

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ზაზა პაპიძე

ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში პროცესების
მოდელირება ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მუშაობის პირობებში

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა: ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია

შიფრი: 0405

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

ივლისი, 2017 წელი

საავტორო უფლება, © 2017 წელი, ზაზა პაპიძე

თბილისი
2017 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ზაზა პაპიძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში პროცესების მოდელირება ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მუშაობის პირობებში“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

ივლისი, 2017 წელი

ხელმძღვანელი: ----- პროფესორი გ. კობრეიძე

რეცენზენტი: -----

რეცენზენტი: -----

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2017 წელი

ავტორი: პაპიძე ზაზა

თემის დასახელება ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში პროცესების მოდელირება ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მუშაობის პირობებში

ფაკულტეტი : ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

ხარისხი: აკადემიური დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: ივლისი, 2017წ.

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

რეზიუმე

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: ქარის გენერატორების კლასიფიკაცია; ასინქრონული გენერატორის მუშაობის რეჟიმები; ქარის გენერატორის მომჭერებზე ძაბვების მყისა მნიშვნელობების განსაზღვრა; მზის ენერჯის გარდაქმნის პროცესების ფიზიკური საფუძვლები; მზის ფოტოელექტრული ელემენტის ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი, ჰიბრიდული პარალელური ელექტროენერგეტიკული სისტემის განზოგადებული სტრუქტურული სქემის დამუშავება; ავტონომიური ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემის პრინციპული საანგარიშო ელექტრული სქემის დამუშავება ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მდგრადი მუშაობის პირობებში.

განხილულია ქარის ბორბლის მოწყობილობათა სქემებისა და ქარის ნაკადში მისი მდებარეობის მიხედვით ქარის გენერატორების სამი კლასი. დადგენილია ასინქრონული გენერატორის მუშაობის ძრავური, გენერატორული და საწინააღმდეგო ჩართვის ანუ დამუხრუჭების რეჟიმები. შესწავლილია თითოეული რეჟიმებისათვის რეაქტიული სიმძლავრეების რეგულირებისა და კომპენსაციის საკითხები. დამუშავებულია ასინქრონული გენერატორის აღზნების საკითხები.

მიღებულია ქარის ასინქრონული გენერატორის გამომავალ მომჭერებზე სამფაზა ფაზური ძაბვების მყისა მნიშვნელობების თეორიული ზოგადი გამოსახულებები, რომლებშიც გათვალისწინებულია ქარის, ლილვზე დამაგრებული ფრთის და მიმღები ცვლადი დენის ქსელის შემდეგი პარამეტრები: ფრთის საქარე წინაღობის ჰაეროდინამიკური კოეფიციენტი; ქარის საშუალო სიჩქარე; ფრთის წრიული მოძრაობის სიჩქარე; ქარის სიმკვრივე; ქარის ენერჯის გამოყენების კოეფიციენტი; ფრთის ექვივალენტური მუშა ზედაპირის ფართობი; მიმღები ცვლადი დენის ქსელის შესასვლელში ძაბვის მოქმედი მნიშვნელობა; ქარის სამფაზა გენერატორის გამომავალ მომჭერებზე ძაბვის მოქმედი მნიშვნელობა; გენერატორის გამომავალ მომჭერებზე ძაბვისა და მიმღები ცვლადი დენის ქსელის შესასვლელში ძაბვის ვექტორებს შორის ძვრის კუთხე; ერთიანი სრული წრედის ექვივალენტური ჯამური ინდუქციური წინაღობა.

განხილულია მზის ელემენტის შენაცვლების ელექტრული სქემა და მისი ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი ტემპერატურის სხვადასხვა მნიშვნელობის და მზის გამოსხივების სხვადასხვა ინტენსივობის დროს. ლაგრანჟის ინტერპოლაციის ფორმულისა და ტეილორის მწკრივებად დაშლის პროცესების გამოყენებით მიღებულია საინჟინრო

გათვლებისათვის დამაკმაყოფილებელი სიზუსტით საჭირო ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის აღმწერი გამოსახულება კვადრატული სამწევრის სახით. წარმოდგენილია თანამედროვე ჰიბრიდული პარალელური ენერგოსისტემის განზოგადებული დამუშავებული სტრუქტურული სქემა, რომელშიც გათვალისწინებულია როგორც მუდმივი, ასევე ცვლადი დენის ძაბვათა სისტემა.

დამუშავებულია იმპულსურ გარდამქმნელიანი მუდმივი და ცვლადი დენის ერთფაზა ძაბვის ჰიბრიდული პარალელური ენერგოსისტემის პრინციპული ელექტრული სქემა.

მეორე თავში დამუშავებულია ავტონომიურ ჰიბრიდულ ენერგეტიკულ სისტემაში მუშაობის მდგრადი რეჟიმების დადგენის საკითხები; ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემის რეჟიმები; ჩატარებულია მცირე და არატრადიციული ენერგეტიკის წინაშე მდგარი პრობლემების ანალიზი და ჩამოყალიბებულია ის ძირითადი ტექნიკური მოთხოვნები, რომლებიც დგას ენერგომომარაგების ავტონომიური სისტემის წინაშე.

წარმოდგენილია ჰიბრიდული პარალელური ელექტროენერგეტიკული სისტემის განზოგადებული სტრუქტურული სქემა, რომელშიც არსებითად ფუნქციონირებენ ქარის ელექტროსადგური, მზის ელექტროსადგური, აკუმულიატორული ბატარეა, მუდმივი დენის გარდამქმნელი, სამფაზა ქსელის მიმყოლი ინვერტორი და სამფაზა ცვლადი დენის მიმღები ქსელი. განხილულია თითოეული ამ ელემენტების მოქმედების პრინციპები და მუშაობის რეჟიმები.

დადგენილია ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული გაერთიანებული სისტემის ელექტრული სიდიდეების დროში ცვალებადობის ერთი პერიოდის განმავლობაში, ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მუშაობის პირობებში, მდგრადი განზოგადებული ექვსი კენტი და ექვსი ლუწი რეჟიმი. შესაბამისად, შესწავლილია აღნიშნულ გაერთიანებულ გარდამქმნელ სისტემაში ელექტრული სიდიდეების, მართვის იმპულსების და კომუტაციური ფუნქციების დროზე დამოკიდებულების კანონზომიერების ალგორითმი.

დამუშავებულია ჰიბრიდული ავტონომიური ელექტროენერგეტიკული სისტემის პარალელური მუშაობის კენტი და ლუწი რეჟიმების საანგარიშო პრინციპული ელექტრული სქემები.

მესამე თავში დამუშავებულია ავტონომიური ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების უნივერსალური მეთოდი, სამართლიანი აღნიშნული სისტემის ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მდგრადი მუშაობის პირობებში. შედგენილია განზოგადებული კენტი და ლუწი დროის ინტერვალისათვის ელექტრული წონასწორობის განტოლებები რეზულტირებული კომპლექსური საძიებელი ელექტრული სიდიდეების მიმართ დამუშავებული ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის საფუძველზე. დადგენილია ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის

ექვივალენტური პარამეტრები და კოეფიციენტები. კომპლექსური რეზულტირებულ ცვლადთა უკუ გარდაქმნის მატრიცების საფუძველზე მიღებულია შესაბამისი ფაზური ელექტრული სიდიდეების მყისა მნიშვნელობების გამოსახულებები.

ჩატარებულია მიღებული განტოლებების ამოხსნა, რომლის შედეგადაც თითოეული საძიებელი ელექტრული სიდიდეებისათვის მიღებულია შესაბამისი გამოსახულებები, სამართლიანი, როგორც დამყარებული, ასევე გარდამავალი პროცესებისათვის. დადგენილია მოცემულ პარამეტრებზე დამოკიდებული დამყარებული პროცესების შესაბამისი განზოგადებული ინტერვალების გამოსახულების თეორიულად არსებობის პირობა, გამომდინარე ერთმანეთის მოდევნო $2n-1$ კენტ და $2n$ ლუწ ინტერვალებში ელექტრული სიდიდეების საშუალო მნიშვნელობების ერთმანეთთან გატოლების საფუძველზე.

შესრულებულია ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების კომპიუტერული მოდელირების სრულყოფილი სამუშაო განზოგადებულ კენტ და ლუწ დროის ინტერვალებისათვის. განსაზღვრულია თითოეული საანგარიშო ელექტრული სიდიდეების დროში წარმოებულების გამოსახულებები მატრიცულ ფორმაში. შესაბამისი დეტერმინანტის ნულთან გატოლების შედეგად ვღებულობთ პირობას, როცა წარმოებულები უსასრულოდ დიდია და ექვივალენტურ ინდუქციურობებთან ნამრავლიც უსასრულო დიდი სიდიდეებია. ეს იმას ნიშნავს, რომ საშუალება გვეძლევა მივიღოთ პარამეტრებსა და კოეფიციენტებს შორის ისეთი თანაფარდობები, რომელთათვისაც დეტერმინანტი არ ხდება ნულის ტოლი და შესაბამისად კომპიუტაციურ გადამაბვებს ადგილი არ აქვს. კომპიუტერული მოდელირებისას საჭირო აღმოჩნდა დამატებით მზის ელემენტის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის ჩვენს მიერ მიღებული განტოლების გამოყენება.

განხილულია ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემის აგებისათვის საჭირო შესაბამისი მათემატიკური ოპერაციების ელემენტების ძირითადი თვისებები. თითოეულ განზოგადებულ კენტ და ლუწ ინტერვალისათვის შედგენილია გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები. ისინი საშუალებას იძლევიან ვიზუალურად გამოჩნდეს სიდიდეებს შორის მათემატიკური ოპერაციების კავშირი საწყისი მნიშვნელობების გათვალისწინებით.

დამუშავებულია ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში საძიებელ ცვლადთა მდგომარეობის მატრიცული განტოლებების შედგენის მეთოდი და მათი რიცხვითი ამოხსნა პარალელური მუშაობის განზოგადებული კენტი და ლუწი რეჟიმების შესაბამისი ინტერვალისათვის. მიღებულია შესაბამისი სხვაობითი განტოლებები რეკურენტული ფორმულის სახით, რომლებიც შეთავსებადია კომპიუტერული პროგრამების საშუალებით რიცხვითი მეთოდებით გაანგარიშებასთან.

Summary

There are presented in doctoral dissertation the following parts: topicality of research; goal and object of research; methods of research; main results and novelty of research; area of potential use of research results; publications; approbation of work and structure of dissertation. There is presented the content of dissertation and shown the issues considered in introduction part.

In chapter 1 the following items are considered: classification of wind-powered generators; the regimes of asynchronous generators; Instant values on wind-powered generator clamps; physical basics of solar energy conversion process; volt-ampere characteristics of solar photoelectric element; forming general structural scheme of hybrid parallel energetic system; working on autonomic hybrid energetic system principal calculating electric scheme while working in variable electricity network. We have discussed three groups of schemes of wind-wheel devices and their positions according to wind generators. Functions of asynchronous generators motor, generative and anti-circuit and brake regime are shown. Regulation of reactive power and compensation items are studied. Asynchronous generator excitation items are processed.

The general theoretical images of three-phase voltage straightway meanings on asynchronous generator output clamps are received including wind, the shaft wing and the following parameters of receiving variable current power supply network. Hydrodynamic ratio of the wind-driven wheel resistance; average wind speed; wing's circular movement; wind density; ratio of using wind energy; the area of equivalent Wing surface; the voltage meaning in the entrance of receiver variable current power; the meaning of voltage on the output clamps of wind three-phase generator; shift angle between the voltage in the output clamps of the generator and in the entrance of receiver variable power; the complete circuit equivalent active inductive impedance.

Electric scheme of solar element substitution and its volt-ampere characteristics during different temperature meanings and in various solar radiations are discussed. With the help of Lagrange' interpolation formula and Theylor's rows collapse processes volt-ampere characteristic image we have received three square form for complete accuracy of engineering calculations. We have presented the structural scheme of general modern hybrid parallel power grid, In which we considered both constant and variable power voltage systems.

Principal electronic scheme of impulsive regenerator of constant and variable current single-phase voltage hybrid parallel power grid is processed.

chapter 2 deals with regime determinations which relate to sustainable modes while working in autonomic hybrid power grid; regimes of hybrid power system; analysis of problems related to small and nontraditional power grid are performed and the main technical requirements that are in energy supply autonomic system are complied with.

The general structural scheme of hybrid parallel power system is presented, where wind power station, solar power station, accumulator battery,

constant power generator, three-phase network inventory follower and three-phase alternating current receiver network take a main part. Functions and regimes of each element and variable power receiver network are discussed. Principles and working conditions of these elements are focused.

We have proved time variation of hybrid power energetic united system during some period, while working at power network, stable general six odd and six even regime. Therefore, electrical properties in the abovementioned generator system is studied, control impulses and commutative functions, time dependent regularity algorithm. In hybrid autonomic electrical system in parallel working for calculating odd and even regimes which calculate principal electric schemes are studied.

chapter 3 focuses on the universal method of math and computer modeling in mathematical and magnetic transitional processes in autonomic hybrid power system, while working simultaneously with power network, general odd and even time interval electric balance equations are made to resulted complex electric magnitude on the basis of processed variable conversion method. We have clarified the equivalent parameters of united generative system and their ratios. On the basis of complex reversibility matrix of resulted variables, adequate phasic electric magnitude instant values are received.

Solving equations resulted in the fact that appropriate expressions are acceptable for each electric magnitude. Theoretical existence of interval expressions depend on the given parameters, on the basis of $2n-1$ odd and $2n$ even intervals by equalizing electric variables. Electromagnetic processes of computer modeling perfect work is done for odd and even time intervals. Each electric magnitude that is in time produced expressions in matrix form. By equating determinant to zero we get the condition, when derivatives are huge and with equivalent inductance, the product is considered to be boundless magnitude. It means that we have a chance to get a ratio between parameters and ratios, for which determinant does not become equal to zero. And therefore, commutative overstrain does not happen. While computer modeling it appeared that it's essential to use extra solar element volt-ampere characteristics.

For constructing electromagnetic process structural scheme, adequate mathematic operations are analyzed. Transitional process modeling schemes are made for odd and even intervals. They provide us with the opportunity to visualize mathematic links among magnitudes including basic meanings.

In united generative system the position of variables matrix the method of making equations are processed and their numerical solving for adequate intervals. Appropriate difference equations, as a recurrent formula is received. They are compatible to calculation of numerical method by computer programs.

შინაარსი

შესავალი.	14
ლიტერატურის მიმოხილვა.	19
შედეგები და მათი განსჯა.	29
თავი 1. ქარის და მზის ენერჯის ელექტრულ ენერჯიაში გარდაქმნის და გამოყენების ტექნოლოგიების დამუშავება	29
1.1. ქარის გენერატორების კლასიფიკაცია	29
1.2. ასინქრონული გენერატორის მუშაობის რეჟიმები. . .	31
1.3. ქარის გენერატორის მომჭერებზე ძაბვების მყისა მნიშვნელობების განსაზღვრა	39
1.4. მზის ენერჯის გარდაქმნის პროცესების ფიზიკური საფუძვლები	41
1.5. მზის ფოტოელექტრული ელემენტის ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი.	45
1.6. ჰიბრიდული პარალელური ელექტროენერჯეტიკული სისტემის განზოგადებული სტუქტურული სქემის დამუშავება	53
1.7. ავტონომიური ჰიბრიდული ელექტროენერჯეტიკული სისტემის პრინციპული საანგარიშო ელექტრული სქემის დამუშავება ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მდგრადი მუშაობის პირობებში	56
თავი 2. ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტროენერჯეტიკულ სისტემაში მუშაობის მდგრადი რეჟიმების დადგენა. .	58
2.1. ჰიბრიდული ელექტროენერჯეტიკული სისტემის ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მუშაობის რეჟიმები	58
2.2. ჰიბრიდული ავტონომიური ელექტროენერჯეტიკული სისტემების ცვლადი დენის ქსელთან	

	პარალელური მუშაობის კენტი რეჟიმების დადგენა .	66
2.3.	ჰიბრიდული ავტონომიური ელექტროენერგეტიკული სისტემების ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მუშაობის ლუწი რეჟიმების დადგენა .	69
2.4.	ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის ძაბვების, მართვის იმპულსების, კომუტაციური ფუნქციებისა და სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის ძაბვების დროზე დამოკიდებულების კანონზომიერების დადგენა . . .	71
2.5.	ჰიბრიდული ავტონომიური ელექტროენერგეტიკული სისტემის პარალელური მუშაობის კენტი და ლუწი რეჟიმების საანგარიშო პრინციპული ელექტრული სქემის დამუშავება	74
თავი 3.	ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მდგრადი მუშაობის პირობებში.	77
3.1.	ქარის ელექტროსადგურისა და სამფაზა გამმართველის ერთობლივი მდგრადი მუშაობის ელექტრომაგნიტური პროცესების ელექტრული წონასწორობის განტოლებები	77
3.2.	მზის ელექტრული სადგურისა და აკუმულატორული ბატარეების ერთობლივი მუშაობის ელექტრული წონასწორობის განტოლებები.	81
3.3.	ავტონომიური ჰიბრიდული ერთიანი ენერგო-სისტემის ელექტრული წონასწორობის განტოლებები უქმი სვლის და დატვირთვის რეჟიმში.	82
3.4.	მუდმივი დენის გარდამქმნელის, სამფაზა ქსელის მიმყოლი ინვერტორის და სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის ერთობლივი პარალელური მდგრადი მუშაობის პირობებში ელექტრული წონასწორობის განტოლებები.	83
3.5.	ჰიბრიდული ავტონომიური ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის ელექტრული წონასწორობის	

განტოლებების ამოხსნა.	88
3.6. ჰიბრიდული ავტონომიური ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის ელექტრომაგნიტური პროცესების კომპიუტერული მოდელირება.	95
3.7. ელექტროენერგეტიკული სისტემის გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემის ელემენტების ძირითადი თვისებები.	102
3.8. ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში ცვლადთა მდგომარეობის მატრიცული განტოლებების რიცხვითი ამოხსნა პარალელური მუშაობის კენტი რეჟიმების განზოგადებული $2(n - 1) \frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n-1} \leq (2n - 1) \frac{\pi}{6\omega}$ ინტერვალებისათვის	107
3.9. ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში ცვლადთა მდგომარეობის მატრიცული განტოლებების რიცხვითი ამოხსნა პარალელური მუშაობის ლუწი რეჟიმების განზოგადებული $(2n - 1) \frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n} \leq 2n \frac{\pi}{6\omega}$ ინტერვალებისათვის	111
დასკვნა	114
გამოყენებული ლიტერატურა.	118

ნახაზების ნუსხა

ნახ.1.	ასინქრონული მანქანის სხვადასხვა რეჟიმებში მუშაობისას ბრუნვის Ω – სიხშირისა და ψ_2 – კუთხის ცვალებადობა.	32
ნახ.2.	ასინქრონული გენერატორის შენაცვლების T -ს მაგვარი სქემა (ა) და $\underline{Z}(j\omega)$ წინაღობის ჰოდოგრაფი ω -ს ნულიდან უსასრულობამდე ცვლილებისას (ბ).	36
ნახ.3.	ქარის ელექტროსადგურისა და მიმღები ცვლადი დენის ქსელის ამსახველი სტრუქტურული სქემა.	40
ნახ.4.	ფოტოელემენტის პრინციპული სქემა: ელექტროდები (1,4), p და n ტიპის ნახევარგამტარის ფენა (2,3), გამტარი (5), დატვირთვის წინაღობა (6)	42
ნახ.5.	მზის ელემენტის საწყისი ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები. დენის წყარო I_{sc} (U), $R = \text{const}$ დროს.	44
ნახ.6.	მზის ელემენტის ექვივალენტური ელექტროსქემა.	45
ნახ.7.	მზის ელემენტის მახასიათებლები.	46
ნახ.8.	მზის მოდულის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები ტემპერატურის სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს.	47
ნახ.9.	მზის მოდულის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები მზის გამოსხივების სხვადასხვა ინტენსივობის დროს.	47
ნახ.10.	მზის ელემენტის შენაცვლების ელექტრული სქემა	48
ნახ.11.	მზის ელემენტის ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი.	52
ნახ.12.	თანამედროვე ჰიბრიდული პარალელური ენერგოსისტემის განზოგადებული სტრუქტურული სქემა.	55
ნახ.13.	იმპულსურ გარდამქმნელიანი მუდმივი და ცვლადი დენის ერთფაზა ძაბვის ჰიბრიდული პარალელური ენერგოსისტემის პრინციპული ელექტრული სქემა	57
ნახ.14.	ჰიბრიდული პარალელური ელექტროენერგეტიკული სისტემის განზოგადებული სტრუქტურული სქემა.	61
ნახ.15.	ავტონომური ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემის პრინციპული ელექტრული სქემა.	62

ნახ.16.	მუდმივი დენის გარდამქმნელის პრინციპული ელექტრული სქემა.	63
ნახ.17.	სამფაზა ქსელის მიმყოლი ინვერტორის და სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის პრინციპული ელექტრული სქემა.	64
ნახ.18.	ჰიბრიდული ავტონომიური ელექტროენერგეტიკული სისტემის პარალელური მუშაობის კენტი რეჟიმების საანგარიშო პრინციპული ელექტრული სქემა	69
ნახ.19.	ჰიბრიდული ავტონომიური ელექტროენერგეტიკული სისტემის პარალელური მუშაობის ლუწი რეჟიმების საანგარიშო პრინციპული ელექტრული სქემა	71
ნახ.20.	ჰიბრიდული ელექტრული სადგურის გამომავალი U_{dc} ძაბვის, მართვის იმპულსების, კომუტაციური ფუნქციების და ქსელის ძაბვის დროზე დამოკიდებულების კანონზომიერება.	73
ნახ.21.	ჰაეს-ის პარალელური მუშაობის კენტი და ლუწი რეჟიმების საანგარიშო ელექტრული სქემა.	75
ნახ.22.	ქარის ელექტრული სადგურის პრინციპული ელექტრული სქემა სამფაზა ძალური ტრანსფორმატორითა და მართვადი გამმართველით უქმი სვლის რეჟიმისათვის.	77
ნახ.23.	სტრუქტურული სქემის ელემენტების ძირითადი თვისებები.	104
ნახ.24.	გარდამავალი პროცესების მოდელის სრუქტურული სქემა კენტი რეჟიმების განზოგადებულ $2(n-1)\frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n-1} \leq (2n-1)\frac{\pi}{6\omega}; n=1,2,3,\dots, k=A,B,C.$ ინტერვალებში.	105
ნახ.25.	გარდამავალი პროცესების მოდელის სრუქტურული სქემა ლუწი რეჟიმების განზოგადებულ $(2n-1)\frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n} \leq 2n\frac{\pi}{6\omega}; n=1,2,3,\dots, k=A,B,C.$ ინტერვალებში.	106

შესავალი

უკანასკნელ პერიოდში გაზრდილია ინტერესი არატრადიციული და განახლებადი ენერჯის წყაროების: ქარის, მზის, ზღვის ტალღების, ოკეანეების მიმოქცევის, გეოთერმული, ბიომასის, დიდი და მცირე წყლის ნაკადების და სხვა ენერჯების ელექტრულ ენერჯიაში გარდაქმნისა და გამოყენების ტექნოლოგიების სრულყოფის მიმართულებით.

ქარის ელექტროსადგურებში, როგორც წესი, რეკომენდირებულია გამოყენებულ იქნას ძირითადად სამფაზა ასინქრონული გენერატორები. ქარის გენერატორების პარალელური მუშაობისას ასინქრონული გენერატორების უპირატესობად ითვლება ელექტრომაგნიტური მომენტის, დენის და გენერირებული სიმძლავრის შედარებით მცირე რხევები ქარის სიჩქარის ცვლილებათა პირობებში. ქარის ელექტროსადგურების აშენება პესპექტიულია სამხრეთ საქართველოს მთიანეთში, კახაბრის ვაკისა და კოლხეთის დაბლობის ცენტრალურ ნაწილში. ამჟამად, გორის გარეუბანში დაყენებულია ქარის რამოდენიმე გენერატორი, რომლებიც დაყენების დღიდან განუწყვეტლივ მუშაობს და მიმდინარეობს შესაბამისი ელექტრული ენერჯის მიმღებ ქსელში შეშვების პროცესის დამუშავება.

ჰიბრიდული პარალელური ელექტროენერჯეტიკული სისტემის მუშაობის მდგრადი და სტაბილური რეჟიმების უზრუნველსაყოფად საჭიროა შესაბამისი ტექნოლოგიებით დამზადებული ქარის გენერატორის, მზის ფოტოელექტრული ელემენტების და აკუმულატორული ბატარეების ერთდროული ეფექტური გამოყენება. მათთვის თანმხლება მუდმივად დამუხტვისა და განმუხტვის პროცესები მიკროპროცესორული კონტროლიორის, სიმძლავრის რეგულიატორისა და შესაბამისი მართვის იმპულსების ფუნქციონირებით.

ნაშრომში შესრულებულია ჰიბრიდული ელექტროენერჯეტიკული სისტემის მიმღებ ქსელთან პარალელური მუშაობის პირობებში მიზანმიმართული თეორიული სამუშაოები სისტემის საექსპლუატაციო,

საანგარიშო პრინციპული და ელექტრული სქემების შექმნისა და მათში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების ჩატარების საკითხები.

შესწავლილია და განსაზღვრულია მზისა და ქარის ენერგორესურსების შესაძლო ეფექტიანი მარაგი, ქარის ასინქრონული გენერატორის მუშაობის გენერატორული, ძრავული და დამუხრუჭების რეჟიმები, როტორის ბრუნვის კუთხური სიხშირისა და როტორის გრაგნილში გამავალ დენსა და დაინდუქციურებული ე.მ.ძალის ვექტორებს შორის ძვრის კუთხის ცვალებადობის კანონზომიერება სრიალზე დამოკიდებულებით.

პირველად, მიღებულია ქარის ასინქრონული გენერატორის გამომავალ მომჭერებზე სამფაზა ფაზური ძაბვების მყისა მნიშვნელობების თეორიული, ზოგადი გამოსახულებები, რომლებშიც გათვალისწინებულია ქარის, გენერატორის ლილვზე დამაგრებული ფრთის და მიმღები ცვლადი დენის ქსელის ყველა შესაძლო არსებული პარამეტრები: T-პროცესების ერთეული განსახილველი რაიმე დრო; C_x - ფრთის საქარე წინალობის ჰაეროდინამიკური კოეფიციენტი; V-ქარის საშუალო სიჩქარე; U - ფრთის წრიული მოძრაობის სიჩქარე; ρ - ქარის სიმკვრივე; $\xi = C_x \left(1 - \frac{U}{V}\right)^2 \cdot \frac{U}{V}$ - ქარის ენერჯის გამოყენების კოეფიციენტი; S - ფრთის ზედაპირის ფართობი; U_m'' - მიმღები ცვლადი დენის ქსელის შესავალში ძაბვის მაქსიმალური მნიშვნელობა; U^I - ქარის სამფაზა გენერატორის მომჭერებზე ძაბვის მოქმედი მნიშვნელობა; δ - U_m'' და U^I ძაბვების შესაბამის ვექტორებს შორის ძვრის კუთხე; X_Σ - ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის ექვივალენტური რეაქტიული წინალობა. მიღებულ გამოსახულებაში შემავალი პარამეტრების გარკვეული კანონზომიერებით რეგულირება შესაბამისი წესით აისახება გენერატორის გამოსავალზე ძაბვების სასურველი სიდიდეების მიღებაზე.[3].

მზის ენერჯის ელექტრულ ენერჯიაში გარდაქმნის პროცესების დამუშავებული ფიზიკური საფუძვლების გათვალისწინებით შედგენილია მზის ფოტოელექტრული ელემენტის შენაცვლების სრულყოფილი ელექტრული სქემა, რომელშიც გათვალისწინებულია ყველა დამახასიათებელი საანგარიშო პარამეტრები. ფოტოელემენტის $p-n$ გადასასვლელზე გამავალი ფოტოდენისა და გაჯერების უკუდენის მიმართ შედგენილი განტოლებათა სისტემის ამოხსნის შედეგად დადგინდა ფოტოელემენტის უქმი სვლის, ნომინალური რეჟიმისა და მოკლე შერთვის პარამეტრებზე დამოკიდებული ექვივალენტური კოეფიციენტები. ტელორის მწკრივებად დაშლის შედეგად მიღებული იქნა მზის ელემენტის სიმძლავრის რაციონალური გამოსახულება მრავალწევრის სახით. მიღებული გამოსახულების დენის მიხედვით გაწარმოების ნულთან გატოლების პირობებიდან გამომდინარე დადგენილი იქნა ძაბვის და დენის უქმი სვლის, ოპტიმალურ–ექსტრემალური და მოკლე შერთვის რეჟიმების დამახასიათებელი შესაბამისი სამი წერტილის კოორდინატები. ლაგრანჟის ინტერპოლაციის ფორმულის საფუძველზე დადგენილ იქნა მზის ელემენტის საინჟინრო გათვლებისათვის მოსახერხებელი ვოლტ–ამპერული მახასიათებლის გამოსახულება კვადრატული სამწევრის სახით. მასში მონაწილეობას ღებულობს ოპტიმალურ–ექსტრემალური დენით და ძაბვით გამოსახული მხოლოდ ერთი ექვივალენტური ფარდობითი კოეფიციენტი.

ქარის, მზის, დიზელ გენერატორების და აკუმულიატორული ბატარეების შესაბამისი გარდაქმნილი ელექტრული ენერჯიების მიკროპროცესორული კონტროლიორების საფუძველზე სელექციური გზით ერთობლივი გამოყენების შესაძლებლობამ საშუალება მოგვცა შექმნილიყო თანამედროვე ჰიბრიდული მუდმივი და ცვლადი დენის ენერჯოსისტემის განზოგადებული სტრუქტურული და საანგარიშო ელექტრული სქემები საქართველოს ელექტროსისტემის ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მდგრადი მუშაობის პირობებში.

ნაშრომში დადგენილია ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული გაერთიანებული სისტემის ელექტრული სიდიდეების დროში ცვალებადობის ერთი პერიოდის განმავლობაში ცვლადი დენის მიმღებ ქსელთან პარალელური მუშაობის პირობებში, მდგრადი განზოგადებული ექვსი კენტი და ექვსი ლუწი რეჟიმი. შესაბამისად, შესწავლილია ელექტრული სიდიდეების, მართვის იმპულსების და კომუტაციური ფუნქციების დროზე დამოკიდებულების კანონზომიერების ალგორითმი. შესაბამისად ჩატარებულია მაღალი სიზუსტით ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება.

შედგენილია განზოგადებული კენტი და ლუწი დროის ინტერვალებისათვის ელექტრული წონასწორობის განტოლებები რეზულტირებული კომპლექსური საძიებელი ელექტრული სიდიდეების მიმართ დამუშავებული ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის საფუძველზე. დადგენილია ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის ექვივალენტური პარამეტრები და კოეფიციენტები. კომპლექსური რეზულტირებული ცვლადთა უკუ გარდაქმნის მატრიცების საფუძველზე მიღებულია შესაბამისი ფაზური ელექტრული სიდიდეების მყისა მნიშვნელობების ზოგადი გამოსახულებები.

ჩატარებულია მიღებული განტოლებების ამოხსნა სამართლიანი, როგორც დამყარებული, ასევე გარდამავალი პროცესებისათვის. დადგენილია მოცემული პარამეტრებზე დამოკიდებული დამყარებული პროცესების შესაბამისი განზოგადებული ინტერვალების გამოსახულების თეორიულად არსებობის პირობა, გამომდინარე ერთმანეთის მომდევნო $2n-1$ კენტი და $2n$ ლუწი ინტერვალებში ელექტრული სიდიდეების საშუალო მნიშვნელობების ერთმანეთთან გატოლების საფუძველზე.

ნაშრომში შესრულებულია ჰიბრიდული ავტონომიური ერთიანი გარდამქმნელი ელექტროენერგეტიკული სისტემის ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების კომპიუტერული მოდელირების ჩატარებული

სრულყოფილი სამუშაო განზოგადებული კენტი და ლუწი ინტერვალებისათვის. განსაზღვრულია თითოეული საანგარიშო ელექტრული სიდიდეების დროში წარმოებულების გამოსახულებები მატრიცულ ფორმაში. შესაბამისი დეტერმინანტის ნულთან განტოლების შედეგად ვღებულობთ პირობას, როცა წარმოებულები უსასრულოდ დიდია და ექვივალენტურ ინდუქციურობებთან ნამრავლიც უსასრულო დიდი სიდიდეებია. ეს იმას ნიშნავს, რომ საშუალება გვძლევს მივიღოთ პარამეტრებსა და კოეფიციენტებს შორის ისეთი თანაფარდობები, რომელთათვისაც დეტერმინანტი არ ხდება ნულის ტოლი და შესაბამისად კომპუტაციურ გადამაბვებს ადგილი არ აქვს. კომპიუტერული მოდელირებისას საჭირო აღმოჩნდა დამატებით მზის ელემენტის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის ჩვენს მიერ მოდერნიზებული განტოლების გამოყენება.

განხილულია ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემის აგებისათვის საჭირო შესაბამისი მათემატიკური ოპერაციების ელემენტების ძირითადი თვისებები. თითოეული განზოგადებული კენტი და ლუწი ინტერვალებისათვის შედგენილია გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები. ისინი საშუალებას იძლევიან შესაბამისი საწყისი მნიშვნელობების გათვალისწინებით ვიზუალურად გამოჩნდეს სიდიდეებს შორის მათემატიკური ოპერაციების კავშირი.

დამუშავებულია ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში საძიებელ ცვლადთა მდგომარეობის მატრიცული განტოლებების შედგენის მეთოდიკა და მათი რიცხვითი ამოხსნა პარალელური მუშაობის განზოგადებული კენტი და ლუწი რეჟიმების შესაბამისი ინტერვალებისათვის. მიღებულია სხვაობითი განტოლებები რეკურენტული ფორმულის სახით, რომლებიც შეთავსებადია კომპიუტერული პროგრამების საშუალებით რიცხვითი მეთოდებით გაანგარიშებასთან.

ლიტერატურის მიმოხილვა

სტატიაში განხილულია ქარის ელექტროსადგურისა და მიმღები ცვლადი დენის ქსელის ერთობლივი მუშაობა. ნაჩვენებია ქარის ელექტრული სადგურის პარალელურად მიერთებული სამფაზა გამმართველის გამოსასვლელზე ძაბვის, მართვის იმპულსების, კომუტაციური ფუნქციებისა და სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის ძაბვების დროზე დამოკიდებულების კანონზომიერება. დადგენილია ქარის ელექტროსადგურისა და ცვლადი დენის ქსელის ერთობლივი მუშაობის რეჟიმები [1].

ნაშრომში დამუშავებულია და შექმნილი ქარისა და მზის ელექტრული სადგურების, აგრეთვე მათთან პარალელურად მიერთებული აკუმულიატორების ბატარეების ერთობლივი ჰიბრიდული ავტონომიური ელექტროენერგეტიკული სისტემის განზოგადოებული სტრუქტურული სქემა და პრინციპული საანგარიშო ელექტრული სქემები. [2].

ნაშრომში განხილულია ქარისა და მზის ენერჯების გამოყენების აუცილებლობა და აქტუალობა. წარმოდგენილია ქარის ენერჯის გამოყენების ოპტიმალური გზები და მეთოდები. აგებულია ქარის ენერგეტიკულ დანადგარში ფრთის მობრუნების კუთხის და განვითარებული სიმძლავრის ქარის სიჩქარეზე დამოკიდებულების გრაფიკები. წარმოდგენილია მზის ელექრომაგნიტური გამოსხივების ატმოსფეროს პარამეტრებზე დამოკიდებულების საკითხები. ფოტოელექტრული გარდაქმნისას ნახევარგამტარებში ენერჯის შთანთქმის პროცესი და გამოსხივების ზღვრული ტალღის სიგრძის ანგარიში. [3].

ნაშრომში წარმოდგენილია ძირითადი რეჟიმები ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემის ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მუშაობის პირობებში. დამუშავებული და შექმნილია ქარის და მზის ელექტრული სადგურების, აგრეთვე მათთან პარალელურად შეერთებული აკუმულიატორული ბატარეების ერთობლივი ჰიბრიდული

ელექტროენერგეტიკული სისტემის სტრუქტურული და პრინციპული საანგარიშო სქემები. [4].

ნაშრომში წარმოდგენილია ქარის ელექტროსადგურში და მასთან დაკავშირებულ ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში მიმდინარე ელექტრომექანიკური და ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური აღწერა. ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის გამოყენებით მიღებულია გამართული ძაბვის მყისა მნიშვნელობისა და სამფაზა ძალური ტრანსფორმატორის გამოსასვლელზე რეზულტირებულ კომპლექსურ ძაბვას შორის დამაკავშირებელი განტოლება. [5].

სტატიაში წარმოდგენილია სინქრონული და ასინქრონული გენერატორების შედარებითი დახასიათება. ჩატარებულია ეკონომიკური გაანგარიშებები, მოცემულია გენერატორის ფასების მათ სიმძლავრეზე დამოკიდებულების მრუდები. [6].

სტატიაში წარმოდგენილია ანალოგური საზომი ხელსაწყოების დამოწმების ორი დინამიკური მეთოდი: შეთავსების მეთოდი და ხელსაწყოს სკალის გამოსახულების მიხედვით ცდომილების ათვლის მეთოდი. განხილულია ავტომატური დამოწმების რეჟიმში წარმოშობილი დინამიკური ცდომილებების მინიმიზაციის პროცესი. [7].

მოცემულია ნავთობისა და ბუნებრივი აირის მარაგის ამოწურვის შემდეგ ნახშირისა და ბირთვული საწვავის გამოყენების შედეგად გარემოზე მათი შესაძლო უარყოფითი ზემოქმედებები. დამუშავებულია არატრადიციული და განახლებადი ენერჯის წყაროების ბაზაზე სუფთა ეკოლოგიური ფოტოელექტრული გარდამქმნელების გამოყენების ტექნოლოგიები ელექტროენერგეტიკაში. მოცემულია მზის ელემენტის შენაცვლების სქემა და მისი ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის გამოსახულება ექსპონენციალურ სახეში [8].

წიგნში განზოგადებულია და სისტემატიზირებულია ფოტოელექტრული მეთოდით მზის ენერჯის ელექტრულ ენერჯიაში

გარდაქმნის საკითხები. მოცემულია გარდაქმნის ფიზიკური საფუძვლები. წარმოდგენილია მზის ელემენტების სხვადასხვა მახასიათებლები[9].

წარმოდგენილია მუდმივი და ცვლადი ძაბვის ენერგოსისტემების გარდამქმნელი დანადგარით შეთანხმებული მუშაობის პრინციპული ელექტრული სქემა. აგებულია გამტარ მდგომარეობაში მყოფი ნახევარგამტარული ხელსაწყოების დენებისა და მუდმივი ძაბვის ქსელში ძაბვის დიაგრამები [10].

სამეცნიერო-ტექნიკური ინფორმაციათა ინსტიტუტის ჰელიოენერგეტიკის სერიაში წარმოდგენილ სამეცნიერო ნაშრომში: „მზის ელექტრული სადგურები“ მოცემულია მზის ელექტროსადგურის ოპტიკური სისტემები, მზის ელექტროსადგურის პარამეტრების ოპტიმიზაცია და მუშაობის მათემატიკური მოდელირების საკითხები[11].

განხილულია ნახევარგამტარ მზის ელემენტებში მიმდინარე ძირითადი ფიზიკური პროცესები მზის ენერგიის ელექტრულ ენერგიად გარდაქმნისას. წარმოდგენილია კაჟბადისა და არსენიდ-გალიუმის მასალებზე შექმნილი ელემენტების პარამეტრების ოპტიმიზაციის საკითხები. მოცემულია მზის ელემენტების სხვადასხვა მოდელების განსაკუთრებულობის ანალიზი. მოყვანილია ექსპერიმენტის შედეგები მაღალი მ.ქ.კ.-ის მქონე ელემენტების მიღების მიზნით [12].

მონოგრაფიაში მოცემულია მზის ელემენტებისა და ბატარეის შექმნის ფიზიკური საფუძვლები, აგებულია ძირითადი მახასიათებლები და გაანგარიშებულია ვოლტ-ამპერული მახასიათებლების ექვივალენტური პარამეტრები. განხილულია მზის ბატარეის პროექტირების საკითხები. დამუშავებულია მზის ელემენტებისა და ბატარეის შეერთების სახეები ძაბვის რეგულირებისათვის[13].

წიგნში აღწერილია მოწყობილობები, რომლებიც საშუალებას იძლევიან გამოყენებული იქნას მზის ენერგია ფოტოელექტრული გარდამქმნელების საშუალებით საყოფაცხოვრებო სფეროში[14].

სტატიაში წარმოდგენილია მუდმივი და ერთფაზა ცვლადი ძაბვის ელექტროენერგეტიკული პარალელური ჰიბრიდული სისტემების პრინციპული ელექტრული სქემა. ჩატარებულია პროცესების ანალიზი. მიღებულია ტრანსფორმატორის დინამიური სიმძლავრის კოეფიციენტის გამოსახულება და დადგენილია ექვივალენტური პარამეტრები[15].

განახლებადი ენერჯის წყაროებიან ავტონომიურ ენერგოსისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელირება მუდმივი დენის გარდამქმნელის მოდულაციური წრედის გათვალისწინებით მოცემულია სტატიაში[16].

მზის ფოტოელექტრული სადგურისა და ცვლადი დენის ქსელის ერთობლივი მუშაობისას პროცესების მართვა და რეგულირება წარმოდგენილია სამეცნიერო სტატიებში[17,19].

წვეის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების სისტემაში, სამფაზა მართვად გამმართველებში ელექტრომაგნიტური პროცესების მათემატიკური მოდელირება განხილულია სამეცნიერო ნაშრომში[20].

წარმოდგენილია მზის ენერჯის ელექტრულ და ქიმიურ ენერჯიაში გარდაქმნის მეთოდის საფუძვლები ნახევარგამტარ ელექტროდებიან ფოტოელექტრულ ელემენტებში. მოცემულია მზის გარდამქმნელების განვითარების პერსპექტივები[21].

წიგნში განხილულია ქარის ენერგეტიკის არსებული მდგომარეობა და განვითარების პერსპექტივები. ჩატარებულია ქარის ენერგეტიკის რესურსების შეფასება. მოყვანილია ენერგოსისტემაში ქარის ენერჯის გამოყენების აუცილებლობა და მიზანშეწონილობა [22].

სახელმძღვანელოში მოცემულია ქარის ენერგეტიკული რესურსები, ქარის ელექტრული დანადგარის მუშაობის პრინციპები, ქარის დანადგარების ტიპები, ქარის აგრეგატების მიერ წლიური ელექტროენერჯის გამომუშავების მიახლოებითი ანგარიშის მეთოდები [23].

დამხმარე სახელმძღვანელოში მოცემულია მოწყობილობათა ელემენტები, დატვირთვები, მათი საანგარიშო ვარიანტები და ურთიერთ შერწყმები. განსაზღვრულია მუდმივი და დროითი დატვირთვები ქარის ელექტროდანადგარების ელემენტებზე, მის ფუნდამენტზე და საფუძველზე. განხილულია გაანგარიშების მაგალითები[24].

მუდმივი დენის ძრავის გაშვებისა და წევის რეჟიმების გამოკვლევა წევის ქვესადგურის სამფაზა ბოგირული გამმართველ-ინვერტორული გარდამქმნელის გათვალისწინებით წარმოდგენილია სტატიაში[25].

წევის ქვესადგურის სამფაზა ბოგირული გამმართველ-ინვერტორული გარდამქმნელისა და განივ - იმპულსური მოდულიაციით მართვადი მუდმივი დენის წევის ძრავის ერთიან სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების გაანგარიშება და ანალიზი დროის განზოგადებული ინტერვალებისათვის მოცემულია სტატიაში[26].

ჰიბრიდული ავტონომიური ელექტროენერგეტიკული სისტემისა და ცვლადი დენის სამფაზა ქსელის პარალელურ რეჟიმში ერთობლივი მუშაობისას პროცესების მართვა, რეგულირება და ოპტიმიზაცია მოცემულია სამეცნიერო ნაშრომში[27].

ნაშრომში განხილულია ძალოვანი ელექტრონიკის სქემების სხვადასხვა ჯგუფების ძირითადი მახასიათებლები, ნაჩვენებია ძალოვანი ქსელური გამმართველების, მწყვეტარების და გარდამქმნელების მუშაობის პრინციპები და გამმართველების დაცვის ტექნოლოგიები[28].

წარმოდგენილია გამმართველებისა და ნახევარგამტარული სიხშირული გარდამქმნელების მოქმედების პრინციპები, მათემატიკური აპარატის გამოყენება პროცესების მოდელირებისათვის, გამომავალი ძაბვის რეგულირების საკითხები. დამუშავებულია ბუნებრივი და იძულებითი კომუტაციით გარდაქმნის უნივერსალური სქემები, მათი რეგულირების და მართვის სქემები [29].

მონოგრაფიაში განხილულია ცვლადი სტრუქტურის ვენტილური გარდამქმნელების სქემები, ანალიზის მეთოდები, სინთეზი და

ოპტიმიზაციის მეთოდები. წარმოდგენილია გამოთვლითი ტექნიკის საშუალებით ანალიზის მეთოდები და პროგრამები. გამოყენებულია პერიოდულად ნახტომისებური კანონით ცვალებადი სტრუქტურებიანი დიფერენციალური განტოლებათა სისტემები. შემოყვანილია მდგომარეობათა ცვლადების გრაფები გარდამქმნელებში მიმდინარე პროცესების ასახვისათვის [30].

მოცემულია მათემატიკური აპარატი, გამოყენებული ავტომატური მართვის თეორიაში; მიღებული დასკვნები დიფერენციალური და სხვაობითი განტოლებების თეორიიდან. მნიშვნელოვანი ყურადღება ეთმობა წრფივ ალგებრას, მატრიცულ აღრიცხვას, კომპლექსური ცვლადების ფუნქციის თეორიას, ოპერაციულ აღრიცხვას და შემთხვევითი პროცესების თეორიას[31].

წიგნში წარმოდგენილია თავმოყრილ და განაწილებულ პარამეტრებიანი წრფივი ელექტრული წრედების ანალიზის ზოგადი მეთოდები. განხილულია ელექტრულ წრედებში გარდამავალი პროცესების გაანგარიშების მეთოდები[32].

განხილულია ძალოვან ვენტილურ წრედებში ელექტრომაგნიტური პროცესების დინამიკის ანალიზი, გაანგარიშებისა და გამოკვლევის თეორია. სხვადასხვა გარდამქმნელი სქემებისათვის მიღებულია გამოკვლევების შედეგები და შექმნილია მათემატიკური მოდელები [33].

სახელმძღვანელოში დამუშავებულია წრფივი და არაწრფივი ელექტრული წრედების გაანგარიშების მეთოდები, როგორც ერთფაზა, ასევე სამფაზა დენის წრედისათვის. განხილულია სიმეტრიული და არასიმეტრიული მრავალფაზა წრედების გაანგარიშების მეთოდები. მოცემულია გარდამავალი პროცესების გაანგარიშების კლასიკური, ოპერატორული და სიხშირული მეთოდები[34].

დამხმარე სახელმძღვანელოში დამუშავებულია მუდმივი და ცვლადი დენის ელექტრული წრედების გაანგარიშების მეთოდები, როგორც დამყარებულ, ასევე გარდამავალ პროცესებისათვის. განხილულია

გარდამავალი პროცესები თავმოყრილ და განაწილებულ პარამეტრებიან ელექტრულ წრედებში. მოცემულია ელექტრომაგნიტური ველის სრული განტოლებები და მათი ამოხსნის მეთოდები [35].

მონოგრაფიაში განხილულია მოდულაციური ტიპის ინვერტორების აგების პრინციპები და თეორია, რომლებიც ითვალისწინებენ გამომავალ სინუსოიდურ ძაბვებს. მოცემულია გამომავალი ძაბვის რეგულირების მეთოდები და განხილულია ამ მოწყობილობებში დინამიური პროცესების გამოკვლევა [36].

წიგნში დამუშავებულია პასიური და აქტიური წრფივი წრედების ანალიზის თანამედროვე მეთოდები დროისა და სიხშირის არეში [37].

განხილულია არაწრფივ ელექტრულ წრედებში პროცესების ანალიზის საკითხები. აღწერილია რეზისტორული და დინამიური წრედების რიცხვითი ანალიზის მეთოდები, რომელთა გამოყენება შეთავსებადია გამოთვლითი ტექნიკის პროგრამებთან [38].

მონოგრაფიაში მოცემულია ელექტრომომარაგების სისტემებში რეჟიმების ოპტიმალური სიმეტრირების მეთოდები და საშუალებები. მოყვანილია სამფაზა არასიმეტრიული სისტემის მათემატიკური მოდელი. დამუშავებულია არასიმეტრიული რეჟიმების ტექნიკური და ეკონომიკური კრიტერიუმების მიხედვით ოპტიმიზაციის ალგორითმები [39].

ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის ელექტრომაგნიტური პროცესების გაანგარიშება და ანალიზი კომპიუტერული პროგრამების გამოყენებით; კომპიუტერული მოდელირების მიზნით პროცესების აღმწერი დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემის გარდაქმნა რეკურენტულ სხვაობით განტოლებებად მატრიცულ ფორმაში; სხვაობითი განტოლებების ამოხსნის მეთოდი და მათი გამოყენება ელექტრონული სქემების ანალიზისათვის განხილულია მონოგრაფიაში [40].

წვევის ქვესადგურის ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში მატარებლის რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმებში ელექტრომაგნიტური

გარდამავალი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება ჩატარებულია სტატიაში[41].

სამფაზა მართვადი გამმართველის დინამიური პროცესების ანალიზი ტრანსფორმატორის ძირითადი პარამეტრების გათვალისწინებით, დაფუძნებული ცვლადთა კომპლექსურ-სპექტრული-ოპერატორული გარდაქმნის მოდერნიზებულ მეთოდზე, წარმოდგენილია ჟურნალ „Электричество“-ში გამოქვეყნებულ სტატიაში[42].

სამფაზა დენის ავტონომიური ინვერტორისაგან და არასიმეტრიულ სტატიკური დატვირთვისაგან შემდგარ გარდამქმნელ სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების დინამიკის გამოკვლევისა და გაანგარიშების მოდერნიზებული მეთოდი დამუშავებულია ჟურნალ „Электричество“-ში [43].

წვეის ქვესადგურის ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნა და შესაბამისი სხვაობითი განტოლებების მიღება, შეთავსებადი კომპიუტერულ პროგრამებთან, მოცემულია სტატიაში[44].

აღწერილია Matlab გაფართოების, Simulink და Fuzzy Logic Toolbox მთელი რიგი პაკეტები, რომლებიც არსებითად აფართოებენ Matlab -ის შესაძლებლობებს შეასრულონ რთული სისტემებისათვის მათემატიკური გაანგარიშებები, მოდელირების საკითხები და გამოიყენონ შესაბამისი მიდგომა ბუნდოვანი ლოგიკისა და ნეირონული წრედების მიმართ მოცემულია ნაშრომში[45].

მექატრონული სისტემების მოდელირება Matlab - Simulink-ის გარემოში, Simulink-ის და Sim Power System-პაკეტების ბიბლიოთეკის აღწერილობა, გამოყენებული მექატრონიკის სისტემებში მოცემულია სახელმძღვანელოში[46].

Matlab6.0 - ის პრაქტიკულად გამოყენების საკითხები ნახევარ გამტარული გარდამქმნელების პროცესების გაანგარიშებისა და ანალიზის ამოცანების გადაწყვეტაში განხილულია ნაშრომში[47].

წარმოდგენილია ელექტროტექნიკური მოწყობილობებისა და სისტემებისათვის Simulink გამოყენებითი პროგრამების და სისტემებისათვის Sim Power System ბიბლიოთეკის ბლოკების აღწერა. განხილულია მოდელების გაანგარიშების შესრულების მექანიზმი. მოყვანილია რეკომენდაციები პროგრამების გამოყენების შესახებ[48].

წიგნში განხილულია მუდმივი დენის გარდამქმნელებისა და ავტონომიური ინვერტორების აგებისა და ფუნქციონირების პრინციპები. აღწერილია ელექტრომაგნიტური პროცესები, მოყვანილია კომუტაციური რგოლების პარამეტრების გაანგარიშების მეთოდიკა და ინვერტორების რეგულირების საკითხები[49].

წილად - რაციონალური გამოსახულებებისა და ორიგინალებისათვის ლაპლასის შებრუნებული გარდაქმნების ზოგადი ფორმულები და Z-გარდაქმნების თეორია წარმოდგენილია მონოგრაფიაში[50].

წრფივი, არაწრფივი, ერთფაზა, სამფაზა, თავმოყრილ და განაწილებულ პარამეტრებიანი ელექტრული წრედების გაანგარიშების მეთოდები; ფილტრები, ოთხპოლუსები, ელექტრომაგნიტური ველის თეორია, მისი სრული განტოლებათა სისტემის ამოხსნის მეთოდები წარმოდგენილია ორი ტომის სახით სახელმძღვანელოში[51].

ელექტრულ წრედებში და ელექტრომაგნიტურ ველებში სივრცითი-დროითი დამოკიდებულებანი; ელექტროტექნიკაში ფიზიკური სიდიდეების გარდამქმნელები, ზეგამტარი ტრანსფორმატორები, დენის შემზღვევლები, სწრაფმოქმედი ავტომატები წარმოდგენილია მსოფლიო დონის მონოგრაფიაში[52].

ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სადგურის, აკუმულიატორული ბატარეის და სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის ერთობლივი მუშაობის ერთიანი სისტემა, მასში ძირითადი თორმეტი რეჟიმის შესწავლა, ელექტრული სიდიდეების წონასწორობის განტოლებები, მდგომარეობათა ცვლადების მიმართ განტოლებების შედგენა და მათი რიცხვითი მეთოდით ამოხსნა, პროცესების

მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება განზოგადებული დროის ინტერვალში, სხვაობითი განტოლებების მიღება და ამოხსნა წარმოდგენილია სამეცნიერო ნაშრომში[53].

გაერთიანებული ჰიბრიდული პარალელური ელექტრო-ენერგეტიკული სისტემებისათვის მიღებულია დენის მიხედვით გადაცემის ფუნქცია დროის განზოგადებული ინტერვალისათვის; დადგენილია ექვივალენტური პარამეტრები; გამოკვლეულია სისტემის მდგრადობა; აგებულია ამპლიტუდურ-ფაზურ-სიხშირული მახასიათებლები, რომელთა საფუძველზე დასტურდება მუშაობის ნებისმიერ რეჟიმებში წარმოდგენილი გარდამქმნელი სისტემის მდგრადობა[54].

აკუმულატორული ბატარეის, გაერთიანებულ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკულ სისტემასთან პარალელურ რეჟიმში მუშაობისას, დამუხტვა-განმუხტვის პროცესების გამოკვლევა, მართვა და რეგულირება დამუხტვა-განმუხტვის დენებისა და ძაბვების მნიშვნელობების მიხედვით წარმოდგენილია სახელმძღვანელოში[55] და სტატიაში[56].

ნაშრომში წარმოდგენილია ქარის ელექტროდანადგარებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელირება. მოდელირებისათვის გამოყენებულია ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდი. მიღებულია გენერატორის როტორის ბრუნვის კუთხური სიჩქარის გარდამავალი პროცესის მოდელის სტრუქტურული სქემა [57].

ნაშრომში წარმოდგენილია ქარის ასინქრონულ გენერატორში და ნახევარგამტარულ საკომუტაციო მოწყობილობაში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელი [58].

შედეგები და მათი განსჯა

თავი 1. ქარის და მზის ენერჯის ელექტრულ ენერჯიაში გარდაქმნის და გამოყენების ტექნოლოგიების დამუშავება

1.1. ქარის გენერატორების კლასიფიკაცია

ენერჯეტიკაში ეკოლოგიურად უსაფრთხოა მზის, ქარის, ზღვის მიმოქცევის და სხვა ასეთი სახის ენერჯები, რომელთა გამოყენებისას არ ხდება CO₂-ის გამოყოფა და რადიოაქტიური ნივთიერებებით გარემოს გაჭუჭყიანება.

ეკოლოგიურად სუფთა და განახლებადი ენერჯის წყაროს მიეკუთვნება ქარის ენერჯია. ცნობილია, რომ პლანეტაზე ქარის ჯამური სიმძლავრეა 2700 ტერავატი. აქედან 670 ტერავატი სიმძლავრე დედამიწის ზედაპირიდან დაახლოებით 100 მ სიმაღლეზე არსებობს, ხოლო 2000 ტერავატის სიმძლავრე მოდის ატმოსფეროს ზედა ფენაზე დედამიწის ზედაპირიდან დაახლოებით 7-დან 12 კმ-მდე სიმაღლეზე პლანეტის ჩრდილოეთით და სამხრეთით ნახევარსფეროს განედზე. ამ სიმაღლეზე ქარს აქვს სტაბილური პარამეტრები როგორც დღე-ღამის, ასევე წლის განმავლობაში. ქარის საშუალო წლიური სიჩქარე აღწევს 20-30 მ/წმ-ს. ასეთი ამოუწურავი და ეკოლოგიურად სუფთა ენერჯის გამოყენება შესაძლებელია მხოლოდ სპეციალურად დამუშავებული ტექნოლოგიებით, რომელთა საფუძველს უნდა შეადგენდეს აეროსტატიკური მიბმული ბაქნები. ასეთ სიმაღლეზე განთავსებული 100 მგტ დადგმული სიმძლავრის მქონე ქარის ელექტროსადგურები 2050 წლისათვის საჭირო იქნება დაახლოებით 290000 ერთეული. თუ მოთხოვნილი მთელი სიმძლავრის 50%-ს დააკმაყოფილებს ასეთ სიმაღლეზე განთავსებული ქარის ელექტროსადგურები, მაშინ საჭირო იქნება 100 მგტ სიმძლავრის მქონე 145000 ერთეული ასეთი დანადგარის შექმნა დედამიწის ჩრდილოეთი და სამხრეთი ნახევარსფეროს ტერიტორიის ზემოდან 40-დან 70-განედამდე. მათ ტროპოსფერული ქარის ელექტროდანადგარებს უწოდებენ[22].

მიწის ზედაპირიდან 100 მ სიმაღლეზე არსებული ქარის ენერჯის გამოყენებას დიდი ყურადღება ექცევა ისეთ ქვეყნებში, როგორცაა: დანია, აშშ, გერმანია, ინგლისი, ბელგია, ნიდერლანდები, იაპონია, ინდოეთი, უკრაინა, რუსეთი და საქართველო. ექსპერტების შეფასებით 2020 წლისათვის რეალურად უნდა იყოს ათვისებული 45105 მგტ სიმძლავრე, რაც უზრუნველყოფს ზოგადი მოთხოვნილი სიმძლავრის 3,5%-ს. ქარის ელექტროსადგურების მიერ დაკავებული მიწის ფართობი იქნება 5400 კმ².

დღეისათვის ქარის ელექტროსადგურებში, როგორც წესი, გამოიყენება ძირითადად ასინქრონული გენერატორები, ტურბინის ნორმალურ ბრუნთა სიხშირეა 20-30 ბრ/წთ. გენერატორის ამძრავის მუშაობა ხორციელდება რედუქციის კოეფიციენტის მქონე რედუქტორით, რომელიც წარმოადგენს ხმაურის დამატებით წყაროს და ამცირებს მთლიანად სისტემის საიმედოობას. ქარის ელექტროსადგურების პარალელური მუშაობისას ასინქრონული გენერატორების უპირატესობად ითვლება ელექტრომაგნიტური მომენტის, დენის და გენერირებული სიმძლავრის შედარებით მცირე რხევები ქარის სიჩქარის ცვლილებათა პირობებში[23].

საქართველოში ქარის ელექტროსადგურების აშენება პერსპექტიულია სამხრეთ საქართველოს მთიანეთში, კახაბრის ვაკისა და კოლხეთის დაბლობის ცენტრალურ ნაწილში.

ქარის ძრავების (გენერატორების) არსებული სისტემები ქარის ბორბლის მოწყობილობათა სქემებისა და ქარის ნაკადში მისი მდებარეობის მიხედვით იყოფა სამ კლასად.

პირველ კლასში თავს იყრის ისეთი ქარის ძრავები, რომელთაც ქარის ბორბალი განლაგებული აქვთ ვერტიკალურ სიბრტყეში. ამ დროს ბრუნვის სიბრტყე ქარის მართობულია და შესაბამისად ქარის ბორბლის ღერძი ქარის ნაკადის პარალელურია. ასეთი ქარის ძრავებს უწოდებენ ფრთოვანს[23].

ფრთის ბოლო წერტილის წრიული სიჩქარის ფარდობა ქარის სიჩქარესთან წარმოადგენს სწრაფსვლიანობას:

$$Z = \frac{\omega R}{V}; \quad (1)$$

ფრთოვანი ქარის ძრავები ქარის ბორბლის ტიპის და სწრაფსვლიანობის მიხედვით იყოფიან სამ ჯგუფად:

- მრავალ ფრთიანი, ნელსვლიანი, სწრაფმავალი $Z \leq 2$ ქარის ძრავები;
- მცირე ფრთიანი, ნელსვლიანი, მათ შორის ქარის წისქვილი, სწრაფმავალი $Z > 2$ ქარის ძრავები;
- მცირე ფრთიანი, სწრაფმავალი $Z \geq 3$ ქარის ძრავები.

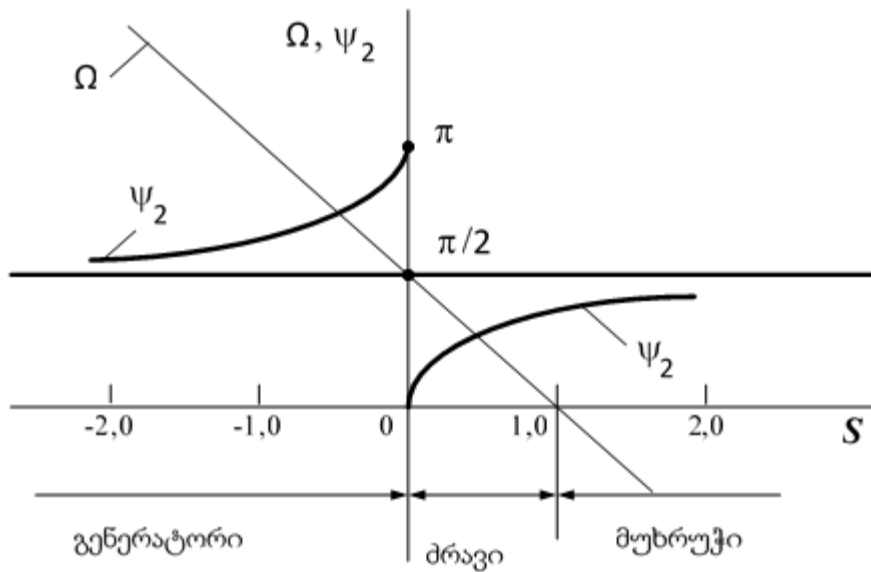
მეორე კლასს განეკუთვნებიან ქარის ბორბლის ბრუნვის ღერძის ვერტიკალური მიმართულებიანი ქარის ძრავების სისტემა.

მესამე კლასს განეკუთვნებიან ქარის ძრავები, რომლებიც მუშაობენ წყლის წისქვილის ბორბლის მუშაობის პრინციპზე. მათ უწოდებენ დოლურ ძრავებს. ასეთი ქარის ძრავებს ბრუნვის ღერძი აქვთ ჰორიზონტალური და პერპენდიკულარულია ქარის მიმართულებისა.

1.2. ასინქრონული გენერატორის მუშაობის რეჟიმები

ასინქრონულ მანქანებში როტორის ბრუნვის სიხშირე არ უდრის სტატორის გრაგნილების მიერ შექმნილი მაგნიტური ველის ბრუნვის სიხშირეს. მათ გააჩნიათ დამზადების სიმარტივე და დიდი საიმედოობა. ასინქრონულ მანქანებში S -სრიალის მნიშვნელობების გათვალისწინებით ანსხვავებენ მათი მუშაობის შემდეგ რეჟიმებს: ძრავურ ($0 < S < 1$); გენერატორულ ($-\infty < S < 0$) და საწინააღმდეგო ჩართვის, ან დამუხრუჭების ($1 < S < +\infty$) [2].

ასინქრონული მანქანის მუშაობის დამახასიათებელი ზოგიერთი სიდიდეების S - სრიალზე დამოკიდებულება აიხსნება ნახ. 1-ით.



ნახ.1. ასინქრონული მანქანის სხვადასხვა რეჟიმებში მუშაობისას ბრუნვის Ω – სიხშირისა და ψ_2 – კუთხის ცვალებადობა

შევთანხმდეთ, რომ ასინქრონული მანქანის სტატორის მბრუნავი მაგნიტური ველის კუთხური სიხშირეა Ω_1 , ხოლო როტორის ბრუნვის კუთხური სიხშირე Ω . ძრავურ რეჟიმში $\Omega < \Omega_1$, სრიალი $S = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1}$ იცვლება 0-დან 1-მდე და როტორის გრაგნილში გამავალი I_2 დენსა და მასში დაინდუქციერებულ E_2 ე.მ.ძალას შორის ძვრის კუთხე ψ_2 -0-დან - $\psi_2 = \arctg\left(\frac{X_2}{R_2}\right)$ მდე. აქ X_2, R_2 - შესაბამისად როტორის ინდუქციური და აქტიური წინაღობებია.

ძრავურ რეჟიმში ასინქრონული მანქანა მოიხმარს ქსელიდან აქტიურ სიმძლავრეს $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1$ და რეაქტიულ სიმძლავრეს $Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1 = m_1 E_1 I_{m\phi} + m_1 I_1^2 x_1$, რომელიც აუცილებელია მანქანის ფანტვის და ძირითადი მაგნიტური ველის შესაქმნელად. აქ m_1 - ფაზათა რიცხვია, φ_1 - კუთხე სტატორის გრაგნილში U_1 - ძაბვასა და I_1 - დენს შორის; $I_{m\phi}$ დენის რეაქტიული მდგენელია; X_1 - სტატორის გრაგნილის ინდუქციური წინაღობაა.

აქტიური სიმძლავრე P_1 - სტატორზე გამოითვლება ფორმულით

$$P_1 = m_1 I_1^2 R_1 + m_1 I_{m0} E_1 + m_1 I_2' E_1 \cos \psi_2 = P_{\text{ელ.1}} + P_{\text{მაგ.1}} + P_{\text{ელ.მაგ.}} \quad (2)$$

სადაც $P_{\text{ელ.1}}$ - სტატორის გრაგნილში ელექტრული დანაკარგებია; $P_{\text{მაგ.1}}$ - სტატორის გულარში მაგნიტური დანაკარგებია; $P_{\text{ელ.მაგ.}}$ - ელექტრომაგნიტური სიმძლავრეა, რომელიც მაგნიტური ველით გადაეცემა სტატორიდან როტორზე.

$P_{\text{ელ.მაგ.}}$ - სიმძლავრეს შეესაბამება მანქანის შენაცვლების სქემაში R_2'/S - წინაღობა, ამიტომ

$$P_{\text{ელ.მაგ.}} = m_1 (I_2')^2 \cdot R_2'/S. \quad (3)$$

აქ I_2', R_2' - შესაბამისად როტორის დენი და აქტიური წინაღობაა, მიყვანილი სტატორზე.

ელექტრომაგნიტური სიმძლავრის ნაწილი იკარგება როტორის გრაგნილის აქტიურ წინაღობაში

$$P_{\text{ელ.2}} = m_1 (I_2')^2 \cdot R_2 = m^2 I_2^2 R_2, \quad (4)$$

ნაწილი კი - გარდაიქმნება როტორზე განვითარებულ მექანიკურ სიმძლავრედ

$$P_{\text{მექ.}} = P_{\text{ელ.მაგ.}} - P_{\text{ელ.2}} = m_1 (I_2') \cdot R_2' (1-S)/S. \quad (5)$$

(4)-(5) გამოსახულებებიდან გამომდინარეობს, რომ:

$$P_{\text{ელ.2}} = S \cdot P_{\text{ელ.მაგ.}}; P_{\text{მექ.}} = (1-S) P_{\text{ელ.მაგ.}} \quad (6)$$

$$P_{\text{ელ.2}} = S \cdot P_{\text{მექ.}} (1-S). \quad (7)$$

(7)-დან გამომდინარეობს, რომ $P_{\text{ელ.2}}$ სიმძლავრის დანაკარგების შემცირებისათვის და მაღალი მარგი ქმედების კოეფიციენტის (მ.ქ.კ) მიღებისათვის აუცილებელია შემცირებული იქნას S - სრიალი. ასინქრონულ ძრავებში ნომინალური დატვირთვებისას სრიალი შეადგენს 0,02-0,05 ($S_{\text{ნომ.}} = 2 \div 5\%$).

თუ ასინქრონული მანქანის როტორს ვაბრუნებთ ქარის ენერგიით სტატორის მზრუნავი ველის მიმართულებით $\Omega > \Omega_1$, მაშინ ასინქრონული

მანქანა გადადის მუშაობის გენერატორულ რეჟიმში და ქსელს გადასცემს აქტიურ სიმძლავრეს.

ამ რეჟიმში $\cos \psi_2 = R'_2 / (SZ'_{2S}) < 0$; $\sin \psi_2 > 0$; $P_{\text{ელ.მაგ.}} < 0$ და $P_{\text{მექ.}} < 0$. ეს

აღნიშნავს იმას, რომ ენერჯის გარდაქმნის მიმართულება საწინააღმდეგოა ძრავულ რეჟიმთან შედარებით.

ასინქრონული გენერატორი ისევე, როგორც ასინქრონული ძრავი მოიხმარს რეაქტიულ სიმძლავრეს და ინდუქციურ დენს. ასინქრონული მანქანის ქსელთან პარალელურად მუშაობისას რეაქტიული სიმძლავრის წყაროდ ითვლება ქსელი. ასინქრონული გენერატორის ავტონომიურად მუშაობისას აუცილებელია იყოს რეაქტიული სიმძლავრის სპეციალური წყარო.

დამუხრუჭების რეჟიმში ასინქრონული მანქანის როტორი გარედან მოდებული მექანიკური ენერჯის მეშვეობით ბრუნავს სტატორის მბრუნავი მაგნიტური ველის ბრუნვის საწინააღმდეგოდ, რის შედეგადაც $\Omega < 0$ და $S > 1$. ეს რეჟიმი პრაქტიკაში გამოიყენება ასინქრონული ძრავების დამუხრუჭებისათვის, აგრეთვე ძრავის ბრუნვის მიმართულების უეცარი შეცვლისათვის. დამუხრუჭების რეჟიმის განსახორციელებლად საკმარისია სამფაზა ძრავის მკვებავი ორი სადენის გადართვა და შესაბამისად მბრუნავი ველის მიმართულების შეცვლა. ამ შემთხვევაში დროის რაღაც შუალედში როტორი ინერჯით განაგრძობს პირვანდელ მიმართულებას, ე.ი. მბრუნავი ველის მიმართულების საწინააღმდეგოდ.

დამუხრუჭების რეჟიმში ასინქრონული მანქანა ქსელიდან იღებს აქტიურ სიმძლავრეს და მანქანის ლილვიდან მექანიკურ სიმძლავრეს. ეს ორივე სიმძლავრეები შთაინთქმება თვით მანქანაში $P_{\text{ელ.2}}$ სიმძლავრის დანაკარგების სახით. ამიტომ ამ რეჟიმში მანქანა სასარგებლო სიმძლავრეს არ აწვითარებს და გახურების მხრივ ეს წარმოადგენს მეტად მძიმე რეჟიმს.

სამფაზა ასინქრონული მანქანა დამუხრუჭებული ფაზური როტორით შეიძლება გამოყენებული იქნას სამფაზა მბრუნე ტრანსფორმატორის (ფაზორეგულატორის), სამფაზა მბრუნე

ავტოტრანსფორმატორის (მაბვის ინდუქციური რეგულატორის) ან ცვლადი ინდუქციურობის ხვიის რანგში.

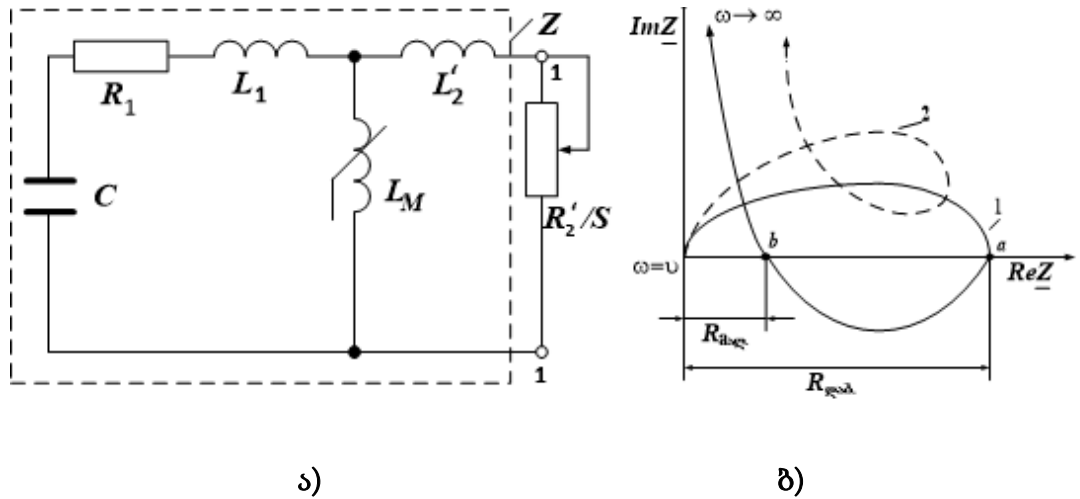
ასინქრონული მანქანის გენერატორულ რეჟიმში მუშაობისას შექმნილია პირობები სტატორის გრაგნილში გაიაროს რეაქტიულმა დენმა, რაც აუცილებელია მანქანის საჰაერო ღრეჩოში მბრუნავი მაგნიტური ველის შესაქმნელად.

რეაქტიული სიმძლავრის წყაროს მქონე სამფაზა ცვლადი დენის ქსელიდან ასინქრონული გენერატორის პარალელური მუშაობისას ქსელში აღმოჩნდება ჩართული სინქრონული გენერატორი, რომელსაც გააჩნია უნარი იმუშაოს წინსწრებითი დენით, ე.ი. მოამარაგოს ასინქრონული მანქანა (ჩამორჩენითი) რეაქტიული დენით. ასინქრონული გენერატორის ავტონომიური მუშაობის შემთხვევაში მის მომჭერებთან რთავენ კონდენსატორებს ვარსკვლავად ან სამკუთხედად, რაც განსაზღვრული პირობების არსებობისას უზრუნველყოფს გენერატორის თვითაღზუნებას. თვითაღზუნებადი ასინქრონული გენერატორი თავისთავად წარმოადგენს ჩვეულებრივ ავტორხევით სისტემას, რომლის მუშაობა შესაძლებელია აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეთა ბალანსის პირობების შესრულებისას. ამისათვის აუცილებელია, რომ რხევით კონტურში შესული ენერგია ტოლი იყოს ამ კონტურში დახარჯული ენერგიისა და ენერგიის შესვლა მოხდეს ერთდროულად მის დახარჯვასთან ერთად.

ასეთ სისტემებში დამყარებული ამპლიტუდიანი ავტორხევების მიღების განმსაზღვრელი მეტად საჭირო ფაქტორად გვევლინება რხევითი კონტურის შემადგენელი თუნდაც ერთი ელემენტის მახასიათებლის არაწრფივობა.

განვიხილოთ ნებისმიერი f_1 - სიხშირის ავტორხევების სისტემაში აღზუნების პირობები, რომლითაც მანქანაში აღიძვრება $\Omega_1 = 2\pi f_1/P$ კუთხური სიხშირის მბრუნავი მაგნიტური ველი. ასინქრონული გენერატორის თითოეული ფაზისათვის შემავალი მომჭერებთან მიერთებული C კონდენსატორებით სამართლიანია შენაცვლების T -ს

მსგავსი სქემა (ნახ. 2, ა). ამ სქემაში რხევით კონტურში შეტანილი ენერგია ხასიათდება 1-1 მომჭერებთან მიერთებული, სრიალზე დამოკიდებული R'_2/S წინალობით. ეს ენერგია მიეწოდება რხევით კონტურს მხოლოდ $S < 0$ - ის დროს და სისტემაში ავტორხევები შეიძლება აღიძვრას მხოლოდ $\Omega_1 < \Omega$ - ის დროს.



ნახ. 2. ასინქრონული გენერატორის შენაცვლების T -ს მაგვარი სქემა (ა) და $\underline{Z}(j\omega)$ წინალობის ჰოდოგრაფი ω -ს ნულიდან უსასრულობამდე ცვლილებისას (ბ)

რხევების აღძვრისათვის აუცილებელია, რომ სისტემა იმყოფებოდეს რეზონანსში და 1-1 ორპოლუსას შესავალი წინალობა რეზონანსულ სიხშირზე წარმოადგენდეს სუფთა აქტიურ წინალობას. რეზონანსული სიხშირის განსაზღვრისათვის ვიპოვოთ 1-1 ორპოლუსას შესავალი წინალობა:

$$\underline{Z}_{შეს} = j\omega_1 L'_2 + \frac{j\omega_1 L_M [R_1 + j\omega_1 L_1 + 1/(j\omega_1 C)]}{R_1 + j\omega_1 (L_1 + L_M) + 1/(j\omega_1 C)}. \quad (8)$$

გენერატორის თვითაღზნების პირობას შეესაბამება $\underline{Z}_{შეს}$ - წინალობის წარმოსახვითი ნაწილის ნულთან ტოლობა:

$$I_m(\underline{Z}_{შეს}) = 0. \quad (9)$$

ნახ. 2, ბ-ზე აგებულია $Z_{შეს}(j\omega)$ -ის ჰოდოგრაფი f_1 – სიხშირის 0-დან ∞ – მდე ცვლილებისას ორი შემთხვევისათვის: 1 - სისტემაში რეზონანსის არსებობისას და 2 - რეზონანსის არ არსებობისას.

(8) გამოსახულებიდან გამომდინარეობს, რომ (9) პირობა სრულდება მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ ალგუნების კონდენსატორების ტევადობის მნიშვნელობა იმყოფება განსაზღვრულ დიაპაზონში

$$C_{ლაბ.} < C < C_{მაღ.} \quad (10)$$

ამ შემთხვევაში ჰოდოგრაფი კვეთს ნამდვილ ღერძს ორ წერტილში კოორდინატებით $Z_{შეს} = R_{ლაბ.}$ და $Z_{შეს} = R_{მაღ.}$; $f_{ლაბ.}$ და $f_{მაღ.}$ სიხშირეებისას.

სისტემაში აქტიური სიმძლავრის ბალანსის პირობის შესრულებისათვის აუცილებელია, რომ $R_{ღ} Z_{შეს} = -R_2' / S$. ეს პირობა მიუთითებს უარყოფითი წინალობის გამოვლენის ეფექტზე, რაც ახასიათებს ნებისმიერ ავტორხევით სისტემას. ეს წინალობა იძლევა შესაძლებლობას განისაზღვროს გენერატორის თვითაღზუნების ზედა და ქვედა სიხშირეებისას სრიალის მნიშვნელობები:

$$S_{jგ} = -R_2' / R_{jგ}, \quad S_{ზედ} = -R_2' / R_{ზედ} \quad (11)$$

ნაკოვნი ω_1 და S - მნიშვნელობებისათვის როტორის კრიტიკული კუთხური სიჩქარე განისაზღვრება გამოსახულებიდან

$$\Omega = \Omega_1 (1 - S) = 2\pi f_1 (1 - S) / P. \quad (12)$$

რხევების აღძვრის მიზეზად შეიძლება იყოს გარეგანი სიგნალები ან კონტურის პარამეტრების ფლუკტუაცია. სასარგებლოდ შეიძლება ჩაითვალოს როტორის ნარჩენი დამაგნიტებულებაც, მაგრამ მისი არსებობა არ არის აუცილებელი ასინქრონული გენერატორის თვითაღზუნებისათვის.

ასინქრონული გენერატორის ალგუნებისათვის აუცილებელ სერიულად წარმოებად კონდენსატორებს აქვთ დიდი გაზარტული ზომები და მასა, რაც ზღუდავს ასეთი გენერატორების გამოყენებას. ასინქრონული გენერატორების უარყოფითი მხარეა აგრეთვე მათი გამომავალი ძაბვის რეგულირების სირთულე.

ასეთი უარყოფითი მხარეებისაგან მეტწილად თავისუფალია ინვერტორული აღზნებიანი ასინქრონული გენერატორები, რომლებსაც უწოდებენ აგრეთვე ასინქრონულ ვენტილურ გენერატორებს. ანსხვავებენ: 1) ასინქრონული გენერატორები ძაბვის ინვერტორის ან დენის ინვერტორის გავლით მუდმივი დენის აღზნებით; 2) ასინქრონული გენერატორები თვით აღზნებით ძაბვის ინვერტორების ან დენის ინვერტორების გამოყენებით.

პირველ შემთხვევაში ასინქრონული მანქანის აღზნების პროცესი წარმოებს მუდმივი დენის ქსელიდან, ხოლო ე.მ.ძალის სიხშირე განისაზღვრება მართვადი ტირისტორების კომუტაციის სიხშირით. ამ დროს აღზნების პროცესი პრინციპში ანალოგიურია სამფაზა ცვლადი დენის ქსელიდან აღზნების პროცესისა.

მეორე შემთხვევაში გენერატორის აღზნება წარმოებს ძაბვის ინვერტორის შესავალზე კონდენსატორსა და დენის ინვერტორის მაკომუტირებელ კონდენსატორსა და გენერატორის ფაზებს შორის რეაქტიული ენერგიების გაცვლით. ამ დროს გენერატორის ინვერტორული აღზნების პროცესი პრინციპში ანალოგიურია ზემოთ განხილული ტევადური თვითაღზნების პროცესისა. ძაბვის ცვლილების და სიხშირის დიაპაზონი დამოკიდებულია მანქანის მაგნიტურ მახასიათებლებზე.

ძაბვის ინვერტორით აღზნებადი ვენტილური ასინქრონული გენერატორი აღიზნება მუდმივი დენის წყაროთი. თუ ეს წყარო არ არსებობს, მაშინ გენერატორი იმყოფება თვითაღზნების რეჟიმში ინვერტორის შესავალზე ჩართული ფილტრის კონდენსატორისაგან.

უნდა აღინიშნოს, რომ ასინქრონული ვენტილური გენერატორები პოულობენ ფართო გამოყენებას ელექტრომომარაგების ავტონომიურ სისტემებში მუდმივი დენის გენერატორების და სტაბილური სიხშირის ცვლადი დენის გენერატორების რანგში. რკინიგზის ტრანსპორტში ასეთი გენერატორები გამოიყენებიან რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმის რეალიზაციისათვის ასინქრონული რხევის ძრავებისათვის. ამ შემთხვევაში

მუდმივი დენის შუალედური რგოლის მართვადი გამმართველი გადადის ქსელის მიმყოლი ერთფაზა ინვერტორის რეჟიმში.

1.3. ქარის გენერატორის მომჭერებზე ძაბვების მყისა მნიშვნელობების განსაზღვრა

ასინქრონული გენერატორის როტორის ლილვზე აქტიური სიმძლავრე რაიმე T -ერთეული დროის განმავლობაში გამოითვლება ფორმულით

$$P = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{T} \cdot C_x \cdot \rho S (V_{\text{ქარ.}} - U_{\text{ფრო.}})^2 \cdot U_{\text{ფრო.}} \quad (13)$$

სადაც: C_x - ფრთის საქარე წინაღობის ჰაეროდინამიკური კოეფიციენტი; $V_{\text{ქარ.}}$ - ქარის საშუალო სიჩქარე; $U_{\text{ფრო.}}$ - ფრთის წრიული მოძრაობის სიჩქარე; ρ - ქარის სიმკვრივე; S - ფრთის ზედაპირის ფართობი;

მეორეს მხრივ, ქარის გენერატორის მიერ ცვლადი დენის ქსელში გაცემული აქტიური სიმძლავრე გამოითვლება ფორმულით

$$P = \frac{U^I U^{II}}{X_\Sigma} \sin \delta, \quad (14)$$

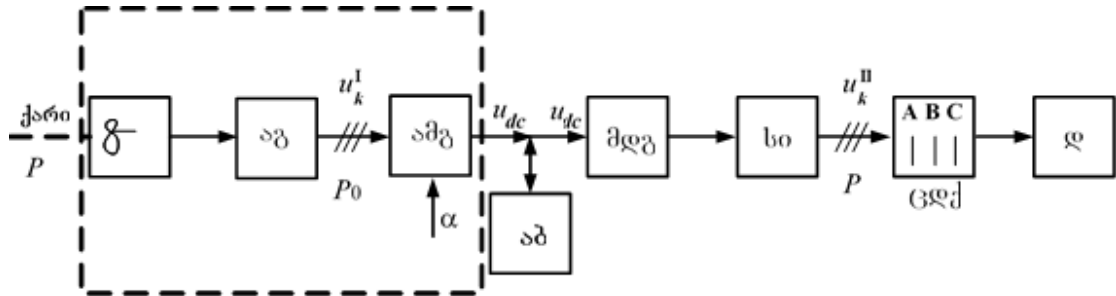
სადაც U^I, U^{II} - შესაბამისად ქარის სამფაზა გენერატორის მომჭერებზე ძაბვის და ცვლადი დენის ქსელის შესასვლელში (სამფაზა ძაბვის ინვერტორის გამოსავალზე) ძაბვათა მოქმედი მნიშვნელობებია, $X_\Sigma = -x_{C2} + x_{L1}$ - ექვივალენტური წრედის ჯამური რეაქტიული წინაღობა; x_{C2}, x_{L1} - შესაბამისად სისტემაში ჩართული მუდმივი დენის გარდამქმნელის სქემაში არსებული C_2 -ტევადობისა და L_1 - ინდუქციურობის რეაქტიული წინაღობებია; δ - ძვრის კუთხეა U^I და U^{II} ძაბვების ვექტორებს შორის.

(14)-ით გამოსახული სიმძლავრე დამყარებულ პროცესში ყოველთვის მცირეა სიმძლავრის იდეალურ ზღვარზე.

(13), (14)-დან გამომდინარეობს, რომ:

$$U_m^I = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{X_\Sigma C_x \rho S (V_{\text{ქარ.}} - U_{\text{ფრო.}})^2 \cdot U_{\text{ფრო.}}}{U_m^{II} \sin \delta}, \quad (15)$$

სადაც U_m^I, U_m^{II} - შესაბამისად, ძაბვების ამპლიტუდური მნიშვნელობებია.



ნახ.3. ქარის ელექტროსადგურისა და მიმღები ცვლადი დენის ქსელის ამსახველი სტრუქტურული სქემა

ნახ.3-ზე ნაჩვენები ფაზური ძაბვების მყისა მნიშვნელობებისათვის ვღებულობთ შემდეგ გამოსახულებებს:

$$u_k^I = U_m^I \sin \left[\omega t - (k-1) \frac{2\pi}{3} + \delta \right]. \quad (16)$$

როგორც (15), (16) გამოსახულებიდან ჩანს ქარის გენერატორის მომჭერებზე ფაზური ძაბვების გამოსახულებებში ფუნქციონირებს ქარის ბორბალზე მოქმედი პარამეტრები: $C_x, \rho, S, V_{ქარ.}, U_{ფრო.}$ და ცვლადი დენის ქსელის ძაბვის მოქმედი მნიშვნელობა დამყარებული რეჟიმებისათვის.

სამფაზა ბოგირული სქემით (ლარიონოვის სქემით) არსებული გამმართველის გამოსავალზე გამართული ძაბვის საშუალო U_{dc} მნიშვნელობა გამოისახება ფორმულით:

$$U_{dc} = \frac{6\sqrt{2} U_b^I \sin \frac{\pi}{6}}{\pi} = 1,35 \cdot U_b^I = 2,34U^I, \quad (17)$$

სადაც U_b^I არის u_k^I ფაზური ძაბვების შესაბამისი ხაზური ძაბვის მოქმედი მნიშვნელობა.

გამართვის პროცესში ჰარმონიკები ბლოკირდება გამმართველის გამოსავალზე პარალელურად მიერთებული კონდენსატორის ტევადობით.

(17)-ში U^I სიდიდისთვის გვაქვს

$$U^I = \frac{U_m^I}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{X_\Sigma C_X \rho S (V_{\text{ქარ.}} - U_{\text{ფრო.}})^2 \cdot U_{\text{ფრო.}}}{U_m^{II} \sin \delta} \quad (18)$$

საბოლოოდ ნახ. 3-ზე ნაჩვენები U_{dc} დაბვისთვის ვღებულობთ:

$$U_{dc} = 2,34U^I = 0,83 \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{X_\Sigma C_X \rho S (V_{\text{ქარ.}} - U_{\text{ფრო.}})^2 \cdot U_{\text{ფრო.}}}{U_m^{II} \sin \delta} \quad (19)$$

1.4. მზის ენერჯის გარდაქმნის პროცესების ფიზიკური საფუძვლები

მზის ფოტოელექტრულ სადგურში - ფეს-ში მუშაობის პრინციპი დამყარებულია ნახევარგამტარში ფოტოეფექტის მოვლენაზე. ფოტოეფექტის არსი მდგომარეობს იმაში, რომ სინათლის ფოტონებს შეუძლიათ ამოაგდონ სხეულის ზედაპირიდან (გარე ფოტოეფექტი) ან ნახევარგამტარის კრისტალური მესერიდან (შიდა ფოტოეფექტი) ელექტრონები.

ფრანგმა მეცნიერმა ედმონდ ბეკერელმა 1839 წელს პირველმა აღმოაჩინა ფოტოეფექტი, ხოლო ამერიკელმა შარ ედგარ ფრისტმა 1883 წელს სელენის ბაზაზე შექმნა პირველი მზის ელემენტი.

1954 წლის 25 აპრილს კომპანია Bell Laboratories შექმნა პირველი მზის ელემენტი. კაჟბადის საფუძველზე შექმნილი ფოტოელემენტი პირდაპირ გარდაქმნიდა სინათლის ენერჯიას მუდმივ ელექტრულ დენში. 1958 წლის 17 მარტს აშშ-ში გაუშვეს პირველი თანამგზავრი მზის ბატარეებით.

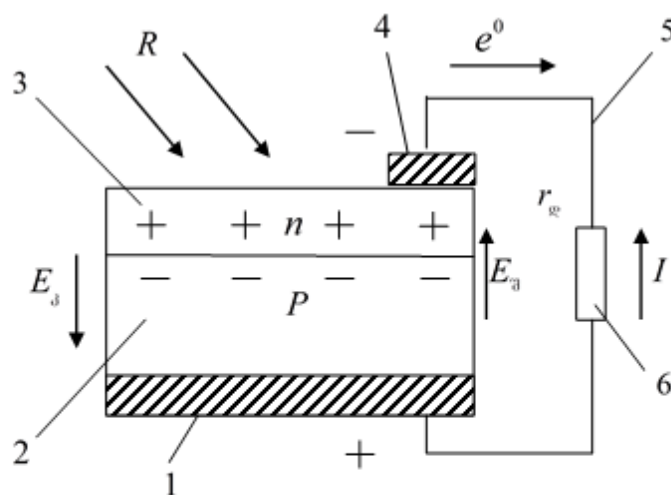
ამჟამად მზის ბატარეები გამოიყენება:

- პორტატულ ელექტრონიკაში.
- ელექტრომობილებში.
- შენობების ელექტრომომარაგებაში.
- კოსმოსში ელექტროენერჯის მისაღებად.

ისინი მუშაობენ დიდხანს რაიმე დანახარჯების გარეშე. არიან ეკოლოგიურად სუფთა. ფოტოელემენტები ძირითადად გარდაქმნიან 9-24% ენერჯიას.

2013 წელს კომპანია Sharp-მა შექმნა სამფენოვანი ფოტოელემენტი გალიუმის არსენიდის და ინდიუმის ბაზაზე, რომლის მქკ-მ შეადგინა 44,4%.

2014 წელს ესპანელმა მეცნიერებმა შექმნეს კაჟბადის ფოტოელემენტი, რომელმაც შეძლო მზის ინფრაწითელი სხივების გარდაქმნა. პერსპექტიულ მიმართულებად ითვლება ფოტოელემენტების შექმნა ნანოანტენების საფუძველზე. ანტენის ზომებია 200-300 ნმ, ხოლო სიხშირე 500 ტკც. ასეთი ფოტოელემენტის მქკ შეიძლება გაიზარდოს 85%- მდე.



ნახ. 4. ფოტოელემენტის პრინციპული სქემა: ელექტროდები (1,4), p და n ტიპის ნახევარგამტარის ფენა (2,3), გამტარი (5), დატვირთვის წინაღობა (6)

ფოტოელემენტი, იგივე მზის ელემენტი წარმოადგენს მოწყობილობას ნახევარგამტარულ გადასასვლელებზე, რომელშიც მზის ენერგიით დასხივებისას ხდება მუხტების გადანაწილება სივრცეში და წარმოიქმნება ელექტრომომოძრავებელი ძალა (ემძ). ფოტოელემენტის პრინციპული სქემა ნაჩვენებია ნახ. 4-ზე [12].

მზის ელემენტის (2) და (3) ფენებში სინათლის სხივის მოხვედრის შედეგად წარმოიქმნებიან მუხტის არამირითადი მატარებლები, რომელნიც ნიშნით საწინააღმდეგოა ძირითადი მატარებლებისადმი p და n ფენაში. წარმოქმნილი ელექტროსტატიკური დაძაბულობის გავლენით ორივე ნიშნის მუხტის თავისუფალი მატარებლები დიფუნდირებენ (2) და (3)

ფენის შეხების საზღვარზე და ქმნიან $p-n$ გადასასვლელს, E_3 – ელექტრული ველის დაძაბულობას, პოტენციალთა სხვაობით $U_3 = SE$.

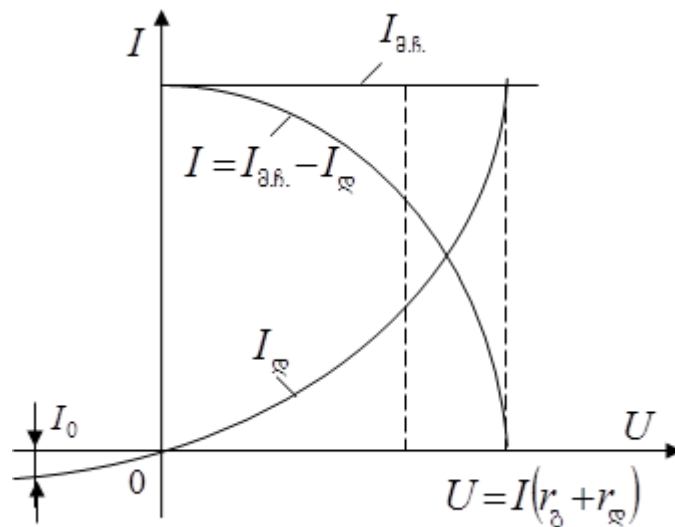
(სადაც S -სასაზღვრო ფენის სიგანეა) და პოტენციური ენერგეტიკული ბარიერით $\Phi_3 = eU_3$. კონტაქტური პოტენციალთა სხვაობა გამოითვლება ფორმულით:

$$U_3 = \frac{KT}{e^0} \ln\left(\frac{P_p}{P_n}\right) = \frac{KT}{e^0} \ln\left(\frac{n_p}{n_n}\right) \quad (20)$$

სადაც K - ბოლცმანის მუდმივაა; e^0 ელექტრონის მუხტია; P_p და P_n აგრეთვე n_p და n_n ხვრელების და ელექტრონების კონცენტრაციებია შესაბამის ფენაში. ამასთან n -არე ლეზულობს უარყოფით, ხოლო P -არე დადებით მუხტს. ეს ექვივალენტურია $P-n$ გადასასვლელისთვის E_3 -ს შემხვედრი ელექტრული E_3 ველის მოდებისა. (1) და (4) ელექტროდებზე წარმოიქმნება მზის ელემენტის ე.წ. უქმი სვლის ძაბვა – ემძ. თუ მზის ელემენტს ეცემა ფოტონების ნაკადი (სინათლის გამოსხივება), მაშინ ფოტონები კრისტალის ბმულ-ვალენტურ ელექტრონებს ამოაგდებენ (ელექტრონი ტოვებს თავის ენერგეტიკულ დონეს) და წარმოიქმნება კრისტალში “ხვრელი”; $P-n$ გადასასვლელი ანცალკევეებს ელექტრონ-ხვრელის წყვილს და იზრდება ძაბვა (1) და (4) ელექტროდებზე. ამის შემდეგ თუ მზის ელემენტის გარე წრედში ჩავრთავთ დატვირთვას $r_{\text{დ}}$ წინააღობით, მაშინ ამ წრედში გაივლის დენი I , რომლის მიმართულება ელექტრონების მოძრაობის შემხვედრია. (ხვრელი გადაადგილდება მხოლოდ ნახევარგამტარში). რაც მეტია მზის გამოსხივების ინტენსიობა, მით მეტი დენი გადის გარე წრედში. მაგრამ მისი მნიშვნელობა არ შეიძლება იყოს მზის ელემენტის რაღაც ზღვრულ დენზე მეტი, რომელიც განისაზღვრება იმით, რომ ყველა ვალენტური ელექტრონი გადასულია თავისუფალ მდგომარეობაში.

1.5. მზის ფოტოელექტრული ელემენტის ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი

მზის ელემენტის დენის დამოკიდებულებას ძაბვაზე, მოცემული მზის გამოსხივების სიმძლავრის დროს, ეწოდება მზის ელემენტის ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი (ვამ). ტიპური ვამ-ი წარმოდგენილია ნახ. 5-ზე.

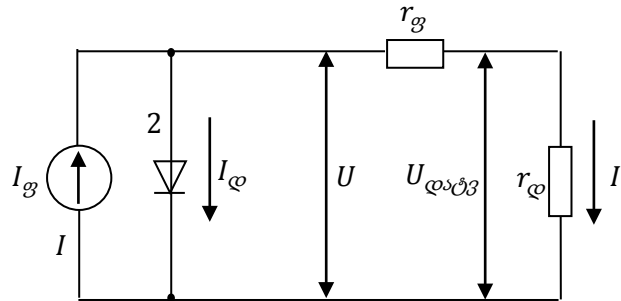


ნახ. 5. მზის ელემენტის საწყისი ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები. დენის წყარო $I_{ფ}(U)$, $R = \text{const}$ დროს

ვამ-დან შეიძლება გამოვყოთ ორი მახასიათებელი წერტილი: უქმი სვლის ძაბვა, როცა $r_{ფ} \rightarrow \infty$; $U_{ფ}^{\text{მაქს}} = U_{\text{უ.ს.}}$; $I = 0$ და მოკლე ჩართვის დენი, როცა $r_{გ} \rightarrow \infty$; $I = I^{\text{მაქს}} = I_{\text{მ.წ.}}$; $U_{ფ} = 0$.

ცხადია, მზის ელემენტის სასარგებლო სიმძლავრე ტოლია $U_{ფ}$ და I -ს ნამრავლისა, $N = U_{ფ} I$. მზის ელემენტების და მოდულების ტექნიკური მახასიათებლები (შედარების მიზნით) მოყვანილია: 1000 ვტ/მ² სინათლის ნაკადის ინტენსივობის; $t = 25^{\circ}\text{C}$ გარემოს ტემპერატურის; 1,5-ატმოსფერული ოპტიკური მასის – AM 1,5 პირობებისათვის.

მზის ელემენტის ენერგეტიკული მახასიათებლების თავისებურებების ანალიზისათვის, მისი ექვივალენტური სქემა შეიძლება ასე წარმოვადგინოთ (ნახ. 6).



ნახ. 6. მზის ელემენტის ექვივალენტური ელექტროსქემა

სადაც მზის ელემენტი პირობითად წარმოდგენილია დენის წყაროს სახით (1), რომელთანაც პარალელურად ჩართულია დიოდი (2), შიგა წინაღობა r_g და მიმდევრობით დატვირთვა $r_დ$ [16].

მზის გამოსხივების ურთიერთქმედების შედეგად, დენის წყარო წარმოშობს დენს I_g , რომელიც ტოლია, I_0 დიოდის (ანუ უკუდენის) და დატვირთვის დენის ჯამის.

$$I = I_g - I_0 = I_g - I_0 \left(e^{\frac{\alpha U}{A}} - 1 \right) \quad (21)$$

სადაც I_0 გაჯერების დენია, რომელიც ტოლია მზის ელემენტის უკუდენის მაქსიმალური მნიშვნელობის (სილიციუმისათვის $I_0 = 10^{-7}$ ამპ/მ²);

$A \geq 1$ – კოეფიციენტი, რომელიც განისაზღვრება მზის ელემენტის მიღების ტექნოლოგიური პროცესით; α -პარამეტრი განისაზღვრება ფორმულით

$$\alpha = \frac{e^0}{KT}, \quad (22)$$

სადაც e^0 – ელექტრონის მუხტია; K – ბოლცმანის მუდმივა; T – ტემპერატურა კელვინებში.

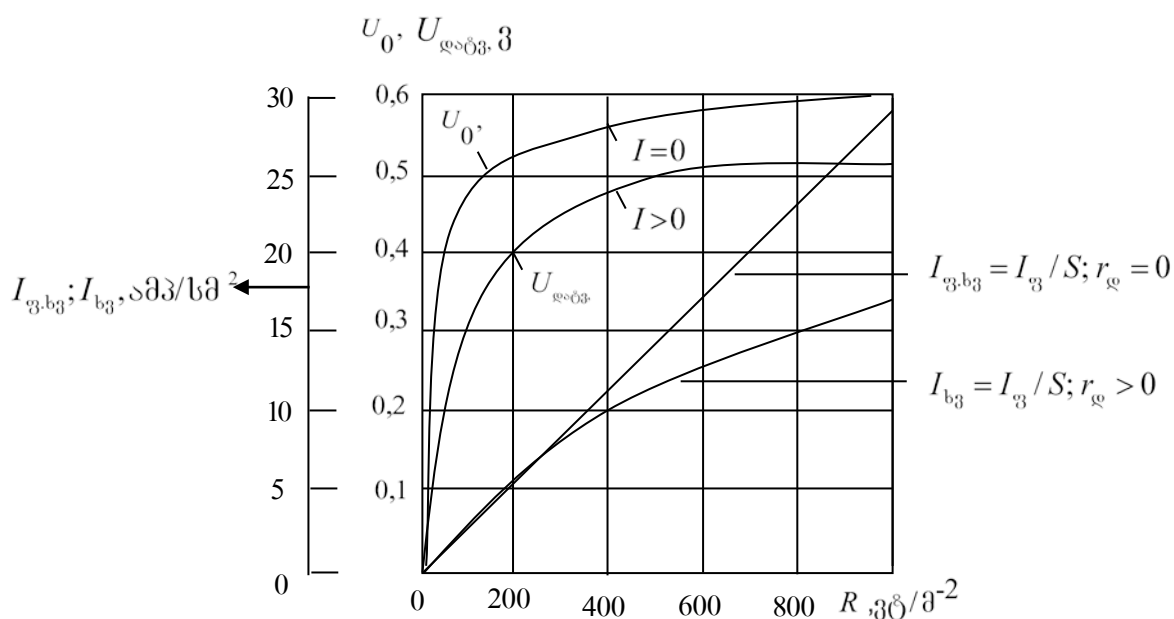
დატვირთვაზე ძაბვა განისაზღვრება ფორმულით

$$U_{\text{ღატკ}} = U - Ir_{\text{ფ}} = \frac{A}{\alpha} \left(\frac{I_{\text{ფ}} - I}{I_0} + 1 \right) - Ir_{\text{ფ}}. \quad (23)$$

მზის გამოსხივების ინტენსივობასთან დამოკიდებულებით მზის ელემენტის ძირითადი ენერგეტიკული მახასიათებლები შეგვიძლია ასე გამოვსახოთ:

$$U_o = U_o(R), \quad U_{\text{ღატკ}} = U_{\text{ღატკ}}(R),$$

გრაფიკულად ის გამოსახულია ნახაზზე (ნახ.7). ამავე ნახაზზეა აგრეთვე გამოსახული ხვედრითი მუშა დენის და ხვედრითი ფოტოდენის ცვლილების დიაგრამები.



ნახ.7. მზის ელემენტის მახასიათებლები

უქმი სვლის $U_0 = U_0(R)$, როცა $I = 0, T = \text{const}$;

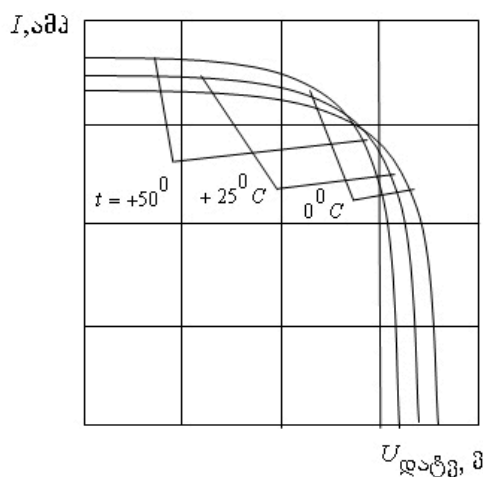
დატვირთვის $U_{\text{ღ}} = U_{\text{ღ}}(R)$, $I = \text{const}$;

ხვედრითი მუშა დენის $-I_{\text{ბგ}} = I_{\text{ბგ}}(R)$ როცა $r_{\text{ღ}} = 0$;

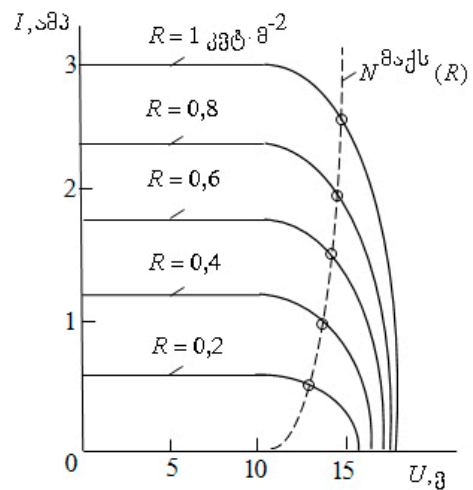
ხვედრითი ფოტოდენის $-I_{\text{ფბგ}} = I_{\text{ფბგ}}(R)$ როცა $r_{\text{ღ}} > 0$.

სტანდარტული მზის ელემენტი თავისი ზომებით შედარებით მცირეა (1-2 დმ²) ამიტომ მისი სიმძლავრე არაა დიდი (1,5-3 ვატი). დიდი სიმძლავრეების მისაღებად მათ აერთებენ მიმდევრობით და პარალელურად. ასე შეერთებული მზის ელემენტების ერთობლიობას მზის მოდული ეწოდება. უფრო დიდი სიმძლავრეების მისაღებად მზის მოდულს აერთებენ მიმდევრობით (მაზვის გაზრდის მიზნით) და პარალელურად (დენის გაზრდის მიზნით).

მზის ელემენტის მახასიათებლები ანალოგიურია მზის მოდულის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლების. მზის მოდულის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები ტემპერატურის და მზის გამოსხივების ინტენსივობის სხვადასხვა მნიშვნელობის პირობებში მოცემულია ნახ.8, ნახ.9);



ნახ.8. მზის მოდულის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები ტემპერატურის სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს

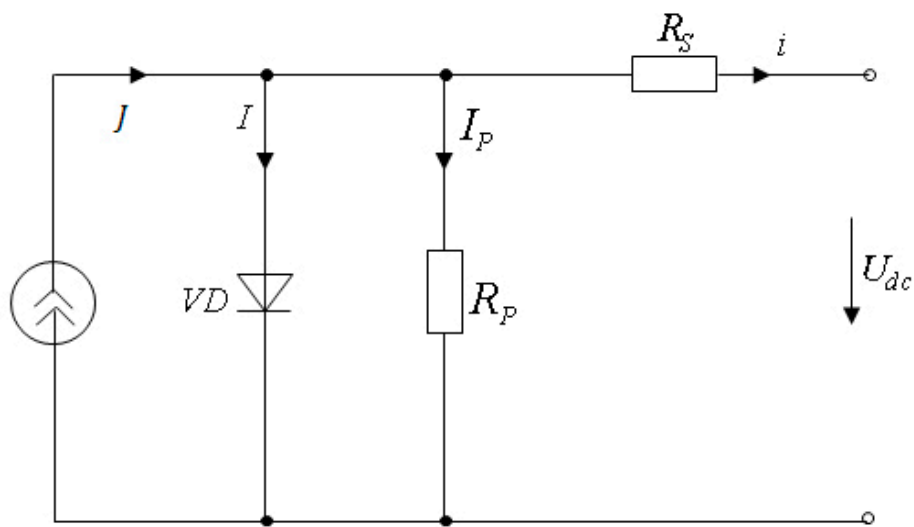


ნახ.9. მზის მოდულის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები მზის გამოსხივების სხვადასხვა ინტენსივობის დროს

მზის ელემენტები ძირითადად მზადდება მიკროკრისტალური კაჟბადის საფუძველზე. კაჟბადის P-ტიპის ფენიდან მცირე სიღრმეზე ფორმირებულია P-n გადასასვლელი თხელი ლითონური კონტაქტით. მზის ელემენტის ელექტრული ენერჯის წყაროს რანგში გამოყენებისას მის გამოსასვლელზე

უნდა მიუერთდეს დატვირთვის აქტიური წინაღობა R_{φ} რომელშიც გაივლის დატვირთვის დენი.

ვიპოვოთ განათებული $P-n$ გადასასვლელის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის განზოგადებული გამოსახულება. ამისათვის დავუშვათ, რომ ამ $P-n$ გადასვლაზე მიერთებულია კვების წყარო ვარირებული ძაბვით. წანაცვლების დადებითი ძაბვისას I_{φ} ფოტოდენი გამოირიცხება $P-n$ გადასვლის „სიბნელის“ დენისაგან, ხოლო უარყოფითი ძაბვისას I_{φ} ფოტოდენი მიემატება „სიბნელის“ დენს.



ნახ.10. მზის ელემენტის შენაცვლების ელექტრული სქემა

მზის ელემენტის შენაცვლების სქემაში (ნახ.10) გამომავალ მახასიათებელზე სხვადასხვა პირობების გავლენის გამოკვლევამ მიგვიყვანა ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის განტოლებაში სამი დამატებითი A, R_s და R_p პარამეტრების ჩართვაზე. დატვირთვაში დენის მიმართულება ყოველთვის ემთხვევა I დენის მიმართულებას; ხოლო თვით დატვირთვის დენი i ტოლია $P-n$ გადასასვლელის გავლით რეზულტირებული დენისა[15].

$$i = J - I \left\{ \exp \left[\frac{e(U_{dc} + iR_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{U_{dc}}{R_p}, \quad (24)$$

სადაც A დიოდური კოეფიციენტი და დებულობს მნიშვნელობას 1-დან 5-მდე; R_s -მზის ელემენტის მიმდევრობითი წინააღობაა; R_p -მზის ელემენტის

მაშუნტირებელი წინაღობა; K -ბოლცმანის კოეფიციენტი; T -აბსოლუტური ტემპერატურა; e -ელექტრონის მუხტი; i - მზის ელემენტის გამომავალი დენი; U_{dc} - მზის ელემენტის გამომავალი ძაბვა; $J - P - n$ გადასასვლელზე გამავალი ფოტოდენი; I - გაჯერების უკუდენი.

(24) განტოლებაში ჯამი $U_{dc} + iR_s$ წარმოადგენს დიოდურ U_d ძაბვას, რომელიც ნიშნავს თვით მზის ელემენტზე ძაბვის ვარდნას. თუ დენის მიმართულება საწინააღმდეგოა, მაშინ ჯამი $U_d = U_{dc} - iR_s$.

მზის ელემენტის ყველა პარამეტრი იცვლება ტემპერატურის, განათებულობის ინტენსიურობისა და რადიაციული დასხივების ხარისხის ცვალებადობასთან ერთად. ამის გამო ძნელია გაიზომოს ყველა დიაპაზონში პარამეტრები I, A, R_s, R_p

(24)-დან განვსაზღვროთ U_{dc} :

$$U_{dc} = R_p [J - I \{ \exp[K_0(U_{dc} + iR_s)] - 1 \} - i] \quad (25)$$

სადაც

$$K_0 = \frac{e}{AKT} \quad (26)$$

(25)-დან უქმი სვლის ($i = 0$) და მოკლე შერთვის ($U_{dc} = 0$) რეჟიმებისათვის გვაქვს განტოლებათა შემდეგი სისტემა:

$$\left. \begin{aligned} U_{dc_{უქმ}} &= R_p [J + I - I \cdot \exp(K_0 U_{dc_{უქმ}})] \\ i_{აშ} &= J + I - I \cdot \exp(K_0 i_{აშ} \cdot R_s) \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

(27) განტოლებათა სისტემის ამოხსნა I და J -ს მიმართ გვაძლევს:

$$I = \frac{c}{R_p} U_{dc_{უქმ}}; \quad J = \frac{1+cb}{R_p} U_{dc_{უქმ}}; \quad J = \left(b + \frac{1}{c}\right) I \quad (28)$$

სადაც:

$$b = \exp(K_0 U_{dc_{უქმ}}) - 1; \quad c = \frac{1 - \frac{R_p i_{აშ}}{U_{dc_{უქმ}}}}{\exp(K_0 i_{აშ} R_s) - \exp(K_0 U_{dc_{უქმ}})} \quad (29)$$

(28) გამოსახულებები ჩავსვათ (25)-ში, მივიღებთ მზის ელემენტის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის განტოლებას ფარდობით ერთეულებში[17]:

$$U_{dc}^* + a \cdot i^* = b' - c \cdot \exp[d(U_{dc}^* + i^*)], \quad (30)$$

სადაც:

$$a = \frac{R_p}{R_s}, \quad d = K_0 U_{dc\text{უქმ}}, \quad b' = 1 + c(1 + b),$$

$$i^* = \frac{i}{\frac{U_{dc\text{უქმ}}}{R_s}}, \quad U_{dc}^* = \frac{U_{dc}}{U_{dc\text{უქმ}}}, \quad (31)$$

(30) განტოლების მარჯვენა მხარის მეორე წევრი დავშალოთ ტეილორის მწკრივებად და გავითვალისწინოთ დაშლის პირველი სამი წევრი. შედეგად მივიღებთ:

$$U_{dc}^* \left(1 + cd + \frac{1}{2} cd^2 U_{dc}^* + cd^2 i^*\right) = b' - c - (a + cd)i^* - \frac{1}{2} cd^2 (i^*)^2 \quad (32)$$

დენის $0 < i^* < i_{\text{მ.შ}}^*$ ინტერვალისათვის (32) განტოლების ამოხსნა გვაძლევს $U_{dc}^* = f(i^*)$ ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის გამოსახულებას[18]:

$$U_{dc}^* = \frac{1}{cd^2} \left(-[1 + cd + cd^2 i^*] \pm \left[[1 + cd(1 + di^*)]^2 + 2cd^2 \left[b' - c - (a + cd)i^* - \frac{1}{2} cd^2 (i^*)^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}} \right) \quad (33)$$

მზის ელემენტის სიმძლავრისთვის გვაქვს:

$$P^* = U_{dc}^* \cdot i^* = \frac{1}{cd^2} \left(-i^* [1 + cd(1 + di^*)] \pm i^* \left[[1 + cd + cd^2 i^*]^2 + 2cd^2 \left[b' - c - (a + cd)i^* - \frac{1}{2} cd^2 (i^*)^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}} \right) \quad (34)$$

(34) გამოსახულებაში თუ მივიღებთ დაშვებას $R_s = R_p$ მაშინ გვექნება

$$a = 1 ; \mu_3 = 0 \quad \text{და} \quad \frac{dP^*}{di^*} = 0$$

პირობისათვის მივიღებთ $i_{\text{ოპტ}}^*$ ოპტიმალური დენის მიმართ შემდეგ განტოლებას:

$$\mu_2 (i_{\text{ოპტ}}^*)^2 + \mu_1 i_{\text{ოპტ}}^* + \mu_0 = 0 \quad (35)$$

სადაც

$$\left. \begin{aligned} \mu_2 &= 4c^2d^4[1 + 2cd - d^2c(2b' - c)]; \\ \mu_1 &= 4d^2c\{1 + cd(3 + 2b'/d) + c^2d^2[1 + d(2b' - c)]\}; \\ \mu_0 &= 2cd + c^2d^2(5 - c^2d^2) + dc^2d^32(2 + cd) \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

(35) განტოლების ამოხსნა და (33) განტოლების გათვალისწინება გვაძლევს $i_{\text{ოპტ}}^*$ ოპტიმალური დენის და ოპტიმალური $U_{\text{dc ოპტ}}^*$ ძაბვის შემდეგ გამოსახულებებს:

$$i_{\text{ოპტ}}^* = \frac{1}{2\mu_2} \left[-\mu_1 \pm (\mu_1^2 - 4\mu_0\mu_2)^{\frac{1}{2}} \right]; \quad (37)$$

$$U_{\text{dc ოპტ}}^* = \frac{1}{cd^2} \left(-[1 + cd(1 + di_{\text{ოპტ}}^*)] \pm \left[[1 + cd(1 + di_{\text{ოპტ}}^*)]^2 + 2cd^2 \left[b - c - (a + cd)i_{\text{ოპტ}}^* - \frac{1}{2}cd^2(i_{\text{ოპტ}}^*)^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}} \right) \quad (38)$$

ექსპერიმენტული მონაცემებით მოცემულად ითვლება უქმი სვლის ძაბვა და მოკლე შერთვის დენი ($U_{\text{dc უქმი } i_{\text{აშ}}}$). $a = 1$. ამ მონაცემების მიხედვით ვპოულობთ $b, c, d, \mu_0, \mu_1, \mu_2$ კოეფიციენტებს (29), (30) და (36) გამოსახულებების საფუძველზე. (31) გამოსახულებიდან ვპოულობთ $i_{\text{ოპტ}}^*$ ოპტიმალურ დენსა და $U_{\text{dc ოპტ}}^*$ ოპტიმალურ ძაბვას[19].

ამრიგად, მზის ელემენტის ვოლტ-ამპერულ მახასიათებელზე გვაქვს სამი წერტილის კოორდინატები ცნობილი:

$$M_1(0,1); \quad M_2(i_{\text{ოპტ}}^*; U_{\text{dc ოპტ}}^*); \quad M_3(1,0);$$

მოვახდინოთ ამ სამი წერტილის კოორდინატების მიხედვით $U_{\text{dc}}^* = f(i^*)$ ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის ინტერპოლაცია ლაგრანჟის ფორმულის მიხედვით და შედეგად მივიღებთ[19]:

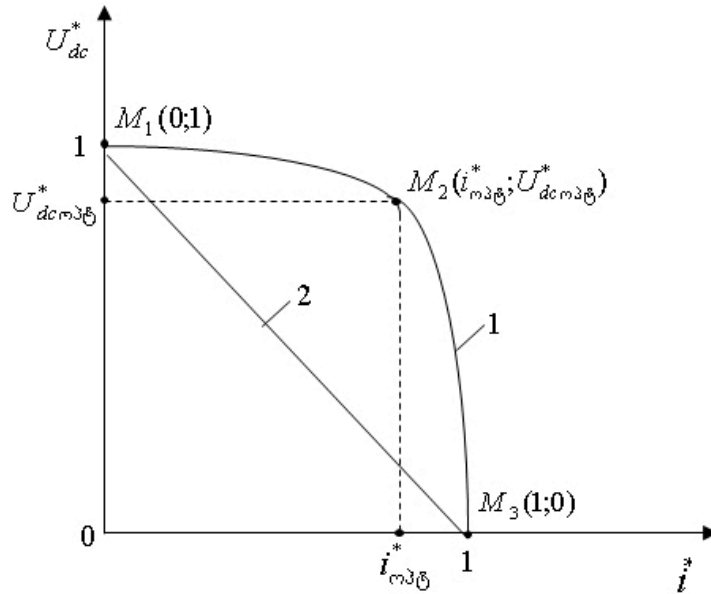
$$U_{\text{dc}}^* = \frac{i^* - 1}{i_{\text{ოპტ}}^*} \left(i^* - i_{\text{ოპტ}}^* + \frac{i^* \cdot U_{\text{dc ოპტ}}^*}{i_{\text{ოპტ}}^*} - 1 \right) \quad (39)$$

(39) გამოსახულებას მივცეთ კვადრატული სამწევრის სახე;

$$U_{\text{dc}}^* = A_1(i^*)^2 - (1 + A_1)i^* + 1 \quad (40)$$

სადაც

$$A_1 = \frac{1}{i_{\text{ოპტ}}^*} + \frac{U_{\text{dc ოპტ}}^*}{[i_{\text{ოპტ}}^*(i_{\text{ოპტ}}^* - 1)]} \quad (41)$$



ნახ.11 შზის ელემენტის ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი

(40), (41)-დან გამომდინარეობს, რომ თუ $i^* = 0$, მაშინ $U_{dc}^* = U_{dc}^* \text{უქმ} = 1$; თუ $U_{dc}^* = 0$. მაშინ გვაქვს $i^* = i_{აშ}^* = 1$, თუ $i^* = i_{ოპტ}^*$, მაშინ გვაქვს $U_{dc}^* = U_{dc\text{ოპტ}}^*$. (40) განტოლების საფუძველზე აგებულ ვოლტ-ამპერულ მახასიათებელს აქვს ნახ.11-ზე ნაჩვენები მრუდი 1-ის სახე.

იმ შემთხვევაში თუ (30) განტოლების მარჯვენა მხარის მეორე წევრის ტეილორის მწკრივებად დაშლაში გავითვალისწინებთ მხოლოდ დაშლის პირველ ორ წევრს, მაშინ ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის გამოსახულებას აქვს სახე:

$$U_{dc}^* = 1 - i^* \quad (42)$$

(42) გამოსახულების საფუძველზე აგებულ ვოლტ-ამპერულ მახასიათებელს აქვს ნახ.11-ზე ნაჩვენები მრუდი 2-ის სახე.

როგორც ნახ.11-დან ჩანს ტეილორის მწკრივებად დაშლის მესამე წევრის უგულვებელყოფა იწვევს ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის გაწრფივებას. შესაბამისად ცდომილებაც მნიშვნელოვნად დიდია. ამიტომ ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის შედარებით ზუსტი აგებისათვის, რომელშიც გათვალისწინებულია დენისა და ძაბვის ზღვრული

ოპტიმალური $i_{\text{ოპტ}}^*$, $U_{dc \text{ ოპტ}}^*$ მნიშვნელობები, აუცილებელი და საკმარისია ტელორის მწკრივებად დამლაში გათვალისწინებული იქნას პირველი სამი წევრი.

1.6. ჰიბრიდული პარალელური ელექტროენერგეტიკული სისტემის განზოგადებული სტრუქტურული სქემის დამუშავება

მზის, ქარის, დიზელგენერატორების და აკუმულატორული ბატარეის ენერჯიების ერთდროული ან სელექციური გზით გამოყენება წარმოადგენს ძირითად საფუძველს, როგორც მუდმივი, ასევე ცვლადი ძაბვის ჰიბრიდული ენერგოსისტემის განვითარებისათვის.

ჰიბრიდული პარალელური ენერგოსისტემების ელექტრომომარაგების მდგრადი და სტაბილური რეჟიმების უზრუნველსაყოფად საჭიროა თანამედროვე ტექნოლოგიებით დამზადებული დიდი ტევადობის აკუმულატორების გამოყენება, რომლებისთვისაც თანმხლება მუდმივად დამუხტვისა და განმუხტვის პროცესები. ასეთი პროცესები მიმდინარეობს კონტროლიორის, სიმპლავრის რეგულატორის და შესაბამისი მართვის იმპულსების ზემოქმედებით.

მზის ელემენტების, ქარის გენერატორის, დიზელგენერატორის და აკუმულატორული ბატარეის სელექციური მუშაობის მიზნით შესაძლებელია გამოყენებული იყოს ტრანზისტორული მოდულებისგან აწყობილი იმპულსური გარდამქმნელი სქემა. ამ სქემის საფუძველზე წარმოებს აკუმულატორული ბატარეის დამუხტვა-განმუხტვის პროცესების მართვა და რეგულირება.

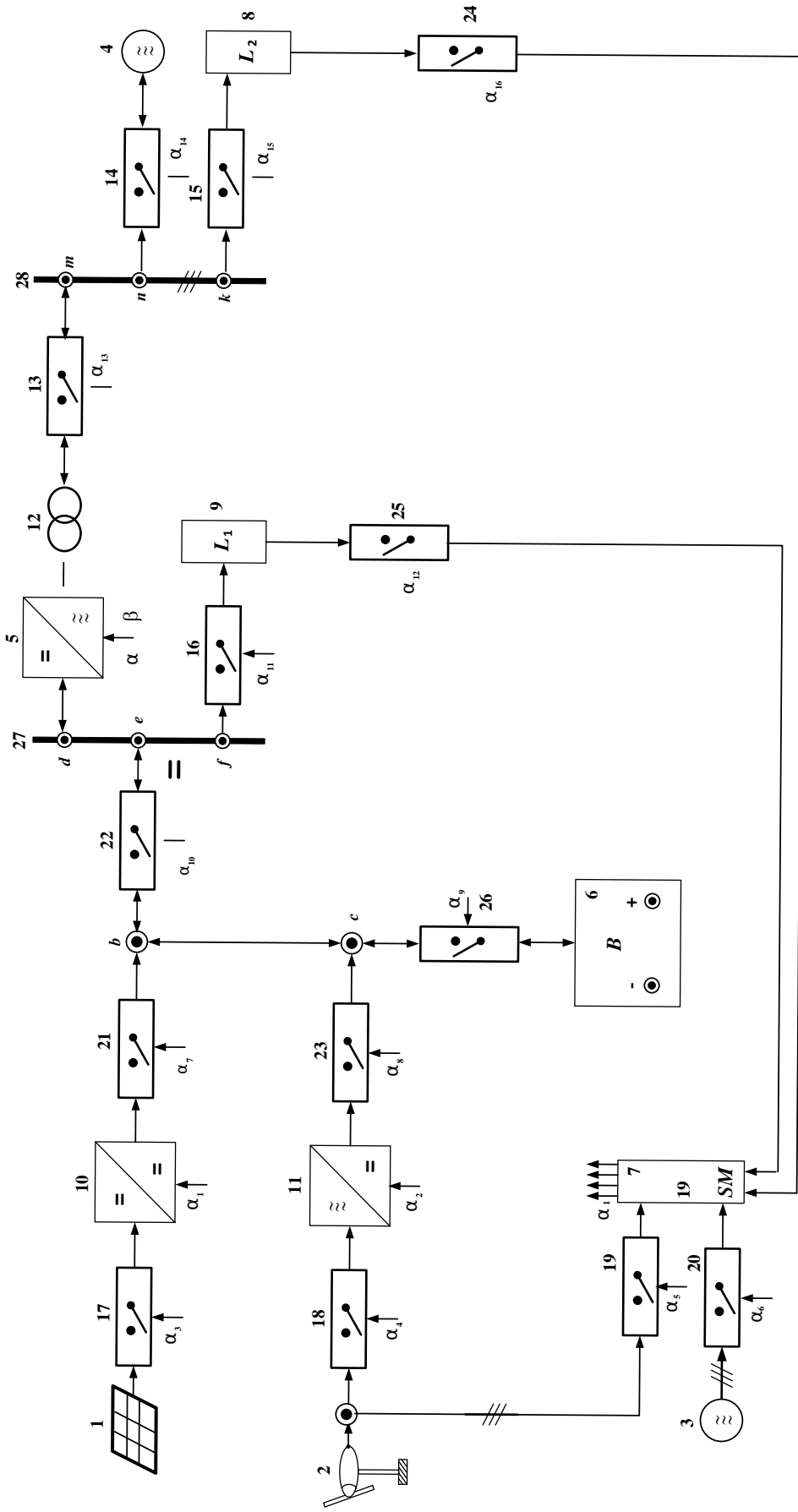
ნახ.12-ზე წარმოდგენილია თანამედროვე ჰიბრიდული პარალელური ელექტროენერგეტიკული სისტემის განზოგადებული პერსპექტიული სტრუქტურული სქემა. იგი შესდგება:

- ფოტოელექტრული გარდამქმნელისაგან-1;

- ქარის გენერატორისაგან-2;
- დიზელგენერატორისაგან- 3-4;
- დენის სამფაზა ინვერტორისაგან – 5;
- აკუმულატორული ბატარეისაგან-6;
- მართვის სისტემისაგან-7;
- ცვლადი დენის დატვირთვისაგან-8;
- მუდმივი დენის დატვირთვისაგან-9;
- მუდმივ ძაბვად გარდამქმნელისაგან-10;
- სამფაზა ცვლადი დენის გამმართველისაგან-11;
- სამფაზა ძალოვანი ტრანსფორმატორისაგან-12;
- მართვადი საკომუტაციო აპარატურისაგან 13-26;
- მუდმივი ძაბვის ქსელისაგან-27;
- ცვლადი ძაბვის ქსელისაგან – 28.

იმის მიხედვით, თუ როგორია კვების წყაროებისა და დატვირთვის სიმძლავრეთა თანაფარდობები, შესაძლებელია მუდმივი და ცვლადი ძაბვის ელექტროენერგეტიკული სისტემებში კვების წყაროების 1-4, 6. სხვადასხვა კომბინაციით ფუნქციონირება.

სხვადასხვა სასურველი კომბინაციით ფუნქციონირებისათვის გამოყენებულია მიკროპროცესორული პროგრამირებადი კონტროლიორები. მათი საშუალებით იმართება ყველა საკომუტაციო მოწყობილობა - 13-26, აგრეთვე მუდმივი დენის გარდამქმნელი -10, მართვადი გამმართველი -11, აკუმულიატორთა ბატარეების დამუხტვის კონტროლიორი. ნახ.12-ზე წარმოდგენილ თანამედროვე ჰიბრიდულ პარალელურ ელექტროენერგეტიკულ სისტემის განზოგადებულ სტრუქტურულ სქემაში კარგად ჩანს, რომ სისტემა უზრუნველყოფს როგორც ცვლადი ისე მუდმივი დენის ქსელის არსებობას, რომელთაც გააჩნიათ თავიანთი მომხმარებელი.



ნახ. 12. თანამედროვე ჰიბრიდული პარალელური ენერგოსისტემის განზოგადებული სტრუქტურული სქემა

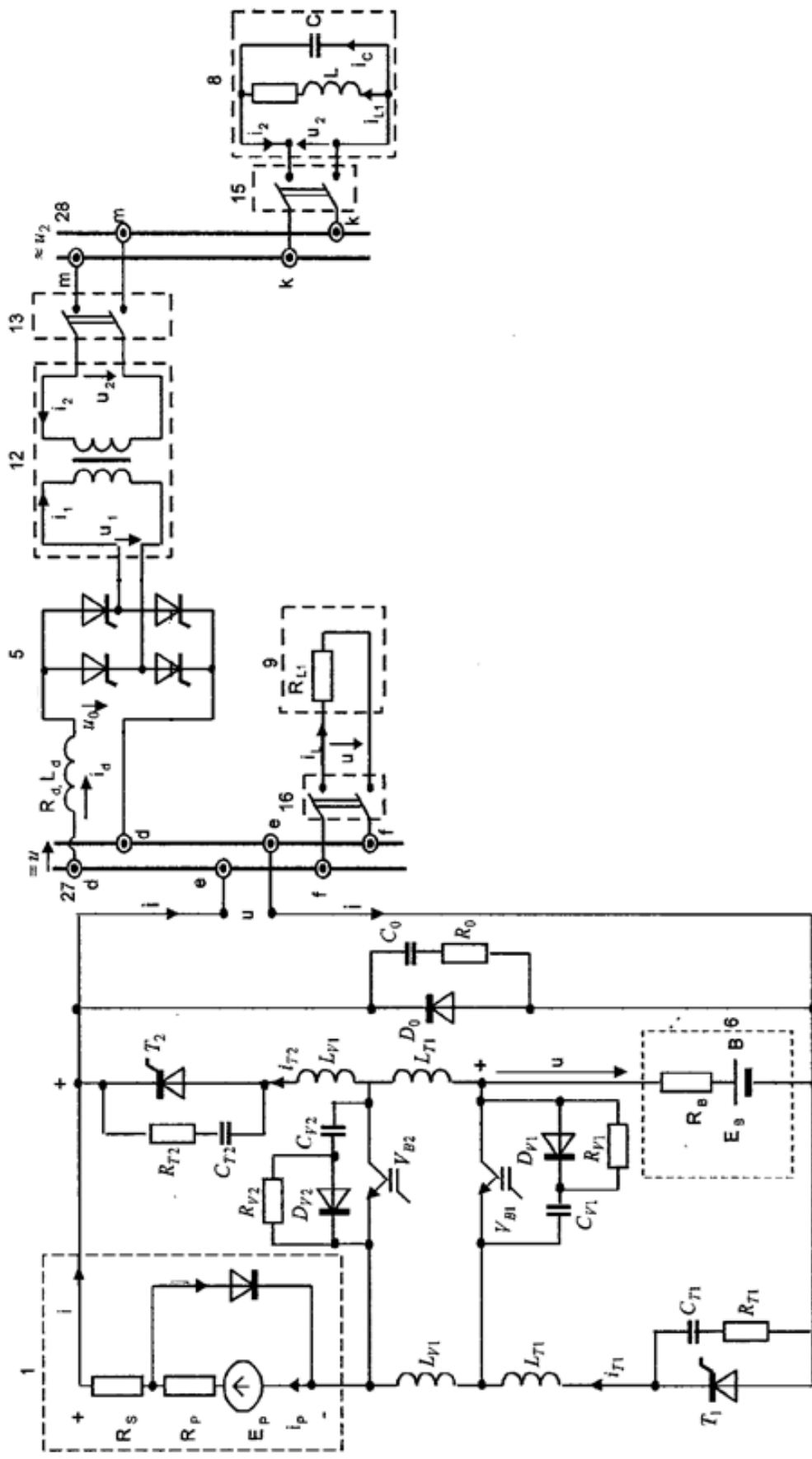
1.7. ავტონომიურ ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემის პრინციპული საანგარიშო ელექტრული სქემის დამუშავება ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მდგრადი მუშაობის პირობებში

ნახ.12-ზე გამოსახული თანამედროვე ჰიბრიდული პარალელური ენერგოსისტემის განზოგადოებული სტრუქტურული სქემიდან კარგად ჩანს, რომ სისტემაში არსებობს სხვადასხვა კვების წყარო. ესენია:

- ფოტოელექტრული გარდამქმნელი-1;
- ქარის გენერატორი-2;
- აკუმულიატორთა ბატარეა-6;
- დიზელგენერატორები - 3-4;

როგორც ზემოთ აღინიშნა იმის მიხედვით, თუ როგორია კვების წყაროებისა და დატვირთვის სიმძლავრეთა თანაფარდობები, შესაძლებელია მუდმივი და ცვლადი ძაბვის ელექტროენერგეტიკულ სისტემებში კვების წყაროების სხვადასხვა კომბინაციით სექციონირება სპეციალური მუდმივი დენის იმპულსური გარდამსახის ან მიკროპროცესორული კონტროლიორის გამოყენებით. ნახ.13-ზე ნაჩვენებია მუდმივი დენის იმპულსურ გარდამქმნელიანი მუდმივი და ცვლადი დენის ერთფაზა ძაბვის ჰიბრიდული ენერგოსისტემის პარალელური მუშაობის ამსახველი პრინციპული ელექტრული სქემა. მასში განხილულია შემთხვევა, როცა ჰიბრიდულ პარალელურ ენერგოსისტემას გააჩნია ორი კვების წყარო - ფოტოელექტრული გარდამქმნელი და აკუმულიატორთა ბატარეა.

როცა მუდმივი დენის ელექტროსისტემაში დატვირთვის მიერ მოთხოვნილი სიმძლავრე მზისა და აკუმულიატორული ბატარეის ჯამურ სიმძლავრეზე ნაკლებია, ელექტროსისტემაში სიმძლავრის დეფიციტის არსებობის პირობებში ის შეივსება არატრადიციული ენერჯის წყაროებიდან გარდაქმნილი ელექტრული ენერჯით.



ნახ.13. იმპულსურ გარდამქმნელიანი მულტიფი და ცვლადი დენის ერთფაზა ძაბვის ჰიბრიდული პარალელური ენერგოსისტემის პრინციპული ელექტრული სქემა

თავი 2. ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში მუშაობის მდგრადი რეჟიმების დადგენა

2.1. ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემის ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მუშაობის რეჟიმები

ელექტროენერგეტიკის განვითარების თანამედროვე ეტაპზე მნიშვნელოვანი ადგილი უკავია ელექტროენერჯის ალტერნატიული წყაროების ბაზაზე მუდმივი და ცვლადი დენის ავტონომიური ჰიბრიდული ენერგოსისტემის შექმნასა და გამოყენებას. ქვეყნის ცალკეული შორეული რაიონების ელექტრომომარაგებაში ავტონომიური ჰიბრიდული ენერგოსისტემის გამოყენება მზის ელემენტების, ქარის გენერატორების, აკუმულიატორული ბატარეებისა და დიზელგენერატორების ბაზაზე მიზანშეწონილია თუ ენერგოსისტემის განვითარება შეუძლებელია და ფასები საწვავზე და სათბობზე მიუღებლად მაღალია რთული ტრანსპორტირების გამო.

21-ე საუკუნე გამოირჩევა ალტერნატიული ენერჯის წყაროების და ტექნოლოგიების ახალი მიღწევებით, დაიწია ფასებმა, გაიზარდა ეფექტურობა. ახლა უკვე შესაძლებელია ეკოლოგიურად სუფთა ენერჯის უწყვეტად მიღება. ყველა ასეთ „მწვანე“ ენერჯის მომცემ სისტემებს აერთიანებს ის, რომ დანახარჯები მის შექმნაზე დიდია. მაგრამ შემდეგ ეს სისტემები საშუალებას იძლევა მივიღოთ ძალიან იაფი ელექტროენერჯია. რამდენიმე წელიწადში ის მთლიანად ფარავს თავის ღირებულებას. ელექტროენერჯის ყველა წყაროს აქვს თავისი უპირატესობები და უარყოფითი მხარეები, ამიტომ აუცილებელია შეირჩეს ოპტიმალური ვარიანტი. ქარის ტურბინებს, მზის პანელებს და დიზელგენერატორებს აქვთ ერთი საერთო ნიშანი ის, რომ მათ შეუძლიათ გამოიმუშაონ ელექტროენერჯია ავტონომიური დეცენტრალიზებული გამოყენებისათვის.

მცირე და არატრადიციული ენერჯეტიკის წინაშე მდგარი პრობლემების ანალიზის საფუძველზე შეგვიძლია ჩამოვყალიბოთ ის

ძირითადი ტექნიკური მოთხოვნები, რომლებიც დგას ენერგომომარაგების ავტონომიური სისტემების წინაშე:

- მრავალფუნქციონალურობა;
- ენერგიის წყაროების კომბინირებული შემადგენლობა (ჰიბრიდული ენერგოდანადგარები);
- მოდულური კომპონენტების არსებობა, კონსტრუქციული უნიფიკაციის საფუძველზე;
- ენერგეტიკული მოდულების ავტონომიური მუშაობის შესაძლებლობა;
- მახასიათებლების შეთანხმებულობა ენერგეტიკულ მოდულებსა და ენერგიის მომხმარებლებს შორის;
- არატრადიციული ენერგიის წყაროების და ენერგოსისტემის ერთობლივი მუშაობის შესაძლებლობა;
- დატვირთვის სიდიდეების რხევების მიუხედავად ელექტრული ენერგიის ხარისხის უზრუნველყოფა.
- ავტონომიური ელექტროენერგეტიკული სისტემის ფუნქციონირების საიმედოობა და ეფექტურობა;
- ეკონომიურობა;
- მუშაობის შესაძლებლობა სხვადასხვა კლიმატურ პირობებში;
- ტრანსპორტაბელურობა;
- ავტომატიზაციის მაღალი დონე;
- დაბალი საექსპლუატაციო ხარჯები და პროფილაქტიკური სამუშაოების ჩატარების სიმარტივე;
- ტექნოლოგიურობა და ურთიერთშეცვლადობა.

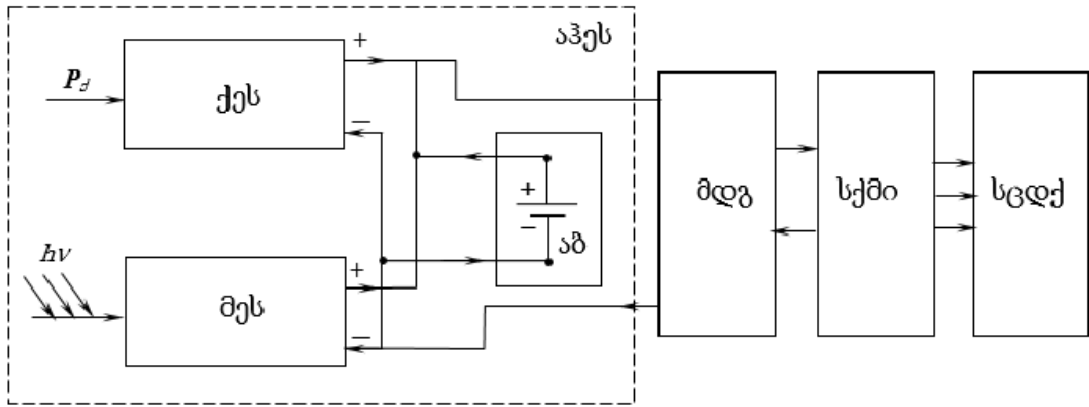
ნახ.14-ზე წარმოდგენილია ჰიბრიდული პარალელური ელექტრო-ენერგეტიკული სისტემის განზოგადოებული სტრუქტურული სქემა, რომელიც შედგება ქარის ელექტროსადგურის (ქეს), მზის ელექტროსადგურის (მეს), აკუმულიატორული ბატარეის (აბ), მუდმივი დენის გარდამქმნელის (მდგ), სამფაზა ქსელის მიმყოლი ინვერტორისა და

სამფაზა ცვლადი დენის ქსელისაგან (სცდქ). ქარის ელექტროსადგური (ქეს), მზის ელექტროსადგური (მეს), აკუმულიატორული ბატარეა (აბ) ერთობლივად წარმოადგენს ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკულ სისტემას (აჰეს). აჰეს-ს აქვს მომხმარებლის სიმძლავრის თანაზომადი შეზღუდული სიმძლავრე. იმის გამო, რომ ენერგომომხმარებლის გრაფიკს აქვს არსებითად არათანაბარი ხასიათი, ელექტრომომარაგების სისტემის მუშაობის რეჟიმების თანმიმდევრობა წარმოებს შემდეგი კლასიფიკაციით.[2].

ა) რეჟიმი, როცა მომხმარებლის სიმძლავრე აღემატება აჰეს-ის სიმძლავრეს, ხოლო სიმძლავრის უკმარისობა იფარება ბუფერული სცდქ-ს წყაროთი. ამ შემთხვევაში აუცილებელია, რომ აჰეს-ი მუშაობდეს მაქსიმალური გასაცემი სიმძლავრის რეჟიმში.

ბ) რეჟიმი, როცა მომხმარებლის სიმძლავრე ნაკლებია აჰეს-ის სიმძლავრეზე. ამ შემთხვევაში „ჭარბი“ სიმძლავრე მფს-დან გადაეცემა სცდქ-ს, ხოლო სცქ მუშაობს მაქსიმალური გადასაცემი სიმძლავრის რეჟიმში.

როგორც აღინიშნა, წარმოდგენილ ჰიბრიდულ პარალელურ ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში შემავალი ელემენტებია: ქარის ელექტროსადგური (ქეს), მზის ელექტროსადგური (მეს), აკუმულიატორული ბატარეა (აბ), მუდმივი დენის გარდამქმნელი (მდგ), სამფაზა ქსელის მიმყოლი ინვერტორი (სქმი) და სამფაზა ცვლადი დენის ქსელი (სცდქ). ავტონომიური ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემის (აჰეს)-ის პრინციპული ელექტრული სქემა ნაჩვენებია ნახ.15-ზე, მუდმივი დენის გარდამქმნელის (მდგ) ნახ.16-ზე. სამფაზა ქსელის მიმყოლი ინვერტორის (სქმი) და სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის (სცდქ) პრინციპული ელექტრული სქემები კი ნაჩვენებია ნახ.17-ზე.



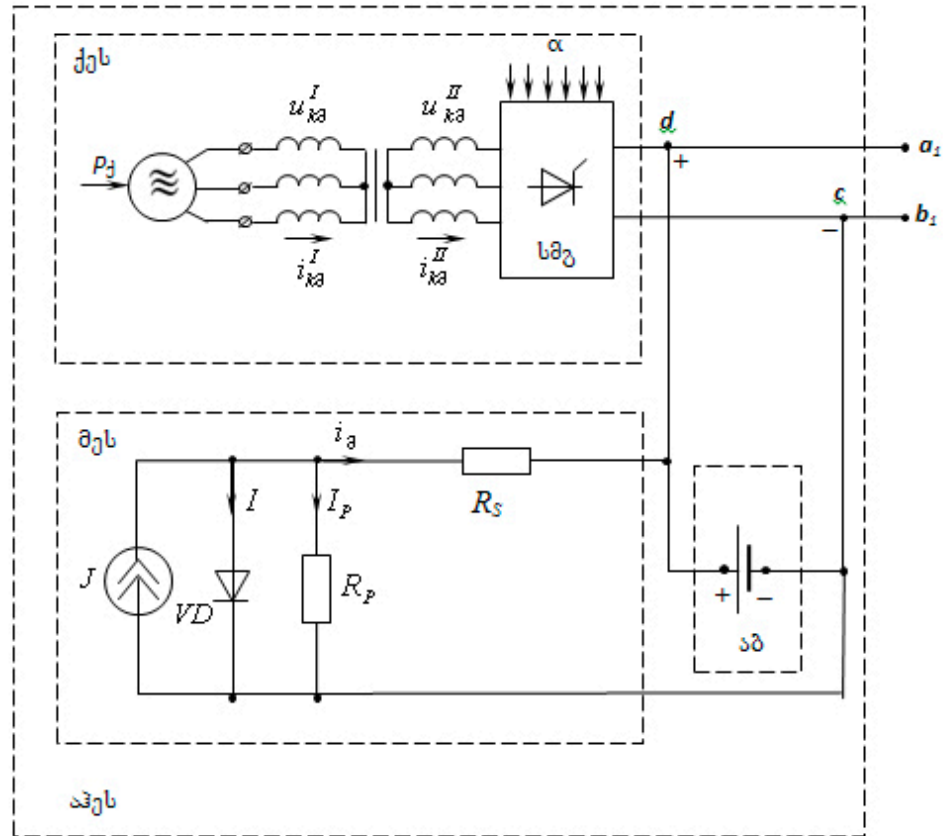
ნახ.14 ჰიბრიდული პარალელური ელექტროენერგეტიკული სისტემის განზოგადებული სტრუქტურული სქემა

ქეს - ქარის ელექტროსადგური; მეს - მზის ელექტროსადგური; აბ - აკუმულიატორული ბატარეა; აპეს - ავტონომიური ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემა; მდგ - მუდმივი დენის გარდამქმნელი; სქმი - სამფაზა ქსელის მიმყოლი ინვერტორი; სცდქ - სამფაზა ცვლადი დენის ქსელი.

მზის ბატარეის ელექტრული შენაცვლების სქემაში ნათლად ჩანს, რომ ელემენტში გამავალი სრული დენი i წარმოადგენს რეკომბინაციულ-გენერაციული J , დიფუზიურ I და შუნტირებული I_p დენების მდგენელების ჯამს. დენის ეს მდგენელები განიხილებიან ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად; R_p - მაშუნტირებელი წინაღობაა, ხოლო R_s - მიმდევრობითი წინაღობაა. დიდ დენებზე R_s -ის გავლენა ელემენტის ვოლტ-ამპერულ მახასიათებელზე მეტად მნიშვნელოვანია, ხოლო დაბალი ძაბვებისას, როცა გადასასვლელზე გამავალი დენი მცირეა მაშუნტირებელ დენთან შედარებით, R_s -ს გავლენა ნაკლებ მნიშვნელოვანია. როგორც წესი, საკმარისად ძნელია ექსპერიმენტული გზით გავყოთ ერთმანეთისაგან რეკომბინაციულ-გენერაციული და შუნტირებული დენები.

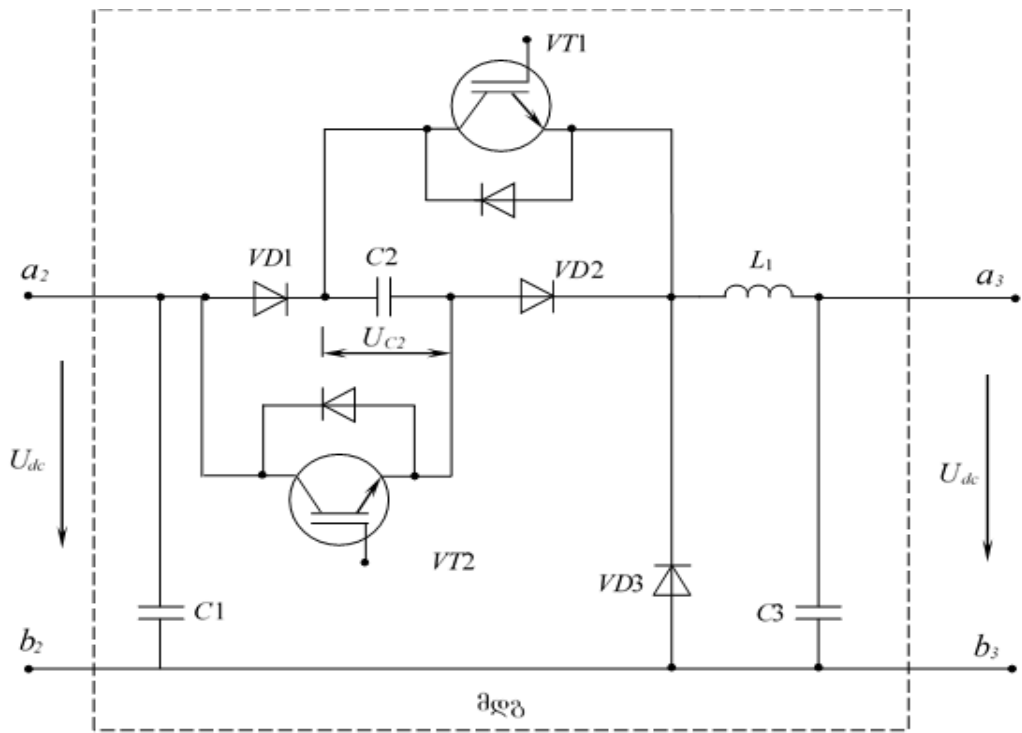
შუნტირებული დენის წარმოშობა დაკავშირებულია რეკომბინაციულ-გენერაციული პროცესის შედეგად მიღებულ ზედაპირულ გამტარობასთან. მზის ელემენტის გამოსავალზე ვლტებულობთ U_{ac} ძაბვას, რომელიც ამავე დროს წარმოადგენს აკუმულიატორული ბატარეის შესავალზე მისაწოდებელ და მუდმივი დენის გარდამქმნელის (მდგ) შესავალ ძაბვას. მუდმივი დენის გარდამქმნელი უზრუნველყოფს ავტონომიური

ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემის და სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის ერთობლივ მუშაობას.



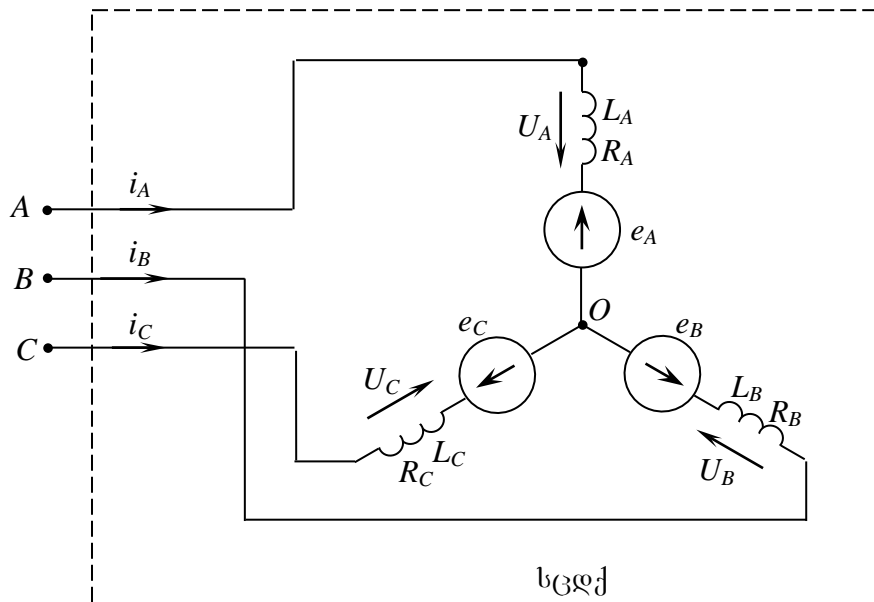
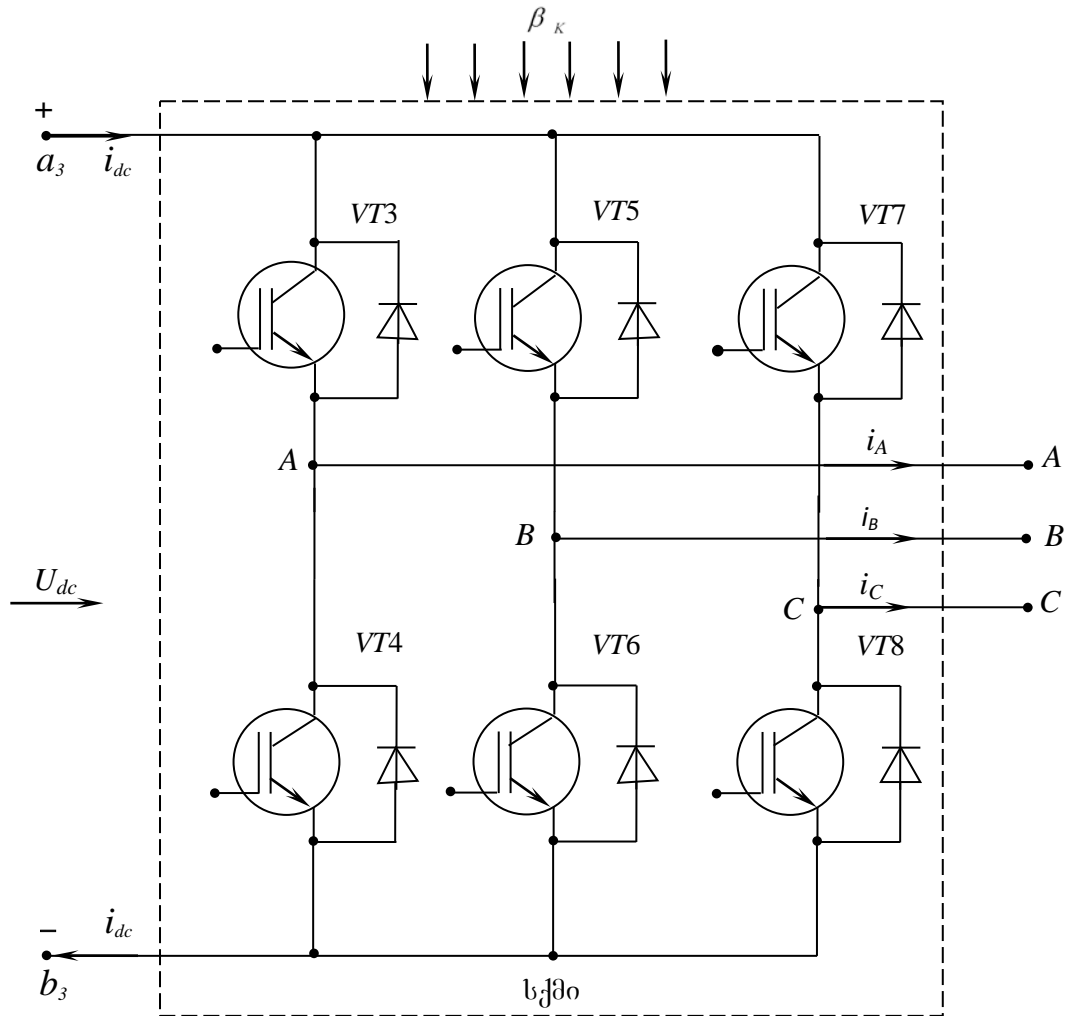
ნახ. 15. ავტონომური ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემის პრინციპული ელექტრული სქემა

მუდმივი დენის გარდამქმნელი შედგება $VT1$ და $VT2$ ტრანზისტორებისაგან; $VD1, VD2, VD3$; დიოდებისაგან; $C1, C2, C3$ კონდენსატორებისა და $L1$ დროსელისაგან. მუდმივი დენის გარდამქმნელის გამოსავალზე გვაქვს U_{dc} და i_{dc} ძაბვის და დენის მყისა მნიშვნელობები, რომლებიც აგრეთვე წარმოადგენენ სამფაზა ქსელის მიმყოლი ინვერტორის (სქმი) შესავალ ძაბვასა და დენს. $VT1$ და $VT2$ – იზოლირებულ საკეტიან ბიპოლარულ ტრანზისტორებზე (IGBT) აგებულია თითქმის იდიალური ტრანზისტორული გასაღებები შემხვედრ- პარალელურად ჩართული დიოდებით.[2].



ნახ. 16 მულტივი დენის გარდამქმნელის პრინციპული ელექტრული სქემა

სამფაზა ინვერტორი წარმოდგენილია ნახ.17-ზე. ის წარმოადგენს $VT3 \div VT8$ ტრანზისტორების ბოგირული სქემით შეერთებას, რომლის გამოსავალზე ვღებულობთ ცვლადი დენის ქსელის მიმართ ელექტრომაგნიტურად შეთავსებად U_A, U_B, U_C ძაბვებსა და i_A, i_B, i_C დენებს. ნაჩვენებია სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის შესაბამისი ფაზური დენების და ძაბვების მყისა მნიშვნელობები L_A, L_B, L_C ინდუქციურობებისა და e_A, e_B, e_C ე.მ. ძალების გათვალისწინებით. ქსელის მიმყოლი ინვერტორი (ნახ.17) არის ისეთი ინვერტორი, რომლის გამოსასვლელზე ძაბვის ფორმა, სიდიდე და სიხშირე განისაზღვრება გარე ქსელისაგან. მიმყოლი ინვერტორის დანიშნულებაა არსებული ცვლადი ძაბვის სისტემას მიაწოდოს დამატებითი აქტიური სიმძლავრე [4]. იმ შემთხვევაში, როცა აუცილებელია სწრაფად და ეფექტურად გამოვიტანოთ დაგროვილი ელექტროენერგია გრაგნილიდან, მასზე დენის მკვეთრი შემცირების გზით, საჭიროა ამ გრაგნილზე ძაბვის პოლარობის შეცვლა საწინააღმდეგო ნიშნით, რასაც უზრუნველყოფს ვენტილურ გარდამქმნელში α -რეგულირების კუთხის



ნახ.17 სამფაზა ქსელის მიმყოლი ინვერტორის და სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის პრინციპული ელექტრული სქემა

გაზრდა 90° -ით. აქედან გამომდინარე, გამმართველებს და მიმყოლი ინვერტორებს აქვთ ერთნაირი პრინციპული სქემები, მაგრამ მიმყოლი ინვერტორები ვერ იმუშავებენ არამართვადი ვენტილებით.

მიმყოლი ინვერტორის მახასიათებლების გაანგარიშებისათვის მოსახერხებელია α კუთხის ნაცვლად ვისარგებლოთ რეგულირების β კუთხით, რომელიც არის α კუთხის 180° -მდე შემავსებელი კუთხე.

$$\alpha + \beta = 180^\circ \quad (43)$$

ამ შეცვლის შემდეგ ინვერტორის მახასიათებლების დამოკიდებულებებს β კუთხეზე ისეთივე სახე ექნებათ, როგორც გამმართველის მახასიათებელთა დამოკიდებულებებს α კუთხეზე. დროითი დიაგრამების აგების მეთოდიკა იგივეა, როგორც გამართვის რეჟიმში მუშაობის პროცესში.

ინვერტირების რეჟიმისათვის დამახასიათებელია დროითი დიაგრამების ორი თავისებურება: ერთი ის, რომ ძალიან მცირეა დროის ინტერვალი, როცა ვენტილზე მოდებულია უკუძაბვა:

$$\delta = \beta - \gamma \quad (44)$$

აქედან გამომდინარე, იზღუდება β კუთხის მინიმალური დასაშვები მნიშვნელობა. რეგულირების კუთხის მინიმალური მნიშვნელობა ინვერტირების რეჟიმში არ შეიძლება იყოს 0-ის ტოლი: $\beta_{\min} \neq 0$.

მუდმივი დენის გარდამქმნელი წარმოადგენს არადისიპატიურ ბუფერულ წრედს, რომელიც ასრულებს მოდულაციური წრედის როლს.

არსებობს მზის ელექტრული სადგურის (მეს) მუშაობის რეჟიმების რამოდენიმე გზა:

1. მზის ელემენტების პანელების (მეპ) მზისკენ ორიენტაცია. ამის შედეგად მიიღწევა მზის პანელების რაციონალური გამოყენება. ამ შემთხვევაში ექსპლუატაციის მთელ პერიოდში მეს გამომავალი სიმძლავრე მიაღწევს თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას პრაქტიკულად პანელების განათებულობასთან ერთად.

2. მეკ-ის სექციონირება შეერთების სქემების თანმიმდევრული შეცვლით. ამის შედეგად მიიღწევა მეკ-ის მუშაობის რეჟიმების ოპტიმიზაცია მფს-ის ფუნქციონირების რეჟიმების დამოუკიდებლად.

3. მეკ-ის შუნტირება ბალასტურ წინაღობაზე. ამით წარმოებს ზედმეტი ენერჯის გამოყოფა კომუტაციის გზით გადამრთველი და უწყვეტ ტიპის ძალოვან რეგულირებად მოწყობილობათა დახმარებით.

4. კომბინირებული გზა-სექციონირება და შუნტირება. შუნტირება წარმოებს პანელების, როგორც სრული ნაკრებისათვის, ასევე ცალკეული სექციებისათვის. შუნტირების ძირითად ნაკლს წარმოადგენს ბალასტურ წინაღობაზე ენერჯის დიდი დანაკარგები, გამოხატული გაფანტული სიტბოს სახით, ხოლო სექციონირების ნაკლია მართვის სქემასთან ერთად რთული კომუტაციური ბლოკის არსებობა.

5. მეკ-ის გამოსავალზე სიმძლავრის ექსტრემალური რეგულიატორის დაყენება. ამ შემთხვევაში მიიღწევა მეკ-ის მუშაობა მაქსიმალური სიმძლავრის გაცემის რეჟიმში. მდგ-ში $VT1, VT2$ ტრანზისტორების გადართვის f_0 სიხშირე n_0 -ჯერ მეტია ცვლადი დენის ქსელის $f_{ქს}$ სიხშირეზე $f_0 = f_{ქს} n_0$. $VT3 \div VT8$ ტრანზისტორების გადართვის სიხშირე ტოლია ქსელის $f_{ქს}$ სიხშირისა.

2.2. ჰიბრიდულ ავტონომიური ელექტროენერგეტიკული სისტემების ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მუშაობის კენტი რეჟიმების დადგენა

მუდმივი დენის გარდამქმნელში (მდგ) $VT1, VT2$ ტრანზისტორები სისტემის მუშაობის ყველა რეჟიმში ან ჩაკეტილია, ან ღია მდგომარეობაშია, ხოლო სამფაზა ქსელის მიმყოლი ინვერტორის (სქმი) $VT3 \div VT8$ ტრანზისტორების ჩაკეტვა-გაღების მდგომარეობა მიმყოლია ცვლადი დენის ქსელის ფაზური ძაბვების ცვლილებასთან.

ავტონომიური ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემის და სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის ერთობლივი მუშაობის ერთი მთლიანი

ციკლისათვის საჭიროა განხილული იყოს 12 რეჟიმი ($U_{dc} > U$). აქედან 6 კენტი და 6 ლუწი რეჟიმი.

კენტი რეჟიმებისათვის გვაქვს:

$$\text{I რეჟიმი: } \left(0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{6}\right), \quad i_A = i_B ;$$

$VT1, VT2$ ტრანზისტორები ჩაკეტილია $t = t_0 = 0$ მომენტიდან $t = t_1$ მომენტამდე. $VD3$ უკუდიოდი ღიაა მაშინ, როდესაც C_2 კონდენსატორზე დაბვა მიაღწევს U_{BA} -ს. დენი მასში მიედინება ჩაკეტილ კონტურში, რომელიც გადის ელემენტებზე $L1, VT3, LA, LB, VT6, VD3, L1$, კონდენსატორი C_2 დამუხტულია U_{dc} დაბვაზე.

$$\text{III რეჟიმი: } \left(\frac{2\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{3\pi}{6}\right),$$

$$i_A = i_C \quad (45)$$

$VT1, VT2$ ტრანზისტორები ჩაკეტილია $t = t_2$ -დან $t = t_3$ -მდე, კონდენსატორი C_2 იმუხტება U_{dc} დაბვისგან. $VD3$ დიოდი იღება, როდესაც კონდენსატორზე დაბვა მიაღწევს ცვლადი დენის ქსელის U_{CA} ხაზურ დაბვას. i_{dc} დენი შეიკვრება კონტურში, რომელიც გადის ელემენტებში: $VD1, C2, VD2, L1, VT3, LA, LC, VT8, \text{ჰე}, VD1$.

$$\text{V რეჟიმი: } \left(\frac{4\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{5\pi}{6}\right),$$

$$i_B = i_C \quad (46)$$

$VT1, VT2$ ტრანზისტორები ჩაკეტილია $t = t_4$ -დან $t = t_4 + \frac{\pi}{6\omega}$ -მდე. კონდენსატორი C_2 იმუხტება U_{dc} დაბვისაგან. $VD3$ დიოდი იღება, როცა კონდენსატორზე დაბვა მიაღწევს ცვლადი დენის ქსელის U_{CB} დაბვას. i_{dc} დენი შეიკვრება კონტურში, რომელიც გადის შემდეგ ელემენტებზე: $VD1, C2, VD2, L1, VT5, LB, LC, VT8, \text{ჰე}, VD1$.

$$\text{VII რეჟიმი: } \left(\frac{6\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{7\pi}{6}\right),$$

$$i_B = i_A \quad (47)$$

$VT1, VT2$ ტრანზისტორები ჩაკეტილია $t = t_4 + \frac{\pi}{3\omega}$ -დან $t = t_4 + \frac{\pi}{2\omega}$ -მდე. $VD3$ დიოდი იღება მაშინ, როცა C_2 კონდენსატორზე დაბვა მიაღწევს U_{AB} -ს. კონდენსატორი C_2 იმუხტება U_{dc} დაბვისაგან. i_{dc} დენი შეიკვრება ჩაკეტილ

კონტურში, რომელიც გადის შემდეგ ელემენტებზე: $VD1, C2, VD2, L1, VT5, LB, LA, VT4$, ჰე, $VD1$.

$$\text{IX რეჟიმი: } \left(\frac{8\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{9\pi}{6} \right),$$

$$i_C = i_A \quad (48)$$

$VT1, VT2$ ტრანზისტორები ჩაკეტილია $t = t_4 + \frac{2\pi}{3\omega}$ დან $t = t_4 + \frac{5\pi}{6\omega}$ -მდე. $VD3$ დიოდი იღება მაშინ, როცა C_2 კონდენსატორზე დაბნა მიაღწევს U_{AC} -ს. კონდენსატორი C_2 იმუხტება U_{dc} დაბვისაგან. i_{dc} დენი შეიკვრება ჩაკეტილ კონტურში, რომელიც გადის შემდეგ ელემენტებზე: $VD1, C2, VD2, L1, VT7, LC, LA, VT4$, ჰე, $VD1$.

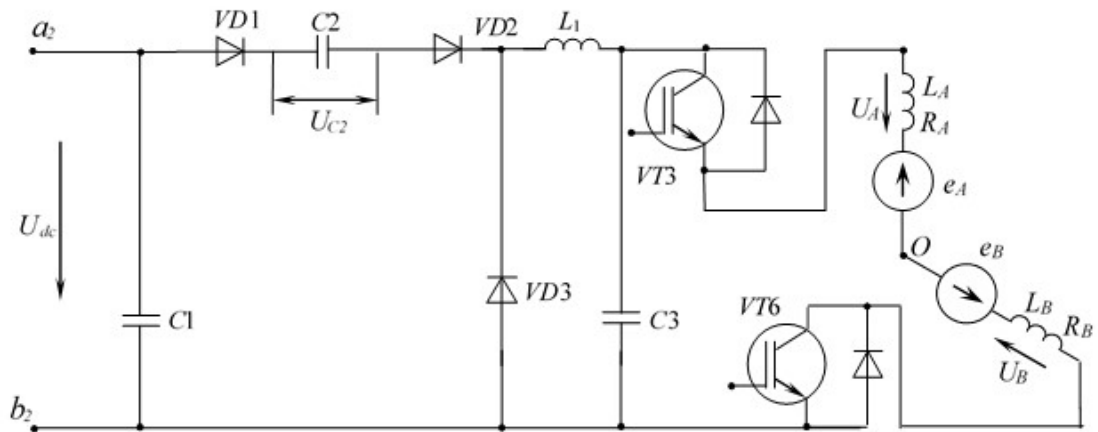
$$\text{XI რეჟიმი: } \left(\frac{10\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{11\pi}{6} \right),$$

$$i_C = i_B \quad (49)$$

$VT1, VT2$ ტრანზისტორები ჩაკეტილია $t = t_4 + \frac{\pi}{\omega}$ დან $t = t_4 + \frac{7\pi}{6\omega}$ მდე. $VD3$ დიოდი იღება მაშინ, როცა C_2 კონდენსატორზე დაბნა მიაღწევს U_{BC} -ს. კონდენსატორი C_2 იმუხტება U_{dc} დაბვისაგან. i_{dc} დენი შეიკვრება ჩაკეტილ კონტურში, რომელიც გადის შემდეგ ელემენტებზე: $VD1, C2, VD2, L1, VT7, LC, LB, VT6$, ჰე, $VD1$.

ზემოთ ცალ-ცალკე არის ჩამოთვლილი ექვსი კენტი რეჟიმი. ყველა რეჟიმისათვის მითითებულია დროის ინტერვალი და დენის გავლის ჩაკეტილ კონტურში შემავალი ელემენტები. რეჟიმების აღწერის შედეგად კარგად გამოჩნდა, რომ კენტ რეჟიმებში მუდმივი დენის გარდამქმნელის $VT1, VT2$ ტრანზისტორები ჩაკეტილია და შეგვიძლია ვუგულებელვყოთ.

ჩამოთვლილი კენტი რიგის რეჟიმების ამსახველი სქემის ტოპოლოგია სტრუქტურულად ერთმანეთის მსგავსია. ის გამოსახულია ნახ.18-ზე. როგორც ნახაზიდან ჩანს ფიქსირდება $VD1$ და $VD2$ დიოდის აგრეთვე C_2 კონდენსატორის მიმდევრობითი შეერთებები. განსხვავება არის ინვერტორის შემადგენლობაში მყოფი $VT3 \div VT8$ ძალოვანი ტრანზისტორების და ცვლადი სამფაზა ქსელის A, B, C ფაზების გადართვების თანმიმდევრობაში.



ნახ.18 ჰიბრიდული ავტონომიური ელექტროენერგეტიკული სისტემის პარალელური მუშაობის კენტი რეჟიმების საანგარიშო პრინციპული ელექტრული სქემა

2.3. ჰიბრიდულ ავტონომიური ელექტროენერგეტიკული სისტემების ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მუშაობის ლუწი რეჟიმების დადგენა

ლუწი რიგის რეჟიმებისათვის ფიქსირდება $VT1, VT2$ ტრანზისტორების და C_2 კონდენსატორის მიმდევრობითი შეერთება (ნახ.19).

ლუწი რეჟიმებისათვის შეგვიძლია დავწეროთ:

$$\text{II რეჟიმი: } \left(\frac{\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{2\pi}{6} \right),$$

$$i_A = i_B \quad (50)$$

$VT1, VT2$ ტრანზისტორები ღიაა $t = t_1$ -დან $t = t_2$ -მდე; $VD3$ დიოდი ჩაკეტილია. C_2 კონდენსატორი გადასცემს დაგროვილ ენერგიას ცვლადი დენის ქსელს (ცდქ) მის ბოლომდე განმუხტვამდე. i_{ac} დენი შეიკვრება ჩაკეტილ კონტურში, რომელიც გადის შემდეგ ელემენტებზე: $VT2, C2, VT1, L1, VT3, LA, LB, VT6, \text{ჰე}, VT2$.

$$\text{IV რეჟიმი: } \left(\frac{3\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{4\pi}{6} \right),$$

$$i_A = i_C \quad (51)$$

$VT1, VT2$ ტრანზისტორები ღიაა $t = t_3$ -დან $t = t_4$ -მდე. $VD3$ დიოდი ჩაკეტილია. C_2 კონდენსატორი გადასცემს დაგროვილ ენერგიას ცვლადი დენის ქსელს სრულ განმუხტვამდე. i_{dc} დენი შეიკვრება ჩაკეტილ კონტურში, რომელიც გადის ელემენტებზე: $VT2, C2, VT1, L1, VT3, LA, LC, VT8$, ჰე, $VT2$.

$$\text{VI რეჟიმი: } \left(\frac{5\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{6\pi}{6} \right),$$

$$i_B = i_C \quad (52)$$

$VT1, VT2$ ტრანზისტორები ღიაა $t = t_4 + \frac{\pi}{6\omega}$ -დან $t = t_4 + \frac{\pi}{3\omega}$ -მდე. $VD3$ დიოდი ჩაკეტილია. C_2 კონდენსატორი გადასცემს დაგროვებულ ენერგიას ცდქ-ს სრულ განმუხტვამდე. i_{dc} დენი შეიკვრება ჩაკეტილ კონტურში, რომელიც გადის ელემენტებზე: $VT2, C2, VT1, L1, VT5, LB, LC, VT8$, ჰე, $VT2$.

$$\text{VIII რეჟიმი: } \left(\frac{7\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{8\pi}{6} \right),$$

$$i_B = i_A \quad (53)$$

$VT1, VT2$ ტრანზისტორები ღიაა $t = t_4 + \frac{\pi}{3\omega}$ -დან $t = t_4 + \frac{2\pi}{3\omega}$ -მდე. $VD3$ დიოდი ჩაკეტილია. C_2 კონდენსატორი გადასცემს დაგროვილ ენერგიას ცდქ-ს სრულ განმუხტვამდე. i_{dc} დენი შეიკვრება ჩაკეტილ კონტურში, რომელიც გადის ელემენტებზე: $VT2, C2, VT1, L1, VT5, LB, LA, VT4$, ჰე, $VT2$.

$$\text{X რეჟიმი: } \left(\frac{9\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{10\pi}{6} \right),$$

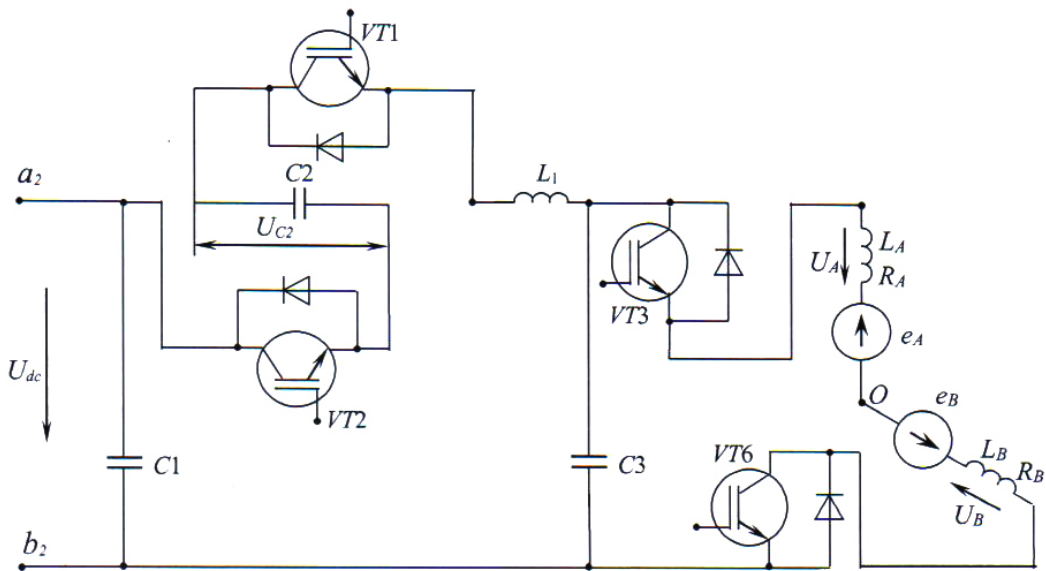
$$i_C = i_A \quad (54)$$

$VT1, VT2$ ტრანზისტორები ღიაა $t = t_4 + \frac{5\pi}{6\omega}$ -დან $t = t_4 + \frac{\pi}{\omega}$ -მდე. $VD3$ დიოდი ჩაკეტილია. C_2 კონდენსატორი გადასცემს დაგროვილ ენერგიას ცდქ-ს სრულ განმუხტვამდე. i_{dc} დენი შეიკვრება ჩაკეტილ კონტურში, რომელიც გადის ელემენტებზე: $VT2, C2, VT1, L1, VT7, LC, LA, VT4$, ჰე, $VT2$.

$$\text{XII რეჟიმი: } \left(\frac{11\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{12\pi}{6} \right),$$

$$i_C = i_B; \quad (55)$$

$VT1, VT2$ ტრანზისტორები ღიაა $t = t_4 + \frac{7\pi}{6\omega}$ დან $t = t_4 + \frac{4\pi}{3\omega} = \frac{2\pi}{3\omega} + \frac{4\pi}{3\omega} = \frac{2\pi}{\omega}$ -მდე. $VD3$ დიოდი ჩაკეტილია. C_2 კონდენსატორი გასცემს დაგროვებულ ენერგიას ცდქ-ს სრულ განმუხტვამდე. i_{dc} დენი შეიკვრება ჩაკეტილ კონტურში, რომელიც გადის შემდეგ ელემენტებზე: $VT2, C2, VT1, L1, VT7, LC, LB, VT6, \text{ჰე}, VT2$. ცვლადი დენის ქსელის ერთი პერიოდის $T = \frac{2\pi}{\omega}$ განმავლობაში რეჟიმის რიცხვი $m_0 = 2n_0$. ჩვენს შემთხვევაში $n_0 = 6$. $m_0 = 12$ და $f_0 = 300\text{ჰც}$. [1].



ნახ.19 . ჰიბრიდული ავტონომიური ელექტროენერგეტიკული სისტემის პარალელური მუშაობის ლუწი რეჟიმების საანგარიშო პრინციპული ელექტრული სქემა

2.4. ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის დაბევის, მართვის იმპულსების, კომუტაციური ფუნქციებისა და სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის დაბევის დროზე დამოკიდებულების კანონზომიერებების დადგენა

ცვლადი დენის ქსელის (ცდქ) ყოველ ფაზაში $\frac{2\pi}{3\omega}$ დროის განმავლობაში დენის გავლისას მუდმივი დენის გარდამქმნელში (მდგ) $VT1, VT2$ ტრანზისტორები მოცემულ შემთხვევაში ორჯერ ასწრებენ ჩაკეტვას და გაღებას. ჩაკეტილია $t = t_0 = 0$ მომენტიდან $t = t_1$ მომენტამდე და $t =$

t_2 მომენტიდან $t = t_3$ მომენტამდე; ღია მდგომარეობაშია $t = t_1$ მომენტიდან $t = t_2$ მომენტამდე და $t = t_3$ მომენტიდან $t = t_4$ მომენტამდე. ამ მომენტებისათვის ცვლადი დენის ქსელში $t = t_0$ და $t = t_2$ მომენტამდე დენი გადის A და B ფაზაში, ხოლო $t = t_2$ მომენტიდან $t = t_4$ მომენტამდე დენი გადის A და C ფაზაში (ნახ.20).

მდგ-ის VT1, VT2 ტრანზისტორებზე $U_{\partial VT1,2}$ მართვის იმპულსების მიწოდების განრიგი ნაჩვენებია ნახ.20-ბ-ზე. ამავე სიხშირით ხდება C_2 კონდენსატორის დამუხტვა-განმუხტვის პროცესები. დამუხტვისა და განმუხტვის დენების $\rho_{C2}(t)$ კომუტაციური ფუნქცია ნაჩვენებია ნახ.20-გ-ზე. ზედა დადებითი მართკუთხა იმპულსები შეესაბამება C_2 კონდენსატორის დამუხტვის დენის არსებობას, ხოლო უარყოფითი მართკუთხა იმპულსები კი განმუხტვის დენის არსებობას. თუ ავღნიშნავთ VT1, VT2 ტრანზისტორებზე მართვის იმპულსებს $U_{\partial VT1,2}$ -ით მაშინ როდესაც $U_{\partial VT1,2} = 0$ გვაქვს $\rho_{C2}(t) = 1$, ხოლო $U_{\partial VT1,2} = 1$ გვაქვს $\rho_{C2}(t) = -1$, ე.ი. $\rho_{C2}(t) = 1 - 2U_{\partial VT1,2}$. მდგ-ის U_{dc0} ძაბვის მიხედვით კომუტაციური ფუნქცია $\Phi(t)$ წარმოადგენს $\rho_{C2}(t)$ კომუტაციური ფუნქციის ერთამდე შემავსებელ გადართვის ფუნქციას (ნახ.20-დ):

$\Phi(t) = 1 - \rho_{C2}(t) = 2U_{\partial VT1,2}$. მდგ-ში VD2-ის კათოდსა და VD1-ის ანოდს შორის u_x ძაბვის კომუტაციური ფუნქცია ნაჩვენებია ნახ.20-ე-ზე. შესაბამისად გვაქვს:

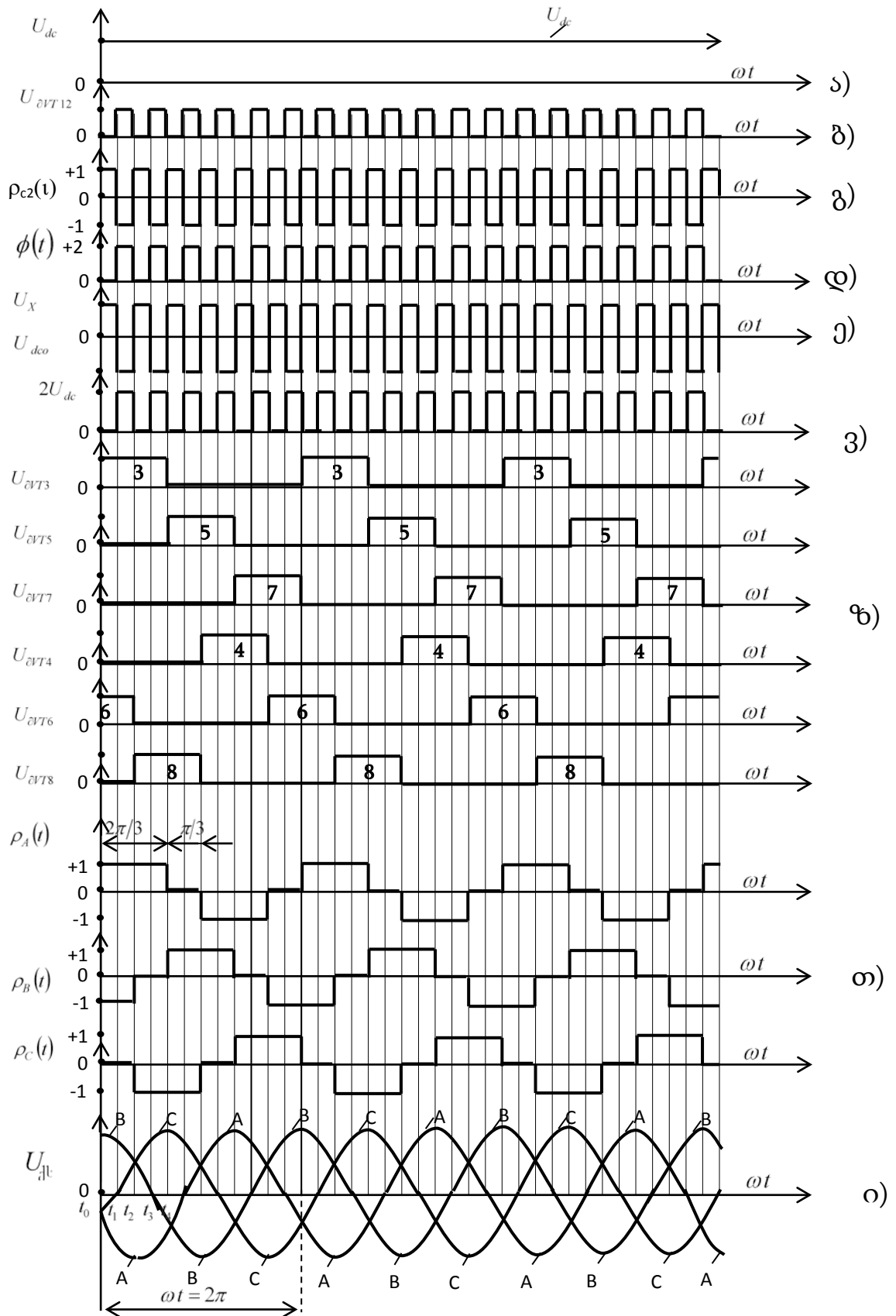
$U_x = U_{dc}\rho_{C2}(t)$; U_{dc0} ძაბვის ფორმა ემთხვევა $\Phi(t)$ ფუნქციის მნიშვნელობებს და მისი მნიშვნელობა გამოითვლება ასე:

$$U_{dc0} = U_{dc} \Phi(t) = 2U_{dc} \cdot U_{\partial VT1,2} \quad (56)$$

მეორე მხრივ გვაქვს:

$$U_{dc0} = U_{dc} + \rho_{C2}(t)U_{C2}(t) = U_{dc}\Phi(t) \quad (57)$$

სი-ში VT3 ÷ VT8 ტრანზისტორების გადართვის კანონზომიერების უზრუნველსაყოფად ვიღებთ მართვის იმპულსების შესაბამის განლაგებას (ნახ.20-ზ).



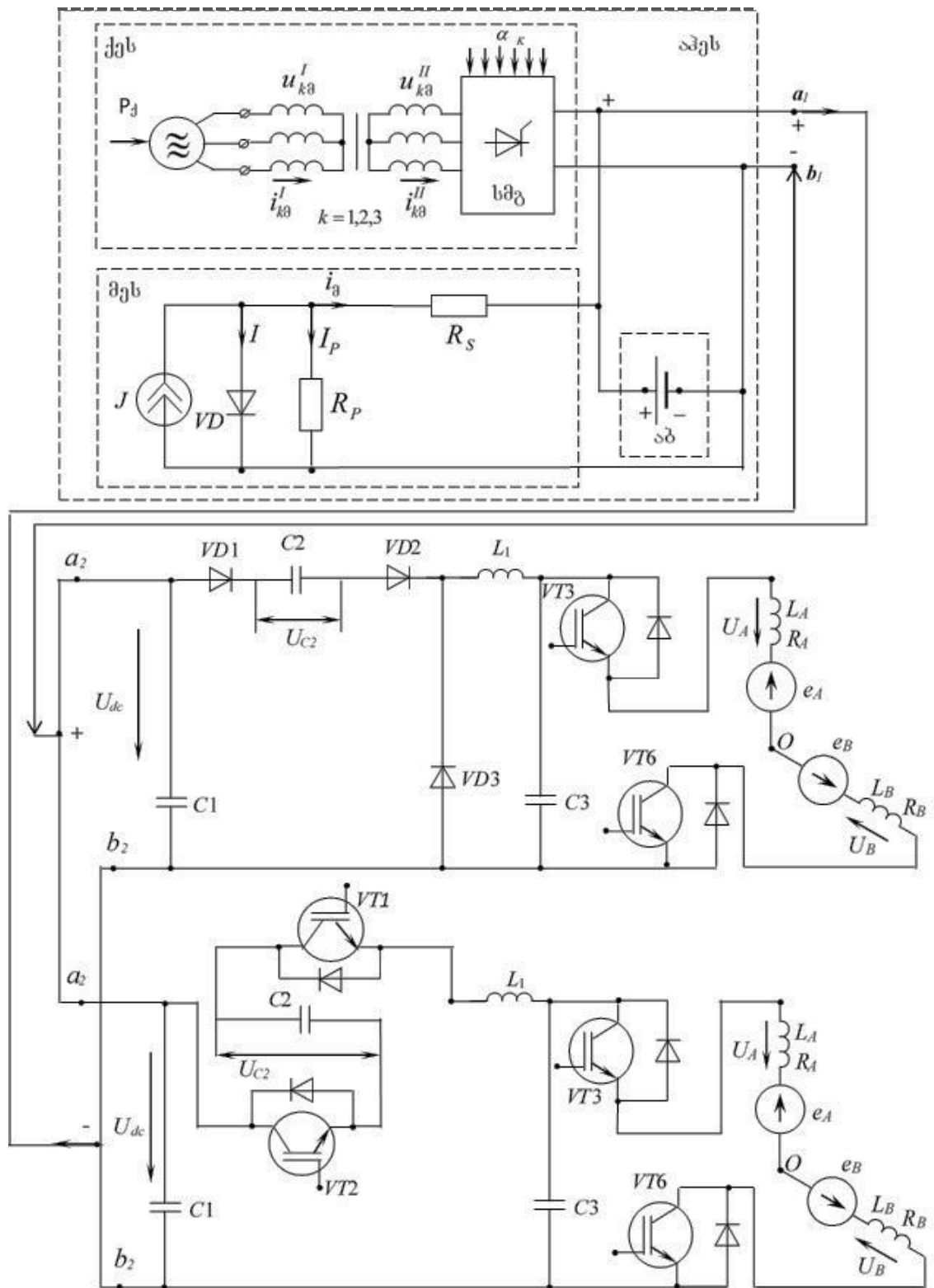
ნახ.20 ჰიბრიდული ელექტრული სადგურის გამომავალი U_{dc} ძაბვის, მართვის იმპულსების, კომუტაციური ფუნქციების და ქსელის ძაბვის დროზე დამოკიდებულების კანონზომიერება.

ფაზური დენების $\rho_A(t)$, $\rho_B(t)$, $\rho_C(t)$, კომუტაციური ფუნქციების ცვალეზადობის კანონი ნაჩვენებია ნახ-20-თ-ზე. კომუტაციური ფუნქციების არსებობა გრძელდება $\frac{2\pi}{3\omega}$ - ის შესაბამის დროში, ხოლო არ არსებობა გრძელდება $\frac{\pi}{3\omega}$ -ის შესაბამის დროში.[1].

სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის (ცდქ) ფაზური ძაბვების ტალღური დიაგრამები ნაჩვენებია ნახ.5-ი-ზე. $t = t_0 = 0$ - დან $t = t_4$ მომენტამდე ცდქ-ის ფაზური ძაბვებიდან ყველაზე უარყოფითია u_A ძაბვა, ამიტომ ამ პერიოდში ღიაა VT3 ტრანზისტორი. $t = t_4$ -დან $t = t_4 + \frac{2\pi}{3\omega}$ -მდე ღიაა VT5 ტრანზისტორი; $t = t_4 + \frac{2\pi}{3\omega}$ -დან $t = t_4 + \frac{4\pi}{3\omega}$ -მდე ღიაა VT7 ტრანზისტორი. $t = t_0 = 0$ - დან $t = t_2$ მომენტამდე ღიაა VT6 ტრანზისტორი; $t = t_2$ -დან $t = t_2 + \frac{2\pi}{3\omega}$ -მდე ღიაა VT8 ტრანზისტორი. $t = t_2 + \frac{2\pi}{3\omega}$ -დან $t = t_2 + \frac{4\pi}{3\omega}$ -მდე ღიაა VT4 ტრანზისტორი; $t = t_2 + \frac{4\pi}{3\omega}$ -დან $t = t_2 + \frac{2\pi}{\omega}$ -მდე ღიაა VT6 ტრანზისტორი; $t = t_2 + \frac{2\pi}{\omega}$ -დან $t = t_2 + \frac{8\pi}{3\omega}$ -მდე ღიაა VT8 ტრანზისტორი. შემდეგი პროცესი VT3 ÷ VT8 ტრანზისტორების გაღების წარმოებს ნახ.20-ზე ნაჩვენები თანმიმდევრობით.

2.5. ჰიბრიდული ავტონომიური ელექტროენერგეტიკული სისტემის პარალელური მუშაობის კენტი და ლუწი რეჟიმების საანგარიშო პრინციპული ელექტრული სქემის დამუშავება

ჰიბრიდულ ავტონომიური ელექტროენერგეტიკული სისტემის განზოგადებული სტრუქტურული სქემის მიხედვით, აგრეთვე მასში შემავალი ქარისა და მზის ელექტროსადგურების (ქეს და მეს), აკუმულიატორთა ბატარეის (აბ), მუდმივი დენის გარდამქმნელის(მდგ) და სამფაზა ქსელის მიმყოლი ინვერტორის (სქმი) გათვალისწინებით შეიძლება შევადგინოთ ჰიბრიდულ ავტონომიური ელექტროენერგეტიკული სისტემის პარალელური მუშაობის კენტი და ლუწი რეჟიმების საანგარიშო პრინციპული ელექტრული სქემა. (ნახ.21)



ნახ.21. ჰავს-ის პარალელური მუშაობის კენტი და ლუწი რეჟიმების საანგარიშო პრინციპული ელექტრული სქემა

სქემაში გათვალისწინებულია ჰაეს-ის პარალელური მუშაობის ერთმანეთისგან განსხვავებული I -კენტი და II -ლუწი რეჟიმები, აგრეთვე ცვლადი დენის ქსელის მიმართ ელ. მაგნიტურად თავსებადი U_A, U_B, U_C ძაბვებისა და i_A, i_B, i_C დენების მნიშვნელობები.[1].

ქარის ელექტრული სადგური (ქეს) მზის ელექტრული სადგური (მეს) და აკუმულატორთა ბატარეების სექცია (აბ) ერთმანეთთან ჩართულია პარალელურად.

ქსელის მიმყოლი ინვერტორის ექვსი სამფაზა ბოგირული სქემით ჩართული ტრანზისტორიდან ყოველი რეჟიმისათვის ღიაა მხოლოდ ორი ტრანზისტორი. ძალოვანი ტრანზისტორული გასაღებების ჩართვას და გამორთვას არეგულირებს მართვის იმპულსები.

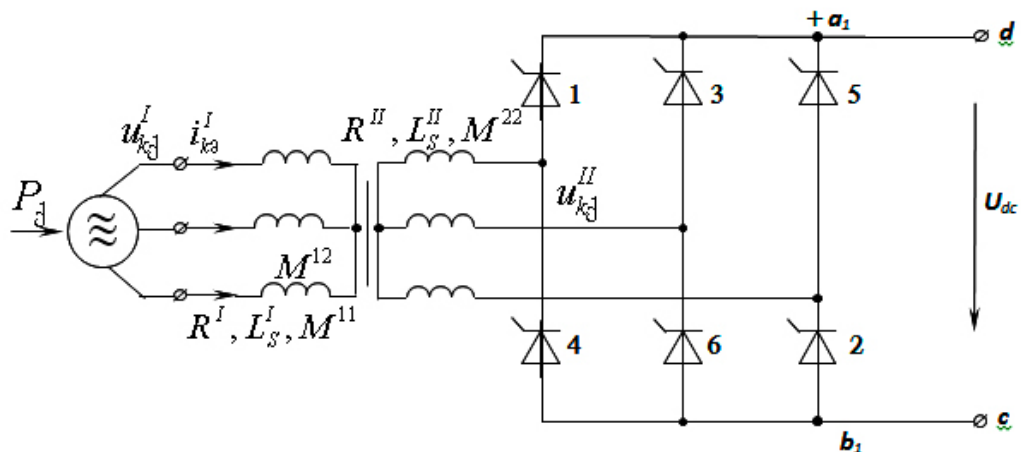
თავი 3

ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მდგრადი მუშაობის პირობებში

3.1. ქარის ელექტროსადგურისა და სამფაზა გამმართველის ერთობლივი მდგრადი მუშაობის ელექტრომაგნიტური პროცესების ელექტრული წონასწორობის განტოლებები

ავტონომიური ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემის პრინციპული ელექტრული სქემის ძირითადი მუშა ნაწილია ქარის ელექტრო სადგური (ქეს), სამფაზა ძალოვანი ტრანსფორმატორი (სძტ), სამფაზა მართვადი გამმართველი (სმგ) ნახევარგამტარულ ტირისტორებზე.

აღნიშნულ ელექტრომაგნიტურ მოწყობილობებში პროცესების აღმწერი ელექტრული წონასწორობის განტოლებების შესადგენად გამოვიყენოთ ცალკე ქარის ელექტრული სადგურის (ქეს) ერთიანი გარდამქმნელი სისტემა. ნახ.22.



ნახ.22. ქარის ელექტრული სადგურის პრინციპული ელექტრული სქემა სამფაზა ძალური ტრანსფორმატორითა და მართვადი გამმართველით უქმი სვლის რეჟიმისათვის.

ქარის გენერატორის სტატორის გრაგნილების მომჭერებზე სამფაზა ფაზური ძაბვების მყისა მნიშვნელობებისათვის გვაქვს შემდეგი გამოსახულება:

$$u_{k,j}^I = U_m^I \sin \left[\omega t - (k-1) \frac{2\pi}{3} + \delta \right], \quad (58)$$

სადაც

$$U_m^I = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{X_\Sigma C_X \rho S (V_{\text{ქარ}} - V_{\text{ვრო}})^2 \cdot V_{\text{ვრო}}}{U_m^{II} \cdot \sin \delta} \quad (59)$$

როგორც (2) გამოსახულებიდან ჩანს, ქარის გენერატორის მომჭერებზე U_m^I ძაბვის ამპლიტუდურ მნიშვნელობებში ფუნქციონირებენ ქარის ბორბალზე მოქმედი პარამეტრები: $C_X, \rho, S, V_{\text{ქარ}}, V_{\text{ვრო}}$, მიმღები ცვლადი დენის ქსელის U_m^{II} ამპლიტუდური მნიშვნელობები და U_m^I და U_m^{II} ძაბვების ვექტორებს შორის δ -ძვრის კუთხე.[5].

დამყარებულ პროცესში U_{dc} ძაბვა ქარის ელექტრული სადგურის გამოსავალზე ტოლია:

$$U_{dc} = 2.34 V^I = 2.34 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot U_m^I. \quad (60)$$

სამფაზა ძალური ტრანსფორმატორისათვის გვაქვს ფაზური მყისა სიდიდეებისადმი შემდეგი განტოლებათა სისტემა:

$$\left. \begin{aligned} u_{k,j}^I &= R^I i_{k,j}^I + \frac{d\psi_{k,j}^I}{dt}, \\ -u_{k,j}^{II} &= \frac{d\psi_{k,j}^{II}}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (61)$$

სადაც, (61) შესაბამისი ნაკადუმბებისათვის გვაქვს შემდეგი გამოსახულებები:

$$\psi_{k,j}^I = L_s^I i_{k,j}^I + \sum_{n=1}^3 M^{II} \cos(\alpha_n^I - \alpha_k^I) i_{n,j}; \quad (62)$$

$$\psi_{k,j}^{II} = \sum_{n=1}^3 M^{12} \cos(\alpha_n^I - \alpha_k^{II}) i_{n,j}; \quad k = 1,2,3. \quad (63)$$

(61) განტოლებათა სისტემის ორთავე მხარე გავამრავლოთ შესაბამისად $e^{j\alpha_k^I}, e^{j\alpha_k^{II}}$ -ზე, მივიღებთ კომპლექსურ ფორმაში განტოლებათა სისტემას:

$$u_{Kj}^I e^{j\alpha_k^I} = R^I i_{Kj}^I e^{j\alpha_k^I} + \frac{d}{dt} (\psi_{Kj}^I \cdot e^{j\alpha_k^I}); \quad (64)$$

$$-u_{Kj}^{II} e^{j\alpha_k^{II}} = \frac{d}{dt} (\psi_{Kj}^{II} \cdot e^{j\alpha_k^{II}}), \quad k = 1, 2, 3. \quad (65)$$

მიღებული (62)-(65) განტოლებები გამოსახულია ვექტორულ სიდიდეებში, რომელთა მოდულები განისაზღვრებიან დენების, ძაბვების და ნაკადუმბმის მყისა მნიშვნელობებით, ხოლო მიმართულებები – ფაზების მაგნიტური ღერძებით. ეს განტოლებები აღწერენ ძალურ ტრანსფორმატორში უქმი სვლის რეჟიმისათვის ელექტრომაგნიტურ პროცესებს მისი ძირითადი პარამეტრების გათვალისწინებით. განგარიშების გამარტივებისათვის ვიყენებთ ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდს და (64) (65) განტოლება (62) (63) გათვალისწინებით მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\frac{3}{2} U_m^I e^{j(\omega t + \delta)} = R^I \dot{I}_j^I + \left(L_s^I + \frac{3}{2} M^{11} \right) \frac{dI_j^I}{dt}, \quad (66)$$

$$-\dot{U}_j^{II} = \frac{3}{2} M^{12} \frac{dI_j^I}{dt}. \quad (67)$$

ამგვარად, სამფაზა ძალური ტრანსფორმატორისათვის ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის მეშვეობით ექვსი განტოლების მაგივრად (64,65) მივიღეთ ორი განტოლება დენებისა და ძაბვების რეზულტირებული ვექტორების მიმართ.[5].

გამოვიყენებთ რა ცვლადთა სპექტრალურ-ოპერატორულ გარდაქმნას, ვწერთ სამფაზა მართვადი გამმართველის შესავალი და გამოსავალი ელექტრული სიდიდეების მყისა მნიშვნელობებს შორის კავშირის განტოლებას უქმი სვლის რეჟიმისათვის:

$$U_{dc} = \sum_{k=1}^3 \rho_{uk}(t) u_{Kj}^{II}, \quad k = 1, 2, 3, \quad (68)$$

სადაც, (68)–ში $\rho_{uk}(t)$ –მაბვის მიხედვით კომუტაციური ფუნქციაა. იგი შეიძლება წარმოდგენილი იქნას ფურიეს მწკრივის სახეში:

$$\rho_{uk}(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \cos m \frac{\pi}{6} \cdot \sin \frac{m\gamma}{2} \sin m(\omega t - \varphi_k), \quad (69)$$

სადაც, $k = 1, 2, 3$, m – ყველა კენტი რიცხვია;

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

საწყისი განტოლებათა სისტემის ამოხსნისას შეიძლება გავითვალისწინოთ კომუტაციური ფუნქციების ჰარმონიკების ნებისმიერი რიცხვი, მაგრამ ჩაწერის მოცულობის შემცირებისთვის შემოვიფარგლოთ მხოლოდ ამ მწკრივების პირველი რიგის ჰარმონიკებით, ე.ი. გაანგარიშება ვაწარმოთ გამართული ძაბვის საშუალო მნიშვნელობის მიხედვით.

კომუტაციური ფუნქციის ძირითადი ჰარმონიკის გათვალისწინებით (68) კავშირის განტოლება მიიღებს სახეს:

$$U_{dc} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} \sum_{k=1}^3 u_{kj}'' \sin \left[\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right], \quad k = 1, 2, 3. \quad (70)$$

(70)–ში გამოვიყენოთ ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნა და შესაბამისად გვექნება:

$$U_{dc} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} R_e \left[\dot{U}_j'' e^{-j \left(\omega t - \alpha_p - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2} \right)} \right] \quad (71)$$

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

(66) (67) და (71) განტოლებები წარმოადგენენ გამოსაკვლევი გარდამქმნელი სისტემის სრულ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემას. ამ განტოლებათა სისტემის ამოხსნა გვამღებს საშუალებას განვსაზღვროთ რეზულტირებული კომპლექსური სიდიდეები \dot{I}_j^I , \dot{I}_j^{II} და U_{dc} გამართული ძაბვა.

თუ გამოვიყენებთ ცვლადთა კომპლექსურ უკუგარდაქმნას, ძალური ტრანსფორმატორის ფაზური დენებისათვის და ძაბვებისათვის ვღებულობთ:

$$i'_{kj} = \frac{2}{3} \left\{ I'_{jd} \cos \left[\alpha'_p + (k-1) \frac{2\pi}{3} \right] + I'_{jq} \sin \left[\alpha'_p + (k-1) \frac{2\pi}{3} \right] \right\}, \quad (72)$$

$$u''_{kj} = \frac{2}{3} \left\{ U''_{jd} \cos \left[\alpha'_p + (k-1) \frac{2\pi}{3} \right] + U''_{jq} \sin \left[\alpha'_p + (k-1) \frac{2\pi}{3} \right] \right\}. \quad (73)$$

3.2. მზის ელექტრული სადგურისა და აკუმულიატორული ბატარეების ერთობლივი მუშაობის ელექტრული წონასწორობის განტოლებები

ნახ.21-ზე მზის ელექტროსადგურის და მასთან პარალელურად მიერთებული აკუმულიატორული ბატარეის შენაცვლების სქემის მუშაობის ელექტრული წონასწორობის განტოლებები უქმი სვლის რეჟიმისათვის წარმოდგინება ასეთნაირად:

$$E_{\text{მზ}} - E_{\text{სბ}} = I_p R_p + i_{\text{ფ}} R_s + i_{\text{სბ}} R_{\text{სბ}}, \quad (74)$$

სადაც $E_{\text{მზ}} = J \cdot R_p$ არის მზის ელემენტის დენის წყაროს ექვივალენტური ძაბვის წყაროდ გარდაქმნის ე.მ.ძალაა; $E_{\text{სბ}}$ – აკუმულიატორული ბატარეის ე.მ.ძალაა; $R_{\text{სბ}}$ – აკუმულიატორული ბატარეის შიგა წინააღობაა. (74) გამოსახულება ჩაიწერება ასეთნაირად:

$$\left. \begin{aligned} J \cdot R_p - E_{\text{სბ}} &= I_p R_p + i_{\text{ფ}} R_s + i_{\text{სბ}} R_{\text{სბ}}; \\ U_{a_1 b_1} &= U_{a_2 b_2} = U_{dc}; \end{aligned} \right\} \quad (75)$$

დენების შესაბამისად, ვღებულობთ შემდეგ განტოლებებს:

$$\left. \begin{aligned} J &= I + I_p + i_{\text{ფ}}, \\ i_{\text{მზ}} &= i_{\text{ფ}} + i_{\text{სბ}}. \end{aligned} \right\} \quad (76)$$

**3.3. ავტონომიური ჰიბრიდული ერთიანი ენერგოსისტემის
ელექტრული წონასწორობის განტოლებები უქმი სვლის
და დატვირთვის რეჟიმში**

ნახ.21–ზე მოყვანილია ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემის პარალელური მუშაობის კენტი და ლუწი რეჟიმების საანგარიშო პრინციპული სქემა. პარალელურად შეერთებული ქარის ელექტრული სადგურის, მზის ელექტრული სადგურისა და აკუმულიატორული ბატარეის მუშაობის შესაბამისი ელექტრომაგნიტური პროცესების აღმწერ განტოლებებს უქმი სვლის რეჟიმისთვის აქვს შემდეგი სახე:

$$\left. \begin{aligned}
 U_m^I \sin \left[\omega t - (k-1) \frac{2\pi}{3} + \delta \right] &= R^I i_{Kj}^I + \frac{d\psi_{Kj}^I}{dt}; \quad k = 1, 2, 3; \\
 -u_{Kj}^{II} &= \frac{d\psi_{Kj}^{II}}{dt}; \\
 \psi_{Kj}^I &= L_S^I i_{Kj}^I + \sum_{k=1}^3 M^{11} \cos(\alpha_n^I - \alpha_k^I) i_{Kj}^I; \\
 \psi_{Kj}^{II} &= \sum_{k=1}^3 M^{12} \cos(\alpha_n^I - \alpha_k^{II}) i_{Kj}^I; \quad k = 1, 2, 3; \\
 J \cdot R_p - E_{s\delta} &= I_p R_p + i_{\vartheta} R_s + i_{s\delta} R_{s\delta}; \quad U_{a_1 b_1} = U_{a_2 b_2} = U_{dc}; \\
 J &= I + I_p + i_{\vartheta}; \quad i_{\vartheta s} = i_{\vartheta} + i_{s\delta}.
 \end{aligned} \right\} \quad (77)$$

წარმოდგენილი (77) განტოლებათა სისტემა საშუალებას იძლევა ავტონომიური ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემის გამოსასვლელზე განვსაზღვროთ U_{dc} ძაბვის დროზე დამოკიდებულების კანონი მათი უქმი სვლის რეჟიმებისათვის.

ავტონომიური ჰიბრიდული ერთიანი ენერგოსისტემის ელექტრული წონასწორობის (77) განტოლებათა სისტემა დატვირთვის რეჟიმისათვის მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\left. \begin{aligned}
U_m^I \sin \left[\omega t - (k-1) \frac{2\pi}{3} + \delta \right] &= R^I i_{Kj}^I + \frac{d\psi_{Kj}^I}{dt}; \quad k = 1, 2, 3; \\
-u_{Kj}^{II} &= R^{II} i_{Kj}^{II} + \frac{d\psi_{Kj}^{II}}{dt}; \\
\psi_{Kj}^I &= L_S^I i_{Kj}^I + \sum_{k=1}^3 \left[M^{11} \cos(\alpha_n^I - \alpha_k^I) i_{Kj}^I + M^{12} \cos(\alpha_n^{II} - \alpha_k^I) i_{nj}^{II} \right] \\
\psi_{Kj}^{II} &= L_S^{II} i_{Kj}^{II} + \sum_{k=1}^3 \left[M^{22} \cos(\alpha_n^{II} - \alpha_k^{II}) i_{Kj}^{II} + M^{12} \cos(\alpha_n^I - \alpha_k^{II}) i_{nj}^I \right] \\
k &= 1, 2, 3; \\
J \cdot R_p - E_{\delta\delta} &= I_p R_p + i_{\delta} R_S + i_{\delta\delta} R_{\delta\delta}; \quad U_{a_1 b_1} = U_{a_2 b_2} = U_{dc}; \\
J &= I + I_p + i_{\delta}; \\
i_{\delta\delta} &= i_{\delta} + i_{\delta\delta}.
\end{aligned} \right\} (78)$$

3.4. მუდმივი დენის გარდამქმნელის, სამფაზა ქსელის მიმყოლი ინვერტორის და სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის ერთობლივი პარალელური მდგრადი მუშაობის პირობებში ელექტრული წონასწორობის განტოლებები

მუდმივი დენის გარდამქმნელში (მდგ) VT1, VT2 ტრანზისტორები სისტემის მუშაობის ყველა რეჟიმში ან ჩაკეტილია, ან ღია მდგომარეობაშია, ხოლო სამფაზა ქსელის მიმყოლი ინვერტორის (სქემი) VT3 ÷ VT8 ტრანზისტორების ჩაკეტვა-გაღების მდგომარეობა მიმყოლია ცვლადი დენის ქსელის ფაზური ძაბვების ცვლილებასთან.

ავტონომიური ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემის და სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის ერთობლივი მუშაობის ერთი მთლიანი ციკლისათვის საჭიროა განხილული იყოს 12 რეჟიმი ($U_{dc} > U$).

როგორც აღინიშნა განხილული რეჟიმებიდან კენტი რიგის რეჟიმების ამსახველი სქემის ტოპოლოგია სტრუქტურულად ერთმანეთის მსგავსია. ფიქსირდება VDI,2 დიოდებისა და C2 კონდენსატორის მიმდევრობითი შეერთებები. განსხვავება არის VT3 ÷ VT8 ძალური ტრანზისტორების და სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის A, B, C ფაზების გადართვების

თანმიმდევრობაში. ასევე ითქმის ყველა ლუწი რიგის რეჟიმების შესახებ, სადაც დაფიქსირებულია $V_{T1,2}$ ტრანზისტორების და C_2 კონდენსატორის მიმდევრობითი შეერთება. ნახ.18 და ნახ19-ზე. ნაჩვენებია ორი ერთმანეთისაგან განსხვავებული I (კენტი) და II (ლუწი) რეჟიმების საანგარიშო პრინციპული ელექტრული სქემები.

ნახ.18 სქემიდან ყველა კენტი რეჟიმებისათვის გვაქვს შემდეგი განტოლებები მყისა მნიშვნელობების მიმართ:

I რეჟიმი ($0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{6}$):

$$i = C_1 \frac{du_{c1}}{dt} + C_2 \frac{du_{c2}}{dt}; \quad (79)$$

$$u_1 = u_{c2} + u_{dc0}; \quad (80)$$

$$u_{dc0} = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + u_{c3}; \quad (81)$$

$$i_{L1} = C_3 \frac{du_{c3}}{dt} + i_A; \quad (82)$$

$$U_{dc} = u_{c2} + u_{dc0}; \quad (83)$$

$$u_{A0} = -U_{mc} \sin(\omega t + 30^\circ); \quad (84)$$

$$\sqrt{3}U_{mc} \sin(\omega t + 60^\circ) = 2R_A i_A + 2 \left(L_A + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12} \right) \frac{di_A}{dt}; \quad (85)$$

$$\sqrt{3}U_{mc} \sin(\omega t + 60^\circ) = 2R_B i_B + 2 \left(L_B + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12} \right) \frac{di_B}{dt}; \quad (86)$$

$$u_{c3} = u_{dc} = -\sqrt{3}U_{mc} \sin(\omega t + 60^\circ); \quad (87)$$

$$u_{c1} = u_{c2} + u_{dc0}; i_A = i_B \quad (88)$$

(79)-(88) განტოლებების საფუძველზე სქემის ელექტრული სიდიდეების განსაზღვრის ალგორითმი მდგომარეობს შემდეგში:

- (87)-დან ვიღებთ C_3 კონდენსატორზე U_{c3} ძაბვის მნიშვნელობას;
- (85), (86)-დან განვსაზღვრავთ დენს $i_A = i_B$;
- (87)-დან ვითვალისწინებთ ტოლობას $u_{dc} = u_{c3}$;
- (82)-დან განვსაზღვრავთ i_{L1} დენს;
- (81)-დან განვსაზღვრავთ u_{dc0} ძაბვას;
- (83)-დან განისაზღვრება u_{c2} ძაბვა;
- (88)-დან განისაზღვრება u_{c1} ძაბვა;
- (79)-დან განისაზღვრება i დენი;

III რვეუბი $\left(\frac{2\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{3\pi}{6}\right)$:

$$i_A = i_C ; \quad (89)$$

$$u_{dc} = u_{c3} = u_{Ac} = u_{A0} - u_{c0}; \quad (90)$$

$$u_{A0} = -U_{mc} \sin(\omega t + 90^0); \quad (91)$$

$$u_{c0} = U_{mc} \sin(\omega t + 30^0); \quad (92)$$

$$u_{c3} = u_{dc} = -\sqrt{3}U_{mc} \sin(\omega t + 60^0); \quad (93)$$

$$i = C_1 \frac{du_{c1}}{dt} + C_2 \frac{du_{c2}}{dt}; \quad (94)$$

$$u_{c1} = u_{c2} + u_{dc0};$$

$$u_{dc0} = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + u_{c3}; \quad (95)$$

$$i_{L1} = C_3 \frac{du_{c3}}{dt} + i_A; \quad (96)$$

$$\sqrt{3}U_{mc} \sin(\omega t + 60^0) = 2R_A i_A + 2 \left(L_A + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12} \right) \frac{di_A}{dt}; \quad (97)$$

$$\sqrt{3}U_{mc} \sin(\omega t + 60^0) = 2R_C i_C + 2 \left(L_C + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12} \right) \frac{di_C}{dt}; \quad (98)$$

V რვეუბი $\left(\frac{4\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{5\pi}{6}\right)$:

$$i_B = i_C ; \quad (99)$$

$$u_{c3} = u_{dc} = -\sqrt{3}U_{mc} \sin(\omega t + 60^0); \quad (100)$$

$$u_{B0} = -U_{mc} \sin(\omega t + 30^0); \quad (101)$$

$$u_{c0} = U_{mc} \sin(\omega t + 90^0); \quad (102)$$

$$i = C_1 \frac{du_{c1}}{dt} + C_2 \frac{du_{c2}}{dt}; \quad (103)$$

$$u_{c1} = u_{c2} + u_{dc0}; \quad (104)$$

$$u_{dc0} = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + u_{c3}; \quad (105)$$

$$i_{L1} = C_3 \frac{du_{c3}}{dt} + i_B; \quad (106)$$

$$\sqrt{3}U_{mc} \sin(\omega t + 60^0) = 2R_B i_B + 2 \left(L_B + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12} \right) \frac{di_B}{dt}; \quad (107)$$

$$\sqrt{3}U_{mc} \sin(\omega t + 60^0) = 2R_C i_C + 2 \left(L_C + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12} \right) \frac{di_C}{dt}; \quad (108)$$

VII რვეუბი $\left(\frac{6\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{7\pi}{6}\right)$:

$$i_B = i_A ; \quad (109)$$

$$u_{c3} = u_{dc} = u_{BA} = u_{B0} - u_{A0}; \quad (110)$$

$$u_{BO} = -U_{mc} \sin(\omega t + 90^0); \quad (111)$$

$$u_{AO} = U_{mc} \sin(\omega t + 30^0); \quad (112)$$

$$u_{C3} = u_{dc} = -\sqrt{3}U_{mc} \sin(\omega t + 60^0); \quad (113)$$

i დენი, u_{c1} ძაბვა, u_{dc0} ძაბვა და i_{L1} დენი გამოისახებიან (103),(104),(105) და (106) გამოსახულებებით.

$$\sqrt{3}U_{mc} \sin(\omega t + 60^0) = 2R_B i_B + 2 \left(L_B + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12} \right) \frac{di_B}{dt}; \quad (114)$$

$$\sqrt{3}U_{mc} \sin(\omega t + 60^0) = 2R_A i_A + 2 \left(L_A + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12} \right) \frac{di_A}{dt}; \quad (115)$$

IX რეჟიმი $\left(\frac{8\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{9\pi}{6} \right)$:

$$i_C = i_A; \quad (116)$$

$$u_{C3} = u_{dc} = u_{CA} = u_{CO} - u_{AO}; \quad (117)$$

$$u_{CO} = -U_{mc} \sin(\omega t + 30^0); \quad (118)$$

$$u_{AO} = U_{mc} \sin(\omega t + 90^0); \quad (119)$$

$$u_{C3} = u_{dc} = -\sqrt{3}U_{mc} \sin(\omega t + 60^0); \quad (120)$$

$$\sqrt{3}U_{mc} \sin(\omega t + 60^0) = 2R_C i_C + 2 \left(L_C + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12} \right) \frac{di_C}{dt}; \quad (121)$$

$$\sqrt{3}U_{mc} \sin(\omega t + 60^0) = 2R_A i_A + 2 \left(L_A + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12} \right) \frac{di_A}{dt}; \quad (122)$$

აქაც და XI რეჟიმისათვის

i , u_{c1} , u_{dc0} და i_{L1} სიდიდეები განისაზღვრებიან შესაბამისად (103)-(106) გამოსახულებებით.

XI რეჟიმი $\left(\frac{10\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{11\pi}{6} \right)$:

$$i_C = i_B; \quad (123)$$

$$u_{C3} = u_{dc} = u_{CB} = u_{CO} - u_{BO}; \quad (124)$$

$$u_{CO} = -U_{mc} \sin(\omega t + 90^0); \quad (125)$$

$$u_{BO} = U_{mc} \sin(\omega t + 30^0); \quad (126)$$

$$u_{C3} = u_{dc} = -\sqrt{3}U_{mc} \sin(\omega t + 60^0); \quad (127)$$

$$\sqrt{3}U_{mc} \sin(\omega t + 60^0) = 2R_C i_C + 2 \left(L_C + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12} \right) \frac{di_C}{dt}; \quad (128)$$

$$\sqrt{3}U_{mc} \sin(\omega t + 60^0) = 2R_B i_B + 2 \left(L_B + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12} \right) \frac{di_B}{dt}; \quad (129)$$

ლუწი რეჟიმებისათვის გვაქვს შემდეგი განტოლებები მყის მნიშვნელობების მიმართ:

II რეჟიმი $\left(\frac{\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{2\pi}{6}\right)$:

$$i_A = i_B; \quad i_{VD3} = 0; \quad i_{C2} = i_{L1}; \quad (130)$$

$$u_{dc} = u_{C2} + u_{dc0}; \quad u_{dc0} = u_{L1} + u_{dc}; \quad (131)$$

$$u_{dc} = u_{C3} = u_{AO} - u_{BO}; \quad (132)$$

$$u_{AO} = -U_{mc} \sin(\omega t + 60^\circ); \quad (133)$$

$$u_{BO} = U_{mc} \sin(\omega t + 120^\circ); \quad (134)$$

$$u_{dc} = u_{C3} = \sqrt{3} U_{mc} \sin(\omega t + 90^\circ); \quad (135)$$

$$U_{mc} \sin 60^\circ \sin(\omega t + 90^\circ) = R_C i_A + \left(L_C + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12}\right) \frac{di_A}{dt}; \quad (136)$$

IV რეჟიმი $\left(\frac{3\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{4\pi}{6}\right)$:

ყველა ლუწ რეჟიმში სამართლიანია (130)-(135) გამოსახულებები $i_A = i_B$ ტოლობის გარდა.

შესაბამისად, ამ რეჟიმში გვაქვს შემდეგი განტოლებები:

$$i_A = i_C; \quad (137)$$

$$U_{mc} \sin 60^\circ \sin(\omega t + 90^\circ) = R_C i_A + \left(L_C + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12}\right) \frac{di_A}{dt}; \quad (138)$$

VI რეჟიმი $\left(\frac{5\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{6\pi}{6}\right)$:

$$i_B = i_C; \quad (139)$$

$$U_{mc} \sin 60^\circ \sin(\omega t + 90^\circ) = R_C i_B + \left(L_C + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12}\right) \frac{di_B}{dt}; \quad (140)$$

VIII რეჟიმი $\left(\frac{7\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{8\pi}{6}\right)$:

$$i_B = i_A; \quad (141)$$

$$U_{mc} \sin 60^\circ \sin(\omega t + 90^\circ) = R_C i_B + \left(L_C + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12}\right) \frac{di_B}{dt}; \quad (142)$$

X რეჟიმი $\left(\frac{9\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{10\pi}{6}\right)$:

$$i_C = i_A; \quad (143)$$

$$U_{mc} \sin 60^\circ \sin(\omega t + 90^\circ) = R_C i_C + \left(L_C + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12}\right) \frac{di_C}{dt}; \quad (144)$$

XII რეჟიმი $\left(\frac{11\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{12\pi}{6}\right)$:

$$i_C = i_B; \quad (145)$$

$$U_{mc} \sin 60^\circ \sin(\omega t + 90^\circ) = R_c i_c + \left(L_c + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12} \right) \frac{di_c}{dt}; \quad (146)$$

როგორც მიღებული განტოლებებიდან ჩანს აქ გათვალისწინებულია სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის ექვივალენტური აქტიური წინაღობა $2R_K (K = A, B, C)$ და ექვივალენტური ინდუქციურობა $2 \left(L_K + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12} \right)$ ($K = A, B, C$) სადაც $L_K (K = A, B, C)$ თითოეული ფაზის ინდუქციურობაა, M^{11} თითოეული ფაზის სრული ინდუქციურობაა, ხოლო M^{12} კი ფაზებს შორის ურთიერთ ინდუქციურობაა.

გარდა ამისა, კენტ რეჟიმებში ექვივალენტური სინუსოიდების ამპლიტუდების მნიშვნელობები ორჯერ მეტია ლუწ რეჟიმში ექვივალენტური სინუსოიდების ამპლიტუდებზე.

თითოეული რეჟიმებში წარმოდგენილი განტოლებების საფუძველზე შესაბამისი სქემისათვის ყველა ელექტრული სიდიდეების სრულად განსაზღვრისათვის ვიყენებთ I რეჟიმისათვის წარმოდგენილ ალგორითმებს.

3.5. ჰიბრიდული ავტონომიური ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის ელექტრული წონასწორობის განტოლებების ამოხსნა

(136) და (146) ელექტრული წონასწორობის განტოლებების ამოხსნის პროცესში შემოვიღოთ შემდეგი ექვივალენტური პარამეტრების და ელექტრული სიდიდეების თითოეულ რეჟიმებში საწყისი მნიშვნელობების მოცემულ პარამეტრებზე დამოკიდებულების გამოსახულებები:

- სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის ექვივალენტური სრული წინაღობა:

$$Z_c = \sqrt{R_c^2 + (\omega L_c)^2}; \quad (147)$$

- ექვივალენტური სრული ინდუქციურობა:

$$L_c = L_k + M^{11} - \frac{1}{2} M^{12}; \quad (148)$$

- სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის ფაზურ ძაბვასა და ხაზურ დენს შორის ძვრის კუთხის 90^0 -მდე შემავსებელი (დამატებითი) კუთხე:

$$\varphi_c = \operatorname{arctg} \frac{R_c}{\omega L_c}; \quad (149)$$

- ცვლადი დენის ქსელის დროის მუდმივა:

$$\tau_c = \frac{L_c}{R_c}; \quad (150)$$

- ქსელის ხაზური დენების ექვივალენტური ამპლიტუდების განზოგადებული კოეფიციენტები ნებისმიერი n - ინტერვალებისათვის ნებისმიერი k -ფაზებისათვის ($k = A, B, C; n = 1, 2, 3 \dots$)

$$\left. \begin{aligned} -I_{km1}^{2n-1} &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{U_{mc}}{Z_c}; & I_{km1}^{2n} &= \sqrt{3} \cdot \frac{U_{mc}}{Z_c} \\ I_{km2}^{2n-1} &= \frac{U_{mc} \left(\frac{\sqrt{3}}{4} \omega L_c - \frac{3}{4} R_c \right)}{R_c^2 + (\omega L_c)^2}; & I_{km2}^{2n} &= \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} U_{mc} \cdot R_c}{Z_c^2} \end{aligned} \right\} \quad (151)$$

- ცვლადი დენის ქსელის ხაზური დენების განზოგადებული საწყისი მნიშვნელობები ნებისმიერი n - რეჟიმის შესაბამისი ინტერვალებისათვის:

$$\begin{aligned} i_k^{2n-1}(0) &= i_k^{2(n-1)}(0) e^{-2(n-1) \frac{\pi}{6\omega\tau_c}} - I_{km1}^{2n} \cos \left[2(n-1) \frac{\pi}{6} + \varphi_c + 90^0 \right] - \\ &\quad - I_{km2}^{2n} e^{-2(n-1) \frac{\pi}{6\omega\tau_c}}, \quad k=A, B, C; \quad n=2, 3, 4, \dots \end{aligned} \quad (152)$$

$$\begin{aligned} i_k^{2n}(0) &= i_k^{2n-1}(0) e^{-2(n-1) \frac{\pi}{6\omega\tau_c}} - I_{km1}^{2n} \cos \left[(2n-1) \frac{\pi}{6} + \varphi_c + 60^0 \right] + \\ &\quad + I_{km2}^{2n-1} e^{-(2n-1) \frac{\pi}{6\omega\tau_c}}, \quad k=A, B, C; \quad n=1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (153)$$

- მუდმივი დენის გარდამქმნელის (მდგ) გამოსავალზე U_{dco} ძაბვის ექვივალენტური მდგენელების კოეფიციენტები:

$$U_{dco1}^{2n} = \left\{ \left[\sqrt{3} U_{mc} (\omega^2 L_1 C_3 - 1) + \omega L_1 \cdot I_{km1}^{2n} \cdot \cos \varphi_c \right]^2 + (\omega L_1 I_{km1}^{2n} \sin \varphi_c)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (154)$$

$$U_{dco2}^{2n} = \frac{L_1}{\tau_c} [i_k^{2n}(0) - I_{km2}^{2n}] e^{-\frac{t_{2n}}{\tau_c}}, \quad k=A, B, C; \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (155)$$

- U_{dco} ძაბვასა და $i_{c2} = i_{L1}$ დენს შორის ექვივალენტური ძვრის კუთხე:

$$\varphi_{udco}^{2n} = \operatorname{arctg} \frac{\omega L_1 I_{km1}^{2n} \sin \varphi_c}{\sqrt{3} U_{mc} (\omega^2 L_1 C_3 - 1) + \omega L_1 I_{km1}^{2n} \cos \varphi_c}; \quad (156)$$

- u_{c2} ძაბვის ექვივალენტური მდგენელების კოეფიციენტები:

$$-u'_{c2} = \left\{ \left[\sqrt{3}U_{mc}(\omega^2 L_1 C_3 - 1) + \omega L_1 I_{km1}^{2n-1} \cos \varphi_c \right]^2 + (\omega L_1 I_{km1}^{2n-1} \sin \varphi_c)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (157)$$

$$u''_{c2} = \frac{L_1}{\tau_c} [i_k^{2n-1}(0) + I_{km2}^{2n-1}], \quad k=A,B,C; \quad n=1,2,3, \dots \quad (158)$$

- ფოტოელექტრული სადგურის გამოსავალზე ან მდგ-ის შესავალზე i დენის კოეფიციენტები:

$$i'_{2n-1} = \sqrt{3}U_{mc} \cdot \omega c_2 \left\{ \left[\omega L_1 \left(\omega C_3 + \frac{1}{2} G_c \right) - 1 \right]^2 + \left(\frac{1}{2} B_c \omega L_1 \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}; \quad (159)$$

$$i''_{2n-1} = \frac{L_1 C_2}{\tau_c^2} \left[i_k^{2n-1}(0) + U_{mc} \cdot \frac{\sqrt{3}}{4} (B_c - \sqrt{3} G_c) \right], \quad (160)$$

$$i'_{2n} = \sqrt{3}U_{mc} \omega c_2 \{ [\omega L_1 (\omega C_3 + G_c) - 1]^2 + (\omega L_1 B_c)^2 \}^{\frac{1}{2}}; \quad (161)$$

$$i''_{2n} = \frac{L_1 C_2}{\tau_c^2} \left[i_k^{2n}(0) - \frac{\sqrt{3}}{2} U_{mc} G_c \right] \quad (162)$$

- შესაბამის ინტერვალებში i დენსა და U_{dc} ძაბვას შორის ექვივალენტური ძვრის კუთხეები:

$$\varphi'_i = \arctg \frac{\frac{1}{2} \omega L_1 B_c}{\omega L_1 \left(\omega C_3 + \frac{1}{2} G_c \right) - 1}; \quad (163)$$

$$\varphi''_i = \arctg \frac{\omega L_1 B_c}{\omega L_1 (\omega C_3 + G_c) - 1}; \quad (164)$$

- სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის აქტიური G_c და რეაქტიული B_c გამტარობები:

$$G_c = \frac{R_c}{R_c^2 + (\omega L_c)^2}; \quad (165)$$

$$B_c = \frac{\omega L_c}{R_c^2 + (\omega L_c)^2}; \quad (166)$$

განტოლებების ამოხსნის შედეგად თითოეული ელექტრული სიდიდისათვის ვღებულობთ ნებისმიერი $2n - 1$ კენტი და $2n$ ლუწი რეჟიმებისათვის შემდეგ გამოსახულებებს

$$i^{2n-1}(t_{2n-1}) = -i'_{2n-1} \cos(\omega t_{2n-1} + \varphi'_i + 60^\circ) - i''_{2n-1} e^{-\frac{t_{2n-1}}{\tau_c}}; \quad k=A,B,C; \quad n=1,2,3, \dots \quad (167)$$

$$i^{2n}(t_{2n}) = -i'_{2n} \cos(\omega t_{2n} + \varphi''_i + 90^\circ) - i''_{2n} e^{-\frac{t_{2n}}{\tau_c}}; \quad k=A,B,C; \quad n=1,2,3, \dots \quad (168)$$

$$i_{c1}^{2n-1}(t_{2n-1}) = 0; \quad i_{c1}^{2n}(t_{2n}) = 0; \quad (169)$$

$$u_{c1}^{2n-1}(t_{2n-1}) = U_{dc}; \quad u_{c1}^{2n}(t_{2n}) = U_{dc}; \quad (170)$$

$$u_{c2}^{2n-1}(t_{2n-1}) = U_{dc} - u_{c2}' \sin(\omega t_{2n-1} + \varphi_{uc2} + 60^\circ) + u_{c2}'' e^{-\frac{t_{2n-1}}{\tau_c}};$$

$$k=A,B,C; \quad n=1,2,3, \dots \quad (171)$$

$$u_{c2}^{2n}(t_{2n}) = U_{dc} - u_{dc0}' \sin(\omega t_{2n} + \varphi_{udco} + 90^\circ) + u_{dc0}'' e^{-\frac{t_{2n}}{\tau_c}};$$

$$k=A,B,C; \quad n=1,2,3, \dots \quad (172)$$

$$u_{dco}^{2n-1}(t_{2n-1}) = u_{dco1}^{2n-1} \sin(\omega t_{2n-1} + \varphi_{udco}^{2n-1} + 60^\circ) - u_{dco2}^{2n-1} e^{-\frac{t_{2n-1}}{\tau_c}};$$

$$k=A,B,C; \quad n=1,2,3, \dots \quad (173)$$

$$u_{dco}^{2n}(t_{2n}) = u_{dco1}^{2n} \sin(\omega t_{2n} + \varphi_{udco}^{2n} + 90^\circ) - u_{dco2}'' e^{-\frac{t_{2n}}{\tau_c}};$$

$$k=A,B,C; \quad n=1,2,3, \dots \quad (174)$$

(173) გამოსახულებაში კოეფიციენტებისათვის გვაქვს:

$$u_{dco1}^{2n-1} = \left\{ [\sqrt{3}U_{mc}(\omega^2 L_1 C_3 - 1) + \omega L_1 I_{km1}^{2n-1} \cos \varphi_c]^2 + (\omega L_1 I_{km1}^{2n-1} \sin \varphi_c)^2 \right\}^{\frac{1}{2}};$$

$$k=A,B,C; \quad n=1,2,3, \dots \quad (175)$$

$$u_{dco2}^{2n-1} = \frac{L_1}{\tau_c} [i_k^{2n-1}(0) + I_{km2}^{2n-1}] e^{-\frac{t_{2n-1}}{\tau_c}}, \quad k=A,B,C; \quad n=1,2,3, \dots$$

ექვივალენტური კუთხისათვის გვაქვს:

$$\varphi_{udco}^{2n-1} = \arctg \frac{\omega L_1 I_{km1}^{2n-1} \sin \varphi_c}{\sqrt{3}U_{mc}(\omega^2 L_1 C_3 - 1) + \omega L_1 I_{km1}^{2n-1} \cos \varphi_c}$$

$$k=A,B,C; \quad n=1,2,3, \dots \quad (176)$$

$$i_{L1}^{2n-1}(t_{2n-1}) = -\sqrt{3}U_{mc} \cdot \omega c_3 \cos(\omega t_{2n-1} + 60^\circ) -$$

$$-I_{km1}^{2n-1} \cos(\omega t_{2n-1} + \varphi_c + 60^\circ) + [i_k^{2n-1}(0) + I_{km2}^{2n-1}] e^{-\frac{t_{2n-1}}{\tau_c}};$$

$$k=A,B,C; \quad n=1,2,3, \dots \quad (177)$$

$$i_{L1}^{2n}(t_{2n}) = -\sqrt{3}U_{mc} \cdot \omega c_3 \cos(\omega t_{2n} + 90^\circ) -$$

$$-I_{km1}^{2n} \cos(\omega t_{2n} + \varphi_c + 90^\circ) + [i_k^{2n}(0) - I_{km2}^{2n}] e^{-\frac{t_{2n}}{\tau_c}};$$

$$k=A,B,C; \quad n=1,2,3, \dots \quad (178)$$

$$i_k^{2n-1}(t_{2n-1}) = -I_{km1}^{2n-1} \cos(\omega t_{2n-1} + \varphi_c + 60^\circ) + [i_k^{2n-1}(0) + I_{km2}^{2n-1}] e^{-\frac{t_{2n-1}}{\tau_c}};$$

$$k=A,B,C; \quad n=1,2,3, \dots \quad (179)$$

$$i_k^{2n}(t_{2n}) = -I_{km1}^{2n} \cos(\omega t_{2n} + \varphi_c + 90^\circ) + [i_k^{2n}(0) - I_{km2}^{2n}] e^{-\frac{t_{2n}}{\tau_c}};$$

$$k=A,B,C; \quad n=1,2,3, \dots \quad (180)$$

მიღებული (167)-(180) გამოსახულებები საშუალებებს იძლევიან განვსაზღვროთ შესაბამისი ელექტრული სიდიდეები, როგორც დამყარებულ, ასევე გარდამავალ პროცესებში.

ყველა ელექტრული სიდიდე დროის ერთი და იგივე მომენტში აღწევს თავის დამყარებულ მნიშვნელობებს.

იმისათვის, რომ განისაზღვროს იმ n ინტერვალის ნომრის მნიშვნელობა, რომლის დროსაც მყარდება დამყარებული პროცესი და წინა კენტ ინტერვალში რომელიმე ელექტრული სიდიდის საშუალო მნიშვნელობა ტოლი ხდება მომდევნო ლუწ ინტერვალში იმავე ელექტრული სიდიდის საშუალო მნიშვნელობისა, საჭიროა ჩატარდეს ასეთი გაანგარიშების პროცესი:

ვიღებთ ზოგადობის შეუზღუდავად $i^{2n-1}(t_{2n-1})$ და $i^{2n}(t_{2n})$ გამოსახულებების მნიშვნელობებს შესაბამისად $2n - 1$ და $2n$ ინტერვალისათვის. (167), (168) გამოსახულების საფუძველზე თითოეულ ინტერვალში ამ დენის საშუალო მნიშვნელობა გამოისახება ფორმულით:

$$I^{2n-1} = \frac{1}{\pi/6} \int_{2(n-1)\frac{\pi}{6}}^{(2n-1)\frac{\pi}{6}} i^{2n-1}(\omega t_{2n-1}) d(\omega t_{2n-1}); \quad n = 1,2,3, \dots; \quad (181)$$

$$I^{2n} = \frac{1}{\pi/6} \int_{(2n-1)\frac{\pi}{6}}^{2n\frac{\pi}{6}} i^{2n}(\omega t_{2n}) d(\omega t_{2n}); \quad n = 1,2,3, \dots \quad (182)$$

(167) გამოსახულების ჩასმა (181)-ში ხოლო (168) გამოსახულების ჩასმა (182)-ში გარდაქმნებისა და ინტეგრალის ამოღების შემდეგ გვაძლევს შემდეგ მნიშვნელობებს:

$$I^{2n-1} = \frac{6}{\pi} \left[A \cos \left(\frac{4n-3}{2} \cdot \frac{\pi}{6} + \varphi_i^{2n-1} \right) - B \omega \tau_c e^{-\frac{(2n-1)\pi/6}{\omega \tau_c}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi/6}{\omega \tau_c}} \right) \right] \\ n=1,2,3, \dots \quad (183)$$

$$I^{2n} = \frac{6}{\pi} \left[C \cos \left(\frac{4n-1}{2} \cdot \frac{\pi}{6} + \varphi_i^{2n} \right) - D \omega \tau_c e^{-\frac{2n\pi/6}{\omega \tau_c}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi/6}{\omega \tau_c}} \right) \right] \\ n=1,2,3, \dots, \quad (184)$$

სადაც (183), (184) გამოსახულებებში შემავალი ექვივალენტური პარამეტრებისათვის გვაქვს:

$$\left. \begin{aligned} A &= -\sqrt{3}U_{mc} \cdot Y_{\text{ქვ}}^{2n-1}; \\ B &= -\mu \left[i_k^{2n-1}(0) + \frac{\sqrt{3}}{4}U_{mc}(B_c - \sqrt{3}G_c) \right]; \\ C &= -\sqrt{3}U_m \cdot Y_{\text{ქვ}}^{2n}; \\ D &= -\mu \left[i_k^{2n}(0) - \frac{\sqrt{3}}{2}U_{mc} \cdot G_c \right]. \end{aligned} \right\} \quad (185)$$

(185) ექვივალენტური პარამეტრების გამოსახულებებში შესაბამისი ექვივალენტური კოეფიციენტებისათვის გვაქვს:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\omega^2 L_1 C_2}{(\omega \tau_c)^2}; \quad \varphi_i^{2n-1} = 60^\circ + \operatorname{arctg} \frac{\frac{1}{2}B_c}{\left(\omega C_3 - \frac{1}{\omega L_1}\right) + \frac{1}{2}G_c}; \\ \varphi_i^{2n} &= 90^\circ + \operatorname{arctg} \frac{B_c}{\left(\omega C_3 - \frac{1}{\omega L_1}\right) + G_c}; \\ Y_{\text{ქვ}}^{2n-1} &= \omega^2 L_1 C_2 \left\{ \left[\left(\omega C_3 - \frac{1}{\omega L_1}\right) + \frac{1}{2}G_c \right]^2 + \left(\frac{1}{2}B_c\right)^2 \right\}^{1/2}; \\ Y_{\text{ქვ}}^{2n} &= \omega^2 L_1 C_2 \left\{ \left[\left(\omega C_3 - \frac{1}{\omega L_1}\right) + G_c \right]^2 + B_c^2 \right\}^{1/2}; \end{aligned} \quad (186)$$

ამის შემდეგ გავუტოლოთ ერთმანეთს I^{2n-1} დენის საშუალო მნიშვნელობა და I^{2n} დენის საშუალო მნიშვნელობა:

$$I^{2n-1} = I^{2n} \quad (187)$$

(183), (184) გამოსახულებების გათვალისწინება (187)-ში, მოგვცემს შემდეგ ტოლობას:

$$\begin{aligned} A \cdot \cos\left(\frac{4n-3}{2} \cdot \frac{\pi}{6} + \varphi_i^{2n-1}\right) - C \cdot \cos\left(\frac{4n-1}{2} \cdot \frac{\pi}{6} + \varphi_i^{2n}\right) &= \\ = \omega \tau_c \left(1 - e^{\frac{\pi/6}{\omega \tau_c}}\right) \cdot \left[B \cdot e^{-\frac{(2n-1)\pi/6}{\omega \tau_c}} - D \cdot e^{\frac{2n\pi/6}{\omega \tau_c}} \right]; \end{aligned} \quad (188)$$

(188) ტოლობა შესრულდება მხოლოდ და მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როცა ცალ-ცალკე ტოლობის მარჯვენა მხარე და მარცხენა მხარეც არის ნულის ტოლი. ამის გათვალისწინებით (188)-დან ვღებულობთ ორ დამოუკიდებელ ტოლობას:

$$A \cdot \cos\left(n \cdot \frac{\pi}{3} + \varphi_i^{2n-1} - \frac{\pi}{4}\right) - C \cdot \cos\left(n \cdot \frac{\pi}{3} + \varphi_i^{2n} - \frac{\pi}{12}\right) = 0; \quad (189)$$

$$B \cdot e^{-\frac{n\pi}{3} \frac{\pi}{\omega\tau_c}} - D \cdot e^{-\frac{n\pi}{6} \frac{\pi}{\omega\tau_c}} = 0; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (190)$$

(189) ტოლობიდან გვაქვს:

$$n = -\frac{3}{\pi} \operatorname{arctg} \left[\frac{A \sin \left(\varphi_i^{2n-1} - \frac{\pi}{4} \right) - C \sin \left(\varphi_i^{2n} - \frac{\pi}{12} \right)}{A \cos \left(\varphi_i^{2n-1} - \frac{\pi}{4} \right) - C \cos \left(\varphi_i^{2n} - \frac{\pi}{12} \right)} \right] + \frac{3}{2} (4k \pm 1); \quad (191)$$

(190) ტოლობიდან გვაქვს:

$$n = 1 + \frac{6}{\pi} \omega\tau_c \ln \frac{B}{D}; \quad (192)$$

(191) და (192) წარმოადგენენ (188) განტოლების ექვივალენტურ ამონახსნს. (185) ჩავსვათ (192)-ში და შემოვიღოთ აღნიშვნა:

$$r^{2n}(0) = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \frac{U_{mc}}{i_k^{2n}(0)}; \quad (193)$$

მაშინ მივიღებთ:

$$n = 1 + \frac{6}{\pi} \omega\tau_c \ln \left| \frac{1 + r^{2n}(0)(B_c - \sqrt{3}G_c)}{1 - 2r^{2n}(0) \cdot G_c} \right|; \quad (194)$$

(194)-ში გავითვალისწინება დამყარებული პროცესის დაწყებიდან დენების საწყისი მნიშვნელობების ტოლობა:

$$i_k^{2n}(0) = i_k^{2n-1}(0); \quad (195)$$

(194)-დან ჩანს, რომ :

$$\left. \begin{array}{l} B_c > \sqrt{3}G_c; \\ G_c < \frac{1}{2r^{2n}(0)}; \end{array} \right\} \quad (196)$$

(196)-ში გავითვალისწინოთ (193), მივიღებთ:

$$G_c < \sqrt{\frac{2}{3} B_c \cdot \frac{i_k^{2n}(0)}{U_{mc}}} \quad (197)$$

(197)-ში თუ გავითვალისწინებთ (165),(166) და მივიღებთ, რომ

$\operatorname{ctg} \varphi_c = \frac{R_c}{\omega L_c}$, მაშინ საბოლოოდ გვექნება:

$$i_k^{2n}(0) > \frac{3}{2} U_{mc} \cdot G_c \operatorname{ctg} \varphi_c; \quad (198)$$

ამგვარად, დამყარებული პროცესი მყარდება n -ის იმ მნიშვნელობისას, რომლის დროსაც დაცულია (198) უტოლობა.

შემთხვევისათვის, როცა $i_k^{2n}(0) < \frac{3}{2}U_{mc} \cdot G_c ctg \varphi_c$; ჯერ კიდევ მიმდინარეობს გარდამავალი პროცესი.

3.6. ჰიბრიდული ავტონომიური ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის ელექტრომაგნიტური პროცესების კომპიუტერული მოდელირება.

ერთიანი ჰიბრიდული პარალელური ენერგოსისტემების (79)-(88) განტოლებები განზოგადებულ კენტ $2(n-1)\frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n-1} \leq (2n-1)\frac{\pi}{6\omega}$ ინტერვალებში მატრიცულ ფორმაში ასე ჩაიწერება:

$$\|\Delta^{2n-1}\| \cdot \left\| \frac{df(t_{2n-1})}{dt_{2n-1}} \right\| = \|f_1(t_{2n-1}, u_{mc}^{2n-1})\|, \quad (199)$$

სადაც (142)-ში თითოეული წევრისათვის გახსნილ მდგომარეობაში გვაქვს:

$$\|\Delta^{2n-1}\| = \left\| \begin{array}{ccccccc} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_1 & C_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_c \end{array} \right\|; \quad (200)$$

$$\left\| \frac{df(t_{2n-1})}{dt_{2n-1}} \right\| = \left\| \begin{array}{c} \frac{dU_{dc}^{2n-1}}{dt_{2n-1}} \\ \frac{du_{c1}^{2n-1}}{dt_{2n-1}} \\ \frac{du_{c2}^{2n-1}}{dt_{2n-1}} \\ \frac{du_{dco}^{2n-1}}{dt_{2n-1}} \\ \frac{du_{c3}^{2n-1}}{dt_{2n-1}} \\ \frac{di_{L1}^{2n-1}}{dt_{2n-1}} \\ \frac{di_k^{2n-1}}{dt_{2n-1}} \end{array} \right\|; \quad k = A, B, C; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (201)$$

$$\|f_1(t_{2n-1}, u_{mc}^{2n-1})\| = \left\| \begin{array}{c} 0 \\ i^{2n-1} \\ i_{L1}^{2n-1} - i_{VD3}^{2n-1} \\ 0 \\ i_{L1}^{2n-1} - i_k^{2n-1} \\ u_{dco}^{2n-1} - u_{dc}^{2n-1} \\ U_{mc} \sin 60^0 \cdot \sin(\omega t_{2n-1} + 60^0) - R_c i_k^{2n-1} \end{array} \right\|; \quad (202)$$

$K = A, B, C; \quad n = 1, 2, 3, \dots$

(199)-ის ამოხსნა $\left\| \frac{df(t_{2n-1})}{dt_{2n-1}} \right\|$ მიმართ გვაძლევს:

$$\left\| \frac{df(t_{2n-1})}{dt_{2n-1}} \right\| = \|(\Delta^{2n-1})^{-1}\| \cdot \|f_1'(t_{2n-1}, u_{mc}^{2n-1})\|; \quad (203)$$

სადაც (203)-ის თითოეული წევრისათვის გახსნილ მდგომარეობაში ვვაქვს:

$$\|(\Delta^{2n-1})^{-1}\| = \left\| \begin{array}{ccccccc} 1/c_1 & 1/c_1 & -1/c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/c_1 & 1/c_1 & -1/c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/c_1 & 1/c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/c_1 & (1/c_1 + 1/c_2) & -(1/c_1 + 1/c_2) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/c_3 & -1/c_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/L_1 & -1/L_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R/L_c & 0 & 0 & \frac{\sin 60^0}{LC_1} \end{array} \right\| \quad (204)$$

$\left\| \frac{df(t_{2n-1})}{dt_{2n-1}} \right\|$ გამოსახულება (203)-ში წარმოდგენილია (204) და

(205) გამოსახულებით:

$$\|f_1'(t_{2n-1}, u_{mc}^{2n-1})\| = \left\| \begin{array}{c} i^{2n-1} \\ i_{VD3}^{2n-1} \\ i_{L1}^{2n-1} \\ i_k^{2n-1} \\ u_{dco}^{2n-1} \\ u_{dc}^{2n-1} \\ U_{mc} \sin(\omega t_{2n-1} + 60^0) \end{array} \right\|; \quad (205)$$

$k = A, B, C; \quad n = 1, 2, 3, \dots$

ერთიანი ჰიბრიდული პარალელური ენერგოსისტემის ლუწი რეჟიმებისათვის დაწერილი (130)-(136) განტოლებები განზოგადებული $(2n - 1) \frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n} \leq 2n \frac{\pi}{6\omega}$, $k = A, B, C$; $n = 1, 2, 3, \dots$ ინტერვალებისათვის წარმოვადგინოთ მატრიცულ ფორმაში:

$$\|\Delta^{2n}\| \cdot \left\| \frac{df(t_{2n})}{dt_{2n}} \right\| = \|f_2(t_{2n}, u_{mc}^{2n})\|, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (206)$$

სადაც (206)-ში თითოეული წევრისათვის გახსნილ მდგომარეობაში გვაქვს:

$$\|\Delta^{2n}\| = \left\| \begin{array}{cccccc} 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_1 & C_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_c \end{array} \right\|; \quad n=1, 2, 3, \dots, \quad (207)$$

$$\left\| \frac{df(t_{2n})}{dt_{2n}} \right\| = \left\| \begin{array}{c} \frac{dU_{dc}^{2n}}{dt_{2n}} \\ \frac{du_{c1}^{2n}}{dt_{2n}} \\ \frac{du_{c2}^{2n}}{dt_{2n}} \\ \frac{du_{dco}^{2n}}{dt_{2n}} \\ \frac{du_{c3}^{2n}}{dt_{2n}} \\ \frac{di_{L1}^{2n}}{dt_{2n}} \\ \frac{di_k^{2n}}{dt_{2n}} \end{array} \right\|; \quad k = A, B, C; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (208)$$

$$\|f_2(t_{2n}, u_{mc}^{2n})\| = \left\| \begin{array}{c} 0 \\ i^{2n} \\ i_{L1}^{2n} \\ 0 \\ i_{L1}^{2n} - i_k^{2n} \\ u_{dco}^{2n} - u_{dc}^{2n} \\ U_{mc} \sin 60^\circ \cdot \sin(\omega t_{2n} + 90^\circ) - R_c i_k^{2n} \end{array} \right\|; \quad (209)$$

$k = A, B, C; \quad n = 1, 2, 3, \dots$

(206)-ის ამოხსნა $\left\| \frac{df(t_{2n})}{dt_{2n}} \right\|$ -ის მიმართ გვაძლევს:

$$\left\| \frac{df(t_{2n})}{dt_{2n}} \right\| = \|(\Delta^{2n})^{-1}\| \cdot \|f'_2(t_{2n}, u_{mc}^{2n})\|; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (210)$$

სადაც (210)-ში თითოეული წევრისათვის გახსნილ მდგომარეობაში გვაქვს

$$\begin{aligned} & \|(\Delta^{2n})^{-1}\| = \\ & = \left\| \begin{array}{cccccc} 1/c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/c_1 & -1/c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/c_1 & -1/c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/c_3 & -1/c_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/L_1 & -1/L_1 & 0 \\ 0 & 0 & -R/L_c & 0 & 0 & \frac{\sin 60^\circ}{L_c} \end{array} \right\|; \quad (211) \end{aligned}$$

$$\|f'_2(t_{2n}, u_{mc}^{2n})\| = \left\| \begin{array}{c} i^{2n} \\ i_{L1}^{2n} \\ i_k^{2n} \\ u_{dco}^{2n} \\ u_{dc}^{2n} \\ U_{mc} \sin(\omega t_{2n} + 90^\circ) \end{array} \right\|; \quad (212)$$

$$k = A, B, C; \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

(203) გამოსახულებიდან ინტეგრალის ამოღება დროის ინტერვალებისათვის - $2(n-1)\frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n-1} \leq (2n-1)\frac{\pi}{6\omega}$, გვაძლევს შემდეგ ინტეგრალურ გამოსახულებებს, საძიებელი ცვლადების მიმართ კენტი რეჟიმებისათვის:

$$\begin{aligned} \|f(t_{2n-1})\| = & \int_{2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}} \{ \|(\Delta^{2n-1})^{-1}\| \cdot \|f'_1(t_{2n-1}, u_{mc}^{2n-1})\| \} dt_{2n-1} + \\ & + \|f[t_{2n-1}(0)]\|; \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (213) \end{aligned}$$

სადაც (213)-ში $\|f[t_{2n-1}(0)]\|$ არის $\|f(t_{2n-1})\|$ ცვლადების საწყისი მნიშვნელობები განსახილველ ინტერვალების დასაწყისში.[31].

(210) გამოსახულებიდან ინტეგრალის ამოღება დროის ინტერვალებისათვის - $(2n - 1) \frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n} \leq 2n \frac{\pi}{6\omega}$ გვაძლევს შემდეგ ინტეგრალურ გამოსახულებებს საძიებელი ცვლადების მიმართ ლუწი რეჟიმებისათვის:

$$\|f(t_{2n})\| = \int_{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{(2n)\frac{\pi}{6\omega}} \{ \|(\Delta^{2n})^{-1}\| \cdot \|f_2'(t_{2n}, u_{mc}^{2n})\| \} dt_{2n} + \|f[t_{2n}(0)]\|; \quad n = 1, 2, 3, \dots, k = A, B, C; \quad (214)$$

სადაც (214)-ში $\|f[t_{2n}(0)]\|$ არის $\|f(t_{2n})\|$ ცვლადების საწყისი მნიშვნელობები განსახილველ ლუწი ინტერვალების დასაწყისში.

მზის ფოტოელექტრული სადგურის მოცემული პარამეტრების შემოყვანა გაერთიანებულ ჰიბრიდულ პარალელურ ელექტროენერგეტიკულ სქემებში წარმოებს მზის ელემენტის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის აღმწერი (40) კვადრატული სამწევრის საფუძველზე [19]:

$$U_{dc}^* = A_1 (i^*)^2 - (1 + A_1) i^* + 1, \quad (215)$$

სადაც A_1 კოეფიციენტი გამოითვლება ასე:

$$A_1 = \frac{U_{dc\text{კობტ}}^*}{i_{\text{კობტ}}^* (i_{\text{კობტ}}^* - 1)} + \frac{1}{i_{\text{კობტ}}^*} \quad (216)$$

U_{dc}^* და i^* ფარდობით ერთეულებში წარმოდგენილი სიდიდეებისათვის გვაქვს: $U_{dc}^* = \frac{U_{dc}^{2n-1}}{U_{dc\gamma, \beta}}$ კენტი ინტერვალებისათვის, ხოლო $U_{dc}^* = \frac{U_{dc}^{2n}}{U_{dc\gamma, \beta}}$ ლუწი ინტერვალებისათვის. ასევე გვაქვს i^* დენის ფარდობითი მნიშვნელობისათვის:

$$i^* = \frac{R_S i^{2n-1}}{U_{dc\gamma, \beta}} \quad \text{კენტი ინტერვალებისათვის,}$$

$$i^* = \frac{R_S i^{2n}}{U_{dc\gamma, \beta}} \quad \text{ლუწი ინტერვალებისათვის.}$$

(215)-დან ამოვხსნათ i^* ფარდობითი მნიშვნელობა U_{dc}^* ძაბვის ფარდობითი მნიშვნელობის მიმართ და შესაბამისად მივიღებთ:

კენტი რეჟიმებისათვის:

$$i^{2n-1} = A'_1 \pm \sqrt{A'_2 + A'_3 U_{dc}^{2n-1}}. \quad (217)$$

ლუწი რეჟიმებისათვის:

$$i^{2n} = A'_1 \pm \sqrt{A'_2 + A'_3 U_{dc}^{2n}}, \quad (218)$$

სადაც:

$$\left. \begin{aligned} A'_1 &= \frac{1 + A_1}{A_1} \cdot \frac{U_{dc,b}}{2R_s} \\ A'_2 &= R_s^2 (1 + A_1)^2 - \frac{4R_s^2 A_1}{U_{dc,b}} \\ A'_3 &= \frac{4R_s^2 A_1}{U_{dc,b}} \end{aligned} \right\} \quad (219)$$

(219) გამოსახულებებში და U_{dc}^* , i^* ფარდობით სიდიდეებში ბაზისურ სიდიდეთ აღებულია $U_{dc,b}$ ძაბვის მნიშვნელობა უქმი სვლისას[26].

განზოგადებულ კენტ რეჟიმებში დამატებით ვსარგებლობთ შემდეგი დიფერენციალური განტოლებით:

$$i_{VD3}^{2n-1} = i_{L1}^{2n-1} - i^{2n-1} + C_1 \frac{du_{c1}^{2n-1}}{dt_{2n-1}}; \quad (220)$$

(213) და (214) გამოსახულებებში გავითვალისწინოთ შესაბამისად (201), (204), (205) და (208),(211),(212) გამოსახულებები, ვაწარმოთ (204) და (205) მატრიცების, აგრეთვე (211) და (212) მატრიცების ურთიერთ გადამრავლება, რის შედეგადაც მივიღებთ ცხად სახეში სამიებული ელექტრული სიდიდეების შემდეგ ინტეგრალურ გამოსახულებებს:

$$ა) \quad \text{განზოგადებული კენტი} \quad 2(n-1) \frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n-1} \leq (2n-1) \frac{\pi}{6\omega},$$

ინტეგრალებისათვის.

$$U_{dc}^{2n-1} = \int_{2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}} \left(\frac{1}{C_1} i^{2n-1} + \frac{1}{C_1} i_{VD3}^{2n-1} - \frac{1}{C_1} i_{L1}^{2n-1} \right) dt_{2n-1} + U_{dc}^{2n-1}(0); \quad (221)$$

$$u_{c1}^{2n-1} = \int_{2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}} \left(\frac{1}{C_1} i^{2n-1} + \frac{1}{C_1} i_{VD3}^{2n-1} - \frac{1}{C_1} i_{L1}^{2n-1} \right) dt_{2n-1} + u_{c1}^{2n-1}(0); \quad (222)$$

$$u_{c2}^{2n-1} = \int_{2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}} \left(\frac{1}{C_2} i^{2n-1} - \frac{1}{C_2} i_{VD3}^{2n-1} \right) dt_{2n-1} + u_{c2}^{2n-1}(0); \quad (223)$$

$$U_{dc0}^{2n-1} = \int_{2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}} \left[\frac{1}{C_1} i^{2n-1} + \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) i_{VD3}^{2n-1} - \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) i_{L1}^{2n-1} \right] dt_{2n-1} + U_{dc0}^{2n-1}(0) \quad (224)$$

$$u_{c3}^{2n-1} = \int_{2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}} \left(\frac{1}{C_3} i_{L1}^{2n-1} - \frac{1}{C_3} i_k^{2n-1} \right) dt_{2n-1} + u_{c3}^{2n-1}(0); \quad (225)$$

$$i_{L1}^{2n-1} = \int_{2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}} \left(\frac{1}{L_1} u_{dco}^{2n-1} - \frac{1}{L_1} u_{dc}^{2n-1} \right) dt_{2n-1} + i_{L1}^{2n-1}(0); \quad (226)$$

$$i_k^{2n-1} = \int_{2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}} \left[-\frac{R_c}{L_c} i_k^{2n-1} + \frac{1}{L_c} U_{mc} \sin 60^\circ \cdot \sin(\omega t_{2n-1} + 60^\circ) \right] dt_{2n-1} + i_k^{2n-1}(0). \quad k = A, B, C; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (227)$$

ბ) განზოგადებული ლუწი $(2n-1)\frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n} \leq 2n\frac{\pi}{6\omega}$:

ინტერვალებისათვის:

$$U_{dc}^{2n} = \int_{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{2n\frac{\pi}{6\omega}} \frac{1}{C_1} i^{2n} dt_{2n} + U_{dc}^{2n}(0); \quad (228)$$

$$u_{c1}^{2n} = \int_{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{2n\frac{\pi}{6\omega}} \left(\frac{1}{C_1} i^{2n} - \frac{1}{C_1} i_{L1}^{2n} \right) dt_{2n} + u_{c1}^{2n}(0); \quad (229)$$

$$u_{c2}^{2n} = \int_{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{2n\frac{\pi}{6\omega}} \frac{1}{C_2} i_{L1}^{2n} dt_{2n} + u_{c2}^{2n}(0); \quad (230)$$

$$u_{dco}^{2n} = \int_{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{2n\frac{\pi}{6\omega}} \left(\frac{1}{C_1} i^{2n} - \frac{1}{C_2} i_{L1}^{2n} \right) dt_{2n} + u_{dco}^{2n}(0); \quad (231)$$

$$u_{c3}^{2n} = \int_{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{2n\frac{\pi}{6\omega}} \left(\frac{1}{C_3} i_{L1}^{2n} - \frac{1}{C_3} i_k^{2n} \right) dt_{2n} + u_{c3}^{2n}(0); \quad (232)$$

$$i_{L1}^{2n} = \int_{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{2n\frac{\pi}{6\omega}} \left(\frac{1}{L_1} u_{dco}^{2n} - \frac{1}{L_1} u_{dc}^{2n} \right) dt_{2n} + i_{L1}^{2n}(0); \quad (233)$$

$$i_k^{2n} = \int_{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{2n\frac{\pi}{6\omega}} \left[\frac{1}{L_c} U_{mc} \sin 60^\circ \cdot \sin(\omega t_{2n} + 90^\circ) - \frac{R_c}{L_c} i_k^{2n} \right] dt_{2n} + i_k^{2n}(0); \quad (234)$$

(221)-(227) გამოსახულებებთან ერთად უნდა გავითვალისწინოთ (217) გამოსახულება, ხოლო (228)-(234) გამოსახულებებთან ერთად კი - (218) გამოსახულება.[32].

3.7. ელექტროენერგეტიკული სისტემის გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემის ელემენტების ძირითადი თვისებები

მიღებული (217), (221)-(227) და (218), (228)-(231) ინტეგრალური გამოსახულებები საშუალებას იძლევიან აგებული იქნას ყველა საძიებელი ელექტრული სიდიდეების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები, კენტი და ლუწი ინტერვალებისათვის, სქემებში შემავალი ელემენტების ძირითადი თვისებების გათვალისწინებით (ნახ.23).

განვიხილოთ ჰიბრიდული ავტონომიური ელექტროენერგეტიკული სისტემების პარალელური მუშაობისას გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემის ელემენტების შემდეგი ძირითადი თვისებები (ნახ.23) [57].

ა) დროის გადამწოდი, $\Delta t_{2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}}, \Delta t_{2n\frac{\pi}{6\omega}}$, -გარდამავალი პროცესის რიცხვითი მეთოდით ანგარიშისას დროის ინტერვალების შესაბამისად კენტი და ლუწი განზოგადებულ ინტერვალებში:

$\Delta t_{2(n-1)} \frac{\pi}{6\omega}$	T_{2n-1}
$t_{(2n-1)} \frac{\pi}{6\omega}$	

 \rightarrow

$$2(n-1) \frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n-1} \leq (2n-1) \frac{\pi}{6\omega}$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$
(235)

ბ) t_{2n-1} ცვლადის ω მუდმივ კოეფიციენტზე ნამრავლი:

$$\begin{array}{c} t_{2n-1} \\ \rightarrow \end{array} \begin{array}{|c|c|} \hline \omega & G \\ \hline \end{array} \begin{array}{c} \rightarrow \\ \omega t_{2n-1} \end{array}$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$
(236)

გ) მუდმივის (60°) წარმოდგენა. შემავალი ცვლადი არ არის:

60°	k
------------	-----

 \rightarrow
 60°
(237)

დ) შემკრები 1,1-მუდმივი კოეფიციენტებია ωt_{2n-1} , 60° -შემავალი

$$\begin{array}{c} \omega t_{2n-1} \\ \rightarrow \\ 60^\circ \\ \rightarrow \end{array} \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & \Sigma \\ \hline 1 & \\ \hline \end{array} \rightarrow 1 \cdot \omega t_{2n-1} + 1 \cdot 60^\circ$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$
(238)

ე) სინუსოიდური ფუნქციის მაფორმირებელი, 1-მუდმივი კოეფიციენტია $\omega t_{2n-1} + 60^\circ$ -შემავალი ცვლადია:

$$\omega t_{2n-1} + 60^\circ \rightarrow \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & \sin \\ \hline 1 & \\ \hline \end{array} \rightarrow \sin 1 \cdot (\omega t_{2n-1} + 60^\circ)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$
(239)

ვ) გამამრავლებელი 1,1, მუდმივი კოეფიციენტებია $\sin(\omega t_{2n-1} + 60^\circ)$,

$\frac{1}{L_1} U_{mc} \sin 60^\circ$ - შემავალი ცვლადებია:

$$\begin{array}{c} \sin(\omega t_{2n-1} + 60^\circ) \\ \rightarrow \\ \frac{1}{L_1} U_{mc} \sin 60^\circ \\ \rightarrow \end{array} \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & X \\ \hline 1 & \\ \hline \end{array} \rightarrow \frac{1}{L_1} U_{mc} \sin 60^\circ \cdot \sin(\omega t_{2n-1} + 60^\circ)$$

$$n = 1, 2, 3$$
(240)

ზ) გაყოფის ელემენტი- k_1, k_2 -მუდმივი კოეფიციენტებია ; x_1 და x_2 -შემავალი ცვლადებია:

$$\begin{array}{c} \xrightarrow{X_1} \\ \xrightarrow{X_2} \end{array} \left[\begin{array}{c|c} K_1 & \\ \hline K_2 & \vdots \end{array} \right] \longrightarrow y = \frac{K_1 X_1}{K_2 X_2} \quad (241)$$

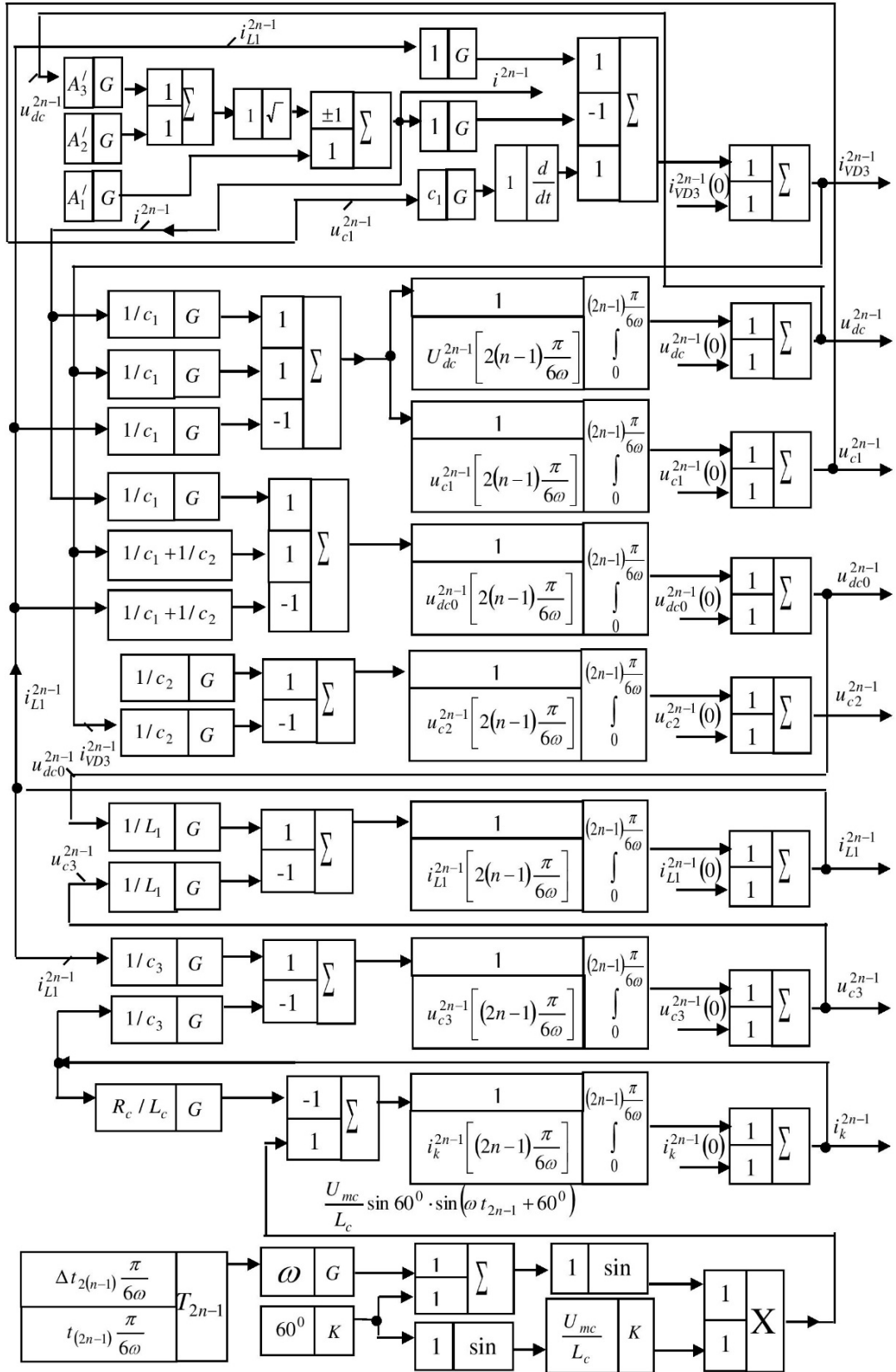
თ) ინტეგრატორი- x -შემავალი ცვლადია, k - მუდმივი კოეფიციენტი და Y_0 – X ფუნქციის საწყისი მნიშვნელობაა:

$$\xrightarrow{X} \left[\begin{array}{c|c} K & \\ \hline y_0 & \int \end{array} \right] \longrightarrow y = K \int_0^{t_{2n-1}} X dt_{2n-1} + y_0, n = 1,2,3 \quad (242)$$

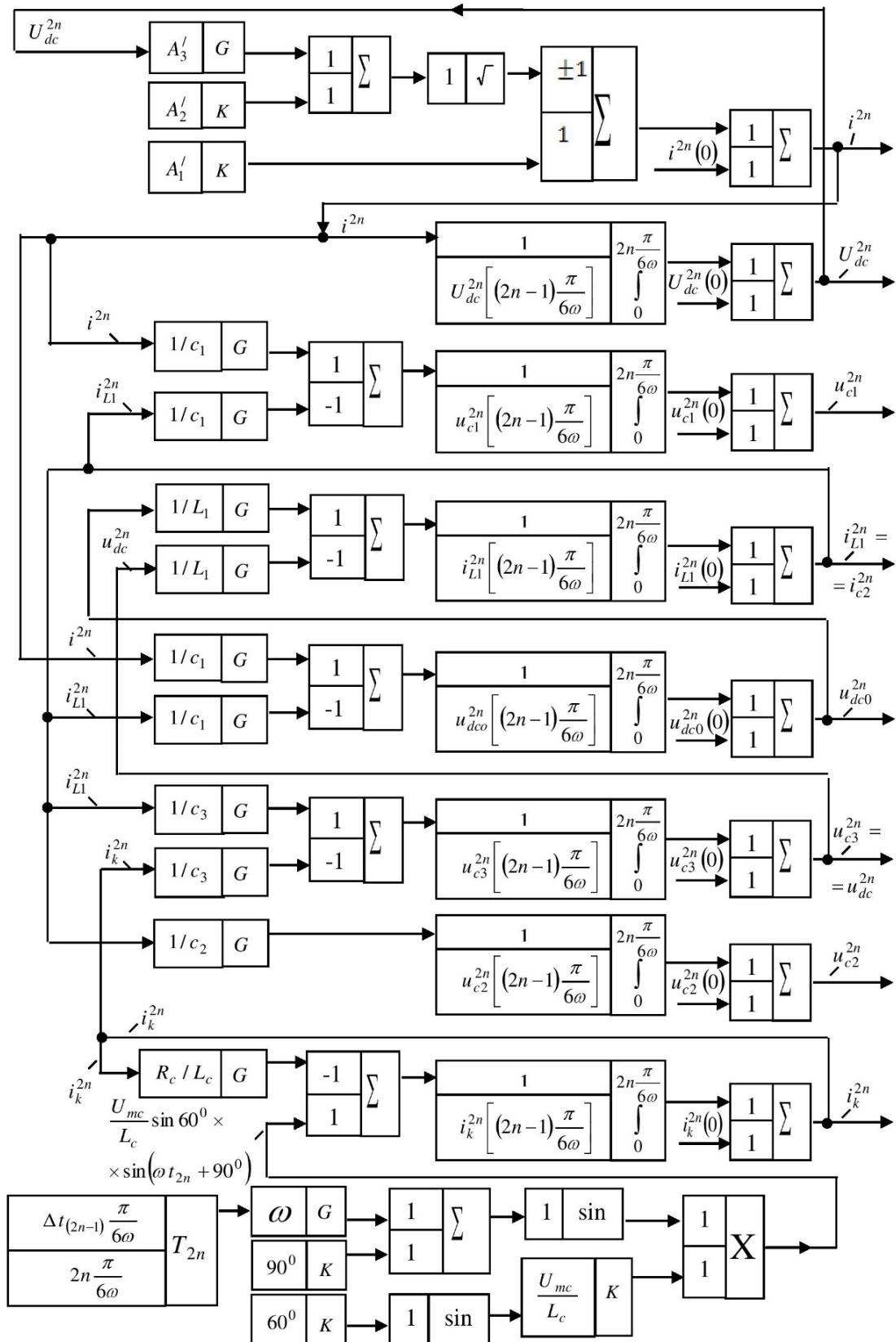
ნახ.23. სტრუქტურული სქემის ელემენტების ძირითადი თვისებები.

ზემოთ მიღებული ძირითადი განტოლებების საფუძველზე ნახ.23-ზე წარმოდგენილი სტრუქტურული სქემის ელემენტების ძირითადი თვისებების გამოყენებით შესაძლებელია აგებულ იქნას კომპიუტერული მოდელირებისათვის დამახასიათებელი გარდამავალი პროცესების გამარტივებული მოდელის სტრუქტურული სქემები შესაბამისად კენტი რეჟიმების განზოგადებულ $2(n-1)\frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n-1} \leq (2n-1)\frac{\pi}{6\omega}; \quad n=1,2,3,\dots,k;$ $k=A,B,C$ და ლუწი რეჟიმების განზოგადებულ $(2n-1)\frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n} \leq 2n\frac{\pi}{6\omega}; \quad n=1,2,3,\dots,k; k=A,B,C$ ინტერვალებში (ნახ.24 და ნახ.25).

როგორც წარმოდგენილი ნახაზებიდან ჩანს, თითოეული საძიებელი ელექტრული სიდიდეების დროზე დამოკიდებულების დასადგენად გათვალისწინებულია სქემის ყველა პარამეტრი, აჯამვის, ინტეგრირების რგოლები და, რაც მთავარია, კომპიუტერული მოდელის სტრუქტურული სქემა შეკრულ უკუკავშირებიან სახეში.



ნახ.24. გარდამავალი პროცესების მოდელის სრულყოფილი სქემა კონტი რეჟიმების განზოგადებულ $2(n-1)\frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n-1} \leq (2n-1)\frac{\pi}{6\omega}$; $n=1,2,3,\dots,k=A,B,C$. ინტერვალებში



ნახ.25. გარდამავალი პროცესების მოდელის სრულყოფილი სქემა ლუწი რეჟიმების განზოგადებულ $(2n-1)\frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n} \leq 2n\frac{\pi}{6\omega}$; $n=1,2,3,\dots$, $k=A, B, C$. ინტერვალში.

3.8. ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში ცვლადთა მდგომარეობის მატრიცული განტოლებების რიცხვითი ამოხსნა პარალელური მუშაობის კენტი რეჟიმების განზოგადებული $2(n-1)\frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n-1} \leq (2n-1)\frac{\pi}{6\omega}$ ინტერვალებისათვის

(201) მატრიცული გამოსახულებიდან გვაქვს შემდეგი მატრიცული გამოსახულება:

$$\|f(t_{2n-1})\| = \|U_{dc}^{2n-1}, u_{c1}^{2n-1}, u_{c2}^{2n-1}, u_{dc0}^{2n-1}, u_{c3}^{2n-1}, i_{L1}^{2n-1}, i_k^{2n-1}\|^t, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (243)$$

სადაც (243)-ში ზემო ინდექსი t ნიშნავს ტრანსპონირებულ მატრიცას.

(203)-ში შემოვიღოთ აღნიშვნები:

$$\|A^{2n-1}\| = \|(\Delta^{2n-1})^{-1}\|; \quad \|I^{2n-1}\| = \|f_1'(t_{2n-1}, u_{mc}^{2n-1})\|; \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (244)$$

(244)-ის გათვალისწინებით (203) გამოსახულება წარმოიდგინება ასეთ ფორმაში:

$$\left\| \frac{df(t_{2n-1})}{dt_{2n-1}} \right\| = \|A^{2n-1}\| \cdot \|I^{2n-1}\|; \quad (245)$$

(245) განტოლება წარმოადგენს მდგომარეობათა ცვლადების განტოლებას მატრიცულ ფორმაში.

„მდგომარეობათა ცვლადების მეთოდის“ უპირატესობა სხვა მეთოდებთან შედარებით არის მისი შეთავსებადობა „ციფრული გამოთვლითი ტექნიკის მეთოდებთან“. [27.30].

ამ პარაგრაფში ნაჩვენებია იქნება ორიგინალური რიცხვითი მეთოდი (245) მატრიცული განტოლების ამოსახსნელად, დროის არეში მისი განსაკუთრებულობის გათვალისწინებით.

(245) განტოლებაში მოცემულად ითვლება მზის ელემენტის შენაცვლების სქემაში ნაჩვენებია I დენი, ელემენტის გამოსავალზე U_{dc}^{2n-1} ძაბვა და სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის ფაზური ძაბვები u_k^{2n-1} ($k = A, B, C; n = 1, 2, 3, \dots$). ამ სამივე ცვლადებს ვუწოდებთ „შემავალ ვექტორებს“ $t_{2n-1} \geq 2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}$, დროის შუალედისათვის ყოველ

განზოგადებულ კენტ ინტერვალებში $\|f(t_{2n-1})\|$ საძიებელი ელექტრული სიდიდეების საწყისი მნიშვნელობები იქნება $t_{2n-1} = 2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}$, დროში ამავე სიდიდეების მნიშვნელობები.ე.ი. შესაბამისად ვღებულობთ:

$$\|f(t_{2n-1})\|_{t_{2n-1}=2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}} = \left\| f \left[2(n-1)\frac{\pi}{6\omega} \right] \right\| \quad (246)$$

რამდენადაც $\|f(t_{2n-1})\|$ საძიებელი სიდიდეების ამოხსნა განხორციელდება „ციფრული გამოთვლითი ტექნიკის მეთოდით“, იმდენად $\|f(t_{2n-1})\|$ სიდიდე უნდა განისაზღვროს t დროის მხოლოდ დისკრეტული $t = 2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}, 2(n-1)\frac{\pi}{6\omega} + T, 2(n-1)\frac{\pi}{6\omega} + 2T, \dots$, მნიშვნელობებისას, სადაც T - არის კენტ რეჟიმებში რაიმე დროის ინტერვალი.

(188) განტოლების ზოგად ამონახსნს ვეძებთ ასეთ სახეში:

$$\|f(t_{2n-1})\| = e^{\|A^{2n-1}\| \cdot t_{2n-1}} \cdot \|k(t_{2n-1})\|, \quad (247)$$

სადაც $\|k(t_{2n-1})\|$ -ნებისმიერი ვექტორის მატრიცაა $n \times 1$ განზომილებიანი მუდმივი ელემენტებით.

(245) განტოლების ამონახსნს ვეძებთ იმის გათვალისწინებით, რომ $\|k(t_{2n-1})\|$ წარმოადგენს t_{2n-1} დროის ფუნქციას.

(247) ტოლობა ჩავსვათ (245) განტოლებაში და ვისარგებლოთ $e^{\|A^{2n-1}\| \cdot t_{2n-1}}$ ექსპონენციალური მატრიცის შემდეგი თვისებებით:

$$\frac{d}{dt} e^{\|A^{2n-1}\| \cdot t_{2n-1}} = \|A^{2n-1}\| \cdot e^{\|A^{2n-1}\| \cdot t_{2n-1}} = e^{\|A^{2n-1}\| \cdot t_{2n-1}} \|A^{2n-1}\|; \quad (248)$$

შედეგად მივიღებთ:

$$\frac{d\|k(t_{2n-1})\|}{dt_{2n-1}} = e^{-\|A^{2n-1}\| \cdot t_{2n-1}} \cdot \|A^{2n-1}\| \cdot [\|I^{2n-1}\| - \|f(t_{2n-1})\|]; \quad (249)$$

გავაინტეგრავთ (249) განტოლება $2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}$ -დან $(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}$ -მდე დროის ინტერვალში, მივიღებთ:

$$\int_{2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}} \left(\frac{d\|k(\tau_{2n-1})\|}{d\tau_{2n-1}} \right) d\tau_{2n-1} =$$

$$= \int_{2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}} \{e^{-\|A^{2n-1}\|\cdot t_{2n-1}} \cdot \|A^{2n-1}\| \cdot [\|I^{2n-1}\| - \|f(\tau_{2n-1})\|]\} d\tau_{2n-1}. \quad (250)$$

(250)-ში ინტეგრების ზედა ზღვარი ასე წარმოვადგინოთ:

$$t_{2n-1} = (2n-1) \frac{\pi}{6\omega} \quad (251)$$

(250)-დან ამოვიღოთ ინტეგრალი და გავითვალისწინოთ (251), ზოგიერთი გარდაქმნების შემდეგ მივიღებთ:

$$\begin{aligned} \|k(t_{2n-1})\| &= \\ &= \int_{2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{t_{2n-1}} \{e^{-\|A^{2n-1}\|\cdot \tau_{2n-1}} \cdot \|A^{2n-1}\| \cdot [\|I^{2n-1}(\tau_{2n-1})\| - \|f(\tau_{2n-1})\|]\} d\tau_{2n-1} + \\ &\quad + \left\| k \left[2(n-1) \frac{\pi}{6\omega} \right] \right\|. \end{aligned} \quad (252)$$

(252) და (247) განტოლებებიდან გვაქვს:

$$\begin{aligned} \|f(\tau_{2n-1})\| &= e^{\|A^{2n-1}\|\cdot t_{2n-1}} \times \\ &\times \left[\int_{2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{t_{2n-1}} \{e^{-\|A^{2n-1}\|\cdot \tau_{2n-1}} \cdot \|A^{2n-1}\| \cdot [\|I^{2n-1}(\tau_{2n-1})\| - \|f(\tau_{2n-1})\|]\} d\tau_{2n-1} + \right. \\ &\quad \left. + \left\| k \left[2(n-1) \frac{\pi}{6\omega} \right] \right\| \right]; \quad n = 1, 2, 3, \dots, \end{aligned} \quad (253)$$

(247)-დან $t_{2n-1} = 2(n-1) \frac{\pi}{6\omega}$ მომენტისათვის $\|f(t_{2n-1})\|$ სიდიდის მნიშვნელობა ტოლია:

$$\left\| f \left[2(n-1) \frac{\pi}{6\omega} \right] \right\| = e^{\|A^{2n-1}\|\cdot 2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}} \cdot \left\| k \left[2(n-1) \frac{\pi}{6\omega} \right] \right\| \quad (254)$$

(254)-დან გვაქვს:

$$\left\| k \left[2(n-1) \frac{\pi}{6\omega} \right] \right\| = e^{-\|A^{2n-1}\|\cdot 2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}} \cdot \left\| f \left[2(n-1) \frac{\pi}{6\omega} \right] \right\| \quad (255)$$

შესაბამისად, (245) განტოლების ამონახსნს აქვს სახე:

$$\begin{aligned} \|f(t_{2n-1})\| &= e^{\|A^{2n-1}\|\cdot t_{2n-1}} \times \\ &\times \int_{2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{t_{2n-1}} e^{-\|A^{2n-1}\|\cdot \tau_{2n-1}} \cdot \|A^{2n-1}\| \cdot [\|I^{2n-1}(\tau_{2n-1})\| - \|f(\tau_{2n-1})\|] d\tau_{2n-1} + \\ &\quad + e^{-\|A^{2n-1}\|\cdot [t_{2n-1} - 2(n-1)\frac{\pi}{6\omega}]} \cdot \left\| f \left[2(n-1) \frac{\pi}{6\omega} \right] \right\|. \end{aligned} \quad (256)$$

ამგვარად, მივიღეთ მოცემული განტოლების ზუსტი ამონახსნი განზოგადებული კენტი რეჟიმების ინტერვალებისათვის შესაბამისი საწყისი პირობების გათვალისწინებით [44,27].

მიუხედავად (256) გამოსახულების კარგი სიზუსტისა, მას აქვს მოუხერხებელი ფორმა „ციფრული გამოთვლითი ტექნიკის მეთოდებში“ გამოსაყენებლად[52].

თუ გამოვიყენებთ კომპიუტერულ პროგრამებს, ჩვენ შეიძლება გამოვთვალოთ $\|f(t_{2n-1})\|$ სიდიდე t_{2n-1} დროის მხოლოდ დისკრეტული მნიშვნელობისათვის: $t_{2n-1} = kT$, სადაც k - მთელი ნატურალური რიცხვებია, ხოლო T -განსაზღვრული გარემოებით შერჩეული დროის ინტერვალი. რამდენადაც ვუშვებთ, რომ „შემავალი ვექტორი“ ცნობილია ყველა k - რიცხვისათვის, მაშინ ჩვენ გვრჩება გამოვიცნოთ, ერთის მხრივ, $\|f[(k+1)T]\|$ სიდიდისა და, მეორეს მხრივ, $\|f(kT)\|$ და $\|I^{2n-1}(kT)\| - \|f(kT)\|$ სიდიდეებს შორის კავშირი. [40].

ასეთი კავშირი აღიწერება „სხვაობითი განტოლების“ კერძო სახით. როგორც კი მივიღებთ „სხვაობით განტოლებას“, მომენტალურად შეიძლება თანმიმდევრობით გამოვთვალოთ $\|I^{2n-1}(kT)\|$ სიდიდე ყველა k რიცხვისათვის [41,27].

(256) განტოლებაში დავუშვათ, რომ:

$$2(n-1)\frac{\pi}{6\omega} = kT \text{ და } t_{2n-1} = (k+1)T; \quad n = 1,2,3, \dots; \quad k=0,1,2,3, \dots, (257)$$

მაშინ მივიღებთ:

$$\begin{aligned} \|f[(k+1)T]\| &= e^{\|A^{2n-1}\| \cdot T} \cdot \|f(kT)\| + e^{\|A^{2n-1}\| \cdot (k+1)T} \times \\ &\times \int_{kT}^{(k+1)T} \{e^{-\|A^{2n-1}\| \cdot \tau_{2n-1}} \cdot \|A^{2n-1}\| \cdot [\|I^{2n-1}(\tau_{2n-1})\| - \|f(\tau_{2n-1})\|]\} d\tau_{2n-1}; \\ &n = 1,2,3, \dots; \quad k = 0,1,2,3, \dots, \end{aligned} \quad (258)$$

(249)-ში $\|I^{2n-1}\| - \|f(t_{2n-1})\|$ სიდიდეში „შემავალი ვექტორები“ თითოეული $kT \leq t < (k+1)T$ დროის ინტერვალებში წარმოადგენენ უბან-უბან მუდმივ სიდიდეებს.

შემოვიღოთ აღნიშვნა:

$$\|u(kT)\| = \|I^{2n-1}(\tau_{2n-1})\| - \|f(\tau_{2n-1})\| = \|I^{2n-1}(kT)\| - \|f(kT)\|;$$

$$n = 1,2,3, \dots; k = 0,1,2,3, \dots, \quad (259)$$

(259) გამოსახულების გათვალისწინება (258)-ში მოგვცემს შემდეგ გამოსახულებას:

$$\|f[(k+1)T]\| = e^{\|A^{2n-1}\| \cdot T} \cdot \|f(kT)\| + e^{\|A^{2n-1}\| \cdot (k+1)T} \times$$

$$\times \int_{kT}^{(k+1)T} e^{-\|A^{2n-1}\| \cdot \tau_{2n-1}} \cdot \|A^{2n-1}\| d\tau_{2n-1} \|u(kT)\|;$$

$$n = 1,2,3, \dots; k = 0,1,2,3, \dots, \quad (260)$$

(260)-ში გამოვიყენოთ $e^{\|A\|t}$ ფუნქციის ერთ-ერთი თვისება:

$$\int_0^t e^{\|A\|\tau} d\tau = \|A\|^{-1} (e^{\|A\|t} - 1) = (e^{\|A\|t} - 1) \|A\|^{-1} \quad (261)$$

მაშინ (260) სხვაობითი განტოლება წარმოდგება ასეთ სახეში:

$$\|f[(k+1)T]\| = e^{\|A^{2n-1}\| \cdot T} \cdot \|f(kT)\| + (e^{\|A^{2n-1}\| \cdot T} - \|1\|) \|u(kT)\|;$$

$$n = 1,2,3, \dots; k = 0,1,2,3, \dots, \quad (262)$$

მიღებული (262) განტოლება წარმოადგენს საძიებელ სხვაობით განტოლებას. იგი წარმოდგენილია რეკურენტული ფორმულის სახით და იოლად ემორჩილება კომპიუტერული პროგრამების საშუალებით რიცხვითი მეთოდებით გაანგარიშებას.

3.9. ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში ცვლადთა მდგომარეობის მატრიცული განტოლებების რიცხვითი ამოხსნა პარალელური მუშაობის ლუწი რეჟიმების განზოგადებული $(2n-1) \frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n} \leq 2n \frac{\pi}{6\omega}$ ინტერვალებისათვის

(208) გამოსახულებიდან გვაქვს $f(t_{2n})$ -ისათვის შემდეგი მატრიცული გამოსახულება:

$$\|f(t_{2n})\| = \|U_{dc}^{2n}, u_{c1}^{2n}, u_{c2}^{2n}, u_{dc0}^{2n}, u_{c3}^{2n}, i_{L1}^{2n}, i_k^{2n}\|^t,$$

$$n = 1,2,3, \dots, \quad k = A, B, C. \quad (263)$$

სადაც, როგორც (243) გამოსახულებაში, აქაც t - ზემოთ ინდექსი ნიშნავს ტრანსპონირებულ მატრიცას.

(210)-ში შემოვიღოთ აღნიშვნები:

$$\|A^{2n}\| = \|(\Delta^{2n})^{-1}\|; \|I^{2n}\| = \|f'_2(t_{2n}, u_{mc}^{2n})\|$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, \quad k = A, B, C. \quad (264)$$

(254)-ის გათვალისწინებით (210) გამოსახულება გადაიწერება ასეთნაირად:

$$\left\| \frac{df(t_{2n})}{dt_{2n}} \right\| = \|A^{2n}\| \cdot \|I^{2n-1}\|, n = 1, 2, 3, \dots, \quad (265)$$

(255) განტოლება წარმოადგენს მდგომარეობათა ცვლადების განტოლებას განზოგადებული $(2n - 1) \frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n} \leq 2n \frac{\pi}{6\omega}$ ინტერვალისათვის მატრიცულ ფორმაში.

ყოველი განზოგადებული ლუწი ინტერვალებში $\|f(t_{2n})\|$ ელექტრული სამიებული სიდიდეების საწყისი მნიშვნელობები იქნება $t_{2n} = (2n - 1) \frac{\pi}{6\omega}$ დროში ამავე სიდიდეების მნიშვნელობები. ე.ი. შესაბამისად ვლებულობთ:

$$\|f(t_{2n})\|_{t_{2n}=(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}} = \left\| f \left[(2n - 1) \frac{\pi}{6\omega} \right] \right\|, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (266)$$

(265) განტოლების ზოგად ამონახსნს ვეძებთ ასეთ სახეში:

$$\|f(t_{2n})\| = e^{\|A^{2n}\| \cdot t_{2n}} \cdot \|k(t_{2n})\|, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (267)$$

სადაც $\|k(t_{2n})\|$ - ნებისმიერი ვექტორის მატრიცაა $n \times 1$ განზომილებიანი მუდმივი ელემენტებით.

ამჟამადაც, თუ ვისარგებლებთ ამავე პარაგრაფის ა) პუნქტში განხილული გაანგარიშების მეთოდით, მაშინ ზოგიერთი გარდაქმნების შემდეგ ლუწი რეჟიმების განზოგადოებულ $(2n - 1) \frac{\pi}{6\omega} \leq t_{2n} \leq 2n \frac{\pi}{6\omega}; n = 1, 2, 3 \dots$ ინტერვალების შესაბამისი (265) განტოლების ამონახსნისათვის გვაქვს შემდეგი გამოსახულება:

$$\|f(t_{2n})\| = e^{\|A^{2n}\| \cdot [t_{2n} - (2n-1)\frac{\pi}{6\omega}]} \cdot \left\| f \left[(2n - 1) \frac{\pi}{6\omega} \right] \right\| + e^{\|A^{2n}\| \cdot t_{2n}} \times$$

$$\times \int_{(2n-1)\frac{\pi}{6\omega}}^{2n\frac{\pi}{6\omega}} e^{-\|A^{2n}\|\cdot\tau_{2n}} \cdot \|A^{2n}\| \cdot [\|I^{2n}(\tau_{2n})\| - \|f(\tau_{2n})\|] d\tau_{2n};$$

$$n = 1, 2, 3, \dots; \quad (268)$$

ამგვარად, მივიღეთ ზუსტი ამონახსნი განზოგადებული ლუწი რეჟიმების ინტერვალებისათვის შესაბამისი საწყისი პირობების გათვალისწინებით.[40].

$$(268) \text{ განტოლებაში დავუშვათ } (2n - 1)\frac{\pi}{6\omega} = kT \text{ და } t_{2n} = (k + 1)T;$$

$$n = 1, 2, 3, \dots; \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (269)$$

მაშინ მვიღებთ:

$$\|f[(k + 1)T]\| = e^{\|A^{2n}\|\cdot T} \cdot \|f(kT)\| + e^{\|A^{2n}\|\cdot(k+1)T} \times$$

$$\times \int_{kT}^{(k+1)T} \{e^{-\|A^{2n}\|\cdot\tau_{2n}} \cdot \|A^{2n}\| \cdot [\|I^{2n}(\tau_{2n})\| - \|f(\tau_{2n})\|]\} d\tau_{2n}$$

$$n = 1, 2, 3, \dots; \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (270)$$

(270)-ში შემოვიღოთ აღნიშვნა:

$$\|u'(kT)\| = \|I^{2n}(\tau_{2n})\| - \|f(\tau_{2n})\| = \|I^{2n}(kT)\| - \|f(kT)\|;$$

$$n = 1, 2, 3, \dots \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (271)$$

(271)-ის გათვალისწინება (270)-ში მოგვცემს შემდეგ გამოსახულებას:

$$\|f[(k + 1)T]\| = e^{\|A^{2n}\|\cdot T} \cdot \|f(kT)\| + e^{\|A^{2n}\|\cdot(k+1)T} \times$$

$$\times \int_{kT}^{(k+1)T} e^{-\|A^{2n}\|\cdot\tau_{2n}} \cdot \|A^{2n}\| d\tau_{2n} \cdot \|u'(kT)\|;$$

$$n = 1, 2, 3, \dots; \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (272)$$

(272)-ში გამოვიყენოთ (261) და გარდაქმნების შედეგად მივიღებთ:

$$\|f[(k + 1)T]\| = e^{\|A^{2n}\|\cdot T} \cdot \|f(kT)\| + (e^{\|A^{2n}\|\cdot T} - \|1\|) \cdot \|u'(kT)\|;$$

$$n = 1, 2, 3, \dots; \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (273)$$

მიღებული (273) განტოლება წარმოადგენს საძიებელ სხვაობით განტოლებას. იგი შეთავსებადია კომპიუტერული ტექნოლოგიების გაანგარიშების რიცხვით მეთოდებთან.

დასკვნა

1. პირველად ენერგეტიკასა და ელექტროინჟინერიაში შესრულდა მიზანმიმართული თეორიული სამუშაოები მზის ენერჯის ფოტოელექტრული, ქარის ენერჯის მექანოტრონული გარდამქმნელების და აკუმულიატორული ბატარეების დამუხტვა-განმუხტვის მიკროპროცესორული კონტროლიორით სელექციურობის საფუძველზე ავტონომიური ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემის, ცვლადი დენის მიმღებ ქსელთან პარალელური მუშაობის პირობებში, საექსპლუატაციო და საანგარიშო პრინციპული ელექტრული სქემის შექმნის და მათში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების საკითხები.

2. განსაზღვრულია არატრადიციული ენერგორესურსების შესაძლო ეფექტიანი მარაგი. შესწავლილია ქარის ასინქრონული გენერატორის მუშაობის გენერატორული, ძრავული და დამუხრუჭების რეჟიმები; ამ რეჟიმებში გენერატორის როტორის ბრუნვის კუთხური სიხშირის, როტორის გრაგნილში გამავალ დენსა და მასში დაინდუქცირებული ე.მ. ძალის ვექტორებს შორის ძვრის კუთხის ცვალეზადობის კანონზომიერება სრიალზე დამოკიდებულებით. პირველად მიღებულია ქარის ასინქრონული გენერატორის გამომავალ მომჭერებზე სამფაზა ფაზური ძაბვების მყისა მნიშვნელობების თეორიული ზოგადი გამოსახულებები ქარის, ლილვზე დამაგრებული ფრთის და მიმღები ცვლადი დენის ქსელის ყველა შესაძლო დასაშვები პარამეტრების გათვალისწინებით.

3. წარმოდგენილია მზის ფოტოელექტრული ელემენტის შენაცვლების სრულყოფილი ელექტრული სქემა, რომელშიც გათვალისწინებულია ყველა დამახასიათებელი საანგარიშო პარამეტრები. დადგინდა ფოტოელემენტის უქმი სვლის, ნომინალური რეჟიმის და მოკლე შერთვის პარამეტრებზე დამოკიდებული ექვივალენტური კოეფიციენტები.

ტელიორის მწკრივებად დაშლის შედეგად მიღებულ იქნა მზის ელემენტის აქტიური სიმძლავრის ოპტიმალური რაციონალური გამოსახულება მრავალწევრის სახით. დადგენილი იქნა ძაბვის და დენის ოპტიმალურ-ექსტრემალური მნიშვნელობები. მზის ელემენტის უქმი სვლის, ოპტიმალურ-ექსტრემალური და მოკლე შერთვის რეჟიმების დამახასიათებელი შესაბამისი სამი წერტილის ფარდობითი კოორდინატების მიხედვით ლაგრანჟის ინტერპოლაციის ფორმულის საფუძველზე დადგენილი იქნა მზის ელემენტის საინჟინრო გათვლებისათვის მოსახერხებელი ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის გამოსახულება კვადრატული სამწევრის სახით.

4. არატრადიციული განახლებადი სხვადასხვა ენერგიების შესაბამისი გარდაქმნილი ელექტრული ენერჯის მიკროპროცესორული კონტროლიორით სელექციური ერთობლივი გამოყენების შესაძლებლობამ შეგვიქმნა თანამედროვე ავტონომიური ჰიბრიდული მუდმივი და ცვლადი დენის ელექტროენერგეტიკული სისტემის განზოგადებული სტრუქტურული და საანგარიშო ელექტრული სქემები საქართველოს ელექტროსისტემის ცვლადი დენის მიმღებ ქსელთან პარალელური მდგრადი მუშაობის განხორციელების პირობებში.

5. დადგინდა ავტონომიური ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული გაერთიანებული სისტემის სამიეხელი ელექტრული სიდიდეების დროში ცვალებადობის ერთი პერიოდის განმავლობაში მდგრადი განზოგადებული ექვსი კენტი და ექვსი ლუწი დროის ინტერვალები. შესაბამისად, ამ ინტერვალებში შესწავლილია აღნიშნულ გაერთიანებულ გარდამქნელ სისტემაში ელექტრული სიდიდეების, მართვადი ნახევარგამტარული ვენტილების მართვის იმპულსების და კომუტაციური ფუნქციების დროზე დამოკიდებულების კანონზომიერებანი.

6. დამუშავებულია ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების მეთოდოლოგია. შედგენილია განზოგადებული კენტი და ლუწი დროის ინტერვალისათვის ელექტრული წონასწორობის განტოლებები რეზულტირებული კომპლექსური სამივნივლი ელექტრული სიდიდეების მიმართ. დადგენილია ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის ექვივალენტური პარამეტრები და კოეფიციენტები. კომპლექსურ რეზულტირებულ ცვლადთა უკუ გარდაქმნის მატრიცების საფუძველზე მიღებულია შესაბამისი ფაზური ელექტრული სიდიდეების მყისა მნიშვნელობების გამოსახულებები.

7. ჩატარებულია მიღებული განტოლებათა სისტემის ამოხსნის პროცედურა და მიღებულია მოცემულ პარამეტრებზე დამოკიდებული დამყარებული პროცესების შესაბამისი განზოგადებული n - ინტერვალის გამოსახულება, გამომდინარე ერთმანეთის მომდევნო $2n-1$ კენტ და $2n$ ლუწ ინტერვალში ელექტრული სიდიდეების საშუალო მნიშვნელობების ერთმანეთთან გატოლებიდან.

8. შესრულებულია ავტონომიური ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემების ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების კომპიუტერული მოდელირება განზოგადებული კენტი და ლუწი ინტერვალისათვის. განსაზღვრულია თითოეული საანგარიშო ელექტრული სიდიდეების დროში წარმოებულების გამოსახულებები მატრიცულ ფორმაში, რომელთა საფუძველზედაც მიღებულია კომუტაციური გადაძაბვების ოპტიმიზაციის პირობა.

9. განხილულია ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემის მათემატიკური ოპერაციების ელემენტების ძირითადი თვისებები. თითოეულ განზოგადებულ კენტ და ლუწ ინტერვალისათვის.

შედგენილია გარდამავალი და დამყარებული ერთიანი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები.

10. დამუშავებულია ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში საძიებელ ცვლადთა მდგომარეობის მატრიცული განტოლებების შედგენის მეთოდიკა და მათი რიცხვითი ამოხსნა განზოგადებული კენტი და ლუწი რეჟიმების შესაბამისი ინტერვალებისათვის. მიღებულია შესაბამისი სხვაობითი განტოლებები რეკურენტული ფორმულის სახით, რომლებიც შეთავსებადია კომპიუტერული პროგრამების საშუალებით პროცესების რიცხვითი მეთოდებით გაანგარიშებასთან.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. კობრეიძე გ. რეხვიაშვილი ზ. ფხაკაძე შ. პაპიძე ზ. ტეტუნაშვილი ე. ქარის ელექტროენერგეტიკული დანადგარების ერთიანი გარდამქმნელი სისტემა და მუშაობის რეჟიმების დადგენა. „ენერჯია“ №4 (72). თბილისი, 2014 წ. 41-44გვ.
2. კობრეიძე გ. რეხვიაშვილი ზ. ფხაკაძე შ. პაპიძე ზ. ტეტუნაშვილი ე. ენერგოეფექტურ ავტონომიურ ჰიბრიდულ ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში პროცესების მოდელირება ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მუშაობის პირობებში. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. „მდგრადი ენერგეტიკა: გამოწვევები და განვითარების პერსპექტივები“. ქუთაისი. საქართველო. 18 ივნისი. 2015 წ. 97-100გვ.
3. კობრეიძე გ. ფხაკაძე შ. პაპიძე ზ. შუშაკიძე თ. ქარის და მზის ენერჯიების ელექტრულ ენერჯიაში გარდაქმნის ტექნოლოგიები. III სამეცნიერო კონფერენცია „მდგრადი ენერგეტიკა: გამოწვევები და განვითარების პერსპექტივები“. ქუთაისი. საქართველო. 25 ნოემბერი. 2015 წ. 95-99გვ.
4. პაპიძე ზ. ფხაკაძე შ. ძირითადი რეჟიმების დადგენა ჰიბრიდული ელექტროენერგეტიკული სისტემის ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მუშაობის პირობებში. IV საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. „მდგრადი ენერგეტიკა: გამოწვევები და განვითარების პერსპექტივები“. ქუთაისი. საქართველო. 2016 წ. 44-47გვ.
5. პაპიძე ზ. ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესები, ქარის ელექტროსადგურისა და სამფაზა მართვადი გამმართველის ერთობლივი მუშაობის პირობებში. IV საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. „მდგრადი ენერგეტიკა: გამოწვევები და განვითარების პერსპექტივები“. ქუთაისი. საქართველო. 2016 წ. 98-101 გვ.
6. ქებურია მ. ქათამაძე ი. პაპიძე ზ. ერთ მგვტ-მდე სიმძლავრის მცირე ჰესებზე ასინქრონული გენერატორების გამოყენების ეკონომიკური ასპექტები. „ენერჯია“ №3(71) თბილისი, 2014 წ. 39-44 გვ.
7. ჩაფიძე კ. პაპიძე ზ. ანალოგიური საზომი ხელსაწყოების დამოწმების დინამიკური რეჟიმები. „მეცნიერება და ტექნოლოგიები“. №3-4. თბილისი, 2010 წ. 39-42 გვ.
8. კობრეიძე გ., ლაოშვილი დ., სამარდანიშვილი დ. განახლებადი ენერჯიის წყაროებიანი მუდმივი და ცვლადი დენის პარალელური ენერგოსისტემის გამოყენების პერსპექტიული მიმართულებები. „მეცნიერება და ტექნოლოგიები“. თბილისი, 2002წ. 87-90გვ.
9. Андреев В.М., Грилехес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л. „Наука“, Ленинградское отделение. 1989 г. 309 с.

10. კობრეიძე გ., ლაოშვილი დ., სამარლანიშვილი დ. განახლებადი ენერჯის წყაროებიანი მუდმივი და ცვლადი დენის ავტონომიური ჰიბრიდული ენერჯოსისტემების პარალელური მუშაობა მუდმივი დენის იმპულსური გარდამსახების საშუალებით. სტუ-ს შრომები N7(446). თბილისი, 2002წ. 31-35გვ.

11. Ахмедов Р.Б., Баум И.В., Пожарнов В.А., Чаховский В.М., Серия Гелиоэнергетика Том.1. Солнечные электрические станции. М. 1986г. 121с.

12. Фаренбрух А., Бьюб Р., Солнечные элементы. Теория и эксперимент. Перевод с английского. М. Энергоатомиздат. 1987г. 278 с.

13. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. Перевод на русский язык. Энергоатомиздат. 1983г. 358 с.

14. Баиерс Т. 20 Конструкций с солнечными элементами. М. „Мир”, 1988г. 198с.

15. Кохреидзе Г.К., Метревели В.Ш., Лаошвили Д.П., Самарганишвили Д.А. К вопросу устойчивости режимов в гибридной энергосистеме с нетрадиционными источниками энергии. Труды ХПИ, Выпуск 12. Том 1. Харьков 2002 г. 264-266 с.

16. კობრეიძე გ., ფხაკაძე შ. განახლებადი ენერჯის წყაროებიან ავტონომიურ ენერჯოსისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელირება. „ენერჯია” N3(55). თბილისი, 2010წ. 37-43გვ.

17. Кохреидзе Г.К., Лаошвили Д.П. Пхакадзе Ш.А. Управление системой при совместной работе солнечных фотоэлектрических станций и сети переменного тока. НТУ „ХПИ”, Украина, Харьков. 2011г. N03(79). 371-374с.

18. კობრეიძე გ., ფხაკაძე შ. განახლებადი ენერჯის წყაროებიან ავტონომიურ ენერჯოსისტემაში დინამიური პროცესების კომპიუტერული მოდელირება „ენერჯია” N3(55). თბილისი, 2010წ. 44-50გვ.

19. კობრეიძე გ., ფხაკაძე შ., გოგინაშვილი ნ., ჯავშანაშვილი ნ. მზის ფოტოელექტრული სადგურისა და სამფაზა ცვლადი დენის ქსელის ერთობლივი მუშაობა. „ენერჯია” N3(59) თბილისი, 2011წ. 20-28გვ.

20. ფრანგიშვილი გ. პაპიძე ზ. წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების სისტემაში, სამფაზა მართვად გამმართველებში ელექტრომაგნიტური პროცესების მათემატიკური მოდელირება, 83-ე სტუდენტური საერთაშორისო ღია სამეცნიერო კონფერენციაზე წარდგენილი სამეცნიერო ნაშრომი (ხელნაწერის უფლებით).თბილისი, 2015 წ. 1-12 გვ.

21. Плесков Ю.В. Фотоэлектрохимическое преобразование солнечной энергетики. М., „Химия”, 1990г. 175 с.

22. Рензо Д. де: Пер. с. Англ.: Под редакцией Я.И. Шефтера. Ветроэнергетика. М. Энергоатомиздат. 1982г. 272 с.

23. Каргиев В.М., Мартиросов С.Н., Муругов В.П., Пинов А.Б., Сокольский А.К., Харатонов В.П. Ветроэнергетика. Руководство по применению ветроустановок малой и средней мощности. М. „Интерсоларцентр”, 2001г. 61 с.

24. Елистратов В.В., Константинов И.А., Панфилов А.А. Нагрузка на элементы Ветроэнергетической установки на ее фундамент и основание. Учебное пособие СП, изд-во СПбГТУ, 1999г. 36 с.

25. Кохреидзе Г., Лаошвили Д., Курашвили И., Пхакадзе Ш. Режимы пуска и тяги двигателя постоянного тока с учетом трехфазного мостового выпрямительно-инверторного преобразователя тяговой подстанции. Труды НТУ „ХПИ”, Харьков. 2010г. 328-331 с.

26. კობრეიძე გ., გოგინაშვილი ნ., ყურაშვილი ი., ფხაკაძე შ., მეგენეიშვილი თ. წევის ქვესადგურების ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება „ ენერგია,” N2 (62) 2012წ. თბილისი, 5-16 გვ.

27. Кохреидзе Г., Лаошвили Д., Мурджикнели Г., Курашвили И., Пхакадзе Ш. Управление и оптимизация режимов параллельной работы гибридной автономной электроэнергетической системы и сети переменного тока. „Кременчук”, Украина ,2012г. 220-224с.

28. Чаки Ф., Герман И., Ипшиц И и др. Силовая электроника. Примеры и расчеты. М. энергоиздат 1982 г. 383с.

29. Джюджи Л., Пелл Б. Силовые полупроводниковые преобразователи частоты. Теория, Характеристики, применение. М. энергоиздат 1983 г. 399с.

30. Тонкаль В.Е., Руденко В.С., Жуйков В.Я., Сучик В.Е., Денисюк С.П., Новосельцов А.В. Ответственный редактор Шидловский А.К. Вентильные преобразователи переменной структуры. Киев. Наукова Думка, 1990г. 335с.

31. Иванов В.А., Чемоданов Б.К., Медведев В.С., Юшенко. Математические основы теории автоматического регулирования. Изд-во „Высшая школа”, М. 1971г. 807с.

32. Зевеке Г.В., Ионкии П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. „Энергия”, М. 1975г. 751с.

33. Мерабишвили П.Ф. Теория переходных процессов в цепях с вентильными преобразователями. Изд-во Тбилиского университета. Тбилиси. 1990г. 292с.

34. Ионкин П.А., Мельников Н.А., Даревский А.И., Кухаркин Е.С. Теоретические основы электротехники ч.1 Изд-во „Высшая школа”, М. 1965г. 734с.

35. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. В трех частях. Изд-во „Высшая школа”, М. 1962г. 791с.
36. Тонкаль В.Е. Синтез автономных инверторов модуляционного типа. Киев. „Науково Думка”. 1979г. 206с.
37. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей-Линейные цепи. М. „Высшая школа”, М. 1981г. 333с.
38. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Нелинейные цепи. М. „Высшая школа”, М. 1986г. 352с.
39. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г., Николаенко В.Г. Оптимизация несимметричных режимов систем электроснабжения. Киев, Наукого Думка, 1987г. 174с.
40. Чуа Л.О., Пен-Мин Лин. Машинный анализ электронных схем (алгоритмы и вычислительные методы). Перевод с английского. Москва. „энергия”, М. 1980г. 638с.
41. კობრიძე გ., გოგინაშვილი ნ., ყურაშვილი ი., ფხაკაძე შ., მეგენიშვილი თ. წევის ქვესადგურების ერთიან გარდამქნელ სისტემაში მატარებლის რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმებში პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება „ ენერგია,” N2 (62) 2012წ. თბილისი, 17-29 გვ.
42. Мерабишвили П.Ф., Кохреидзе Г.К. Электромагнитные процессы в трехфазных управляемых выпрямителях. Электричество М. 1986г N8. 28-33с.
43. Мерабишвили П.Ф., Кохреидзе Г.К. Математическое моделирование Электромагнитных процессов в преобразовательной системе с трехфазным автономным инвертором тока. Электричество М. 1990г N3. Энергоатомиздат-во 31-37с..
44. კობრიძე გ., გოგინაშვილი ნ., ყურაშვილი ი., ფხაკაძე შ., მეგენიშვილი თ. წევის ქვესადგურების ერთიანი გარდამქნელ სისტემის მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნა. „ენერგია,” N2 (62) 2012წ. თბილისი, 30-36 გვ.
45. Дьяконов В., Круглов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. СПб.: Питер, 2001 г. 475с.
46. Герман-Галкин С.Г., Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: Корона-Век, 2008г. 368с.
47. Герман-Галкин С.Г., Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. СПб.: „Корона Принт” , 2001г. 320с.
48. Черных И.В. Моделирование электромеханических устройств в Matlab, Sim Power System и Simulink. Питер. ФМК. 2008г. 285с.

49. Гончаров Ю.П., Ермуратский В.В., Зайка Э.И., Штейнберг А.Ю. Автономные инверторы изд-во „Штинца“ 1974г. 336с.

50. Макаров И.М., Менский Б.М. Таблица обратных преобразований Лапласа и обратных Z-преобразований. М. „Высшая школа“ 1978г. 247с.

51. Неиман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. В двух томах. Л. Энергоиздат. 1981г. 145 с.

52. Лутидзе Ш.И. Новая электротехника. М.И.З.Д. „Лонгфелло“ 2010г. 336с.

53. პაპიძე ზ. ავტონომიურ ჰიბრიდულ ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება ცვლადი დენის ქსელთან პარალელური მდგრადი მუშაობის პირობებში საგანმანათლებლო პროგრამის კვლევითი კომპონენტის კოლოქვიუმი-3-ის სამეცნიერო ნაშრომი (ხელნაწერის უფლებით). სტუ, თბილისი, 2017. 1-52 გვ.

54. ფხაკაძე შ., კობრეიძე გ. ჰიბრიდული ავტონომიური ენერგეტიკული პარალელური სისტემის მუშაობის რეჟიმების ოპტიმიზაცია და მდგრადობის გამოკვლევა. ჟურნალი „ენერჯია“, N4 (64) 2012წ. თბილისი, 43-47 გვ.

55. Прохорский А.А. Тяговые и трансформаторные подстанции. М.Транспорт. 1983. 496 с.

56. ლაოშვილი დ., კობრეიძე გ., ფხაკაძე შ., გოგინაშვილი ნ. ენერჯიის განახლებადი წყაროების გამოყენების ტექნიკური პრობლემები. ჟურნალი „ენერჯია“, N1 (65) 2013წ. თბილისი, 32-39 გვ.

57. პაპიძე ზ. ქარის ენერგოდანადგარებში გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემების დამუშავება, სტუ. სტუდენტთა 84-ე კონფერენცია, თბილისი, 2016 წ.

58. Папидзе З. Переходные Электромагнитные и электромеханические процессы в ветровых энергоустановках. „Инженерия и технология“-Варшава. 2016г.