,\delta\delta}(t)I_q^I] \cdot i_{\delta\delta,d} + \frac{1}{2}M_d^{\delta,\delta\delta}(t)i_{\delta,d} \cdot i_{\delta\delta,d} + \frac{1}{2}L_d^{\delta}(t) \cdot i_{\delta,d}^2 + \frac{1}{2}L_d^{\delta\delta}(t) \cdot i_{\delta\delta,d}^2. \quad (318)$$

(318)-ში შემავალი თითოეული ცვლადი ექვივალენტური ურთიერთ ინდუქციურობებისათვის და სრული ინდუქციურობებისათვის გვაქვს შემდეგი გამოსახულებები:

- წევის ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილისა და გამმართველ გრაგნილებს შორის ცვლადი ურთიერთ ინდუქციურობები:

$$M_d^{I,\delta}(t) = \frac{4}{9}M^{12}[k_3(t) - \frac{1}{2}k_{17}(t)]; \quad M_q^{I,\delta}(t) = \frac{4}{9}M^{12}[k_7(t) - \frac{1}{2}k_{21}(t)]; \quad (319)$$

- წევის ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილისა და ინვერტორულ გრაგნილებს შორის ცვლადი ურთიერთინდუქციურობები:

$$M_d^{I,\delta\delta}(t) = \frac{4}{9} \{ [k_4(t) - \frac{1}{2}k_{18}(t)]M^{12} + [k_{11}(t) - \frac{1}{2}k_{25}(t)]M^{13} \}; \quad (320)$$

$$M_q^{I,\delta\delta}(t) = \frac{4}{9} \{ [k_8(t) - \frac{1}{2}k_{22}(t)]M^{12} + [k_{14}(t) - \frac{1}{2}k_{28}(t)]M^{13} \}; \quad (321)$$

- წევის ტრანსფორმატორის გამმართველისა და ინვერტორულ გრაგნილებს შორის ცვლადი ურთიერთინდუქციურობა:

$$M_d^{\delta,\delta\delta}(t) = \frac{4}{9} [k_1(t) \cdot k_4(t) + k_2(t) \cdot k_3(t) + k_5(t) \cdot k_8(t) + k_6(t) \cdot k_7(t) + k_9(t) \cdot k_{11}(t) + k_{12}(t) \cdot k_{14}(t) - k_{15}(t) \cdot k_{18}(t) - k_{16}(t) \cdot k_{17}(t) - k_{19}(t) \cdot k_{22}(t) - k_{20}(t) \cdot k_{21}(t) - k_{23}(t) \cdot k_{25}(t) - k_{26}(t) \cdot k_{28}(t)]; \quad (322)$$

- წევის ტრანსფორამტორის გამართვის გრაგნილებს შორის ცვლადი სრული ინდუქციურობა:

$$L_d^{\delta}(t) = \frac{4}{9} [k_1(t) \cdot k_3(t) + k_5(t) \cdot k_7(t) - k_{15}(t) \cdot k_{17}(t) - k_{19}(t) \cdot k_{21}(t)]; \quad (323)$$

- წევის ტრანსფორმატორის ინვერტორულ გრაგნილებს შორის ცვლადი სრული ინდუქციურობა:

$$L_d^{\delta\delta}(t) = \frac{4}{9} [k_2(t) \cdot k_4(t) + k_6(t) \cdot k_8(t) + k_{10}(t) \cdot k_{11}(t) + k_{13}(t) \cdot k_{14}(t) - k_{16}(t) \cdot k_{18}(t) - k_{20}(t) \cdot k_{22}(t) - k_{24}(t) \cdot k_{25}(t) - k_{27}(t) \cdot k_{28}(t)]. \quad (324)$$

(319) ÷ (324)-ში შემავალი $k_1(t) \div k_{28}(t)$ -ცვლადი კოეფიციენტებისათვის გვაქვს:

$$\begin{aligned}
 k_1(t) &= (L_S^{II} + M^{22})f_1(t); & k_2(t) &= (L_S^{II} + M^{22})f_2(t) + M^{23}f_5(t); \\
 k_3(t) &= \left(\frac{3}{2} - \cos^2 \alpha_p\right)f_1(t) - \frac{1}{2}f_3(t)\sin 2\alpha_p; \\
 k_4(t) &= \left(\frac{3}{2} - \cos^2 \alpha_p\right)f_2(t) - \frac{1}{2}f_4(t)\sin 2\alpha_p; \\
 k_5(t) &= (L_S^{II} + M^{22})f_3(t); & k_6(t) &= (L_S^{II} + M^{22})f_4(t) + M^{23}f_6(t); \\
 k_7(t) &= \left(\frac{1}{2} + \cos^2 \alpha_p\right)f_3(t) - \frac{1}{2}f_1(t)\sin 2\alpha_p; \\
 k_8(t) &= \left(\frac{1}{2} + \cos^2 \alpha_p\right)f_4(t) - \frac{1}{2}f_2(t)\sin 2\alpha_p; \\
 k_9(t) &= M^{23}f_1(t); & k_{10}(t) &= M^{23}f_2(t) + (L_S^{III} + M^{33})f_5(t); \\
 k_{11}(t) &= \left(\frac{3}{2} - \cos^2 \beta\right)f_5(t) - \frac{1}{2}f_6(t)\sin 2\beta; \\
 \\
 k_{12}(t) &= M^{23}f_3(t); & k_{13}(t) &= M^{23}f_4(t) + (L_S^{III} + M^{33})f_6(t); \\
 k_{14}(t) &= \left(\frac{1}{2} + \cos^2 \beta\right)f_6(t) - \frac{1}{2}f_5(t)\sin 2\beta; \\
 k_{15}(t) &= \frac{1}{2}(L_S^{II} + M^{22})f_1(t); & k_{16}(t) &= \frac{1}{2}[(L_S^{II} + M^{22})f_2(t) + M^{23}f_5(t)]; \\
 k_{17}(t) &= f_3(t)\sin 2\alpha_p; & k_{18}(t) &= f_4(t)\sin 2\alpha_p; \\
 k_{19}(t) &= \frac{1}{2}(L_S^{II} + M^{22})f_3(t); & k_{20}(t) &= \frac{1}{2}(L_S^{II} + M^{22})f_4(t) + M^{23}f_6(t); \\
 k_{21}(t) &= f_1(t)\sin 2\alpha_p; & k_{22}(t) &= f_2(t)\sin 2\alpha_p; & k_{23}(t) &= \frac{1}{2}M^{23}f_1(t); \\
 k_{24}(t) &= \frac{1}{2}M^{23}f_2(t) + \frac{1}{2}(L_S^{III} + M^{33})f_5(t); & k_{25}(t) &= f_6(t)\sin 2\beta; \\
 k_{26}(t) &= \frac{1}{2}M^{23}f_3(t); & k_{27}(t) &= \frac{1}{2}M^{23}f_4(t) + \frac{1}{2}(L_S^{III} + M^{33})f_6(t); \\
 k_{28}(t) &= f_5(t)\sin 2\beta;
 \end{aligned} \tag{325}$$

(325)-ში შემავალი $f_1(t) \div f_6(t)$ ცვლადი ფუნქციებისათვის, სადაც მონაწილეობენ $\alpha_p, \beta, \gamma, \omega^\circ$ და ω° პარამეტრები, გვაქვს შემდეგი გამოსახულებები:

$$\begin{aligned}
f_1(t) &= \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2} [2 \cos(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2}) + \cos(\omega^\delta t - 2\alpha_p - \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{2})]; \\
f_2(t) &= \frac{\sqrt{3}}{\pi} \{ \cos(\alpha_p - \beta) [2 \cos(\omega^\circ t + \frac{\pi}{2}) + \cos(\omega^\circ t - 2\beta - \frac{\pi}{2})] - \sin(\alpha_p - \beta) [2 \sin(\omega^\circ t + \frac{\pi}{2}) - \\
&\quad - \sin(\omega^\circ t - 2\beta - \frac{\pi}{2})] \}; \\
f_3(t) &= \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{\sin \gamma/2}{\gamma/2} [2 \sin(\omega^\delta t - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2}) - \sin(\omega^\delta t - 2\alpha_p - \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{2})]; \\
f_4(t) &= \frac{\sqrt{3}}{\pi} \{ \sin(\alpha_p - \beta) [2 \cos(\omega^\circ t + \frac{\pi}{2}) + \cos(\omega^\circ t - 2\beta - \frac{\pi}{2})] + \cos(\alpha_p - \beta) [2 \sin(\omega^\circ t + \frac{\pi}{2}) - \\
&\quad - \sin(\omega^\circ t - 2\beta - \frac{\pi}{2})] \}; \\
f_5(t) &= \frac{\sqrt{3}}{\pi} [2 \cos(\omega^\circ t + \frac{\pi}{2}) + \cos(\omega^\circ t - 2\beta - \frac{\pi}{2})]; \\
f_6(t) &= \frac{\sqrt{3}}{\pi} [2 \sin(\omega^\circ t + \frac{\pi}{2}) - \sin(\omega^\circ t - 2\beta - \frac{\pi}{2})]; \tag{326}
\end{aligned}$$

ამგვარად (318) ÷ (326) გამოსახულებები წარმოადგენენ დროის აღნიშნულ ინტერვალებში (225) განტოლებებთან ერთად ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების სრულ მათემატიკურ მოდელს [58, 61].

დასკვნა

1. პირველად, ენერგეტიკასა და ელექტროინჟინერიაში, აგრეთვე ელექტროფიცირებულ სარკინიგზო ტრანსპორტში შესრულდა სამუშაოები მუდმივი დენის წევის ქვესადგურების ბაზაზე ელექტრული წევის ელექტრომომარაგების მართვად გამმართველ აგრეგატებიან სისტემებში ელექტრომაგნიტური არასიმეტრიული გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების მნიშვნელოვან საკითხებში სამფაზა მკვებავი ქსელის, ძალური სამფაზა წევის ტრანსფორმატორების, რეაქტორების, საკონტაქტო და სალიანდაგო წრედების, მუდმივი დენის მიმდევრობით აღგზნებიანი წევის ძრავის პარამეტრების და ნახევარგამტარული მართვადი ტირისტორების რეგულირების, წინსწრების და კომუტაციის კუთხეების გათვალისწინებით.

2. მიღებული შედეგებიდან გამომდინარე დადგინდა:

2.1. წევის სამფაზა მართვად გამმართველ სისტემებში კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის პირობების განზოგადებული ფორმულა ერთიან სისტემაში შემავალი ძირითადი პარამეტრების გათვალისწინებით, რაც დადებითად აისახება გამმართველ სისტემაში საექსპლუატაციო მუშაობის პროცესების მდგრადობასა და იმედიანობაზე;

2.2. წევის სამფაზა მართვად გამმართველ სისტემებში არასიმეტრიული გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემების აგების შესაძლებლობა;

2.3. რეკურენტულ სხვაობითი განტოლების შედგენის შესაძლებლობა, რომელიც იოლად ექვემდებარება კომპიუტერული პროგრამებით სხვადასხვა ამოცანის ამოხსნას;

2.4. მკვებავი წყაროს დენის მრუდის დამახინჯების კოეფიციენტის და სიმძლავრის კოეფიციენტის ზოგადი გამოსახულების მიღება ტირისტორების რეგულირებისა და კომუტაციის კუთხეების დამოკიდებულებით;

2.5. მტკიცებულება იმისა, რომ მართვად გამმართველ აგრეგატებში სიმძლავრის კოეფიციენტის მაქსიმალური მნიშვნელობა, ყველაზე საუკეთესო სასურველ პირობებში (რეგულირების და კომუტაციის კუთხეების მინიმალური მნიშვნელობებისას), აღწევს 0,9554-ს.

დასრულებულ სადისერტაციო ნაშრომში საკვლევი და საანგარიშო სამუშაოები შესრულებულია საძიებელ ელექტრულ ცვლადთა პირდაპირი და უკუ კომპლექსური და სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნების ახალი, მოდერნიზებული, უნივერსალური მეთოდით.

3. ჩატარებული სამუშაოების შედეგებიდან გამომდინარე, პირველად შეიქმნა მუდმივი დენის წევის ქვესადგურების მკვებავი ცვლადი დენის ქსელის მიმყოფ ინვერტორულ გარდამქმნელ სისტემაში რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების გაანგარიშებისა და ანალიზისათვის მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელების თეორიის საფუძვლები.

4. შექმნილი თეორიის საფუძველზე მოცემულია საძიებელ ცვლადთა პირდაპირი და უკუ გარდაქმნის ახალი კომპლექსური მატრიცა, დაფუძნებული ინვერტორული აგრეგატის შესავალსა და გამოსავალ ცვლადების მყისა მნიშვნელობებს შორის დამაკავშირებელი დენებისა და ძაბვების მიმართ სამფაზა კომუტაციური ფუნქციების სპექტრალურ-ოპერატორულ გარდაქმნაზე.

5. აგებულია ნახევარგამტარულ ინვერტორულ გარდამქმნელ სისტემაში არასიმეტრიული ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები, დაფუძნებული მათემატიკური ოპერაციების სტრუქტურული მოდელების ელემენტებსა და მათ თვისებებზე. მიღებულია კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის პირობების ამსახველი განზოგადებული გამოსახულებები; მოცემულია მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნა და მიღებულია რეკურენტული სხვაობითი განტოლებები, რომლებიც იოლად ექვემდებარებიან კომპიუტერული პროგრამებით ამოცანების ამოხსნას;

6. ჩატარებული შესაბამისი სამუშაოების შედეგების საფუძველზე მიღებულია დასკვნა იმისა, რომ მართვად სამფაზა გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში მუდმივი დენის წევის ძრავების რეკუპერაციული დამუხრუჭების პროცესების სრულყოფა, ცვლადი დენის მიმღები ქსელის მიმყოფი ძაბვის ინვერტორის გარე მახასიათებლის გაუმჯობესება, ინვერტორის გამოსავალში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია, სიმძლავრის კოეფიციენტის გაზრდა და ელექტრული ენერჯის ხარისხის გაუმჯობესება შესაძლებელია მართვადი უკუ გამმართველი აგრეგატის ინვერტორულ აგრეგატთან შემხვედრ-პარალელურად ჩართვის განხორციელებით.

7. დამუშავებულია მუდმივი დენის წევის ძრავების რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში შემხვედრ-პარალელურად ჩართული უკუმართვადი გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატების საანგარიშო

პრინციპული ელექტრული სქემა, როგორც არასაკომუტაციო, ასევე საკომუტაციო დროის განზოგადებულ ინტერვალებისათვის.

8. ჩატარებულია შემხვედრ-პარალელურად ჩართული უკუ მართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება არასაკომუტაციო და საკომუტაციო განზოგადებულ დროის ინტერვალებისათვის.

9. საძიებელ ცვლადთა კომპლექსური პირდაპირი გარდაქმნის ახალი მატრიცის საფუძველზე, დროის განზოგადებულ ინტერვალებისათვის, დამტკიცებულია წევის ძალური სამფაზა ტრანსფორმატორის მეორადი გამმართველი, ინვერტორული და მართვადი უკუ გამმართველი გრაგნილთა თავმოყრის კვანძებისათვის რეზულტირებული კომპლექსური დენების მიმართ თეორემა კირხჰოფის პირველი კანონის მოდიფიკაციის შესახებ, რომლის თანახმადაც ნებისმიერ რეჟიმში გამმართველ გრაგნილში გამავალი დენის კომპლექსი ტოლია რეკუპერაციულ რეჟიმში მართვად უკუ გამმართველ გრაგნილში გამავალ დენის კომპლექსს დამატებული ინვერტორულ გრაგნილში გამავალი დენის კომპლექსი, შემობრუნებული უარყოფითი მიმართულებით წინსწრებისა და რეგულირების კუთხეების სხვაობის ტოლი კუთხით.

10. დადგენილია გაერთიანებული გარდამქმნელი ერთიანი სისტემის ნებისმიერი რეჟიმის, ნებისმიერი განზოგადებული დროის ინტერვალებისათვის საინჟინრო გაანგარიშებისა და ანალიზისათვის ხელსაყრელი ცვლადი ექვივალენტური პარამეტრები და მათ საფუძველზე კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის აუცილებელი და საკმარისი პირობების ამსახველი განზოგადებული გამოსახულება, რომელიც თავისთავად გამოხატავს ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის იმედიანობისა და სტატიკურ-დინამიკური მდგრადობის აუცილებელ და საკმარის ადეკვატურ კრიტერიუმებს; ჩატარებულია რეკუპერაციული რეჟიმის პირობებში ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელირება და მიღებულია გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესის სრული მათემატიკური მოდელი, რის საფუძველზეც აგებულია გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები; შედგენილია ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მდგომარეობათა კომპლექსური ცვლადების მატრიცული

განტოლებები, ჩატარებულია მათი ამოხსნა და მიღებულია რეკურენტული სხვაობითი განტოლებები დატვირთვის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Прохорский А.А. Тяговые и трансформаторные подстанции. М.Транспорт. 1983. 496с.
2. Марквард К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог . М. Транспорт.1982. 526с.
3. Розенфельд В.Е.,Исаев И.П.,Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги. М. Транспорт. 1983. 328с.
- 4.Захарченко Д.Д., Ротанов Н.А.,Торчаков Е.В. Тяговые электрические машины и трансформаторы .М. Транспорт. 1979. 303с.
- 5.Мирошниченко Р.И., Ивахно П.Н. Особенности работы выпрямительно-инверторного агрегата с регулированием напряжения на шинах подстанции.Сборник научных трудов. М. Транспорт. 1985. 68-75с.
- 6.Лутидзе Ш.И. Основы теории электрических машин с управляемым полупроводниковым коммутатором. М. Энергия. 1968. 303с.
- 7.Шелесть В.А. Компьютерное моделирование переходных процессов в электротехнических устройствах. Техническая электродинамика. Часть 8. Киев. 2000. 9-14с.
- 8.Соколов С.Д., Бей Ю.М., Гуральник Я.Д.,Чаусов О.Г. Полупроводниковые преобразовательные агрегаты тяговых подстанций.М. Транспорт. 1979. 264с.
- 9.Иньков Ю.М., Ротанов Н.А., Феоктистов В.П.,Чаусов О.Г. под ред. Инькова. Преобразовательные полупроводниковые устройства подвижного состава. М. Транспорт. 1982. 302с.
- 10.Пронтарский А.Ф. Системы и устройства электроснабжения.М. Транспорт. 1974. 272с.
- 11.Давидова И.К., Попов Б.И., Эрлих В.М. Справочник по эксплуатации тяговых подстанций и постов секционирования. М. Транспорт. 1978. 416с.
12. Засорин С.Н.,Карш Н.А.,Кучма К.Г.,Мирошниченко Р.И. Электронная и Ионная техника.Изд-во Транспорт. М. 1968. 375с.
13. Костенко М.П. Электрические машины. Спец. Часть. М-Л Госэнерго издат. 1949. 712с.
14. Векслер М.И. Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания. М. Транспорт. 1976. 120с.
15. Быков В.А.,Зимаков В.А.,Овласюк В.Я.,Хальков В.С.,Шилов Л.Н. под ред. Овласюка В.А. Электронные устройства релейной защиты и автоматики в системах тягового энергоснабжения. М. Транспорт. 1974. 304с.

16. Лутидзе Ш.И., Михневич Г.В., Тафт В.А. Введение в динамику синхронных машин и машинно-полупроводниковых систем. Изд-во «Наука» 1973. 336с.
17. Грубер Л.О., Перцовский Л.М., Трофимов В.И. Устройство, монтаж и эксплуатация тяговых подстанций. М. Транспорт. 1969. 360с
18. Лутидзе Ш.И. Новая электротехника. М. ИД «Лонгфелло». 2010. 336с.
19. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. 1-2 книга. Л. 1981. 1-533с., 1-415с.
20. Мерабишвили П.Ф. Теория переходных процессов в цепях с вентильными Преобразователями. Тбилиси. 1990. 292с.
21. Коган Ф.Л. Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования. М. 1998. 494с.
22. Министерство топлива и энергетики Российской Федерации. Правила устройства Электроустановок. Шестое издание. Главгоснадзор России. М. 1998. 607с.
23. Мерабишвили П.Ф., Кохреидзе Г.К. Электромагнитные процессы в трёхфазных управляемых выпрямителях. Электричество М. 1986. 8. Энергоатом-издат. 28-33с.
24. Мерабишвили П.Ф., Кохреидзе Г.К. Математическое моделирование электромагнитных процессов в преобразовательной системе с трёхфазным автономным инвертором тока. Электричества. 1990. 3. Энергоатом-издат. 31-37с.
25. Карибов С.И., Мерабишвили П.Ф., Азикури А.Ш. Обоснование нового принципа регулирования выпрямленного напряжения на электроподвижном составе с коллекторными тяговыми двигателями. Новочеркасск. 2009. 136-147с.
26. Кохреидзе Г., Курашвили И., Сихарулидзе А. Преобразовательная система тяговой подстанции по схеме «две обратные звезды с уравнительным реактором». ენერჯია სამეცნიერო ტექნიკური ჟურნალი. 59-67с. 2009. №3 (51)
27. Кохреидзе Г.К., Гогинашвили Н.Г., Инджия Л.Д., Курашвили И.А. Моделирование процессов в полупроводниковых преобразовательных установках тяговой подстанции. Изд-во «Электроинформ». Львов. 2009. 307-308с.
28. Кохреидзе Г.К., Лаошвили Д.П., Курашвили И.А., Инджия Л.Д. Регулирование переключения режимов рекуперации энергии (на украинском языке). Изд-во «Електро інформ». Энергетика. 12-13с. 2010. №1
29. Кохреидзе Г., Лаошвили Д., Кохреидзе Д., Инджия Л., Курашвили И. Математическое и компьютерное моделирование коммутационных процессов в полупроводниковых преобразователях тяговой подстанции с двухфазным

уравнительным реактором. ენერგია.სამეცნიერო ტექნიკური ჟურნალი. 36-48ს. 2009.№4 (52)-1

30.Кохреидзе Г.,Лаошвили Д.,Инджия Л.,Курашвили И. Математическое и компьютерное моделирование внекоммутационных процессов в преобразовательных тяговой подстанции по схеме «две обратные звезды с уравнительным реактором». ენერგია.სამეცნიერო ტექნიკური ჟურნალი. 49-57ს. 2009. №4 (52)-1

31.Кохреидзе Г.,Лаошвили Д.,Курашвили И.,Инджия Л. Разработка полупроводниковой преобразовательной системы тяговой подстанции с компьютерным моделированием переходных процессов (на английском языке).Energyonlin.ge 2009.№1

32.Кохреидзе Г.,Лоашвили Д.,Кохреидзе Д.,Курашвили И. Трёхфазный мостовой выпрямительно-инверторный преобразователь с широтно-импульсным управлением тягового двигателя постоянного тока (на английском языке). Energyonlin.ge 2010.№1.

33.Кохреидзе Г.,Курашвили И.,Лаошвили Д., Пхакадзе Ш. Режимы пуска и тяги двигателя постоянного тока с учётом трёхфазного мостового выпрямительно-инверторного преобразователя тяговой подстанции. Труд. НТУ «ХПИ», Харьков. 2010.

34. კობრეიძე გ.კ, ყურაშვილი ი., კობრეიძე დ.კ. სამფაზა ბოგური გამმართველ-ინვერტორული გარდამქმნელის გათვალისწინებით მუდმივი დენის ძრავის გაშვებისა და წევის რეჟიმების მენეჯმენტი. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია «ენერგეტიკა:რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები». საქართველო, ქუთაისი. 2010.

35. В.А. Иванов; Б. К. Чемоданов; В. С. Медведев; А. С. Ющенко. Математические основы теории автоматического регулирования. Изд-во «Высшая школа». Москва 1971. 807 с.

36. Л. О. Чуа; Пен-Мин Лин. Машинный анализ электронных схем (алгоритмы и вычислительные методы). Перевод с английского. Москва «Энергия» 1980.

37. Л. Джуджи; Б. Пелли. Силовые полупроводниковые преобразователи частоты. Теория, характеристики, Применение. Перевод с английского. Москва Энергоатомиздат 1983.

38. И. В. Черных. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, Sim Power Systems и Simulink. 285 с.Санкт-Петербург. 2008.

39. С. Г. Герман-Галкин. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем 320с.. MATLAB 6.0 Корона принт, 2001.

40. კობრეიძე გ., გოგინაშვილი ნ., ყურაშვილი ი., ფხაკაძე შ., მეგენეიშვილი თ. წევის ქვესადგურების ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში

ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება. სამეცნიერო ტექნიკური ჟურნალი "ენერჯია", 2012წ. №2 (62)

41. კობრეიძე გ., გოგინაშვილი ნ., ყურაშვილი ი., ფხაკაძე შ., მეგენიშვილი თ. წევის ქვესადგურების ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში მატარებლის რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმებში პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება. სამეცნიერო ტექნიკური ჟურნალი "ენერჯია", 2012წ. №2 (62).

42. კობრეიძე გ., გოგინაშვილი ნ., ყურაშვილი ი., ფხაკაძე შ., მეგენიშვილი თ. წევის ქვესადგურების ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნა. სამეცნიერო ტექნიკური ჟურნალი "ენერჯია", 2012წ. №2 (62)

43. Кохреидзе Г.К.,Гурамишвили Г.Г.,Прангишвили Г.В.Тетунашвили Е.Р. Математическое и компьютерное моделирование электромагнитных переходных процессов в трехфазной инверторной преобразовательной системе электроснабжения тяговой подстанции. Евразийский Союз Ученых(EUS). XIV международная научно-практическая конференция."Современные концепции научных исследований". 2015 г. №5. Часть 3. стр.88-96.

44. Кохреидзе Г.К.,Гурамишвили Г.Г.,Прангишвили Г.В.,Тетунашвили Е.Р. Математическое и компьютерное моделирование электромагнитных переходных процессов в трехфазных управляемых выпрямителях электроснабжения тяговой подстанции. Евразийский Союз Ученых(EUS). XIV международная научно-практическая конференция."Современные концепции научных исследований." 2015 г. №5. Часть 3. стр.96-104.

45. Кохреидзе Г.К.,Прангишвили Г.В.,Курашвили И.А.,Тетунашвили Е.Р. Математическое и компьютерное моделирование процессов в полупроводниковых преобразовательных системах электроснабжения тяговой подстанции. Международный научный институт "EDUCATIO".Ежемесячный научный журнал. XII Международная научно-практическая конференция:" Научные перспективы XXI века.Достижения и перспективы нового столетия". 2015 г. №5(12). стр.62-69.

46. კობრეიძე გ.კ.,ნემსაძე ს.გ.,ფრანგიშვილი გ.ვ.,გაბრაშვილი მ.ა.,შუკაკიძე თ.დ. ნახევარგამტარულ გარდამქმნელ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური ტექნოლოგიური პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია - მდგრადი ენერჯეტიკა: გამოწვევები და განვითარების პერსპექტივები. ქუთაისი. 2015წ. გვ.13-16.

47. კობრეიძე გ.კ., ბახტაძე მ.გ., ფრანგიშვილი გ.ვ., ტეტუნაშვილი ე.რ. გემის მუდმივი დენის ნახევარგამტარულ გარდამქმნელებში პროცესების

მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება დატვირთვის გაშვებისა და წევის რეჟიმებში. სართაშორისო კონფერენცია „საზღვაო ინდუსტრიის ინოვაციური გამოწვევები“ შრომის კრებული. ბათუმი. 2015წ. გვ-127-134.

48. კოხრეიძე გ.კ., ბახტაძე მ.გ., ფრანგიშვილი გ.ვ., ფხაკაძე შ.ა. ტეტუნაშვილი ე.რ. წევის ქვესადგურებში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში. III სართაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია - ენერგეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები. ქუთაისი. 2015წ. გვ. 42-47.

49. Кохреидзе Г.К., Бахтадзе М.Г., Прангишвили Г.В., Тетунашвили Э.Р. Повышение коэффициента мощности в тяговых подстанциях в условиях рекуперативного торможения. XIV международная научно-практическая конференция. „Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени“. 2015 г. №9(14). Часть 1. стр. 131-132.

50. კოხრეიძე გ.კ., ხორავა ვ.ჯ., ფრანგიშვილი გ.ვ., ტეტუნაშვილი ე.რ. უკუ გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელირება დროის საკომუტაციო ინტერვალებში წევის ძრავის რეკუპერაციული დამუხრუჭების პირობებში. „ენერჯია“, 2016 წ. №3(79). გვ 24-29.

51. კოხრეიძე გ.კ., ბახტაძე მ.გ., ფრანგიშვილი გ.ვ., ტეტუნაშვილი ე.რ. თეორემა კირხჰოფის პირველი კანონის მოდიფიკაციის შესახებ, წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების მართვადი უკუ გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატების შემხვედრ-პარალელური მუშაობის პირობებში. „ენერჯია“, 2016 წ. №3(79). გვ. 30-35.

52. კოხრეიძე გ.კ., ხორავა ვ.ჯ., ფრანგიშვილი გ.ვ., ტეტუნაშვილი ე.რ. წევის ქვესადგურებში ქსელის მიმყოლი სამფაზა ინვერტორების მუშაობის რეჟიმები შემხვედრ-პარალელურად მიერთებული უკუ მართვადი გამმართველის პირობებში. IV სართაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია - ენერგეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები. ქუთაისი. 2016წ. გვ. 12-16.

53. კოხრეიძე გ.კ., ბახტაძე მ.გ., ფრანგიშვილი გ.ვ., ტეტუნაშვილი ე.რ. შემხვედრ-პარალელურად ჩართულ უკუ მართვად გამმართველ-ინვერტორულ აგრეგატებში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელირება. IV სართაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია - ენერგეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები. ქუთაისი. 2016წ. გვ17-19.

54. Кохреидзе Г.К., Прангишвили Г.В., Тетунашвили Э.Р. Математическое моделирование электромеханических переходных процессов в встречно-

параллельно соединенных выпрямительно-инверторных агрегатах. The scientific heritage, (Budapest, Hungary) 2016 г. No 4(4). стр. 87-90.

55. Кохреидзе Г.К., Прангишвили Гр.В., Тетунашвили Э.Р Компьютерное моделирование электромагнитных переходных процессов в встречно-параллельно соединенных выпрямительно-инверторных агрегатах. Болгария. „Научный потенциал мира “ The scientific heritage, (Budapest, Hungary), 2016 г. No 4 (4). стр. 87-89.

56. კობრეიძე გ., ფრანგიშვილი გრ., მთვარელიშვილი გ., ტეტუნაშვილი ე., წევის ქვესადგურების ნახევარგამტარულ ერთიან გარდამქმნელ სისტემებში პროცესების მოდელირების ანალიზური და რიცხვითი მეთოდების მათემატიკური თეორია. „ენერჯია“. 2016 წ. №4(80). გვ. 22-27.

57. Кохреидзе Г., Прангишвили Гр., Кекелия Н., Мтварелишვილი Г., Тетунашвили Э., Решение матричных уравнений состояния переменных в выпрямительно-инверторных агрегатах в условиях рекуперативного торможения. „ენერჯია“. 2016 წ. №4(80). გვ. 28-33.

58. კობრეიძე გ.კ., ბახტაძე მ.გ., ხორავა ვ., ფრანგიშვილი გრ.ვ., კეკელია ნ.ა., კერელიშვილი ბ.რ. ინვერტორული სიხშირული რეგულირების ასინქრონულ წევის ძრავიან გაერთიანებულ მართვად გარდამქმნელ სისტემაში პროცესების მათემატიკური მოდელირება და ანალიზი. III ქართულ-პოლონური საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციის „სატრანსპორტო ხიდი ევროპა-აზია“ შრომები. ქუთაისი. 2017 წ. გვ. 267-274.