

**იზოლდა ყურაშვილი**

**გარდამსახი სისტემების დამუშავება წევის ქვესადგურების  
ელექტრომომარაგების საიმედოობის გასაზრდელად**

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის  
მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
თბილისი, 0175, საქართველო  
ივნისი, 2012 წ.

საავტორო უფლება, © იზოლდა ყურაშვილი, 2012 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით იზოლდა ყურაშვილის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: “გარდამსახი სისტემების დამუშავება წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების საიმედოობის გასაზრდელად” და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკის და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

ხელმძღვანელი: \_\_\_\_\_ გ. კობრეიძე

რეცენზენტი: \_\_\_\_\_ ა. ვაშაკიძე

რეცენზენტი: \_\_\_\_\_ ო. ზივზივაძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2012 წელი

ავტორი: ყურაშვილი იზოლდა

დასახელება: გარდამსახი სისტემების დამუშავება წვევის ქვესადგურების

ელექტრომომარაგების საიმედოობის გასაზრდელად

ფაკულტეტი: ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

ხარისხი: დოქტორის

სხდომა ჩატარდა: ივნისი, 2012წ.

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

ი. ყურაშვილი

---

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 გამოყენებულ 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 და სამუშაოს აპრობაცია და დისერტაციის სტრუქტურა.

გაშუქებულია დისერტაციის შინაარსი. ნაჩვენებია შესავალში განხილული საკითხები; პირველ თავში დამუშავებულია საკითხები ქვესადგურების ნახევარგამტარულ ვენტილურ გარდამქმნელ სისტემაში პროცესების მათემატიკური მოდელირების შესახებ. დადგენილია სამფაზა ნახევარგამტარულ გარდაქმნელებში არასიმეტრიული გარდამავალი და სტაციონალური პროცესების მიმდინარეობის ხასიათი.

გარდამქმნელი სისტემა განხილულია, როგორც ნახევარგამტარული აგრეგატები, ასევე საკონტაქტო ქსელისა, ლიანდაგებისა და ელმავლის წევის ძრავის ერთიანი სისტემა იმპულსური მოდულაციით.

წევის ძრავების არსებობის გამო აღნიშნული სისტემა ხასიათდება დროში პერიოდულად ცვალებადი პარამეტრებით. ფაზური ცვლადების მიმართ დაწერილი განტოლებები დაიყვანება ამოსახსნელად მეტად რთულ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემაზე. ამ გარემოებამ გამოიწვია მყისა ფაზური ცვლადების გამოყენებაზე უარის თქმა და განტოლებების გასამარტივებლად ახალი კომპლექსური რეზულტირებული საგრაგნილო დამოკიდებული ცვლადების შემოყვანა. ცვლადთა გარდაქმნის გამოყენება იწვევს ისეთ მუდმივ კოეფიციენტებიან მარტივ დიფერენციალურ განტოლებების მიღებას, რომელთა ამოხსნა შესაძლებელია ანალიზურად. ვენტილურ ელექტრულ წრედებში გამოყენებულია ცვლადების სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნის მეთოდი. ამ ორი მეთოდის შერწყმის საფუძველზე მიღებულია გარდამქმნელი სისტემის პროცესების ანალიზის ახალი მოდერნიზებული მეთოდი, რომელშიც გამოიყენება ცვლადთა კომპლექსური და სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნა. ეს მეთოდი საშუალებას იძლევა ერთდროულად გათვალისწინებული იქნას ძალოვანი ტრანსფორმატორის ძირითადი პარამეტრები და ნახევარგამტარულ გარდამქმნელებში კომუტაციური და არასაკომუტაციო განზოგადოებული ინტერვალები კომუტაციური ფუნქციების მწკრივებად დაშლის გათვალისწინებით.

სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნის მეთოდის გამოყენებით ვლემულობით რეკურენტულ განტოლებათა უსასრულო სისტემას, რომლის ამოხსნას ვახდენთ რედუქციის მეთოდით. ჩატერებული სამუშაოების შედეგად მიღებულია შესაბამისი დასკვნები;

მეორე თავში დამუშავებულია საკითხები წევის ქვესადგურის ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის შესახებ სქემით "ორი შებრუნებული ვარსკვლავი გამათანაბრებელი ორფაზა რეაქტორით". გარდამქმნელის ერთიან სისტემაში გათვალისწინებულია დინამიური მოძრავი დატვირთვა.

ამის გამო შედგენილია დინამიკის განტოლებები ლიანდაგებში პოტენციალებისა და დენების გათვალისწინებით. წარმოდგენილია შესაბამისი განტოლების ამონახსნი ლიანდაგში პოტენციალისა და დენის მნიშვნელობებისათვის. განხილულია პროცესების გაანგარიშება არასაკომუტაციო და კომუტაციური დროის ინტერვალებისათვის და მიღებულია დენების ინტეგრალური გამოსახულებები.

გამოსაკვლევი სისტემის პროგრამული ციფრული მოდელირებისათვის შედგენილია გარდამავალი პროცესის მოდელის სრულყოფილი სქემები.

დამუშავებულია წევის ქვესადგურის ერთიანი გამმართველ-ინვერტორული გარდამქმნელი სისტემის საანგარიშო სქემები მატარებლის დაძვრის, წევის და რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმებისათვის წევის ძრავის მართვის განივ-იმპულსური მოდულაციის, საკონტაქტო და სალიანდაგო ქსელების პარამეტრების გათვალისწინებით დროის არასაკომუტაციო და კომუტაციური ინტერვალებში.

მესამე თავში დამუშავებულია საკითხები წევის ქვესადგურების მოდერნიზებული გარდამქმნელი სისტემის შესახებ უნივერსალური სამფაზა ბოგური გამმართველ-ინვერტორული სქემით. არსებულისგან განსხვავებით ჩვენს შემთხვევაში გამოიყენება ელმავლის მუდმივი დენის მიმდევრობით აღზნებიანი წევის ძრავის მართვისათვის IGBT ტრანზისტორულ მოდულებზე აწყობილი განივ-იმპულსური მოდულაციური წრედი. წარმოდგენილია საანგარიშო სქემები მუშაობის სხვადასხვა რეჟიმებისათვის. გათვალისწინებულია შესაბამისი განზოგადოებული დროის ინტერვალები. შედგენილ განტოლებათა სისტემაში გათვალისწინებულია ძრავის ღუზის ექვივალენტური მექანიკური ცვალებადობა მუდმივი დენის ძრავის სიჩქარის გარდამავალი პროცესისას. ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის გამოყენებით საწყისი განტოლებები გარდაიქმნება რეზულტირებული კომპლექსურ განტოლებებად. ცვლადთა უკუ კომპლექსური გარდაქმნის მატრიცა საშუალებას იძლევა განისაზღვროს ფაზური სიდიდეების მყისა მნიშვნელობები.

მეოთხე თავში დამუშავებულია საკითხები სამფაზა ბოგური გამმართველ-ინვერტორული მოდერნიზებული ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების შესახებ. ნაჩვენებია საანგარიშო სქემები დროის თითოეული ინტერვალებისათვის და გარდამავალი პროცესების მოდელების სტრუქტურული სქემები. გაკეთებულია თითოეული თავების მიხედვით შესაბამისი დასკვნები.

წარმოდგენილია ყველა საანგარიშო სქემებისათვის პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირებისათვის შესაბამისი ინტეგრალური გამოსახულებები. ნაჩვენებია წევის ძრავის ღუზაში ძაბვისა და დენის გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები დროის თითოეული ინტერვალებისათვის.

ნაჩვენებია სისტემის მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების შედგენა, რომელთა საფუძველზეც მიღებულია შესაბამისი ამონახსნები რეკურენტული სხვაობითი განტოლებების სახით.

წარმოდგენილია დისერტაციის თემაზე ავტორის მიერ გამოქვეყნებული ძირითადი ნაშრომების სია და წარმოჩენილია ავტორის პირადი წვლილი დისერტაციის ნაშრომის შესრულების შესახებ.

## Abstract

The work of the dissertation deals with the actuality of the topic, purpose of the work and objectives of the research; methods of research; major outcomes of the work and scientific innovations; the field for application of outcomes, publications, approbation of the work and the structure of the dissertation.

There is given a review of the content of the dissertation. There are shown the issues reviewed in the introductory part. The issues given in the first chapter about mathematical modeling of processes in semiconductor valvular transforming systems of substations. There is established a character of transient and stationary processes in three-phase semiconductor transformers.

The transforming system is reviewed as semiconductor aggregates as well as a unified system of contact net, railway and locomotive traction with impulsive modulation.

Because of existence of traction engines the abovementioned system is characterized with periodically time- variable parameters. Equations to phase variables are reduced for solving to essentially difficult differential equations system. Application of phase variables were denied and for simplifying the equation there are introduced new complex resulted dependant variable. Usage of variables transformation causes reception of simple differential equations with such permanent coefficients solving of them is available analytically. There is used a spectral-operational transformation model in valvular electric cycles. On the base of combination of these two models there was get a new modernized method of transforming systems processes analysis which uses complex and spectral-operative transformation of variables. This method allows to consider the main parameters of power transformer and commutative and non-commutative generalized intervals in semiconductor transformers with consideration of distribution into columns.

By application of spectral-operational transforming method we get an infinite system of referent equations which is solved by reduction method. As a result of the work there are made corresponding conclusions.

The second chapter deals with issues of unified transforming system of tractions substations with the scheme "two inverted stars with equalizer two-phase reactor". A unified transforming system considers a dynamic movable load. For this there are composed dynamic equations considering potentials and electricity in rails. There are presented solved equations for potentials and electricity in rails. There is reviewed calculation of processes for commutative and non-commutative time intervals and are get integral power images.

For program digital modeling of the system under study there are composed structural schemes of transitive process models.

The are processed calculative schemes of the unified inventor transforming system of a traction substation for the train start, traction and recuperation and braking regimen with cross-impulsive modulation of the traction engine. With consideration of rail-net parameters in commutative and non-commutative time intervals.

The third chapter deals wit issues of the modernized transforming system of traction substation with a universal three-phase current-converter circuit. Unlike the existing in our case there is applied a cross-impulsive modulating circuit assembled by IGBT transitive modules for traction motor control excited with the permanent locomotive power. There are presented calculative schemes for different working regimen. There are considered relevant generalised time intervals there and in composed equation systems there is considered an engine anchor mechanical capacity for transitive process of constant power engine speed. Initial equations by application

of complex transforming method of variables are converted into complex equations to resulted complex powers. Back-forward transforming matrix of variable allows us to define phase value.

The forth chapter deals with issues of mathematical and computer modeling of electromagnetic and electromechanical transition processes in the three-phase current-converter modernized unified transforming system.

There are shown accounting schemes for each time interval and structural schemes for models of transition processes. There are given corresponding conclusions according to each chapter. There are presented integral images appropriate for computer and mathematical modeling of the process for each accounting scheme. There is demonstrated structural schemes of transition processes models of the current and in the anchor of the traction engine for each time interval.

There is presented how to make a matrix equation of systems condition variables which is the basis of appropriate solutions in the face of recuperated differential equations.

There is presented the list of author's published works in respect with the presented dissertation and there is demonstrated the author's personal contribution to the fulfillment of the thesis work.



## შინაარსი

### შესავალი;

#### 1. ლიტერატურის მიმოხილვა;

#### 2. შედეგები და მათი განსჯა;

თავი 1. წვევის ქვესადგურების ნახევარგამტარულ ვენტილურ გარდამქმნელ სისტემაში სტაციონალური და გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელირება ;

1.1. სამფაზა ნახევარგამტარულ გარდამქმნელებში არასიმეტრიული გარდამავალი და სტაციონალური პროცესების მიმდინარეობის ხასიათი ;

1.2 სამფაზა მართვად გამმართველებში ელექტრომაგნიტური პროცესების გაანგარიშების მათემატიკური მოდელირება ;

1.3 სამფაზა დენის ავტონომიურ ინვერტორულ გარდამქმნელ სისტემაში ელექტრომაგნიტური პროცესების გაანგარიშების მათემატიკური მოდელირება ;

თავი 2. წვევის ქვესადგურის მოდერნიზებული გარდამქმნელი სისტემა უნივერსალური სქემით - "ორი შებრუნებული ვარსკვლავი გამათანაბრებელი ორფაზა რეაქტორით";

2.1. უნივერსალური სქემის შედგენილობა და მოქმედების პრინციპი;

2.2. ელექტრომოდრაფი შემადგენლობის დინამიკის განტოლებები ლიანდაგებში პოტენციალებისა და დენების გათვალისწინებით;

2.3. გარდამქმნელ სისტემაში არაკომუტაციური პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება ;

2.4. გარდამქმნელ სისტემაში კომუტაციური პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება ;

თავი 3. წვევის ქვესადგურის მოდერნიზებული გარდამქმნელი სისტემა უნივერსალური სამფაზა ბოგური გამმართველ-ინვერტორული სქემით ;

3.1. უნივერსალური სქემის შემადგენლობა და მოქმედების პრინციპი ;

3.2. ელმავლის განივ-იმპულსური მოდულაციით მართვადი მუდმივი დენის წვევის ძრავის უნივერსალური ერთიანი სისტემის ელექტრული სქემა და მოქმედების პრინციპი;

3.3. მოდერნიზებული ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების საანგარიშო სქემები მატარებლის გაშვებისა და წვევის რეჟიმებში;

3.4. მოდერნიზებული ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების საანგარიშო სქემები რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმში;

თავი 4. წევის ქვესადგურის სამფაზა ბოგური გამმართველ-ინვერტორული მოდერნიზებულ ერთიან გარდაქმნელ სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და კომუტაციური პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება;

4.1 მატარებლის გაშვებისა და წევის რეჟიმებში პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება არასაკომუტაციო დროის ინტერვალებში; ა,ბ - როცა ტრანზისტორული გასაღები (35) ჩართულია (ნახ.20<sup>ა</sup>) და გ,დ - როცა ტრანზისტორული გასაღები (35) გამორთულია (ნახ 20<sup>ბ</sup>);

ა) მათემატიკური მოდელირება  $t_{n-1} = \frac{1}{\omega} (n-1) \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \leq t \leq \tau_1$  დროის ინტერვალებში (ნახ 20, ა);

ბ) კომპიუტერული მოდელირება  $t_{n-1} = \frac{1}{\omega} (n-1) \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \leq t \leq \tau_1$  დროის ინტერვალებში (ნახ 20,ა);

გ) მათემატიკური მოდელირება  $\tau_1 \leq t \leq t_n = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \right]$  დროის ინტერვალებში (ნახ 20, ბ);

დ) კომპიუტერული მოდელირება  $\tau_1 \leq t \leq t_n = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \right]$  დროის ინტერვალებში (ნახ 20,ბ);

4.2. მატარებლის გაშვებისა და წევის რეჟიმებში პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება დროის კომუტაციური ინტერვალებში. ა, ბ, - როცა ტრანზისტორული გასაღები (35) ჩართულია (ნახ 21,ა) და გ, დ - როცა ტრანზისტორული გასაღები (35) გამორთულია (ნახ 21,ბ);

ა) მათემატიკური მოდელირება  $t_n = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \right] \leq t \leq \tau_2$  დროის ინტერვალებში (ნახ 21,ა);

ბ) კომპიუტერული მოდელირება  $t_n = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \right] \leq t \leq \tau_2$  დროის ინტერვალებში (ნახ 21,ა);

გ) მათემატიკური მოდელირება  $\tau_2 \leq t \leq t_{n+1} = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) + \gamma \right]$  დროის ინტერვალებში (ნახ 21, ბ);

დ) კომპიუტერული მოდელირება

$\tau_2 \leq t \leq t_{n+1} = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) + \gamma \right]$  დროის ინტერვალებში (ნახ 21,ბ);

4.3. მატარებლის რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმებში პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება დროის არასაკომუტაციო ინტერვალებში; ა, ბ - როცა  $t_{n-1} = \frac{1}{\omega} (n-1) \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \leq t \leq \tau_1$  დროის ინტერვალში ტრანზისტორული გასაღები (37) გამორთულია (ნახ 22, ა) და გ, დ - როცა  $\tau_1 \leq t \leq t_n = \frac{1}{\omega} n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right)$  დროის ინტერვალში ტრანზისტორული გასაღები (37) ჩართულია (ნახ 22,ბ);

ა) მათემატიკური მოდელირება  $\frac{1}{\omega}(n-1)\left(\frac{\pi}{3}-\gamma\right) \leq t \leq \tau_1$   
დროის ინტერვალებში (ნახ 22,ა) ;

ბ) კომპიუტერული მოდელირება  $\frac{1}{\omega}(n-1)\left(\frac{\pi}{3}-\gamma\right) \leq t \leq \tau_1$   
დროის ინტერვალებში (ნახ 22, ა) ;

გ) მათემატიკური მოდელირება  $\tau_1 \leq t \leq t_n = \frac{1}{\omega}\left[n\left(\frac{\pi}{3}-\gamma\right)\right]$   
დროის ინტერვალებში (ნახ 22, ბ) ;

დ) კომპიუტერული მოდელირება  $\tau_1 \leq t \leq t_n = \frac{1}{\omega}\left[n\left(\frac{\pi}{3}-\gamma\right)\right]$   
დროის ინტერვალებში (ნახ 22, ბ) ;

4.4 მატარებლის რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმებში პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება კომუტაციური დროის ინტერვალებში. ა, ბ - როცა  $t_n = \frac{1}{\omega}\left[n\left(\frac{\pi}{3}-\gamma\right)\right] \leq t \leq \tau_2$  დროის ინტერვალებში ტრანზისტორული გასაღები (37) გამორთულია (ნახ.23,ა) და გ, დ - როცა  $\tau_2 \leq t \leq t_{n+1} = \frac{1}{3}\left[n\left(\frac{\pi}{3}-\gamma\right) + \gamma\right]$  დროის ინტერვალებში ტრანზისტორული გასაღები (37) ჩართულია (ნახ.23,ბ);

ა) მათემატიკური მოდელირება  $t_n = \frac{1}{\omega}\left[n\left(\frac{\pi}{3}-\gamma\right)\right] \leq t \leq \tau_2$  დროის ინტერვალებში (ნახ. 23, ა) ;

ბ) კომპიუტერული მოდელირება  $t_n = \frac{1}{\omega}\left[n\left(\frac{\pi}{3}-\gamma\right)\right] \leq t \leq \tau_2$   
დროის ინტერვალებში (ნახ. 23, ა) ;

გ) მათემატიკური მოდელირება  $\tau_2 \leq t \leq t_{n+1} = \frac{1}{\omega}\left[n\left(\frac{\pi}{3}-\gamma\right) + \gamma\right]$   
დროის ინტერვალებში (ნახ. 23, ბ) ;

დ) კომპიუტერული მოდელირება  $\tau_2 \leq t \leq t_{n+1} = \frac{1}{\omega}\left[n\left(\frac{\pi}{3}-\gamma\right) + \gamma\right]$   
დროის ინტერვალებში (ნახ. 23, ბ) ;

4.5. ერთიანი გარდაქმნელი სისტემის მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნა გაშვებისა და წვეთი რეჟიმების  $t_{n-1} \leq t \leq \tau_1$  დროის ინტერვალებისათვის (ნახ. 20, ა) და რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმის  $t_n \leq t \leq \tau_2$  დროის ინტერვალებისათვის (ნახ. 23, ა) ;

ა) გაშვებისა და წვეთი რეჟიმების  $t_{n-1} \leq t \leq \tau_1$  დროის ინტერვალის (ნახ. 20, ა) ;

ბ) რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმების  $t_n \leq t \leq \tau_2$  დროის ინტერვალის (ნახ. 23, ა) ;

3. დასკვნა ;

გამოყენებული ლიტერატურა .

## ნახაზების ნუსხა

ნახ. 1. სამფაზა მართვადი გამმართველიანი გარდამქმნელის სქემა.....	28
ნახ. 2. კომუტაციური ფუნქციების გრაფიკი.....	32
ნახ. 3. გარდამქმნელის გაშვებისას გარდამავალი პროცესების მრუდები 1 - ექსპერიმენტალური; 2 - გაანგარიშებით.....	41
ნახ. 4. ინვერტორ-ტრანსფორმატორ-დატვირთვის გარდამქმნელი სისტემის სქემა.....	41
ნახ. 5. სამფაზა ავტონომიური დენის ინვერტორის კომუტაციური ფუნქცია.....	44
ნახ. 6. შესავალი $i_a(t)$ დენისა და ფაზური დენების მრუდები: 1-ეგმ-ზე გაანგარიშებული; 2 - ანალიზურად გაანგარიშებული; 3 - ექსპერიმენტული გზით გადაღებული ოსცილოგრამა.....	53
ნახ. 7. $i_a(t)$ შესავალი დენის გარდამავალი და დამყარებული პროცესის მრუდი გარდამქმნელი სისტემის სიმეტრიული დატვირთვის გათვალისწინებით: 1 - ანალიზური გაანგარიშება; 2 - ექსპერიმენტული ოსცილოგრამა.....	55
ნახ. 8. წევის ქვესადგურის გარდამქმნელის ერთიანი სისტემა "ორი შებრუნებული ვარსკვლავი გამათანაბრებელი ორფაზა რეაქტორით", დატვირთული განედურ-იმპულსური მართვადი ელმავლის მუდმივი დენის წევის ძრავით.....	58
ნახ. 9. დატვირთვის წრედში $U_H$ ძაბვის ცვლილების, ქსელიდან მიღებული $i_1$ დენის და ძრავის $i$ დენის ცვლილების დიაგრამა .....	63
ნახ. 10. რეკუპერაციისას ძაბვებისა და დენების დიაგრამები ნახ.8 სქემის მიხედვით ჩამრახი 30-ის 2° - მდგომარეობაში ყოფნისას.....	64
ნახ. 11. გარდამქმნელის საანგარიშო ელექტრული სქემა არასაკომუტაციო დროის ინტერვალში T ტირისტორის ღია მდგომარეობაში, $i_{BO}=0$ , $i_{c\phi}=0$ , $i_n \approx 0$ .....	73
ნახ. 12. წევის ტრანსფორმატორის რეზულტირებული საგრაგნილე დენების დროში ფორმირების ბლოკ-სქემა.....	80
ნახ. 13. წევის ტრანსფორმატორის და დატვირთვის ფაზური დენების მყისა მნიშვნელობების ბლოკ-სქემა.....	81
ნახ. 14. წევის ქვესადგურის გარდამქმნელი სისტემის პრინციპული ელექტრული სქემა ორფაზა გამათანაბრებელი რეაქტორიანი გამმართველის მუშაობის კომუტაციურ ინტერვალში, T ტირისტორის გაღებისას $i_{Bo}=0$ , $i_{c\phi}=0$ , $i_n \approx 0$ .....	84
ნახ. 15. ძაბვები და დენები დენების კომუტაციისას.....	85
ნახ. 16. რეზულტირებული საგრაგნილო დენების d, q კოორდინატებში ფორმირების ბლოკ-სქემა.....	92
ნახ. 17. რეზულტირებული საგრაგნილო დენების d, q კოორდინატებში ფორმირების ბლოკ-სქემა (გაგრძელება).....	93
ნახ. 18. წევის ტრანსფორმატორის ფაზური დენების, დატვირთვის დენის და გამათანაბრებელი ორფაზა რეაქტორის დენების ფორმირების ბლოკ-სქემა.....	94

- ნახ. 19. წევის ქვესადგურის სამფაზა ბოგური გამმართველ-ინვერტორული გარდამქმნელისა და ელმავლის განედურ-იმპულსური მოდულაციით მართვადი მუდმივი დენის წევის ძრავის ერთიანი სისტემის პრინციპული ელექტრული სქემა.....97
- ნახ.20. ე.მ.შ-ის გაშვებისა და წევის რეჟიმებში გარდამქმნელი სისტემის საანგარიშო სისტემა არასაკომუტაციო დროის ინტერვალებში, როცა: ა)  $t=t_{n-1}$  მომენტში 35-ტრანზისტორული გასაღები ჩართულია და ბ)  $t=\tau_1$  მომენტში კი გამორთულია.....102
- ნახ: 21. ემშ-ის გაშვებისა და წევის რეჟიმებში გარდამქმნელი სისტემის საანგარიშო სქემა კომუტაციური დროის ინტერვალებში, როცა: ა)  $t=t_n$  მომენტში 35-ტრანზისტორული გასაღები ჩართულია და ბ)  $t=\tau_2$  მომენტში კი გამორთულია.....103
- ნახ. 22. გარდამქმნელი სისტემის საანგარიშო სქემა ემშ-ის რეკუპერაციული დამუხრუჭებისას დროის არა საკომუტაციო ინტერვალებში.....111
- ნახ. 23. გარდამქმნელი სისტემის საანგარიშო სქემა ემშ-ის რეკუპერაციული დამუხრუჭებისას დროის კომუტაციურ ინტერვალებში .....112
- ნახ. 24. წევის ტრანსფორმატორის რეზულტირებული კომპლექსური დენების  $d, q$  მდგენელებისა და ფაზური დენების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა დროის  $t_{n-1} \leq t \leq \tau_1$  და  $\tau_1 \leq t \leq t_n$  ინტერვალებში (ნახ. 20. ა და ნახ. 20 ბ-ს) მიხედვით .....119
- ნახ. 25. წევის ძრავის ღუზაში ძაბვისა და დენის გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა  $\tau_1 \leq t \leq t_n$  დროის ინტერვალებში .....123
- ნახ. 26. რეზულტირებული კომპლექსური დენების  $d, q$  მდგენელებისა და წევის ტრანსფორმატორის ფაზური დენების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა  $t_n \leq t \leq \tau_2$  დროის ინტერვალებში.  $\alpha_1^I = \alpha_1^{II} = 0^0$ ;  $\alpha_2^I = \alpha_2^{II} = 120^0$ ;  $\alpha_3^I = \alpha_3^{II} = 240^0$  (ნახ. 21, ა) .....128
- ნახ. 27. რეზულტირებული დენების  $d, q$  მდგენელებისა და ფაზური დენების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა დროის  $t_{n-1} \leq t \leq \tau_1$  ინტერვალებში (ნახ. 22, ა) .....136
- ნახ. 28. რეზულტირებული დენების  $d, q$  მდგენელებისა და ფაზური დენების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა დროის  $\tau_1 \leq t \leq t_n$  ინტერვალებში (ნახ. 22, ბ) .....141
- ნახ. 29. წევის ძრავის ღუზაში გამავალი  $i_{აფ}$  დენის გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა დროის  $\tau_1 \leq t \leq t_n$  ინტერვალებში (ნახ. 22, ბ).....142
- ნახ. 30. რეზულტირებული დენების  $d, q$  მდგენელებისა და ფაზური დენების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა დროის  $t_n \leq t \leq \tau_2$  ინტერვალებში (ნახ. 23, ა) .....148

- ნახ. 31. რეზულტირებული დენების  $d, q$  მდგენელებისა და ფაზური დენების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა დროის  $\tau_2 \leq t \leq t_{n+1}$  ინტერვალებში (ნახ. 23, ბ) .....153
- ნახ. 32. წევის ძრავის დენის გარდამავალი პროცესის მოდელის სტრუქტურული სქემა დროის  $\tau_2 \leq t \leq t_{n-1}$  ინტერვალებში (ნახ. 23, ბ) .....154

## შესავალი

წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების საიმედოობა ბევრადაა დამოკიდებული ძალოვანი ნახევარგამტარული მართვადი გამმართველებისა და ქსელის მიმყოლი ინვერტორების მდგრადი მუშაობის პროცესებზე.

საკონტაქტო ქსელის ძაბვის ვარდნის პროცესებში საჭირო ხდება ავტომატურად ამოქმედდეს ძაბვის გადამწოდი და შესაბამისმა სიგნალმა იმოქმედოს მართვადი გამმართველის მართვის სისტემაზე. გამმართველის ტირისტორების გაღების კუთხის რეგულირებით შესაძლებელი იქნება გამართული ძაბვის რეგულირება საკონტაქტო ქსელის ნომინალური ძაბვის სიდიდის ფარგლებში.

საკონტაქტო ქსელის ძაბვის დონის ამაღლების პროცესში საჭირო ხდება ავტომატურად გამოირთოს მართვადი გამმართველი და რეკუპერაციის მიზნით ჩაირთოს ქსელის მიმყოლი სამფაზა ინვერტორი. ამ პროცესის განხორციელებისათვის საჭიროა დაცული იყოს ინვერტორის მუშაობის მდგრადობის პირობა, რათა არ მოხდეს ინვერტორის მხრიდან ძალური ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილების ფაზებს შორის მოკლე შერთვა (ინვერტორის გადაყირავება). ინვერტორის მდგრად მუშაობაზე დიდ გავლენას ახდენს: ძალური ტრანსფორმატორების და ქვესადგურის აუცილებელი სიმძლავრეების სწორად შერჩევა; კომუტაციური და გარდამავალი პროცესების გაანგარიშების შედეგების ოპერატიული გათვალისწინება კომპიუტერული მოდელირების საფუძველზე; ინვერტორის მართვის სისტემის კასკადების დამუშავება და შესაბამისი პარამეტრების შერჩევა.

ზემოთ განხილული საკითხები წარმოადგენენ მეტად აქტუალურ ამოცანას წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების საიმედოობის გასაზრდელად.

სადისერტაციო ნაშრომის პირველ ნახევარში წარმოდგენილია წვევის ქვესადგურის ნახევარგამტარული გარდამსახის ელექტრული პრინციპული სქემა "ორი შებრუნებული ვარსკვლავი გამათანაბრებელი რეაქტორით". გათვალისწინებულია საკონტაქტო ქსელში ჩართული ელმავლის წვევის ძრავის ელექტრული სქემა და მისი მომჭერებზე მუდმივი ძაბვის რეგულირება იმპულსური მოდულაციით. სქემაზე ელექტრომაგნიტური შეთავსებადობის უზრუნველყოფისათვის გათვალისწინებულია ფილტრები, ბეტონის რეაქტორი და სრულად მართვადი ნახევარგამტარული ვენტილები-ტირისტორები. ტირისტორები საშუალებას იძლევიან მოვახდინოთ ავტომატური გადართვა გამმართველი რეჟიმიდან ინვერტორულ რეჟიმზე და პირიქით.

ნაშრომში განხილულია მოძრავი შემადგენლობის დაძვრის, გარბენის და რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმები. დამუხრუჭების პროცესში საჭიროა ინვერტორულ რეჟიმში გადასვლა, რისთვისაც აუცილებელია ძალოვანი ტრანსფორმატორის მეორად გრაგნილების მომჭერებზე ამალდეს ძაბვა. ამ მიზნით ნაშრომში ეფექტურადაა გამოყენებული დამატებითი ტირისტორების ჩართვა გრაგნილების ანძაფებსა და ძირითადი ტირისტორების ანოდებს შორის. გამართვის რეჟიმში დამატებითი ტირისტორები ღიაა, ხოლო ინვერტორულ რეჟიმში კი - ჩაკეტილი და ანოდურ დენებს უხდებათ გავლა მომატებული ხვიათა რიცხვების მქონე მეორად გრაგნილებში, შედეგად, ამისა მიიღება შედარებით მაღალი ძაბვა. რაც უფრო დიდია ინვერტორულ რეჟიმში წინსწრების კუთხე, მით მეტი ძაბვა იქნება ტრანსფორმატორის მეორად გრაგნილების მომჭერებზე.

ნაშრომში დამუშავებულია წვევის მუდმივი დენის ძრავის ძაბვისა და დენის რეგულირების საკითხები წვევისა და რეკუპერაციის რეჟიმებისთვის. გამოყენებულია იმპულსური მოდულაციის მართვის მეთოდი და წარმოდგენილია მართვის ეფექტური სქემა ნახევარგამტარულ ტირისტორებზე, როგორც მწყვეტარა გადამრთველებზე.



განხილულია შემადგენლობის მოძრაობისას ორ მეზობელ წვევის ქვესადგურებს შორის ლიანდაგის ნებისმიერი წერტილის პოტენციალის განსაზღვრა. დამუშავებულია ლიანდაგში გამავალი დენის გაანგარიშების მეთოდოლოგია ცალმხრივი კვების შემთხვევაში.

ნაშრომის ორიგინალობად შეიძლება ჩაითვალოს გამმართველის რეჟიმიდან ინვერტორულ რეჟიმზე გადასვლისათვის ერთი და იგივე წვევის ტრანსფორმატორის მეორად გრაგნილების ანძაფებში დამატებითი ტირისტორების გამოყენება, ელმავალში მიმდევრობითი აღზნებიანი წვევის ძრავის რეგულირებისათვის და საკონტაქტო ქსელის ძაბვის რეგულირებისათვის იმპულსური მოდულაციის მეთოდის გამოყენება, როგორც წვევის, ასევე რეკუპერაციის რეჟიმებისათვის; აგრეთვე წვევის ქვესადგურის ელექტროსისტემის ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების მთელი ტექნოლოგიური ციკლის ნათლად წარმოდგენისათვის ერთიანი, შეკრული გარდამსახი სისტემის შედგენა.

ელექტრული ტრანსპორტის შემდგომი განვითარება მჭიდროდაა დაკავშირებული როგორც დიდი სიმძლავრის ელექტრული ენერჯის სტატიკური გარდამქმნელებისათვის, ასევე ავტომატიკისა და ტელემექანიკის მოწყობილობებში პროცესების მართვისა და კონტროლისათვის ნახევარგამტარული ტექნიკის გამოყენებასთან. წვევის ქვესადგურებში დაყენებულია გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატები ნახევარგამტარულ ვენტილებზე – ტირისტორებზე. თანამედროვე პერიოდში შეიქმნა შესაძლებლობა გამოყენებული იქნას ეკონომიკური ძალოვანი მრავალფაზა ტრანსფორმატორები ამორფულ მასალებზე და ზეგამტარულ გრაგნილებზე, რის შედეგად მიიღწევა მოწყობილობის მასა-გაბარიტებისა და სიმძლავრის დანაკარგების საგრძნობლად შემცირება. გარდა ამისა ძალოვან გარდამქმნელ ტექნიკაში წვევის ქვესადგურის სამფაზა ბოგური გამმართველ-ინვერტორული გარდამქმნელისა და ელმავლის განედურ - იმპულსური მართვადი მუდმივი დენის წვევის ძრავის ერთიან

სისტემაში პროცესების მართვის გამარტივებისათვის ტირისტორული გასაღების რანგში გამოიყენება IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) ტრანზისტორული მოდულები.

წევის ქვესადგურებში ელექტრო მოძრაობის საიმედოობის გაზრდის მიზნით ელექტრო მოძრაობის შემადგენლობის (ემშ) გაშვებისა და წევის რეჟიმებში (გამართვის რეჟიმში) პროცესების ზუსტი აღწერისთვის აუცილებელია განხილულ იქნას დანადგარის მთლიანი კომპლექსი, როგორც ერთიანი გარდამქმნელი სისტემა, დაწყებული წევის ქვესადგურის 10 კვ ცვლადი ძაბვის ქსელიდან, დამთავრებული ელმავლის მუდმივი დენის წევის ძრავით საკონტაქტო და სალიანდაგო წრედების გათვალისწინებით.

გარდამქმნელი სისტემის დატვირთვის ცვლილების რეჟიმი ხასიათდება გარდამავალი პროცესებით, რომელსაც აქვს რთული ხასიათი. გარდამავალი პროცესის თითოეული დროის ინტერვალზე ელექტრული სიდიდეების საწყისი პირობები იცვლებიან. ჩატარდა ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების გაანგარიშება ემშ-ის გაშვებისა და წევის რეჟიმებში დროის არასაკომუტაციო და კომუტაციური ინტერვალისათვის ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდით და პროგრამული მოდელირება, რომლის შედეგად მიღებულ იქნა გარდამქმნელი სისტემის გარდამავალი პროცესის მოდელის სტრუქტურული სქემები.

## 1. ლიტერატურის მიმოხილვა

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

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

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

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

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

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

სხვადასხვა გარდამქმნელ მოწყობილობებში გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემების შედგენის მეთოდიკა,

დაფუნქციონირებული ცალკეული ელემენტარული მათემატიკური ოპერაციების მოდელირების ელემენტების ნაკრებზე, მოცემულია სტატიაში [7].

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

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

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

ტრანსფორმატორულ ქვესადგურებში გამმართველების მუშაობა დატვირთვის სხვადასხვა სახეებისათვის და რეჟიმებისათვის, ფილტრების სქემების შერჩევა, ძაბვისა და დენის რეგულირება და სტაბილიზაცია; ქვესადგურის მუშაობის რეჟიმები, მართვა, ბლოკირება და სიგნალიზაცია წარმოდგენილია სახელმძღვანელოში [11].

წევის ქვესადგურების მოწყობა და სქემები, მათი ექსპლუატაციის თანამედროვე მეთოდები, უწყესრიგობების აღმოჩენა და მათი აღმოფხვრის ხერხები მოყვანილია ცნობარში [12].

ელექტრული წევის ქვესადგურების მოწყობილობებში სტატიკური ნახევარგამტარული გარდამქმნელების შერჩევის, მუშაობის რეჟიმების,

ავარიული და არანორმალური რეჟიმების შესწავლის საკითხები წარმოდგენილია წიგნში [13].

სხვადასხვა ტიპის ელექტრული მანქანებისათვის დამახასიათებელი საერთო რთული პროცესები და მუშაობის რეჟიმების სპეციალური საკითხები შესწავლილია და გადმოცემულია ფუნდამენტალური დამხმარე სახელმძღვანელოში [14].

მუდმივი დენის წევის ქსელებში მიმდინარე გარდამავალი პროცესების განსაკუთრებულობის სპეციფიკური ანალიზის საფუძველზე მის მიმართ წაყენებული დაცვის მოთხოვნების გათვალისწინება და შესრულება გაშუქებულია წიგნში [15].

წევის ქვესადგურების ელემენტების სარელეო დაცვის ძირითადი საკითხები, მოქმედების პრინციპები და სქემები; მზომი გარდამქმნელების გამოყენების განსაკუთრებულობა, რელეების კონსტრუქცია. დაცვის ფუნქციონირების ეფექტურობის ძირითადი მაჩვენებლის-დანაყენების გაანგარიშების მეთოდიკა განხილული და დამუშავებულია სახელმძღვანელოში [16].

სარელეო დაცვისა და ავტომატიკის მოწყობილობებში ნახევარგამტარული ხელსაწყოების გამოყენების საკითხები, ძირითადი ფუნქციონალური და ლოგიკური ელემენტების აგების პრინციპები და მათი გაანგარიშება წარმოდგენილია მონოგრაფიაში [17].

გარდამქმნელ სისტემებში დამყარებული და გარდამავალი პროცესების ანალიზის ერთიანი მეთოდიკა, მანქანურ-ნახევარგამტარული სისტემების განტოლებები რეზულტირებული კომპლექსური ცვლადების მიმართ წარმოდგენილია მონოგრაფიაში [18].

წევის ქვესადგურში მოწყობილობები, გარდამქმნელი აგრეგატები, აპარატურები, დამხმარე მოწყობილობები, ელექტრული შეერთების სქემები, რელეები და სარელეო დაცვები, პროცესების ავტომატიკა და ტელემართვა მოცემულია სახელმძღვანელოში [19].

სივრცითი-დროითი დამოკიდებულებანი ელექტრომაგნიტურ ველებში და ელექტრულ წრედებში; ფიზიკური სიდიდეების გარდამქმნელები ელექტროტექნიკაში; ზეგამტარი ტრანსფორმატორები, დენის შემზღვევლები, სწრაფმოქმედი ავტომატები წარმოდგენილია მონოგრაფიაში [20].

ელექტრომაგნიტური ველის, ელექტრული და მაგნიტური წრედების თეორიის ძირითადი ცნებები და კანონები, წრფივი ელექტრული წრედების თეორია, არაწრფივი ელექტრული და მაგნიტური წრედების თეორია, ელექტრომაგნიტური ველის თეორია მოცემულია ფუნდამენტალურ სახელმძღვანელოში [21].

ელექტრული ენერჯის სხვადასხვა სტატიკური გარდამქმნელისაგან შემდგარი ძალოვანი ვენტილურ წრედებში ელექტრომაგნიტური პროცესების დინამიკის ანალიზი და თეორია დაფუძნებული სპექტრალურ-ოპერატიულ მეთოდზე, მოცემულია მონოგრაფიაში [22].

თანამედროვე ელექტრომოწყობილობების შესახებ სრულყოფილი საცნობარო მასალები მოცემულია წიგნში [23].

ელექტრომომარაგების მდგომარეობების კონტროლისა და იზოლაციის მახასიათებლების გაზომვების მეთოდები მოყვანილია წიგნში [24].

ელექტროდანადგართა მოწყობის წესები და ელექტრომომარაგების იმედიანობის უზრუნველყოფის ზოგადი მითითებები მოცემულია საყოველთაოდ ცნობილ წიგნში [25].

ძალოვანი ტრანსფორმატორების მასა-გაბარიტების და დანაკარგების მნიშვნელოვნად შემცირების მიზნით, აგრეთვე დიდი სიმძლავრის გამტარუნარიანობის მისაღწევად ამორფული მასალებიანი და ზეგამტარი გრაგნილებიანი მრავალფაზა ტრანსფორმატორების შექმნის შესახებ მეტად საჭირო ინფორმაცია მოცემულია მიმოხილვაში [26].

სამფაზა მართვადი დინამიკის ანალიზი ტრანსფორმატორის ყველა ძირითადი პარამეტრების გათვალისწინებით, დაფუძნებული „ცვლადთა

კომპლექსურ-სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნის ახალ მეთოდზე, წარმოდგენილია საკავშირო ჟურნალში გამოქვეყნებულ სტატიაში [27].

სამფაზა დენის ავტონომიური ინვერტორისაგან, სამფაზა შემათანხმებელი ძალოვანი ტრანსფორმატორისაგან და არასიმეტრიული სტატიკური დატვირთვისაგან შემდგარი გარდამქმნელი სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების დინამიკის გამოკვლევისა და გაანგარიშების ახალი ანალიზური მეთოდი გამოქვეყნებულია სტატიაში [28].

ელექტრომოდრავი შემადგენლობის კოლექტორული წვევის ძრავაზე გამართული ძაბვის რეგულირების ახალი პრინციპი წარმოდგენილია სტატიაში [29].

წვევის ქვესადგურების ნახევარგამტარული გარდამქმნელის ელექტრული პრინციპული სქემა „ორი შებრუნებული ვარსკვლავი გამათანაბრებელი რეაქტორით“, დამუშავებული ავტორების მიერ, გაშუქებულია სტატიაში [30].

ნახევარგამტარული გარდამქმნელი დანადგარების პროგრამული მოდელირება, ჩატარებული ავტორების მიერ წარმოდგენილია სტატიაში [31].

გამართვიდან ინვერტირებაზე და პირიქით გადართვების რეჟიმების რეგულირება ენერგიის რეკუპერაციისას ნაჩვენებია სტატიაში [32].

წვევის ქვესადგურის ნახევარგამტარულ გარდამქმნელებში კომუტაციური პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების საკითხები გაშუქებულია სტატიაში [33].

ნახევარგამტარულ გარდამქმნელებში არასაკომუტაციო პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების საკითხი მოცემულია სტატიაში [34].

წვევის ქვესადგურის ნახევარგამტარული გარდამქმნელების დამუშავება და გარდამავალი პროცესების კომპიუტერული მოდელირებით ანალიზი წარმოდგენილია ელექტრონულ სტატიაში [35].

განედურ-იმპულსური მართვით მუდმივი დენის წევის ძრავიანი სამფაზა ბოგური გამმართველ-ინვერტორული გარდამქმნელის მუშაობის რეჟიმები დაძრვის, წევის და რეკუპერაციული დამუხრუჭების გათვალისწინებით მოცემულია ელექტრონულ სტატიაში [36].

მუდმივი დენის ძრავის გაშვებისა და წევის რეჟიმების გამოკვლევა წევის ქვესადგურის სამფაზა ბოგური გამმართველ-ინვერტორული გარდამქმნელის გათვალისწინებით წარმოდგენილია სტატიაში [37].

ელმავლის მუდმივი დენის ძრავის გაშვებისა და წევის რეჟიმების მოდელირება გაშუქებულია სტატიაში [38].

გამმართველ-ინვერტორული გარდამქმნელის ერთიანი სისტემა სამფაზა ბოგური სქემით, დატვირთული განედურ-იმპულსური მართვადი ელმავლის მუდმივი დენის წევის ძრავით უზრუნველყოფს ძრავის რეჟიმების მენეჯმენტს და ყველაფერი ეს გაშუქებულია გამოქვეყნებულ სტატიაში [39].

ერთიანი გარდაქმნელი სისტემის ელექტრომაგნიტური პროცესების გაანგარიშება და ანალიზი კომპიუტერული პროგრამების საშუალებით მოითხოვს კომპიუტერული მოდელირების მიზნით პროცესების აღმწერი დიფერენციალური განტოლებათა სისტემის გარდაქმნას რეკურენტული სხვაობითი განტოლებებად მატრიცულ ფორმაში. სხვაობითი განტოლებები და მათი გამოყენება ავტომატური რეგულირების იმპულსური სისტემების და ელექტრონული სქემების ანალიზისათვის განხილულია დამხმარე დახელმძღვანელოში და მონოგრაფიაში [40, 41]. ცვლადი სტრუქტურის ნახევარგამტარული ვენტილური გარდაქმნელების გაანგარიშება, მათემატიკური მოდელირება, სიხშირის ძალოვანი ნახევარგამტარული გარდაქმნელებში პროცესების მართვა, რეგულირება და ყველა შესაძლო მახასიათებლების დადგენა მოცემულია მონოგრაფიებში [42, 43]. ელექტროტექნიკურ მოწყობილობებში და ნახევარგამტარულ გარდაქმნელ სისტემებში პროცესების კომპიუტერული მოდელირება MATLAB-ში განხილულია დამხმარე სახელმძღვანელოებში [44,45].



## 2. შედეგები და მათი განსჯა

### თავი 1. წევის ქვესადგურების ნახევარგამტარული ვენტილური გარდამქმნელი სისტემაში სტაციონალური და გარდამავალი პროცესების მათემატიკური მოდელირება

#### 1.1. სამფაზა ნახევარგამტარულ გარდამქმნელებში არასიმეტრიული გარდამავალი და სტაციონალური პროცესების მიმდინარეობის ხასიათი

წევის ქვესადგურების სამფაზა ნახევარგამტარულ გარდამქმნელებში ძალოვან ტრანსფორმატორებში მიმდინარე პროცესების განსაკუთრებულობა ჩვეულებრივი სამფაზა ტრანსფორმატორებთან შედარებით მდგომარეობს იმაში, რომ ნახევარგამტარ ტირისტორულ გარდამრთველებზე მართვადი იმპულსის მიწოდების მომენტიდან წარმოებს ტრანსფორმატორის გრაგნილთა ფაზების პერიოდული გადართვები. ეს დროის ინტერვალიდან ინტერვალამდე, თავის მხრივ იწვევს მაგნიტო მამოძრავებელი ძალების (მმძ) სივრცითი განაწილებას, აგრეთვე ტრანსფორმატორის პარამეტრების და მოქმედი ელექტრომამოძრავებელი ძალების (ემძ) ცვლილებას. დროში სტაციონალური და გარდამავალი პროცესების განხილვისათვის მყისა მნიშვნელობების გაანგარიშების მეთოდის თანახმად, აუცილებელია გაანგარიშებული იქნას სიდიდეების მყისა მნიშვნელობები დროის ინტერვალების მიხედვით. თითოეულ ამ ცალკეული ინტერვალებში ძალოვანი ტრანსფორმატორი იმყოფება გარდამავალ არასიმეტრიულ რეჟიმში სივრცეში მმძ და ემძ-ს განაწილების კანონის შეუცვლელად ტრანსფორმატორის ერთი და იგივე პარამეტრებისას. საწყისი პირობების დროში შეცვლისას გარდამავალი პროცესი იცვლება დროის ინტერვალიდან ინტერვალამდე. განსაზღვრული დროის შემდეგ საწყისი პირობები პერიოდულად მეორდებიან. გარდამავალი პროცესი მყარდება და ამ რეჟიმში საკმარისია განხილული იქნას მხოლოდ პროცესის განმეორებადობის ინტერვალი [1-6].

სტატიკურ გარდამქმნელებში გარდამავალი პროცესების აღმწერ განტოლებებს ჩვეულებრივ ადგენენ უშუალოდ ფაზური ცვლადების მყისა მნიშვნელობების მიმართ. ეს განტოლებები დაიყვანებიან მუდმივ კოეფიციენტებიან დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემაზე. იმ შემთხვევაში, თუ წევის ქვესადგურში გარდამქმნელ სისტემას განვიხილავთ, როგორც ნახევარგამტარულ აგრეგატებს, ასევე საკონტაქტო ქსელისა, ლიანდაგებისა და ელმავლის წევის ძრავის ერთიან სისტემას იმპულსური მოდულაციით, მაშინ ელექტრული მანქანების (მზრუნავი ნაწილის) არსებობის გამო სისტემა ხასიათდება დროში პერიოდულად ცვალებადი პარამეტრებით. ამიტომ ფაზური ცვლადების მიმართ დაწერილი განტოლებები, როგორც ცნობილია, დაიყვანება ამოსახსნელად მეტად რთულ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემაზე. ამ გარემოებამ გამოიწვია მყისა ფაზური ცვლადების გამოყენებაზე უარის თქმა და განტოლებების გასამარტივებლად ახალი კომპლექსური რეზულტირებული საგრაგნილო ცვლადების (დენები, ძაბვები და ნაკადუმები) შემოყვანა. ეს ცვლადები ჩაიწერება სხვადასხვა კოორდინატთა სისტემაში, ჩვენს შემთხვევაში  $d, q, o$  სისტემაში. ცვლადთა გარდაქმნის გამოყენება იწვევს ისეთი მუდმივი კოეფიციენტებიანი მარტივი დიფერენციალური განტოლებების მიღებას, რომელთა ამოხსნა შესაძლებელია ანალიზურად [6]. ვენტილურ ელექტრულ წრედებში გამოყენებულია ცვლადების სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნის მეთოდი [22].

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

ინტერვალები კომპუტაციური ფუნქციების მწკრივებად დაშლის გათვალისწინებით [18,27,28].

## 1.2. სამფაზა მართვადი გამმართველებში ელექტრომაგნიტური პროცესების გაანგარიშების მათემატიკური მოდელირება

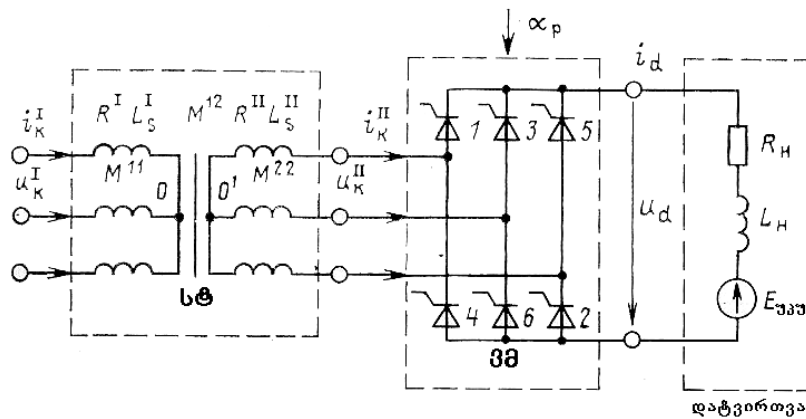
წევის ტრანსფორმატორებიდან მკვებავი სამფაზა ბოგური გამმართველები წარმოადგენენ რთულ ელექტრულ არაწრფივ ვენტილურ წრედებს. დამყარებულ და გარდამავალ ელექტრომაგნიტურ პროცესებს ასეთ წრედებში ანგარიშობდნენ მეტად რთულ და შრომატევადი "აკინძვის" მეთოდით [6,18].

ამ პარაგრაფში წარმოდგენილია სამფაზა მართვადი გამმართველებში ელექტრომაგნიტური პროცესების დინამიკის ანალიზი წევის ტრანსფორმატორის ძირითადი პარამეტრების გათვალისწინებით. ანალიზი დაფუძნებულია ნახევარგამტარულ კომუტატორიან ელექტრული მანქანების ფაზური სიდიდეების კომპლექსური გარდაქმნის გამოყენებაზე [6,18] და ვენტილური ელექტრული წრედების თეორიაში დამუშავებული ცვლადთა სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნის გამოყენებაზე [22]. ზოგადად მიღებული დაშვებების გათვალისწინებით და ერთდროულად ამ ორი გარდაქმნის გამოყენება საშუალებას იძლევა არაწრფივი ამოცანა დავიყვანოთ წრფივზე და მიღებული იქნას დიფერენციალური განტოლებათა სისტემა ცვლადი კოეფიციენტებით. ყოველივე ამის შედეგად მარტივდება გარდამავალი პროცესების გაანგარიშება მართვადი გამმართველიანი რთულ სისტემაში [27].

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

განტოლებებს, იძლევა საშუალებას გათვალისწინებული იქნას ფანტვის ინდუქციურობები და ტრანსფორმატორის გრაგნილების ომური წინაღობები.

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



ნახ.1. სამფაზა მართვადი გამმართველიანი გარდამქმნელის სქემა.

სქემაში მიღებულია შემდეგი აღნიშვნები:

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

ანალიზისას მიღებულია შემდეგი დაშვებები: ვენტილები იდეალურია, გარდამქმნელის კომუტაციის კუთხე იცვლება  $0 \leq \gamma \leq \frac{\pi}{3}$  შუალედში. გარდამქმნელის გაშვებისას გარდამავალ პროცესში

ვენტილების რეგულირების კუთხე მუდმივია ( $\alpha_p = const$ ), გამმართველი სისტემა მიერთებულია ძაბვის სამფაზა წყაროსთან:

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

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

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

$$\text{სადაც } \alpha_k^n = \alpha_0^n + (k-1) \frac{2\pi}{3}, (k = 1, 2, 3) \text{ - სტ-ს პირველადი და}$$

მეორადი გრაგნილების ფაზების მაგნიტური ღერძების განმსაზღვრელი კუთხეებია;  $\alpha_0^n (n = I, II)$  - სტ-ს შესაბამისი გრაგნილების პირველადი ფაზისათვის ძვრის საწყისი ფაზაა.

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

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

სადაც

$$[i^n] = [i_1^n \ i_2^n \ i_3^n]^T; [u^n] = [u_1^n \ u_2^n \ u_3^n]^T;$$

$$[\psi^n] = [\psi_1^n \ \psi_2^n \ \psi_3^n]^T; (n = I, II) \quad (3)$$

აქ სიმბოლო  $T$  ნიშნავს ტრანსპონირებულ მატრიცას.

კომპლექსური სიდიდეებიდან ნამდვილი ფაზურ სიდიდეებზე უკუ გარდაქმნისათვის აუცილებელია შემოღებული იქნას შეუღლებული სვეტური მატრიცები  $[T]$  და  $[T^*]$  [6,27]:

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

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

სადაც

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

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

სამფაზა ტრანსფორმატორისათვის გვაქვს შემდეგი განტოლებათა სისტემა:

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

(6) განტოლებათა სისტემის ორთავე მხარე გავამრავლოთ შესაბამისად  $e^{ja_k^I}, e^{ja_k^{II}}$ -ზე, მივიღებთ კომპლექსურ ფორმაში განტოლებათა სისტემას:

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

(7)-ში ნაკად შებმების მყისა მნიშვნელობები  $\psi_k^I, \psi_k^{II}$  განისაზღვრებიან, როგორც განსახილველ ფაზის მაგნიტურ ღერძზე დენებისგან გამოწვეული ნაკადშებმების ვექტორების გეგმილების ჯამი:

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

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

გამოვიყენებთ რა ცვლადთა სპექტრალურ ოპერატორული გარდაქმნას, ვწერთ ვმ-ის შესავალ და გამოსავალი ელექტრული სიდიდეების მყისა მნიშვნელობებს შორის კავშირის განტოლებას [27]:

$$\mathbf{i}_k'' = \rho_{ik}(t) \mathbf{i}_d; \quad (9)$$

$$u_d = \sum_{k=1}^3 \rho_{uk}(t) u_k'', k = 1, 2, 3 \quad (10)$$

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

(7)-(10) განტოლებები წარმოადგენენ გამოსაკვლევ ვარდამქმნელი სისტემის მათემატიკურ მოდელს. ამ განტოლებების უშუალოდ ანალიზური ამოხსნა შეუძლებელია (9), (10) განტოლებების არაწრფივობის გამო, რომელშიც კომუტაციური ფუნქციები დამოკიდებულნი არიან ვენტილების კომუტაციის კუთხეზე, ხოლო კომუტაციის კუთხე, თავისმხრივ, დამოკიდებულია დენზე [27].

მიღებული (7)-(10) სისტემის მიახლოებით ანალიზური ამოხსნისათვის მივიღოთ, რომ კომუტაციის კუთხე  $\gamma \leq 60^\circ$  (განვიხილავთ ვენტილური ბოგირის მუშაობის ნორმალურ რეჟიმს) და გარდამავალი პროცესის დროს  $\alpha_p = const$ . ამით კომუტაციის კუთხის ცვლილების გავლენა გარდამავალ პროცესზე უგულვებელყოფთ. ეს დაშვება, როგორც მრავალრიცხოვან გაანგარიშებამ და სხვა შედეგებთან შედარებამ გვიჩვენა, პრაქტიკულად არ ცვლის გარდამავალი პროცესების გაანგარიშების სიზუსტეს [27], [28].

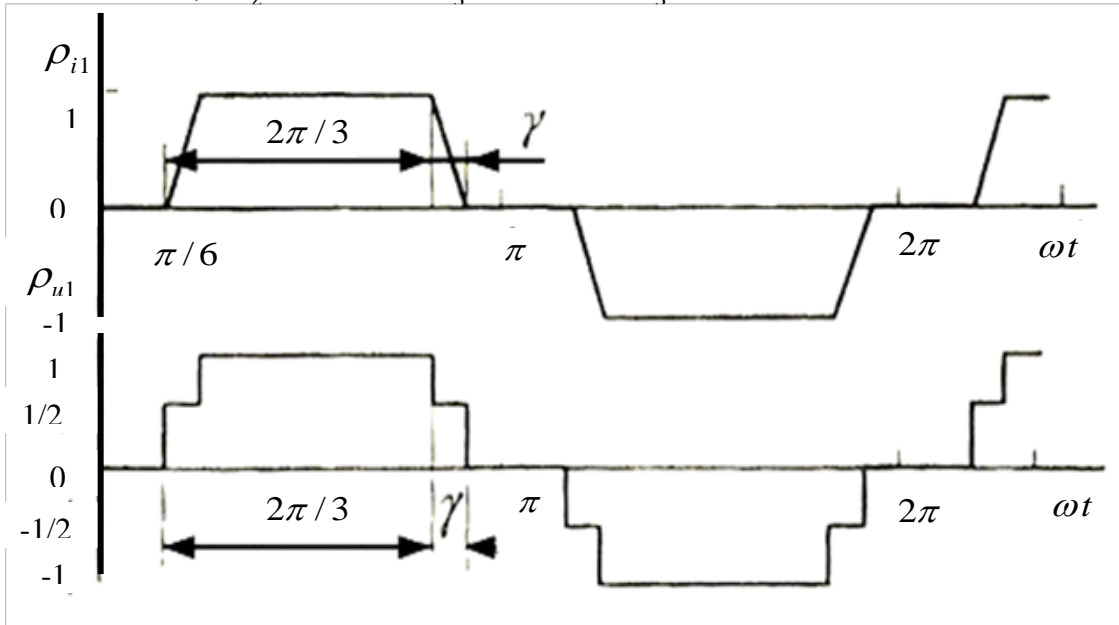
დენისა და ძაბვის მიხედვით კომუტაციური ფუნქციები წარმოვადგინოთ ფურიეს მწკრივების სახეში, შესაბამისად მივიღებთ:

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

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

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

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



ნახ. 2 კომუტაციური ფუნქციების გრაფიკი

საწყისი განტოლებათა სისტემის ამოხსნისას შეიძლება გავითვალისწინოთ კომუტაციური ფუნქციების ჰარმონიკების ნებისმიერი რიცხვი, მაგრამ ჩაწერის მოცულობის შემცირებისათვის შემოვიფარგლოთ მხოლოდ ამ მწკრივების პირველი რიგის ჰარმონიკებით, ე.ი. გაანგარიშება ვაწარმოვოთ გამართული დენის საშუალო მნიშვნელობის მიხედვით. ამ დროს, როგორც ნაჩვენებია [22, 27]-ში, მაღალი ჰარმონიკების უგულვებელყოფის გამო გაანგარიშების ცდომილება უმნიშვნელოა.

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

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

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

დატვირთვის კონტურისათვის გვაქვს

$$u_d = i_d R_n + L_n \frac{di_d}{dt} + E_{უკუ} \quad (13)$$

მიღებული განტოლებების უშუალო ამოხსნა დენებისა და ძაბვების მყისა მნიშვნელობების მიმართ წარმოადგენს შრომატევადს და



ვეებერთელას. ამოხსნის გამარტივებისათვის ვიყენებთ ცვლადთა (1)-(5) კომპლექსურ გარდაქმნას. ამ შემთხვევაში სისტემაში ელექტრომაგნიტური პროცესები ხასიათდებიან პირველადი და მეორადი გრაგნილთა დენების, ძაბვებისა და ნაკადუმბების რეზულტირებული ვექტორებით:

$$\left. \begin{aligned} i' &= \sum_{k=1}^3 i'_k e^{ja'_k}; \quad i'' = \sum_{k=1}^3 i''_k e^{ja''_k}; \\ \dot{U}'' &= \sum_{k=1}^3 u_k^i e^{ja''_k}; \\ \dot{U}' &= \sum_{k=1}^3 u'_k e^{ja'_k} = \frac{3}{2} U_m e^{i(\omega t + \varphi_n)}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

თუ (7) და (8)-დან განვსაზღვრავთ თითოეული  $k = 1, 2, 3$ , მნიშვნელობებისათვის  $u_k$  და  $\psi_k$  სიდიდეებს, ავჯამავთ მათ შესაბამისად და  $\psi_k$ -ს მიღებულ გამოსახულებებს ჩავსვავთ  $u_k$ -ს განტოლებებში, მაშინ მივიღებთ:

$$\frac{3}{2} U_m e^{i(\omega t + \psi_u)} = R' i' + \left( L'_S + \frac{3}{2} M'' \right) \frac{di'}{dt} + \frac{3}{2} M^{12} \frac{di''}{dt}; \quad (15)$$

$$-\dot{U}'' = R'' i'' + \left( L''_S + \frac{3}{2} M^{22} \right) \frac{di''}{dt} + \frac{3}{2} M^{12} \frac{di'}{dt} \quad (16)$$

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

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

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

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

$$\left. \begin{aligned} u_1^{11} e^{j a_1^{11}} &= \dot{U}^{11} - u_2^{11} e^{j a_2^{11}} - u_3^{11} e^{j a_3^{11}}; \\ u_2^{11} e^{j a_2^{11}} &= \dot{U}^{11} - u_1^{11} e^{j a_1^{11}} - u_3^{11} e^{j a_3^{11}}; \\ u_3^{11} e^{j a_3^{11}} &= \dot{U}^{11} - u_1^{11} e^{j a_1^{11}} - u_2^{11} e^{j a_2^{11}}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

(18) სისტემის თითოეული განტოლებები გავამრავლოთ შესაბამისად გამოსახულებაზე  $e^{-j a_k^{11}} \sin[\omega t - a_\rho - \frac{\gamma}{2} - (k-1) \frac{2\pi}{3}]$ ,  $k = 1, 2, 3$  და მიღებული გამოსახულებები ავჯამოთ, ზოგიერთი გამარტივებების შემდეგ ვღებულობთ:

$$\begin{aligned} &\sum_{k=1}^3 u_k'' \sin[\omega t - a_\rho - \frac{\gamma}{2} - (k-1) \frac{2\pi}{3}] = \\ &= \frac{1}{2} [\dot{U}^{11} e^{-j(\omega t - a_\rho - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})} + U^{*11} e^{j(\omega t - a_\rho - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})}] \end{aligned} \quad (19)$$

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

$$u_d = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} \operatorname{Re} [\dot{U}^{11} e^{-j(\omega t - a_\rho - \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})}] \quad (20)$$

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

(13) განტოლება და რეზულტირებული კომპლექსური სიდიდეების მიმართ მიღებული განტოლებები (15-17), (20) წარმოადგენენ გამოსაკვლევი გარდამქმნელი სისტემის სრულ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემას. ამ განტოლებათა სისტემის ამოხსნა გვაძლევს საშუალებას განვსაზღვროთ რეზულტირებული კომპლექსური სიდიდეები  $I^I, I^{II}, \dot{U}^{II}$ , . თუ გამოვიყენებთ უკუგარდაქმნის მატრიცებს (4), (5), მივიღებთ შესაბამისი ფაზური ცვლადების მყისა მნიშვნელობებს.

(13), (15)-(17), (20) განტოლებათა სისტემაში გამოვიყენოთ ლაპლასის ოპერატორული გარდაქმნა და ზოგიერთი ელემენტარული გარდაქმნების შემდეგ მივიღებთ გარდამქმნელი სისტემის განტოლებათა სისტემას ოპერატორულ ფორმაში [27]:

$$\frac{3 U_m e^{i \psi_u}}{2 p-j \omega} = Z^1(p) i^1(p) + \frac{3}{2} M^{12} p i^{11}(p); \quad (21)$$

$$-\dot{U}^{II}(p) = Z^{11}(p) i^{11}(p) + \frac{3}{2} M^{12} p i^1(p); \quad (22)$$

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

$$U_d(p) = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\gamma}{2} \left[ e^{j\left(a_\rho + \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{2}\right)} \dot{U}^{II}(p+j \omega) + \right. \\ \left. + e^{-j\left(a_\rho + \frac{\gamma}{2} + \frac{\pi}{2}\right)} \dot{U}^{II}(p-j \omega) \right]; \quad (24)$$

$$U_d(p) = Z_n(p) L_d(p) + \frac{E_{np}}{p}, \quad (25)$$

სადაც

$$\left. \begin{aligned} Z^I(p) &= R^I + \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^{11} \right) p; \\ Z^{II}(p) &= R^{II} + \left( L_s^{II} + \frac{3}{2} M^{22} \right) p; \\ Z_n(p) &= R_n + L_n(p) \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

ამ ოპერატორული განტოლებებიდან გამოვრიცხოთ უცნობები.

$i^{II}(p)$ ,  $\dot{U}^{II}(p)$  ამისათვის (23) ჩავსვათ (21), (22)-ში და მივიღებთ:

$$\frac{3}{2} \frac{U_m e^{i \psi_u}}{p-j \omega} = Z'(p) i^1(p) + \frac{9 \sqrt{3} \sin \frac{\gamma}{2}}{j 2 \pi \frac{\gamma}{2}} e^{-j\left(a_\rho + \frac{\gamma}{2}\right)} M^{12} p I_d(p-j \omega); \quad (27)$$

$$-\dot{U}^{II}(p) = \frac{3 \sqrt{3} \sin \frac{\gamma}{2}}{j \pi \frac{\gamma}{2}} e^{-j\left(a_\rho + \frac{\gamma}{2}\right)} Z^{11}(p) I_d(p-j \omega) + M^{12} p i'(p); \quad (28)$$

(28)-დან  $U^{*II}(p)$  გამოსახულებისათვის გვაქვს:

$$-U^{*II}(p) = Z^{11}(p) \frac{3 \sqrt{3} \sin \frac{\gamma}{2}}{\gamma / \pi \frac{\gamma}{2}} e^{j\left(a_\rho + \frac{\gamma}{2}\right)} \times \\ \times I_d(p+j \omega) + \frac{3}{2} M^{12} p i'(p); \quad (29)$$

(28)-ში  $p$  შევცვალთ  $p+j \omega$ -თი, ხოლო (29)-ში კი -  $p-j \omega$ -თი,

შესაბამისად მივიღებთ:

$$\dot{U}^{II}(p+j \omega) = -Z^{11}(p+j \omega) \frac{3 \sqrt{3} \sin \frac{\gamma}{2}}{j \pi \frac{\gamma}{2}} e^{-j\left(a_\rho + \frac{\gamma}{2}\right)} \times \\ \times I_d(p) - \frac{3}{2} M^{12} (p+j \omega) i'(p+j \omega); \quad (30)$$

$$U^{*II}(p-j \omega) = Z^{11}(p-j \omega) \frac{3 \sqrt{3} \sin \frac{\gamma}{2}}{j \pi \frac{\gamma}{2}} e^{j\left(a_\rho + \frac{\gamma}{2}\right)} \times \\ \times I_d(p) - \frac{3}{2} M^{12} (p-j \omega) i'(p-j \omega); \quad (31)$$

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

$$U_d(p) = -\frac{18 \sin \gamma}{\pi^2} \frac{Z^{11}}{\gamma} p I_d(p) + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} \cos \frac{\gamma}{2} \times \\ \times [e^{j(a_\rho + \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})} (p + j\omega) I^I(p + j\omega) + \\ \times e^{-j(a_\rho + \frac{\gamma}{2} - \frac{\pi}{2})} (p - j\omega) I^I(p - j\omega)]. \quad (32)$$

(27) განტოლების შეუღლებული განტოლებისათვის გვაქვს:

$$\frac{3}{2} \frac{U_m e^{-j\phi_m}}{p + j\omega} = Z^1(p) I^I(p) - \frac{9\sqrt{3}}{j2\pi} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} e^{j(a_\rho + \frac{\gamma}{2})} \times \\ \times M^{12} P I_d(p + j\omega) \quad (33)$$

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

$$I^I(p + j\omega) = \frac{3}{2} \frac{U_m e^{j\phi_u}}{p Z^1(p + j\omega)} - \frac{9\sqrt{3}}{j2\pi} e^{-j(a_\rho + \frac{\gamma}{2})} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} \frac{M^{12}(p + j\omega)}{Z^1(p + j\omega)} I_d(p); \quad (34)$$

$$I^I(p - j\omega) = \frac{3}{2} \frac{U_m e^{-j\phi_u}}{p Z^1(p - j\omega)} + \frac{9\sqrt{3}}{j2\pi} e^{j(a_\rho + \frac{\gamma}{2})} \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}} \frac{M^{12}(p - j\omega)}{Z^1(p - j\omega)} I_d(p); \quad (35)$$

სადაც

$$Z^1(p + j\omega) = R^1 + \left( L_s^1 + \frac{3}{2} M^{11} \right) (p + j\omega);$$

$$Z^1(p - j\omega) = R^1 + \left( L_s^1 + \frac{3}{2} M^{11} \right) (p - j\omega);$$

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

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

$$I_d(p) = \frac{\sum_{k=0}^2 p^k (U_m C_k + E_{\text{კვლ}} d_k)}{p \sum_{k=0}^3 A_k p^k}; \quad (37)$$

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

$$a_0 = \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} \omega M^{12} R_H z^1 \cos \frac{\gamma}{2} \cos \left( \varphi^1 - a_\rho - \frac{\gamma}{2} - \psi_u \right);$$

$$a_1 = \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} \cos \frac{\gamma}{2} [R^1 R_H \sin(a_\rho + \frac{\gamma}{2} + \varphi_u) + \omega L_H z^1 \cos(\varphi^1 - a_\rho - \frac{\gamma}{2} - \psi_u)];$$

$$a_2 = \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} (L^1 R_H + L_H R^1) \cos \frac{\gamma}{2} \sin(a_\rho + \frac{\gamma}{2} + \psi_u);$$

$$a_3 = \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} L^1 L_H \cos \frac{\gamma}{2} \sin(a_\rho + \frac{\gamma}{2} + \psi_u);$$

$$C_0 = \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} z^1 \cos \frac{\gamma}{2} \sin(\varphi^1 - a_\rho - \frac{\gamma}{2} - \psi_u);$$

$$C_1 = \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{12} L^1 \cos \frac{\gamma}{2} \sin(a_\rho + \frac{\gamma}{2} + \varphi_u)$$

$$d_0 = (z^1)^2; \quad d_1 = 2R^1 L^1; \quad d_2 = (L^1)^2;$$

$$L^1 = L_s^1 + \frac{3}{2} M^{11}; \quad L'' = L_s'' + \frac{3}{2} M^{22};$$

$$\varphi_1 = \arctg \frac{\omega L'}{R}; \quad z^1 = \sqrt{(R^1)^2 + (\omega L^1)^2}$$

$$b_0 = \frac{18}{\pi^2} \frac{\sin \gamma}{\gamma} \left[ \left( \frac{3}{2} \omega M^{12} \right)^2 R' + (\omega L^1)^2 R'' \right];$$

$$b_1 = \frac{18}{\pi^2} \frac{\sin \gamma}{\gamma} \left[ 2R' L^1 R'' + (\omega L^1)^2 L'' + \left( \frac{3}{2} \omega M^{12} \right)^2 L' \right];$$

$$b_2 = \frac{18}{\pi^2} \frac{\sin \gamma}{\gamma} \left[ R'' (L^1)^2 + 2R' L^1 L'' - \left( \frac{3}{2} M^{12} \right)^2 R' \right];$$

$$b_3 = \frac{18}{\pi^2} \frac{\sin \gamma}{\gamma} \left[ L^1 L'' - \left( \frac{3}{2} M^{12} \right)^2 \right] L^1;$$

$$A_0 = R_H (z^1)^2 + \frac{18}{\pi^2} \frac{\sin \gamma}{\gamma} \left[ R'' (z^1)^2 + R' \left( \frac{3}{2} \omega M^{12} \right)^2 \right];$$

$$A_1 = 2R' R_H L^1 + L_H (z^1)^2 + \frac{18}{\pi^2} \frac{\sin \gamma}{\gamma} \left[ 2R' L^1 R'' + L'' (z^1)^2 - \left( \frac{3}{2} \omega M^{12} \right)^2 L^1 \right];$$

$$A_2 = 2R' L^1 L_n + R_n (L^1)^2 + \frac{18}{\pi^2} \frac{\sin \gamma}{\gamma} \left[ 2R' L^1 L'' + (L^1)^2 R'' - \left( \frac{3}{2} M^{12} \right)^2 R^1 \right];$$

$$A_3 = (L^1)^2 L_n + \frac{18}{\pi^2} \frac{\sin \gamma}{\gamma} L^1 \left[ L^1 L'' - \left( \frac{3}{2} M^{12} \right)^2 \right];$$

ამგვარად, მიღებულია საწყისი დიფერენციალური განტოლებების ამონახსნი ოპერატორული ფორმაში. (36), (37)-ში დაშლის თეორემის გამოყენება მოგვცემს საშუალებას განვსაზღვროთ გამართული ძაბვა და

გამართული დენი, როგორც გარდამავალ, ასევე დამყარებულ რეჟიმებში წრედის ყველა ძირითადი პარამეტრების გათვალისწინებით. (36), (37)-ში

ვისარგებლოთ ლაპლასის ზღვრული თეორემა და მივიღებთ გამართული ძაბვისა და გამართული დენის გამოსახულებებს დამყარებული რეჟიმისათვის:

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

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

სადაც

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

$\varphi^i, Z^I$ -ის მნიშვნელობები მოცემულია ექვივალენტური პარამეტრების გამოსახულებებთან ერთად. ზევრ პრაქტიკულ შემთხვევაში  $R^I \ll \omega L^I, L_s^I \ll \frac{3}{2} M^{11}, R^{II} \ll \omega L^{II}, L_s^{II} \ll \frac{3}{2} M^{22}$ , და (38), (39) გამოსახულებები შეიძლება გამარტივდეს:

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

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

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

თუ განვიხილავთ ზღვრულ შემთხვევას, როცა სამფაზა ტრანსფორმატორის პირველადი და მეორადი კონტურები განთავსებულია იმდენად ახლოს, რომ ურთიერთინდუქციისა და თვითინდუქციის ნაკადები პირველად მხარეში ურთიერთ კომპენსირდება, მაშინ (41), (42)-ში შეიძლება დავუშვათ  $\mu = 1$  და მაშინ მივიღებთ:

$$U_{დაბე} = U_{აბ} \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2}; \quad (43)$$

$$I_{დაბე} = \frac{U_{აბ}}{R_H} \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2} - \frac{E_{უკუ}}{R_H}; \quad (44)$$

(43), (44) გამოსახულებები სრულიად ემთხვევიან ტრანსფორმატორის პარამეტრების გარეშე მიღებულ ცნობილ გამოსახულებებს [11, 13, 29].

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

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

განვიხილოთ გარდამქმნელი სისტემის გაშვებისას გარდამავალი პროცესების გაანგარიშება შემდეგი პარამეტრების გათვალისწინებით:

$$\begin{aligned} R^I &= 0,878 \text{ ომ}; R^{II} = 0,561 \text{ ომ}; L_s^I = 732 \cdot 10^{-5} \text{ ჰნ}; \\ L_s^{II} &= 251 \cdot 10^{-5} \text{ ჰნ}; M^{11} = M^{22} = M^{12} = 579 \cdot 10^{-5} \text{ ჰნ}; \\ R_H &= 16 \text{ ომ}; L_H = 115 \cdot 10^{-3} \text{ ჰნ}; E_{უკუ} = 34 \text{ ვ}; a_p = \frac{\pi}{9}; \\ \psi_u &= \frac{\pi}{6}; \gamma = \frac{\pi}{18}; U_m = \sqrt{2}U = \sqrt{2} 200 \approx 310 \text{ ვ} \end{aligned}$$

განგარიშების შემდეგ ვღებულობთ ექვივალენტური პარამეტრების (კოეფიციენტების) მნიშვნელობებს:

$$\begin{aligned} a_0 &= 16 \cdot 10^{+5}; a_1 = 1,15 \cdot 10^4; a_2 = 16,2; a_3 = 0,12; \\ b_0 &= 19,3 \cdot 10^4; b_1 = 1,55; b_2 = 1,9; b_3 = 0; \end{aligned}$$

$$A_0 = 11,83 \cdot 10^5; A_1 = 8,28 \cdot 10^3; A_2 = 14,3;$$

$$A_3 = 0,09; C_0 = 10,1 \cdot 10^4; C_1 = 1; C_2 = 1,02;$$

$$d_0 = 73,9 \cdot 10^3; d_1 = 1,5; d_2 = 0,75; L^I = L^{II} = 0,87;$$

$$\psi^I = \frac{\pi}{2}; z^I = 272,7 \text{ მძ}; k_s = 2,7; k = 1,06;$$

$$R_s = 0,6 \text{ მძ}; U_{d^0} = 512 \text{ ვ}$$

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

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

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

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

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

$$p_{2,3} = -\delta \pm j\beta = -6,5 \pm j300 \frac{1}{\text{წმ}} \quad (47)$$

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

$$i_d(t) = 24,35 - 24,34e^{p_1 t} - 1,29e^{-\delta t} \cos(\beta t - \frac{\pi}{2}); \quad (48)$$

$$u_d(t) = 424,7 - 19,6e^{p_1 t} - 36,6e^{-\delta t} \cos(\beta t - \frac{\pi}{6}); \quad (49)$$

$$\text{სადაც } \delta = 6,5 \text{ 1/წმ}; \beta = 300 \text{ 1/წმ}.$$

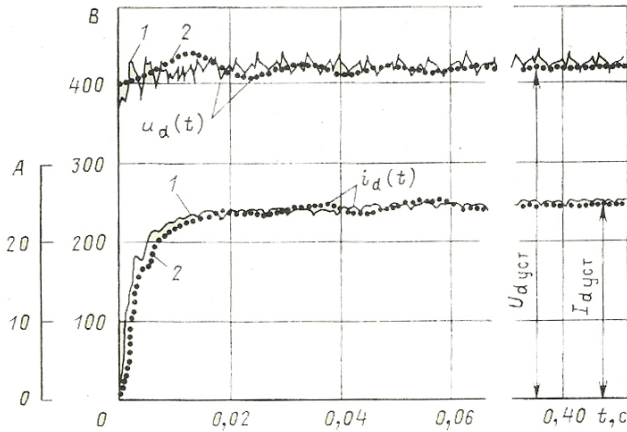
(48), (49)-დან  $t=0$  მომენტისათვის გვაქვს  $V_d(0) = 413 \text{ ვ}$ ,  $i_d(0) = 0$ ; ხოლო  $t=\infty$  მომენტისათვის (დამყარებულ რეჟიმში) გვაქვს

$$u_d(\infty) = u_{d\text{დამყ.}} = 427,7 \text{ ვ}; i_d(\infty) = I_{d\text{დამყ.}} = 24,35 \text{ ა};$$

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

ნახ. 3-ზე ნაჩვენებია გარდამავალი პროცესების საანგარიშო მრუდები-2 და შესაბამის ოსცილოგრამული მრუდები, გადაღებულნი ექსპერიმენტულად - 1. [27].

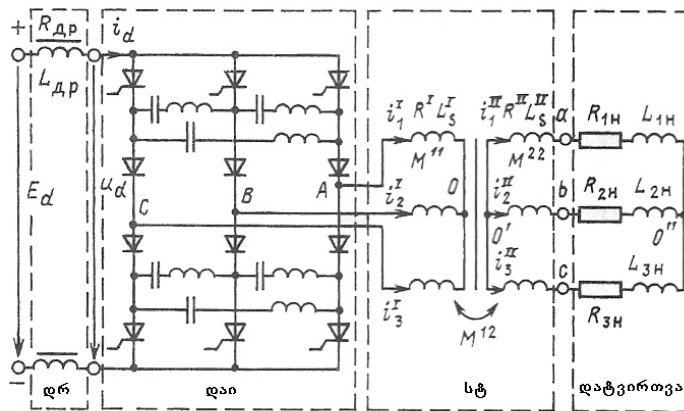




ნახ. 3. გარდამქმნელის გაშვებისას გარდამავალი პროცესების მრუდები 1 - ექსპერიმენტალური; 2 - გაანგარიშებით.

### 1-3. სამფაზა დენის ავტონომიური ინვერტორული გარდამქმნელ სისტემაში ელექტრომაგნიტური პროცესების გაანგარიშების მათემატიკური მოდელირება

შემოთავაზებულია სამფაზა დენის ავტონომიური ინვერტორული გარდამქმნელ სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების დინამიკის გამოკვლევისა და გაანგარიშების ანალიზური მეთოდი. გარდამქმნელი სისტემა (გს) შედგება გამაგლუვებელი დროსელებისაგან (დრ), დენის სამფაზა ავტონომიური ინვერტორისაგან (დაი), სამფაზა ტრანსფორმატორისაგან (სტ) და არასიმეტრიული სამფაზა სტატიკური დატვირთვისაგან (დატვ.) (ნახ. 4).



ნახ. 4. ინვერტორ-ტრანსფორმატორ-დატვირთვის გარდამქმნელი სისტემის სქემა.

გამოკვლევა და გაანგარიშება წარმოებს ცვლადთა კომპლექსური და სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნის მეთოდის საფუძველზე [18, 20, 21, 27, 28]. კომპლექსური განტოლებები შედგენილია გრაგნილების რეზულტირებული კომპლექსური დენებისა და ძაბვების და არა ცალკეული ფაზების ელექტრული სიდიდეებისათვის, რაც მნიშვნელოვნად ამარტივებს მრავალფაზა წრედების მათემატიკურ მოდელს გარდამქმნელის ცვლადი დენის წრედის მხრიდან, სტ-ის გრაგნილების ფანტვის ინდუქციურობებისა და ომიური წინაღობების გათვალისწინებით. ცვლადთა სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნა საშუალებას იძლევა მიღებული იქნას არაწრფივი ვენტილური მოწყობილობების მათემატიკური მოდელი ისეთ მოსახერხებელ ფორმაში, რომლითაც აღიწერება გარდამავალი პროცესის მთელი პერიოდი, ცალკეული ინტერვალების მიხედვით ანგარიშის ჩაუტარებლად [27, 28].

გს-ს გამოკვლევისას მიღებულია მხედველობაში ცნობილი დაშვებები: ვენტილები იდეალურია, ტრანსფორმატორი და დროსელები განიხილება, როგორც წრფივი ელემენტები და  $\alpha = const, \gamma \leq \pi/3$ .

ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდისა და სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნის მეთოდის ერთდროული გამოყენება, ზემოდ მოყვანილი დაშვებების გათვალისწინებით, საშუალებას იძლევა არაწრფივი ამოცანა დაყვანილი იქნას წრფივზე და მივიღოთ წრფივი დიფერენციალური განტოლებათა სისტემა, ცვლადი კოეფიციენტებით, რეზულტირებული კომპლექსური სიდიდეების მიმართ. მიღებული განტოლებათა სისტემის ზოგადი ამოხსნა საშუალებას იძლევა ვიპოვოთ ძირითადი ელექტრული სიდიდეების, ინჟინრული გაანგარიშებებისათვის მოსახერხებელ, ანალიზური გამოსახულებები.

ნახ. 4 სქემაში შემოღებულია შემდეგი აღნიშვნები:

$$R_{დრ}, R^I, R^{II}, R_{kH} (k = 1,2,3), L_{დრ}, L_S^I, L_S^{II}, L_{kH}, (k = 1,2,3)$$

დროსელების, სამფაზა ტრანსფორმატორის და დატვირთვის აქტიური წინაღობები და ინდუქციურობები;  $E_d, i_d$  - გარდამქმნელის

შესავალი ძაბვა და დენი;  $i_k^I, u_k^I, i_k^{II}, u_k^{II}, (k = 1, 2, 3)$  - ტრანსფორმატორის პირველადი და მეორადი გრაგნილების ფაზური დენები და ძაბვები;  $M^{11}, M^{22}, M^{12}$  - შესაბამისად, სტ-ის პირველადი და მეორადი გრაგნილების ორ ფაზას შორის და პირველადი გრაგნილის ერთი ფაზასა და მეორადის ერთ ფაზას შორის მაქსიმალური ურთიერთინდუქციურობები;  $U_d$  - დენის ავტონომიური ინვერტორის შემავალი ძაბვა.

ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევისათვის ვადგენთ გს-ს სრულ მათემატიკურ მოდელს ელექტრული სიდიდეების მყისა მნიშვნელობების მიმართ. ამისათვის დენის ინვერტორის შესასვლელისათვის, სამფაზა ტრანსფორმატორისათვის და სამფაზა არასიმეტრიული დატვირთვისათვის ვწერთ ელექტრული წონასწორობის დიფერენციალურ განტოლებებს:

$$\left. \begin{aligned} E_d &= 2R_{\text{დრ}} i_d + 2L_{\text{დრ}} \frac{di_d}{dt} + u_d; \\ u_k^1 &= R' i_k' + \frac{d\psi_k'}{dt}; \\ -u_k^{11} &= R'' i_k'' + \frac{d\psi_k''}{dt}; \\ u_{kH}^{11} &= i_k'' R_{kH} + L_{kH} \frac{di_k''}{dt}; \end{aligned} \right\} \quad (50)$$

$$u_k^{11} = u_0 + u_{kH}^{11}$$

$$\psi_k^1 = L_k' i_k' + \sum_{n=1}^3 M^{11} \cos(\alpha_n^1 - \alpha_k^1) i_n^1 + \sum_{n=1}^3 M^{12} \cos(\alpha_n^{11} - \alpha_k^1) i_n^{11},$$

$$\psi_k^{11} = L_k'' i_k'' + \sum_{n=0}^3 M^{22} \cos(\alpha_n^{11} - \alpha_k^{11}) i_n^{11} +$$

$$+ \sum_{n=0}^3 M^{12} \cos(\alpha_n^1 - \alpha_k^{11}) i_n^1, \quad k = 1, 2, 3; \quad u_{kH}^{11} (k = 1, 2, 3),$$

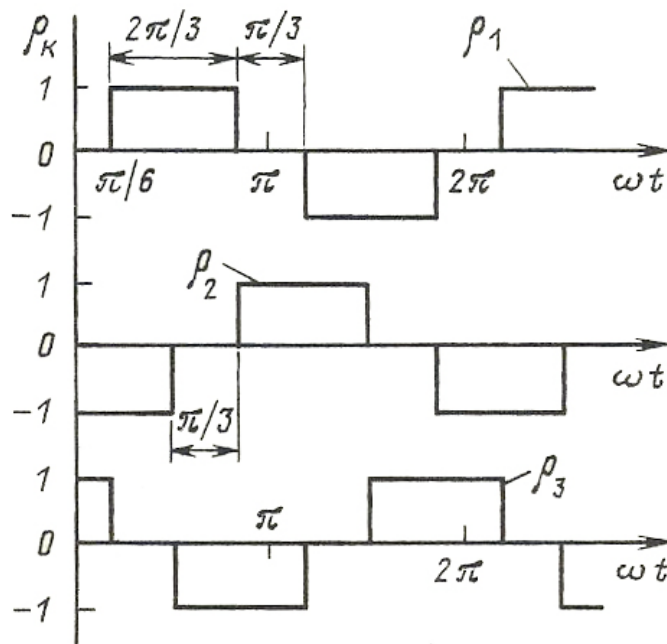
სადაც (50)-ში  $u_{kH}^{II} (k = 1, 2, 3), u_0$  - შესაბამისად ძაბვებია დატვირთვებზე და ტრანსფორმატორის მეორად გრაგნილის ნეიტრალურ წერტილსა და სამფაზა არასიმეტრიული დატვირთვის ნეიტრალურ წერტილს შორის,

$\alpha_k^z = (k - 1) \frac{2\pi}{3}$  ( $k = 1, 2, 3; z = I, II$ ) - ტრანსფორმატორის პირველადი და მეორადი გრაგნილების ფაზების მაგნიტური ღერძების განმსაზღვრელი კუთხეებია.

ვმ-ის შესავალი და გამოსავალი ელექტრული სიდიდეებს შორის კავშირი გამოისახება შემდეგი განტოლებებით [28]:

$$\left. \begin{aligned} i_k^I &= i_d \rho_k(t) \\ u_d &= \sum_{k=1}^3 u_k^I \rho_k(t) \end{aligned} \right\} \quad (51)$$

სადაც  $k = 1, 2, 3; \rho_k(t) (k = 1, 2, 3)$  - სამფაზა დენის ავტონომიური ინვერტორის კომუტაციური ფუნქციებია (მათი მრუდები მოყვანილია ნახ. 5-ზე).



ნახ. 5. სამფაზა ავტონომიური ინვერტორის კომუტაციური ფუნქციები.

(50), (51) დიფერენციალური განტოლებათა სისტემა წარმოადგენს გასაანგარიშებელი გს-ის მათემატიკურ მოდელს. მიღებული განტოლებების ანალიზური ამოხსნისათვის (51)-ში მოყვანილი კომუტაციური ფუნქციები წარმოადგენილი შეიძლება იყოს ფურიეს მწკრივებად [22, 28]. საწყისი

სისტემის ამოხსნისას შეიძლება გავითვალისწინოთ ჰარმონიკების საჭირო რიცხვი, მაგრამ ჩაწერის მოცულობის შეკვეცისათვის შევჩერდებით მხოლოდ პირველი ჰარმონიკებზე. ეს, როგორც ჩანს [28]-ში, იმას ნიშნავს, რომ ანგარიში წარმოებს ცვლადთა გასაშუალებული მნიშვნელობების მიმართ, ე. ი. პულსაციის გაუთვალისწინებლად.

კომუტაციური ფუნქციების ძირითადი ჰარმონიკების გათვალისწინებით (51) კავშირის განტოლებები მიიღებენ სახეს:

$$\left. \begin{aligned} i_k^I &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} i_d \sin \left[ \omega t - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right] \\ u_d &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \sum_{k=1}^3 u_k^I \sin \left[ \omega t - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right] \end{aligned} \right\} \quad (52)$$

ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის საფუძველზე შემოვიღოთ ახალი ცვლადები - სამფაზა ტრანსფორმატორის პირველადი და მეორადი გრაგნილების რეზულტირებული კომპლექსური დენები და ძაბვები [27, 28]:

$$\dot{U}^z = \sum_{k=0}^3 u_k^z e^{j\alpha_k^z}, \quad \dot{I}^z = \sum_{k=0}^3 i_k^z e^{j\alpha_k^z}, \quad z = I, II \quad (53)$$

რეზულტირებული კომპლექსური სიდიდეებიდან ნამდვილი ფაზური სიდიდეებზე უკუ გადასვლისათვის აუცილებელია ვისარგებლოთ შემდეგი გამოსახულებები:

$$\begin{aligned} u_k^z &= \frac{1}{3} \left( \dot{U}^z e^{-j\alpha_k^z} + \dot{U}^z e^{j\alpha_k^z} \right) \\ i_k^z &= \frac{1}{3} \left( \dot{I}^z e^{-j\alpha_k^z} + \dot{I}^z e^{j\alpha_k^z} \right) \\ k &= 1, 2, 3, \quad z = I, II \end{aligned} \quad (54)$$

(54)-ში რეზულტირებული კომპლექსურ ელექტრული სიდიდეები გამოვსახოთ მათი d, q მდგენელების მიმართ, შესაბამისად გვექნება:

$$\begin{aligned} u_k^z &= \frac{2}{3} \left( U_d^z \cos \alpha_k^z + U_q^z \sin \alpha_k^z \right) \\ i_k^z &= \frac{2}{3} \left( I_d^z \cos \alpha_k^z + I_q^z \sin \alpha_k^z \right), \quad k = 1, 2, 3, \quad z = I, II, \end{aligned} \quad (55)$$

(53) და (54)-ის გათვალისწინებით არა რთული გარდაქმნების შემდეგ (50), (52) განტოლებები წარმოვადგინოთ რეზულტირებული კომპლექსური ელექტრული სიდიდეების მიმართ შემდეგ სახეში:

$$E_d = 2R_{\text{ფრ}} i d + 2L_{\text{ფრ}} \frac{di_d}{dt} + u_d; \quad (56)$$

$$\dot{U}^I = R^I i^I + \left( L_s^I + \frac{2}{3} M^{II} \right) \frac{di^I}{dt} + \frac{3}{2} M^{I2} \frac{di^{II}}{dt} \quad (57)$$

$$-\dot{U}^{II} = R^{II} i^{II} + \left( L_s^{II} + \frac{3}{2} M^{22} \right) \frac{di^{II}}{dt} + \frac{3}{2} M^{I2} \frac{di^I}{dt} \quad (58)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_H^{II} &= \frac{1}{3} \left( \sum_{k=0}^3 R_{kH} \right) i^{II} + \frac{1}{3} \left( \sum_{k=0}^3 R_{kH} e^{j2\alpha_k^H} \right) \times \\ &\times i^I + \frac{1}{3} \left( \sum_{k=1}^3 L_{kH} \right) \frac{di^{II}}{dt} + \frac{1}{3} \left( \sum_{k=1}^3 L_{kH} e^{j2\alpha_k^H} \right) \times \frac{di^I}{dt} \end{aligned} \quad (59)$$

$$\dot{U}^{II} = u_0 \left( \sum_{k=0}^3 e^{j\alpha_k^H} \right) + \dot{U}_H^{II} \quad (60)$$

$$u_d = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \left[ \dot{U}^1 e^{-j(\omega t - \frac{\pi}{2})} + \tilde{U}^1 e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})} \right] \quad (61)$$

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \frac{\sqrt{3}\pi}{9} i^1 e^{-j(\omega t - \frac{\pi}{2})} \\ \dot{U}_H^{II} &= \sum_{k=1}^3 u_{kH}^{II} e^{j\alpha_k^H}, \quad \sum_{k=1}^3 e^{j\alpha_k^H} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (62)$$

მიღებული (56)-(62) განტოლებები წარმოადგენენ პერიოდულ კოეფიციენტებიან სრულ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემას კომპლექსურ ფორმაში. ამ განტოლებებში გამოვრიცხოთ შუალედური უცნობები და შვიდი განტოლებით შემდგარი სისტემა დავიყვანოთ შესავალი  $i_d$  დენისა და დატვირთვის ჯამური დენების  $i^{II}, \dot{i}^{II}$  მიმართ სამ განტოლებით შემდგარ სისტემაზე. ამისათვის (61) ჩავსვათ (56)-ში და (57), (62)-ის გათვალისწინებით არა რთული გარდაქმნების შემდეგ მივიღებთ:

$$\begin{aligned} E_d &= R_1 i_d + L_1 \frac{di_d}{dt} + M_1 e^{-j(\omega t - \frac{\pi}{2})} \frac{di^{II}}{dt} + \\ &+ M_1 e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})} \frac{di^{II}}{dt}; \end{aligned} \quad (63)$$

სხვა მხრივ, (60), (62)-ის გათვალისწინებით (58) და (59)-დან ვღებულობთ

$$0 = \omega M_2 i_d e^{j\omega t} + M_2 e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})} \frac{di_d}{dt} + R_2 i^{II} +$$

$$+L_2 \frac{dI^{II}}{dt} + R_H \tilde{I}^{II} + L_H \frac{d\tilde{I}^{II}}{dt}; \quad (64)$$

მესამე განტოლებას მივიღებთ (64)-დან კომპლექსური სიდიდეების მათივე შეუღლებულობით შეცვლით:

$$0 = \omega M_2 i_d e^{-j\omega t} + M_2 e^{-j(\omega t - \frac{\pi}{2})} \frac{di_d}{dt} + R_H I^{*II} + \\ + L_H \frac{dI^{*II}}{dt} + R_2 \tilde{I}^{II} + L_2 \frac{d\tilde{I}^{II}}{dt}; \quad (65)$$

(63)-(65) განტოლებებში გამოყენებულია შემდეგი აღნიშვნები:

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= 2R_{\varnothing\varnothing} + \frac{18}{\pi^2} R^I; & R_2 &= R^{II} + \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 R_{KH}; \\ R_H &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 R_{KH} e^{j2\alpha_k^{II}}; & R_H^* &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 R_{KH} e^{-j2\alpha_k^{II}}; \\ L_1 &= 2L_{\varnothing\varnothing} + \frac{18}{\pi^2} \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^{II} \right); & L_2 &= L_s^I + \frac{3}{2} M^{22} + \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 L_{KH}; \\ L_H &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 L_{KH} e^{j2\alpha_k^{II}}; & L_H^* &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 L_{KH} e^{-j2\alpha_k^{II}}; \\ M_1 &= \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} M^{I2}; & M_2 &= \frac{9\sqrt{3}}{2\pi} M^{I2} \end{aligned} \right\} \quad (66)$$

(66)-ში კომპლექსური ექვივალენტური წინაღობები და ინდუქციურობები შეიძლება წარმოდგენილი იქნას შემდეგ სახეში:

$$R_H = B_H e^{j\beta_H}; \quad R_H^* = B_H e^{-j\beta_H}; \quad L_H = A_H e^{j\alpha_H}; \quad L_H^* = A_H e^{-j\alpha_H} \quad (67)$$

სადაც (67)-ში  $A_H, B_H, \alpha_H, \beta_H$  კოეფიციენტები ახასიათებენ დატვირთვის არა სიმეტრიულობის ხარისხს და წარმოდგენილია შემდეგი გამოსახულებით:

$$A_H = \left\{ \frac{1}{9} \left( L_{1H} - \frac{1}{2} L_{2H} - \frac{1}{2} L_{3H} \right)^2 + \frac{1}{12} (L_{3H} - L_{2H})^2 \right\}^{1/2} \\ B_H = \left\{ \frac{1}{9} \left( R_{1H} - \frac{1}{2} R_{2H} - \frac{1}{2} R_{3H} \right)^2 + \frac{1}{12} (R_{3H} - R_{2H})^2 \right\}^{1/2} \\ \alpha_H = \arctg \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{L_{3H} - L_{2H}}{L_{1H} - \frac{1}{2}(L_{2H} + L_{3H})} \right] \quad (67^0)$$

$$\beta_H = \arctg \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{R_{3H} - R_{2H}}{R_{1H} - \frac{1}{2}(R_{2H} + R_{3H})} \right]$$

გს-ის სიმეტრიული დატვირთვის შემთხვევაში (66)-(67<sup>0</sup>)-დან გვაქვს შემდეგი მნიშვნელობები:

$$\begin{aligned} R_{1H} &= R_{2H} = R_{3H} = R_H; L_{1H} = L_{2H} = L_{3H} = L_H; \\ A_H &= 0; B_H = 0; \alpha_H = 0; \beta_H = 0. \end{aligned} \quad (68)$$

(63)-(65) განტოლებათა სისტემის ანალიზურად ამოხსნისათვის გადავიდეთ მათი ლაპლასის ოპერატორულ გამოსახულებებზე:

$$\begin{aligned} \frac{1}{p} E_d &= (R_1 + L_1 p) I_d(p) + M_1 e^{j\pi/2} (p + j\omega) \times \\ &\times I^{II}(p + j\omega) + M_1 e^{-j\pi/2} (p - j\omega) \dot{I}^{II}(p - j\omega); \\ 0 &= M_2 e^{-j\pi/2} p I_d(p - j\omega) + (R_2 + L_2 p) \dot{I}^{II}(p) + (R_H + L_H p) \dot{I}^{II}(p); \\ 0 &= M_2 e^{j\pi/2} p I_d(p + j\omega) + (\dot{R}_H + \dot{L}_H p) \dot{I}^{II}(p) + (R_2 + L_2 p) \dot{I}^{II}(p); \end{aligned} \quad (69)$$

(69) განტოლებათა სისტემაში უკანასკნელი ორი განტოლებიდან განვსაზღვროთ  $I^{II}(p), I^{*II}(p)$  გამოსახულებები  $I_d(p + j\omega)$  და  $I_d(p - j\omega)$  გამოსახულებების მიმართ. მიღებული  $I^{II}(p)$  დენის გამოსახულებაში  $p$  ოპერატორი შევცვალოთ  $(p + j\omega)$  ოპერატორით, ხოლო  $I^{*II}(p)$  მიღებულ გამოსახულებაში  $(p - j\omega)$ -ოპერატორით. მიღებული  $I^{II}(p + j\omega), I^{*II}(p - j\omega)$  დენების გამოსახულებები ჩავსვათ (69) სისტემის პირველ განტოლებაში, ზოგიერთი არასრული გარდაქმნების შემდეგ მივიღებთ პერიოდულ კოეფიციენტებიან ზოგად ფუნქციონალურ განტოლებას გამართული შესავალი დენის ოპერატორული გამოსახულებების მიმართ:

$$\begin{aligned} \frac{E_d}{p} &= -Z_{1\text{გვ}}(p + j\omega) I_d(p + j2\omega) + Z_{\text{გვ}}(p) I_d(p) - \\ &- Z_{2\text{გვ}}(p - j\omega) I_d(p - j2\omega); \end{aligned} \quad (70)$$

სადაც, ექვივალენტური კოეფიციენტების ოპერატორული გამოსახულებები წარმოდგენილია შემდეგი სახით:

$$Z_{\text{გვ}}(p) = R_1 + L_1 p - 2\text{Re} \left[ \frac{M_1 M_2 (p + j\omega)^2 Z_2(p + j\omega)}{Z_2^2(p + j\omega) - Z_H(p + j\omega) Z_H^*(p + j\omega)} \right];$$



$$Z_{k\omega} [p + (-1)^{k+1}j\omega] = \frac{M_1 M_2 (p + (-1)^{k+1}j\omega)^2 [(k-1) \times \times Z_H^*(p-j\omega) - (2-k)Z_H(p+j\omega)]}{Z_2^2(p + (-1)^{k+1}j\omega) - Z_H(p + (-1)^{k+1}j\omega) Z_H^*[p + (-1)^{k+1}j\omega]}, \quad k = 1, 2 \quad (71)$$

ხოლო ოპერატორული წინაღობების გამოსახულებებს აქვთ შემდეგი სახე:

$$\begin{aligned} Z_2(p) &= R_2 + L_2 p, & Z_H(p) &= R_H + L_H p, \\ Z_H^*(p) &= R_H^* + L_H^* p, & Z_2(p \pm j\omega) &= R_2 + L_2(p \pm j\omega), \\ Z_H(p \pm j\omega) &= R_H + L_H(p \pm j\omega), & Z_H^*(p \pm j\omega) &= R_H^* + L_H^*(p \pm j\omega), \end{aligned} \quad (72)$$

(67)-(72) გამოსახულებებიდან ჩანს, რომ დატვირთვის არასიმეტრიულობის გათვალისწინებით (70) რეზულტირებულ განტოლებაში, გარდამქმნელის შესავალი დენის  $I_d(p)$ -ს მიმართ დაწერილი, ერთდროულად ფიგურირებენ სამი უცნობი სიდიდეები:  $I_d(p \pm j2\omega), I_d(p)$ . ამიტომ (70)-დან შეუძლებელია უშუალოდ განისაზღვროს საძიებელი სიდიდე -  $I_d(p)$  დენი.  $I_d(p)$ -ს განსაზღვრისათვის აუცილებელია (70) განტოლება შევავსოთ დამხმარე განტოლებებით. ამ მიზნით (70)-ში P ოპერატორი შევცვალოთ თანმიმდევრობით  $p \pm j2\omega, p \pm j4\omega, \dots, p \pm j2k\omega$   $k=1, 2, 3, \dots$ , ოპერატორებით, მაშინ მივიღებთ რეკურენტული განტოლებათა უსასრულო სისტემას, რომელთა ამოხსნისათვის ვიყენებთ რექლუქციის მეთოდს [22, 28]. შედეგად მივიღებთ შესავალი  $I_d(p)$  დენის ანალიზურ გამოსახულებას:

$$I_d(p) = \frac{\varepsilon_0}{a_0} + Re \left[ \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\varepsilon_{2k}}{a_{2k}} \prod_{n=0}^{2(k-1)} \frac{b_n}{a_n} \right], \quad (73)$$

სადაც

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{2k} &= \frac{E_d}{p + j2k\omega} + Z_{2\omega}[p + j(2k-1)\omega] \frac{\varepsilon_{2(k-1)}}{a_{2(k-1)}}; \\ a_{2k} &= Z_{\omega}[p + j2k\omega] + Z_{2\omega}[p + j(2k-1)\omega] \frac{b_{2(k-1)}}{a_{2(k-1)}}; \\ b_{2k} &= -Z_{1\omega}[p + j(2k+1)\omega], \quad k = 1, 2, 3, \dots, 2m; \\ \varepsilon_0 &= \frac{E_d}{p}; \quad a_0 = Z_{\omega}(p); \quad b_0 = -Z_{1\omega}(p + j\omega) \end{aligned} \right\} \quad (74)$$

(73) გამოსახულების პრაქტიკული გამოყენებისას გარდამავალი პროცესის საკმარისად ზუსტ მახასიათებელს იძლევა მისი ძირითადი წევრი:

$$I_d(p) = \frac{\varepsilon_0}{a_0} = \frac{E_d}{pZ_{\text{მზ}}(p)} \quad (75)$$

(75)-ში თუ ჩავსვავთ  $Z_{\text{მზ}}(p)$  გამოსახულებას (71)-დან, მაშინ (67), (72) გამოსახულებების გათვალისწინებით ვღებულობთ:

$$I_d(p) = \frac{E_d \sum_{k=0}^4 A_k p^k}{p \sum_{k=0}^5 B_k p^k} \quad (76)$$

სადაც,  $A_k$  ( $k = 0, 1, 2, 3, 4$ ) და  $B_k$  ( $k = 0, 1, 2, \dots, 5$ ) კოეფიციენტებისათვის გვაქვს შემდეგი გამოსახულებები [28]:

$$\begin{aligned} A_0 &= [L_2^2 \left( \frac{1}{\tau_0^2} - \omega^2 \right) - B_H^2 + \omega^2 A_H^2]^2 + \\ &+ 4\omega^2 \left[ \frac{1}{\tau_0} L_2^2 - A_H B_H \cos(\beta_H - \alpha_H) \right]^2 \\ A_1 &= 2 \left[ \frac{2}{\tau_0} L_2^2 - 2A_H B_H \cos(\beta_H - \alpha_H) \right] \times \\ &\times [L_2^2 \left( \frac{1}{\tau_0^2} - \omega^2 \right) - B_H^2 + \omega^2 A_H^2] + 8\omega^2 (L_2^2 - A_H^2) \times \\ &\times \left[ \frac{1}{\tau_0} L_2^2 - A_H B_H \cos(\beta_H - \alpha_H) \right]; \\ A_2 &= 4\omega^2 (L_2^2 - A_H^2)^2 + \left[ \frac{2}{\tau_0} L_2^2 - 2A_H B_H \cos(\beta_H - \alpha_H) \right]^2 + \\ &+ 2(L_2^2 - A_H^2) [L_2^2 \left( \frac{1}{\tau_0^2} - \omega^2 \right) - B_H^2 + \omega^2 A_H^2]; \\ A_3 &= 2(L_2^2 - A_H^2) \left[ \frac{2}{\tau_0} L_2^2 - 2A_H B_H \cos(\beta_H - \alpha_H) \right] \\ A_4 &= (L_2^2 - A_H^2)^2; \\ B_0 &= R_1 A_0 + 2M_1 M_2 L_2 \omega^2 \frac{1}{\tau_0} \left[ L_2^2 \left( \frac{1}{\tau_0^2} - \omega^2 \right) - B_H^2 + \omega^2 A_H^2 \right] + \\ &+ 4\omega^4 M_1 M_2 L_2 \left[ \frac{1}{\tau_0} L_2^2 - A_H B_H \cos(\beta_H - \alpha_H) \right]; \\ B_1 &= R_1 A_1 + L_1 A_0 - 2M_1 M_2 L_2 \omega^2 [L_2^2 \left( 3\omega^2 - \frac{5}{\tau_0^2} \right) + \end{aligned} \quad (77)$$

$$\begin{aligned}
& +3(B_H^2 - \omega^2 A_H^2) + \frac{2}{\tau_0} A_H B_H \cos(\beta_H - \alpha_H) - \\
& - 4M_1 M_2 L_2 \omega^2 \left[ \frac{2}{\tau_0} L_2^2 - \frac{2}{\tau_0} A_H B_H \cos(\beta_H - \alpha_H) + \right. \\
& \left. + \omega^2 (A_H^2 - L_2^2) \right]; \tag{78}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_2 = & R_1 A_2 + L_1 A_1 - 2M_1 M_2 L_2 \left[ \frac{1}{\tau_0} L_2^2 \left( \frac{1}{\tau_0} - 8\omega^2 \right) - \right. \\
& - \frac{1}{\tau_0} B_H^2 + \frac{2}{\tau_0} \omega^2 A_H^2 + 6\omega^2 A_H B_H \cos(\beta_H - \alpha_H) - \\
& \left. - 4M_1 M_2 L_2 \omega^2 \left[ \frac{5}{\tau_0} L_2^2 - \frac{2}{\tau_0} A_H^2 - 3A_H B_H \cos(\beta_H - \alpha_H) \right] \right];
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_3 = & R_1 A_3 + L_1 A_2 - 2M_1 M_2 L_2 \left[ L_2^2 \left( \frac{3}{\tau_0} - \omega^2 \right) - \right. \\
& - B_H^2 + \omega^2 (4A_H^2 - 3L_2^2) - \frac{2}{\tau_0} A_H B_H \cos(\beta_H - \alpha_H) - \\
& \left. - 12M_1 M_2 L_2 \omega^2 (L_2^2 - A_H^2) \right];
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_4 = & R_1 A_4 + L_1 A_3 - 2M_1 M_2 L_2 \left[ \frac{1}{\tau_0} 3 (L_2^2 - A_H^2) - \right. \\
& \left. - 2A_H B_H \cos(\beta_H - \alpha_H) \right]; \tau_0 = L_2 / R_2;
\end{aligned}$$

$$B_5 = L_1 A_4 - 2M_1 M_2 L_2 [(L_2^2 - A_H^2)]$$

ელექტრომაგნიტური პროცესების გაანგარიშება მნიშვნელოვნად მარტივდება, თუ გს-ის დატვირთვა სიმეტრიულია. ამ დროს (70) რეზულტირებული განტოლება (68) გამოსახულებების თანახმად დაიყვანება მარტივ ოპერატორულ განტოლებაზე და შესავალი დენის ოპერატორული გამოსახულებისათვის გვექნება:

$$I_d(p) = \frac{E_d \sum_{k=0}^2 A'_k p^k}{p \sum_{k=0}^3 B'_k p^k} \tag{79}$$

სადაც  $A'_k (k = 0, 1, 2)$ ;  $B'_k (k = 0, 1, 2, 3)$ ; კოეფიციენტებისათვის გვაქვს შემდეგი გამოსახულებები:

$$\begin{aligned}
A'_0 &= \delta_0 Z_2^2; A'_1 = 2\delta_0 R_2 L_2; A'_2 = \delta_0 L_2^2; \\
B'_0 &= \delta_0 (R_1 Z_2^2 + 2\omega^2 M_1 M_2 R_2); \\
B'_1 &= \delta_0 [L_1 Z_2^2 + 2L_2 (R_1 R_2 - \omega^2 M_1 M_2)]; \\
B'_2 &= \delta_0 [R_1 L_2^2 + 2R_2 (L_1 L_2 - M_1 M_2)]; B'_3 = 1; \\
\delta_0 &= [L_2 (L_1 L_2 - 2M_1 M_2)]^{-1}; Z_2^2 = R_2^2 + (\omega L_2)^2
\end{aligned} \tag{80}$$

დაშლის თეორემის, ან სტანდარტული ცხრილების გამოყენების საფუძველზე (76), (79)-ში თუ გადავალთ ორიგინალებზე, მაშინ შესაძლებელია განისაზღვროს,  $i_d(t)$  დენის მყისა მნიშვნელობა.  $i_d(t), I_d(P)$  გამოსახულების განსაზღვრის შემდეგ ზემოდ მოყვანილი განტოლებების საფუძველზე შესაძლებელია განისაზღვროს გარდამსახი სისტემის დანარჩენი ელექტრული სიდიდეების გამოსახულებები, როგორც გარდამავალ, ასევე დამყარებული რეჟიმისათვის.

მიღებული ანალიზური გამოსახულებები გამოყენებული იქნა გარდამქმნელი სისტემის გაშვებისას გარდამავალი პროცესების გასაანგარიშებლად სხვადასხვა პარამეტრისათვის. ქვემოთ მოყვანილია ორი მაგალითის გაანგარიშების რეზულტატები.

მაგალითი 2. მიღებული ანალიზური გამოსახულებების საფუძველზე გაანგარიშებული იქნა გარდამქმნელ სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი და სტაციონალური პროცესები (ნახ. 4) ძირითადი პარამეტრების შემდეგი სიდიდეების გათვალისწინებით:

$$\begin{aligned}
 E_d &= 220_3; R_{\text{გრ}} = 0,9 \text{ ომ}; R^I = 0,878 \text{ ომ}; R^{II} = 0,561 \text{ ომ}; \\
 R_{1H} &= 2 \text{ ომ}; R_{2H} = 16 \text{ ომ}; R_{3H} = 30 \text{ ომ}; L_{\text{გრ}} = 0,096 \text{ ჰნ}; \\
 L_s^I &= 732 \cdot 10^{-5} \text{ ჰნ}; L_s^{II} = 251 \cdot 10^{-5} \text{ ჰნ}; M^{11} = M^{22} = M^{12} = 0,145 \text{ ჰნ}; \\
 L_{1H} &= 0,104 \text{ ჰნ}; L_{2H} = 0,08 \text{ ჰნ}; L_{3H} = 0,02 \text{ ჰნ}; \omega = 314 \text{ } 1/\text{წმ}
 \end{aligned}$$

ამ პარამეტრების ჩასმა (77), (78) გამოსახულებებში და გამოთვლა გვაძლევს მათი შემდეგ მნიშვნელობებს:

$$\begin{aligned}
 A_0 &= 72\,341\,692; A_1 = 164\,013; A_2 = 1477, A_3 = 1,63; \\
 A_4 &= 0,0068; B_0 = 1\,509\,748\,500; B_1 = 24\,392\,445; \\
 B_2 &= 77974; B_3 = 484; B_4 = 0,650; B_5 = 0,002
 \end{aligned} \tag{81}$$

(76)-ში შედარებით უმცირესი კოეფიციენტების უგულვებელყოფა გვაძლევს  $I_d(p)$ -ს შემდეგ ოპერატორულ გამოსახულებას:

$$L_d(p) = G \frac{p^2 + M_1 p + M_0}{p(p^3 + N_2 p^2 + N_1 p + N_0)} \tag{82}$$

სადაც

$$G = 671,4; M_1 = 111,0; M_0 = 48\,979; N_2 = 161;$$

$$N_1 = 50\,397; N_0 = 3\,119\,315 \quad (83)$$

(82)-დან ორიგინალისთვის ვღებულობთ:

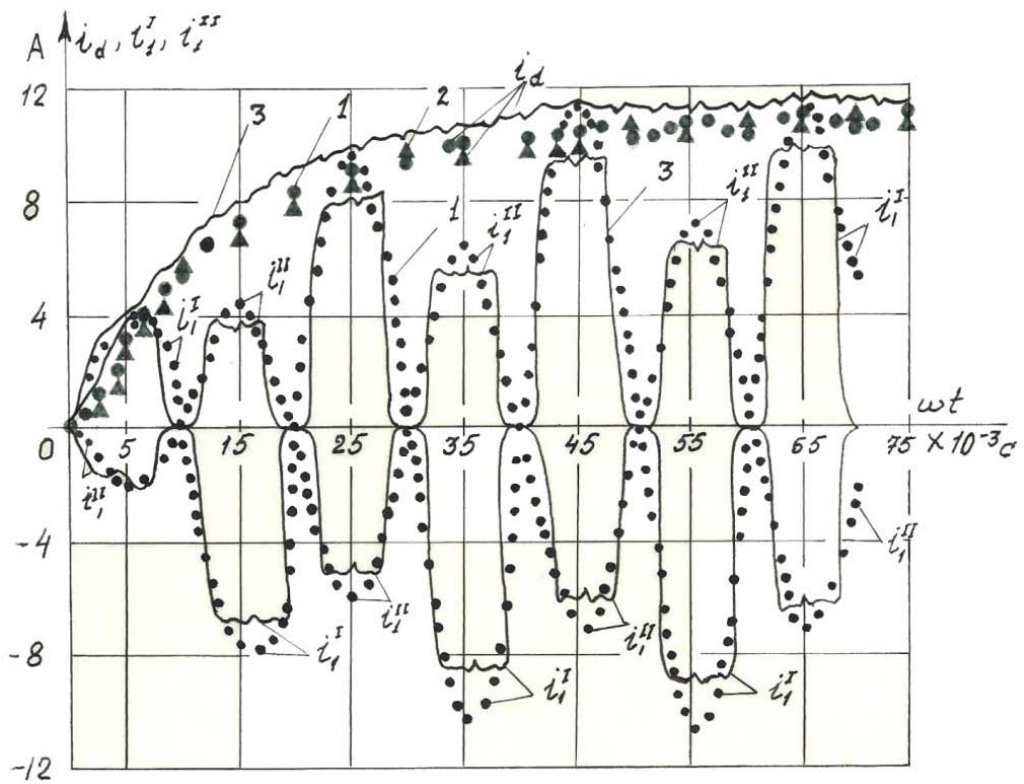
$$i_d(t) = I_{d\text{დაბყ.}} + I_{d1}e^{-\frac{t}{\tau_1}} + I_{d2}e^{-\frac{t}{\tau_2}} \cos(\beta t + \theta), \quad (84)$$

სადაც

$$I_{d\text{დაბყ.}} = 10,542 \text{ ა}; I_{d1} = -10,246 \text{ ა}; I_{d2} = 0,451 \text{ ა};$$

$$\theta = 131^\circ, \tau_1 = 0,014 \text{ წმ}; \tau_2 = 0,022 \text{ წმ};$$

(84) გამოსახულების საფუძველზე აგებულ  $i_d(t)$  დენის მრუდს აქვს ნახ. 6-ზე ნაჩვენები სახე.



**ნახ. 6.** შესავალი  $i_d(t)$  დენისა და  $i_1^I, i_1^{II}$  ფაზური დენების მრუდები: 1 - ეგმ-ზე გაანგარიშებული; 2 - ანალიზურად გაანგარიშებული, 3 - ექსპერიმენტული გზით გადაღებული ოსცილოგრამა.

**მაგალითი 3.** გავიანგარიშოთ გარდაქმნელი სისტემის გაშვებისას გარდამავალი და დამყარებული პროცესები სიმეტრიული დატვირთვის შემდეგი პარამეტრებით:

$$E_d = 220 \text{ ვ}; R_{\text{დრ}} = 0,9 \text{ ომ}; R^I = 0,878 \text{ ომ}; R^{II} = 0,561 \text{ ომ};$$

$$L_{\text{დრ}} = 0,096 \text{ ჰნ}; L_s^I = 732 \cdot 10^{-5} \text{ ჰნ}; L_s^{II} = 251 \cdot 10^{-5} \text{ ჰნ};$$

$$M^{11} = M^{22} = M^{12} = 0,579 \text{ კვ}; R_{1H} = R_{2H} = R_{3H} = R_H = 16 \text{ ომ};$$

$$L_{1H} = L_{2H} = L_{3H} = L_H = 0,115 \text{ კვ}; \omega = 314 \text{ } 1/\text{წმ}$$

ამ პარამეტრების ჩასმა (79), (80)-ში და მიღებული ოპერატორული გამოსახულებიდან ორიგინალზე გადასვლით, აგრეთვე ანალოგიური მოქმედებების ჩატარება  $I_d^I(p)$  და  $I_d^{II}(p)$  ოპერატორული გამოსახულებებისათვის, მოგვცემს  $i_d(t)$  შესავალი დენისა  $i_k^I(t)$  და  $i_k^{II}(t)$ ,  $k=1, 2, 3$  ფაზური დენებისათვის შემდეგ გამოსახულებებს:

$$i_d(t) = I_{d\text{დაბ}} + I_{d1}e^{-\frac{t}{\tau_1}} + I_{d2}e^{-\frac{t}{\tau_2}} \sin(\beta t + \theta_1); \quad (85)$$

$$i_k^I(t) = I_1^I \sin \left[ \omega t - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right] + I_2^I e^{-\frac{t}{\tau_1}} \sin \left[ \omega t - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right] + \\ + I_3^I e^{-\frac{t}{\tau_2}} \left\{ \cos \left[ (\omega + \beta)t + \theta_1 - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right] - \right. \\ \left. - \cos \left[ (\omega - \beta)t - \theta_1 - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right] \right\};$$

$$i_k^{II}(t) = I_1^{II} \sin \left[ \omega t - \theta_2 - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right] + B_k e^{-\frac{t}{\tau_0}} + \\ + I_2^{II} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \left\{ \cos \left[ \omega t - \theta_3 - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right] + \right. \\ \left. + I_3^{II} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \cos \left[ (\omega + \beta)t - \theta_4 - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right] + \right. \\ \left. + I_4^{II} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \cos \left[ (\omega - \beta)t - \theta_5 - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right] \right\}, \quad (86)$$

$$\text{სადაც } k = 1, 2, 3; I_{d\text{დაბ}} = 8,227 \text{ ა}; I_{d1} = -8,222 \text{ ა}; I_{d2} = -0,028 \text{ ა};$$

$$I_1^I = 4,54 \text{ ა}; I_2^I = -9,07 \text{ ა}; I_3^I = 0,015 \text{ ა};$$

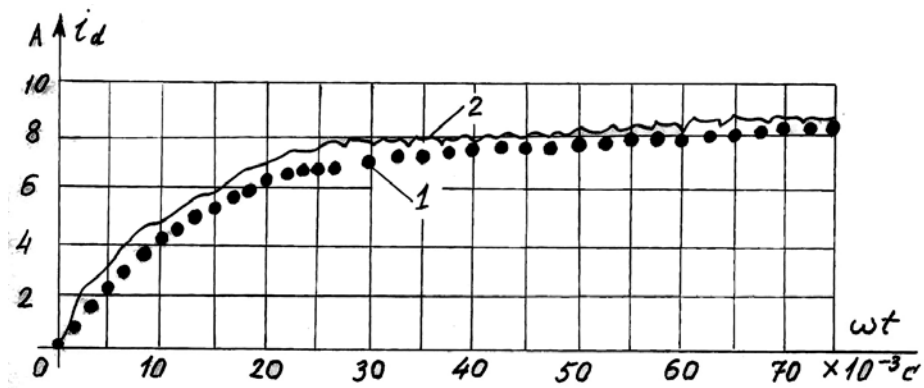
$$I_1^{II} = -7,97 \text{ ა}; I_2^{II} = 8,19 \text{ ა}; I_3^{II} = 6,6 \cdot 10^{-4} \text{ ა}; I_4^{II} = 0,097 \text{ ა};$$

$$\theta_1 = 168^0; \theta_2 = 86^0; \theta_3 = 87^0; \theta_4 = 11^0; \theta_5 = 172^0;$$

$$B_1 = 0,212 \text{ ა}; B_2 = 20,8 \text{ ა}; B_3 = -21,17 \text{ ა};$$

$$\omega + \beta = 626 \text{ } 1/\text{წმ}; \omega - \beta = 2 \text{ } 1/\text{წმ}; \beta = 312,05 \text{ } 1/\text{წმ}$$

$$\tau_0 = 0,06 \text{ წმ}; \tau_1 = 1,435 \cdot 10^{-2} \text{ წმ}; \tau_2 = 6,034 \cdot 10^{-2} \text{ წმ}.$$



ნახ. 7.  $i_d(t)$  შესავალი დენის გარდამავალი და დამყარებული პროცესის მრუდი გარდამქმნელი სისტემის სიმეტრიული დატვირთვის გათვალისწინებით: 1 - ანალიზური გაანგარიშება; 2 - ექსპერიმენტული ოსცილოგრამა.

კომპუტაციური ფუნქციების მხოლოდ ძირითადი ჰარმონიკის და ზოგადი ამონახსნის ძირითადი წევრის გათვალისწინებების გამო მიახლოებითი ანალიზური გაანგარიშების ცდომილების შეფასებისათვის ჩატარებულ იქნა მოცემული ამოცანის გაანგარიშება ელექტრო გამომთვლელ მანქანაზე (ეგმ) და ექსპერიმენტალური გამოკვლევა. გარდამქმნელი სისტემის პრინციპული ელექტრული სქემა და ექსპერიმენტალური დანადგარის ძირითადი პარამეტრები ანალოგიურია მაგალითი 2-ში განხილულისა. ეგმ-ის დახმარებით ამოხსნილი იქნა (63)-(65) დიფერენციალური განტოლებათა სისტემა (54), (55) გარდაქმნების გათვალისწინებით.

გარდამავალი პროცესების ანალიზური გაანგარიშების შედეგების შედარება ეგმ-ის მიხედვით გაანგარიშების შედეგებთან და ექსპერიმენტალურ მონაცემებთან მოყვანილია ნახ. 6,7-ზე.

## თავი 2. წევის ქვესადგურის მოდერნიზებული გარდამქმნელი სისტემა უნივერსალური სქემით "ორი შებრუნებული ვარსკვლავი გამათანაბრებელი ორფაზა რეაქტორით"

### 2.1. უნივერსალური სქემის შედგენილობა და მოქმედების პრინციპი

წევის ელექტრული ტრანსპორტის განვითარება მჭიდროდ არის დაკავშირებული, როგორც დიდი სიმძლავრის ელექტროენერჯის სტატიკური გარდამქმნელებისათვის, ასევე პროცესებისა და მართვის მიზნით ავტომატიკისა და ტელემექანიკის მოწყობილობებისათვის ძალოვანი ნახევარგამტარული ტექნიკის გამოყენებასთან. წევის ქვესადგურებში დადგმულია ნახევარგამტარულ ვენტილებზე - ტირისტორებზე აგებული გამმართველ-ინვერტორული აგრეგატი. გამოყენებულია ეკონომიკური ძალოვანი ტრანსფორმატორები, შესრულებული "ორი შებრუნებული ვარსკვლავი ორფაზა გამათანაბრებელი რეაქტორით" და "სამფაზა ბოგური სქემით", აგრეთვე ძალოვანი ვენტილები დიდ დენებზე და ძაბვებზე GTO, IGCT და IGBT ძალოვანი მოდულების ბაზაზე [12-19, 26, 30, 31, 35].

ნახ.8-ზე ნაჩვენებია წევის ქვესადგურის გამმართველის გარდამქმნელი სისტემის "ორი შებრუნებული ვარსკვლავი ორფაზა გამათანაბრებელი რეაქტორით" პრინციპული ელექტრული სქემა სრულად მართვადი 9, 10 ვენტილების-ტირისტორების ბაზაზე. სქემაზე გათვალისწინებულია აგრეთვე მუდმივი დენის წევის ძრავის პრინციპული ელექტრული სქემა 21, 22 მოთავსებული იმპულსური მართვით 26, აგრეთვე ნაჩვენებია ზეთიანი ამომრთველი 2.

ელექტრომოდრავი შემადგენლობის (ემშ) მუშაობის ნორმალური პირობების უზრუნველყოფისთვის გამმართველი გარდამქმნელის შემოთავაზებული სქემა გაშვების, წევისა და რეკუპერაციის რეჟიმებში უზრუნველყოფს ძაბვის ავტომატურ უკონტაქტო რეგულირებას შესაბამისად 3; 3,3-3,8 და 3,4-3,6 კვ-ის დიაპაზონში. გაშვებისა და წევის რეჟიმში 9-10 გარდამქმნელი მუშაობს გამართვის რეჟიმში, ხოლო

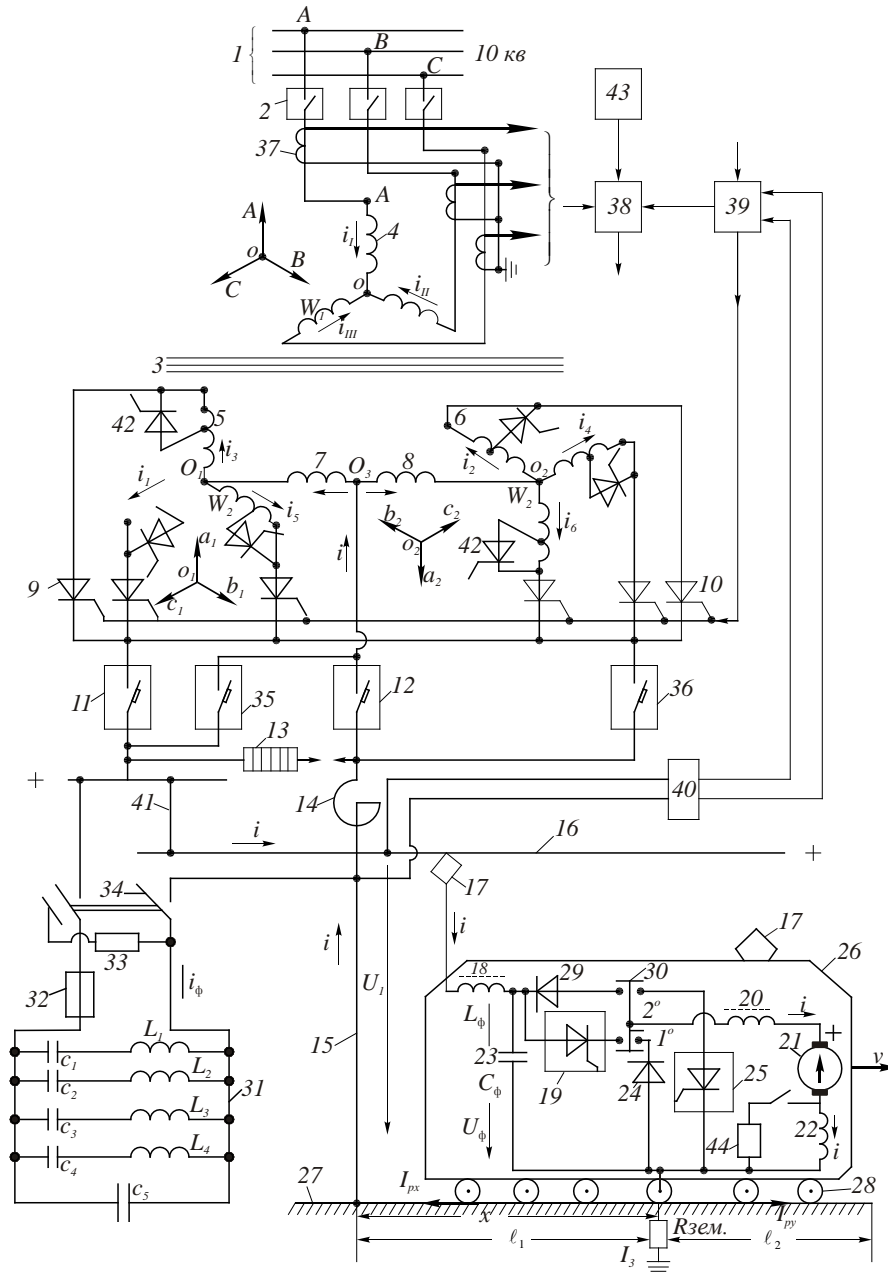


რეკუპერაციისას - ინვერტორულ რეჟიმში 38 რეჟიმების გადართვის გადამწოდის დახმარებით. წევის რეჟიმისას სწრაფმოქმედი ავტომატური ამომრთველები 11, 12 იმყოფებიან ჩართულ მდგომარეობაში. რეკუპერაციისას ისინი ამოირთვებიან და ჩაირთვებიან 35,36 ავტომატები, რის შემდეგ გამმართველი გადადის ინვერტირების რეჟიმში. ერთი რეჟიმიდან მეორე რეჟიმში გადასვლის ხერხი, ბევრად არის დამოკიდებული გადართვის გადამწოდზე [1, 3, 30]. არსებული გადამწოდის მუშაობის მოცემული რეჟიმის ძირითად პარამეტრად მიჩნეულია გამართული დენის 41 სალტეზე დაბვის დონე. ეს დაბვა უშუალოდ იზომება და შედარდება მკვებავი ქსელის დაბვასთან, ან ირიბი გზით შედარდება ემშ-ის რეკუპერაციულ დაბვასთან. რეჟიმების უკონტაქტო გადართვის გადამწოდი აგრეთვე ადარებს აგრეგატის დაბვას ემშ-ის დენმიმღებზე დაბვას ან მეზობელი ქვესადგურის სალტეზე დაბვას. არ შეიძლება გადამწოდის აწყობა ისეთნაირად, რომ აგრეგატი გადაირთოს ინვერტორულ რეჟიმში აგრეგატზე 3,7-3,8 კვ დაბვის მიღწევისას მკვებავი ქსელის დაბვასთან დამოუკიდებლად; ასე რომ დაბვის ასეთი დონე სრულიად შესაძლებელია გამმართველ რეჟიმშიც. გადამწოდი აიწყობა იმგვარად, რომ მეზობელ ქვესადგურებში დაუტვირთავი გამმართველი აგრეგატის არსებობისას განხილული გამმართველი აგრეგატი რეკუპერაციული დამუხრუჭების შემდეგაც დარჩეს ინვერტორულ რეჟიმში [23-25, 30].

გადამწოდი მართავს 11, 12 სწრაფმოქმედ ავტომატებს და ინვერტორული რეჟიმის მართვის 39 იმპულსებს. გაჟღენთვის 14 დროსელის გადამაგნიტებაზე დროის დაყოვნება შეადგენს 3-4 და 5-6 წმ შესაბამისად გამართვისა და ინვერტირების რეჟიმში გადართვისას.

აგრეგატის გამართვის რეჟიმიდან ინვერტირების რეჟიმზე გადასვლა ხორციელდება შემდეგი თანმიმდევრობით: ამოირთვება გამმართველის 11,12 ამომრთველები, გადამაგნიტდება გაჟღენთვის 14 რეაქტორი და მართვის იმპულსები 39-დან მიეწოდება 9-10 ტირისტორებს; ირთვება 35,36 ამომრთველები. ქვესადგურის სალტეზე გადართვის მომენტში

მაქსიმალური ძაბვა არ აღწევს 3,65-3,68 კვ-ს, რადგანაც გამართვის რეჟიმის ამორთვისას რეკუპერაციის ენერგია გადაეცემა მეზობელ ზონას. ინვერტორულ რეჟიმში აგრეგატზე იმპულსების მიწოდებისას აგრეგატი დებულობს დატვირთვას, და სალტეზე ძაბვა მყარდება მისი სტაბილური მახასიათებლების დონეზე.



**ნახ.8** წევის ქვესადგურის გარდამქმნელის ერთიანი სისტემა "ორი შებრუნებული ვარსკვლავი გამათანაბრებელი ორფაზა რეაქტორით", დატვირთული განედურ-იმპულსური მართვადი ელმავლის მუდმივი დენის წევის ძრავით.

16 საკონტაქტო ქსელში ძაბვის ხანმოკლე ცვლილებისას აგრეგატში მცდარი გადართვების აღსაკვეთად გადამწოდის ელემენტი შესრულებულია 0,2-0,3 წმ დროის დაყოვნებით [17, 19]. ინვერტორულ რეჟიმიდან გამართვის რეჟიმზე გადასვლა ხდება შებრუნებული თანმიმდევრობით. გარდამქმნელი აგრეგატის მუშაობის ყველაზე სასიამოვნო პირობაა, როცა მეზობელი ქვესადგურები მუშაობენ უქმი სვლის რეჟიმში მახასიათებლის ბუნებრივ მონაკვეთზე.

14 რექტორი გამოყენებულია რადიო დაბრკოლებებისათვის, კომუტაციის გასაუმჯობესებლად, ძაბვის გაგლუვებისათვის და ავარიული რეჟიმებისას მოკლე შერთვის დენების შემცირებისათვის. გარდამქმნელის გამოსავალზე ანოდსა და კათოდზე ჩართულია PBK ტიპის განმუხტველები, რომლებიც იცავენ მას ატმოსფერული და გარე კომუტაციური გადაძაბვებისაგან; 13 განმუხტველი PBBK-3,3 ტიპისა იცავს გარდამქმნელს 16 საკონტაქტო ქსელის მხრიდან გადაძაბვებისაგან. გამართვის რეჟიმში შეკრულია 11, 12 სწრაფმოქმედი ავტომატები და გამორთულია 35, 36 ავტომატები; ინვერტორულ რეჟიმში კი - პირიქით. ТДП-12 500/10ж ტიპის წევის ტრანსფორმატორის ძაბვის აწევა ინვერტორულ რეჟიმში

$$U_{2H} = U_{2B} / \cos\beta \quad (87)$$

გამოსახულების შესაბამისად ხდება ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილების ხვიათა რიცხვის გაზრდით (42 ტირისტორი ყველა ფაზაში ჩაკეტილ მდგომარეობში, დენს არ ატარებენ). (87)-ში  $U_{2B}$  - არის გამართვის რეჟიმში წევის ტრანსფორმატორის მეორადი ძაბვა;  $U_{2H}$  - იგივე ინვერტორულ რეჟიმში;  $\beta$  - მორიგი ტირისტორის გაღების მომენტიდან ორი მაკომუტირებელ ფაზებს შორის ე.მ. ძალების გათანაბრების მომენტამდე დროის ინტერვალის დამახასიათებელი წინსწრების კუთხეა. წინსწრების  $\beta$  კუთხე უნდა იყოს კომუტაციის პროცესისათვის საკმარისი (კომუტაცია გრძელდება  $\gamma$  - კომუტაციის კუთხის შესაბამის დროში, რომლის სიდიდე დამოკიდებულია დენის სიდიდეზე) და ტირისტორების

ჩაკეტვის თვისებების აღდგენის დროისათვის საკმარისი (ამ აღდგენის დროს შეესაბამება  $\delta$  კუთხე):  $\beta \geq \gamma + \delta$

თუ წინსწრება არა საკმარისია, მაშინ ხდება ინვერტორულ რეჟიმში მოკლე შერთვა და ინვერტორის გადაყირავება.  $\gamma$  და  $\delta$  კუთხეები დამოკიდებულნი არიან ანოდურ დენზე და იგი რაც უფრო დიდია, მით უფრო დიდ დროში გრძელდება ეს პროცესები; მაშინ აუცილებელია  $\beta$  შერჩეული იქნას საშუალო პირდაპირი დენის ყველაზე უდიდესი მნიშვნელობიდან გამომდინარე ან ავტომატურად გაიზარდოს  $\beta$  კუთხე ინვერტორული რეჟიმის დენის გაზრდისას. წვევის ქვესადგურის უქმისვლის რეჟიმში გამართვის რეჟიმი გადადის ინვერტორულ რეჟიმში ( $\beta = \delta$ ), ხოლო დატვირთვის შემთხვევაში  $\beta = \gamma + \delta$  გამართვის რეჟიმში 42 ტირისტორი ტრანსფორმატორის ყველა ფაზაში იმყოფება ღია მდგომარეობაში, დენს ატარებს. გამართვის რეჟიმში 9, 10, 42 ტირისტორების რეგულირების კუთხე  $\alpha \approx 0$ , ხოლო ინვერტორულ რეჟიმში 9-10 ტირისტორებისათვის  $\alpha = \pi - \beta$ ; 42-ტირისტორებისათვის მართვის იმპულსები გათიშულია და იმყოფებიან გახსნილ მდგომარეობაში (დენს არ ატარებენ).

გამართვის რეჟიმიდან ინვერტირების რეჟიმზე გადასვლის პროცესი და პირიქით სრულიად ავტომატიზირებულია ნახევარგამტარულ მოწყობილობებით. ნახ.8-ზე ნაჩვენებია აგრეთვე ავტომატური მართვის ბლოკები: გამართული ძაბვის გადამწოდი -40 3,3 კვ ძაბვის სალტეზე; რეჟიმების გადართვის გადამწოდი - 38 და მართვის კარადა - 39.

დავუშვათ, რომ გარდამქმნელი იმყოფება გამართვის რეჟიმში და დგება ინვერტირების რეჟიმი. შესაბამისი დონის სიგნალები ძაბვის გადამწოდიდან მართვის კარადამდე მიეწოდება და დენის ტრანსფორმატორიდან - 37, ძაბვის ტრანსფორმატორიდან - 43 და მართვის კარადიდან მიეწოდება რეჟიმების გადართვის გადამწოდს. ამ უკანასკნელის ლოგიკური ელემენტები და მართვის კარადის ლოგიკური ელემენტები გამოიმუშავენ სიგნალებს და თავიანთი გამოსავალი კასკადებით იძლევიან: რეჟიმების გადართვის (გადამწოდი - სიგნალების 11-12

ამომრთველების გათიშვაზე და 35-36 ამომრთველების ჩართვაზე ინვერტორული რეჟიმისათვის, მართვის კარადა - მოცემული  $\beta$  კუთხით გამღებ იმპულსებს 9-10 ტირისტორების მართვის ელექტროდებზე მისაწოდებლად.

გამაგლუვებელი მოწყობილობა შედგება 14-რეაქტორისაგან, ჩართული მინუსურ სალტესთან და 31 რეზონანსული კონტურებისაგან, შემდგარი  $C_1-C_5$  კონდენსატორებისაგან და  $L_1-L_4$  ინდუქციურობის ხვიებისაგან. ყოველ კონტურს აწყობენ განსაზღვრული სიხშირის რეზონანსზე, რომელიც გააჩნია გამართულ ძაბვას. კონდენსატორების განმუხტვისათვის იყენებენ 33 რეზისტორის - გამაგლუვებელი მოწყობილობაში ჩართვება 34 ჩამრახით. გაგლუვების კოეფიციენტი განისაზღვრება ასეთნაირად:

$$K_{გაგლ.} = \frac{W_n^2 L_{rn} C_n}{\alpha_0 t g \delta}, \quad (88)$$

სადაც  $w_n$  - n რიგის ჰარმონიკის კუთხური სიხშირეა;  $L_{rn}$  - n სიხშირის რეაქტორის ინდუქციურობაა;  $C_n$  - n სიხშირის ტევადობაა;  $\alpha_0$  - კოეფიციენტია, რომელიც ითვალისწინებს სადენების, კონტაქტორების და ხვიების აქტიურ წინაღობებს;  $t g \delta$  - კონდენსატორში დიელექტრიკული კარგვებია. გაგლუვების კოეფიციენტი მით უფრო მაღალია, რაც მეტია  $L_{rn}$  და  $C_n$  და მით უფრო მცირეა, რაც უფრო მეტია კონტურის აქტიური წინაღობა.

სქემაში (ნახ. 8) გათვალისწინებულია 26 ემმ-ის მუდმივი დენის იმპულსური მართვის ძრავის - 21 პრინციპული ელექტრული სქემა ტირისტორული მწყვეტარა 19, მოწყობილობის დახმარებით. ძრავში დენის პულსაციის გაგლუვებისათვის მის მიმდევრობით ჩართულია 20 დამტვირთავი რეაქტორი, ხოლო დატვირთვის წრედის პარალელურად - არა მართვადი ვენტილი 24, რომელსაც უწოდებენ უკუ ვენტილს. ამ ვენტილის გავლით შეიკვრება დატვირთვის წრედი მწყვეტარას გახსნისას. ძრავის მართვის სისტემის შესავალში საკონტაქტო ქსელში დენის

პულსაციის გაგლუვებისათვის დაყენებულია  $r$  - მაგვარი ფილტრი, შემდგარი 18 რეაქტორისგან და 23 კონდენსატორისაგან. ეს უკანასკნელი გამორიცხავს აგრეთვე საკონტაქტო ქსელის ინდუქციურობის ზეგავლენას გარდამქმნელზე [3,30]. 19 - მწყვეტარას ორ ჩართვას შორის პერიოდის ხანგრძლივობას ავლნიშნავთ  $T$  -თი, ხოლო დროს, რომლის განმავლობაში მწყვეტარა ჩართულია -  $t_A$  -თი. ე.მ.შ-ის გაშვებისა და წვევისას 30 გადამრთველი იმყოფება  $1^0$  მდგომარეობაში, ხოლო 21-22 ძრავის რეკუპერაციის პროცესში -  $2^0$  მდგომარეობაში.

19 მწყვეტარას შეკვრისას დატვირთვის წრედზე მოდებულია ძაბვა, რომელიც ტოლია საკონტაქტო ქსელის  $U_1$  ძაბვის ( $u_H=U_1$ ).  $t_A$  დროის ინტერვალში (ნახ. 9)  $U_1$  ძაბვის მოქმედებით იზრდება  $i = i_1$  დენი. ქსელიდან მიღებული ენერგია იხარჯება წვევის ძრავის მუშაობაზე და მის წრედში ელექტრომაგნიტური ენერგიის  $L_{H\partial\theta}(i_K^2 - i_K^2)/2$  სიდიდით გაზრდაზე, სადაც  $L_{H\partial\theta}$  - ინდუქციურობაა  $L_H$  რეაქტორისა და ძრავისა;  $i_H, i_K$  - დატვირთვის დენებია შესაბამისად  $t_A$  ინტერვალის დასაწყისში და ბოლოში. პერიოდის დანარჩენ ნაწილში  $t_B=T-t_A$  დატვირთვა გათიშულია ქსელიდან ( $U_H=0$ ), რის შედეგადაც ძრავის  $i$  დენი შეიკვრება 24 ვენტილის გავლით თანდათან  $i_H$  მნიშვნელობამდე შემცირებით. ძრავის დენი შენარჩუნდება  $t_B$  პერიოდის განმავლობაში დატვირთვის კონტურში დაგროვილი ენერგიის ხარჯზე და შემცირებული  $L_{H\partial\theta}(i_K^2 - i_K^2)/2$  სიდიდით.

$$\text{ძრავზე ძაბვის საშუალო მნიშვნელობა } U = \frac{1}{T} \int_0^T U_H dt, \text{ როგორც ნახ. 9-}$$

დან ჩანს ტოლია:

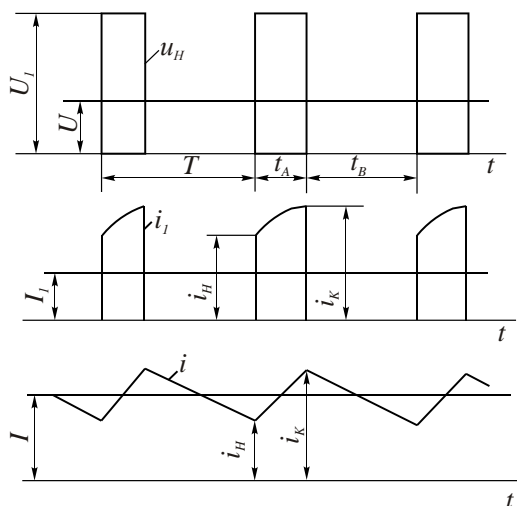
$$U = U_1 t_A / T. \quad (89)$$

ძრავის საშუალო  $I$  დენსა და ქსელის საშუალო  $I_1$  დენს შორის თანაფარდობა შეიძლება მიახლოებით განისაზღვროს  $U_1$  და  $I$  სიდიდეების შეუცვლელად პირველადი და მეორადი სიმძლავრეთა ბალანსის საფუძველზე:

$$U_1 I_1 = UI, \quad (90)$$

საიდანაც

$$I_1 = I \frac{U}{U_1} = I \frac{t_A}{T}. \quad (91)$$



**ნახ.9** დატვირთვის წრედში  $U_H$  ძაბვის ცვლილებების, ქსელიდან მიღებული  $i_1$  დენის და  $i$  ძრავის დენის ცვლილებების დიაგრამა.

(91) იმპულსების შევსების კოეფიციენტისათვის გვაქვს:

$$\lambda = t_A / T \quad (92)$$

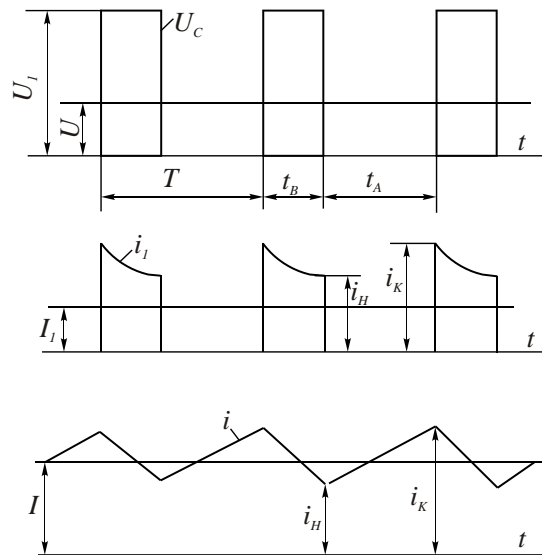
(89)-დან გამომდინარეობს, რომ წვეის ძრავაზე ძაბვა შეიძლება ვარეგულიროთ როგორც  $t_A$ , ასევე  $T$ -ს ცვლილებით. ამ შემთხვევაში რეგულირდება იმპულსის განედი (განედურ-იმპულსური მართვა) ისეთნაირად, რომ იმპულსის სიხშირე და შესაბამისად პერიოდის ხანგრძლივობა უცვლელია.

ნახ.8-ზე ნაჩვენებ სქემაზე აღნიშნულია: 21-22 ღუზა და აღზენების გრაგნილი წვეის ძრავისა; ემშ-ის ბორბალი - 28; რელსი - 27; შემწოვი სალტე - 15, ელმავლის დენმიმღები - 17.

იმპულსური მართვა საშუალებას იძლევა განხორციელდეს რეკუპერაცია იმ შემთხვევაშიც თუ ე.მ. ძალა ნაკლებია ქსელის ძაბვაზე

მაშინაც კი თუ გვაქვს მიმდევრობითი აღზნების მუდმივი დენის წევის ძრავა.

განვიხილოთ წევის ძრავის მართვის იმპულსური გარდამქმნელის მუშაობის პრინციპი რეკუპერაციული დამუხრუჭებისას გამარტივებული სქემის (ნახ.8) შემთხვევაში, როცა ჩამრაზი - 30 იმყოფება  $2^\circ$  მდგომარეობაში.  $L_H$  რეაქტორი უზრუნველყოფს წევის ძრავას წრედში დენის გაგლუვებას, ხოლო ვენტილი - 29 ხელს უშლის ამ წრედში საკონტაქტო ქსელიდან დენის შემოდინებას იმ დროის შუალედში, როცა ძრავზე დაბვა ნაკლებია საკონტაქტო ქსელის დაბვაზე.



**ნახ.10.** რეკუპერაციისას დაბვებისა და დენების დიაგრამები ნახ.8 სქემის მიხედვით ჩამრაზი-30-ის  $2^\circ$  მდგომარეობაში ყოფნისას.

ნახ. 10-ზე მოყვანილია რეკუპერაციისას დენების და დაბვების დიაგრამები იმ სქემისათვის, როცა ჩამრაზი 30 იმყოფება  $2^\circ$  მდგომარეობაში. მწყვეტარა 25-ის შეკრულ მდგომარეობას შეესაბამება პერიოდის  $t_A$  ნაწილი, ხოლო გათიშულ მდგომარეობას კი -  $t_B = T - t_A$ . მწყვეტარას გაღებისას წარმოიშვება წევის ძრავის დენის კონტური, მომუშავე გენერატორულ რეჟიმში; ეს კონტური შეიცავს 21 ძრავას,  $L_H$  რეაქტორს-20 და მწყვეტარას-25. კონტურის მცირე წინაღობის მეშვეობით გენერატორული დენი  $i$  იზრდება  $i_H$  -დან  $i_K$  -მდე, რის შედეგადაც იზრდება, ძირითადად



რეაქტორში კონტურის ელექტრომაგნიტური ენერჯის მარაგი. ამ ინტერვალში  $i_1=0$ . შემდგომ, მწყვეტარას ჩაკეტვის შემდეგ ძრავას დენი იწყებს შემცირებას, და რეაქტორის  $L_H$  ინდუქტიურობასა და ძრავას გრაგნილის ინდუქციურობით განპირობებული თვითინდუქციის ე.მ.ძალა შეჯამდება ძრავას ე.მ. ძალასთან. ამ ე.მ. ძალების ჯამი აღემატება საკონტაქტო ქსელის ძაბვას, ძრავის დენი შეაღწევს წვეის ქსელში, იმის მიუხედავად, რომ ე.მ.ძ ნაკლებია ქსელის ძაბვაზე[14].

გენერატორულ რეჟიმში მომუშავე წვეის ძრავის საშუალო ძაბვა  $U$  წონასწორდება პერიოდის განმავლობაში  $U_c$  ძაბვის საშუალო მნიშვნელობით. ამიტომ, ნახ.10-ზე მოყვანილი დიაგრამებიდან გვაქვს:

$$U = \frac{1}{T} \int_0^T u_c dt = U_1 \left( 1 - \frac{t_A}{T} \right). \quad (93)$$

როგორც წვეის რეჟიმში, ამ რეჟიმშიც თუ მივიღებთ, რომ  $U_1 T_1 = UI$ , მაშინ წვეის ძრავას დენის საშუალო მნიშვნელობისათვის ვღებულობთ:

$$I = I_1 T / (T - t_A) = I_1 T / t_B, \quad (94)$$

სადაც  $I_1$  - რეკუპერაციისას საკონტაქტო ქსელში დაბრუნებული დენის საშუალო მნიშვნელობაა.

როგორც (93), (94) გამოსახულებიდან ჩანს,  $U$  ძაბვისა და  $I$  დენის რეგულირება და შემდგომ კი თვით სამუხრუჭე ძალისა და სიჩქარისა იმპულსური მართვის პირობებში შეიძლება განვახორციელოთ  $t_A/T$  თანაფარდობის ცვლილებით. განედურ-იმპულსური მართვის შემთხვევაში  $T = \text{const}$  და ძაბვა რეგულირდება იმპულსის  $t_A$  ხანგრძლივობის ცვლილებით, რომელიც უნდა გავზარდოთ  $U$  ძაბვის შემცირებისათვის და უნდა შევამციროთ  $U$  ძაბვის გაზრდისათვის.

## 2.2. ელექტრომოდრავი შემადგენლობის დინამიკის განტოლებები

ლიანდაგებში პოტენციალებისა და დენების გათვალისწინებით.

წვეის ქვესადგურის გარდამქმნელ სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების გაანგარიშებისა და გამოკვლევისათვის

მიზანშეწონილია გავითვალისწინოთ მატარებლის მოძრაობის განტოლებები ერთი მატარებლის ცალმხრივი კვების შემთხვევაში პოტენციალებისა და დენების განსაზღვრის გათვალისწინებით [5].

როგორც ცნობილია მატარებელი წარმოადგენს რთულ სისტემას, რომელიც შედგება მრავალი ნაწილისაგან, ერთმანეთთან დრეკადად და მყარად დაკავშირებულნი. ამიტომ ლიანდაგის გზაზე მატარებლის მოძრაობა შედგება გზის ღერძის გასწვრივ სასარგებლო გადაადგილებისაგან, რომელსაც თან სდევს 28-ბორბლის, ღერძის და წვევის ძრავის ღუზის-21-ის ბრუნვითი მოძრაობა, მოძრავი მექანიზმების ელემენტებისგან და მათზე დადებული სხვადასხვა რხევითი მოძრაობებისგან (ნახ.8).

განვიხილოთ მატარებლის სასარგებლო მოძრაობა. ამ შემთხვევაში გაანგარიშებას აწარმოებენ გამარტივებული სქემის საფუძველზე, რომლის თანახმად მატარებელი წარმოდგენილია, როგორც  $m$  მასის მაგარი სხეული, თავმოყრილი მასის ცენტრში; უგულვებელყოფენ მატარებლის სასრულო სიგრძეს, ხოლო მის მოძრაობას განიხილავენ, როგორც გადატანით [3-30].

მატარებელზე მოდებული ძალები განსაზღვრავენ მისი მოძრაობის ხასიათს. ამ ძალებს ყოფენ მემანქანით მართვადი - წვევისა და დამუხრუჭების და არამართვადი - მოძრაობის წინააღმდეგობის ძალებად.

მატარებლის მოძრაობის ძირითადი რეჟიმებია: წვევის (მოძრაობა დენის ქვეშ) რეჟიმი; გარბენის რეჟიმი (დენის გარეშე მოძრაობა) და დამუხრუჭების რეჟიმი [3].

წვევის რეჟიმში მატარებელი გადაადგილდება წვევის ძრავის მიერ შექმნილი ძალის მოქმედებით და მბრუნავი ბორბლის ლიანდაგთან შეჭიდულობის არსებობის რეალიზაციის მეშვეობით. გადარბენისას ძრავები გამორთულია და მატარებლის მოძრაობას განსაზღვრავს მოძრაობის წინააღმდეგობის ძალები, მათ შორის სიმძიმის ძალებიც. დამუხრუჭების რეჟიმში ხელოვნურად ქმნიან ძალებს, რომლებიც მიმართულია სასარგებლო მოძრაობის საწინააღმდეგო მიმართულებით.

მატარებლის მოძრაობის განტოლება დიფერენციალურ ფორმაში აკავშირებს ერთმანეთთან ცვლადების -  $V$  სიჩქარეს, განვლილ  $S$  მანძილს და  $t$  დროს.

შემოვიღოთ შემდეგი პარამეტრები:

- მატარებლის მასა -  $m$ ;
- მატარებლის სიჩქარე -  $V$ ;
- გადაყვანის კოეფიციენტები  $\xi$  და  $\xi^1$ , ასე, რომ ნებისმიერად შეძლება შერჩეული იქნას შემავალი სიდიდეების განზომილების ერთეულები;
- მბრუნავი ნაწილების ექვივალენტური მასა -  $m_3$ ;
- მბრუნავი ნაწილების ინერციის კოეფიციენტი.

$$1 + m_3/m = 1 + \gamma$$

$$m_3 = \sum J_{dr} / R_{dr}^2 + \sum J_n / R_b^2 + \sum I_{ლუზ} \mu^2 / R_{dr}^2$$

- წყვილი ბორბლების მოძრაობის ინერციის მომენტი -  $J_{ბრ}$ , წყვილი ბორბლების დამჭერი მომენტი -  $J_{\Pi}$ , ძრავის ლუზის მომენტი -  $J_{ლ}$ ,
- მოძრაობის რადიუსი -  $R_{ბრ}$  და დამჭერი ბორბლის რადიუსი -  $R_{\Pi}$  ;
- მოძრავი მექანიზმის გადაცემის რიცხვი -  $\mu = \omega_{ლუზ} / R_{dr}$
- მბრუნავი ნაწილების კუთხური სიჩქარეები:  $\omega_{dr} = \frac{V}{R_{dr}}$   $\omega_n = \frac{V}{R_n}$  ;

$$\omega_{ლუზ} = \mu \omega_{dr} = \frac{\mu V}{R_{dr}};$$

- მატარებლის დაყვანილი მასა -  $M_{\Pi} = (1 + \gamma) m$ ;
- წვევის ძალა -  $F$ ;
- მატარებლის სასარგებლო მოძრაობის წინაღობის ძალა -  $W$ ,
- სამუხრუჭე ძალის აბსოლუტური მნიშვნელობა -  $B$ .

მატარებლის მოძრაობის განტოლებას ზემოთ მოყვანილი პარამეტრების გათვალისწინებით აქვს სახე:

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{\xi}{1 + \gamma} (F - W - B) \tag{95}$$

(95) ტოლობიდან გამომდინარეობს, რომ წევის რეჟიმში, როცა  $B=0$ , თანაბრად მოქმედი ძალა  $F_{აბ} = F - W$ . თუ  $F-W>0$ , მაშინ  $dv/dt=0$  და მატარებლის სიჩქარე  $V$  მატულობს; ამ შემთხვევაში  $F_{აბ}$  ძალა ამაჩქარებელია. თუ  $F-W<0$  მაშინ  $V$  სიჩქარე შემცირდება,  $dv/dt<0$  და  $F_{აბ}$  ძალა არის შემნელებელი. თუ  $F-W=0$ , ე.ი.  $F=W$ ,  $dv/dt=0$ , მატარებლის მოძრაობა იქნება თანაბარი, დამყარებული  $V_y$  სიჩქარით.

განარბენის დროს  $F$  და  $B$  ძალები ნულის ტოლია,  $F_{აბ}=-W$ . აღმართზე, მოედანზე და დაღმართზე  $W$  დადებითია და მატარებლის სიჩქარე  $V$  მცირდება  $dv/dt<0$ . მრუდე დაღმართზე  $W$  შეიძლება მიმართული იყოს მოძრაობის მიმართულებით,  $dv/dt$  დადებითია და  $V$  სიჩქარე იზრდება.

დამუხრუჭების დროს  $F=0$  და  $F_{აბ}=- (B+W)$ . ჩვეულებრივად  $W$  მიმართულია მოძრაობის საწინააღმდეგოდ და მაშინ  $dv/dt<0$ . ე.ი. სიჩქარე  $V$  მცირდება. თუ მრუდე დაღმართზე დამამუხრუჭებელი ძალა უმნიშვნელოა, მაშინ  $F_{აბ}=- (B+W)$  შეიძლება გახდეს ნულზე მეტი და მატარებლის შეჩერება არ მოხდება. როცა  $B+W=0$  და  $dv/dt=0$ , მაშინ გვაქვს რეგულირებადი დამუხრუჭება.

ამგვარად, ნებისმიერ რეჟიმში თანაბრადმოქმედი  $F_{აბ}$  ძალისას ნულის ტოლობის შემთხვევაში მატარებელი მოძრაობს  $V=const$  დამყარებული სიჩქარით. თუ  $F_{აბ}\neq 0$ , მაშინ მატარებლის მოძრაობის პროცესი მიმდინარეობს გადიდებული სიჩქარით  $F_{აბ}>0$  შემთხვევისათვის და შემცირებული სიჩქარით  $F_{აბ}<0$  შემთხვევაში:

წევის გაანგარიშების მოცულობაში შედის: მატარებლის მიერ მოთხოვნილი სიმძლავრის დამოკიდებულება გზაზე ან დროზე; ენერჯის დანახარჯების გაანგარიშება მოძრაობაზე; წევის ძრავასა და სხვა ელექტროდანადგარების გაანგარიშება გახურებაზე.

წევის ძრავები ხშირად მუშაობენ აგზნების გრაგნილის, 44 შუნტის წინააღმდეგობით დაშუნტების მეთოდით, შესუსტებული აგზნებით.

გარდამავალი რეჟიმების ანალიზისას აუცილებელია გავითვალისწინოთ მასზე გრიგალური დენების გავლენა და წევის ძრავას

გრაგნილების ინდუქციურობები. მაგნიტური ნაკადის მნიშვნელობას ანგარიშობენ ჩვეულებრივ დატვირთვის მახასიათებლიდან, ე.ი.  $\Phi(I_B)$  დამოკიდებულებიდან სხვადასხვა  $I_{\infty} = \text{const}$  დენის მნიშვნელობისას.

განვიხილოთ  $d_x$  ელემენტარული უბანი დატვირთვიდან  $X$  მანძილზე (ნახ.8). აქ  $I_{\infty X}$  - დენია ლიანდაგში დატვირთვიდან  $X$  მანძილზე;  $I_{\text{მიწა}X}$  - დენია მიწაში დატვირთვიდან იმავე მანძილზე;  $\varphi_x$  - პოტენციალია ლიანდაგის დატვირთვიდან  $X$  მანძილზე. ლიანდაგის წრედის ელემენტის წინაღობა  $dx$  სიგრძეზე  $R_{\infty} dx$  - მაშინ ლიანდაგის პოტენციალის ნაზრდზე ამავე  $dx$  მანძილზე ტოლია და საწინააღმდეგოდაა მასში ძაბვის ვარდნასთან.

$$\frac{d\varphi_x}{dx} = -R_{\infty} I_{\infty X} \quad (96)$$

თუ დენის ნაზრდი ლიანდაგში  $dx$  სიგრძეზე  $dI_{PX}$  ტოლია გაჟონვის დენისა და ნიშნით საწინააღმდეგოთაა, მაშინ შეგვიძლია დავწეროთ:

$$\frac{dI_{\infty X}}{dx} = -\frac{\varphi_x}{R_{\Pi}} \quad (97)$$

სადაც (96), (97)-ში  $R_{\infty}$  - ლიანდაგის წინაღობაა;  $R_{\Pi}$  - ლიანდაგსა და მიწას შორის  $d_x$  სიგრძეზე გარდამავალი წინაღობაა. მინუს ნიშანი გვიჩვენებს, რომ  $X$ -ის გაზრდით ლიანდაგში დენი მცირდება.

(96), (97)-დან ვღებულობთ:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} - \alpha^2\varphi_x = 0 \quad (98)$$

$$I_{\infty X} = -\frac{1}{R_B} - \alpha^2\varphi_x = 0 \quad (99)$$

სადაც  $\alpha = \sqrt{R_{\infty} R_{\Pi}}$  - ლიანდაგში ტალღის გავრცელების კოეფიციენტი;  $R_B$  - ტალღური წინაღობაა.

(98), (99) განტოლებების ამოხსნას ვეძებთ სახეში:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_x &= Ae^{\alpha x} + Be^{-\alpha x}; \\ I_{PX} &= \frac{1}{R_B} (Ae^{\alpha x} - Be^{-\alpha x}); \end{aligned} \right\} \quad (100)$$

სადაც

$$R_B = \sqrt{R_{\infty} R_{\Pi}} \quad (101)$$

(100) და (101) ფორმულები არიან ზოგადი გამოსახულებები.

დატვირთვის კონკრეტული განლაგების სხვადასხვა შემთხვევისათვის A და B მუდმივების მნიშვნელობებს ადგენენ შესაბამის სასაზღვრო პირობების მიხედვით [2,3].

(100) და (101) განტოლებები დატვირთვის მარცხნიდან და მარჯვნიდან ჩაიწერება ასე სახეში:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_x &= A_1 e^{\alpha x} + B_1 e^{-\alpha x}; \\ \varphi_y &= A_2 e^{\alpha y} + B_2 e^{-\alpha y}; \\ I_{px} &= -\frac{1}{R_B} (A_1 e^{\alpha x} - B_1 e^{-\alpha x}) \\ I_{py} &= -\frac{1}{R_B} (A_2 e^{\alpha y} - B_2 e^{-\alpha y}) \\ I_3 &= \varphi_{x=0} / R_3 \end{aligned} \right\} \quad (102)$$

როცა  $X=0$  და  $Y=0$  გვაქვს  $\varphi_{x=0} = \varphi_{y=0}$  და  $I = I_{X=0} + I_{Y=0} + I_3$ ;  $X=l_1$ -ის შემთხვევაში ვღებულობთ:  $I_{PX=l_1}=0$ ; როცა  $Y=l_2$  დენი  $I_{PY=l_2}=0$ . გამოვიყენოთ ეს სასაზღვრო პირობები და  $A_1 B_1 A_2 B_2$  პარამეტრებისათვის ვღებულობთ:

$$A_1 = \frac{IR_B}{2} \frac{e^{-\alpha l_1}}{\left[\frac{R_B}{R_3} + t h \alpha l_1 + t h \alpha l_2\right] c h \alpha l_1}; \quad (103)$$

$$B_1 = \frac{IR_B}{2} \frac{e^{\alpha l_1}}{\left[\frac{R_B}{R_3} + t h \alpha l_1 + t h \alpha l_2\right] c h \alpha l_1}; \quad (104)$$

$$A_2 = \frac{IR_B}{2} \frac{e^{-\alpha l_2}}{\left[\frac{R_B}{R_3} + t h \alpha l_1 + t h \alpha l_2\right] c h \alpha l_2}; \quad (105)$$

$$B_2 = \frac{IR_B}{2} \frac{e^{\alpha l_2}}{\left[\frac{R_B}{R_3} + t h \alpha l_1 + t h \alpha l_2\right] c h \alpha l_2}; \quad (106)$$

მიღებული (104)-(106) გამოსახულებებისა და (100)-(101) განტოლებების საფუძველზე ნებისმიერი სქემისათვის და ნებისმიერი წერტილისათვის შეიძლება განისაზღვროს ლიანდაგში  $\varphi_x$  პოტენციალის და  $I_{PX}$  დენის მნიშვნელობები.

### 2.3. გარდამქმნელ სისტემაში არაკომპუტაციური პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდულირება

ნახ.8-ზე წარმოდგენილი სამფაზა ძაბვის გამართვის სქემა, ყველაზე მეტად გავრცელებულია, რადგანაც ამ სქემაში, როგორც გამმართველი ისე ტრანსფორმატორი მუშაობენ უფრო ხელსაყრელ პირობებში, სხვა გამართვის სქემასთან შედარებით [14,30].

განვიხილოთ ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესები სქემის მუშაობის არასაკომპუტაციო ინტერვალში (ნახ.11)

$$0 \leq \omega t \leq \frac{2\pi}{3}.$$

ნახ.11-ზე მიღებული აღნიშვნებისას ფაზური დენების მყისა მნიშვნელობებისათვის გვაქვს განტოლებათა სისტემა მატრიცულ ფორმაში:

$$\begin{vmatrix} 0 \\ i_4'' w_2 - i_3'' w_2 \\ -i_3'' w_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} w_1 & w_1 & w_1 \\ -w_1 & 0 & w_1 \\ -w_1 & w_1 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_I' \\ i_{II}' \\ i_{III}' \end{vmatrix}. \quad (107)$$

(107)-დან სისტემის ამოხსნის შედეგად  $i_k^I$  ( $k = I, II, III$ ) დენებისათვის ვღებულობთ:

$$\begin{vmatrix} i_I' \\ i_{II}' \\ i_{III}' \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \frac{w_2}{w_1} \begin{vmatrix} 2 & -1 \\ -1 & -1 \\ -1 & 2 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_3'' \\ i_4'' \end{vmatrix} \quad (108)$$

კირჰოფის პირველი კანონის თანახმად გვაქვს:

$$i = i_3'' + i_4''. \quad (109)$$

მეორად გრაგნილზე ფაზური ძაბვებისათვის გვაქვს:

$$u_3'' = \frac{w_2}{w_1} u_I', \quad u_4'' = \frac{w_2}{w_1} u_{III}'. \quad (110)$$

წევის ტრანსფორმატორის პირველადი და მეორადი გრაგნილების ელექტრული წონასწორობის განტოლებებს, ცვლადთა მყისი მნიშვნელობების მიმართ, აქვთ შემდეგი სახე:

$$\begin{aligned}
u_k^I &= i_k^I R^I + \frac{d\psi_k^I}{dt}, \quad k = I, II, III; \quad u_k^I = U_m^I \sin\left[\omega t + \varphi + (k-1)\frac{2\pi}{3}\right], \\
u_3^II &= i_3^II R^II + \frac{d\psi_3^II}{dt}, \quad u_4^II = i_4^II R^II + \frac{d\psi_4^II}{dt}, \\
-u_3^II &= R_{\ominus}^II i + R_{yp} i_3^II + L_{\ominus}^II \frac{di}{dt} + L_{yp} \frac{di_3^II}{dt} + \frac{1}{C_{\mathcal{A}}} \int idt, \\
-u_4^II &= R_{\ominus}^II i + R_{yp} i_4^II + L_{\ominus}^II \frac{di}{dt} + L_{yp} \frac{di_4^II}{dt} + \frac{1}{C_{\mathcal{A}}} \int idt.
\end{aligned} \tag{111}$$

$\psi_k^I, \psi_3^II, \psi_4^II$  ნაკადუმბმის მყისა მნიშვნელობები განისაზღვრებიან, როგორც  $i_k^I$  და  $i_n^II$  დენების ნაკადუმბმების გეგმილები განსახილველი ფაზის მაგნიტურ ღერძზე [2,34]:

$$\begin{aligned}
\psi_k^I &= L_s^I i_k^I + \sum_{m=I}^{III} M^I i_m^I \cos(\alpha_m^I - \alpha_k^I) + \sum_{n=3}^4 M^{12} i_n^II \cos(\alpha_n^II - \alpha_k^I), \\
\psi_n^II &= L_s^II i_n^II + \sum_{m=3}^4 M^II i_m^II \cos(\alpha_m^II - \alpha_n^II) + \sum_{m=I}^{III} M^{21} i_m^I \cos(\alpha_m^I - \alpha_n^II), \\
k &= I, II, III; \quad n = 3, 4.
\end{aligned} \tag{112}$$

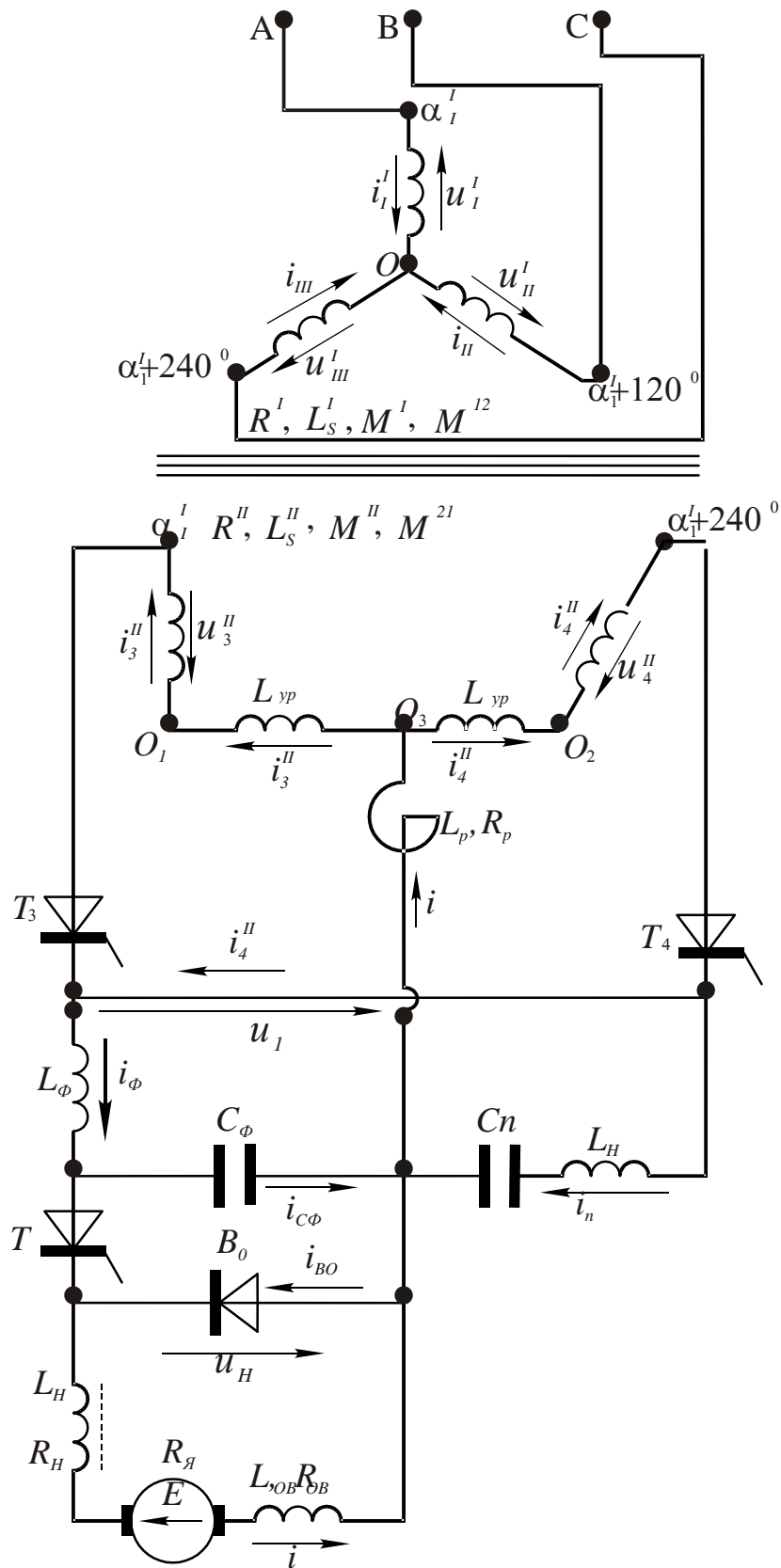
(111) განტოლებებში  $C_{\mathcal{A}} = \frac{J}{k_1^2 \phi^2}$  წარმოადგენს წვევის ძრავის ღუზის ექვივალენტური მექანიკურ ტევადობას [14,34];  $J$  მბრუნავი ნაწილების ინერციის მომენტს;  $\phi - \Phi$  - ღუზის მაგნიტურ ნაკადს;

$$K_1 = \frac{P N}{a 2\pi};$$

$2P$  წვევილ პოლუსთა რიცხვია;  $2a$  - პარალელური შტოთა რიცხვია.  $N$  - ღუზის გრაგნილის საერთო რაოდენობაა. ძრავის ფოლადში მაგნიტური ნაკადი გრიგალური დენების მოქმედების გამო შეიძლება ჩაითვალოს მუდმივად [14];

$$\begin{aligned}
R_{\ominus}^II &= R_H + R_{OB} + R_{\mathcal{A}} + R_{\Phi} + R_P, \\
L_{\ominus}^II &= L_H + L_{OB} + L_{\Phi} + L_P.
\end{aligned}$$





ნახ.11. გარდამქმნელის საანგარიშო ელექტრული სქემა არასაკომუტაციო დროის ინტერვალში T ტირისტორის ღია მდგომარეობაში,  $i_{B0} = 0, i_{C\phi} = 0, i_n \approx 0$ .

(107)-(112) განტოლებებში ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის საფუძველზე გრაგნილების რეზულტირებული კომპლექსური დენების მიმართ ვლუბულობით შემდეგ განტოლებებს:

$$\frac{3}{2} U_m^I e^{j(\omega t + \alpha'_I + \varphi)} = R^I \dot{I}^I + \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \frac{d\dot{I}^I}{dt} + \frac{3}{2} M^{12} \frac{d\dot{I}^{II}}{dt}, \quad (113)$$

$$0 = M^{21} \frac{d\dot{I}^I}{dt} - \frac{1}{2} M^{21} e^{j2(\alpha'_I + 120^\circ)} \frac{d\dot{I}^{*I}}{dt} + (R^{II} + R_{yp}) \dot{I}^{II} + \left[ L_s^{II} + L_{yp} + \left( 1 + \frac{1}{2} e^{-j60^\circ} \right) M^{II} \right] \frac{d\dot{I}^{II}}{dt} + \frac{\sqrt{3}}{3} M^{II} e^{j2\alpha'_I} \left( \frac{1}{2} e^{j150^\circ} - e^{j30^\circ} \right) \frac{d\dot{I}^{*II}}{dt} + R_3^{II} e^{j(\alpha'_I - 30^\circ)} \dot{i} + L_3^{II} e^{j(\alpha'_I - 30^\circ)} \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_{\mathcal{A}}} e^{j(\alpha'_I - 30^\circ)} \int i dt, \\ i = I^{*II} e^{j(\alpha'_I - 120^\circ)} + \dot{I}^{II} e^{-j(\alpha'_I - 120^\circ)},$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}^I &= \sum_{k=I}^{III} \dot{i}_k^I e^{j\alpha_k^I}, & \dot{I}^{II} &= \sum_{m=3}^4 \dot{i}_m^{II} e^{j\alpha_m^{II}}, \\ \dot{I}^{*I} &= \sum_{k=I}^{III} \dot{i}_k^{*I} e^{-j\alpha_k^I}, & \dot{I}^{*II} &= \sum_{m=3}^4 \dot{i}_m^{*II} e^{-j\alpha_m^{II}}. \end{aligned} \right\} \quad (114)$$

$$\alpha_{II}^I = \alpha_I^I + 120^\circ; \quad \alpha_{III}^I = \alpha_I^I + 240^\circ, \quad \alpha_3^{II} = \alpha_I^I, \quad \alpha_4^{II} = \alpha_I^I + 240^\circ. \quad (115)$$

ცვლადთა უკუგარდაქმნით ვლუბულობით:

$$\dot{i}_k^I = \frac{1}{3} \left( \dot{I}^I e^{-j\alpha_k^I} + \dot{I}^{*I} e^{j\alpha_k^I} \right), \quad k = I, II, III; \\ \dot{i}_3^{II} = \frac{\sqrt{3}}{3} e^{-j(\alpha'_I + 330^\circ)} \dot{I}^{II} - \frac{\sqrt{3}}{3} e^{j(\alpha'_I + 150^\circ)} \dot{I}^{*II}, \\ \dot{i}_4^{II} = -\frac{\sqrt{3}}{3} e^{-j(\alpha'_I + 90^\circ)} \dot{I}^{II} + \frac{\sqrt{3}}{3} e^{j(\alpha'_I - 90^\circ)} \dot{I}^{*II}, \\ i = e^{-j(\alpha'_I - 60^\circ)} \dot{I}^{II} - e^{j(\alpha'_I + 60^\circ)} \dot{I}^{*II}.$$

(113) განტოლებებიდან არ არის ძნელი მივიღოთ სკალარული განტოლებები დენების დ,გ ღერძებზე გეგმილების მიმართ კომპიუტერზე ამოცანის შემდგომი ამოხსნის მიზნით. შესაბამის სკალარულ განტოლებებს აქვს შემდეგი სახე:

$$\begin{bmatrix} e_d(t) - R_d^I I_d^I \\ e_q(t) - R_q^I I_q^I \\ -R_{d1}^II \cdot I_d^II - R_{d2}^II \cdot I_q^II - \int \left( \frac{I_d^II}{C_{\mathcal{R}} d_1} + \frac{I_q^II}{C_{\mathcal{R}} d_2} \right) dt \\ -R_{q1}^II \cdot I_d^II - R_{q2}^II \cdot I_q^II - \int \left( \frac{I_d^II}{C_{\mathcal{R}} d_1} - \frac{I_q^II}{C_{\mathcal{R}} d_2} \right) dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d^I & O & M_d^I & O \\ O & L_d^I & O & M_d^I \\ M_{d1}^I & -M_{d2}^I & L_{d1}^II & L_{d2}^II \\ -M_{q1}^II & M_{q2}^II & L_{q1}^II & L_{q2}^II \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dI_d^I/dt \\ dI_q^I/dt \\ dI_d^II/dt \\ dI_q^II/dt \end{bmatrix}, \quad (117)$$

სადაც

$$\begin{aligned} e_d(t) &= \frac{3}{2} U_m^I \cos(\omega t + \alpha'_I + \varphi), \quad e_q(t) = \frac{3}{2} U_m^I \sin(\omega t + \alpha'_I + \varphi), \quad R_d^I = R^I, \quad L_d^I = L_s^I + \frac{3}{2} M^I, \\ M_d^I &= \frac{3}{2} M^{12}, \quad R_{d1}^II = R^II + R_{yp} + R_{\mathcal{G}}^II \left[ \cos(2\alpha'_I - 150^\circ) - \frac{\sqrt{3}}{2} \right]; \quad R_{d2}^II = R_{\mathcal{G}}^II [\sin(2\alpha'_I - 150^\circ) - 1] \\ M_{d1}^II &= M^{21} \left[ 1 - \frac{1}{2} \cos 2(\alpha'_I + 120^\circ) \right], \quad L_{d1}^II = L_s^II + L_{yp} + L_{\mathcal{G}}^II \left[ \cos(2\alpha'_I - 150^\circ) - \frac{\sqrt{3}}{2} \right] + M^II \left[ \frac{5}{4} - \right. \\ &\left. - \frac{\sqrt{3}}{12} (3\sqrt{3} \cos 2\alpha'_I - \sin 2\alpha'_I) \right], \quad M_{d2}^II = \frac{1}{2} M^{21} \sin 2(\alpha'_I + 120^\circ), \quad L_{d2}^II = L_{\mathcal{G}}^II [\sin(2\alpha'_I - 150^\circ) - 1] + \\ &+ \frac{\sqrt{3}}{4} M^II \left[ 1 - \frac{1}{3} (\cos 2\alpha'_I + 3\sqrt{3} \sin 2\alpha'_I) \right], \quad \frac{1}{C_{\mathcal{R}} d1} = \frac{1}{C_{\mathcal{R}}} \left[ \cos(2\alpha'_I - 150^\circ) - \frac{\sqrt{3}}{2} \right], \quad \frac{1}{C_{\mathcal{R}} d2} = \\ &= \frac{1}{C_{\mathcal{R}}} [\sin(2\alpha'_I - 150^\circ) - 1], \quad R_{q1}^II = R_{\mathcal{G}}^II [1 + \sin(2\alpha'_I - 150^\circ)], \quad R_{q2}^II = R^II + R_{yp} - R_{\mathcal{G}}^II \cos(2\alpha'_I - 150^\circ), \\ M_{q1}^II &= \frac{1}{2} M^{21} \sin 2(\alpha'_I + 120^\circ), \quad M_{q2}^II = M^{21} \left[ 1 + \frac{1}{2} \cos 2(\alpha'_I + 120^\circ) \right], \quad L_{q1}^II = L_{\mathcal{G}}^II [\sin(2\alpha'_I - 150^\circ) + 1] - \\ &- \frac{\sqrt{3}}{4} M^II \left[ 1 + \frac{1}{3} (\cos 2\alpha'_I + 3\sqrt{3} \sin 2\alpha'_I) \right], \quad L_{q2}^II = L_s^II + L_{yp} - L_{\mathcal{G}}^II \cos(2\alpha'_I - 150^\circ) + M^II \left[ \frac{5}{4} + \right. \\ &\left. + \frac{\sqrt{3}}{12} (3\sqrt{3} \cos 2\alpha'_I - \sin 2\alpha'_I) \right], \quad \frac{1}{C_{\mathcal{R}q1}} = \frac{1}{C_{\mathcal{R}}} [\sin(2\alpha'_I - 150^\circ) + 1]; \quad \frac{1}{C_{\mathcal{R}q2}} = \frac{1}{C_{\mathcal{R}}} \cos(2\alpha'_I - 150^\circ). \end{aligned} \quad (118)$$

ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების გამოკვლევების საფუძვლად დევს სხვადასხვა პროგრამების პაკეტების გამოყენებით მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება.

თუ (117) განტოლებათა სისტემას გარდავქმნით ინტეგრალურ სახეში და შევადგენთ მისთვის გარდამავალი პროცესის მოდელის სტრუქტურულ სქემას, მაშინ ეს უკანასკნელი შეიცავს ინერციული ელემენტების გარეშე კონტურებს, რაც მიგვიყვანს ამოცანის არამდგრად ამოხსნასთან. ამ გარემოების გამოსარიცხად (117) განტოლებათა სისტემა ამოიხსნება დენების წარმოებულების მიმართ (მიყვანილი იქნა ნორმალურ განტოლებათა სისტემაზე) და მხოლოდ ამის შემდეგ მიყვანილი იქნა ინტეგრალურ სახეში, რომლებიც სამართლიანია განზოგადოებულ არა

საკომუტაციო ინტერვალებში  $\omega t_{n-1} = (n-1)\left(\frac{2\pi}{3} + \gamma\right)$  და  $\omega t_n = n\left(\frac{2\pi}{3} + \gamma\right) - \gamma$

( $n = 1, 2, 3 \dots \infty$  ინტერვალების ნომერია)-მდე:

$$I_d^I = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \left[ \frac{3 U_m^I}{2 L_{d3}^I} \cos(\omega t + \alpha_l^I + \varphi + \varphi_d^I) - \frac{1}{T_{1d}^I} I_d^I + \frac{1}{T_{2d}^I} I_q^I + \frac{1}{T_{3d}^I} I_d^{II} + \frac{1}{T_{4d}^I} I_q^{II} - \int (\omega_{1d}^2 I_d^{II} + \omega_{2d}^2 I_q^{II}) dt \right] dt + I_d^I(0), \quad (119)$$

$$I_q^I = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \left[ \frac{3 U_m^I}{2 L_{q3}^I} \sin(\omega t + \alpha_l^I + \varphi - \varphi_q^I) + \frac{1}{T_{1q}^I} I_d^I - \frac{1}{T_{2q}^I} I_q^I + \frac{1}{T_{3q}^I} I_d^{II} + \frac{1}{T_{4q}^I} I_q^{II} + \int (\omega_{1q}^2 I_d^{II} + \omega_{2q}^2 I_q^{II}) dt \right] dt + I_q^I(0), \quad (120)$$

$$I_d^{II} = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \left[ \frac{3 U_m^I}{2 L_{d3}^I} \cos(\omega t + \alpha_l^I + \varphi + \varphi_d^{II}) - \frac{1}{T_{1d}^{II}} I_d^I + \frac{1}{T_{2d}^{II}} I_q^I + \frac{1}{T_{3d}^{II}} I_d^{II} + \frac{1}{T_{4d}^{II}} I_q^{II} + \int (\omega_{3d}^2 I_d^{II} - \omega_{4d}^2 I_q^{II}) dt \right] dt + I_d^{II}(0), \quad (121)$$

$$I_q^{II} = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \left[ \frac{3 U_m^I}{2 L_{q3}^I} \cos(\omega t + \alpha_l^I + \varphi - \varphi_q^{II}) + \frac{1}{T_{1q}^{II}} I_d^I - \frac{1}{T_{2q}^{II}} I_q^I + \frac{1}{T_{3q}^{II}} I_d^{II} + \frac{1}{T_{4q}^{II}} I_q^{II} + \int (\omega_{3q}^2 I_d^{II} - \omega_{4q}^2 I_q^{II}) dt \right] dt + I_q^{II}(0), \quad (122)$$

სადაც (119) – (122) განტოლებებში ექვივალენტური ინდუქციურობები - სათვის, კუთხეებისათვის, დროის მუდმივებისათვის და ექვივალენტური კუთხური სიხშირეებისათვის, გვაქვს:

$$\begin{aligned} L_{d3}^I &= \Delta / (\sqrt{\delta_{11}^2 + \delta_{21}^2}), & L_{q3}^I &= \Delta / (\sqrt{\delta_{22}^2 + \delta_{12}^2}), & L_{d3}^{II} &= \Delta / (\sqrt{\delta_{13}^2 + \delta_{23}^2}), & L_{q3}^{II} &= \Delta / (\sqrt{\delta_{14}^2 + \delta_{24}^2}), \\ \varphi_d^I &= \arctg(\delta_{21} / \delta_{11}), & \varphi_q^I &= \arctg(\delta_{12} / \delta_{22}), & \varphi_d^{II} &= \arctg(\delta_{23} / \delta_{13}), & \varphi_q^{II} &= \arctg(\delta_{14} / \delta_{24}), \\ T_{1d}^I &= \Delta / R_d^I \delta_{11}, & T_{2d}^I &= \Delta / R_d^I \delta_{21}, & T_{3d}^I &= \Delta / (R_{q1}^I \delta_{41} - R_{d1}^I \delta_{31}), & T_{4d}^I &= \Delta / (R_{q2}^I \delta_{41} - R_{d2}^I \delta_{31}), \\ T_{1q}^I &= \Delta / R_d^I \delta_{12}, & T_{2q}^I &= \Delta / R_d^I \delta_{22}, & T_{3q}^I &= \Delta / (R_{d1}^I \delta_{32} - R_{q1}^I \delta_{42}), & T_{4q}^I &= \Delta / (R_d^I \delta_{32} - R_{q2}^I \delta_{42}), \\ T_{1d}^{II} &= \Delta / R_d^I \delta_{13}, & T_{2d}^{II} &= \Delta / R_d^I \delta_{23}, & T_{1q}^{II} &= \Delta / R_d^I \delta_{14}, & T_{3d}^{II} &= \Delta / (R_{q1}^I \delta_{43} - R_{d1}^I \delta_{33}), \\ T_{4d}^{II} &= \Delta / (R_{q2}^I \delta_{43} - R_{d2}^I \delta_{33}), & T_{2q}^{II} &= \Delta / R_d^I \delta_{24}, & T_{3q}^{II} &= \Delta / (R_{d1}^I \delta_{34} - R_{q1}^I \delta_{44}), & T_{4q}^{II} &= \Delta / (R_{d2}^I \delta_{34} - R_{q2}^I \delta_{44}), \\ \omega_{1d}^2 &= (\delta_{31} / C_{\beta d1} \Delta) - (\delta_{41} / C_{\beta q1} \Delta), & \omega_{2d}^2 &= (\delta_{31} / C_{\beta d2} \Delta) + (\delta_{41} / C_{\beta q2} \Delta), & \omega_{1q}^2 &= (\delta_{32} / C_{\beta d1} \Delta) - (\delta_{42} / C_{\beta q1} \Delta), \\ \omega_{2q}^2 &= (\delta_{32} / C_{\beta d2} \Delta) + (\delta_{42} / C_{\beta q2} \Delta), & \omega_{3d}^2 &= (\delta_{43} / C_{\beta q1} \Delta) - (\delta_{33} / C_{\beta d1} \Delta), & \omega_{4d}^2 &= (\delta_{43} / C_{\beta q2} \Delta) - (\delta_{33} / C_{\beta d2} \Delta), \\ \omega_{3q}^2 &= (\delta_{34} / C_{\beta d1} \Delta) - (\delta_{44} / C_{\beta q1} \Delta), & \omega_{4q}^2 &= (\delta_{34} / C_{\beta d2} \Delta) + (\delta_{44} / C_{\beta q2} \Delta). \end{aligned} \quad (123)$$

(123) გამოსახულებებში  $\Delta$ ,  $\delta_{mn}$  ( $m = 1, 2, 3, 4; n = 1, 2, 3, 4$ ) შესაბამისად დეტერმინანტი და ელემენტების მინორებია, მიღებული (117) სისტემის დეტერმინანტიდან "მ" სტრიქონის და "ნ" სვეტის წაშლისა და  $(-1)^{m+n}$  -ზე გამრავლებით.

(113) – (122) გამოსახულებებში  $I_d^I(0), I_q^I(0), I_d^{II}(0), I_q^{II}(0)$  დ,კ კოორდინატებში შესაბამისი რეზულტირებული დენების საწყისი მნიშვნელობებია თითოეული არასაკომუტაციო დროის ინტერვალებში:

$$t_{n-1} = (n-1) \frac{1}{\omega} \left( \frac{2\pi}{3} + \gamma \right).$$

(114)-(116)-დან წევის ტრანსფორმატორის ფაზური დენებისათვის და დატვირთვისათვის ვლემულობით  $d, q$  კოორდინატებში რეზულტირებული დენების მიმართ შემდეგ გამოსახულებებს:

$$\begin{aligned} i_k^I &= \frac{2}{3} \left\{ I_d^I \cos \left[ \alpha_1^I + (k-1) \frac{2\pi}{3} \right] + I_q^I \sin \left[ \alpha_1^I + (k-1) \frac{2\pi}{3} \right] \right\}, \\ i_3^II &= -\frac{2\sqrt{3}}{3} \sin(\alpha_1^I + 240^\circ) I_d^II + \frac{2\sqrt{3}}{3} \cos(\alpha_1^I + 240^\circ) I_q^II, \\ i_4^II &= \frac{2\sqrt{3}}{3} \sin \alpha_1^I I_d^II - \frac{2\sqrt{3}}{3} \cos \alpha_1^I I_q^II, \\ i &= \sqrt{3} \sin \alpha_1^I I_d^II - \sqrt{3} \cos \alpha_1^I I_q^II. \end{aligned} \tag{124}$$

გამოსაკვლევი გარდამქმნელი სისტემის პროგრამული ციფრული მოდელირებისათვის, აუცილებელია შედგეს გარდამავალი პროცესის მოდელის სტრუქტურული სქემა (119)-(122) გამოსახულების საფუძველზე. ამ შემთხვევაში გაითვალისწინება ცალკეული ელემენტარული მათემატიკური ოპერაციების მოდელირებადი ელემენტების ნაკრები ურთიერთშერწყმის პირობების შესრულების გათვალისწინებით.

უპირველეს ყოვლისა განვიხილოთ სტრუქტურული მოდელის ელემენტების ძირითადი თვისებები, რომლებიც გამოყენებულია წინამდებარე ნაშრომში. ელემენტების გამოსახვები შევსებულია შემავალი კოეფიციენტით, რაც ვირტუალურ მოდელს ხდის უფრო თვალსაჩინოს [7,30]:

ა) დროის მონაცემები,  $\Delta t$  - გარდამავალი პროცესის რიცხვითი მეთოდით გაანგარიშებისას დროის ინტერვალი,  $t_k$  - გაანგარიშების დამთავრების დროა.

$$\left[ \begin{array}{c|c} \Delta t & T \\ \hline t_k & \end{array} \right] \rightarrow 0 \leq t \leq t_k;$$

ბ) შემკრები,  $K_1$ ,  $K_2$  და  $K_3$  - მუდმივი კოეფიციენტებია,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  - შემავალი ცვლადებია

$$\begin{array}{l} X_1 \rightarrow \\ X_2 \rightarrow \\ X_3 \rightarrow \end{array} \left[ \begin{array}{c|c} K_1 & \\ \hline K_2 & \\ \hline K_3 & \end{array} \right] \Sigma \rightarrow Y = K_1 X_1 + K_2 X_2 + K_3 X_3$$

გ) სინუსოიდური ფუნქციის მაფორმირებელი,  $K$  - მუდმივი კოეფიციენტი,  $X$  - შემავალი ცვლადია.

$$X \rightarrow \left[ K \mid \sin \right] \rightarrow Y = \sin K \cdot X ;$$

დ) ცვლადი  $X$  - ის მუდმივი  $K$  კოეფიციენტზე გამამრავლებელი:

$$X \rightarrow \left[ K \mid G \right] \rightarrow Y = K \cdot X;$$

ე)  $K$  მუდმივის მოცემა, შესავალი ცვლადი არ არის

$$\left[ K \mid K \right] \rightarrow Y = K;$$

ვ) ინტეგრატორი,  $X$  - შესავალი ცვლადია,  $K$  - მუდმივი კოეფიციენტი და  $Y_0$  - საწყისი მნიშვნელობაა  $Y$  ფუნქციისა.

$$X \rightarrow \left[ \begin{array}{c|c} K & \\ \hline Y_0 & \int \end{array} \right] \rightarrow Y = K \int_0^t X dt + Y_0;$$

ზ) გაყოფის ელემენტი,  $K_1$  და  $K_2$  - მუდმივი კოეფიციენტებია,  $x_1$ , და  $x_2$  შესავალი ცვლადებია:

$$\begin{array}{l} X_1 \rightarrow \\ X_2 \rightarrow \end{array} \left[ \begin{array}{c|c} K_1 & \\ \hline K_2 & \end{array} \right] \rightarrow Y = \frac{K_1 X_1}{K_2 X_2};$$

თ) გამრავლების ელემენტი  $x_1$ , და  $x_2$  შესავალი ცვლადებია:

$$\begin{array}{l} X_1 \rightarrow \\ X_2 \rightarrow \end{array} \left[ \begin{array}{c|c} I & \\ \hline I & X \end{array} \right] \rightarrow Y = X_1 \cdot X_2.$$

(119)-(122)-ში ჩაწერის შემოკლების მიზნით სტრუქტურული სქემის აგებისას (ნახ.12) შემოვიღოთ შემდეგი აღნიშვნები:

$$\begin{aligned}
u_1 &= \frac{3 U_m^I}{2 L_{d3}^I}, \quad u_2 = \frac{3 U_m^I}{2 L_{q3}^I}, \quad u_3 = \frac{3 U_m^I}{2 L_{d3}^I}, \quad u_4 = \frac{3 U_m^I}{2 L_{q3}^I}, \quad i_1 = 1/T_{1d}^I, \quad i_2 = 1/T_{2d}^I, \quad i_3 = 1/T_{3d}^I, \\
i_4 &= 1/T_{4d}^I, \quad i_5 = 1/T_{1q}^I, \quad i_6 = 1/T_{2q}^I, \quad i_7 = 1/T_{3q}^I, \quad i_8 = 1/T_{4q}^I, \quad i_9 = 1/T_{1d}^I, \quad i_{10} = 1/T_{2d}^I, \\
i_{11} &= 1/T_{3d}^I, \quad i_{12} = 1/T_{4d}^I, \quad i_{13} = 1/T_{1q}^I, \quad i_{14} = 1/T_{2q}^I, \quad i_{15} = 1/T_{3q}^I, \quad i_{16} = 1/T_{4q}^I, \quad K_1 = I_d^I(0), \\
K_2 &= I_q^I(0), \quad K_3 = I_d^I(0), \quad K_4 = I_q^I(0), \quad P_1 = \omega_{1d}^2, \quad P_2 = \omega_{2d}^2, \quad P_3 = \omega_{1q}^2, \quad P_4 = \omega_{2q}^2, \\
P_5 &= \omega_{3d}^2, \quad P_6 = \omega_{4d}^2, \quad P_7 = \omega_{3q}^2, \quad P_8 = \omega_{4q}^2.
\end{aligned} \tag{125}$$

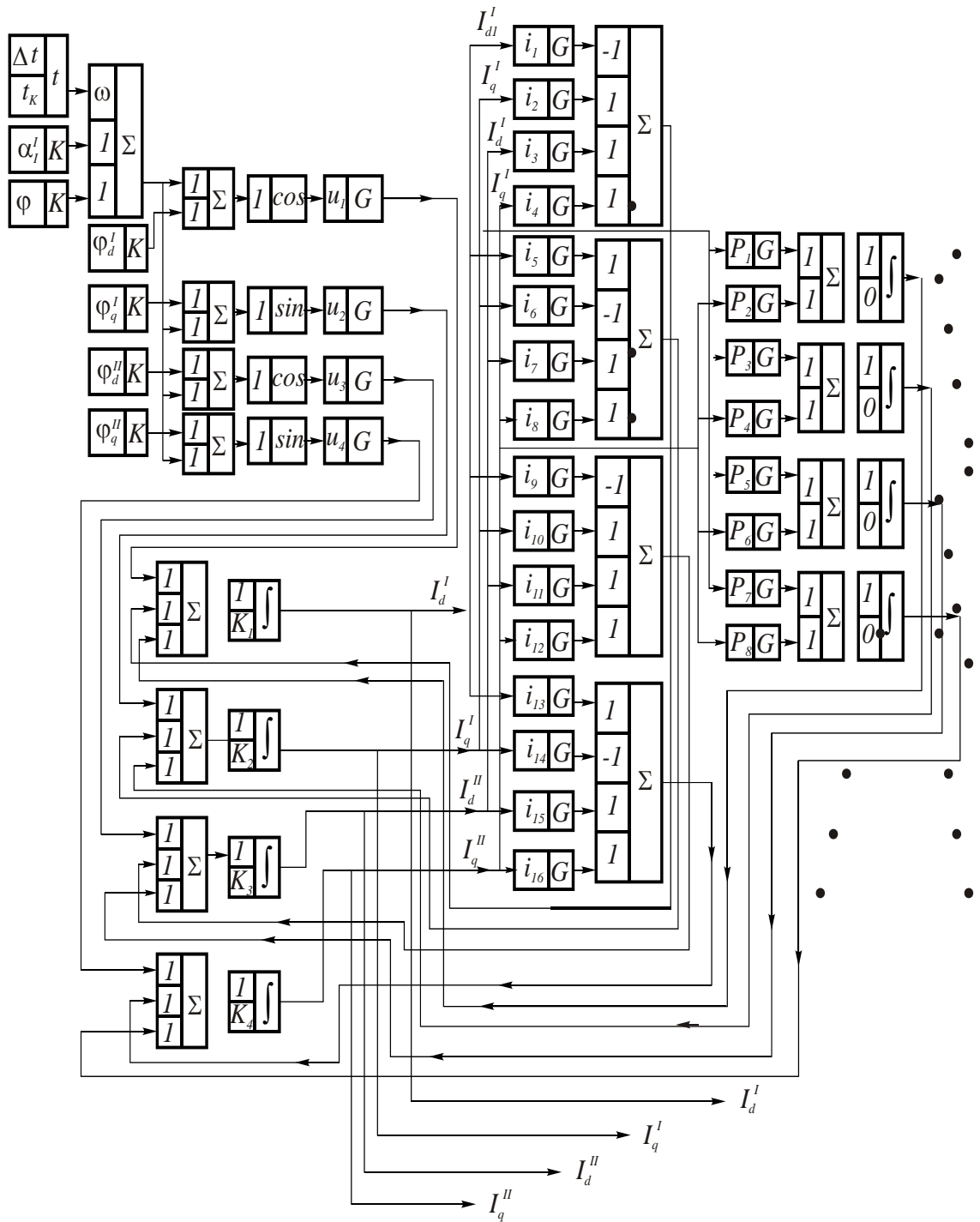
სტრუქტურული მოდელის ელემენტების თვისებებისა და (119)-(122)-ში (125)-ის გათვალისწინება საშუალებას გვაძლევს ავაგოთ წვეის ტრანსფორმატორის რეზულტირებული საგრანგილო დენების დროის ფუნქციაში ფორმირების ბლოკ-სქემა [ნახ.12]. ანალოგიური გზით (124)-ის საფუძველზე მივიღებთ წვეის ტრანსფორმატორისა და დატვირთვისათვის ფაზური დენების დროში ფორმირების ბლოკ-სქემას (ნახ.13).

ნახ.12 და ნახ. 13. ბლოკ-სქემის შეუღლებისას რეზულტირებული დენების "შესავალ-გამოსავალის" წერტილებში, მივიღებთ გარდამქმნელი სისტემის გარდამავალი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების სტრუქტურულ სქემას იმპულსური მართვით მუდმივი დენის ძრავის ძირითადი პარამეტრების გათვალისწინებით.

მიღებული სტრუქტურული მოდელის სქემა საშუალებას იძლევა გამოვიკვლიოთ და გავიანგარიშოთ ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესები სხვადასხვა მუშაობის რეჟიმებისათვის განზოგადოებულ არასაკომუტაციო და კომუტაციური დროის ინტერვალებისათვის

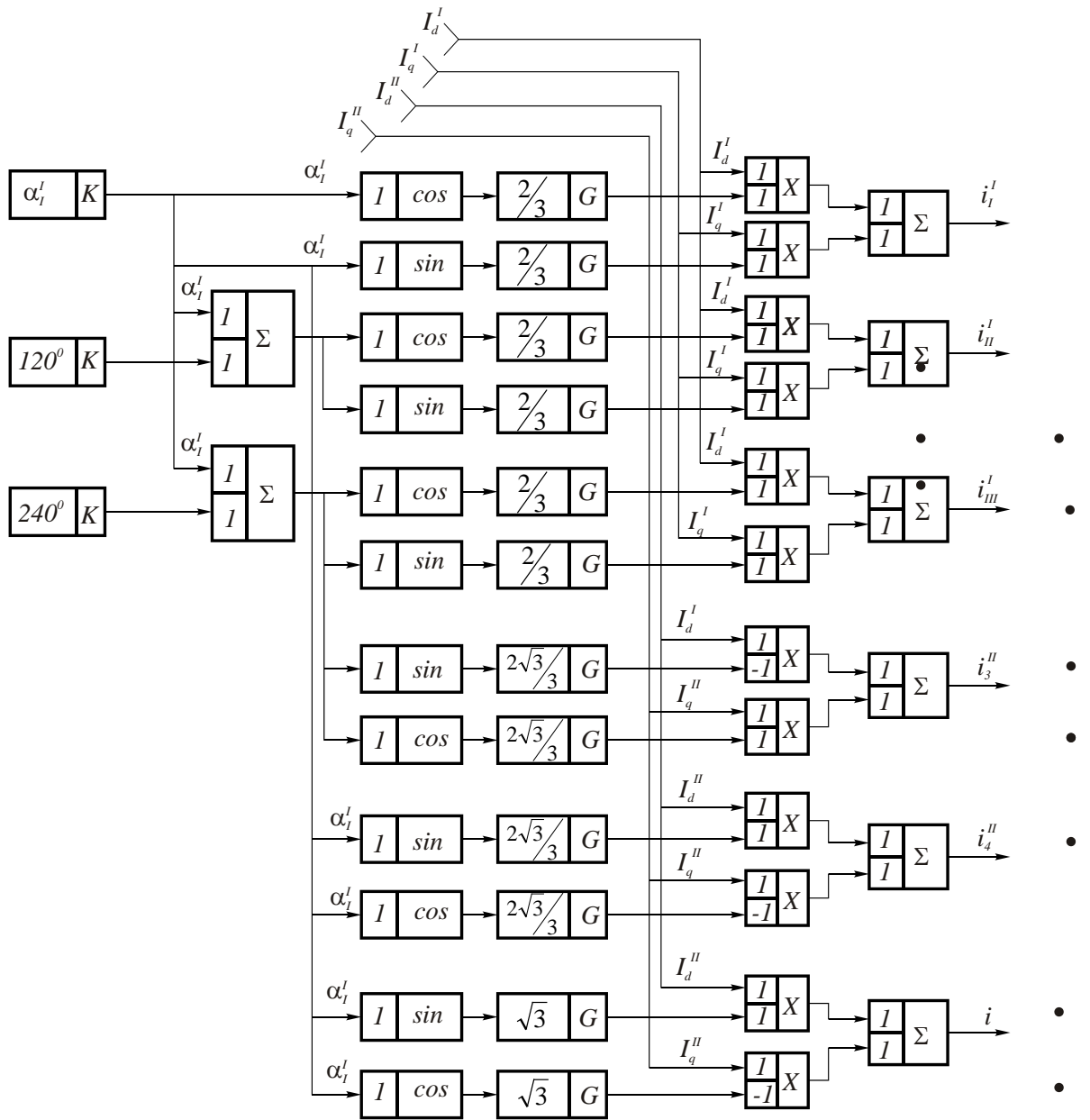
$$t_{n-1} = \frac{1}{\omega} (n-1) \left( \frac{2\pi}{3} + \gamma \right) \text{-დან}$$

$$t_n = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{2\pi}{3} + \gamma \right) - \gamma \right] \text{-მდე.}$$



ნახ.12. წვეის ტრანსფორმატორის რეზულტირებული საგრაგნილე დენების დროში ფორმირების ბლოკ-სქემა.





ნახ.13. წევის ტრანსფორმატორის და დატვირთვის ფაზური დენების მყისა მნიშვნელობების ფორმირების ბლოკ-სექმა:

#### 2.4. გარდამქმნელ სისტემაში კომპუტაციური პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება

განვიხილოთ გამმართველში მიმდინარე კომპუტაციური პროცესები, როცა წევის ტრანსფორმატორის მეორადი გრაგნილების პირველი

ვარსკვლავის ორ ფაზაში გადის დენები და ვითვალისწინებთ წევის ძრავის (დატვირთვის) ძირითად პარამეტრებს (ნახ.14).

მოცემული საანგარიშო სქემისათვის კომპუტაციურ პროცესებს განვიხილავთ განზოგადოებულ ინტერვალებში  $\omega t_n = n\left(\frac{2\pi}{3} + \gamma\right) - \gamma$  დან  $\omega t_{n+1} = n\left(\frac{2\pi}{3} + \gamma\right)$ ,  $n=1,2,3,\dots,\infty$  -მდე. აქ  $n$  - კომპუტაციური ინტერვალების ნომერია;  $\gamma$  - კომპუტაციის კუთხეა;

ორი ფაზის კომპუტაციისას აღმოჩნდება ეს ფაზები მოკლედ შერთულნი  $T_3$  და  $T_5$  ტირისტორების გავლით. ამ შემთხვევაში იარსებებს კომპუტაციის დენი, რომლის ამპლიტუდაც ტოლი იქნება  $I_{km} = \sqrt{6}U_{2\phi}''/(2x)$  სადაც  $X$  - ტირისტორის ანოდური წრედის ინდუქციური წინაღობაა. განხილულ შემთხვევაში  $i_k$  კომპუტაციის დენი წარმოიშობა ემძალების სხვაობის  $u_5'' - u_3'' = \sqrt{6}U_{2\phi}'' \sin \omega t$ . მოქმედებით. ის ამცირებს  $i_3''$  დატვირთვის დენს ნულამდე მუშა ფაზაში და ზრდის დატვირთვის  $i_5''$  დენს 0,5  $i$  სიდიდემდე მუშაობაში შემდგარი ფაზაში. კომპუტაცია გრძელდება  $t=\gamma/\omega$  დროის განმავლობაში. ამ დროს  $i_3''$  მიაღწევს ნულს, ხოლო  $i_5''$  მიაღწევს 0,5  $i$  სიდიდეს. ინდუქციურობის გაზრდით მცირდება კომპუტაციის დენის ამპლიტუდა და იზრდება კომპუტაციის კუთხე (ნახ.15):  $\cos \gamma \approx 1 - I \cdot x / (\sqrt{6}U_{2\phi}'')$ , სადაც  $I$  - გამართული  $i$  დენის საშუალო მნიშვნელობაა,  $U_{2\phi}''$  - ვენტილური გრაგნილის ფაზური ძაბვაა [3,33].

დენების კომპუტაციის დამთავრების მომენტში მუშაობაში რჩება ორი  $T_5$  და  $T_4$  ტირისტორი და გარდამქმნელის გამოსავალზე ძაბვა მყისიერად იზრდება ფაზური ძაბვების ნახევარჯამამდე. დენის კომპუტაციის გამო გამოწვეული გამართული ძაბვის დანაკარგები ტოლია.

$$\Delta u_H = 1 / \frac{2\pi}{3} \int_{t_n}^{t_{n+1}} \frac{\sqrt{6}}{2} U_{2\phi}'' \sin \omega t d\omega t.$$

ექვივალენტური აქტიური წინაღობა ზემოქმედებს კომუტაციის  $\gamma$  კუთხეზე იმის შედეგად, რომ იზრდება სრული წინაღობა და მცირდება კომუტაციის დენის ამპლიტუდა, აგრეთვე იცვლება მუშაობაში შესაყვანი ვენტილების მუშაობის მომენტი. მუშა ტირისტორების ჯგუფის ფაზური ძაბვის შემცირების გამო  $0,5 I \cdot R''$  სიდიდით, იცვლება მუშაობაში შესაყვანი შემდგომი ტირისტორების ჯგუფის მუშაობაში დაწყების მომენტი  $\Delta_0$  კუთხით (ნახ. 15,ბ).

ეს კუთხე შეიძლება ვიპოვოთ შემდეგი გამოსახულებიდან [8, 33]

$$\sqrt{2}U''_{2\phi} \sin\left(\frac{\pi}{6} - \Delta_0\right) = \sqrt{2}U''_{2\phi} \sin\left(\frac{\pi}{6} + \Delta_0\right) - 0,5I \cdot R'',$$

$$\text{საიდანაც } \sin \Delta_0 = 0,5IR'' / (\sqrt{6}U''_{2\phi})$$

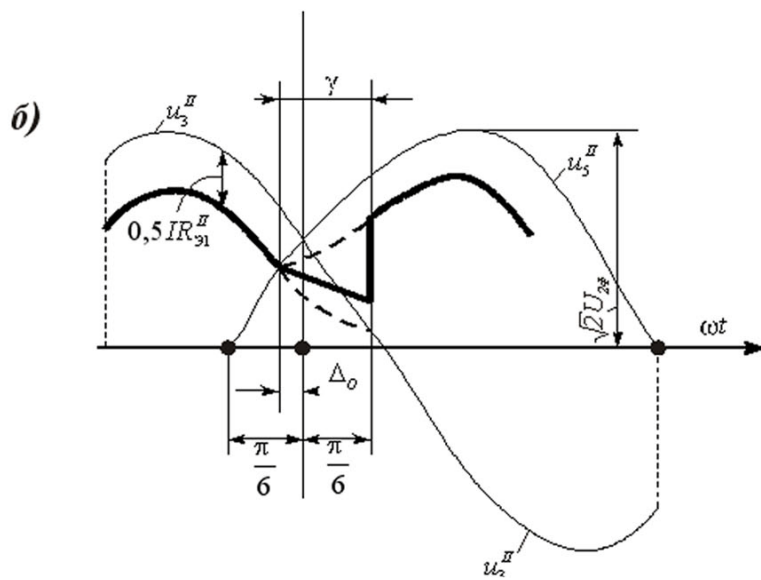
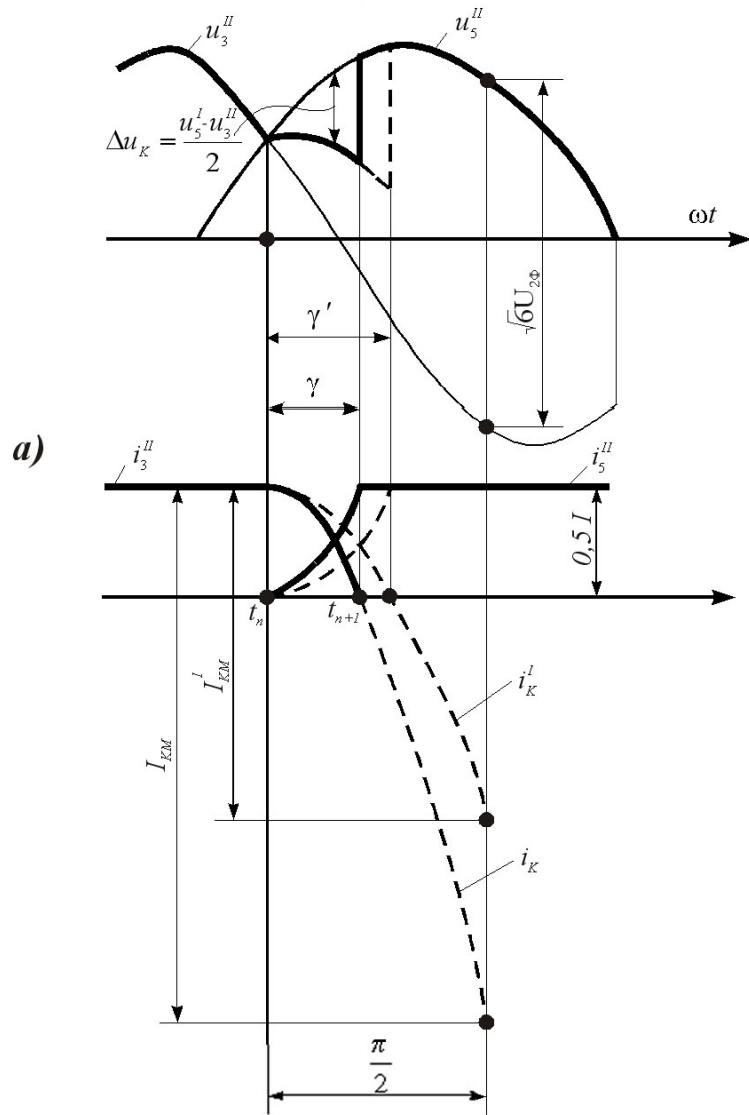
ყოველივე ამის გათვალისწინებით  $\gamma$  - კომუტაციის კუთხე განისაზღვრება განტოლებიდან:

$$\frac{I}{4}(1 - e^{-R''\gamma/\omega L''_s}) = \frac{\sqrt{6}U''_{2\phi}}{2Z} \left[ \sin\left(\Delta_0 + \arctg(\omega L''_s/R'')e^{-R''\gamma/\omega L''_s}\right) - \sin\left(\Delta_0 + \arctg \frac{\omega L''_s}{R''} - \gamma\right) \right]$$

მცირე  $R''$  წინააღობის შემთხვევაში კომუტაციის დენის ამპლიტუდა და  $\gamma$  - კუთხე განისაზღვრება გამოსახულებით:  $I_{km} = \sqrt{6}U''_{2\phi}/(2Z)$  და  $\cos \gamma \approx 1 - IZ/(\sqrt{6}U''_{2\phi})$ , სადაც  $Z = \sqrt{(R''_s)^2 + (\omega L''_s)^2}$

$T_3$  ტირისტორის ანოდსა და გამმართველის კათოდს შორის წარმოიშვება უკუ ძაბვა, რომელსაც აქვს უკუ პოლარობა და ტოლია არამუშა და მუშა ტირისტორების ანოდებს შორის ძაბვათა სხვაობისა. კომუტაციის დამთავრების მომენტში მუშაობის დამამთავრებელ ვენტელზე ჩნდება უკუ ძაბვის ნახტომი:  $\Delta u_{\text{opp}} = \sqrt{6}U''_{2\phi} \sin \gamma$  ამპლიტუდა უკუძაბვისა ტოლია ფაზებს შორის ძაბვის ამპლიტუდისა  $\sqrt{6}U''_{2\phi}$ . უკუ ძაბვის ფორმაზე გავლენას ახდენს ორთავე ვარსკვლავის ტირისტორებს შორის დენების კომუტაცია.





ნახ.15. ძაბვები და დენები დენების კომუტაციისას.

წევის ტრანსფორმატორის პირველადი და მეორადი გრაგნილების ელექტრული წონასწორობის განტოლებებს ფაზური ცვლადების მყისა მნიშვნელობების მიმართ აქვთ სახე:

$$\begin{aligned}
 u_K^I &= U_{\max}^I \sin \left[ \omega t + \varphi + (K-1) \frac{2\Pi}{3} \right], \quad u_K^I = i_K^I R^I + \frac{d\Psi_K^I}{dt}, \quad K=I, II, III; \\
 0 &= i_3^{II} R_{\mathcal{O}1}^{II} + i_5^{II} R_{yp}^{II} + iR_{\mathcal{O}}^{II} + L_{\mathcal{O}}^{II} \frac{di}{dt} + L_{yp} \left( \frac{di_3^{II}}{dt} + \frac{di_5^{II}}{dt} \right) + \frac{1}{C_{\mathcal{R}}^{II}} \int idt + \frac{d\Psi_3^{II}}{dt}, \\
 0 &= i_3^{II} R_{yp}^{II} + i_5^{II} R_{\mathcal{O}1}^{II} + iR_{\mathcal{O}}^{II} + L_{\mathcal{O}}^{II} \frac{di}{dt} + L_{yp} \left( \frac{di_3^{II}}{dt} + \frac{di_5^{II}}{dt} \right) + \frac{1}{C_{\mathcal{R}}^{II}} \int idt + \frac{d\Psi_5^{II}}{dt}, \\
 0 &= i_4^{II} R_{\mathcal{O}1}^{II} + L_{yp} \frac{di_4^{II}}{dt} + iR_{\mathcal{O}}^{II} + L_{\mathcal{O}}^{II} \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_{\mathcal{R}}^{II}} \int idt + \frac{d\Psi_4^{II}}{dt}, \\
 0 &= i - i_3^{II} - i_5^{II} - i_4^{II}, \quad i_{yp} = i_3^{II} + i_5^{II}.
 \end{aligned} \tag{126}$$

$\Psi_K^I, \Psi_n^{II}, K=I, II, III, n=3,4,5$ , ნაკადუმბების მყისა მნიშვნელობები განისაზღვრებიან როგორც  $i_K^I$  და  $i_n^{II}$  დენების ნაკადუმბების ვექტორების გეგმილების ჯამი განსახილველი ფაზების მაგნიტურ ღერძებზე [6,33]:

$$\Psi_K^I = L_S^I i_K^I + \sum_{\substack{m=I \\ m \neq 4}}^{III} M^I i_m^I \cos(\alpha_m^I - \alpha_K^I) + \sum_{\substack{n=3 \\ n \neq 4}}^5 M^{12} i_n^{II} \cos(\alpha_n^{II} - \alpha_K^I) + M^{13} i_4^{II} \cos(\alpha_4^{II} - \alpha_K^I),$$

$$\Psi_{Ko}^I = L_S^I i_{Ko}^I + \sum_{\substack{n=3 \\ n \neq 4}}^5 M^{II} i_n^{II} \cos(\alpha_n^{II} - \alpha_{Ko}^{II}) + M^{23} i_4^{II} \cos(\alpha_4^{II} - \alpha_{Ko}^{II}) + \sum_{m=1}^3 M^{21} i_m^I \cos(\alpha_m^I - \alpha_{Ko}^{II})$$

$$\Psi_4^{II} = L_S^{II} i_4^{II} + M^{II} i_4^{II} \cos(\alpha_4^{II} - \alpha_4^{II}) + \sum_{\substack{n=3 \\ n \neq 4}}^5 M^{23} i_n^{II} \cos(\alpha_n^{II} - \alpha_4^{II}) + \sum_{m=1}^{III} M^I i_m^I \cos(\alpha_m^I - \alpha_4^{II})$$

$$K=I, II, III; \quad Ko=3,5; \tag{127}$$

$$C_{\mathcal{R}}^{II} = \frac{J}{K_1^2 \Phi^2} \quad - \text{ წარმოადგენს წევის ძრავის სიჩქარის გარდამავალი}$$

პროცესისას ძრავის ღუზის ექვივალენტურ ტევადობას [14, 33];  $J$  - მბრუნავი ნაწილების ინერციის მომენტი;  $\Phi$  - ღუზის მაგნიტური ნაკადია;

$$K_1 = \frac{PN}{a \cdot 2\pi}; \quad 2p - \text{ წვეილპოლუსთა რიცხვია, } 2a - \text{ პოლარული შტოთა}$$

რიცხვია;  $N$  - ღუზის გრაგნილების ღეროების საერთო რიცხვია. ძრავის

ფოლადში გრიგალური დენების მოქმედების გამო მაგნიტური ნაკადი შეიძლება ჩაითვალოს მუდმივ სიდიდედ [33].

$$R_{\vartheta 1}'' = R'' + R_{yp}, \quad R_{\vartheta}'' = R_{\phi} + R_H + R_{OB} + R_P + R_{\mathcal{A}}; \quad L_{\vartheta}'' = L_{\phi} + L_H + L_{OB} + L_P.$$

(126), (127)-ში ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის საფუძველზე ვღებულობთ რეზულტირებული საგრანგილო კომპლექსური სიდიდეების მიმართ შემდეგ განტოლებათა სისტემას [33].

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} U_{\max}^I e^{j(\omega t + \varphi + \alpha'_i)} &= R^I \dot{I}^I + \frac{d\Psi^I}{dt}, \\ 0 &= (R_{\vartheta}'' + R_{\vartheta 1}'') \dot{I}_1'' + (R_{\vartheta}'' + R_{yp}) e^{j2(\alpha'_i + 60^\circ)} I_1^{*II} - R_{\vartheta}'' \dot{I}_2'' + (L_{\vartheta}'' + L_{yp}) \frac{d\dot{I}_1''}{dt} + (L_{\vartheta}'' + L_{yp}) e^{j2(\alpha'_i + 60^\circ)} \frac{d I_1^{*II}}{dt} - \\ &\quad - L_{\vartheta}'' \frac{d\dot{I}_2''}{dt} + \frac{1}{C_{\mathcal{A}}''} \int \dot{I}_1'' dt + \frac{1}{C_{\mathcal{A}}''} e^{j2(\alpha'_i + 60^\circ)} \int I_1^{*II} dt - \frac{1}{C_{\mathcal{A}}''} \int \dot{I}_2'' dt + \frac{d\Psi_1''}{dt}, \\ 0 &= (R_{\vartheta}'' + R_{\vartheta 1}'') \dot{I}_2'' - R_{\vartheta}'' \left[ \dot{I}_1'' - I_1^{*II} e^{j2(\alpha'_i + 150^\circ)} \right] - L_{\vartheta}'' \frac{d}{dt} \left[ \dot{I}_1'' - I_1^{*II} e^{j2(\alpha'_i + 150^\circ)} \right] + (L_{\vartheta}'' + L_{yp}) \frac{d\dot{I}_1''}{dt} - \\ &\quad - \frac{1}{C_{\mathcal{A}}''} \int \left[ \dot{I}_1'' - I_1^{*II} e^{j2(\alpha'_i + 150^\circ)} \right] dt + \frac{1}{C_{\mathcal{A}}''} \int \dot{I}_1'' dt - \frac{d\Psi_2''}{dt}, \end{aligned} \quad (128)$$

(128)-ში რეზულტირებული კომპლექსური ნაკადუმბმებისათვის გვაქვს:

$$\begin{aligned} \Psi^I &= \left( L_S^I + \frac{3}{2} M^I \right) \dot{I}^I + \frac{3}{2} M^{12} \dot{I}_1'' + \frac{3}{2} M^{13} \dot{I}_2'', \\ \Psi_1'' &= M^{21} \dot{I}^I - \frac{1}{2} M^{21} e^{j2(\alpha'_i + 60^\circ)} I^I + \left( L_S'' + \frac{3}{2} M'' \right) \dot{I}_1'' + \frac{1}{2} M'' e^{j2\alpha'_i} I_1^{*II} + M^{23} \dot{I}_2'' - \frac{1}{2} M^{23} e^{j2(\alpha'_i + 60^\circ)} I_2^{*II} \\ \Psi_2'' &= \frac{1}{2} M^{13} \dot{I}^I - \frac{1}{2} M^{13} e^{j2(\alpha'_i + 60^\circ)} I^I + \frac{1}{2} M^{23} \dot{I}_1'' + (L_S'' + M'') \dot{I}_2'' - \frac{1}{2} M^{23} e^{j2(\alpha'_i + 60^\circ)} I_1^{*II}. \end{aligned} \quad (129)$$

(128), (129) განტოლებებში რეზულტირებული კომპლექსური და მათი შეუღლებული დენების და ნაკადუმბმებისათვის გვაქვს:

$$\begin{aligned} \dot{I}^I &= \sum_{K=1}^{\text{III}} \dot{i}_K^I e^{j\alpha'_K}, & \dot{I}_1'' &= \sum_{K=3}^5 \dot{i}_K'' e^{j\alpha''_K}; & \dot{I}_2'' &= \dot{i}_4'' e^{j(\alpha'_i + 240^\circ)}, \\ \Psi^I &= \sum_{K=1}^{\text{III}} \dot{i}_K^I e^{-j\alpha'_K}, & \Psi_1'' &= \sum_{\substack{K=3 \\ K \neq 4}}^5 \Psi_K'' e^{j\alpha''_K}, & \Psi_2'' &= \Psi_4'' e^{j(\alpha'_i + 240^\circ)}, \\ \dot{I}^I &= \sum_{K=1}^{\text{III}} \dot{i}_K^I e^{-j\alpha'_K}, & \dots &, & \Psi_2'' &= \Psi_4'' e^{-j(\alpha'_i + 240^\circ)} \end{aligned} \quad (130)$$

ცვლადთა უკუგარდაქმნის მატრიცების გამოყენების საფუძველზე [6] დატვირთვისა და ფაზური დენების მყისა მნიშვნელობებისათვის გვაქვს [33]:

$$\begin{aligned}
 i_K^I &= \frac{1}{3} \left( \dot{I}^I e^{-j\alpha_K^I} + \dot{I}^{*I} e^{j\alpha_K^I} \right), \quad K = I, II, III; \\
 i_m^II &= \frac{\sqrt{3}}{3} \left\{ \dot{I}^{II} e^{-j[\alpha_i^I + (m-2)30^\circ]} + \dot{I}^{*II} e^{j[\alpha_i^I + (m-2)30^\circ]} \right\}, \quad m = 3, 5; \\
 i_4^I &= \dot{I}_2^{II} e^{-j(\alpha_i^I + 240^\circ)}. \\
 i_{yp} &= i_3^II + i_5^II = \dot{I}_1^{II} e^{-j(\alpha_i^I + 60^\circ)} + \dot{I}_1^{*II} e^{j(\alpha_i^I + 60^\circ)}, \\
 i &= i_4^I + i_{yp} = \dot{I}_1^{II} e^{-j(\alpha_i^I + 60^\circ)} + \dot{I}_1^{*II} e^{j(\alpha_i^I + 60^\circ)} - \dot{I}_2^{II} e^{-j(\alpha_i^I + 60^\circ)}. \tag{131}
 \end{aligned}$$

(128), (129)-დან არ არის ძნელი მივიღოთ ნორმალური დიფერენციალური განტოლებები რეზულტირებული სიდიდეების  $d, q$  მდგენელების მიმართ:

$$\begin{aligned}
 & \left[ \begin{array}{c} \frac{3}{2} U_{\max}^I \cos(\omega t + \varphi + \alpha_1^I) - R^I I_d^I \\ \frac{3}{2} U_{\max}^I \sin(\omega t + \varphi + \alpha_1^I) - R^I I_q^I \\ - R_{1d1}^{II} I_{1d}^{II} - R_{1d2}^{II} I_{1q}^{II} + R_{1d3}^{II} I_{2d}^{II} - \frac{1}{C_{1q1}^{II}} \int I_{1d}^{II} dt - \frac{1}{C_{1d2}^{II}} \int I_{1q}^{II} dt + \frac{1}{C_{1d3}^{II}} \int I_{2d}^{II} dt \\ - R_{1q1}^{II} I_{1d}^{II} - R_{1q2}^{II} I_{1q}^{II} + R_{1q3}^{II} I_{2d}^{II} - \frac{1}{C_{1q1}^{II}} \int I_{1d}^{II} dt - \frac{1}{C_{1q2}^{II}} \int I_{1q}^{II} dt + \frac{1}{C_{1q3}^{II}} \int I_{2q}^{II} dt \\ - R_{2d1}^{II} I_{1d}^{II} - R_{2d2}^{II} I_{1q}^{II} - R_{2d3}^{II} I_{2d}^{II} + \frac{1}{C_{2d1}^{II}} \int I_{1d}^{II} dt - \frac{1}{C_{2d2}^{II}} \int I_{1q}^{II} dt - \frac{1}{C_{2d3}^{II}} \int I_{2d}^{II} dt \\ - R_{2q1}^{II} I_{1d}^{II} + R_{2q2}^{II} I_{1q}^{II} - R_{2q3}^{II} I_{2q}^{II} - \frac{1}{C_{2q1}^{II}} \int I_{1d}^{II} dt + \frac{1}{C_{2q2}^{II}} \int I_{1q}^{II} dt - \frac{1}{C_{2q3}^{II}} \int I_{2q}^{II} dt \end{array} \right] = \\
 & \left[ \begin{array}{cccccc} L_d^I & 0 & M_d^{12} & 0 & M_d^{13} & 0 \\ 0 & L_d^I & 0 & M_d^{12} & 0 & M_d^{13} \\ M_{1d1}^{II} & -M_{1d2}^{II} & L_{1d2}^{II} & L_{1d3}^{II} & -L_{1d4}^{II} & -M_{1d3}^{II} \\ -M_{1q1}^{II} & M_{1q2}^{II} & L_{1q1}^{II} & L_{1q2}^{II} & -M_{1q3}^{II} & -L_{1q3}^{II} \\ M_{2d1}^{II} & M_{2d2}^{II} & L_{2d1}^{II} & L_{2d2}^{II} & L_{2d3}^{II} & 0 \\ M_{2q1}^{II} & M_{2q2}^{II} & L_{2q1}^{II} & L_{2q2}^{II} & 0 & L_{2q3}^{II} \end{array} \right] \cdot \left[ \begin{array}{c} dI_d^I/dt \\ dI_q^I/dt \\ dI_{1d}^{II}/dt \\ dI_{1q}^{II}/dt \\ dI_{2d}^{II}/dt \\ dI_{2q}^{II}/dt \end{array} \right]. \tag{132}
 \end{aligned}$$

(132)-ში ექვივალენტური პარამეტრებისათვის გვაქვს:

$$\begin{aligned}
 R_{\mathcal{G}}^{II} &= R_{1d3}^{II} = R_{1q3}^{II}, \quad R_{1d1}^{II} = R_{\mathcal{G}}^{II} + R_{\mathcal{G}1}^{II} + (R_{\mathcal{G}}^{II} + R_{yp}^{II}) \cos 2(\alpha_i^I + 60^\circ), \\
 R_{1d2}^{II} &= R_{1q1}^{II} = (R_{\mathcal{G}}^{II} + R_{yp}^{II}) \sin 2(\alpha_i^I + 60^\circ); \quad R_{1q2}^{II} = R_{\mathcal{G}}^{II} + R_{\mathcal{G}1}^{II} - (R_{\mathcal{G}}^{II} + R_{yp}^{II}) \cos 2(\alpha_i^I + 60^\circ); \\
 R_{2d1}^{II} &= R_{\mathcal{G}}^{II} [1 - \cos 2(\alpha_i^I - 30^\circ)], \quad R_{2d2}^{II} = R_{2q1}^{II} = R_{\mathcal{G}}^{II} \sin 2(\alpha_i^I - 30^\circ), \tag{133}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
R_{2d3}'' &= R_{2q3}'' = R_{\mathfrak{S}}'' + R_{\mathfrak{S}1}'' , \quad R_{2q2}'' = R_{\mathfrak{S}}'' [1 + \cos 2(\alpha'_i - 30^\circ)] ; \\
\frac{1}{C_{1d1}''} &= \frac{1}{C_{\mathfrak{R}}''} [1 + \cos 2(\alpha'_i + 60^\circ)] , \quad \frac{1}{C_{1d2}''} = \frac{1}{C_{1q1}''} = \frac{1}{C_{\mathfrak{S}}''} \cos 2(\alpha'_i - 30^\circ) ; \\
\frac{1}{C_{1q2}''} &= \frac{1}{C_{\mathfrak{R}}''} [1 - \cos 2(\alpha'_i + 60^\circ)] , \quad \frac{1}{C_{2d1}''} = \frac{1}{C_{\mathfrak{R}}''} [1 - \cos 2(\alpha'_i - 30^\circ)] , \\
\frac{1}{C_{2d2}''} &= \frac{1}{C_{2q1}''} = \frac{1}{C_{\mathfrak{R}}''} \sin 2(\alpha'_i - 30^\circ) , \quad \frac{1}{C_{2q2}''} = \frac{1}{C_{\mathfrak{R}}''} [1 + \cos 2(\alpha'_i - 30^\circ)] , \tag{134}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_{1d3}'' &= C_{1q3}'' = C_{2d3}'' = C_{2q3}'' = C_{\mathfrak{R}}'' ; \\
L_d' &= L_s' + \frac{3}{2} M' , \quad L_{1d2}'' = L_s'' + \frac{3}{2} M'' + L_{yp} + L_{\mathfrak{S}}'' + L_{1d1}'' \cos 2(\alpha'_i + \varphi_{1d1}'') , \\
L_{1d1}'' &= \left[ \frac{1}{4} (M'' - L_{yp} - L_{\mathfrak{S}}'')^2 + \frac{3}{4} (L_{yp} + L_{\mathfrak{S}}'')^2 \right]^{1/2} , \\
\varphi_{1d1}'' &= \arctg \left[ \sqrt{3} / \left( \frac{M''}{L_{yp} + L_{\mathfrak{S}}''} - 1 \right) \right] , \quad L_{1d3}'' = L_{1q1}'' = L_{1d1}'' \sin(2\alpha'_i + \varphi_{1d1}'') , \\
L_{1d4}'' &= -L_{\mathfrak{S}}'' + M^{23} \left[ 1 + \frac{1}{2} \cos 2(\alpha'_i + 60^\circ) \right] , \\
L_{1q2}'' &= L_s'' + \frac{3}{2} M'' + L_{yp} + L_{\mathfrak{S}}'' - L_{1d1}'' \cos(2\alpha'_i + \varphi_{1d1}'') , \\
L_{1q3}'' &= -L_{\mathfrak{S}}'' + M^{23} \left[ 1 - \frac{1}{2} \cos 2(\alpha'_i + 60^\circ) \right] , \\
L_{2d1}'' &= \frac{1}{2} M^{23} - L_{\mathfrak{S}}'' + \left( L_{\mathfrak{S}}'' + \frac{1}{2} M^{23} \right) \cos 2(\alpha'_i - 30^\circ) , \\
L_{2d2}'' &= L_{2q1}'' = \left( L_{\mathfrak{S}}'' - \frac{1}{2} M^{23} \right) \sin 2(\alpha'_i - 30^\circ) , \quad L_{2d3}'' = L_{2q3}'' = L_{\mathfrak{S}}'' + L_{yp} + L_s'' + M'' , \tag{135} \\
L_{2q2}'' &= \left( \frac{1}{2} M^{23} - L_{\mathfrak{S}}'' \right) [1 + \cos 2(\alpha'_i - 30^\circ)] ; \\
M_d^{12} &= \frac{3}{2} M^{12} , \quad M_d^{13} = \frac{3}{2} M^{13} , \quad M_{1d1}'' = M^{12} \left[ 1 - \frac{1}{2} \cos 2(\alpha'_i + 60^\circ) \right] , \\
M_{1d2}'' &= M_{1q1}'' = \frac{1}{2} M^{21} \sin 2(\alpha'_i + 60^\circ) , \quad M_{1d3}'' = M_{1q3}'' = \frac{1}{2} M^{23} \sin 2(\alpha'_i + 60^\circ) , \\
M_{1q2}'' &= M^{21} \left[ 1 + \frac{1}{2} \cos 2(\alpha'_i + 60^\circ) \right] , \quad M_{2d1}'' = \frac{1}{2} M^{13} [1 + \cos 2(\alpha'_i + 60^\circ)] , \\
M_{2d2}'' &= M_{2q1}'' = \frac{1}{3} M^{13} \sin 2(\alpha'_i + 60^\circ) , \quad M_{2q2}'' = \frac{1}{2} M^{13} [1 - \cos 2(\alpha'_i + 60^\circ)] . \tag{136}
\end{aligned}$$

(132) განტოლებათა სისტემა ამოვხსნათ დენების წარმოებულების მიმართ და მხოლოდ ამის შემდეგ გარდავქმნათ შემდეგ ინტეგრალურ სახეში, სამართლიანი განზოგადოებული კომპუტაციური ინტერვალებში  $t_n$ -დან  $t_{n+1}$ -მდე, ( $n=1, 2, 3, \dots, \infty$ ):

$$I_{\lambda}^I = \int_{t_n}^{t_{n+1}} \left[ \frac{3U_{\max}^I}{2L_{n\lambda}^I} \cos(\omega t + \alpha_I^I + \varphi + \varphi_{\lambda}^I) + \sum_{K=1}^6 \frac{I_K}{T_{nK\lambda}^I} + \sum_{m=1}^4 \omega_{m\lambda}^2 \int I_{m+2} dt \right] dt + I_{\lambda}^I(0), \quad (137)$$

$$I_{n\lambda}^{II} = \int_{t_n}^{t_{n+1}} \left[ \frac{3U_{\max}^{II}}{2L_{n\lambda}^{II}} \cos(\omega t + \alpha_I^{II} + \varphi + \varphi_{n\lambda}^{II}) + \sum_{K=1}^6 \frac{I_K}{T_{nK\lambda}^{II}} + \sum_{m=1}^4 \omega_{n\lambda m}^2 \int I_{m+2} dt \right] dt + I_{n\lambda}^{II}(0), \quad (138)$$

$$\lambda = d, q; \quad n = 1, 2; \quad I_1 = I_d^I, \quad I_2 = I_q^I, \quad I_3 = I_{1d}^{II}, \quad I_4 = I_{1q}^{II}, \quad I_5 = I_{2d}^{II}, \quad I_6 = I_{2q}^{II}. \quad (139)$$

(137), (139) გამოსახულებებში ექვივალენტური კოეფიციენტები და კუთხეები  $L_{\lambda\vartheta}^I, L_{n\lambda\vartheta}^{II}, T_{K\lambda}^I, T_{n\lambda K}^{II}, \omega_{m\lambda}^2, \omega_{n\lambda m}^2, \varphi_{\lambda}^I, \varphi_{n\lambda}^{II}$  ( $\lambda=d, q; n=1, 2; K=1, 2, 3, \dots, 6; m=1, 2, 3, 4$ ) განისაზღვრებიან (133) –(136) ექვივალენტური პარამეტრების,  $\Delta$  დეტერმინანტის და (132) სისტემის დეტერმინანტიდან ”მ” სტრიქონისა ”ნ” სვეტის წაშლის შედეგად მიღებული  $\delta_{mn}$ , მინორის, გამრავლებულს  $(-1)^{m+n}$  -ზე, მიხედვით;  $I_{\lambda}^I(0), I_{n\lambda}^{II}(0)$  - d,q კოორდინატებში შესაბამისი რეზულტირებული დენების საწყისი მნიშვნელობებია არასაკომუტაციო ინტერვალების ბოლოში, ან კომუტაციური ინტერვალების დასაწყისში.

(131)-ის საფუძველზე ვღებულობთ ფაზური დენების, დატვირთვის დენების და გამათანაბრებელი ორფაზა რეაქტორის დენების გამოსახულებებს d,q კოორდინატებში.

$$\begin{aligned} i_1^I &= \frac{2}{3}(I_d^I \cos \alpha_I^I + I_q^I \sin \alpha_I^I); \quad i_1^{II} = -\frac{2}{3}I_d^I \sin(\alpha_I^I + 30^\circ) + \frac{2}{3}I_q^I \cos(\alpha_I^I + 30^\circ); \\ i_3^{II} &= -\frac{2}{3}I_d^I \cos(\alpha_I^I + 60^\circ) - \frac{2}{3}I_q^I \sin(\alpha_I^I + 60^\circ); \\ i_3^{II} &= \frac{2}{3}\sqrt{3}[I_{1d}^{II} \cos(\alpha_I^I + 30^\circ) + I_{1q}^{II} \sin(\alpha_I^I + 30^\circ)]; \\ i_5^{II} &= -\frac{2}{3}\sqrt{3}[I_{1d}^{II} \sin \alpha_I^I - I_{1q}^{II} \cos \alpha_I^I]; \quad i_4^{II} = -I_{2d}^{II} \cos(\alpha_I^I + 60^\circ) - I_{2q}^{II} \sin(\alpha_I^I + 60^\circ); \\ i_{yp} &= 2I_{1d}^{II} \cos(\alpha_I^I + 60^\circ) + 2I_{1q}^{II} \sin(\alpha_I^I + 60^\circ); \\ i &= (2I_{1d}^{II} - I_{2d}^{II}) \cos(\alpha_I^I + 60^\circ) + (2I_{1q}^{II} - I_{2q}^{II}) \sin(\alpha_I^I + 60^\circ). \end{aligned} \quad (140)$$

გამოსაკვლევი გარდამქმნელი ერთიანი სისტემის პროგრამული ციფრული მოდელირებისათვის აუცილებელია შედგენილი იქნას გარდამქმნელი სისტემის გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები (137)-(139) გამოსახულებების საფუძველზე [33].

ჩაწერის შემოკლების მიზნით სტრუქტურულ სქემებში (ნახ.16,17) (137)-(139) ინტეგრალურ გამოსახულებებში შემოღებულია შემდეგი აღნიშვნები:

$$u_1 = \frac{2}{3} \cdot \frac{U^I_{\max}}{L^I_{d\vartheta}}, \dots, u_6 = \frac{3}{2} \frac{U^I_{\max}}{L^I_{2q\vartheta}}; \quad i_1 = \frac{1}{T^I_{1d}}, \dots, i_{36} = \frac{1}{T^I_{2q6}};$$

$$K_1 = I^I_d(0), \dots, K_6 = I^I_{2q}(0); \quad P_1 = \omega^2_{1d}, \dots, P_{24} = \omega^2_{2q4}. \quad (141)$$

სტრუქტურული მოდელის ელემენტების ძირითადი თვისებების გამოყენებით (137)-(139) და (140) გამოსახულებების საფუძველზე ვღებულობთ შესაბამისი დენების ფორმირების ბლოკ-სქემებს (ნახ.16-18):

ნახ.16 და ნახ.17-ზე შერწყმის ადგილების აღმნიშვნელი რიგითი ნომრებისათვის 1,2,3,..., 9 გვაქვს შემდეგი აღნიშვნები:

$$\left. \begin{aligned} 1 &\rightarrow \frac{1}{T^I_{1q1}} I^I_d + \frac{1}{T^I_{1q2}} I^I_q + \frac{1}{T^I_{1q3}} I^I_{1d} + \frac{1}{T^I_{1q4}} I^I_{1q} + \frac{1}{T^I_{1q5}} I^I_{2d} + \frac{1}{T^I_{1q6}} I^I_{2q}; \\ 2 &\rightarrow \frac{1}{T^I_{2d1}} I^I_d + \frac{1}{T^I_{2d2}} I^I_q + \frac{1}{T^I_{2d3}} I^I_{1d} + \frac{1}{T^I_{2d4}} I^I_{1q} + \frac{1}{T^I_{2d5}} I^I_{2d} + \frac{1}{T^I_{2d6}} I^I_{2q}; \\ 3 &\rightarrow \frac{1}{T^I_{2q1}} I^I_{d1} + \frac{1}{T^I_{2q2}} I^I_{q1} + \frac{1}{T^I_{2q3}} I^I_{1d} + \frac{1}{T^I_{2q4}} I^I_{1q} + \frac{1}{T^I_{2q5}} I^I_{2d} + \frac{1}{T^I_{2q6}} I^I_{2q}; \end{aligned} \right\} \quad (142)$$

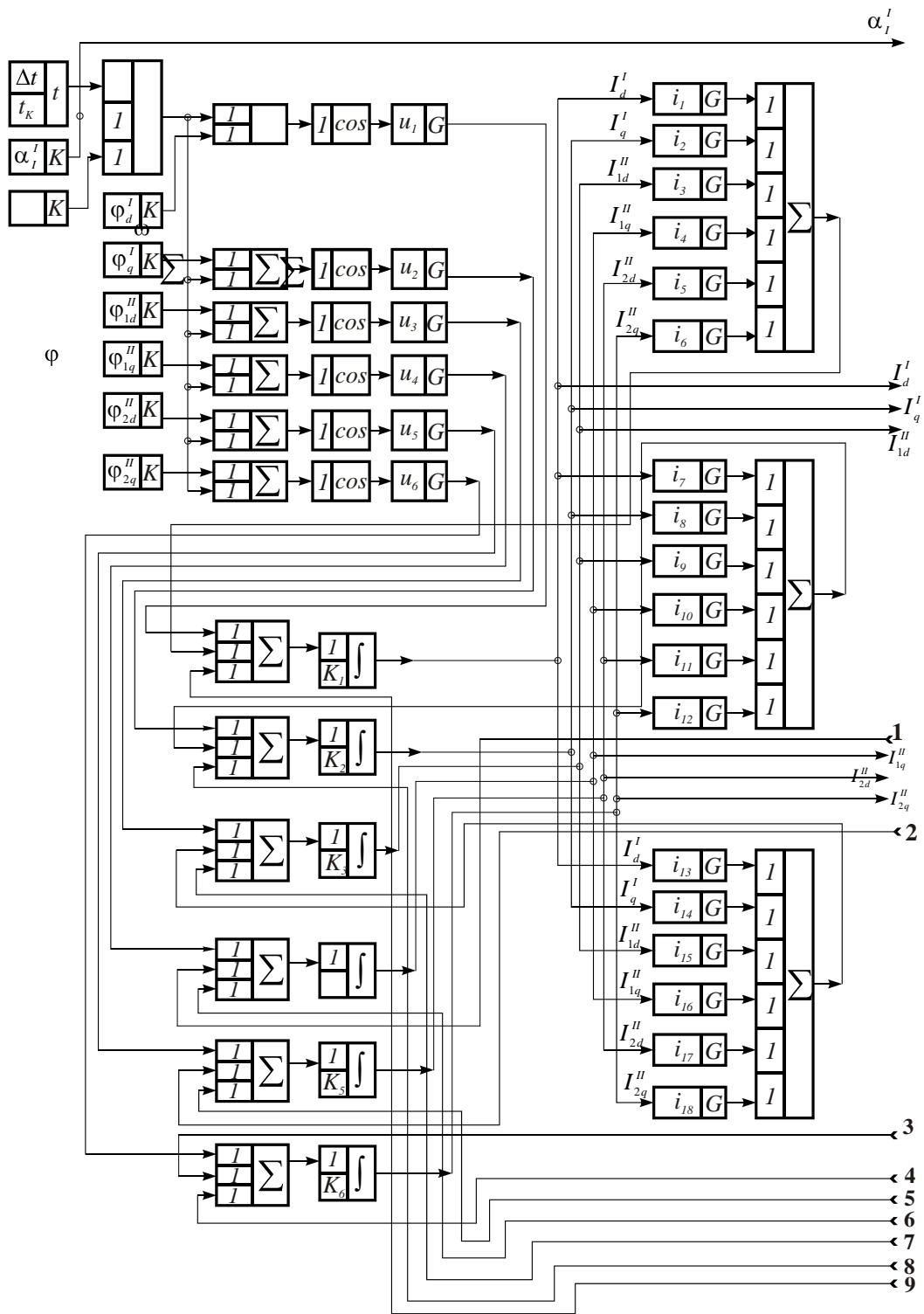
$$\left. \begin{aligned} 4 &\rightarrow \omega^2_{2q1} \int I^I_{1d} dt + \omega^2_{2q2} \int I^I_{1q} dt + \omega^2_{2q3} \int I^I_{2d} dt + \omega^2_{2q4} \int I^I_{2q} dt, \\ 5 &\rightarrow \omega^2_{2d1} \int I^I_{1d} dt + \omega^2_{2d2} \int I^I_{1q} dt + \omega^2_{2d3} \int I^I_{2d} dt + \omega^2_{2d4} \int I^I_{2q} dt, \\ 6 &\rightarrow \omega^2_{1q1} \int I^I_{1d} dt + \omega^2_{1q2} \int I^I_{1q} dt + \omega^2_{1q3} \int I^I_{2d} dt + \omega^2_{1q4} \int I^I_{2q} dt, \\ 7 &\rightarrow \omega^2_{1d1} \int I^I_{1d} dt + \omega^2_{1d2} \int I^I_{1q} dt + \omega^2_{1d3} \int I^I_{2d} dt + \omega^2_{1d4} \int I^I_{2q} dt, \\ 8 &\rightarrow \omega^2_{1q} \int I^I_{1d} dt + \omega^2_{2q} \int I^I_{1q} dt + \omega^2_{3q} \int I^I_{2d} dt + \omega^2_{4q} \int I^I_{2q} dt, \\ 9 &\rightarrow \omega^2_{1d} \int I^I_{1d} dt + \omega^2_{2d} \int I^I_{1q} dt + \omega^2_{3d} \int I^I_{2d} dt + \omega^2_{4d} \int I^I_{2q} dt. \end{aligned} \right\}$$

მიღებული სტრუქტურული მოდელები დიდ საფუძველს გვაძლევს გამოვიკვლიოთ და გავიანგარიშოთ სხვადასხვა რეჟიმებში და

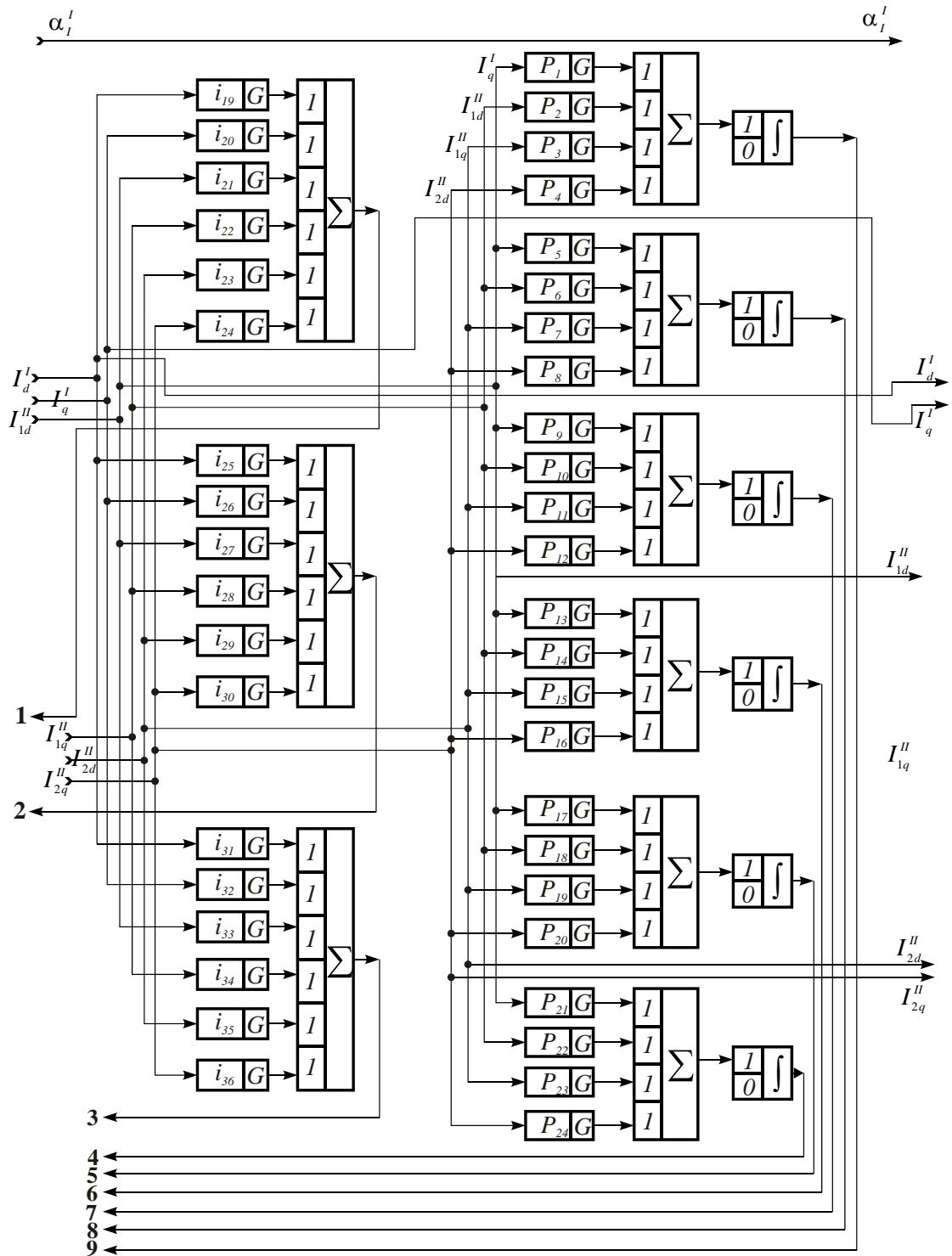
განზოგადოებული კომპუტაციური დროის  $t_n = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{2\pi}{3} + \gamma \right) - \gamma \right]$  - დან

$t_{n+1} = \frac{1}{\omega} n \left( \frac{2\pi}{3} + \gamma \right)$ ,  $n=1, 2, 3, \dots, \infty$ ; -მდე ინტერვალებში ელექტრომაგნი-

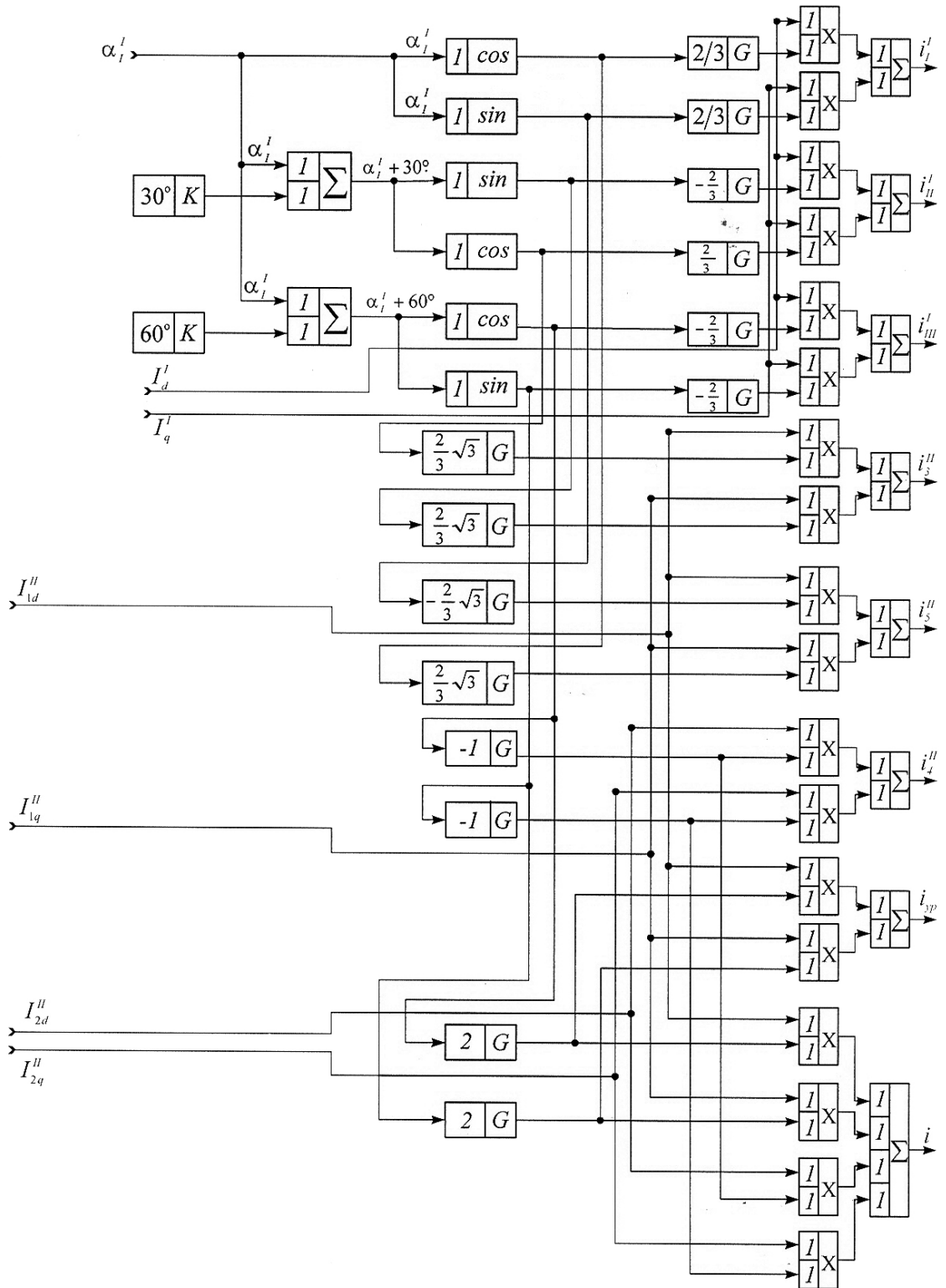
ტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესები [33].



ნახ.16. რეზულტირებული საგრანგნილო დენების d,q კოორდინატებში ფორმირების ბლოკ-სქემა.



ნახ: 17. რეზულტირებული საგრაგნილო დენების d,q კოორდინატებში ფორმირების ბლოკ-სქემა (გაგრძელება).



ნახ.18. წვეის ტრანსფორმატორის ფაზური დენების, დატვირთვის დენის და გამათანაბრებელი ორფაზა რეაქტორის დენების ფორმირების ბლოკ- სქემა.

### თავი 3. წევის ქვესადგურის მოდერნიზებული გარდამქმნელი სისტემა უნივერსალური სამფაზა ბოგური გამმართველ- ინვერტორული სქემით

#### 3.1. უნივერსალური სქემის შემადგენლობა და მოქმედების პრინციპი.

ელმავლის წევის ძრავის განედურ-იმპულსური მართვის წრედში პროცესების მართვის გამარტივებისათვის ტირისტორული გასაღების რანგში გამოიყენება IGBT (Insulated Gate Bipolar transistor) ტრანზისტორული მოდულები [36,37].

ელექტრო მოძრავი შემადგენლობის (ემშ) გაშვებისა და წევის რეჟიმებში (გამართვის რეჟიმში) პროცესების ზუსტი აღწერისათვის აუცილებელია განხილულ იქნას დანადგარის მთლიანი კომპლექსი, როგორც ერთიანი გარდამქმნელი სისტემა, დაწყებული წევის ქვესადგურის 10 კვ ცვლადი ძაბვის ქსელიდან, დამთავრებული ელმავლის მუდმივი დენის წევის ძრავით საკონტაქტო და სალიანდაგო წრედების გათვალისწინებით.

გარდამქმნელი სისტემის დატვირთვის ცვლილების რეჟიმი ხასიათდება გარდამავალი პროცესებით, რომელსაც აქვს რთული ხასიათი. გარდამავალი პროცესის თითოეული დროის ინტერვალზე ელექტრული სიდიდეების საწყისი პირობები იცვლებიან.

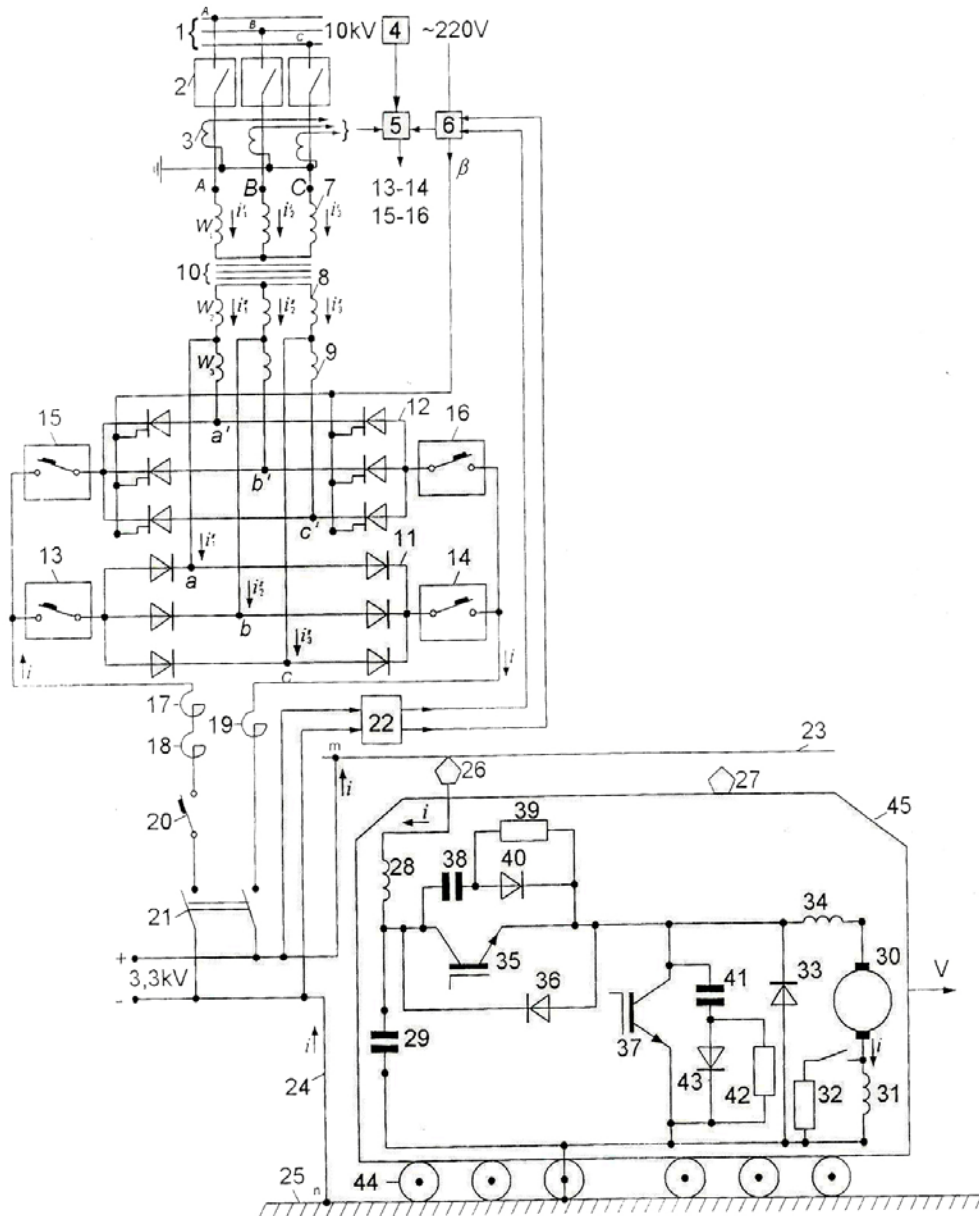
ამოცანის მიზანია წარმოდგენილი გარდამქმნელი სისტემის ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების გაანგარიშება ემშ-ის გაშვებისა და წევის რეჟიმებში, როგორც გარდამქმნელი სისტემების დროის არასაკომუტაციო, ისე კომუტაციური ინტერვალისათვის. პროცესების გაანგარიშებისა და გამოკვლევებისათვის საკმარისია ჩატარდეს მათემატიკური მოდელირება ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდით და პროგრამული მოდელირება მოდელირებადი ელემენტების კრებულიდან ცალკეული ელემენტარული მათემატიკის ოპერაციების შედგენით [33,37].

ნახ.19-ზე ნაჩვენებია წევის ქვესადგურის სამფაზა ბოგური გამმართველ-ინვერტორული გარდამქმნელისა და ელმავლის განედურ-იმპულსური მოდულაციით მართვადი მუდმივი დენის წევის ძრავის ერთიანი სისტემის ელექტრული სქემა.

წარმოდგენილი სქემა შედგება ძირითადი ელემენტებისაგან:

1- ელექტრული სისტემის 10 კვ ცვლადი ძაბვის ქსელი; 2 - ზეთიანი ამომრთველები; 3 - სამფაზა დენის ტრანსფორმატორი; 4 - ძაბვის ტრანსფორმატორი; 5 - რეჟიმების გადართვის გადამწოდი; 6 - მართვის კარადა; 7 - წევის ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილი; 8 - წევის ტრანსფორმატორის მეორადი გამმართველის გრაგნილი; 9 - წევის ტრანსფორმატორის ინვერტორული მეორადი გრაგნილის ნაწილი; 10 - სამფაზა წევის ტრანსფორმატორი; 11 - სამფაზა არამართვადი გამმართველი; 12 - ქსელის მიმყოლი სამფაზა ინვერტორი; 13, 14 - გამმართველი აგრეგატის სწრაფმოქმედი ავტომატური ამომრთველი; 15,16 - ინვერტორული აგრეგატის სწრაფმოქმედი ავტომატური ამომრთველი; 17,18,19 - კომუტაციის გაუმჯობესებისა, ძაბვის გაგლუვებისა და ავარიული რეჟიმებისას მოკლე შერთვის (მშ) დენების შემცირებისათვის დანიშნულების მქონე რეაქტორები; 20 - როგორც გამმართველი, ასევე ინვერტორულ რეჟიმებში შეკრული სწრაფმოქმედი ავტომატური ამომრთველი; 21 - საკონტაქტო ქსელის ამომრთველი; 22 - ძაბვის გადამწოდი; 23 - საკონტაქტო ქსელი; 24 - ლიანდაგიდან შემწოვი სალტე; 25 - ლიანდაგი; 26,27 - დენმიმღები; 28 - საკონტაქტო ქსელში დენის პულსაციის გაგლუვების რეაქტორი; 29 - Γ-ს მაგვარი ფილტრის კონდენსატორი; 30 - მუდმივი დენის წევის ძრავის ღუზა; 31 - წევის ძრავის მიმდევრობითი ალგუნების გრაგნილი; 32 - წევის ძრავის ალგუნების შემასუსტებელი მაშუნტირებელი წინაღობა; 33 - უკუვენტილი, რომლის გავლით ძრავის დენი შეიკვრება ქსელიდან დატვირთვის მოხსნისას; 34 - ძრავში დენის - გაგლუვებისთვის საჭირო დამტვირთავი რეაქტორი; 35,37 - IGBT ტრანზისტორები; 36 - ძალოვანი ვენტილი; 38 - 43 - ტრანზისტორების





**ნახ. 19.** წვეის ქვესადგურის სამფაზა ბოგური გამმართველ-ინვერტორული გარდამქმნელისა და ელმავლის განედურ-იმპულსური მოდულაციით მართვადი მუდმივი დენის წვეის ძრავის ერთიანი სისტემის პრინციპული ელექტრული სქემა.

მადემფირებული წრედები; 44 - ელმავლის ბორბალი; 45 - ელმავლის კორპუსი.

ემშ-ის გაშვებისა და წვეის რეჟიმებში მუშაობს გამმართველი აგრეგატი (შერთულია 13 და 14 სწრაფმოქმედი ავტომატები და ამორთულია 15 და 16 ავტომატები), რეკუპერაციული დამუხრუჭებისას მუშაობს

ინვერტორული აგრეგატი (შერთულია 15 და 16, ხოლო ამორთულია 13 და 14 ავტომატები). სწრაფმოქმედი ავტომატი 20 შერთულია ორთავე რეჟიმში. ინვერტორული რეჟიმისათვის წევის ტრანსფორმატორის მეორად მხარეს ძაბვის ამაღლება ხორციელდება შესაბამისი ხვიათა რიცხვების მომატებით. გარდამქმნელი სისტემის გამმართველი რეჟიმიდან ინვერტორულ რეჟიმში გადაყვანის პროცესი და პირიქით სრულიად ავტომატიზებულია ნახევარგამტარული მოწყობილობების გამოყენებით.

### **3.2. ელმავლის განივ-იმპულსური მოდულაციით მართვადი მუდმივი დენის წევის ძრავის უნივერსალური ერთიანი სისტემის ელექტრული სქემა და მოქმედების პრინციპი**

გამმართველ რეჟიმში გაშვების ან წევისას ტრანზისტორი 35 იმყოფება ღია მდგომარეობაში და დატვირთვის წრედზე მოდებულია საკონტაქტო ქსელის ძაბვის ტოლი ძაბვა. ამ დროში საკონტაქტო ქსელის ძაბვის მოქმედებით იზრდება დატვირთვის დენი. ქსელიდან შემოსული ენერგია მოიხმარება წევის ძრავით და ერთდროულად ზრდის მის წრედში ელექტრომაგნიტურ ენერგიას. დროის სხვა ნაწილში დატვირთვა გათიშულია ქსელიდან, რის შედეგადაც დატვირთვის დენი შეიკვრება 33 ვენტილის მეშვეობით და თანდათანობით მცირდება საწყის მნიშვნელობამდე. ძრავში დენი შეინარჩუნება გამორთვის პერიოდის განმავლობაში დატვირთვის კონტურში დაგროვებული ენერგიის ხარჯზე. ძრავის მომჭერებზე ძაბვა შეიძლება ვარეგულიროთ 35 ტრანზისტორული გასაღების ღია მდგომარეობის რეგულირებით, ასევე ციკლის მთელი პერიოდის რეგულირებით. ჩვენს შემთხვევაში განიხილება განედურ-იმპულსური მართვა - რეგულირდება იმპულსის სიგანე. 35 ტრანზისტორის განმეორებითი ჩართვისას მიმდინარეობს 29 კონდენსატორის განმუხტვა დატვირთვის კონტურში წევის ძრავის გავლით. ტრანზისტორული მწყვეტარას ჩართვა და გამორთვა მიმდინარეობს პერიოდულად და შესაბამისად პერიოდულად იმუხტება და განიმუხტება 29 კონდენსატორი.

გამმართველ რეჟიმში ფაზური დენები შეიკვრება  $W_2$  ხვიათა რიცხვის მქონე წევის ტრანსფორმატორის მეორად გრაგნილებში [ნახ.19].

წევის ძრავები ხშირად მუშაობენ შერბილებული ალგზნებით ალგზნების გრაგნილის 32 წინაღობის შუნტირების მეთოდით [32. 35.38].

დავუშვათ, რომ გამმართველის რეჟიმის შემდეგ ადგილი აქვს ინვერტორულ რეჟიმს, ე.ი. მიმდინარეობს ემშ-ის რეკუპერაციული დამუხრუჭება. 22 ძაბვის გადამწოდიდან შესაბამისი დონის სიგნალი შედის 6 მართვის კარადაში და 3 დენის ტრანსფორმატორიდ ან, 4 ძაბვის ტრანსფორმატორიდან და 6 მართვის კარადიდან შესაბამისი სიგნალები შედიან 5 რეჟიმების გადართვის გადამწოდზე. რეჟიმების გადართვის გადამწოდის და მართვის კარადის ლოგიკური ელემენტები გამოიმუშავენ სიგნალებს და თავიანთი გამომავალი კასკადებით იძლევიან: რეჟიმების გადართვის გადამწოდი - სიგნალებს II გამმართველის 13 და 14 ამომრთველების გამორთვაზე და 12 ინვერტორის ტირისტორების მოცემული  $\beta$  წინსწრების კუთხით გამღებ იმპულსებს.

რეკუპერაციულ რეჟიმში განედურ-იმპულსური მართვისას 35 ტრანზისტორული გასაღები გამორთულია და პერიოდულად ჩაირთვება 37 ტრანზისტორული გასაღები. წევის ძრავის გენერატორულ რეჟიმში დენი იკვრება შებრუნებული მიმართულებით 36 ვენტილის, 28 რეაქტორის გავლით 23 საკონტაქტო ქსელში. 29 კონდენსატორი გადაიმუხტება 31 ალგზნების გრაგნილის და 36 ვენტილის გავლით, 37 გასაღების გავლით და ამავდროულად მიმდინარეობს 29 ტევადობის დამუხტვა. 37 ტრანზისტორული გასაღების პერიოდული ჩართვისა და ამორთვით ხორციელდება რეკუპერაციული დენის მდოვრე რეგულირება. რეკუპერაციისას გაითვალისწინება როგორც არასაკომუტაციო, ასევე ინვერტორის მუშაობის კომუტაციური ინტერვალები.

ინვერტორის მართვის სისტემა უზრუნველყოფს ტირისტორების იმპულსურ-ფაზურ მართვას, ინვერტორში დაზიანებისას დაცვას,

კონტროლს და სიგნალიზაციას, ასევე ინვერტორის აუცილებელი გარე მახასიათებლის მიღებას.

მაზვის მიხედვით უკუკავშირი, რომელიც აუცილებელია ინვერტორის "ჰორიზონტალური" გარე მახასიათებლის მისაღებად, სრულდება 22 მაზვის გადამწოდის დახმარებით. მაზვის გადამწოდის შესავალზე მიეწოდება მაზვა, რომელიც მოიხსნება ქვესადგურის "პლიუსი" და "შემწოვი" სალტეს შორის ჩართული მაზვის გამყოფიდან.

გათვალისწინებულია ინვერტორის გარე მახასიათებლის დახრის შესაძლებლობა დენის კორექციის შემოყვანის გზით.

დენის გადამწოდად გვევლინება დენის ტრანსფორმატორი, რომელიც ჩართულია ძალოვანი ტრანსფორმატორის ქსელურ (პირველად) გრაგნილში.

### 3.3 მოდერნიზებული ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების საანგარიშო სქემები მატარებლის გაშვებისა და წევის რეჟიმში

ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირებისათვის აუცილებელია შედგეს დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა თითოეული საანგარიშო სქემისთვის (ნახ. 20, 21) გამმართველ რეჟიმში. ამ სქემებში გათვალისწინებულია 35 ტრანზისტორული გასაღების მდგომარეობა, როგორც არასაკომუტაციო, ასევე კომუტაციური დროის ინტერვალებში.

შედგენილ განტოლებათა სისტემაში გათვალისწინებულია სქემებზე მითითებული პარამეტრების მოცემული სიდიდეები:  $U_k^I$  ( $k=1,2,3$ )

$$L_s^I, L_s^{II}, M^I, M^{II}, M^{12}, R^I, R^{II}, R, L, L_f, L_l, L_D, C_f, R_f, R_l, R_D$$

და წევის ძრავის ღუზის ექვივალენტური მექანიკური ტევადობა  $C_d$  გარდამავალი პროცესებისათვის [36.37].

განიხილება გამმართველ რეჟიმში სისტემის მუშაობის ოთხი ძირითადი ინტერვალი:

$$1. t = t_{n-1} = \frac{1}{\omega}(n-1)\left(\frac{\pi}{3} - \gamma\right) \text{ -დან } t = \tau_1 \text{ -მდე} \quad (\text{ნახ. 20, ა})$$

$$2. t = \tau_1 \text{ -დან } t = t_n = \frac{1}{\omega}\left[n\left(\frac{\pi}{3} - \gamma\right)\right] \text{ -მდე} \quad (\text{ნახ. 20, ბ})$$

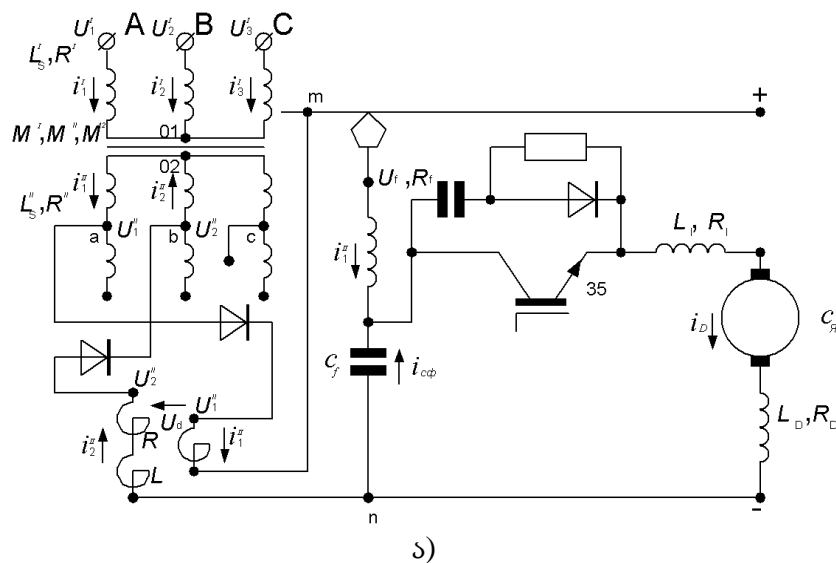
$$3. t = t_n = \frac{1}{\omega}\left[n\left(\frac{\pi}{3} - \gamma\right)\right] \text{ -დან } t = \tau_2 \text{ -მდე} \quad (\text{ნახ. 21, ა})$$

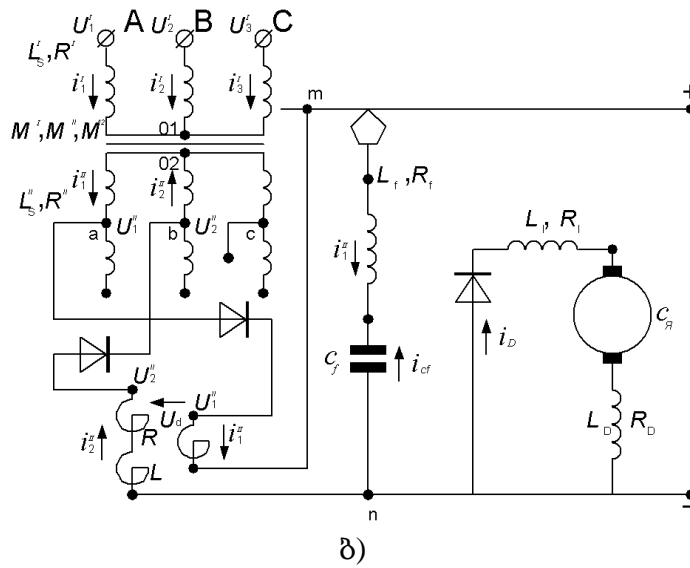
$$4. t = \tau_2 \text{ -დან } t = t_{n+1} = \frac{1}{\omega}\left[n\left(\frac{\pi}{3} - \gamma\right) + \gamma\right] \text{ -მდე} \quad (\text{ნახ. 21, ბ})$$

თითოეული ზემოთ აღნიშნული ინტერვალებისათვის ცალ-ცალკე აღებული სქემებისათვის (ნახ. 20, ნახ. 21) შედგენილ განტოლებათა სისტემას, ზოგადად, მატრიცულ ფორმაში, აქვთ შემდეგი სახე:

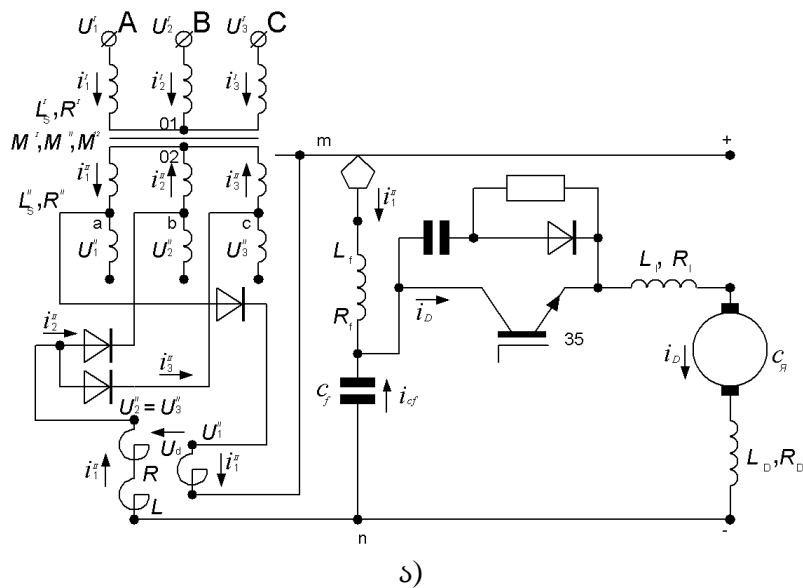
$$[u] = [iR] + \left[L \frac{di}{dt}\right] + \left[\frac{1}{C} \int_{t_{n-1}}^{\tau} i dt\right] + \left[\frac{d\psi}{dt}\right] \quad (144)$$

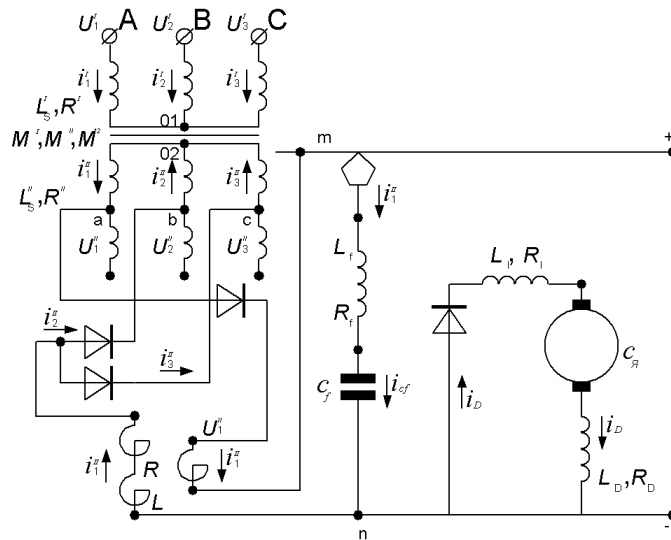
სადაც თითოეული პარამეტრი მითითებულია შესაბამის ნახაზებზე.





ნახ. 20 ემშ-ის გაშვებისა და წვევის რეჟიმებში გარდამქმნელი სისტემის საანგარიშო სქემა არასაკომუტაციო დროის ინტერვალებში, როცა ა)  $t_{n-1}$  მომენტში 35-ტრანზისტორული გასაღები ჩართულია და ბ)  $t = \tau_1$  მომენტში კი გამორთული





ბ)

**ნახ. 21** ემშ-ის გაშვებისა და წევის რეჟიმებში გარდამქმნელი სისტემის საანგარიშო სქემა კომპუტაციური დროის ინტერვალებში, როცა:  
 ა)  $t = t_n$ , მომენტში 35-ტრანზისტორული გასაღები ჩართულია და  
 ბ)  $t = t_2$  მომენტში კი გამორთულია.

ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის გამოყენებით (144) საწყის განტოლებათა სისტემა გარდაიქმნება წევის ტრანსფორმატორის საგრაგნილე ჯამური კომპლექსური დენების მიმართ განტოლებათა სისტემაში. შედეგად განტოლებათა რიცხვი მცირდება საგრაგნილე დენების რიცხვამდე.

ცვლადთა უკუგარდაქმნის მატრიცა საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ ფაზური სიდიდეების მყისი მნიშვნელობები საგრაგნილე დენების ფუნქციური დამოკიდებულებით. [38,39]

კომპლექსური განტოლებათა სისტემიდან შესაძლებელია მივიღოთ ჯამური დენების ნამდვილი  $d$  და წარმოსახვითი  $q$  მდგენელების მიმართ სკალარული განტოლებები, რომლებიც შემდგომში წარმოადგენენ კომპიუტერული მოდელირების მეთოდით ამოცანის ამოხსნის ერთ-ერთ უმთავრეს საფუძველს:

$$\left[ \sum u_k \right] = [L_k] \cdot [dI_k dt] \quad (145)$$

სადაც (145)-ში  $\left[ \sum u_k \right]$  წრედის ექვივალენტურ წინააღმდეგობებზე ძაბვის ვარდნათა მატრიცაა;  $[L_k]$  - ექვივალენტური ინდუქციურობებისა და ურთიერთინდუქციურობის მატრიცაა;  $[dI_k dt]$  - d,q კოორდინატებში ჯამური დენების წარმოებულების მატრიცაა. (145)-დან მივიღებთ დენების მატრიცებისათვის გამოსახულებას თითოეული ინტერვალისათვის:

$$I_k = \int_{t_1}^{t_2} [L_k]^{-1} \left[ \sum u_k \right] dt + I_k(0), \quad (146)$$

სადაც  $[L_k]^{-1}$  - ექვივალენტური ინდუქციურობებისა და ურთიერთ ინდუქციურობების შებრუნებული მატრიცაა;  $I_k(0)$  - d,q კოორდინატებში შესაბამისი ჯამური დენების საწყისი მნიშვნელობებია თითოეული ინტერვალის დასაწყისში.

ცვლადთა უკუკავშირის მატრიცების გამოყენებით მივიღებთ ფაზური დენების მყისა მნიშვნელობებს d,q კოორდინატებში ჯამური დენების მდგენელების მიმართ.

$$[i_k] = [\mu_k (I_{dk} \cos \alpha_k + I_{qk} \sin \alpha_k)] \quad (147)$$

(146), (147) გამოსახულებების საფუძველზე შესაძლებელია აგებული იქნას გარდამქმნელი სისტემის გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა. მიღებული სტრუქტურული სქემა გაითვალისწინებს ცალკეული ელემენტარული მათემატიკური ოპერაციების მოდელირების ელემენტების კრებულს [38,39].

მიღებული სტრუქტურული სქემა საშუალებას იძლევა გამოკვლევული და გაანგარიშებული იქნას ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესები მუშაობის თითოეული დროის განზოგადებული ინტერვალისათვის.



გარდამსახი სისტემის მუშა ციკლი შესაძლებელია წარმოდგენილი იქნას, როგორც დროის არასაკომუტაციო და კომუტაციური ინტერვალების მონაცვლეობა [30-39].

### **3.4. მოდერნიზებული ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების საანგარიშო სქემები რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმში**

განიხილება წევის ძრავის ელექტრული რეკუპერაციული დამუხრუჭება განედურ-იმპულსური მართვით. ელექტრული ძრავის ე.მ. ძალა ნაკლებია საკონტაქტო ქსელის დაბვაზე. იმპულსური მართვა უზრუნველყოფს წევის ძრავაზე მოდებული დაბვის მდოვრე რეოსტატის გარეშე რეგულირებას, წარმოებს ელექტრომოდრავი შემადგენლობის სიჩქარის უფრო სრულყოფილი და მარტივი მართვა. გამორიცხულია ძრავის დაბვისა და საკონტაქტო ქსელის დაბვას შორის უშუალო კავშირი; მარტივდება მატარებლის მოძრაობის პროცესების ავტომატიზაცია [31,32,36].

დამუშავებულია ერთიანი ნახევარგამტარული გარდამქმნელი სისტემა, შედგენილი: 10 კვ ცვლადი დაბვის ქსელისაგან, სამფაზა წევის ტრანსფორმატორისაგან; ქსელის მიმყოლი სამფაზა ინვერტორისაგან, 3,3 კვ მუდმივი დაბვის საკონტაქტო ქსელისაგან, ემშ-ის განედურ-იმპულსური მართვით მუდმივი დენის წევის ძრავისაგან, ლიანდაგისაგან; შემწოვი სალტისაგან და ბეტონური რეაქტორისაგან.

ემშ-ის რეკუპერაციის რეჟიმში მუშაობის ნორმალური პირობების უზრუნველსაყოფად ერთიანი გარდამქმნელი სისტემამ უნდა უზრუნველყოს დაბვის უკონტაქტო და ურეოსტატო რეგულირება. ამასთანავე, მათი ძირითადი განსაკუთრებულობა მდგომარეობს წევის ტრანსფორმატორის მეორად გრაგნილებზე ფაზური დაბვების (20-25)%-ით

ამაღლება, უკუ პოლარობის არსებობა და დამატებითი რეაქტორის არსებობა.

რეჟიმების გადართვის გადამწოდის დახმარებით გამმართველ ინვერტორული აგრეგატის გადართვა მუდმივი დენის მხარეზე ხორციელდება სწრაფმოქმედი ამომრთველით. ესენი ამავე დროს იცავენ სისტემას ინვერტორის გადაყირავების შემთხვევაში მოკლე შერთვის დენებისაგან. ერთი რეჟიმიდან მეორე რეჟიმში გადართვა ხდება უინერციოდ, კომუტატორული აპარატის მონაწილეობის გარეშე.

რეკუპერაციის რეჟიმში ინვერტორისა და მატარებლის მუშაობის შემსუბუქებისათვის, რაც ხდება ინვერტორის გადაყირავების დენის მატების სიჩქარის შემცირებით, ინვერტორის ანოდური და კათოდური ჯგუფის ტირისტორების წრედში დაყენებულია რეაქტორები. რეაქტორის ინდუქციურობას ირჩევენ 4,5-10  $\mu\text{H}$ -ის ტოლს [3,36].

იმპულსური გარდამქმნელის ძირითად ელემენტად აღებულია არა ტირისტორული გასაღები, არამედ IGBT ტრანზისტორული მოდული, რომელიც გამორიცხავს მაკომუტირებელ დიოდებს, ტირისტორებს, ტევადობებს და დროსელებს [3], რის შედეგადაც მნიშვნელოვნად მარტივდება გარდამქმნელის განედურ-იმპულსური მართვა [36].

ინვერტორულ რეჟიმში რეკუპერაციული დამუხრუჭების პროცესების ზუსტი აღწერისათვის აუცილებელია მთელი დანადგარის კომპლექსი განვიხილოთ, როგორც ერთიანი გარდამქმნელი სისტემა დაწყებული წევის ქვესადგურის 10 კვ ცვლადი ძაბვის ქსელიდან, დამთავრებული ელმავლის წევის ძრავის, საკონტაქტო ქსელისა და ლიანდაგის წრედით.

დატვირთვის ცვლადების რეჟიმი ხასიათდება გარდამავალი პროცესით, რომელიც მიმდინარეობს რთული პროცესით.

განიხილება ინვერტორული აგრეგატის მუშაობის რეჟიმების განსაკუთრებულობა წევის ელექტრომომარაგების ერთიანი გარდამქმნელი სისტემაში ე.მ.შ-ის დინამიური დატვირთვის გათვალისწინებით.

დავუშვათ, რომ ნახ.19-ზე გამართვის რეჟიმიდან გადავდივართ ინვერტორულ რეჟიმზე, ე.ი. წარმოებს რეკუპერაციული დამუხრუჭება. ძაბვის გადამწოდიდან - 22 მართვის კარადაზე - 6 და 3 -დენის ტრანსფორმატორიდან, 4-ძაბვის ტრანსფორმატორიდან და 6 მართვის კარადიდან 5 - რეჟიმის გადართვის გადამწოდზე მიეწოდება შესაბამისი დონის სიგნალები. რეჟიმების გადართვის გადამწოდის და მართვის კარადის ლოგიკური ელემენტები გადაამუშავებენ მიღებულ სიგნალებს და თავიანთი გამომავალი კასკადებიდან იძლევიან: რეჟიმების გადართვის გადამწოდი - 11-გამმართველის 13 და 14 ამომრთველების გამორთვის სიგნალებს და 12-ინვერტორის 15 და 16 ამომრთველების ჩართვის სიგნალებს; მართვის კარადა - 12 ინვერტორის ტირისტორების მართვის გამომყვანებზე მოცემული β წინსწრების კუთხით გამღებ იმპულსებს.

რეკუპერაციულ რეჟიმში განედურ-იმპულსური მართვისას გამორთულია 35-ტრანზისტორული გასაღები და ჩაერთვება პერიოდულად 37 - ტრანზისტორული გასაღები. გენერატორულ რეჟიმში 36 ვენტილის გავლით დენი იკვრება უკუ მიმართულებით 28 რექტორის გავლით 23 - საკონტაქტო ქსელში. 29-ე კონდენსატორი გადაიმუხტება ალგუნების 31 - გრაგნილის და 36 ვენტილის გავლით - ღუზის დენი შეიკვრება 37 - გასაღების გავლით და ერთდროულად ხდება 29 - კონდენსატორის დამუხტვა. 37 - ტრანზისტორული გასაღების პერიოდულად ჩართვისა და გამორთვის შედეგად წარმოებს რეკუპერაციული დენის მდოვრე რეგულირება. რეკუპერაციის რეჟიმში განიხილება როგორც არა საკომუტაციო, ასევე კომუტაციური მუშაობის ინტერვალები ინვერტორის წრედში. ტრანზისტორული გასაღების სიხშირეს შეესაბამება მუშაობის არასაკომუტაციო ინტერვალი [3,32].

ინვერტორის მართვის სისტემა უზრუნველყოფს ტირისტორების იმპულსურ-ფაზური მართვას, კონტროლს, დაცვასა და სიგნალიზაციას ინვერტორის დაზიანებისას, აგრეთვე ინვერტორის სასურველ გარე მახასიათებლის მიღებას.

ძაბვის 22 - გადამწოდის დახმარებით სრულდება ძაბვის მიხედვით უკუკავშირის დამყარება და მიიღება აუცილებელი "ჰორიზონტალური" მახასიათებელი. ძაბვის გადამწოდის შემავალ სიგნალად ითვლება "პლიუს" სალტესა და ქვესადგურის "შემწოვი" სალტეს შორის ჩართული ძაბვის გამყოფიდან მოხსნილი ძაბვა. გათვალისწინებულია ინვერტორის გარე მახასიათებლის დახრა დენური კორექციის საშუალებით.

დენის გადამწოდად გვევლინება წევის ტრანსფორმატორის ქსელური გრაგნილში ჩართული დენის ტრანსფორმატორები.

გარდამქმნელის ჩართვა მუშაობაში ხდება შემდეგი თანმიმდევრობით:

1. მართვის კარადა;
2. წევის ტრანსფორმატორი;
3. ინვერტორის (გამმართველის) ვენტილატორი;
4. იმპულსები;
5. ინვერტორის (გამმართველის) სწრაფმოქმედი ამომრთველები.

გამორთვა ხდება უკუთანმიმდევრობით.

გარდამქმნელის რეჟიმების გადართვა (ხელით ან ავტომატურად) უნდა მოხდეს შემდეგი წესით:

ა) გამმართველიდან ინვერტორულში.

1. გამმართველის სწრაფმოქმედი ამომრთველის გამორთვა, გამმართველის ვენტილიატორის გამორთვა;
2. დროის დაყოვნება 1-2 წამი.
3. ინვერტორის ვენტილიატორის ჩართვა;
4. იმპულსების ჩართვა;
5. ინვერტორის სწრაფმოქმედი ამომრთველების ჩართვა.

ბ) ინვერტორული რეჟიმიდან გამმართველ რეჟიმში.

1. ინვერტორის სწრაფმოქმედი ამომრთველების გამორთვა, ინვერტორის ვენტილიატორის გამორთვა;
2. ინვერტორის იმპულსების მოხსნა;

3. გამმართველის ვენტილატორის ჩართვა;
4. გამმართველის სწრაფმოქმედი ამომრთველების ჩართვა.

გარდამქმნელი სისტემის ავარიული გამორთვებისას (საკონტაქტო ქსელში მოკლე შერთვა, ინვერტორის გადაყირავება, გადატვირთვები და ა.შ.) მართვის კარადის კვება არ შეიძლება მოიხსნას [1,32,36].

გამმართველ-ინვერტორული გარდამქმნელი სისტემის მახასიათებლები და ძირითადი ტექნიკური მონაცემები:

1. ნომინალური დენი  $I_{ნომ}, A$ :

- გამმართველის რეჟიმში - 2500;
- ინვერტორულ რეჟიმში - 1600.

2. დენის მიხედვით დასაშვები გადატვირთვები  $I_{ნომ}, \%$ :

- 15 წთ განმავლობაში - 2 საათში ერთხელ - 25 (1,04  $I_{ნომ}$ );
- 2 წთ განმავლობაში - 1 საათში ერთხელ - 50 (1,5  $I_{ნომ}$ );
- 10 წმ განმავლობაში - 2 წუთში ერთხელ - 100 (2,0  $I_{ნომ}$ ).

3. ნომინალური ძაბვა,  $V$ :

- გამმართველ რეჟიმში - 3300;
- ინვერტორულ რეჟიმში - 3200÷3800.

მაქსიმალური ძაბვა ორივე რეჟიმში  $V=4000$ .

4. ტრანსფორმატორის ვენტილური გრაგნილების ძაბვა,  $V$ :

- გამმართველის გამომყვანებზე  $a, b, c$ , - 1520;
- ინვერტორის  $a', b', c'$ , გამომყვანებზე - 1900.

5. გარდამქმნელი იჭერს ორპოლარულ გადაძაბვებს ამპლიტუდებით:

- ტრანსფორმატორის ინვერტორული  $a', b', c'$ , გამომყვანებზე 12 KV (ხაზური ძაბვა);
- გამმართველის  $a, b, c$ , გამომყვანებზე ხაზური ძაბვა - 9 KV;
- წევის ქვესადგურების მუდმივი დენის სალტეზე გამმართველის და ინვერტორების რეჟიმში - 9 KV (ხაზური ძაბვა);

6. საკუთარი მოხმარების კვების ქსელის ძაბვა და სიხშირე,  $V - 3X220$  ან  $3 X 380$ ;  $Hz - 50$ ;

7. მართვის სისტემის მიერ მოთხოვნილი სიმძლავრე, KVA- 3;

8. ინვერტორი კომპლექტდება ტირისტორებით, რომლებსაც

$$dv/dt \geq 100 \text{ v}/\mu\text{s}; \quad t \text{ გამორთვის} \leq 100 \mu\text{s};$$

$$di/dt \geq 40 \text{ A}/\mu\text{s};$$

9. გამმართველი კომპლექტდება БЛ-200 ტიპის ვენტილებით არა უმცირესი მე-8 კლასისა.

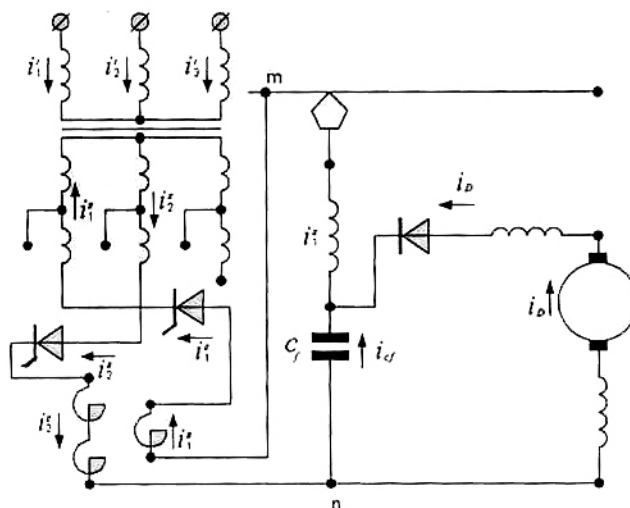
ემშ-ის რეკუპერაციული დამუხრუჭებისას ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესების გაანგარიშებისათვის აუცილებელია ნახ. 22, 23-ის საფუძველზე შედგეს დიფერენციალური განტოლებათა სისტემები დროის როგორც არასაკომუტაციო, ასევე კომუტაციური ინტერვალებში ტრანზისტორული გასაღებების მდგომარეობათა გათვალისწინებით.

ნახაზზე ნაჩვენებია სქემებისათვის გვაქვს შემდეგი თანაფარდობანი:

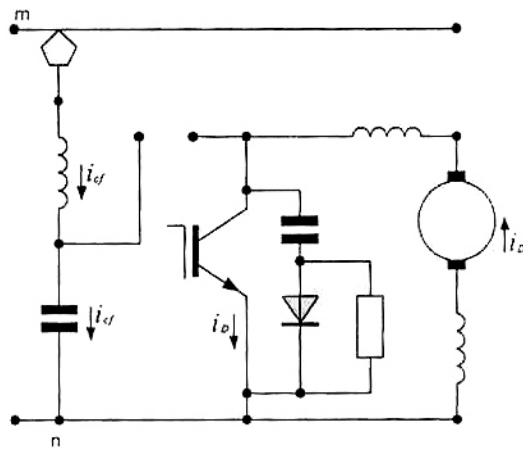
$$t_{n-1} = \frac{1}{\omega} (n-1) \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \quad \text{დან} \quad t_n = \frac{1}{\omega} n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \text{-მდე}$$

არასაკომუტაციო ინტერვალში ხორციელდება.

ა) ემშ-ის რეკუპერაციული დამუხრუჭება 37-ტრანზისტორის გამორთვისას (ნახ. 22 ა) და ჩართვისას (ნახ. 22, ბ).



ა)



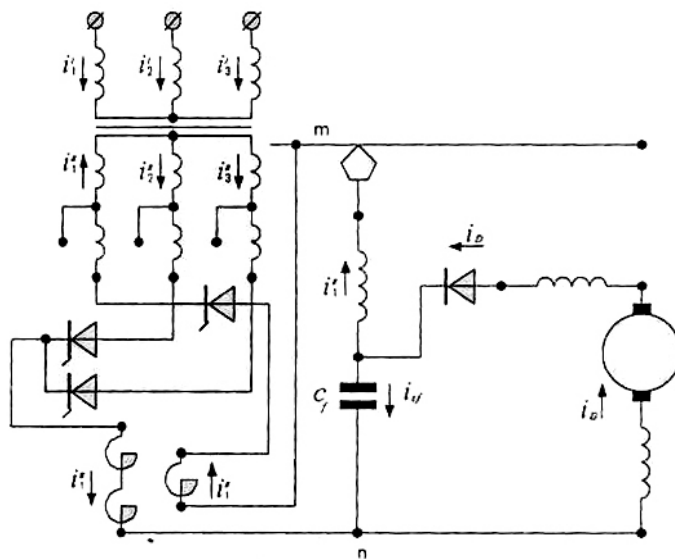
ბ)

**ნახ. 22.** გარდამქმნელი სისტემის საანგარიშო სქემა ემშ-ის რეკუპერაციული დამუხრუჭებისას დროის არა საკომუტაციო ინტერვალებში.

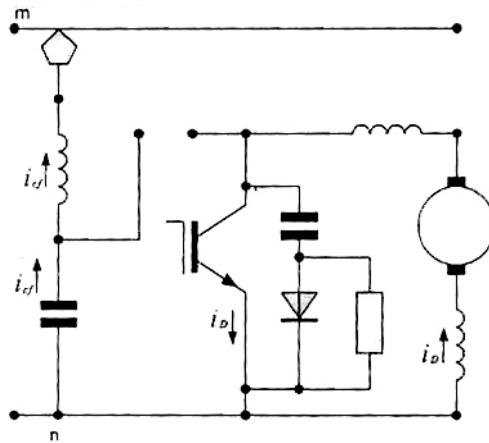
დროის  $t_n = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \right]$ -დან  $t_{n+1} = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) + \gamma \right]$ -მდე ინტერვალებში

ხორციელდება.

ბ) ემშ-ის რეკუპერაციული დამუხრუჭება 37-ტრანზისტორის გამორთვისას (ნახ.23, ა) და ჩართვისას (ნახ. 23, ბ).



ა)



ბ)

**ნახ. 23.** გარდამქმნელი სისტემის საანგარიშო სქემა ემშ-ის რეკუპერაციული დამუხრუჭებისას დროის კომუტაციურ ინტერვალებში.

თითოეული საანგარიშო სქემისათვის (ნახ. 22, 23) შედგება ცვლადების მყისა მნიშვნელობების მიმართ ელექტრული წონასწორობის განტოლებები. განტოლებებში გაითვალისწინება ძრავის ღუზის ექვივალენტური მექანიკური ტევადობა მუდმივი დენის ძრავის სიჩქარის გარდამავალი პროცესისას. ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის გამოყენებით საწყისი განტოლებები გარდაიქმნება რეზულტირებული კომპლექსური საგრაგნილე დენების მიმართ კომპლექსურ განტოლებებად. ამ შემთხვევაში განტოლებათა რიცხვი შემცირდება წევის ტრანსფორმატორის გრაგნილების რიცხვამდე. ცვლადთა უკუგარდაქმნის მატრიცა საშუალებას მოგვცემს განისაზღვროს ფაზური სიდიდეების მყისა მნიშვნელობები [6,36].

კომპლექსური განტოლებათა სისტემიდან მივიღებთ სკალარულ განტოლებათა სისტემას ცვლადების ნამდვილი და წარმოსახვითი მდგენელების მიმართ ამოცანის კომპიუტერული მოდელირების მეთოდით შემდგომი ამოხსნისათვის:



$$\left[ \sum u_k \right] = [L_k] \cdot [dI_k / dt], \quad (148)$$

სადაც (148)-ში  $\left[ \sum u_k \right]$  - წრედის ექვივალენტურ წინაღობებზე დაბრუნება ვარდნების ჯამის მატრიცაა;  $[L_k]$  - ექვივალენტური ინდუქციურობების და ურთიერთინდუქციურობების მატრიცაა;  $[dI_k / dt]$  - d,q კოორდინატებში რეზულტირებული დენების წარმოებულების მატრიცაა.

(148)-დან მიიღება  $[I_k]$  დენების მატრიცების გამოსახულებები დროის არასაკომუტაციო განზოგადოებულ  $t_{n-1}$ -დან  $t_n$ -მდე ინტერვალისათვის:

$$I_k = \int_{t_{n-1}}^{t_n} [L_k]^{-1} \left[ \sum u_k \right] dt + I_k(0), \quad (149)$$

და  $t_n$ -დან  $t_{n+1}$ -მდე დროის კომუტაციური ინტერვალში:

$$I_K = \int_{t_n}^{t_{n+1}} \int_{t_{n-1}}^{t_n} [L_k]^{-1} \left[ \sum u_k \right] dt + I_k(0) \quad (150)$$

სადაც (149), (150)-ში  $[L_k]^{-1}$  - ექვივალენტური ინდუქციურობების და ურთიერთინდუქციურობების შებრუნებული მატრიცებია;  $I_k(0)$  - d,q კოორდინატებში  $t=t_{n-1}$  არასაკომუტაციო და  $t=t_n$  კომუტაციური ინტერვალის დასაწყისში შესაბამისი რეზულტირებული დენების საწყისი მნიშვნელობებია.

ცვლადთა უკუგარდაქმნის მატრიცა საშუალებას მოგვცემს განისაზღვროს ფაზური სიდიდეების მყისა მნიშვნელობები d,q კოორდინატებში რეზულტირებული დენების მიმართ:

$$[i_K] = [\mu_K (I_{dk} \cos \alpha_k + I_{qk} \sin \alpha_k)] \quad (151)$$

(150), (151) გამოსახულებების საფუძველზე შეიძლება შედგეს გარდამქმნელი სისტემის გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა [31,32,33].

მიღებული სტრუქტურული მოდელი საშუალებას მოგვცემს გამოვიკვლიოთ და გავიანგარიშოთ ოთხ ძირითად მუშაობის რეჟიმში (ნახ. 22,23) ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური გარდამავალი პროცესები განზოგადოებულ არა საკომუტაციო  $t_{n-1}$  -დან  $t_n$  - მდე და კომუტაციური  $t_n$ -დან  $t_{n+1}$  -მდე დროის ინტერვალებში.

გარდამქმნელი სისტემის მუშა ციკლი შეიძლება წარმოდგენილი იქნას, როგორც დროის არასაკომუტაციო და კომუტაციური ინტერვალების მონაცვლეობა [ 36].

**თავი IV. წევის ქვესადგურის სამფაზა ბოგური  
გამმართველ-ინვერტორული მოდერნიზებული ერთიანი  
გარდაქმნელი სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი  
და კომუტაციური პროცესების მათემატიკური და  
კომპიუტერული მოდელირება.**

4.1. მატარებლის გაშვებისა და წევის რეჟიმებში პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება არასაკომუტაციო დროის ინტერვალებში, ა,ბ - როცა ტრანზისტორული გასაღები-35 ჩართულია და გ,დ- როცა ტრანზისტორული გასაღები-35 გამორთულია.

ა) მათემატიკური მოდელირება  $t_{n-1} = \frac{1}{\omega} (n-1) \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \leq t \leq \tau_1$  დროის ინტერვალებში (ნახ.20.ა)

ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის საფუძველზე შედგენილ კომპლექსურ განტოლებათა სისტემას რეზულტირებული დენების მიმართ აქვს შემდეგი სახე [46-48]:

$$\frac{3}{2} U_m e^{j(\omega t + \varphi_0)} = R^I i^I + \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \frac{di^I}{dt} + \frac{3}{2} \sqrt{3} M^{12} e^{-j\frac{\pi}{6}} \frac{di_1^{II}}{dt} \quad (152)$$

$$0 = R_{\text{ქქ}}^{II} i_1^{II} + L_{\text{ქქ}}^{II} \frac{di_1^{II}}{dt} + \frac{1}{c_{\text{ც}} \tau_1} \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} i_1^{II} dt - \frac{\sqrt{3}}{2} M^{12} e^{-j\frac{5\pi}{6}} \frac{di^I}{dt} - \frac{\sqrt{3}}{2} M^{12} e^{j\frac{5\pi}{6}} \frac{dI^{*I}}{dt} \quad (153)$$

სადაც:

$$R_{\text{ქქ}}^{II} = R^{II} + 3R + 2R_1 + R_{\text{ძრ}}; \quad L_{\text{ქქ}}^{II} = L_s^{II} + 3L + 2L_1 + L_{\text{ძრ}} \quad (154)$$

მიღებული (152), (153) განტოლებათა სისტემიდან ვღებულობთ დენების  $d$ ,  $q$  მდგენელების მიმართ შემდეგ მატრიცულ განტოლებათა სისტემას:

$$\begin{pmatrix} \frac{3}{2}U_m \cos(\omega t + \varphi_0) - R^I I_d^I \\ \frac{3}{2}U_m \cos(\omega t + \varphi_0) - R^I I_q^I \\ -R_{\text{ჰჰჰ}}^{II} i_1^{II} - \frac{1}{c_{\text{ღ}}} \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} i_1^{II} dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s^I + \frac{3}{2}M^I & 0 & \frac{9}{4}M^{12} \\ 0 & L_s^I + \frac{3}{2}M^I & \frac{3}{4}\sqrt{3}M^{12} \\ \frac{3}{2}M^{12} & -\frac{\sqrt{3}}{2}M^{12} & L_{\text{ჰჰჰ}}^{II} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} dI_d^I / dt \\ dI_q^I / dt \\ di_1^{II} / dt \end{pmatrix} \quad (155)$$

ბ) კომპიუტერული მოდელირება  $t_{n-1} = \frac{1}{\omega}(n-1)\left(\frac{\pi}{3} - \gamma\right) \leq t \leq \tau_1$

დროის ინტერვალში(ნახ.20.ა)

(155) განტოლებათა სისტემის ამოხსნა დენების წარმოებულების მიმართ გვაძლევს შემდეგ მატრიცულ გამოსახულებებს:

$$\begin{pmatrix} dI_d^I / dt \\ dI_q^I / dt \\ di_1^{II} / dt \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} -\frac{2}{3}a \cdot R^I & \frac{2}{3}b \cdot R^I & c \cdot R_{\text{ჰჰჰ}}^{II} & \frac{c}{c_{\text{ღ}}} \\ -\frac{2}{3}b \cdot R^I & -\frac{2}{3}d \cdot R^I & \frac{\sqrt{3}}{3}c \cdot R_{\text{ჰჰჰ}}^{II} & \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{c}{c_{\text{ღ}}} \\ \frac{2}{3}c \cdot R^I & -\frac{2\sqrt{3}}{9}c \cdot R^I & -\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{c^2}{b} \cdot R_{\text{ჰჰჰ}}^{II} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{c^2}{b} \cdot \frac{1}{c_{\text{ღ}}} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I_d^I \\ I_q^I \\ i_1^{II} \\ \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} i_1^{II} dt \end{pmatrix} + \frac{U_m}{\Delta} \begin{pmatrix} \sqrt{a^2 + b^2} \cos\left(\omega t + \varphi_0 + \arctg \frac{b}{a}\right) \\ \sqrt{a^2 + b^2} \cos\left(\omega t + \varphi_0 - \arctg \frac{b}{d}\right) \\ -1,15c \cos\left(\omega t + \varphi_0 + \arctg \frac{\sqrt{3}}{3}\right) \end{pmatrix} \quad (156)$$

სადაც (156)-ში ექვივალენტური კოეფიციენტებისათვის გვაქვს წრედის პარამეტრებზე დამოკიდებული შემდეგი გამოსახულებები:

$$a = \frac{b}{\sqrt{3}} + \frac{2}{3} \cdot \frac{CL_{\text{მმ}}^{II}}{M^{12}}; \quad b = \frac{27\sqrt{3}}{16} (M^{12})^2; \quad c = \frac{9}{4} M^{12} \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right);$$

$$d = \frac{2}{3} \cdot \frac{c}{M^{12}} \cdot L_{\text{მმ}}^{II} - \sqrt{3}b; \quad \Delta = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{c^2}{b} \cdot L_{\text{მმ}}^{II} - \frac{64}{243} \cdot \frac{bc}{M^{12}} \quad (157)$$

(156)-დან თითოეული დენებისათვის ვღებულობთ შემდეგ ინტეგრალურ გამოსახულებებს შესაბამისი საწყისი დენების გათვალისწინებით:

$$I_d^I = \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} \left[ -\frac{2}{3} \cdot \frac{a}{\Delta} R^I I_d^I + \frac{2}{3} \cdot \frac{b}{\Delta} R^I I_q^I + \frac{c}{\Delta} R_{\text{მმ}}^{II} i_1^{II} + \frac{c}{\Delta} \frac{1}{c_{\text{ც}} t_{n-1}} \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} i_1^{II} dt + \right. \\ \left. + \frac{U_m}{\Delta} \sqrt{a^2 + b^2} \cos \left( \omega t + \varphi_0 + \arctg \frac{b}{a} \right) \right] dt + I_d^I(0)$$

(158)

$$I_q^I = \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} \left[ -\frac{2}{3} \cdot \frac{b}{\Delta} R^I I_d^I - \frac{2}{3} \cdot \frac{d}{\Delta} R^I I_q^I + \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{c}{\Delta} R_{\text{მმ}}^{II} i_1^{II} + \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{c}{\Delta} \frac{1}{c_{\text{ც}} t_{n-1}} \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} i_1^{II} dt + \right. \\ \left. + \frac{U_m}{\Delta} \sqrt{a^2 + b^2} \cos \left( \omega t + \varphi_0 - \arctg \frac{b}{d} \right) \right] dt + I_q^I(0)$$

(159)

$$i_1^{II} = \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} \left[ \frac{2}{3} \cdot \frac{c}{\Delta} R^I I_d^I - \frac{2\sqrt{3}}{9} \cdot \frac{c}{\Delta} R^I I_q^I - \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{c^2}{\Delta \cdot b} R_{\text{მმ}}^{II} i_1^{II} - \right. \\ \left. - \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{c^2}{\Delta \cdot b} \frac{c}{c_{\text{ც}} t_{n-1}} \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} i_1^{II} dt - 1,15 \frac{c}{\Delta} U_m \cos \left( \omega t + \varphi_0 + \arctg \frac{\sqrt{3}}{3} \right) \right] dt + \\ + i_1^{II}(0)$$

(160)

$$i_k^I = \frac{2}{3} \left( I_d^I \cos \alpha_k^I + I_q^I \sin \alpha_k^I \right), \quad (k = 1, 2, 3) \quad (161)$$

დროის  $t_{n-1} = \frac{1}{\omega} (n-1) \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right)$  -დან,  $\tau_1$ -მდე ინტერვალში

გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემის აგებისათვის (158)-(160) გამოსახულებებში შემოვიღოთ აღნიშვნები:

$$\begin{aligned}
\varphi_d^I &= \arctg \frac{b}{a}; & \varphi_q^I &= \arctg \frac{b}{d}; & \varphi_1^{II} &= \arctg \frac{\sqrt{3}}{3}; \\
a_1 &= \frac{2}{3} \frac{a}{\Delta} R^I; & a_2 &= \frac{2}{3} \frac{b}{\Delta} R^I; & a_3 &= \frac{c}{\Delta} R_{\text{ძძ3}}^{II}; & a_4 &= \frac{c}{\Delta} \frac{1}{c_{\text{გ}}}; \\
a_5 &= \frac{1}{\Delta} \sqrt{a^2 + b^2}; & b_1 &= a_2; & b_2 &= \frac{2}{3} \cdot \frac{d}{\Delta} R^I; & b_3 &= \frac{\sqrt{3}}{3} a_3; & b_4 &= \frac{\sqrt{3}}{3} a_4 \\
b_5 &= \frac{1}{\Delta} \sqrt{a^2 + b^2}; & c_1 &= \frac{2}{3} \cdot \frac{c}{\Delta} R^I; & c_2 &= \frac{\sqrt{3}}{3} c_1; & c_3 &= \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{c^2}{\Delta \cdot b} R_{\text{ძძ3}}^{II}; \\
c_4 &= \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{c^2}{\Delta \cdot b} \cdot \frac{1}{c_{\text{გ}}}; & c_5 &= 1,15 \cdot \frac{c}{\Delta}
\end{aligned} \tag{162}$$

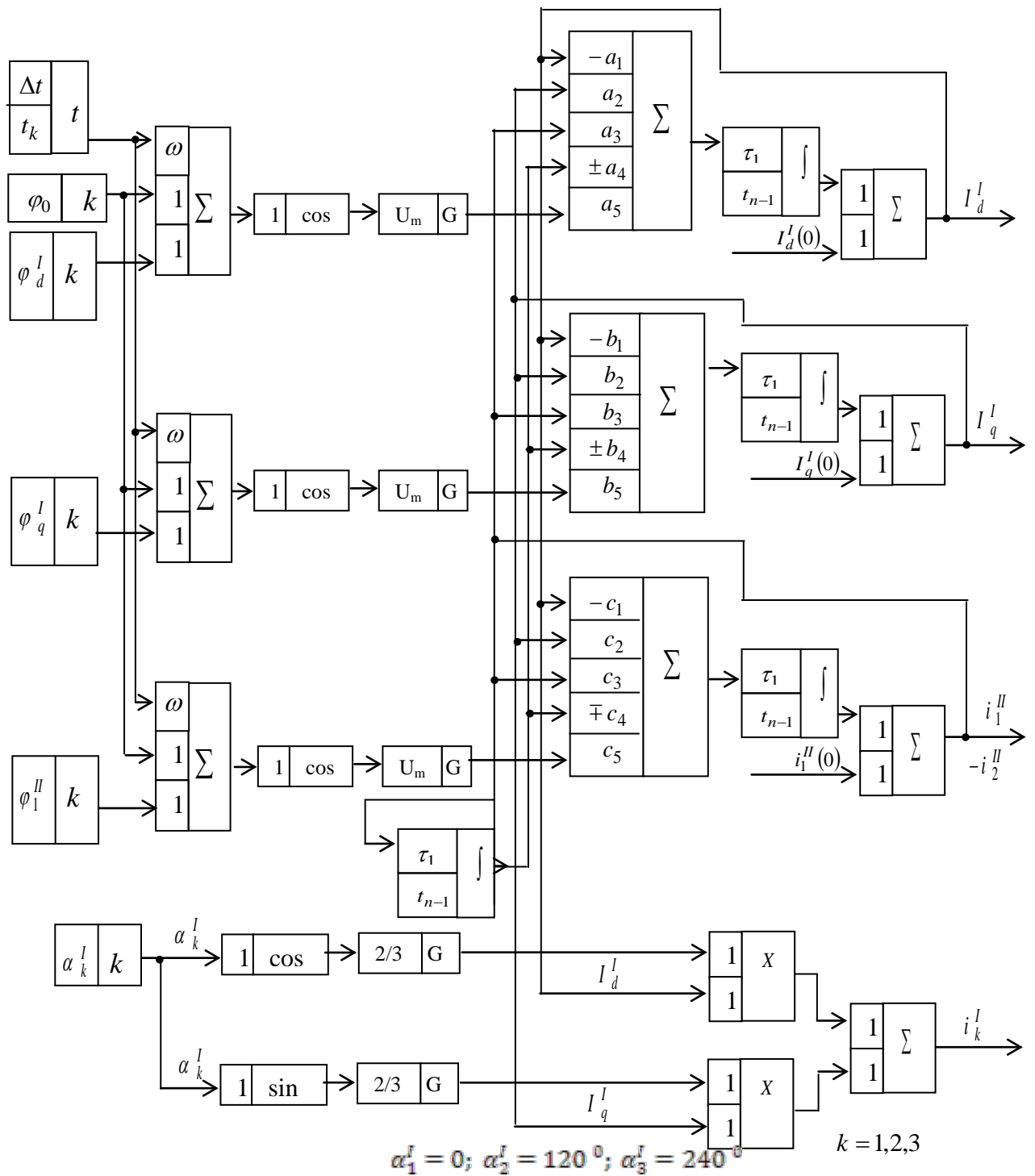
(162)-ის გათვალისწინება (158)-(160)-ში მოგვცემს:

$$\begin{aligned}
I_d^I &= \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} \left[ -a_1 \cdot I_d^I + a_2 \cdot I_q^I + a_3 \cdot i_1^{II} + a_4 \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} i_1^{II} dt + \right. \\
&\quad \left. + a_5 U_m \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_d^I) \right] dt + I_d^I(0)
\end{aligned} \tag{163}$$

$$\begin{aligned}
I_q^I &= \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} \left[ -b_1 \cdot I_d^I + b_2 \cdot I_q^I + b_3 \cdot i_1^{II} + b_4 \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} i_1^{II} dt - \right. \\
&\quad \left. - b_5 U_m \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_d^I) \right] dt + I_q^I(0)
\end{aligned} \tag{164}$$

$$\begin{aligned}
i_1^{II} &= \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} \left[ c_1 \cdot I_d^I - c_2 \cdot I_q^I - c_3 \cdot i_1^{II} - c_4 \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} i_1^{II} dt - \right. \\
&\quad \left. - c_5 U_m \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_1^{II}) \right] dt + I_1^{II}(0)
\end{aligned} \tag{165}$$

ქვემოთ ნაჩვენებია (163)-(165) და (161) გამოსახულებების საფუძველზე აგებული წევის ტრანსფორმატორის რეზულტირებული კომპლექსური დენების  $d$ ,  $q$  მდგენელებისა და ფაზური დენების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა(ნახ.24).



ნახ. 24. წევის ტრანსფორმატორის რეზულტირებული კომპლექსური დენების  $d, q$  მდგენელებისა და ფაზური დენების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა დროის  $t_{n-1} \leq t \leq \tau_1$  და  $\tau_1 \leq t \leq t_n$  ინტერვალებში (ნახ. 20 –ა და ნახ. 20-ბ-ს მიხედვით)

აღნიშნული სქემა წარმოადგენს კომპიუტერულ ტექნოლოგიებთან თავსებად ვირტუალურ მოდელს.

გ) მათემატიკური მოდელირება  $\tau_1 \leq t \leq t_n = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \right]$  დროის

ინტერვალში (ნახ. 20-ბ)

ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის საფუძველზე შედგენილ კომპლექსურ განტოლებათა სისტემას რეზულტირებული დენების მიმართ აღნიშნულ ინტერვალში აქვს შემდეგი სახე:

$$\frac{3}{2} U_m e^{j(\omega t + \varphi_0)} = R^I i^I + \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \frac{di^I}{dt} + \frac{3}{2} \sqrt{3} M^{12} e^{-j\frac{\pi}{6}} \frac{di_1^{II}}{dt} \quad (166)$$

$$0 = R_{\text{გვ3}}^{II} i_1^{II} + L_{\text{გვ3}}^{II} \frac{di_1^{II}}{dt} - \frac{1}{c_f} \int_{\tau_1}^{t_n} i_1^{II} dt - \frac{\sqrt{3}}{2} M^{12} e^{-j\frac{5\pi}{6}} \frac{di^I}{dt} - \frac{\sqrt{3}}{2} M^{12} e^{j\frac{5\pi}{6}} \frac{dI^{*I}}{dt} \quad (167)$$

(166), (167) კომპლექსურ განტოლებებიდან ვღებულობთ სკალარულ განტოლებათა სისტემას  $d, q$  მდგენელების მიმართ:

$$\begin{pmatrix} \frac{3}{2} U_m \cos(\omega t + \varphi_0) - R^I I_d^I \\ \frac{3}{2} U_m \sin(\omega t + \varphi_0) - R^I I_q^I \\ - R_{\text{გვ3}}^{II} i_1^{II} + \frac{1}{c_f} \int_{\tau_1}^{t_n} i_1^{II} dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s^I + \frac{3}{2} M^I & 0 & \frac{9}{4} M^{12} \\ 0 & L_s^I + \frac{3}{2} M^I & \frac{3}{4} \sqrt{3} M^{12} \\ \frac{3}{2} M^{12} & -\frac{\sqrt{3}}{2} M^{12} & L_{\text{გვ3}}^{II} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} dI_d^I / dt \\ dI_q^I / dt \\ di_1^{II} / dt \end{pmatrix} \quad (168)$$

სადაც ამ ინტერვალში

$$R_{\text{გვ3}}^{II} = 3R + R_1 + R^{II}; \quad L_{\text{გვ3}}^{II} = L_s^{II} + 3L + L_1; \quad (169)$$



დ) კომპიუტერული მოდელირება  $\tau_1 \leq t \leq t_n = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \right]$  დროის

ინტერვალში(ნახ. 20-ბ)

(168) მატრიცული განტოლებათა სისტემის ამოხსნა დენების წარმოებულების მიმართ გვაძლევს შემდეგ მატრიცულ გამოსახულებებს:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} dI_d^I/dt \\ dI_q^I/dt \\ di_1^{II}/dt \end{pmatrix} &= \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} -\frac{2}{3}a \cdot R^I & \frac{2}{3}b \cdot R^I & c \cdot R_{\text{მძ}}^{II} & \frac{c}{c_f} \\ -\frac{2}{3}b \cdot R^I & -\frac{2}{3}d \cdot R^I & \frac{\sqrt{3}}{3}c \cdot R_{\text{მძ}}^{II} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{c}{c_f} \\ \frac{2}{3}c \cdot R^I & -\frac{2\sqrt{3}}{9}c \cdot R^I & -\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{c^2}{b} \cdot R_{\text{მძ}}^{II} & \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{c^2}{b} \cdot \frac{1}{c_f} \end{pmatrix} \times \\ &\times \begin{pmatrix} I_d^I \\ I_q^I \\ i_1^{II} \\ \int_{\tau_1}^{t_n} i^{II} dt \end{pmatrix} + \frac{U_m}{\Delta} \begin{pmatrix} \sqrt{a^2 + b^2} \cos\left(\omega t + \varphi_0 + \arctg \frac{b}{a}\right) \\ \sqrt{a^2 + b^2} \cos\left(\omega t + \varphi_0 - \arctg \frac{b}{d}\right) \\ -1,15c \cos\left(\omega t + \varphi_0 + \arctg \frac{\sqrt{3}}{3}\right) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (170)$$

სადაც (170) –ში შემავალი კოეფიციენტები განისაზღვრებიან (157) გამოსახულებით.

(170) –ში შემოვიღოთ ზუსტად (162)–ის ანალოგიური აღნიშვნები და თითოეული დენებისათვის აღნიშნულ ინტერვალში ვღებულობთ შემდეგ გამოსახულებებს:

$$\begin{aligned} I_d^I &= \int_{\tau_1}^{t_n} \left[ -a_1 I_d^I + a_2 I_q^I + a_3 i_1^{II} + a_4 \int_{\tau_1}^{t_n} i_1^{II} dt + \right. \\ &\quad \left. + a_5 U_m \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_d^I) \right] dt + I_d^I(0) \end{aligned} \quad (171)$$

$$\begin{aligned} I_q^I &= \int_{\tau_1}^{t_n} \left[ -b_1 I_d^I - b_2 I_q^I + b_3 i_1^{II} + b_4 \int_{\tau_1}^{t_n} i_1^{II} dt + \right. \\ &\quad \left. + b_5 U_m \cos(\omega t + \varphi_0 - \varphi_q^I) \right] dt + I_q^I(0) \end{aligned} \quad (172)$$

$$i_1^{II} = \int_{\tau_1}^{t_n} \left[ c_1 I_d^I - c_2 I_q^I - c_3 i_1^{II} + c_4 \int_{\tau_1}^{t_n} i_1^{II} dt - c_5 U_m \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_1^{II}) \right] dt + i_1^{II}(0) \quad (173)$$

$$i_k^I = \frac{2}{3} \left( I_d^I \cos \alpha_k^I + I_q^I \sin \alpha_k^I \right), \quad (k = 1, 2, 3) \quad (174)$$

ნახ. 20,ბ-ს მიხედვით წვევის ძრავის ჩაკეტილი კონტურისათვის გვაქვს მდგომარეობათა შემდეგი განტოლებები:

$$e_{\text{ვ}} = \frac{1}{c_{\text{ვ}} \tau_1} \int_{\tau_1}^{t_n} i_{\text{ძრ}} dt + e_{\text{ვ}}(0) \quad (175)$$

$$i_{\text{ძრ}} = \int_{\tau_1}^{t_n} \left[ -\frac{e_{\text{ვ}}}{L_1 + L_{\text{ძრ}}} - \frac{(R_1 + R_{\text{ძრ}}) i_{\text{ძრ}}}{L_1 + L_{\text{ძრ}}} \right] dt + i_{\text{ძრ}}(0) \quad (176)$$

მიღებული (171)-(176) გამოსახულებები საშუალებას იძლევიან აგებული იქნას აღნიშნულ ინტერვალებში გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა. აგებული სქემა ანალოგიურია წინა ინტერვალში აგებული სტრუქტურული სქემისა (ნახ. 24). განსხვავება მდგომარეობს მხოლოდ იმაში რომ: წინა ინტერვალში  $a_4$  და  $b_4$  აღებულია დადებითი ნიშნით და  $c_4$  აღებულია უარყოფითი ნიშნით; ხოლო ამ მიმდინარე ინტერვალებში კი  $a_4$  და  $b_4$  კოეფიციენტები აღებულია უარყოფითი ნიშნით და  $c_4$  კოეფიციენტი აღებულია დადებითი ნიშნით (ნახ. 24).

(175),(176) გამოსახულებების საფუძველზე გვაქვს მუდმივი დენის წვევის ძრავის ღუზის ძაბვისა და ღუზაში გამავალი დენის გარდამავალი პროცესების მოდელის შემდეგი სტრუქტურული სქემა(ნახ. 25).

4.2 მატარებლის გაშვებისა და წევის რეჟიმებში პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება კომპუტაციური დროის ინტერვალებში, ა, ბ, - როცა ტრანზისტორული გასაღები- 35 ჩართულია (ნახ.21,ა) და გ, დ - როცა ტრანზისტორული გასაღები-35 გამორთულია (ნახ.21,ბ).

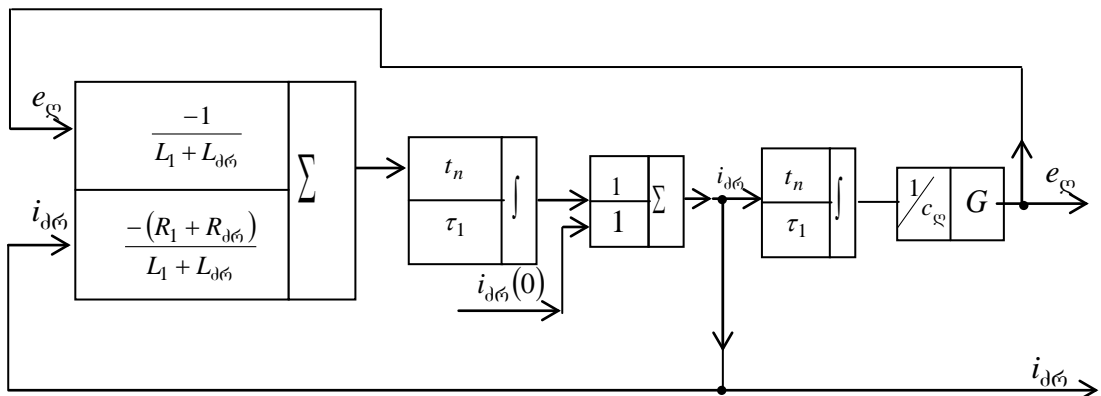
ა) მათემატიკური მოდელირება  $t_n = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \right] \leq t \leq \tau_2$  დროის ინტერვალებში (ნახ.21,ა)

მაბვებისა და დენის მყისა მნიშვნელობების მიმართ გვაქვს შემდეგი გამოსახულებები [48]:

$$u_2^{II} = u_3^{II}; \quad u_d = u_1^{II} - u_2^{II} = u_1^{II} - u_3^{II}$$

$$\dot{U}^{II} = u_d e^{j\alpha_1^{II}}; \quad i_1^{II} e^{j\alpha_1^{II}} = \frac{1}{3} \left( \dot{I}^{II} + e^{j2\alpha_1^{II}} I^{*II} \right)$$

(177)



ნახ.25 წევის ძრავის ლუზაში მაბვისა და დენის გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა  $\tau_1 \leq t \leq t_n$  დროის ინტერვალებში.

ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის საფუძველზე შედგენილ კომპლექსურ განტოლებათა სისტემას რეზულტირებული დენების მიმართ აღნიშნულ ინტერვალში აქვს შემდეგი სახე:

$$\frac{3}{2}U_m e^{j(\omega t + \varphi_0)} = R^I i^I + \frac{d\psi^I}{dt} \quad (178)$$

$$0 = \left[ R^{II} + \frac{2}{3}(3R + 2R_1 + R_{d\sigma}) \right] i^{II} + \frac{2}{3}(3R + 2R_1 + R_{d\sigma}) e^{j2\alpha_1^{II}} I^{*II} + \frac{2}{3}(3L + 2L_1 + L_{d\sigma} + L_s^{II}) \frac{di^{II}}{dt} + \frac{2}{3}(3L + 2L_1 + L_{d\sigma} + L_s^{II}) e^{j2\alpha_1^{II}} \frac{dI^{II}}{dt} + \frac{1}{c_{\Sigma}} \int \frac{\tau_2}{t_n} \frac{1}{3} \left( i^{II} + e^{j2\alpha_1^{II}} I^{*II} \right) dt + \frac{d\psi^{II}}{dt} \quad (179)$$

$$\psi^I = \left( L_s^I + \frac{3}{2}M^{12} \right) i^I + \frac{3}{2}M^{12} i^{II} \quad (180)$$

$$\psi^{II} = \left( L_s^{II} + \frac{3}{2}M^{12} \right) i^{II} + \frac{3}{2}M^{12} i^I \quad (181)$$

$$\left. \begin{aligned} \psi^I &= \sum_{k=1}^3 \psi_k^I e^{j\alpha_k^I}; & \psi^{II} &= \sum_{k=1}^3 \psi_k^{II} e^{j\alpha_k^{II}}; \\ i^I &= \sum_{k=1}^3 i_k^I e^{j\alpha_k^I}; & i^{II} &= \sum_{k=1}^3 i_k^{II} e^{j\alpha_k^{II}}; \\ I^{*I} &= \sum_{k=1}^3 \psi_k^I e^{j\alpha_k^I}; & I^{*II} &= \sum_{k=1}^3 i_k^{II} e^{-j\alpha_k^{II}}; \end{aligned} \right\} \quad (182)$$

(178)-(182)-დან შეიძლება მიღებულ იქნას დენების მდგენელების მიმართ სკალარული განტოლებები მატრიცულ ფორმაში:

$$\begin{pmatrix} \frac{3}{2}U_m \cos(\omega t + \varphi_0) - R^I I_d^I \\ \frac{3}{2}U_m \sin(\omega t + \varphi_0) - R^I I_q^I \\ -\frac{1}{c_{\Sigma}} \int \frac{\tau_2}{t_n} \frac{2}{3} I_d^{II} dt - R_d^{II} I_q^{II} \\ -R^I I_q^{II} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_d^I & 0 & \frac{3}{2}M^{12} & 0 \\ 0 & L_d^I & 0 & \frac{3}{2}M^{12} \\ \frac{3}{2}M^{12} & 0 & L_q^{II} & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M^{12} & 0 & L_q^{II} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} dI_d^I / dt \\ dI_q^I / dt \\ dI_d^{II} / dt \\ dI_q^{II} / dt \end{pmatrix} \quad (183)$$

სადაც, (183)-ში ექვივალენტური პარამეტრებისათვის გვაქვს:

$$R_d^{II} = R^{II} + \frac{4}{3}(3R + 2R_1 + R_{\text{დრ}}); \quad L_d^{II} = L_s^{II} + \frac{3}{2}M^{II} + \frac{4}{3}(3L + 2L_1 + L_{\text{დრ}}) \quad (184)$$

$$L_d^I = L_s^I + \frac{3}{2}M^I; \quad L_q^{II} = L_s^{II} + \frac{3}{2}M^{II} \quad (185)$$

წევის ტრანსფორმატორის ფაზური დენებისთვის გვაქვს

შემდეგი გამოსახულებები:

$$i_k^I = \frac{2}{3}(I_d^I \cos \alpha_k^I + I_q^I \sin \alpha_k^I), \quad (k = 1, 2, 3) \quad (186)$$

$$i_k^{II} = \frac{2}{3}(I_d^{II} \cos \alpha_k^{II} + I_q^{II} \sin \alpha_k^{II}), \quad (k = 1, 2, 3) \quad (187)$$

ბ) კომპიუტერული მოდელირება  $t_n = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \right] \leq t \leq \tau_2$  დროის

ინტერვალში (ნახ.21,ა)

(183) მატრიცულ განტოლებათა სისტემის ამოხსნა დენების  $d$ ,  $q$  მდგენელების წარმოებულების მიმართ გვაძლევს შემდეგ მატრიცულ გამოსახულებებს:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} dI_d^I/dt \\ dI_q^I/dt \\ dI_d^{II}/dt \\ dI_q^{II}/dt \end{pmatrix} &= \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} -a_1 & 0 & a_2 & 0 & a_3 \\ 0 & -b_1 & 0 & b_2 & 0 \\ c_1 & 0 & c_2 & 0 & -c_3 \\ 0 & d_1 & 0 & d_2 & -d_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_d^I \\ I_q^I \\ I_d^{II} \\ I_q^{II} \\ \int_{t_n}^{\tau_2} I_d^{II} dt \end{pmatrix} + \\ &+ U_m \begin{pmatrix} a_4 \cos(\omega t + \varphi_0) \\ b_3 \sin(\omega t + \varphi_0) \\ -c_4 \cos(\omega t + \varphi_0) \\ -d_3 \sin(\omega t + \varphi_0) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (188)$$

სადაც (188)-ში ექვივალენტური კოეფიციენტებისათვის გვაქვს:

$$a_1 = k_d^I R^I / L_d^I; \quad a_2 = \frac{3}{2} k_d^I R^I / L_d^I; \quad a_3 = k_d^{II} / L_d^I \cdot c_{\text{ვ}}; \quad a_4 = \frac{3}{2} k_d^I / L_d^I;$$

$$b_1 = k_q^I R^I / L_d^I; \quad b_2 = \frac{3}{2} k_q^{II} R^I / L_d^I; \quad b_3 = \frac{3}{2} k_q^I / L_d^I; \quad a_4 = \frac{3}{2} k_d^I / L_d^I;$$

$$c_1 = \frac{3}{2} k_d^{II} \cdot R^I / L_d^I; \quad c_2 = k_{d1}^{II} \cdot R_d^{II} / L_d^I; \quad c_3 = \frac{3}{2} k_{d1}^{II} / L_d^I \cdot c_{\text{ვ}}; \quad c_4 = \frac{9}{4} k_d^{II} / L_d^I$$

$$d_1 = \frac{3}{2} k_q^{II} \cdot R^I / L_d^I; \quad d_2 = k_{q1}^{II} \cdot R^I / L_d^I; \quad d_3 = \frac{9}{4} k_d^{II} / L_d^I$$

(189)

$$k_d^I = L_d^{II} / \left[ L_d^{II} - \left( \frac{3}{2} M^{12} \right)^2 / L_d^I \right]; \quad k_d^I = M^{12} / \left[ L_d^{II} - \left( \frac{3}{2} M^{12} \right)^2 / L_d^I \right]$$

$$k_q^I = L_q^{II} / \left[ L_q^{II} - \left( \frac{3}{2} M^{12} \right)^2 / L_d^I \right]; \quad k_q^I = M^{12} / \left[ L_q^{II} - \left( \frac{3}{2} M^{12} \right)^2 / L_d^I \right]$$

$$k_{d1}^{II} = L_d^I / \left[ L_d^{II} - \left( \frac{3}{2} M^{12} \right)^2 / L_d^I \right]; \quad k_{q1}^{II} = L_d^I / \left[ L_d^{II} - \left( \frac{3}{2} M^{12} \right)^2 / L_{d1}^I \right]$$

(190)

(188)-დან თითოეული დენებისათვის გვაქვს შემდეგი ინტეგრალური გამოსახულებები:

$$I_d^I = \int_{t_n}^{\tau_2} \left[ -a_1 I_d^I + a_2 I_d^I + a_3 \int_{t_n}^{\tau_2} I_d^{II} dt + a_4 U_m \cos(\omega t + \varphi_0) \right] dt + I_d^I(0) \quad (191)$$

$$I_q^I = \int_{t_n}^{\tau_2} \left[ -b_1 I_q^I + b_2 I_q^{II} + b_3 U_m \sin(\omega t + \varphi_0) \right] dt + I_q^I(0) \quad (192)$$

$$I_d^{II} = \int_{t_n}^{\tau_2} [c_1 I_d^I + c_2 I_d^{II} - c_3 \int_{t_n}^{\tau_2} I_d^{II} dt - c_4 U_m \cos(\omega t + \varphi_0)] dt + I_d^{II}(0) \quad (193)$$

$$I_d^I = \int_{t_n}^{\tau_2} [d_1 I_q^I + d_2 I_q^I - d_3 \int_{t_n}^{\tau_2} I_d^{II} dt - d_3 U_m \sin(\omega t + \varphi_0)] dt + I_q^I(0) \quad (194)$$

ქვემოთ ნაჩვენებია (186), (187) და (191)-(194) გამოსახულებების საფუძველზე აგებული ცვლადების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა. ნახ.21,ა სქემის  $t_n \leq t \leq \tau_2$  შესაბამისი დროის ინტერვალებში (ნახ.26).

გ) მათემატიკური მოდელირება  $\tau_2 \leq t \leq t_{n+1} = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) + \gamma \right]$  დროის

ინტერვალებში (ნახ .21,ბ).

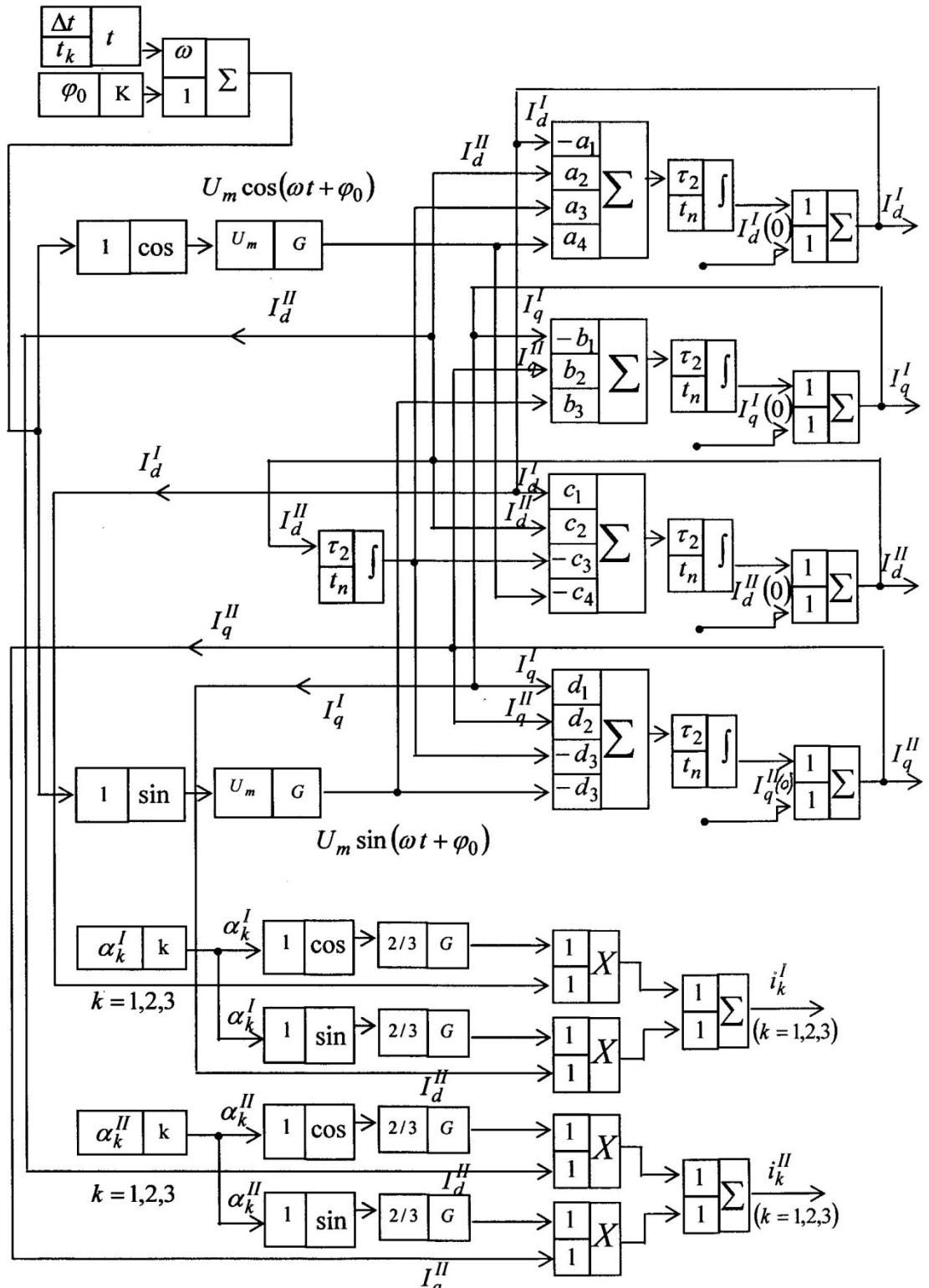
ნახ. 21,ბ-ზე ნაჩვენები სქემისათვის რეზულტირებული კომპლექსური ცვლადებისათვის გვაქვს შემდეგი განტოლებათა სისტემა:

$$\frac{3}{2} U_m e^{j(\omega t + \varphi_0)} = R^I \cdot \dot{I}^I + \frac{d\psi^I}{dt} \quad (195)$$

$$0 = \left[ R^{II} + \frac{2}{3}(3R + 2R_1) \right] \dot{I}^{II} + \frac{2}{3}(3R + 2R_1 + R^{II}) e^{j2\alpha_1^{II}} I^{*II} + \frac{2}{3}(3L + 2L_1 + 3L) \frac{d\dot{I}^I}{dt} + \frac{2}{3}(3L + 2L_1 + L_s^{II}) e^{j2\alpha_1^{II}} \frac{d\dot{I}^{*II}}{dt} + \frac{1}{c_f} \int_{\tau_2}^{t_{n+1}} \frac{1}{3} \left( \dot{I}^{II} + e^{j2\alpha_1^{II}} I^{*II} \right) dt + \frac{d\psi^{II}}{dt} \quad (196)$$

$$\psi^I = \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \dot{I}^I + \frac{3}{2} M^{12} \dot{I}^{II} \quad (197)$$

$$\psi^{II} = \left( L_s^{II} + \frac{3}{2} M^{12} \right) \dot{I}^{II} + \frac{3}{2} M^{12} \dot{I}^I \quad (198)$$



ნახ.26 რეზულტირებული კომპლექსური დენების  $d, q$  მდგენელებისა და წევის ტრანსფორმატორის ფაზური დენების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა  $t_n \leq t \leq \tau_2$  დროის ინტერვალებში  $\alpha_1^I = \alpha_1^{II} = 0^\circ$ ;  $\alpha_2^I = \alpha_2^{II} = 120^\circ$ ;  $\alpha_3^I = \alpha_3^{II} = 240^\circ$  (ნახ.21,ა)



წევის ძრავის ჩაკეტილი კონტურისათვის (ნახ.21,ბ) გვაქვს ამავე კონტურის მდგომარეობათა განტოლებები ღუზის ე.მ. ძალისა  $e_{\text{ღ}}$  და ღუზაში გამავალი დატვირთვის  $i_{\text{ღ}}$  დენის მიმართ:

$$e_{\text{ღ}} = \frac{1}{c_{\text{ღ}}} \int_{\tau_1}^{t_{n+1}} i_{\text{ღ}} dt + e_{\text{ღ}}(0) \quad (199)$$

$$i_{\text{ღ}} = \int_{\tau_1}^{t_{n+1}} \left[ -\frac{e_{\text{ღ}}}{L_1 + L_{\text{ღ}}} - \frac{(R_1 + R_{\text{ღ}})i_{\text{ღ}}}{L_1 + L_{\text{ღ}}} \right] dt + i_{\text{ღ}}(0) \quad (200)$$

(195)-(198) კომპლექსური განტოლებათა სისტემიდან შესაძლებელია მიღებული იქნას ცვლადების  $d, q$  მდგენელების მიმართ სკალარული განტოლებათა სისტემა მატრიცულ ფორმაში:

$$\begin{pmatrix} \frac{3}{2}U_m \cos(\omega t + \varphi_0) - R^I I_d^I \\ \frac{3}{2}U_m \sin(\omega t + \varphi_0) - R^I I_q^I \\ -\frac{1}{c_f} \int_{\tau_2}^{t_{n+1}} \frac{2}{3} I_d^{II} dt - R_d^{II} I_q^{II} \\ -R^I I_q^{II} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_d^I & 0 & \frac{3}{2}M^{12} & 0 \\ 0 & L_d^I & 0 & \frac{3}{2}M^{12} \\ \frac{3}{2}M^{12} & 0 & L_d^{II} & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M^{12} & 0 & L_q^{II} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} dI_d^I / dt \\ dI_q^I / dt \\ dI_d^{II} / dt \\ dI_q^{II} / dt \end{pmatrix} \quad (201)$$

სადაც (201)-ში ექვივალენტური პარამეტრებისათვის გვაქვს:

$$\begin{aligned} R_d^{II} &= R^{II} + \frac{4}{3}(3R + R_1); & L_d^I &= L_s^I + \frac{3}{2}M^I; \\ L_q^{II} &= L_s^{II} + \frac{3}{2}M^{II} & L_d^{II} &= L_q^{II} + \frac{4}{3}(3L + L_1) \end{aligned} \quad (202)$$

ფაზური დენების მყისა მნიშვნელობებისთვის გვაქვს შემდეგი გამოსახულებები:

$$i_k^I = \frac{2}{3} \left( I_d^I \cos \alpha_k^I + I_q^I \sin \alpha_k^I \right), \quad (k = 1, 2, 3) \quad (203)$$

$$i_k^{II} = \frac{2}{3} \left( I_d^{II} \cos \alpha_k^{II} + I_q^{II} \sin \alpha_k^{II} \right), \quad (k = 1, 2, 3) \quad (204)$$

დ) კომპიუტერული მოდელირება  $\tau_2 \leq t \leq t_{n+1} = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) + \gamma \right]$  დროის

ინტერვალებში (ნახ.21,ბ).

(201) მატრიცული განტოლებათა სისტემის ამონახსნი დენების  $d$ ,  $q$  მდგენელების წარმოებულების მიმართ წარმოადგენს  $t_n = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \right] \leq t \leq \tau_2$  დროის ინტერვალებში (ნახ. 21,ა) მიღებული (188),(189),(190) ამონახსნების ანალოგიურს, მხოლოდ საჭიროა გათვალისწინებული იქნას ინტეგრების ქვედა  $\tau_2$  და  $t_{n+1}$  ზედა ზღვარი,  $c_g$ -ის მაგივრად  $c_f$  ტევადობა და (202) გამოსახულებების საფუძველზე  $R_d^{II}$ ,  $L_d^{II}$  პარამეტრები.

ყოველივე ზემოთ მოყვანილის გათვალისწინებით  $\tau_2 \leq t \leq t_{n+1}$  დროის ინტერვალებში თითოეული დენების  $d, q$  მდგენელებისათვის გვაქვს:

$$I_d^I = \int_{\tau_2}^{t_{n+1}} \left[ -a_1 I_d^I + a_2 I_d^{II} + a_3 \int_{\tau_2}^{t_{n+1}} I_d^{II} dt + a_4 U_m \cos(\omega t + \varphi_0) \right] dt + I_q^I(0) \quad (205)$$

$$I_q^I = \int_{\tau_2}^{t_{n+1}} \left[ -b_1 I_q^I + b_2 I_q^{II} + b_3 U_m \sin(\omega t + \varphi_0) \right] dt + I_q^I(0) \quad (206)$$

$$I_d^{II} = \int_{\tau_2}^{t_{n+1}} \left[ c_1 I_d^I + c_2 I_d^{II} - c_3 \int_{\tau_2}^{t_{n+1}} I_d^{II} dt - c_4 U_m \cos(\omega t + \varphi_0) \right] dt + I_d^{II}(0) \quad (207)$$

$$I_q^H = \int_{\tau_2}^{t_{n+1}} [d_1 I_q^I + d_2 I_q^H - d_3 \int_{\tau_2}^{t_{n+1}} I_d^H dt - d_3 U_m \sin(\omega t + \varphi_0)] dt + I_q^I(0) \quad (208)$$

მიღებული (199), (200), (203) და (208) გამოსახულებების საფუძველზე აგებულ გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურულს სქემას აქვს ნახ.25 და ნახ. 26-ზე ნაჩვენები სახეები. მხოლოდ აქაც გასათვალისწინებელია ინტეგრების ქვედა  $\tau_2$  და ზედა  $t_{n+1}$  ზღვარი,  $c_g = c_f$  ტოლობა  $a_k (k=1,2,3,4)$ ,  $b_k (k=1,2,3)$ ,  $c_k (k=1,2,3,4)$  და  $d_k (k=1,2,3)$ , კოეფიციენტებში (202) გამოსახულებების ჩასმა.

**4.3 მატარებლის რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმებში პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება დროის არასაკომუტაციო ინტერვალებში, ა, ბ –როცა  $t_{n-1} = \frac{1}{\omega}(n-1)\left(\frac{\pi}{3} - \gamma\right) \leq t \leq \tau_1$  დროის ინტერვალში ტრანზისტორული გასაღები –37 გამორთულია (ნახ.22,ა) და გ,დ – როცა  $\tau_1 \leq t \leq t_n = \frac{1}{\omega}n\left(\frac{\pi}{3} - \gamma\right)$  დროის ინტერვალში ტრანზისტორული გასაღები–37 ჩართულია (ნახ.22,ბ).**

ა) მათემატიკური მოდელირება  $\frac{1}{\omega}(n-1)\left(\frac{\pi}{3} - \gamma\right) \leq t \leq \tau_1$  დროის ინტერვალებში (ნახ.22,ა)

ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის გამოყენებით აღნიშნული ინტერვალის შესაბამისი სქემისათვის (ნახ.22,ა) გვაქვს განტოლებათა სისტემა რეზულტირებული კომპლექსური სიდიდეების მიმართ [49]:

$$\frac{3}{2} U_m e^{j\left[\omega(t-t_{n-1}) - \frac{\pi}{6}\right]} = R^I \dot{I}^I + \frac{d\psi^I}{dt} \quad (209)$$

$$E_{\delta\delta 6} = R_d^{II} i_1^{II} + \frac{d\psi^{II}}{dt} \quad (210)$$

$$\psi^I = L_s^I i^I + \frac{3}{2} \left[ M^I i^I + M^{12} i_1^{II} \sqrt{3} e^{-j\left(\frac{\pi}{6} + \alpha_p\right)} \right] \quad (211)$$

$$\psi^{II} = L_d^{II} i_1^{II} - \frac{\sqrt{3}}{2} M^{12} \left[ i^I e^{-j\left(\frac{5\pi}{6} + \alpha_p\right)} + i^I e^{j\left(\frac{5\pi}{6} + \alpha_p\right)} \right] \quad (212)$$

სადაც:

$$\omega t_{n-1} = (n-1) \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right); \gamma - \text{კომუტაციის კუთხეა};$$

სამფაზა ცვლადი ქსელის ფაზური ძაბვებია:

$$u_k^I = U_m \sin \left[ \omega(t - t_{n-1}) - \frac{\pi}{6} - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right] \quad (213)$$

$$R_d^{II} = 2R^{II} + 3R + 2R_1 + R_{\delta\delta 6}; \quad L_d^{II} = 2L^{II} + 3L + 2L_1 + L_{\delta\delta 6} \quad (214)$$

$E_{\delta\delta 6}$  არის გენერატორულ რეჟიმში არსებული წევის ძრავის მიერ დაინდუქცირებული ე.მ. ძალა;  $\alpha_p$  - ტირისტორების გაღების კუთხეა.

$$\begin{aligned} & \left\| \begin{array}{l} \frac{3}{2} U_m \cos \left[ \omega(t - t_{n-1}) - \frac{\pi}{6} \right] - R^I I_d^I \\ \frac{3}{2} U_m \sin \left[ \omega(t - t_{n-1}) - \frac{\pi}{6} \right] - R^I I_q^I \\ E_{\delta\delta 6} - R^I I_q^{II} \end{array} \right\| = \\ & = \left\| \begin{array}{ccc} L_s^I + \frac{3}{2} M^I & 0 & \frac{3}{2} \sqrt{3} M^{12} \cos \left( \alpha_p + \frac{\pi}{6} \right) \\ 0 & L_s^I + \frac{3}{2} M^I & -\frac{3}{2} \sqrt{3} M^{12} \sin \left( \alpha_p + \frac{\pi}{6} \right) \\ -\sqrt{3} M^{12} \cos \left( \alpha_p + \frac{5\pi}{6} \right) - \sqrt{3} M^{12} \sin \left( \alpha_p + \frac{5\pi}{6} \right) & & L_d^{II} \end{array} \right\| \times \left\| \begin{array}{l} dI_d^I / dt \\ dI_q^I / dt \\ di_1^{II} / dt \end{array} \right\| \quad (215) \end{aligned}$$

(209)–(212) განტოლებებიდან ვლუბულობთ ჸემდეგ სკალარულ განტოლებათა სისტემას ცვლადების  $d, q$  მდგენელების მიმართ (215).

ბ) კომპიუტერული მოდეირება  $\frac{1}{\omega}(n-1)\left(\frac{\pi}{3}-\gamma\right) \leq t \leq \tau_1$  დროის

ინტერვალეში (ნახ. 22,ა)

(215) განტოლებათა სისტემის ამოხსნა დენების წარმოებულების მიმართ გვადლევს ჸემდეგ მატრიცულ გამოსახულებებს:

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} dI_d^I/dt \\ dI_q^I/dt \\ di_1^H/dt \end{vmatrix} &= \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} -\alpha R^I & bR^I & -cR_d^H \\ -dR^I & -eR^I & -fR_d^H \\ -gR^I & kR^I & -lR_d^H \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_d^I \\ I_q^I \\ i_1^H \end{vmatrix} + \frac{E_{\text{გმგ}}}{\Delta} \begin{vmatrix} -c \\ f \\ l \end{vmatrix} + \\ &+ \frac{3}{2} \cdot \frac{U_m}{\Delta} \begin{vmatrix} \sqrt{a^2+b^2} \cos\left[\omega(t-t_{n-1})-\frac{\pi}{6}+\text{arctg}\frac{b}{a}\right] \\ \sqrt{d^2+e^2} \cos\left[\omega(t-t_{n-1})-\frac{\pi}{6}-\text{arctg}\frac{e}{d}\right] \\ \sqrt{g^2+k^2} \cos\left[\omega(t-t_{n-1})-\frac{\pi}{6}+\text{arctg}\frac{k}{g}\right] \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (216)$$

სადაც (216)–ში ჸესაბამისი კოეფიციენტებისათვის გვაქვს ჸემდეგი გამოსახულებები:

$$\Delta = \left(L_s^I + \frac{3}{2}M^I\right) \left[L_d^H \left(L_s^I + \frac{3}{2}M^I\right) - \frac{9}{2}(M^{12})^2 \cos 2\alpha_p\right]; \quad (217)$$

$$\alpha = L_d^H \left(L_s^I + \frac{3}{2}M^I\right) - \frac{9}{4}(M^{12})^2 \left(-\frac{1}{2} + \cos 2\alpha_p\right);$$

$$b = \frac{9}{2}(M^{12})^2 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \sin 2\alpha_p\right);$$

$$c = \frac{3}{2}\sqrt{3}M^{12} \left(L_s^I + \frac{3}{2}M^I\right) \cos\left(\alpha_p + \frac{\pi}{6}\right);$$

$$\begin{aligned}
d &= \frac{9}{4} (M^{12})^2 \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + \sin 2\alpha_p \right) \\
e &= L_d^I \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) - \frac{9}{4} (M^{12})^2 \left( \frac{1}{2} + \cos 2\alpha_p \right); \\
f &= \frac{3}{2} \sqrt{3} M^{12} \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \sin \left( \alpha_p + \frac{\pi}{6} \right); \\
g &= \sqrt{3} M^{12} \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \cos \left( \alpha_p + \frac{5\pi}{6} \right); \\
k &= \sqrt{3} M^{12} \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \sin \left( \alpha_p + \frac{5\pi}{6} \right); \\
l &= \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right)^2
\end{aligned} \tag{218}$$

(216) გამოსახულებებიდან თითოეული დენებისათვის ვღებულობთ შემდეგ ინტეგრალურ გამოსახულებებს:

$$\begin{aligned}
I_d^I &= \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} \left\{ -a_1 I_d^I + a_2 I_q^I - a_3 i_1^{II} + \right. \\
&\quad \left. + a_4 U_m \cos \left[ \omega(t - t_{n-1}) - \frac{\pi}{6} + \arctg \frac{b}{a} \right] - a_5 E_{\delta\beta\delta} \right\} dt + I_d^I(0)
\end{aligned} \tag{219}$$

$$\begin{aligned}
I_q^I &= \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} \left\{ -b_1 I_d^I - b_2 I_q^I - b_3 i_1^{II} + \right. \\
&\quad \left. + b_4 U_m \cos \left[ \omega(t - t_{n-1}) - \frac{\pi}{6} - \arctg \frac{e}{d} \right] + a_5 E_{\delta\beta\delta} \right\} dt + I_q^I(0)
\end{aligned} \tag{220}$$

$$\begin{aligned}
i_1^{II} &= \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} \left\{ -c_1 I_d^I + c_2 I_q^I - c_3 i_1^{II} + \right. \\
&\quad \left. + c_4 U_m \cos \left[ \omega(t - t_{n-1}) - \frac{\pi}{6} + \arctg \frac{k}{g} \right] + c_5 E_{\delta\beta\delta} \right\} dt + i_1^{II}(0)
\end{aligned} \tag{221}$$

$$i_k^I = \frac{2}{3} \left( I_d^I \cos \alpha_k^I + I_q^I \sin \alpha_k^I \right), \quad (k=1,2,3) \quad i_1^{II} = i_2^{II} \tag{222}$$

(219)-(221) ექვივალენტური კოეფიციენტებისათვის გვაქვს:

$$a_1 = \frac{aR^I}{\Delta}; \quad a_2 = \frac{bR^I}{\Delta}; \quad a_3 = \frac{cR_d^{II}}{\Delta}; \quad a_4 = \frac{3}{2} \cdot \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{\Delta}; \quad a_5 = \frac{c}{\Delta}; \quad (223)$$

$$b_1 = \frac{dR^I}{\Delta}; \quad b_2 = \frac{eR^I}{\Delta}; \quad b_3 = \frac{fR_d^{II}}{\Delta}; \quad b_4 = \frac{3}{2} \cdot \frac{\sqrt{d^2 + e^2}}{\Delta}; \quad b_5 = \frac{f}{\Delta}; \quad (224)$$

$$c_1 = \frac{gR^I}{\Delta}; \quad c_2 = \frac{kR^I}{\Delta}; \quad c_3 = \frac{iR_d^{II}}{\Delta}; \quad c_4 = \frac{3}{2} \cdot \frac{\sqrt{g^2 + k^2}}{\Delta}; \quad c_5 = \frac{l}{\Delta}; \quad (225)$$

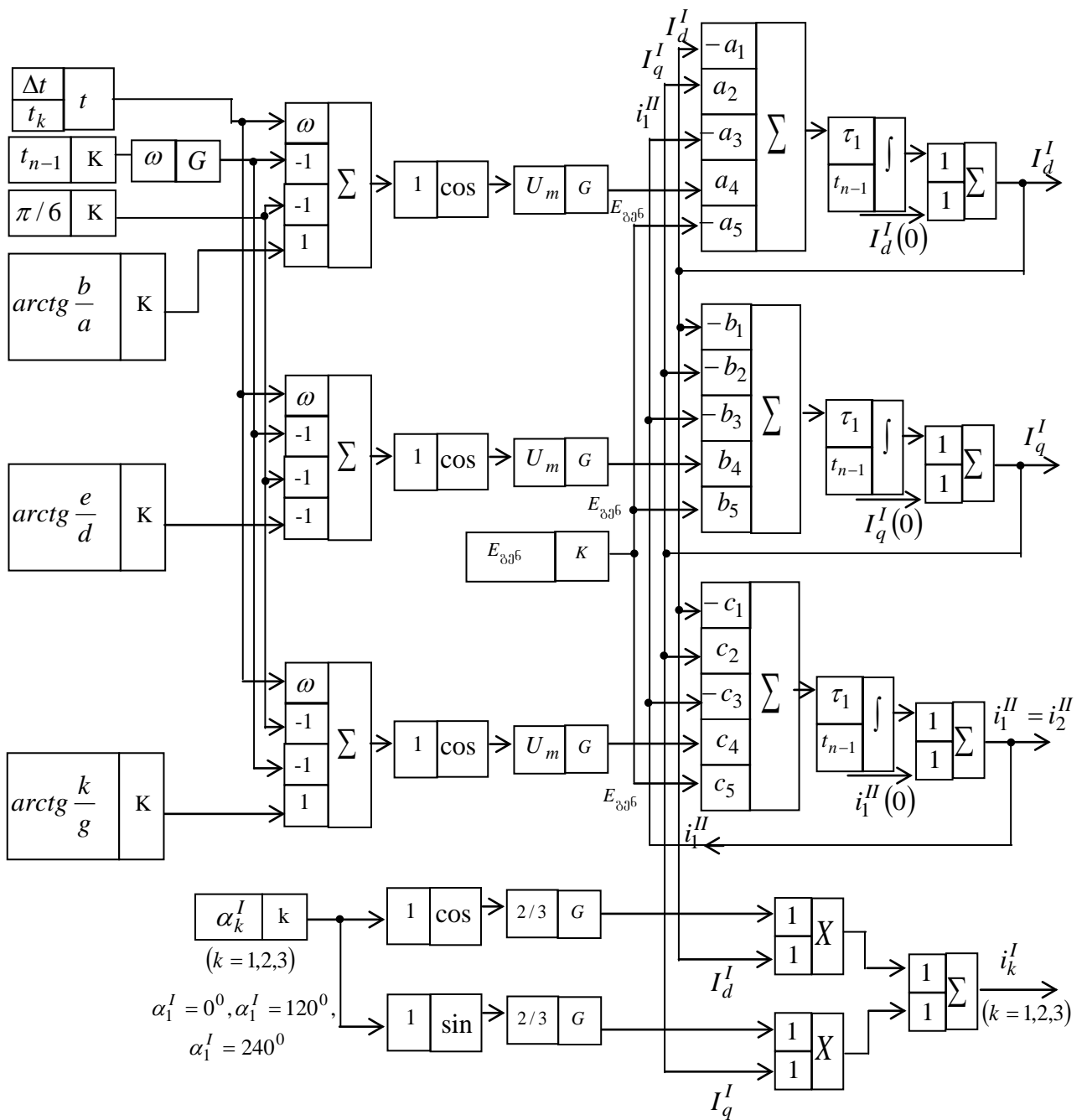
ქვემოთ ნაჩვენებია (219)-(222) გამოსახულებების საფუძველზე აგებული ცვლადების  $d, q$  მდგენელებისა და ფაზური დენების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა(ნახ. 27)

გ) მათემატიკური მოდელირება  $\tau_1 \leq t \leq t_n = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \right]$  დროის

ინტერვალებში (22,ბ).

ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდის გამოყენებით აღნიშნული ინტერვალის შესაბამისი სქემისათვის (ნახ.22,ბ) რეზულტირებული კომპლექსური სიდიდეების მიმართ გვაქვს შემდეგი კომპლექსური განტოლებათა სისტემა:

$$\frac{3}{2} U_m e^{j \left[ \omega(t-t_{n-1}) - \frac{\pi}{6} \right]} = R^I \dot{i}^I + \frac{d\psi^I}{dt} \quad (226)$$



ნახ.27. რეზულტირებული დენების  $d, q$  მდგენელებისა და ფაზური დენების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა დროის  $t_{n-1} \leq t \leq \tau_1$  ინტერვალში (ნახ.22,ა)



$$\frac{1}{C_f} \int_{\tau_1}^{t_n} i_1^{II} dt = (2R^{II} + 3R + R_1) i_1^{II} + \frac{d\psi^{II}}{dt} \quad (227)$$

$$\psi^I = L_s^I i^I + \frac{3}{2} \left[ M^I i^I + \sqrt{3} M^{12} i_1^{II} e^{-j\left(\frac{\pi}{6} + \alpha_p\right)} \right] \quad (228)$$

$$\psi^{II} = (2L_s^{II} + 3L + L_1) i_1^{II} - \frac{\sqrt{3}}{2} M^{12} \left[ i^I e^{-j\left(\frac{5\pi}{6} + \alpha_p\right)} + i^{*I} e^{j\left(\frac{5\pi}{6} + \alpha_p\right)} \right] \quad (229)$$

$$E_{\text{გებ}} = (R_1 + R_{\text{გრ}}) i_{\text{გრ}} + (L_1 + L_{\text{გრ}}) \frac{di_{\text{გრ}}}{dt} \quad (230)$$

(226)-(230)- დან ვღებულობთ შემდეგ სკალარულ განტოლებათა სისტემას ცვლადების  $d, q$  მდგენელების მიმართ:

$$\begin{aligned} & \left\| \begin{array}{l} \frac{3}{2} U_m \cos \left[ \omega(t - \tau_1) - \frac{\pi}{6} \right] - R^I I_d^I \\ \frac{3}{2} U_m \sin \left[ \omega(t - \tau_1) - \frac{\pi}{6} \right] - R^I I_q^I \\ - (2R^{II} + 3R + R_1) i_1^{II} + \frac{1}{C_f} \int_{\tau_1}^{t_n} i_1^{II} dt \end{array} \right\| = \\ & = \left\| \begin{array}{ccc} L_s^I + \frac{3}{2} M^I & 0 & \frac{3\sqrt{3}}{2} M^{12} \cos \left( \alpha_p + \frac{\pi}{6} \right) \\ 0 & L_s^I + \frac{3}{2} M^I & -\frac{3\sqrt{3}}{2} M^{12} \sin \left( \alpha_p + \frac{\pi}{6} \right) \\ -\sqrt{3} M^{12} \cos \left( \alpha_p + \frac{5\pi}{6} \right) - \sqrt{3} M^{12} \sin \left( \alpha_p + \frac{5\pi}{6} \right) & 2(2L_s^{II} + 3L + L_1) & \end{array} \right\| \times \left\| \begin{array}{l} dI_d^I / dt \\ dI_q^I / dt \\ di_1^{II} / dt \end{array} \right\| \quad (231) \end{aligned}$$

დ) კომპიუტერული მოდელირება  $\tau_1 \leq t \leq t_n = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \right]$  დროის

ინტერვალში (ნახ.22,ბ)

(230), (231) განტოლებების ამოხსნა დენების წარმოებულების მიმართ გვაძლევს შემდეგ მატრიცულ გამოსახულებებს:

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} dI_d^I/dt \\ dI_q^I/dt \\ di_1^{II}/dt \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} -A_1 & A_2 & A_3 \\ B_1 & -B_2 & -B_3 \\ -C_1 & -C_2 & -C_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I_d^I \\ I_q^I \\ i_1^{II} \end{pmatrix} + \int_{\tau_1}^{t_n} i_1^{II} dt \begin{pmatrix} -A_4 \\ B_4 \\ C_4 \end{pmatrix} + \\
&+ \frac{3}{2} \cdot U_m \begin{pmatrix} A_5 \cos \left[ \omega(t-\tau_1) - \frac{\pi}{6} + \operatorname{arctg} \frac{b_1}{a_1} \right] \\ B_5 \cos \left[ \omega(t-\tau_1) - \frac{\pi}{6} - \operatorname{arctg} \frac{b_2}{a_2} \right] \\ C_5 \cos \left[ \omega(t-\tau_1) - \frac{\pi}{6} - \operatorname{arctg} \frac{b_3}{a_3} \right] \end{pmatrix} \quad (232)
\end{aligned}$$

სადაც(232)-ში ექვივალენტური კოეფიციენტებისა და პარამეტრებისათვის გვაქვს:

$$\begin{aligned}
A_1 &= \frac{a_1 R^I}{\Delta}; & A_2 &= \frac{b_1 R^I}{\Delta}; & A_3 &= \frac{c_1 (3R + 2R^{II} + R_1)}{\Delta}; \\
A_4 &= \frac{c_1}{\Delta c_f}; & A_5 &= \frac{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}{\Delta} \quad (233)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_1 &= \frac{a_2 R^I}{\Delta} I_d^I; & B_2 &= \frac{b_2 R^I}{\Delta}; & B_3 &= \frac{c_2 (3R + 2R^{II} + R_1)}{\Delta}; \\
B_4 &= \frac{c_2}{\Delta c_f}; & B_5 &= \frac{\sqrt{a_2^2 + b_2^2}}{\Delta} \quad (234)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_1 &= \frac{a_3 R^I}{\Delta}; & C_2 &= \frac{b_3 R^I}{\Delta}; & C_3 &= \frac{c_1 (3R + 2R^{II} + R_1)}{\Delta}; \\
C_4 &= \frac{c_3}{\Delta c_f}; & C_5 &= \frac{\sqrt{a_3^2 + b_3^2}}{\Delta} \quad (235)
\end{aligned}$$

$$\Delta = \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \times \left[ 2 \left( L_s^{II} + 3L + L_1 \right) \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) - \frac{9}{2} \left( M^{12} \right)^2 \left( -\frac{1}{2} + \cos 2\alpha_p \right) \right] \quad (236)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \left( 2L_s^{II} + 3L + L_1 \right) - \frac{9}{4} \left( M^{12} \right)^2 \left( -\frac{1}{2} + \cos 2\alpha_p \right) \\ b_1 &= \frac{9}{2} \left( M^{12} \right)^2 \left( \frac{\sqrt{3}}{2} - \sin 2\alpha_p \right) \\ c_1 &= \frac{3\sqrt{3}}{2} M^{12} \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \cos \left( \frac{\pi}{6} + \alpha_p \right) \end{aligned} \right\} \quad (237)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_2 &= \frac{9}{4} \left( M^{12} \right)^2 \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + \sin 2\alpha_p \right) \\ b_2 &= \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \left( 2L_s^{II} + 3L + L_1 \right) - \frac{9}{4} \left( M^{12} \right)^2 \left( \frac{1}{2} + \cos 2\alpha_p \right) \\ c_2 &= \frac{3\sqrt{3}}{2} M^{12} \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \sin \left( \frac{\pi}{6} + \alpha_p \right) \end{aligned} \right\} \quad (238)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_3 &= \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \sqrt{3} M^{12} \cos \left( \frac{5\pi}{6} + \alpha_p \right) \\ b_3 &= \sqrt{3} \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) M^{12} \sin \left( \frac{5\pi}{6} + \alpha_p \right) \\ c_3 &= \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (239)$$

(230)-დან გვაქვს:

$$\frac{di_{d\delta}}{dt} = \frac{E_{d\delta}}{L_1 + L_{d\delta}} - \frac{R_1 + R}{L_1 + L_{d\delta}} \cdot i_{d\delta} \quad (240)$$

(232) და (240) –დან თითოეული დენებისათვის გვაქვს შემდეგი ინტეგრალური გამოსახულებები მატრიცულ სახეში:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} I_d^I \\ I_q^I \\ i_1^H \end{pmatrix} = \int_{\tau_1}^{t_n} \begin{pmatrix} -A_1 & A_2 & A_3 \\ B_1 & -B_2 & -B_3 \\ -C_1 & -C_2 & -C_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I_d^I \\ I_q^I \\ i_1^H \end{pmatrix} + \int_{\tau_1}^{t_n} i_1^H dt \begin{pmatrix} -A_4 \\ B_4 \\ C_4 \end{pmatrix} + \\ + \frac{3}{2} \cdot U_m \begin{pmatrix} A_5 \cos \left[ \omega(t - \tau_1) - \frac{\pi}{6} + \arctg \frac{b_1}{a_1} \right] \\ B_5 \cos \left[ \omega(t - \tau_1) - \frac{\pi}{6} - \arctg \frac{b_2}{a_2} \right] \\ C_5 \cos \left[ \omega(t - \tau_1) - \frac{\pi}{6} - \arctg \frac{b_3}{a_3} \right] \end{pmatrix} dt + \begin{pmatrix} I_d(0) \\ I_q^I(0) \\ i_1^H(0) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (241)$$

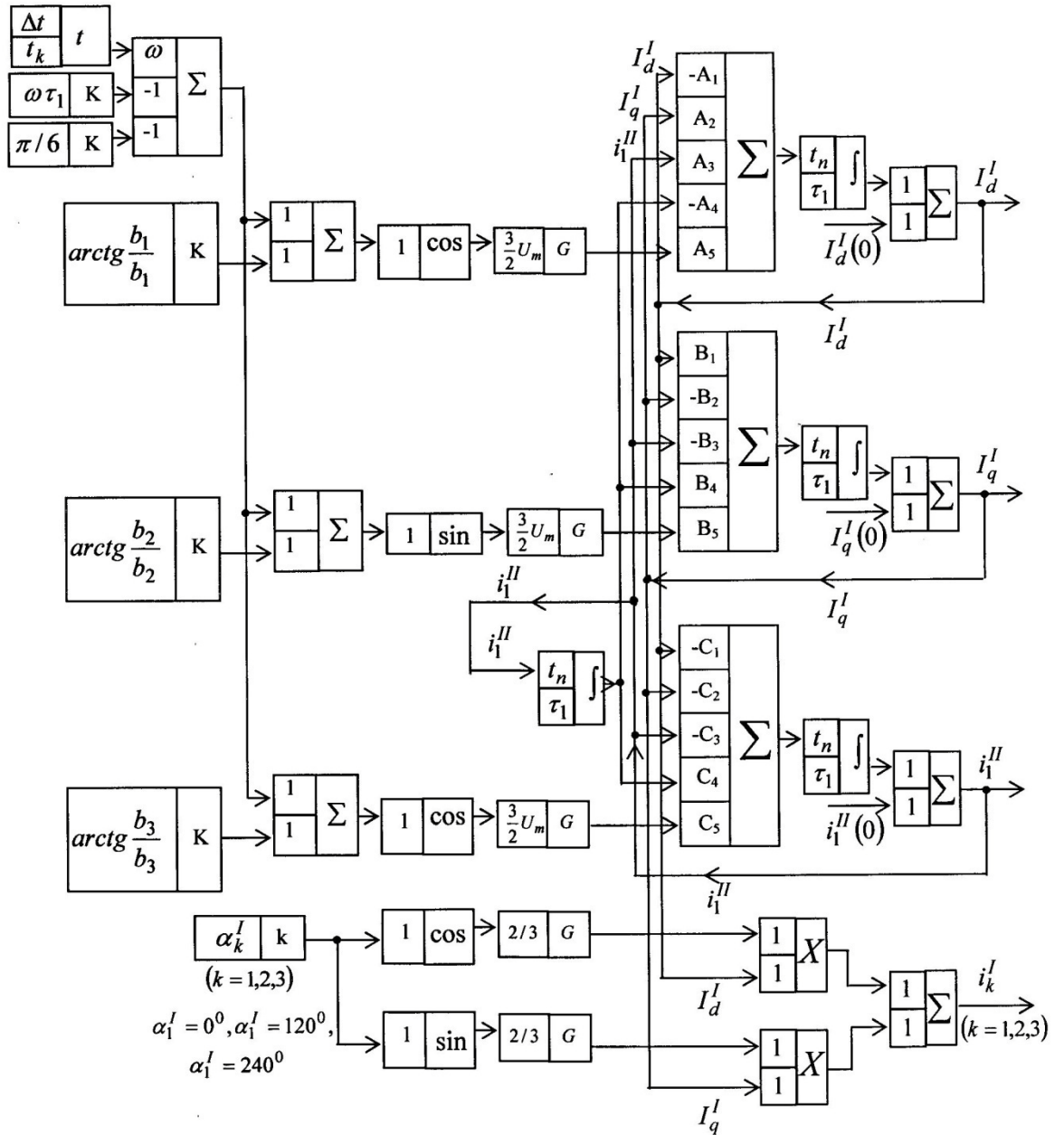
$$i_{\partial\sigma} = \int_{\tau_1}^{t_n} \left[ \frac{1}{L_1 + L_{\partial\sigma}} \cdot E_{\partial\sigma} - \frac{R_1 + R}{L_1 + L_{\partial\sigma}} \cdot i_{\partial\sigma} \right] dt + i_{\partial\sigma}(0) \quad (242)$$

მიღებული (241), (242) გამოსახულებები საშუალებას იძლევიან ავაგოთ  $I_d^I$ ,  $I_q^I$ ,  $i_{\partial\sigma}$ ,  $i_k^I$  ( $k=1,2,3$ ),  $i_k^H$  ( $k=1,2$ ) დენების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა (ნახ.28)

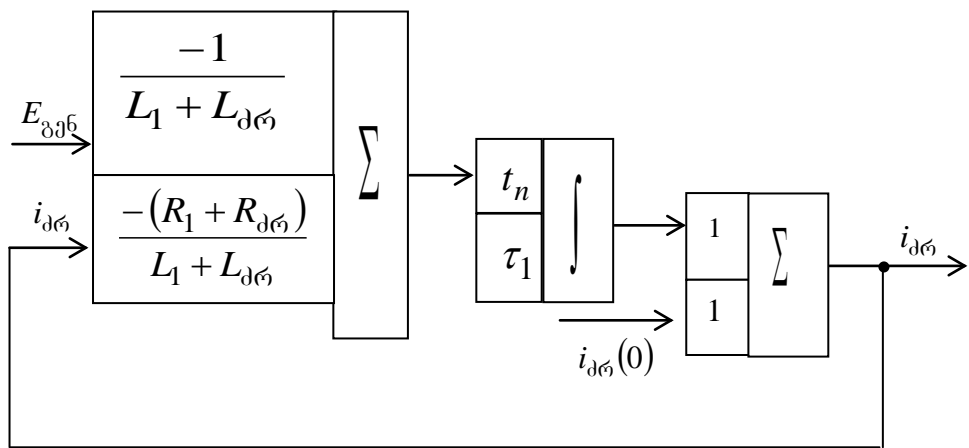
$i_k^I$  ( $k=1,2,3$ ) დენებისთვის გვაქვს შემდეგი გამოსახულება:

$$i_k^I = \frac{2}{3} (I_d^I \cos \alpha_k^I + I_q^I \sin \alpha_k^I), \quad (k=1,2,3) \quad (243)$$

(242) გამოსახულების საფუძველზე აგებულ გენერატორულ რეჟიმში წევის ძრავის ღუზაში გამავალი დენის გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურულ სქემას აქვს ნახ.29-ზე ნაჩვენები სახე.



ნახ.28. რეზულტირებული დენების  $d$ ,  $q$  მდგენელებისა და ფაზური დენების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა დროის  $\tau_1 \leq t \leq t_n$  ინტერვალში (ნახ.22-ბ.)



ნახ.29. წვევის ძრავის ღუზაში გამავალი  $i_d$  დენის გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა დროის  $\tau_1 \leq t \leq t_n$  ინტერვალებში (ნახ.22-ბ)

4.4 მატარებლის რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმებში პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება

კომუტაციური დროის ინტერვალებში. ა,ბ- როცა  $t_n = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \right] \leq t \leq \tau_2$

დროის ინტერვალებში ტრანზისტორული გასაღები-37 გამორთულია

(ნახ.23,ა) და გ,დ)-როცა  $\tau_2 \leq t \leq t_{n+1} = \frac{1}{3} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) + \gamma \right]$  დროის

ინტერვალებში ტრანზისტორული გასაღები-37 ჩართულია (ნახ.23,ბ)

ა) მათემატიკური მოდელირება  $t_n = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \right] \leq t \leq \tau_2$  დროის

ინტერვალებში (ნახ.23,ა).

აღნიშნული ინტერვალების შესაბამისი სქემისათვის (ნახ.23,ა) რეზულტირებული კომპლექსური სიდიდეების მიმართ გვაქვს შემდეგი კომპლექსური განტოლებათა სისტემა [49]:

$$\frac{3}{2} U_m e^{j \left[ \omega(t-t_{n-1}) - \frac{\pi}{6} \right]} = R^I \dot{I}^I + \frac{d\psi^I}{dt} \quad (244)$$

$$\begin{aligned}
E_{\text{ფ6}} = & \left[ R^{II} + \frac{2}{3}(3R + 2R_1 + R_{\text{დ6}}) \right] i^{II} + \frac{2}{3}(3R + 2R_1 + R_{\text{დ6}}) e^{j2\alpha_p} I^{*II} + \\
& + \frac{2}{3}(3L + 2L_1 + L_s^{II} + L_{\text{დ6}}) \frac{di^{II}}{dt} + \\
& + \frac{2}{3}(3L + 2L_1 + L_s^{II} + L_{\text{დ6}}) e^{j2\alpha_p} \frac{di^{II}}{dt} + \frac{d\psi^I}{dt}
\end{aligned}
\tag{245}$$

$$\left. \begin{aligned}
\dot{\psi}^I &= \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) i^I + \frac{3}{2} M^{12} i^{II} \\
\dot{\psi}^{II} &= \left( L_s^{II} + \frac{3}{2} M^{II} \right) i^{II} + \frac{3}{2} M^{12} i^I
\end{aligned} \right\}
\tag{246}$$

(244)-(246)-დან ვღებულობთ შემდეგ სკალარულ განტოლებათა სისტემას ცვლადების  $d, q$  მდგენელების მიმართ:

$$\begin{aligned}
& \left\| \begin{aligned}
& \frac{3}{2} U_m \cos \left[ \omega(t - \tau_1) - \frac{\pi}{6} \right] - R^I I_d^I \\
& \frac{3}{2} U_m \sin \left[ \omega(t - \tau_1) - \frac{\pi}{6} \right] - R^I I_q^I \\
& E_{\text{ფ6}} - R_{d1}^{II} I_d^{II} - R_{q1}^{II} I_q^{II} \\
& - R_{q1}^{II} I_d^{II} - R_{q2}^{II} I_q^{II}
\end{aligned} \right\| = \\
& = \left\| \begin{aligned}
& \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) & 0 & \frac{3}{2} M^{12} & 0 \\
& 0 & \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) & 0 & \frac{3}{2} M^{12} \\
& \frac{3}{2} M^{12} & 0 & L_{d1}^{II} & L_{q1}^{II} \\
& 0 & \frac{3}{2} M^{12} & L_{d1}^{II} & L_{q2}^{II}
\end{aligned} \right\| \times \left\| \begin{aligned}
& dI_d^I / dt \\
& dI_q^I / dt \\
& dI_d^{II} / dt \\
& dI_q^{II} / dt
\end{aligned} \right\|
\end{aligned}
\tag{247}$$

სადაც ექვივალენტური წინაღობებისა და ინდუქციურობებისათვის გვაქვს შემდეგი გამოსახულებები:

$$\left. \begin{aligned} R_{d1}'' &= R'' + \frac{4}{3}(3R + 2R_1 + R_{\partial\sigma})\cos^2 \alpha_p \\ R_{q1}'' &= \frac{2}{3}(3R + 2R_1 + R_{\partial\sigma})\sin 2\alpha_p \\ R_{d2}'' &= R'' + \frac{4}{3}(3R + 2R_1 + R_{\partial\sigma})\sin^2 \alpha_p \end{aligned} \right\} \quad (248)$$

$$\left. \begin{aligned} L_{d1}'' &= \left( L_s'' + \frac{3}{2}M'' \right) + \frac{4}{3}(3L + 2L_1 + L_s'' + L_{\partial\sigma})\cos^2 \alpha_p \\ L_{q1}'' &= \frac{2}{3}(3L + 2L_1 + L_s'' + L_{\partial\sigma})\sin 2\alpha_p \\ L_{d2}'' &= \left( L_s'' + \frac{3}{2}M'' \right) + \frac{4}{3}(3L + 2L_1 + L_s'' + L_{\partial\sigma})\sin^2 \alpha_p \end{aligned} \right\} \quad (249)$$

ბ) კომპიუტერული მოდელირება  $t_n = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \right] \leq t \leq \tau_2$  დროის

ინტერვალში (ნახ.23,ა)

(247) მატრიცული განტოლებათა სისტემის ამოხსნა დენების  $d, q$  მდგენელების წარმოებულების მიმართ გვაძლევს შემდეგ გამოსახულებებს:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} dI_d^I / dt \\ dI_q^I / dt \\ dI_d^{II} / dt \\ dI_q^{II} / dt \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} -A_1 & A_2 & A_3 & -A_4 \\ A_2 & -B_2 & -B_3 & -B_4 \\ C_1 & -C_2 & C_3 & C_4 \\ -D_1 & -D_2 & D_3 & D_4 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I_d^I \\ I_q^I \\ I_d^{II} \\ I_q^{II} \end{pmatrix} + \\ &+ \frac{3}{2} \cdot U_m \begin{pmatrix} A_5 \cos \left[ \omega(t-t_n) - \frac{\pi}{6} + \operatorname{arctg} \frac{b_1}{a_1} \right] \\ -B_5 \cos \left[ \omega(t-t_n) - \frac{\pi}{6} + \operatorname{arctg} \frac{b_2}{b_1} \right] \\ -C_5 \cos \left[ \omega(t-t_n) - \frac{\pi}{6} + \operatorname{arctg} \frac{d_1}{a_3} \right] \\ D_5 \cos \left[ \omega(t-t_n) - \frac{\pi}{6} - \operatorname{arctg} \frac{b_4}{a_4} \right] \end{pmatrix} + E_{\text{გპ6}} \begin{pmatrix} -A_6 \\ B_6 \\ C_6 \\ -D_6 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (250)$$



სადაც (250)-ში ექვივალენტური კოეფიციენტებისათვის გვაქვს:

$$A_1 = \frac{a_1 R^I}{\Delta}; \quad A_2 = \frac{b_1 R^I}{\Delta}; \quad A_3 = \frac{R_{q1}^{II} d_1 - R_{d1}^{II} C_1}{\Delta};$$

$$A_4 = \frac{R_{q2}^{II} d_1 - R_{q1}^{II} C_1}{\Delta}; \quad A_5 = \frac{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}{\Delta}; \quad A_6 = \frac{C_1}{\Delta}; \quad (251)$$

$$B_2 = \frac{b_2 R^I}{\Delta}; \quad B_3 = \frac{R_{q1}^{II} d_1 + R_{d1}^{II}}{\Delta}; \quad B_4 = \frac{R_{q1}^{II} d_1 + R_{q2}^{II}}{\Delta}$$

$$B_5 = \frac{\sqrt{b_2^2 + b_2^2}}{\Delta}; \quad B_6 = \frac{d_1}{\Delta}; \quad (252)$$

$$C_1 = \frac{a_3 R^I}{\Delta}; \quad C_2 = \frac{d_1 R^I}{\Delta}; \quad C_3 = \frac{R_{q1}^{II} d_3 - R_{d1}^{II} c_3}{\Delta};$$

$$C_4 = \frac{R_{q2}^{II} d_3 - R_{q1}^{II} c_3}{\Delta}; \quad C_5 = \frac{\sqrt{a_3^2 + d_3^2}}{\Delta}; \quad C_6 = \frac{c_3}{\Delta}; \quad (253)$$

$$D_1 = \frac{a_4 R^I}{\Delta}; \quad D_2 = \frac{b_4 R^I}{\Delta}; \quad D_3 = \frac{R_{d1}^{II} d_3 - R_{q1}^{II} d_3}{\Delta};$$

$$D_4 = \frac{R_{d1}^{II} d_3 - R_{q2}^{II} d_4}{\Delta}; \quad D_5 = \frac{\sqrt{a_4^2 + d_4^2}}{\Delta}; \quad D_6 = \frac{d_3}{\Delta}; \quad (254)$$

$$\Delta = \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \left\{ \left( L_s^I + \frac{3}{2} M_1 \right) \left[ L_{d1}^{II} L_{q2}^{II} - (L_{q1}^{II})^2 \right] - \left( \frac{3}{2} M^{12} \right)^2 L_{d1}^{II} \right\} +$$

$$+ \left( \frac{3}{2} M^{12} \right)^2 \left[ \left( \frac{3}{2} M^{12} \right)^2 - L_{q2}^{II} \left( L_s^I + \frac{3}{2} M_1 \right) \right] \quad (255)$$

$$\left. \begin{aligned}
 a_1 &= \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \left[ L_{d1}^{II} L_{q2}^{II} - (L_{q1}^{II})^2 \right] - L_{d1}^{II} \left( \frac{3}{2} M^{12} \right)^2 \\
 b_1 &= L_{q1}^{II} \left( \frac{3}{2} M^{12} \right)^2 \\
 c_1 &= \frac{3}{2} M^{12} \left[ \left( \frac{3}{2} M^{12} \right)^2 - L_{q2}^{II} \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \right] \\
 d_1 &= \frac{3}{2} M^{12} \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right)
 \end{aligned} \right\} \quad (256)$$

$$\left. \begin{aligned}
 b_2 &= \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \left[ L_{d1}^{II} L_{q2}^{II} - (L_{q1}^{II})^2 \right] - L_{d1}^{II} \left( \frac{3}{2} M^{12} \right)^2 \\
 d_2 &= \left( \frac{3}{2} M^{12} \right) \left[ \left( \frac{3}{2} M^{12} \right)^2 - L_{d1}^{II} \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \right]
 \end{aligned} \right\} \quad (257)$$

$$\left. \begin{aligned}
 a_3 &= \frac{3}{2} M^{12} \left[ L_{q2}^{II} \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) - \left( \frac{3}{2} M^{12} \right)^2 \right] \\
 c_3 &= \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \left[ L_{q2}^{II} \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) - \left( \frac{3}{2} M^{12} \right)^2 \right] \\
 d_3 &= L_{q1}^{II} \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right)^2
 \end{aligned} \right\} \quad (258)$$

$$\left. \begin{aligned}
 a_4 &= \frac{3}{2} M^{12} L_{q1}^{II} \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \\
 b_4 &= \frac{3}{2} M^{12} \left[ \left( \frac{3}{2} M^{12} \right)^2 - L_{d1}^{II} \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \right] \\
 d_4 &= \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \left[ L_{d1}^{II} \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right)^2 - \left( \frac{3}{2} M^{12} \right)^2 \right]
 \end{aligned} \right\} \quad (259)$$

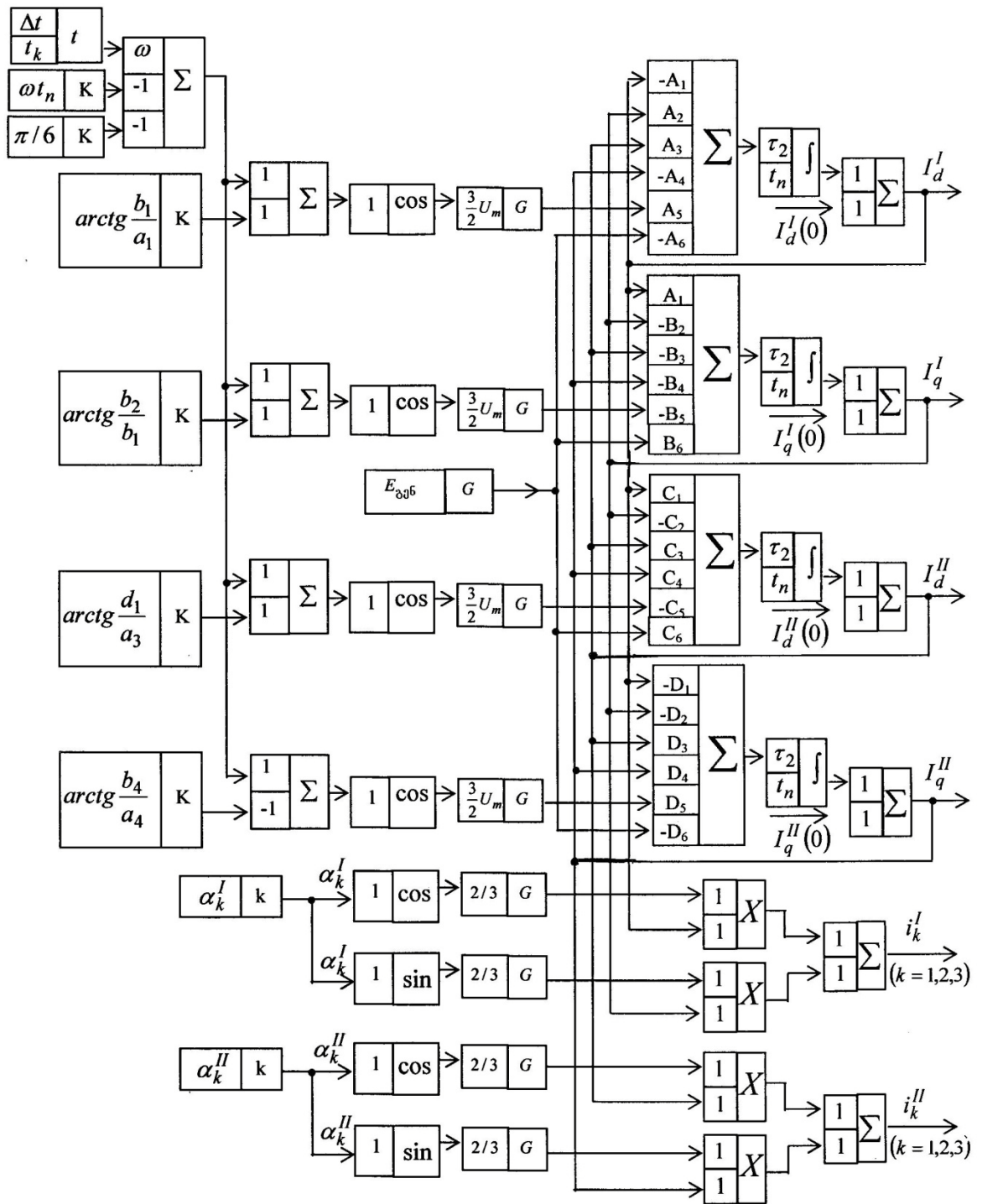
(250) გამოსახულებებიდან  $t_n \leq t \leq \tau_2$  ინტერვალში ინტეგრალის ამოღება გვაძლევს დენების შემდეგ გამოსახულებებს:

$$\begin{aligned}
& \begin{pmatrix} I_d^I \\ I_q^I \\ I_d^{II} \\ I_q^{II} \end{pmatrix} = \int_{t_n}^{\tau_2} \begin{pmatrix} -A_1 & A_2 & A_3 & -A_4 \\ A_2 & -B_2 & -B_3 & -B_4 \\ C_1 & -C_2 & C_3 & C_4 \\ -D_1 & -D_2 & D_3 & D_4 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I_d^I \\ I_q^I \\ I_d^{II} \\ I_q^{II} \end{pmatrix} + \\
& + \frac{3}{2} \cdot U_m \begin{pmatrix} A_5 \cos \left[ \omega(t-t_n) - \frac{\pi}{6} + \arctg \frac{b_1}{a_1} \right] \\ -B_5 \cos \left[ \omega(t-t_n) - \frac{\pi}{6} + \arctg \frac{b_2}{b_1} \right] \\ -C_5 \cos \left[ \omega(t-t_n) - \frac{\pi}{6} + \arctg \frac{d_1}{a_3} \right] \\ D_5 \cos \left[ \omega(t-t_n) - \frac{\pi}{6} - \arctg \frac{b_4}{a_4} \right] \end{pmatrix} + E_{\text{გპ6}} \begin{pmatrix} -A_6 \\ B_6 \\ C_6 \\ -A_6 \end{pmatrix} \left\{ dt + \begin{pmatrix} I_d(0) \\ I_q^I(0) \\ I_{d1}^{II}(0) \\ I_{q1}^{II}(0) \end{pmatrix} \right. \quad (260)
\end{aligned}$$

$i_k^I (k=1,2,3)$  და  $i_k^{II} (k=1,2,3)$  ფაზური დენებისთვის გვაქვს:

$$\left. \begin{aligned} i_k^I &= \frac{2}{3} \left( I_d^I \cos \alpha_k^I + I_q^I \sin \alpha_k^I \right), \quad (k=1,2,3) \\ i_k^{II} &= \frac{2}{3} \left( I_d^{II} \cos \alpha_k^{II} + I_q^{II} \sin \alpha_k^{II} \right), \quad (k=1,2,3) \end{aligned} \right\} \quad (261)$$

მიღებული (260) (261) გამოსახულების საფუძველზე აგებულ დენების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურულ სქემას აქვს ნახ.30-ზე ნაჩვენები სახე:



ნახ.30. რეზულტირებული დენების  $d$  და  $q$  მდგენელებისა და ფაზური დენების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა დროის  $t_n \leq t \leq \tau_2$  ინტერვალში (ნახ.23,ა)

გ) მათემატიკური მოდელირება  $\tau_2 \leq t \leq t_{n+1} = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) + \gamma \right]$  დროის

ინტერვალში (ნახ.23,ბ)

აღნიშნული ინტერვალის შესაბამისი სქემისათვის (ნახ23,ბ) რეზულტირებული კომპლექსური სიდიდეების მიმართ გვაქვს შემდეგი კომპლექსური განტოლებათა სისტემა:

$$\frac{3}{2} U_m e^{j \left[ \omega(t-t_{n-1}) - \frac{\pi}{6} \right]} = R^I \dot{I}^I + \frac{d\psi^I}{dt} \quad (262)$$

$$\begin{aligned} -\frac{1}{c_f} \int_{\tau_1}^{t_n} \dot{i}_1^{II} dt = & \left[ R^{II} + \frac{2}{3}(3R + R_1) \right] \dot{I}^{II} + \frac{2}{3}(3R + R_1) e^{j2\alpha_p} I^{*II} + \\ & + \frac{2}{3} (L_s^{II} + 3L + L_1) \frac{d\dot{I}^{II}}{dt} + \\ & + \frac{2}{3} (L_s^{II} + 3L + L_1) e^{j2\alpha_p} \frac{dI^{*II}}{dt} + \frac{d\psi^I}{dt} \end{aligned} \quad (263)$$

$$\psi^I = \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) \dot{I}^I + \frac{3}{2} M^{12} \dot{I}^{II} \quad (264)$$

$$\psi^{II} = \left( L_s^{II} + \frac{3}{2} M^{II} \right) \dot{I}^{II} + \frac{3}{2} M^{12} \dot{I}^I \quad (265)$$

$$E_{გენ} = (R_1 + R_{დრ}) \dot{i}_{დრ} + (L_1 + L_{დრ}) \frac{di_{დრ}}{dt} \quad (266)$$

(262)-(265)-დან ვღებულობთ შედეგ სკალარულ განტოლებათა სისტემას ცვლადების  $d, q$  მდგენელების მიმართ:

$$\begin{aligned}
& \left\| \begin{array}{l} \frac{3}{2} U_m \cos \left[ \omega(t - \tau_2) - \frac{\pi}{6} \right] - R^I I_d^I \\ \frac{3}{2} U_m \sin \left[ \omega(t - \tau_2) - \frac{\pi}{6} \right] - R^I I_q^I \\ - R_{d1}^{II} I_d^{II} - R_{q1}^{II} I_q^{II} - \frac{1}{c_f} \int_{\tau_2}^{t_{n+1}} \frac{2}{3} (I_d^{II} \cos \alpha_p + I_q^{II} \sin \alpha_p) dt \\ - R_{q2}^{II} I_d^{II} - R_{q1}^{II} I_q^{II} \end{array} \right\| = \\
& = \left\| \begin{array}{cccc} \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) & 0 & \frac{3}{2} M^{12} & 0 \\ 0 & \left( L_s^I + \frac{3}{2} M^I \right) & 0 & \frac{3}{2} M^{12} \\ \frac{3}{2} M^{12} & 0 & L_{d1}^{II} & L_{q1}^{II} \\ 0 & \frac{3}{2} M^{12} & L_{d1}^{II} & L_{q2}^{II} \end{array} \right\| \times \left\| \begin{array}{l} dI_d^I / dt \\ dI_q^I / dt \\ dI_d^I / dt \\ dI_q^I / dt \end{array} \right\| \quad (267)
\end{aligned}$$

სადაც (267)-ში ექვივალენტური აქტიური წინაღობებისათვის და ინდუქციურობებისათვის გვაქვს შემდეგი გამოსახულებები:

$$R_{d1}^{II} = R^{II} + \frac{4}{3}(3R + 2R_1) \cos^2 \alpha_p; \quad R_{q1}^{II} = R^{II} + \frac{2}{3}(3R + 2R_1) \sin 2\alpha_p$$

$$R_{q2}^{II} = R^{II} + \frac{4}{3}(3R + 2R_1) \sin^2 \alpha_p; \quad L_{q1}^{II} = \frac{2}{3}(L_s^{II} + 3L + L_1) \sin 2\alpha_p$$

$$L_{d1}^{II} = \left( L_s^{II} + \frac{3}{2} M^{II} \right) + \frac{4}{3}(3L + L_1 + L_s^I) \cos^2 \alpha_p$$

$$L_{q2}^{II} = \left( L_s^{II} + \frac{3}{2} M^{II} \right) + \frac{4}{3}(3L + L_1 + L_s^I) \sin^2 \alpha_p \quad (268)$$

წევის ტრანსფორმატორის ფაზური დენებისათვის გვაქვს:

$$i_k^I = \frac{2}{3} (I_d^I \cos \alpha_k^I + I_q^I \sin \alpha_k^I), \quad (k=1,2,3) \quad (269)$$

$$i_k^{II} = \frac{2}{3} (I_d^{II} \cos \alpha_k^{II} + I_q^{II} \sin \alpha_k^{II}), \quad (k=1,2,3) \quad (270)$$

მიღებული განტოლებათა სისტემა (267) და (269),(270) გამოსახულებები საშუალებას იძლევიან ჩატარდეს კომპიუტერული მოდელირება აღნიშნულ ინტერვალში.

დ) კომპიუტერული მოდელირება  $\tau_2 \leq t \leq t_{n+1} = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) + \gamma \right]$

დროის ინტერვალში (ნახ.23.ბ).

(267) განტოლებათა სისტემის ამოხსნა დენების  $d, q$  მდგენელების წარმოებულების მიმართ გვაძლევს შემდეგ გამოსახულებებს მატრიცულ ფორმაში:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} dI_d^I / dt \\ dI_q^I / dt \\ dI_d^{II} / dt \\ dI_q^{II} / dt \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} -A_1 & A_2 & A_3 & -A_4 \\ A_2 & -B_2 & -B_3 & -B_4 \\ C_1 & -C_2 & C_3 & C_4 \\ -D_1 & -D_2 & D_3 & D_4 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I_d^I \\ I_q^I \\ I_d^{II} \\ I_q^{II} \end{pmatrix} + \\ &+ \frac{3}{2} \cdot U_m \begin{pmatrix} A_5 \cos \left[ \omega(t - \tau_2) - \frac{\pi}{6} + \operatorname{arctg} \frac{b_1}{a_1} \right] \\ -B_5 \cos \left[ \omega(t - \tau_2) - \frac{\pi}{6} + \operatorname{arctg} \frac{b_2}{b_1} \right] \\ -C_5 \cos \left[ \omega(t - \tau_2) - \frac{\pi}{6} + \operatorname{arctg} \frac{d_1}{a_3} \right] \\ D_5 \cos \left[ \omega(t - \tau_2) - \frac{\pi}{6} - \operatorname{arctg} \frac{b_4}{a_4} \right] \end{pmatrix} + \\ &+ \left[ \frac{1}{c_f} \int_{\tau_2}^{t_{n+1}} \frac{2}{3} (I_d^{II} \cos \alpha_p + I_q^{II} \sin \alpha_q) dt \right] \times \begin{pmatrix} -A_6 \\ B_6 \\ C_6 \\ -A_6 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (271)$$

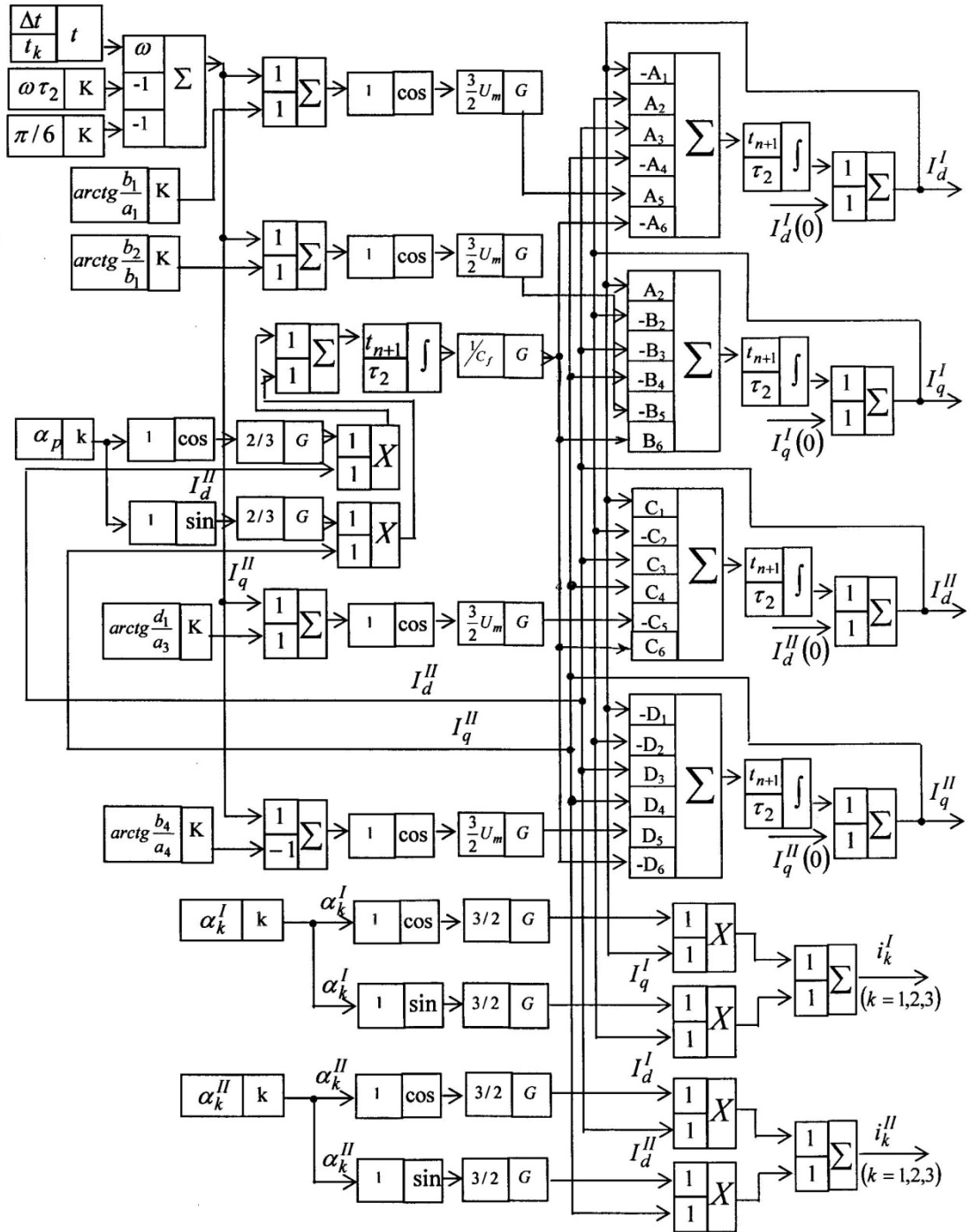
სადაც (271)-ში ექვივალენტური კოეფიციენტების საანგარიშოდ გამოსადეგია (251)-(259) გამოსახულებები, (268) გამოსახულებების საფუძველზე ექვივალენტური აქტიური წინაღობებისა და ინდუქციურობების გათვალისწინებით.

(271) გამოსახულებებიდან ინტეგრალის ამოღება  $\tau_2 \leq t \leq t_{n+1}$  დროის ინტერვალისათვის გვაძლევს შემდეგ ინტეგრალურ გამოსახულებებს დენების  $d, q$  მდგენელების მიმართ:

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} I_d^I \\ I_q^I \\ I_d^{II} \\ I_q^{II} \end{pmatrix} &= \int_{\tau_2}^{t_{n+1}} \begin{pmatrix} -A_1 & A_2 & A_3 & -A_4 \\ A_2 & -B_2 & -B_3 & -B_4 \\ C_1 & -C_2 & C_3 & C_4 \\ -D_1 & -D_2 & D_3 & D_4 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I_d^I \\ I_q^I \\ I_d^{II} \\ I_q^{II} \end{pmatrix} + \\
 &+ \frac{3}{2} \cdot U_m \begin{pmatrix} A_5 \cos \left[ \omega(t - \tau_2) - \frac{\pi}{6} + \operatorname{arctg} \frac{b_1}{a_1} \right] \\ -B_5 \cos \left[ \omega(t - \tau_2) - \frac{\pi}{6} + \operatorname{arctg} \frac{b_2}{b_1} \right] \\ -C_5 \cos \left[ \omega(t - \tau_2) - \frac{\pi}{6} + \operatorname{arctg} \frac{d_1}{a_3} \right] \\ D_5 \cos \left[ \omega(t - \tau_2) - \frac{\pi}{6} - \operatorname{arctg} \frac{b_4}{a_4} \right] \end{pmatrix} + \\
 &+ \left[ \frac{1}{c_f} \int_{\tau_2}^{t_{n+1}} \frac{2}{3} (I_d^{II} \cos \alpha_p + I_q^{II} \sin \alpha_q) dt \right] \times \begin{pmatrix} -A_6 \\ B_6 \\ C_6 \\ -A_6 \end{pmatrix} dt + \begin{pmatrix} I_d(0) \\ I_q^I(0) \\ I_d^{II}(0) \\ I_q^{II}(0) \end{pmatrix} \quad (272)
 \end{aligned}$$

(269), (270), (272) გამოსახულებების საფუძველზე შესაძლებელია აგებული იქნას რეზულტირებული დენების  $d, q$  მდგენელებისა და წევის ტრანსფორმატორის ფაზური დენების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა(ნახ.31), ხოლო (266) გამოსახულების საფუძველზე აიგება წევის ძრავის დენის გარდამავალი პროცესის მოდელის სტრუქტურული სქემა (ნახ.32). ნახ.32-ში გათვალისწინებულია (266) განტოლების წარმოდგენა ასეთ სახეში:



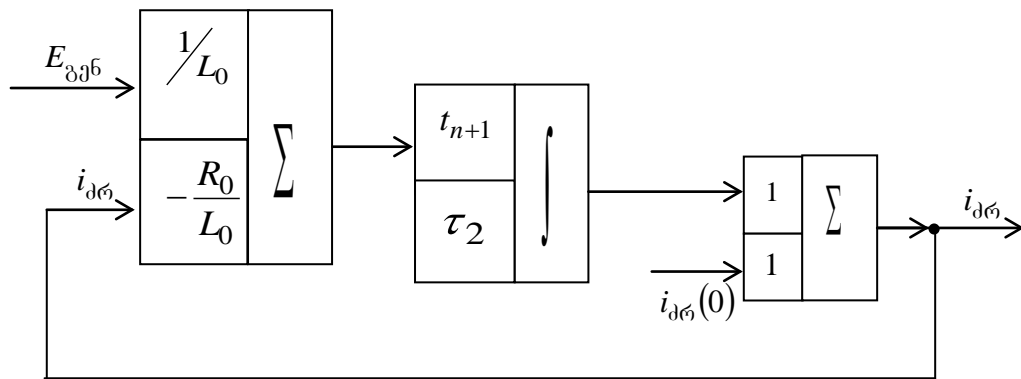


ნახ.31. რეზულტირებული დენების  $d$ ,  $q$  მდგენელებისა და ფაზური დენების გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემა დროის  $\tau_2 \leq t \leq t_{n+1}$  ინტერვალში (ნახ.23,ა)

$$i_{\text{დრ}} = \int_{\tau_2}^{t_{n+1}} \left( E_{\text{გპ6}} \frac{1}{L_0} - i_{\text{დრ}} \frac{R_0}{L_0} \right) dt + i_{\text{დრ}}(0) \quad (273)$$

სადაც (273) –ში გვაქვს:

$$R_0 = R_1 + R_{\text{დრ}} ; \quad L_0 = L_1 + L_{\text{დრ}} \quad (274)$$



ნახ.32. წევის ძრავის დენის გარდამავალი პროცესის მოდელის სტრუქტურული სქემა დროის  $\tau_2 \leq t \leq t_{n+1}$  ინტერვალებში (ნახ.23,ბ).

4.5 ერთიანი გარდაქმნილი სისტემის მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნა გაშვებისა და წვევითი რეჟიმების  $t_{n-1} \leq t \leq \tau_1$  დროის ინტერვალებისათვის (ნახ.20,ა) და რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმის  $t_n \leq t \leq \tau_2$  დროის ინტერვალებისათვის (ნახ.23,ა)

ა) გაშვებისა და წვევითი რეჟიმების  $t_{n-1} \leq t \leq \tau_1$  დროის ინტერვალის (ნახ.20,ა)

(163)-(165) განტოლებების გაწარმოებით ვღებულობთ [50]:

$$\| \frac{dI}{dt} \| = \| A \| \cdot \| I \| + \| A_1 \| \cdot \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} i_1^H dt + \| B_1 \| \cdot \| u(t) \| \quad (275)$$

სადაც (275)-ში მატრიცებისათვის გვაქვს:

$$\|I\| = \begin{Bmatrix} I_d^I \\ I_q^I \\ i_1^I \end{Bmatrix}; \quad \|A_1\| = \begin{Bmatrix} a_4 \\ b_4 \\ -c_4 \end{Bmatrix}; \quad \|B_1\| = \begin{Bmatrix} a_5 \\ b_5 \\ -c_5 \end{Bmatrix}; \quad \|A\| = \begin{Bmatrix} -a_1 & a_2 & a_3 \\ -b_1 - b_2 & b_3 \\ c_1 - c_2 & -c_3 \end{Bmatrix};$$

$$\|u(t)\| = \begin{Bmatrix} U_m \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_d^I) \\ U_m \cos(\omega t + \varphi_0 - \varphi_q^I) \\ U_m \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_1^I) \end{Bmatrix}; \quad (276)$$

(275) მატრიცული განტოლების ამოხსნას ვეძებთ ასეთ სახეში:

$$\|I(t)\| = e^{\|A\| \cdot t} \|k(t)\| \quad (277)$$

(277)-ში  $k(t)$  არის დროის ნამდვილი ცვლადის ფუნქცია. ჩავსვათ (277) გამოსახულება (275) განტოლებაში, შესაბამისად მივიღებთ:

$$\frac{d\|k(t)\|}{dt} = e^{-\|A\|t} \cdot \|A_1\| \cdot \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} i_1^I dt + e^{-\|A\|t} \cdot \|B_1\| \cdot \|u(t)\| \quad (278)$$

(278)-ში გათვალისწინებულია შემდეგი გამოსახულება:

$$\frac{d}{dt} e^{\|A\|t} = \|A\| e^{\|A\|t} = e^{\|A\|t} \|A\| \quad (279)$$

(278)-დან  $t_{n-1}$ -დან  $\tau_1$ -მდე ინტეგრალის საზღვრებში ინტეგრალის ამოღება გვაძლევს:

$$\|k(t)\| = \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} \left\{ e^{-\|A\|\tau} \cdot \|A_1\| \cdot \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} i_1^I dt + e^{-\|A\|\tau} \cdot \|B_1\| \cdot \|u(\tau)\| \right\} dt + \|k(t_{n-1})\| \quad (280)$$

(280) ჩავსვათ (277)-ში და მივიღებთ:

$$\| \|I(t)\| = e^{\|A\|t} \left\{ \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} \left[ e^{-\|A\|\tau} \cdot \|A_1\| \cdot \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} i_1^H dt + e^{-\|A\|\tau} \cdot \|B_1\| \cdot \|u(\tau)\| \right] d\tau + \|k(t_{n-1})\| \right\} \quad (281)$$

(277)-დან გვაქვს:

$$\| \|k(t_{n-1})\| = e^{-\|A\|t_{n-1}} \|I(t_{n-1})\| \quad (282)$$

ამრიგად, (275) მატრიცული განტოლების ამონახსნია:

$$\|I(t)\| = e^{\|A\|t} \left\{ \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} \left[ e^{-\|A\|\tau} \cdot \|A_1\| \cdot \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} i_1^H dt + e^{-\|A\|\tau} \cdot \|B_1\| \cdot \|u(\tau)\| \right] d\tau \right\} + e^{-\|A\|[t-t_{n-1}]} \cdot \|I(t_{n-1})\| \quad (283)$$

(283) განტოლებაში დავუშვათ  $t_{n-1} = kT$  და  $t = \tau_1 = (k+1)T$

$$\|I[(k+1)T]\| = e^{\|A\|T} \cdot \|I(kT)\| + e^{\|A\|(k+1)T} \times \int_{kT}^{(k+1)T} \left[ e^{-\|A\|\tau} \cdot \|A_1\| \cdot \int_{kT}^{(k+1)T} i_1^H dt + e^{-\|A\|\tau} \cdot \|B_1\| \cdot \|u(\tau)\| \right] d\tau \quad (284)$$

(284)-ში  $kT \leq t \leq (k+1)T$  ქვეინტერვალებში  $\| \|u(t)\| = \|u(kT)\|$

წარმოადგენს ნაჭერ-ნაჭერ მუდმივ სიდიდეს:

$$\| \|u(kT)\| = \left\| \begin{array}{l} U_m \cos(\omega kT + \varphi_0 + \varphi_d^I) \\ U_m \cos(\omega kT + \varphi_0 - \varphi_q^I) \\ U_m \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_1^H) \end{array} \right\| \quad (285)$$

(284)-ში გამოვიყენოთ ტოლობა:

$$\int_0^t e^{\|A\|\tau} d\tau = \|A\|^{-1} \cdot (e^{\|A\|t} - 1) = (e^{\|A\|t} - 1) \cdot \|A\|^{-1} \quad (286)$$

(286)-ის გათვალისწინება (284)-ში გვაძლევს აღნიშნულ  $t_{n-1} \leq t \leq \tau_1$  ინტერვალში საძიებელ სხვაობით მატრიცულ განტოლებას:

$$\|I[(k+1)T]\| = e^{\|A\|T} \cdot \|I(KT)\| + \left\{ \left( e^{\|A\|T} - 1 \right) \|A\|^{-1} \|B_1\| \cdot \|u(kT)\| + \left( e^{\|A\|T} - 1 \right) \|A\|^{-1} \|A_1\| \cdot \int_{kT}^{(k+1)T} i_1^H dt \right\} \quad (287)$$

(287)-ში დავშალოთ ტეილორის მწკრივად მატრიცული გამოსახულება:

$$\left( e^{\|A\|T} - 1 \right) \cdot \|A\|^{-1} = \|1\| \cdot T + \frac{1}{2!} \|A\| T^2 + \frac{1}{3!} \|A\|^2 T^3 + \dots = \|\delta(T)\| \quad (288)$$

(288) გამოსახულების ჩასმა (287)-ში გვაძლევს (275) განტოლების ზუსტ ამონახსნს:

$$\|I[(k+1)T]\| = e^{\|A\|T} \cdot \|I(KT)\| + \left\{ \|\delta(T)\| \cdot \|B_1\| \cdot [\|u(kT)\| - \|u(0)\|] + \|1\| \cdot \|I[1 \cdot T]\| - \|1\| e^{\|A\|T} \cdot \|I(0)\| \right\} \quad (288')$$

(288') სხვაობითი განტოლების მიღებაში გამოყენებული იქნა (287) განტოლებიდან მიღებული გამოსახულება  $k=0$  შემთხვევისათვის:

$$\|A_1\| \int_{kT}^{(k+1)T} i_1^H dt \approx \|\delta(T)\|^{-1} \left\{ \|I[(1 \cdot T)]\| - e^{\|A\|T} \|I(0)\| \right\} - \|B_1\| \cdot \|u(0)\| \quad (289)$$

(288')-ში გვაქვს:

$$\|I(0)\| = \begin{Bmatrix} I_d^I(0) \\ I_q^I(0) \\ I_1^H(0) \end{Bmatrix}; \quad \|u(0)\| = \begin{Bmatrix} U_m \cos(\varphi_0 + \varphi_d^I) \\ U_m \cos(\varphi_0 - \varphi_q^I) \\ U_m \cos(\varphi_0 + \varphi_1^H) \end{Bmatrix}; \quad (290)$$

(288') რეკურენტული სხვაობითი განტოლება წარმოადგენს კომპიუტერულ ტექნოლოგიებთან შეთავსებად მატრიცულ განტოლებას, რომლის საფუძველზე შესაძლებელია პროცესების ანალიზი და დენების ანგარიში კომპიუტერული პროგრამების გამოყენებით.

ბ) რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმების  $t_n \leq t \leq \tau_2$  დროის ინტერვალი (ნახ.23.ა)

(250) განტოლება ჩავწეროთ ნორმალურ ფორმაში:

$$\left\| \frac{dI}{dt} \right\| = \|A\| \cdot \|I\| + \|B\| \cdot \|u(t)\| + \|A_1\| \cdot E_{\text{გვ6}} \quad (291)$$

სადაც (291)-ში გვაქვს:

$$\|I\| = \begin{bmatrix} I_d^I \\ I_q^I \\ i_1^II \\ I_q^II \end{bmatrix}; \quad \|B\| = \begin{bmatrix} A_5 \\ -B_5 \\ -C_5 \\ D_5 \end{bmatrix}; \quad \|A_1\| = \begin{bmatrix} -A_6 \\ B_6 \\ C_6 \\ -D_6 \end{bmatrix}; \quad \|A\| = \begin{bmatrix} -A_1 & A_2 & A_3 & -A_4 \\ A_2 & -B_2 & -B_3 & -B_4 \\ C_1 & -C_2 & C_3 & C_4 \\ -D_1 & -D_2 & D_3 & D_4 \end{bmatrix};$$

$$\|u(t)\| = \frac{3}{2} U_m \begin{bmatrix} \cos \left[ \omega(t-t_n) - \frac{\pi}{6} + \arctg \frac{b_1}{a_1} \right] \\ \cos \left[ \omega(t-t_n) - \frac{\pi}{6} + \arctg \frac{b_2}{b_1} \right] \\ \cos \left[ \omega(t-t_n) - \frac{\pi}{6} + \arctg \frac{d_1}{a_3} \right] \\ \cos \left[ \omega(t-t_n) - \frac{\pi}{6} - \arctg \frac{b_4}{a_4} \right] \end{bmatrix} \quad (292)$$

ნორმალური ფორმაში წარმოდგენილი მდგომარეობათა ცვლადების (275) მატრიცული განტოლების ამოხსნის მეთოდის ანალოგიურად (283) განტოლების ამოხსნა გვძლევს შემდეგ ამონახსნს [50]:

$$\|I(t)\| = e^{\|A\|t} \left\{ \int_{t_n}^{\tau_2} \left[ e^{-\|A\|\tau} \cdot \|A_1\| \cdot E_{\text{გვ6}} + e^{-\|A\|\tau} \cdot \|B\| \cdot \|u(\tau)\| \right] d\tau \right\} + e^{\|A\|(t-t_n)} \cdot \|I(t_n)\| \quad (293)$$

(281) და (293) გამოსახულებები წარმოადგენენ შესაბამისად (275)-ის და (291) მატრიცული განტოლებების ზუსტ ამონახსნს, მაგრამ მათ აქვთ

არახელსაყრელი ფორმა კომპიუტერული ტექნიკის გამოყენებისათვის. კომპიუტერული ტექნიკის გამოყენებისას  $\|I(t)\|$  ცვლადებს ანგარიშობენ  $t$  ცვლადის რაიმე დისკრეტული მნიშვნელობებისათვის. ჩვეულებრივად  $\|I(t)\|$  ცვლადები იანგარიშება  $t = kT (k = 0, 1, 2, 3, \dots)$  დროებისათვის,  $T$  არის განსახილველ  $t_{n-1} \leq t \leq \tau_1$  და  $t_n \leq t \leq \tau_2$  ინტერვალებში გარკვეული გარემოებით შერჩეული დროის ქვეინტერვალი. განტოლებაში შემავალი ვექტორი  $u(kT)$  ცნობილია ყველა  $k$ -სთვის და რჩება  $\|I[(k+1)T]\|$ ;  $\|u(kT)\|$ ;  $\|I(kT)\|$  ცვლადებს შორის კავშირის გარკვევა. ასეთი კავშირი აღიწერება სხვაობითი განტოლების კერძო სახით. როგორც კი მიიღება სხვაობითი განტოლება, მაშინვე შეიძლება თანმიმდევრობით  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$  მთელი რიცხვებისათვის  $\|I(kT)\|$ -ს გაანგარიშება.

ვაჩვენოთ (293) განტოლების მიყვანა სხვაობითი განტოლებამდე. მიღებული შედეგები სამართლიანი იქნება მხოლოდ დროის მიმართ წრფივი ინვარიანტული ერთიანი ელექტრული სქემისათვის [40].

(293) განტოლებაში დავუშვათ  $t_n = kT$  და  $t = \tau_2 = (k+1)T$ , მაშინ გვაქვს:

$$\begin{aligned} \|I[(k+1)T]\| &= e^{\|A\|T} \cdot \|I(kT)\| + \\ &+ e^{\|A\|(k+1)T} \left\{ \int_{kT}^{(k+1)T} \left[ e^{-\|A\|\tau} \cdot \|A_1\| \cdot E_{\text{გე6}} + e^{-\|A\|\tau} \cdot \|B\| \cdot \|u(\tau)\| \right] d\tau \right\} \end{aligned} \quad (294)$$

(294)-ში  $E_{\text{გე6}}$  წარმოადგენს მუდმივ სიდიდეს თითოეული დროის ქვეინტერვალში, ხოლო  $\|u(t)\| = \|u(kT)\|$  დროის  $kT \leq t \leq (k+1)T$  ქვეინტერვალში წარმოადგენს ნაჭერ-ნაჭერ მუდმივ სიდიდეს:

$$\|u(kT)\| = \frac{3}{2} U_m \begin{vmatrix} \cos \left[ \omega kT - \frac{\pi}{6} + \operatorname{arctg} \frac{b_1}{a_1} \right] \\ \cos \left[ \omega kT - \frac{\pi}{6} + \operatorname{arctg} \frac{b_2}{b_1} \right] \\ \cos \left[ \omega kT - \frac{\pi}{6} + \operatorname{arctg} \frac{d_1}{a_3} \right] \\ \cos \left[ \omega kT - \frac{\pi}{6} - \operatorname{arctg} \frac{b_4}{a_4} \right] \end{vmatrix}; \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (295)$$

(294)-ში გამოვიყენოთ ტოლობა:

$$\int_0^t e^{\|A\|\tau} d\tau = \|A\|^{-1} \cdot (e^{\|A\|t} - 1) = (e^{\|A\|t} - 1) \cdot \|A\|^{-1} \quad (296)$$

(296) –ის გათვალისწინება (294)-ში გვაძლევს საძიებელ სხვაობითი მატრიცულ განტოლებას. ეს განტოლება წარმოადგენს არსებითად რეკურენტულ ფორმულას, რომელიც ადვილად ექვემდებარება კომპიუტერული ტექნოლოგიებით ამოცანის ამოხსნას:

$$\begin{aligned} \|I[(k+1)T]\| &= e^{\|A\|T} \cdot \|I(kT)\| + \\ &+ \left\{ (e^{\|A\|T} - 1) \cdot \|A\|^{-1} \|B\| \cdot \|u(kT)\| + (e^{\|A\|T} - 1) \cdot \|A\|^{-1} \|A_1\| \cdot E_{3\text{გ6}} \right\} \end{aligned} \quad (297)$$

პირველი შეხედვით (297)-ში მოგვეჩვენება, რომ  $\| \|A\|^{-1} \|$  მატრიცა უნდა იყოს არა განსაკუთრებული ( $\|A\| \neq 0$ ). ჩვენს შემთხვევაში ეს მოთხოვნა არ არის საჭირო, რადგან ჩვენ ფაქტიურად ვანგარიშობთ  $\| e^{\|A\|T} \|$  გამოსახულებას შემდეგი ტეილორის მწკრივის წევრების აჯამებით:

$$\begin{aligned} \left( e^{\|A\|T} - 1 \right) \cdot \|A\|^{-1} &= \left[ \left( 1 + \|A\| \cdot T + \frac{1}{2!} \|A\|^2 \cdot T^2 + \dots \right) - 1 \right] \cdot \|A\|^{-1} = \\ &= \|1\| \cdot T + \frac{1}{2!} \|A\| \cdot T^2 + \frac{1}{3!} \|A\|^2 \cdot T^3 + \dots \end{aligned} \quad (298)$$



ე.ი. საყურადღებოა ის გარემოება, რომ (297)-ში არ გვესაჭიროება  $\|A\|^{-1}$  შებრუნებული მატრიცის გამოთვლა.

(298)-ის ჩასმა (297)-ში მოგვცემს:

$$\|I[(k+1)T]\| = e^{\|A\| \cdot T} \cdot \|I(kT)\| + \left[ \|1\| \cdot T + \frac{1}{2!} \|A\| \cdot T^2 + \frac{1}{3!} \|A\|^2 \cdot T^3 + \dots \right] \times [\|B\| \cdot \|u(kT)\| + \|A_1\| \cdot E_{\text{გენ}}] \quad (299)$$

(299) განტოლება იძლევა  $\|I(kT)\|$ -სთვის ზუსტ ამონახსნს მხოლოდ  $\|u(t)\|$  ფუნქციის კერძო შემთხვევისათვის, გამოსახული (295) ფორმულით.

(299)-ში თუ ცნობილია  $\|I(0)\|$ -ის მნიშვნელობა მაშინ ნებისმიერი  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$  მთელი რიცხვებისათვის ვიპოვით  $\|I(1T)\|$ ,  $\|I(2T)\|$ ,  $\|I(3T)\|$ ,  $\dots$   $\|I(kT)\|$ , დენების მნიშვნელობებს  $1T, 2T, 3T, \dots kT$ , ქვეინტერვალისათვის.

#### შენიშვნა:

(126 - 128), (132 - 135), (137), (138), (141) გამოსახულებებში პარამეტრების ქვედა ინდექსები: ა, ყრ, ყ, ნ, ფ, თვ, პ შესაბამისად აღნიშნავენ: ექვივალენტურს, გამათანაბრებელ რეაქტორს, ღუზას, დატვირთვას, ფილტრს, აღგზნების გრაგნილს და რეაქტორს.

#### 4. დასკვნა

1. მართვადი გამმართველიანი მრავალფაზა გარდამქმნელ სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების სრულყოფილი მათემატიკური მოდელის მისაღებად მიზანშეწონილი და ეფექტურია ერთობლივად გამოყენებული იქნას ცვლადთა კომპლექსური გარდაქმნის მეთოდი და ცვლადთა სპექტრალურ-ოპერატორული გარდაქმნის მეთოდი. ამ დროს გამმართველის ცვლადი დენის წრედის მხრიდან და ვენტილური მოწყობილობის მხრიდან ეს მოდერნიზებული მეთოდი იძლევა გამარტივებულ და მოსახერხებელ მათემატიკურ მოდელს. აღნიშნული სისტემის ინტეგრირება განსახილველ ინტერვალებში გვამლევს საძიებელი უცნობების რეკურენტულ გამოსახულებებს, რომლებიც შეთავსებადია კომპიუტერული ტექნოლოგიებით ამოცანის შემდგომი ამოხსნასთან.
2. დენის ავტონომიური ინვერტორიანი მრავალფაზა გარდამქმნელ სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების გამოკვლევისა და გაანგარიშებისათვის სრულყოფილი მათემატიკური მოდელის მისაღებად, ტრანსფორმატორის ძირითადი პარამეტრების გათვალისწინებით, მიზანშეწონილი და ეფექტურია გამოყენებული იქნას მოდერნიზებული მეთოდი - მრავალფაზა ელექტრული სიდიდეების კომპლექსური და სპექტრული გარდაქმნის მეთოდი. ამ მეთოდის გამოყენება იძლევა ძირითადი ელექტრული სიდიდეების უწყვეტი ანალიზური გამოსახულებებს. მიღებულია, რომ გარკვეული პარამეტრებისას, ფაზური დენები გარდამავალ პროცესში შეიცავენ მიღევად რხევით მდგენელებს  $\omega$ ,  $\omega + \square$  კუთხური  $\omega - \square$  კუთხური სიხშირეებით. ინვერტორიანი მრავალფაზა გარდაქმნელ სისტემაში მიღებული მათემატიკური მოდელის გამოყენება კომპიუტერული პროგრამების დახმარებით წარმოებს სათანადო ალგორითმის შედგენით და გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემის აგებით.

3. აღნიშნული მეთოდით ანალიზური ამოხსნის, ექსპერიმენტული გამოკვლევების მონაცემების და ეგმ-ის მეშვეობით გაანგარიშებების შედარებამ გვიჩვენა მიღებული ანალიზური ამონახსნების ინჟინრული გაანგარიშებისათვის საკმარისი სიზუსტე.
4. დამუშავებულია წევის ქვესადგურის ერთიანი გარდამქმნელი ნახევარგამტარული სისტემების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების თეორიის საკითხები მატარებლის წევის ძრავის მართვის იმპულსური მოდულაციის, საკონტაქტო და სალიანდაგო ქსელების პარამეტრების გათვალისწინებით.

დამვრისა და წევის (გამართვის) რეჟიმიდან რეკუპერაციული დამუხრუჭების (ინვერტირების) რეჟიმზე და პირიქით გადართვის პროცესების ეფექტიანობის ამაღლების მიზნით ჩატარებულია არსებული გარდამქმნელი სისტემის სქემური გადაწყვეტა "ორი ვარსკვლავი გამათანაბრებელი ორფაზა რექტორით" მართვადი ნახევარგამტარულ ტირისტორებზე და IGBT ტრანზისტორულ მოდულზე.

5. დამუშავებულია წევის ქვესადგურის ერთიანი გამართველ-ინვერტორული გარდამქმნელი სისტემის საანგარიშო სქემები მატარებლის დამვრის, წევის და რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმებისათვის წევის ძრავის მართვის განედურ-იმპულსური მოდულაციის, საკონტაქტო და სალიანდაგო ქსელების პარამეტრების გათვალისწინებით დროის არასაკომუტაციო და კომუტაციური ინტერვალებში. წარმოდგენილია ელექტრომაგნიტური პროცესების გაანგარიშების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირების ალგორითმი.
6. ჩატარებულია ერთიანი გამართველ-ინვერტორული გარდამქმნელი სისტემის მატარებლის გაშვებისა და წევის რეჟიმებში ელექტრომაგნიტური პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება არა საკომუტაციო და კომუტაციური

დროის ინტერვალებისათვის. მიღებულია თითოეული ინტერვალებისათვის გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები და საძიებელი უცნობებისათვის რეკურენტული სხვაობითი განტოლებები კომპიუტერული პროგრამებით ამოცანის ამოხსნისათვის.

7. ჩატარებულია ამავე სისტემის მატარებლის რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმებში პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება დროის არასაკომუტაციო და კომუტაციური ინტერვალებისათვის. შედგენილია გარდამავალი პროცესების მოდელის სტრუქტურული სქემები. მიღებულია კომპიუტერული ტექნოლოგიებთან შეთავსებადი რეკურენტული სხვაობითი განტოლებები პროცესების გაანგარიშებების და ანალიზისათვის.
8. შედგენილია სისტემის მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებები, რომელთა საფუძველზეც მიღებულია შესაბამისი ამონახსნები რეკურენტული სხვაობითი განტოლებების სახით. ჩატარებულია პროცესების ანალიზი, როგორც გარდამავალი, ასევე დამყარებული რეჟიმებისათვის.
9. სადისერტაციო ნაშრომში წარმოდგენილი გარდაქმნილი სისტემების დამუშავების, ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების გაანგარიშების და ანალიზის მეთოდების სრულყოფის შედეგები უზრუნველყოფს პროცესების ოპტიმალურ მართვას და რეგულირებას წევის ქვესადგურების ელექტრომომარაგების საიმედოობის გაზრდის მიზნით.

### გამოყენებული ლიტერატურა

1. Пухорский А. А Тяговые и трансформаторные подстанции. М.Транспорт. 1983. 496с.
2. Марквард К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог . М. Транспорт. 1982. 526с.
3. Розенфельд В.Е.,Исаев И.П.,Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги. М. Транспорт. 1983. 328с.
- 4.Захарченко Д.Д., Ротанов Н.А.,Торчаков Е.В. Тяговые электрические машины и трансформаторы .М. Транспорт. 1979. 303с.
- 5.Мирошниченко Р.И., Ивахно П.Н. Особенности работы выпрямительно-инверторного агрегата с регулированием напряжения на шинах подстанции.Сборник научных трудов. М. Транспорт. 1985. 68-75с.
- 6.Лутидзе Ш.И. Основы теории электрических машин с управляемым полупроводниковым коммутатором. М. Энергия. 1968. 303с.
- 7.Шелесть В.А. Компьютерное моделирование переходных процессов в электротехнических устройствах. Техническая электродинамика. Часть 8. Киев. 2000. 9-14с.
- 8.Соколов С.Д., Бей Ю.М., Гуральник Я.Д., Чаусов О.Г. Полупроводниковые Преобразовательные агрегаты тяговых подстанций.М. Транспорт. 1979. 264с.
- 9.Иньков Ю.М., Ротанов Н.А., Феоктистов В.П., Чаусов О.Г. под ред. Инькова. Преобразовательные полупроводниковые устройства подвижного состава. М. Транспорт. 1982. 302с.
- 10.Пронтарский А.Ф. Системы и устройства электроснабжения.М. Транспорт. 1974. 272с.
- 11.Аксенов В.Н. Выпрямители и трансформаторные подстанции связи и радио. М. 1961. 440с.
- 12.Давидова И.К., Попов Б.И., Эрлих В.М. Справочник по эксплуатации тяговых подстанций и постов секционирования. М. Транспорт. 1978. 416с.
13. Засорин С.Н.,Карш Н.А.,Кучма К.Г.,Мирошниченко Р.И. Электронная и Ионная техника.Изд-во Транспорт. М. 1968. 375с.
14. Костенко М.П. Электрические машины. Спец. Часть. М-Л Госэнерго издат. 1949. 712с.
- 15.Векслер М.И. Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания. М. Транспорт. 1976. 120с.
- 16.Фигурнов Е.П. Релейная защита устройств электроснабжения железных дорог. М. Транспорт. 1981. 215с.
- 17.Быков В.А.,Зимаков В.А.,Овласюк В.Я.,Хальков В.С.,Шилов Л.Н. под ред. Овласюка В.А. Электронные устройства релейной защиты и автоматики в системах тягового энергоснабжения. М. Транспорт. 1974. 304с.
- 18.Лутидзе Ш.И.,Михневич Г.В.,Тафт В.А. Введение в динамику синхронных машин и машинно-полупроводниковых систем. Изд-во «Наука» 1973. 336с.
19. Грубер Л.О.,Перцовский Л.М.,Трофимов В.И. Устройство,монтаж и эксплуатация тяговых подстанций. М. Транспорт. 1969. 360сю

20. Лутидзе Ш.И. Новая электротехника. М. ИД «Лонгфелло». 2010. 336с.
21. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. 1-2 книга. Л. 1981.1-533с., 1-415с.
22. Мерабишвили П.Ф. Теория переходных процессов в цепях с вентильными Преобразователями. Тбилиси. 1990. 292с.
23. Григорьев В.И., Кироева Э.А., Быстрицкий Г.Ф., Харитон А.Г., Чохонелидзе А.Н. Справочник энергетика. Под ред. Чохонелидзе А.Н. М. «Колос» 2006. 488с.
24. Коган Ф.Л. Сборник методических пособий по контролю состояния электро-Оборудования. М. 1998. 494с.
25. Министерство топлива и энергетики Российской Федерации. Правила устройства Электроустановок. Шестое издание. Главгоснадзор России. М. 1998. 607с.
26. Лутидзе Ш.И., Джафаров Э.А., Блохин А.И. Сверхпроводящие трансформаторы энергетического назначения. Энергетика и электрификация. Выпуск 3. М. 1980. 57с.
27. Мерабишвили П.Ф., Кохреидзе Г.К. Электромагнитные процессы в трёхфазных управляемых выпрямителях. Электричество М. 1986. 8. Энергоатом-издат. 28-33с.
28. Мерабишвили П.Ф., Кохреидзе Г.К. Математическое моделирование электромагнитных процессов в преобразовательной системе с трёхфазным автономным инвертором тока. Электричества. 1990. 3. Энергоатом-издат. 31-37с.
29. Карибов С.И., Мерабишвили П.Ф., Азикури А.Ш. Обоснование нового принципа регулирования выпрямленного напряжения на электроподвижном составе с коллекторными тяговыми двигателями. Новочеркасск. 2009. 136-147с.
30. Кохреидзе Г., Курашвили И., Сихарулидзе А. Преобразовательная система тяговой подстанции по схеме «две обратные звезды с уравнительным реактором». ენერჯია. სამეცნიერო ტექნიკური ჟურნალი. 3 (51)/2009/ თბილისი. 59-67с.
31. Кохреидзе Г.К., Гогинашвили Н.Г., Инджия Л.Д., Курашвили И.А. Моделирование процессов в полупроводниковых преобразовательных установках тяговой подстанции. Изд-во «Электроинформ». Львов. 2009. 307-308с.
32. Кохреидзе Г.К., Лаошвили Д.П., Курашвили И.А., Инджия Л.Д. Регулирование переключения режимов рекуперации энергии (на украинском языке). Изд-во «Електро інформ» №1/2010. Энергетика. Електротехніка. Електроніка. Україна, Львов. 2010. 12-13с.
33. Кохреидзе Г., Лаошвили Д., Кохреидзе Д., Инджия Л., Курашвили И. Математическое и компьютерное моделирование коммутационных процессов в полупроводниковых преобразователях тяговой подстанции с двухфазным уравнительным реактором. ენერჯია. სამეცნიერო ტექნიკური ჟურნალი. 4(52)-1/2009. თბილისი. 36-48с.

- 34.Кохреидзе Г.,Лаошвили Д.,Инджия Л.,Курашвили И. Математическое и компьютерное моделирование внекоммутационных процессов в преобразовательных тяговой подстанции по схеме «две обратные звезды с уравнительным реактором». ენერჯია.სამეცნიერო ტექნიკური ჟურნალი.4 (52)-1/2009. თბილისი. 49-57ს.
- 35.Кохреидзе Г.,Лаошвили Д.,Курашвили И.,Инджия Л. Разработка полупроводниковой преобразовательной системы тяговой подстанции с компьютерным моделированием переходных процессов (на английском языке).Energyonlin.ge №1 2009.
- 36.Кохреидзе Г.,Лоашвили Д.,Кохреидзе Д.,Курашвили И. Трёхфазный мостовой выпрямительно-инверторный преобразователь с широтно-импульсным управлением тягового двигателя постоянного тока (на английском языке). Energyonlin.ge №1.2010.
- 37.Кохреидзе Г.,Курашвили И.,Лаошвили Д., Пхакадзе Ш. Режимы пуска и тяги двигателя постоянного тока с учётом трёхфазного мостового выпрямительно-инверторного преобразователя тяговой подстанции. Труд. НТУ «ХПИ», Харьков. 2010.
- 38.ყურაშვილი ი. წევის ქვესადგურის სამფაზა ბოგური გამმართველი-ინვერტორული გარდაქმნელის გათვალისწინებით ელმავლის მუდმივი დენის ძრავის გაშვებისა და წევის რეჟიმების მოდელირება. სტუ-ს სტუდენტთა და დოქტორანტთა ღია სამეცნიერო ტექნიკური კონფერენციის მასალები. თბილისი. 2010.
- 39.კობრიძე გ., ყურაშვილი ი., კობრიძე დ. სამფაზა ბოგური გამმართველი-ინვერტორული გარდაქმნელის გათვალისწინებით მუდმივი დენის ძრავის გაშვებისა და წევის რეჟიმების მენეჯმენტი. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია «ენერჯეტიკა:რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები». საქართველო, ქუთაისი. 2010. 313-320.
40. В.А. Иванов; Б. К. Чемоданов; В. С. Медведев; А. С. Ющенко. Математические основы теории автоматического регулирования. Изд-во «Высшая школа». Москва 1971. 807 с.
41. Л. О. Чуа; Пен-Мин Лин. Машинный анализ электронных схем (алгоритмы и вычислительные методы). Перевод с английского. Москва «Энергия» 1980. 638 с.
42. В. Е. Тонкаль; В. С. Руденко; В. Я. Жуйков; В.Е. Сучик; С. П. Денисюк; А. В. Новосельцев. Вентильные преобразователи переменной структуры. Киев Наукова Думка, 1990. 335с.
43. Л. Джюджи; Б. Пелли. Силовые полупроводниковые преобразователи частоты. Теория, характеристики, Применение. Перевод с английского. Москва Энергоатомиздат 1983.
44. И. В. Черных. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, Sim Power Systems и Simulink. Санкт-Петербург. 2008. 285 с.
45. С. Г. Герман-Галкин. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. MATLAB 6.0 Корона принт, 2001. 320с.

46. ყურაშვილი ი. წევის ქვესადგურების გამმართველებში და ინვერტორებში კომუტაციური და გარდამავალი პროცესების გაანგარიშების მეთოდების დამუშავება. №1 თემატურ სემინარზე წარმოდგენილი მოხსენების ტექსტი (ხელნაწერი). სტუ. თბილისი, 2011წ.
47. ყურაშვილი ი. წევის ქვესადგურების ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში ელექტრომაგნიტური პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება №2 თემატურ სემინარზე წარმოდგენილი მოხსენების ტექსტი (ხელნაწერი). სტუ. თბილისი, 2012წ.
48. კობრეიძე გ., გოგინაშვილი ნ., ყურაშვილი ი., ფხაკაძე შ., მეგენეიშვილი თ. წევის ქვესადგურების ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში ელექტრომაგნიტური გარდამავალი პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება. სამეცნიერო ტექნიკური ჟურნალი "ენერჯია", 2 (62) 2012წ. თბილისი.
49. კობრეიძე გ., გოგინაშვილი ნ., ყურაშვილი ი., ფხაკაძე შ., მეგენეიშვილი თ. წევის ქვესადგურების ერთიან გარდამქმნელ სისტემაში მატარებლის რეკუპერაციული დამუხრუჭების რეჟიმებში პროცესების მათემატიკური და კომპიუტერული მოდელირება. სამეცნიერო ტექნიკური ჟურნალი "ენერჯია", 2 (62) 2012წ. თბილისი.
50. კობრეიძე გ., გოგინაშვილი ნ., ყურაშვილი ი., ფხაკაძე შ., მეგენეიშვილი თ. წევის ქვესადგურების ერთიანი გარდამქმნელი სისტემის მდგომარეობათა ცვლადების მატრიცული განტოლებების ამოხსნა. სამეცნიერო ტექნიკური ჟურნალი "ენერჯია", 2 (62) 2012წ. თბილისი.