



საქართველოს ტექნიკური
უნივერსიტეტი
1922 წლიდან

დიმიტრი ხარეზავა

ელექტრომომარაგების სისტემაში მიმდინარე ელექტროდინამიკური
პროცესების ექსპერიმენტული გამოკვლევის ფიზიკური მოდელის
დამუშავება

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა: „ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“

შიფრი: 0713

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, 0160, საქართველო

2023 წ.

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ფაკულტეტი: ენერგეტიკის

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით დიმიტრი ხარებავას მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ელექტრომომარაგების სისტემაში მიმდინარე ელექტროდინამიკური პროცესების ექსპერიმენტული გამოკვლევის ფიზიკური მოდელის დამუშავება“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის საინჟინრო, ტექნოლოგიური და საბუნებისმეტყველო საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

-----, ----- 2023 წელი

სამეცნიერო ხელმძღვანელი/ხელმძღვანელები: პროფესორი მ. ქობალაია

რეცენზენტი: _____

რეცენზენტი: _____

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2023 წ.

ავტორი: დიმიტრი ხარებავა

დასახელება: „ელექტრომომარაგების სისტემაში მიმდინარე ელექტროდინამიკური პროცესების ექსპერიმენტული გამოკვლევის ფიზიკური მოდელის დამუშავება“

სადოქტორო პროგრამა: „ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“

მისანიჭებელი კვალიფიკაცია: ენერგეტიკის და ელექტროინჟინერიის დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: _____

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

ავტორის ხელმოწერა _____

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

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

რეზიუმე

თანამედროვე ეტაპზე, მსოფლიოში შექმნილი ენერგეტიკული კრიზისის პირობებში, ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს ამოცანას ელექტრომომხმარებლების შეუფერხებელი და საერთაშორისოდ მიღებული სტანდარტების ხარისხის მაჩვენებლების ელექტროენერჯით უზრუნველყოფა წარმოადგენს. ამავდროულად, ელექტრომომარაგების სისტემებსა და ელექტრომომხმარებლების ელექტროტექნოლოგიურ დანადგარებს ენერგეტიკული მაჩვენებლებისა და ენერგოეფექტურობის ამაღლების მიმართ მოთხოვნა წაყენებათ.

მნიშვნელოვანია რომ, ელექტრომომარაგების სისტემაში ჩართულ ელექტრომომხმარებლებს, რომელთა შემადგენლობაში მრავალი პრაქტიკული დანიშნულების ელექტროტექნოლოგიური დანადგარები და კომპლექსები შედის, ურთიერთგანსხვავებული მოქმედების პრინციპი და მუშაობის რეჟიმი გააჩნიათ. ამასთან ერთად, მკვეთრად განსხვავებულია მათ მიერ ელექტრომომარაგების ქსელისადმი ელექტროენერჯის მიწოდების საიმედოობისა და ელექტროენერჯის ხარისხის, ანუ ელექტრომაგნიტური თავსებადობის მიმართ წაყენებული მოთხოვნები. აგრეთვე, განსხვავებულია მათ მიერ ელექტრომომარაგების ქსელის ელემენტებში განვითარებული ელექტრომაგნიტური დინამიკური პროცესები და ამ პროცესების მიერ წარმოქმნილი ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებები.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, ელექტრომომარაგების სისტემებში მომხმარებელთა ელექტრომაგნიტური თავსებადობის უზრუნველყოფის, ელექტრომომარაგების სისტემების საიმედოობის ამაღლებისა და ენერგეტიკული მაჩვენებლების გაუმჯობესების ძირითად პირობას წარმოადგენს ელექტროტექნოლოგიური დანადგარებისა და ელექტრომომარაგების ქსელის ძალოვან ელემენტებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური დინამიკური პროცესების ღრმა მეცნიერული შესწავლა და მათ მიერ შექმნილი ელექტრომაგნიტური გარემოს დადგენა.

ბოლო პერიოდში, ქალაქების ელექტრომომარაგების სისტემის დაბალი და საშუალო ძაბვის ქსელებში, სულ უფრო და უფრო ინტენსიურად მიმდინარეობს, ახალი ტექნოლოგიების ათვისების კვალდაკვალ შექმნილი, საშუალო და დიდი სიმძლავრის, მძიმე რეჟიმში მომუშავე, თანამედროვე, მართვადი ელექტროტექნოლოგიური დანადგარებისა და კომპლექსების ჩართვა. ამის გამო, ქსელის გამანაწილებელი მოწყობილობების სალტებზე რადიკალურად იცვლება ელექტრომაგნიტური გარემო, მომხმარებლებზე მიწოდებული ელექტროენერჯის ხარისხის მაჩვენებლების პარამეტრები, რის გამოც შეუძლებელი ხდება ელექტრომომხმარებელთა ელექტრომაგნიტური თავსებადობის უზრუნველყოფა. აქედან გამომდინარე, ახალი ქსელების აგებისა და მოქმედი გაფართოება-რეკონსტრუქციას დაქვემდებარებული ელექტრომომარაგების გამანაწილებელი მოწყობილობების დაპროექტებისას, საჭიროა, წინასწარ ელექტრომომარაგების დატვირთვის ფიზიკურ მოდელზე გამოკვლევულ იქნეს, ქსელში ჩართული ყველა ელექტროტექნოლოგიური დანადგარებისა და კომპლექსების მიერ განვითარებული ელექტრომაგნიტური დინამიკური პროცესები, წარმოქმნილი ემდ-ები და მათ მიერ ელექტროენერჯის ხარისხის მაჩვენებლებისადმი წაყენებული მოთხოვნები.

აღსანიშნავია, რომ ელექტრომომარაგების ქსელში ჩართული მომხმარებელთა ელექტროტექნოლოგიური დანადგარებისა და კომპლექსების ელექტრომაგნიტური თავსებადობის უზრუნველყოფისა და ელექტრომომარაგების სისტემების საიმედოობის ამაღლების ერთ-ერთ უმთავრეს ამოცანას წარმოადგენს ელექტრომომარაგების ქსელისა და ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების ძალოვან ელემენტებში მიმდინარე ელექტროდინამიკური პროცესების ღრმა მეცნიერული გამოკვლევა, მათ მიერ ქსელში შექმნილი ელექტრომაგნიტური გარემოს და გავრცელებული ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებების დადგენა.

ნაშრომში ჩატარებულია ქ. თბილისის ელექტრომომარაგების სისტემის ოთხი, 110/(6-10) კვ ძაბვის, დამწვევი ქვესადგურის გამანაწილებელ მოწყობილობებში არსებული ელექტრომაგნიტური გარემო. ექსპერიმენტული გამოკვლევების საფუძველზე დადგენილია, რომ, ელექტრომაგნიტური დინამიკური პროცესები ქსელის ცალკეულ ფაზებში ურთიერთგანსხვავებულად მიმდინარეობს. აგრეთვე, დასაბუთებულია, რომ განსხვავებულია ცალკეული ფაზებში გამავალი დატვირთვის დენების მრუდის ფორმის დამახინჯების ხარისხი, წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრის პარამეტრები, ცალკეულ ფაზებში შექმნილი ელექტრომაგნიტური გარემო, წარმოქმნილი ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებების ხასიათი და პარამეტრები.

დადგენილია, რომ ელექტრომომარაგების ქსელის ელემენტებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტურ დინამიკურ პროცესებს ძირითადად განაპირობებს შემდეგი ფაქტორები: ქვესადგურის 6-10 კვ ძაბვის გამანაწილებელ მოწყობილობებთან მიერთებული დიდი აქტიური და რეაქტიული დატვირთვების მყისიერი ჩართვა-გამორთვა, დიდი სიმძლავრის ელექტრორკალური დანადგარებისა და კომპლექსების მუშაობის რეჟიმების შედეგად ძალურ ნაწილში განვითარებული ელექტრომაგნიტური დინამიკური პროცესები; ელექტრომომხმარებლებისა და ელექტრომომარაგების ქსელების ელემენტებში წარმოქმნილი მოკლედ შერთვები.

მნიშვნელოვანია, რომ ქსელში ძირითადად დომინირებს აქტიური და რეაქტიული დატვირთვის დენების არასიმეტრიულობა, ცალკეულ ფაზებში წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკები. ამავდროულად, მნიშვნელოვნად დაბალია ცალკეულ ფაზების, რეაქტიული სიმძლავრის კოეფიციენტები.

ნაშრომში შესწავლილ იქნა ელექტრომომარაგების ახალი ქსელებისა და გამანაწილებელი მოწყობილობების გაფართოება-რეკონსტრუქციის პროექტების შედგენისას გამოყენებული „ელექტრომომარაგების დატვირთვების ფიზიკური მოდელები“. დასაბუთებულია, რომ დატვირთვის არსებული მოდელების გამოყენება მიუღებელია, რადგან, ისინი ვერ უზრუნველყოფენ ქსელის ცალკეულ ფაზებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევას და წარმოქმნილი ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებების დადგენას.

ნაშრომში შემოთავაზებულია „ელექტრომომარაგების ქსელის დატვირთვების ფიზიკური მოდელი“, რომელიც საშუალებას გვაძლევს, წინასწარ გამოვიკვლიოთ გამანაწილებელ მოწყობილობებთან მიერთებული ელექტროტექნოლოგიური დანადგარებისა და კომპლექსების მუშაობის რეჟიმების შედეგად, ქსელის თითოეულ ფაზაში განვითარებული ელექტრომაგნიტური სტატიკური და დინამიკური პროცესები. განვსაზღვროთ ელექტრომაგნიტური გარემო და დავადგინოთ წარმოქმნილი ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებები. შესაბამისად, მიღებული კვლევების შედეგების საფუძველზე, შეიძლება შევადგინოთ ელექტრომომარაგების ქსელის, ელექტრომომარაგების საიმედოობის,

ელექტრომომხმარებელთა ელექტრომაგნიტური თავსებადობის, ქსელისა და მომხმარებლების ენერგეტიკული მაჩვენებლებისა და ენერგოეფექტურობის თვალსაზრისით, ოპტიმალური სქემა, განვსაზღვროთ ქსელის ცალკეული ელემენტების პარამეტრები.

შემოთავაზებული დატვირთვის ფიზიკური მოდელისათვის დამუშავებულია ძალური ნაწილის ცალხაზოვანი სქემა და მიკროპროცესორული მართვის სისტემა, რომელიც შესრულებულია კომპანია „შნეიდერ ელექტრიკის“ მიერ წარმოებული პროგრამირებადი კონტროლერის ბაზაზე. ამასთან, მართვის სისტემა მოიცავს ცალკეული ფაზების აქტიური, ინდუქციური და ტევადური უჯრედების დამოუკიდებელ მართვის ბლოკებს. შედგენილია აქტიური და რეაქტიული დატვირთვების ერთსაათიანი ინტერვალის საფეხუროვანი დღე-ღამური გრაფიკები და ცალკეული უჯრედების პარამეტრების განსაზღვრის მათემატიკური გამოსახულებები.

Abstract

In the current era, amid the global energy crisis, it is vital to provide electricity consumers with internationally recognized quality standards. Furthermore, there is a growing necessity to boost the energy performance and efficiency of power supply systems and electrotechnological devices utilized by electric consumers.

To ensure the electromagnetic compatibility of electric consumers, including various devices and complexes, within the power supply system, it is crucial to understand their operational principles and modes. Their requirements for electricity supply reliability and electromagnetic compatibility vary significantly. These devices create diverse electromagnetic obstacles and dynamic processes in the power supply network.

To enhance power supply system reliability, energy efficiency, and electromagnetic compatibility, a comprehensive scientific investigation of electromagnetic dynamic processes in power elements is essential. This research should also focus on identifying the electromagnetic environment created by these processes.

The integration of advanced and technologically sophisticated electrotechnological installations into urban power supply systems is a growing trend. This adoption of new technologies brings about significant changes in the electromagnetic environment and quality parameters of electricity at the network distribution device terminals. As a result, ensuring electromagnetic compatibility among consumers becomes increasingly challenging.

Hence, it becomes crucial to conduct a thorough investigation of the electromagnetic dynamic processes generated by all integrated electrotechnological installations when designing power supply distribution devices for new network construction or expansion-reconstruction projects. This investigation should analyze the electromagnetic fields generated and their impact on power quality indicators, based on a physical model of the power supply load.

The objective of ensuring electromagnetic compatibility and improving power supply system reliability involves conducting scientific research on electrodynamic processes in power elements and electrotechnological installations. This research aims to identify the electromagnetic environment and detect widespread obstacles within the network.

This paper presents an analysis of the electromagnetic environment within the distribution devices of four 110/(6-10) kV step-down substations in the Tbilisi power supply system. Through experimental research, it has been observed that the electromagnetic dynamic processes vary across the individual phases of the network. Furthermore, the findings support the notion that there are differences in the extent of distortion in the load current curve shape as it passes through each phase, the parameters of the high-order harmonic spectrum, the electromagnetic environment generated in each phase, as well as the nature and characteristics of electromagnetic interferences.

The study determines that the electromagnetic dynamic processes in power supply network elements are primarily influenced by three factors: the instantaneous switching on and off of large active and reactive loads connected to the 6-10 kV voltage distribution devices of the substation, the electromagnetic dynamics resulting from the operation modes

of high-power electric arc installations and complexes, and short-circuits occurring within power consumers and power supply networks.

It is crucial to note that the network is predominantly characterized by the asymmetry of active and reactive load currents, as well as the generation of high-order harmonics in individual phases. Additionally, the reactive power coefficients of individual phases are considerably lower.

The paper investigates the use of "physical models of power supply loads" in the planning and design of expansion-reconstruction projects for new power supply networks and desalination devices. It argues that the existing load models are inadequate since they fail to adequately consider the examination of electromagnetic processes occurring in individual phases of the network and the determination of the resulting electromagnetic disturbances. As a result, the paper justifies that the use of these existing load models is unacceptable.

The paper proposes use of "physical model of power supply network loads", which allows us to preliminarily investigate the electromagnetic static and dynamic processes developed in each phase of the network as a result of the operation modes of the electrotechnological installations and complexes connected to the distribution devices. Define the electromagnetic environment and identify the emerging electromagnetic obstacles. Accordingly, based on the results of the studies, we can draw up an optimal scheme in terms of power supply network, power supply reliability, electromagnetic compatibility of power consumers, energy indicators and energy efficiency of the network and consumers, determine the parameters of individual elements of the network.

The physical model of the proposed load involves the development of a one-line diagram representing the power part of the system. Additionally, a microprocessor control system, based on a programmable controller manufactured by "Schneider Electric," is incorporated. The control system consists of independent control blocks for active, inductive, and capacitive cells of each phase.

To further analyze and characterize the load, step-by-step day-night profiles of active and reactive loads are generated at hourly intervals. Mathematical representations are also employed to determine the parameters of individual cells within the system. These efforts contribute to a comprehensive understanding of the load's behavior and aid in optimizing the performance and efficiency of the power supply network.

შესავალი	17
ლიტერატურის მიმოხილვა	20
თავი 1. ელექტრომომარაგების სისტემის ელემენტებში ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების მიერ განვითარებული ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევა	22
1.1. ელექტრომომარაგების სისტემის ელემენტებში ელექტრომაგნიტური პროცესების წარმოქმნის ძირითადი წყაროები და მათი გავლენა ქსელის ელემენტებზე	22
1.1.1 ელექტრომომარაგების სისტემებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური დინამიკური პროცესების გამოკვლევა და გამომწვევი მიზეზების დადგენა	22
1.1.2 ელექტრომომარაგების მიერ ელექტრული ენერჯის ხარისხისადმი წაყენებული ძირითადი მოთხოვნები	23
1.1.3 ელექტრომომარაგების მუშაობის რეჟიმებით ქსელში განვითარებული ელექტრომაგნიტური პროცესები და მათი გავლენა ელექტროენერჯის ხარისხზე	25
1.1.4 ელექტრომომარაგების სისტემის აქტიური და რეაქტიული დატვირთვების თავისებურებანი და დატვირთვების გრაფიკები	28
1.1.5 დატვირთვების ასიმეტრიულობის გავლენა ელექტრომიმდებებსა და ელექტროტექნოლოგიურ დანადგარებზე	39
1.1.6 ელექტრორკალური ღუმელების მიერ განვითარებული ელექტრომაგნიტური დინამიკური პროცესების გამოკვლევა	43
თავი 2. ელექტრომომარაგების სისტემის ელექტროდინამიკური პროცესების ექსპერიმენტული გამოკვლევის არსებული ფიზიკური მოდელების შეფასება	48
2.1 ელექტრომომარაგების სისტემის ექსპერიმენტული გამოკვლევის არსებული ფიზიკური მოდელი	48
2.2 ასინქრონული ძრავას უჯრედის გამოკვლევა	49
2.3 აქტიური დატვირთვის უჯრედის გამოკვლევა	53
2.4 ინდუქციური დატვირთვის უჯრედის გამოკვლევა	61
2.5 ტევადური დატვირთვის უჯრედის გამოკვლევა	64
2.6 ელექტრორკალური დატვირთვის უჯრედის გამოკვლევა	67

თავი 3. ელექტრომომარაგების სისტემის ელექტროდინამიკური პროცესების ექსპერიმენტული გამოკვლევის სრულყოფილი ფიზიკური მოდელის დამუშავება	77
3.1. დატვირთვის ფიზიკური მოდელის ბლოკების მართვის სისტემის დამუშავება	77
3.1.1 ასინქრონული ძრავას უჯრედის მართვის სისტემა	77
3.1.2 ელექტრორკალური დატვირთვის უჯრედი	78
3.1.3 აქტიური, ინდუქციური და ტევადური დატვირთვის უჯრედი	81
3.2. ელექტრომომარაგების სისტემაში მიმდინარე ელექტროდინამიკური პროცესების ექსპერიმენტული გამოკვლევის სრულყოფილი მოდელის მართვის სისტემის დამუშავება	95
3.2.1 Zelio Logic SR2B121FU - პროგრამირებადი ლოგიკური კონტროლერი	95
3.2.2 ელექტრომომარაგების სისტემაში მიმდინარე ელექტროდინამიკური პროცესების ექსპერიმენტული გამოკვლევის სრულყოფილი მოდელის სქემა	101
დასკვნა	102
გამოყენებული ლიტერატურა	104

ცხრილების ნუსხა

83

ცხრილი 1. ფიზიკური მოდელის აქტიურ - ტევადური დატვირთვის ელექტრული პარამეტრების ცხრილი.....	72
ცხრილი 2. აქტიურ - ინდუქციური დატვირთვის მაღალი რიგის ჰარმონიკული სპექტრი.....	73
ცხრილი 3. მართვის სქემის ელემენტების ნომენკლატურა.....	76
ცხრილი 4. გამანაწილებელი მოწყობილობის A ფაზის აქტიური და რეაქტიული დატვირთვის დღე-ღამური გრაფიკების ცხრილი.....	86
ცხრილი 5. გამანაწილებელი მოწყობილობის B ფაზის აქტიური და რეაქტიული დატვირთვის დღე-ღამური გრაფიკების ცხრილი.....	87
ცხრილი 6. გამანაწილებელი მოწყობილობის C ფაზის აქტიური და რეაქტიული დატვირთვის დღე-ღამური გრაფიკების ცხრილი	88
ცხრილი 7. დატვირთვის ფიზიკური მოდელის ბლოკების მართვის სისტემის ალგორითმი	91
ცხრილი 8. მართვის სისტემის პროგრამა	92
ცხრილი 9. Zelio soft - მართვის სქემის ელემენტების ნომენკლატურა I	99
ცხრილი 10. Zelio soft - მართვის სქემის ელემენტების ნომენკლატურა II	100

ნახაზების ნუსხა

83.

ნახაზი 1. აქტიური და რეაქტიული დატვირთვების დღე-ღამური გრაფიკები.....	29
ნახაზი 2. 60 წუთინი დატვირთვის გრაფიკები: ა) წერტილოვანი, ანალიზატორიდან ამოღებული და ბ) საფეხუროვანი, დამუშავებული.....	30
ნახაზი 3. №1 ქვესადგურის ცალკეული ფაზების ჯამური აქტიური დატვირთვის გრაფიკები.....	31
ნახაზი 4. №1 ქვესადგურის ჯამური სამფაზა აქტიური დატვირთვის გრაფიკი.....	32
ნახაზი 5. ქვესადგურის ცალკეული ფაზების აქტიური დატვირთვის დღე-ღამური გრაფიკები.....	33
ნახაზი 6. ქვესადგური №1-ის სამფაზა აქტიური დატვირთვის დღე-ღამური გრაფიკი.....	34
ნახაზი 7. ქვესადგური №2 - ცალკეული ფაზების აქტიური დატვირთვის დენის ცვლილების მრუდეები.....	35
ნახაზი 8. ქვესადგური №2 - ცალკეული ფაზის ძაბვის ცვლილების მრუდეები.....	36
ნახაზი 9. ქვესადგური №2 - სრული სიმძლავრის გრაფიკი თითოეული ფაზისათვის	37
ნახაზი 10. ქვესადგური №2 - ჯამური სრული სიმძლავრის გრაფიკი.....	38
ნახაზი 11. ქვესადგური „ჩულურეთი“-ის 6 კვ-ის ძაბვის №7 ფიდერის აქტიური დატვირთვის დენების ვექტორული დიაგრამა 30 წუთიანი ინტერვალით.....	42
ნახაზი 12. ელექტრორკალური ღუმელის საღუმელე ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის აქტიური დატვირთვის დენის მრუდი.....	43
ნახაზი 13. საწარმოს 110 კვ-ის სასალტე ანალიზატორებიდან ამოღებული ელექტრორკალური ღუმელის 24 საათიანი დენის გრაფიკი თითოეული ფაზისათვის.....	44
ნახაზი 14. საწარმოს 110 კვ-ის სასალტის ანალიზატორებიდან ამოღებული ელექტრორკალური ღუმელის ცალკეული ფაზის 24 საათიანი ძაბვის მრუდი.....	45

ნახაზი 15. საწარმოს 110 კვ-ის სალტის ანალიზატორებიდან ამოღებული სიხშირის 24 საათიანი ცვალებადობის მრუდი.....	46
ნახაზი 16. ექსპერიმენტალური გამოკვლევის ფიზიკური მოდელის ცალხაზოვანი სქემა	49
ნახაზი 17. ფიზიკური მოდელის ასინქრონული ძრავას უჯრედის პრინციპიალური სქემა.....	50
ნახაზი 18. ფიზიკური მოდელის ასინქრონული დატვირთვის უჯრედის ძაბვისა და დატვირთვის დენის მრუდეები ძრავას უქმ სვლაზე მუშაობისას.....	51
ნახაზი 19. ფიზიკური მოდელის ასინქრონული დატვირთვის უჯრედის ძაბვისა და დატვირთვის დენის მრუდეები ძრავას დატვირთვისას.....	52
ნახაზი 20. ფიზიკური მოდელის დატვირთვის ქვეშ მყოფი ძრავას მაღალი რიგის ჰარმონების სპექტრი.....	52
ნახაზი 21. ფიზიკური მოდელის აქტიური დატვირთვის უჯრედი.....	53
ნახაზი 22. ფიზიკური მოდელის აქტიური დატვირთვის უჯრედის ძაბვისა და დატვირთვის დენის მრუდეები პირდაპირი ჩართვისას.....	55
ნახაზი 23. ფიზიკური მოდელის აქტიური დატვირთვის უჯრედის ძაბვისა და დატვირთვის დენის მრუდეები დიოდების არხის ჩართვისას.....	56
ნახაზი 24. ფიზიკური მოდელის აქტიური დატვირთვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრი დიოდების ჩართვისას.....	57
ნახაზი 25. ფიზიკური მოდელის აქტიური დატვირთვის უჯრედის ძაბვისა და დატვირთვის დენის მრუდეები ტირისტორული არხის ჩართვისას.....	58
ნახაზი 26. ფიზიკური მოდელის აქტიური დატვირთვის ძაბვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრი ტირისტორული არხის ჩართვისას.....	59
ნახაზი 27. ფიზიკური მოდელის აქტიური დატვირთვის უჯრედის ძაბვისა და დატვირთვის დენის მრუდეები ასიმეტრიული რეჟიმისას.....	60
ნახაზი 28. ფიზიკური მოდელის ინდუქციური დატვირთვის უჯრედის სქემა.....	61
ნახაზი 29. ფიზიკური მოდელის ინდუქციური დატვირთვის უჯრედის ძაბვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრი.....	63
ნახაზი 30. ფიზიკური მოდელის ტევადური დატვირთვის უჯრედი.....	64

ნახაზი 31. ფიზიკური მოდელის ტევადური დატვირთვის უჯრედის ძაბვისა და დატვირთვის დენის მრუდეები.....	65
ნახაზი 32. ფიზიკური მოდელის ტევადური დატვირთვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრი.....	66
ნახაზი 33. ფიზიკური მოდელის ელექტრორკალური დატვირთვის უჯრედი.....	67
ნახაზი 34. ფიზიკური მოდელის ელექტრორკალური ღუმელის უჯრედის დენისა და ძაბვის მრუდეები.....	68
ნახაზი 35. ფიზიკური მოდელის ელექტრორკალური ღუმელის უჯრედის ძაბვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრი.....	69
ნახაზი 36. ფიზიკური მოდელის აქტიურ - ტევადური ძაბვისა და დატვირთვის დენის მრუდეები.....	71
ნახაზი 37. აქტიურ- ტევადური დატვირთვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრი.....	72
ნახაზი 38. ფიზიკური მოდელის აქტიურ - ინდუქციური ძაბვისა და დატვირთვის დენის მრუდეები.....	73
ნახაზი 39. აქტიურ- ინდუქციური დატვირთვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრი.....	74
ნახაზი 40. Zelio Logic SR2B121FU - საფეხუროვანი მართვის სქემა (ნაწილი 1).....	75
ნახაზი 41. Zelio Logic SR2B121FU - საფეხუროვანი მართვის სქემა (ნაწილი 2).....	75
ნახაზი 42. ასინქრონული ძრავას უჯრედის ძალური ნაწილის სქემა.....	77
ნახაზი 43. ელექტრორკალური უჯრედის ძალური ნაწილის სქემა.....	89
ნახაზი 44. ა) ერლ-ის ტიპის დატვირთვის დიაგრამა; ბ) ელექტროამძრავის მართვის მოკარნახე სიგნალის დიაგრამა.....	80
ნახაზი 45. აქტიური დატვირთვის უჯრედის ძალური ნაწილის სქემა.....	81
ნახაზი 46. ქ/ს „ჩუღურეთი“ 6 კვ-ის ფ№7 A ფაზის დენი 24 საათიანი გრაფიკი.....	83
ნახაზი 47. ქ/ს „ჩუღურეთი“ 6 კვ-ის ფ№7 B ფაზის დენი 24 საათიანი გრაფიკი.....	84
ნახაზი 48. ქ/ს „ჩუღურეთი“ 6 კვ-ის ფ№7 C ფაზის დენი 24 საათიანი გრაფიკი.....	85

ნახაზი 49. გამანაწილებელი მოწყობილობის ცალკეული ფაზების აქტიური დატვირთვის დღე-ღამური გრაფიკები.....	89
ნახაზი 50. გამანაწილებელი მოწყობილობის ჯამური აქტიური დატვირთვის დღე-ღამური გრაფიკი.....	90
ნახაზი 51. გამანაწილებელი მოწყობილობა.....	93
ნახაზი 52. Zelio soft - პროგრამის ინტერფეისი.....	96
ნახაზი 53. Zelio Logic SR2A201FU - Zelio soft -საფეხუროვანი მართვის სქემა I.....	97
ნახაზი 54. Zelio Logic SR2A201FU - Zelio soft -საფეხუროვანი მართვის სქემა II.....	98
ნახაზი 55. Zelio Logic SR2A201FU - Zelio soft -საფეხუროვანი მართვის სქემა III.....	99
ნახაზი 56. ელექტროდინამიკური პროცესების ექსპერიმენტალური გამოკვლევის სრულყოფილი მოდელის სქემა.....	101

გამოყენებული აბრევიატურები

- ეგხ – ელექტროგადამცემი ხაზი;
- ედპ – ელექტროდინამიკური პროცესები;
- ემდ – ელექტრომაგნიტური დაბრკოლება;
- ემგ – ელექტრომაგნიტური გარემო;
- ემმ – ელექტრომაგნიტური მდგომარეობა;
- ემპ – ელექტრომაგნიტური პროცესები;
- ემს – ელექტრომომარაგების სისტემა;
- ედპეგფმ – ელექტროდინამიკური პროცესების ექსპერიმენტალური
გამოკვლევის ფიზიკური მოდელი;
- ეტდ – ელექტროტექნოლოგიური დანადგარები;
- ეტკ – ელექტროტექნოლოგიური კომპლექსები;
- მრკ – მაღალი რიგის ჰარმონიკები.

შესავალი

თანამედროვე ეტაპზე, მსოფლიოში შექმნილი ენერგეტიკული კრიზისის პირობებში, ელექტრომომარაგების სისტემების მიმართ წაყენებულ ერთ-ერთ ძირითად მოთხოვნას ელექტრომომხმარებლების შეუფერხებელი და საერთაშორისოდ მიღებული სტანდარტების ხარისხის მაჩვენებლების ელექტროენერგიით უზრუნველყოფა წარმოადგენს (ხარებავა, 2021). ამავდროულად, ელექტრომომარაგების ქსელებს, ელექტრომომხმარებლების ელექტროტექნოლოგიურ დანადგარებსა და კომპლექსებს, მაღალი ენერგეტიკული მაჩვენებლებისა და ენერგოეფექტურობის მიმართ მოთხოვნა წაყენებათ (ჭუნაშვილი ბ., პეტროსიანი ა., გამრეკელაშვილი თ., ხარებავა დ., 2016).

მნიშვნელოვანია რომ, ელექტრომომარაგების სისტემაში ჩართულ ელექტრომომხმარებლებს, რომელთა შემადგენლობაში მრავალი პრაქტიკული დანიშნულების ელექტროტექნოლოგიური დანადგარები და კომპლექსები შედის, ურთიერთგანსხვავებული მოქმედების პრინციპი და მუშაობის რეჟიმი გააჩნიათ. ამასთან ერთად, მკვეთრად განსხვავებულია მათ მიერ ელექტრომომარაგების ქსელისადმი ელექტროენერგიის მიწოდების საიმედოობისა და ელექტროენერგიის ხარისხის, ანუ ელექტრომაგნიტური თავსებადობის მიმართ წაყენებული მოთხოვნები. აგრეთვე, განსხვავებულია მათ მიერ ელექტრომომარაგების ქსელის ელემენტებში განვითარებული ელექტრომაგნიტური პროცესები და ამ პროცესების მიერ წარმოქმნილი ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებები (ემდ) (ჭუნაშვილი ბ., ქობალია მ., ხარებავა დ., 2016).

აღსანიშნავია, რომ ელექტრომომარაგების ქსელში ჩართული მომხმარებელთა ელექტროტექნოლოგიური დანადგარებისა (ეტდ) და კომპლექსების ელექტრომაგნიტური თავსებადობის (ემთ) უზრუნველყოფის, ელექტრომომარაგების სისტემების საიმედოობის ამაღლებისა და ენერგეტიკული მაჩვენებლების გაუმჯობესების ერთ-ერთ უმთავრეს ამოცანას წარმოადგენს ელექტრომომარაგების ქსელისა და ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების ძალოვან ელემენტებში მიმდინარე ელექტროდინამიკური პროცესების (ემპ) ღრმა მეცნიერული გამოკვლევა, მათ მიერ შექმნილი ელექტრომაგნიტური გარემოს (ემგ)

და ქსელში გავრცელებული ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებების (ემდ) დადგენა (Tchunashvili B., Kobalia M., Petrosyan A., Gamrekelashvili T., Kharebava D., 2020).

ბოლო პერიოდში, ქალაქების ელექტრომომარაგების სისტემის დაბალი და საშუალო ძაბვის ქსელებში, სულ უფრო და უფრო ინტენსიურად მიმდინარეობს ახალი ტექნოლოგიების ათვისების საფუძველზე შექმნილი საშუალო და დიდი სიმძლავრის მუშაობის მძიმე რეჟიმის მქონე თანამედროვე მართვადი ელექტროტექნოლოგიური დანადგარებისა და კომპლექსების ჩართვა. შედეგად, ქსელში რადიკალურად იცვლება ელექტრომაგნიტური გარემო, მომხმარებლებზე მიწოდებული ელექტროენერჯის ხარისხის მაჩვენებლების პარამეტრები. ამის გამო შეუძლებელი ხდება ელექტრომომხმარებელთა ელექტრომაგნიტური თავსებებადობის უზრუნველყოფა (Чунашвили Б., Кобалия М., Петросян А., Гамреკელაშვილი Т., Ртвелაძე Н., 2020). შესაბამისად, ახალი ქსელების აგებისა და მოქმედი გაფართოება-რეკონსტრუქციას დაქვემდებარებული ელექტრომომარაგების ქსელების გამანაწილებელი მოწყობილობების დაპროექტებისას, საჭიროა წინასწარ ელექტრომომარაგების დატვირთვის ფიზიკურ მოდელზე გამოკვლევულ იქნეს ქსელში ჩართული ყველა ეტდ-ის მიერ განვითარებული ემპ-ები, წარმოქმნილი ემდ-ები და მათ მიერ ელექტროენერჯის ხარისხის მაჩვენებლებისადმი წაყენებული მოთხოვნები (Кудрин, Б.И., 2006).

სადისერტაციო ნაშრომის ფორმატში გამოკვლევულ იქნა ქ. თბილისის ელექტრომომარაგების სისტემის ოთხი, 110/(6-10) კვ ძაბვის, დამწვევი ქვესადგურის საშუალო ძაბვის გამანაწილებელ მოწყობილობებში არსებული ელექტრომაგნიტური გარემო. ექსპერიმენტული გამოკვლევების საფუძველზე დადგენილია, რომ ცალკეული ფაზების აქტიური და რეაქტიული დატვირთვები ურთიერთ განსხვავებულია და ქსელის ცალკეულ ფაზებში სტატიკური და დინამიკური ემპ-ები ურთიერთ განსხვავებულად მიმდინარეობს. ასევე, დასაბუთებულია, რომ განსხვავებულია ცალკეული ფაზებში გამავალი დატვირთვის დენების მრუდის ფორმის დამახინჯების ხარისხი, წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრის პარამეტრები, ცალკეულ ფაზებში შექმნილი ელექტრომაგნიტური გარემო, წარმოქმნილი ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებების ხასიათი და პარამეტრები.

ნაშრომში შესწავლილ იქნა ელექტრომომარაგების სისტემის გაფართოება-რეკონსტრუქციის და ახალი ქსელების პროექტირებისას გამოყენებული „ელექტრომომარაგების ქსელის დატვირთვების ფიზიკური მოდელები“. შესწავლის საფუძველზე დადგენილია, რომ დატვირთვის არსებული მოდელების გამოყენება მიუღებელია, რადგან ისინი ვერ უზრუნველყოფენ ცალკეულ ფაზებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევას და მათ მიერ ქსელის ელემენტებში გავრცელებული ემდ-ების დადგენას.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, ნაშრომში დაისახა მიზანი: შეიქმნას ელექტრომომარაგების ქსელის დატვირთვების ფიზიკური მოდელი, რომელიც უზრუნველყოფს ემს-ის დაბალი, საშუალო და მაღალი ძაბვის ქსელების გამანაწილებელ მოწყობილობებთან მიერთებული ეტდ-ისა და კომპლექსების მიერ ქსელის ცალკეულ ფაზებში განვითარებული ელექტრომაგნიტური დინამიკური პროცესების გამოკვლევას, მათ მიერ ქსელის ელემენტებში წარმოქმნილი ემდ-ების ხასიათისა და პარამეტრების განსაზღვრას და ქსელის ელემენტებზე ზემოქმედების დადგენას.

შემოთავაზებული „ელექტრომომარაგების ქსელის დატვირთვების ფიზიკური მოდელი“ საშუალებას გვაძლევს, ელექტრომომარაგების სისტემის ქსელების გაფართოება-რეკონსტრუქციისა და ახლის პროექტირებისას, წინასწარ ჩავატაროთ სრულყოფილი გამოკვლევა გამანაწილებელ მოწყობილობებთან მიერთებული ეტდ-ისა და კომპლექსების მუშაობის რეჟიმების შედეგად, ქსელის თითოეულ ფაზაში განვითარებული ელექტრომაგნიტური სტატიკური და დინამიკური პროცესები, განვსაზღვროთ ელექტრომაგნიტური გარემო და დავადგინოთ წარმოქმნილი ემდ-ები. შესაბამისად, ფიზიკური მოდელიდან მიღებული კვლევების შედეგების საფუძველზე, შეიძლება შევადგინოთ ელექტრომომარაგების ქსელის, საიმედოობის, ელექტრომომხმარებელთა ელექტრომაგნიტური თავსებადობის, ქსელისა და მომხმარებლების ენერგეტიკული მაჩვენებლებისა და ენერგოეფექტურობის თვალსაზრისით, ოპტიმალური სქემა, განვსაზღვროთ ქსელის ცალკეული ელემენტების პარამეტრები.

ლიტერატურის მიმოხილვა

სადისერტაციო თემასთან დაკავშირებული სამეცნიერო ნაშრომები მრავლადაა გამოქვეყნებული ქართულ და უცხოურ სხვადასხვა გამოცემებში. სადისერტაციო ნაშრომებსა და სამეცნიერო სტატიებში ძირითადად წარმოდგენილია ელექტრომომარაგების ქსელების ელემენტებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური დინამიკური პროცესების გამოკვლევების შედეგები. სასწავლო ლიტერატურა ძირითადად მოიცავს ელექტრომომხმარებელთა ელექტრომაგნიტური თავსებადობის, ელექტრომომარაგების საიმედოობისა და ელექტროენერჯის ხარისხის საკითხებს.

ქართულ და უცხოურ ლიტერატურაში დეტალურადაა გამოკვლეული და შესწავლილი ელექტროტექნოლოგიური დანადგარებისა და კომპლექსების მუშაობის რეჟიმების შედეგად ელექტრომომარაგების დაბალი და საშუალო ძაბვის ქსელებში განვითარებული ელექტრომაგნიტური დინამიკური პროცესები, მათ მიერ წარმოქმნილი და ქსელის ელემენტებში გავრცელებული ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებები. შესაბამისად, გამოკვლეულია აგრესიული ეტდ-ების ცალკეული ფაზის დატვირთვის დენის მრუდის ფორმის დამახინჯების შედეგად ქსელში გავრცელებული მაღალი რიგის ჰარმონიკების წარმოქმნის მიზეზები და პარამეტრები. ჩატარებულია, მაღალი რიგის ჰარმონიკების ელექტრომიმღებებზე ზემოქმედების ანალიზი და შეფასება.

რიგი ნაშრომები ეძღვნება ელექტრორკალური დანადგარების მიერ წარმოქმნილი მრკ-ის შემზღუდავი მოწყობილობის მართვის სისტემის დამუშავებას და ტირისტორულ ელემენტებზე შესრულებული მართვადი გამმართველებით აღჭურვილი ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების დატვირთვის დენის ფორმის დამახინჯების გამასწორებელი ფილტრის მდოვრე რეგულირების მართვის სისტემის დამუშავებას.

დასაბუთებულია, რომ ელექტრომიმღების მგრძობიარობა ჰარმონიკების მიმართ ძირითადად დამოკიდებულია ჰარმონიკის რიგზე. შესაბამისად, ჰარმონიკების ელექტრომიმღებებზე ზემოქმედების შეფასებისათვის შემოღებულია დანადგარის ჰარმონიკების მიმართ მგრძობიარობის კოეფიციენტი,

ელექტრომიმღების მგრძობიარობის მახასიათებელი, ჰარმონიკის ელექტრომიმღებზე ზემოქმედების ეფექტურობის კოეფიციენტი და ზემოქმედების ეფექტი. შემოთავაზებულია სპექტრში შემავალი ჰარმონიკების ჯამური ზემოქმედების ეფექტის საანგარიშო გამოსახულება.

სხვადასხვა ნაშრომში შემოთავაზებულია წარმოქმნილი მრკ-ების შემზღუდავი ფილტრების სქემები და მდოვრე რეგულირების მართვის სისტემები. წარმოდგენილია „ელექტროენერჯის ხარისხის მაჩვენებლების კონტროლისა და აღრიცხვის“ სტენდზე ჩატარებული ექსპერიმენტული გამოკვლევებით მიღებული შედეგები და დასაბუთებულია, რომ ელექტრომომხმარებლის დატვირთვის დენის შედეგად ქსელში წარმოქმნილი ძაბვის მრკ-ების სპექტრის ყოველი სიხშირე მკვეთრად გამოხატული ასიმეტრიულობით ხასიათდება და საჭიროა იგი გათვალისწინებულ იქნას ფილტრების შეერთების სქემების შედგენისას.

რიგი ნაშრომი ეძღვნება რეაქტიული სიმძლავრის საკომპენსაციო მოწყობილობების გავლენას ელექტრომომარაგების ქსელში მიმდინარე ელექტრომაგნიტურ პროცესებსა და წარმოქმნილ ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებებს. წარმოდგენილი ექსპერიმენტული კვლევის მასალების ანალიზის საფუძველზე გაკეთებულია სათანადო დასკვნები. დადგენილია, რომ ემს-ებში რეაქტიული სიმძლავრის საკომპენსაციო მოწყობილობების მიერ განვითარებული პროცესები გამოწვეულია კონდენსატორთა ბატარეების ჩართვა - გამორთვის გარდამავალი პროცესების დენის ბიძგებით. დადგენილია, რომ ჩართვისას ძირითადად ხანმოკლე გადამაბვა დომინირებს, ხოლო გამორთვისას კი - ძაბვის სიღრმისეული ჩავარდნა. ამავდროულად დასაბუთებულია, რომ ახალი საწარმოების ელექტრომომარაგების ქსელების პროექტირებისას, მოთხოვნილი რეაქტიული სიმძლავრეების კომპენსაციისათვის, მიზანშეწონილია გამოყენებულ იქნეს, ტრანზისტორულ მართვაზე დაფუძნებული, მდოვრე რეგულირების სისტემით აღჭურვილი საკომპენსაციო მოწყობილობები. მნიშვნელოვანია, რომ გამოქვეყნებულ ლიტერატურაში ნაკლებადაა წარმოდგენილი ელექტრომომარაგების დატვირთვების გამოკვლევის ფიზიკურ მოდელებთან დაკავშირებული საკითხები.

**თავი 1. ელექტრომომარაგების სისტემის ელემენტებში
ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების მიერ განვითარებული
ელექტრომაგნიტური პროცესების გამოკვლევა**

**1.1. ელექტრომომარაგების სისტემის ელემენტებში ელექტრომაგნიტური
პროცესების წარმოქმნის ძირითადი წყაროები და მათი გავლენა ქსელის
ელემენტებზე**

**1.1.1 ელექტრომომარაგების სისტემებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური
დინამიკური პროცესების გამოკვლევა და გამომწვევი მიზეზების დადგენა**

ელექტრომომარაგების სისტემა მრავალ სხვადასხვა ძაბვისა და სიმძლავრის დამწვევ ქსესადგურებს მოიცავს, რომლებიც ურთიერთ და ელექტროსისტემასთან სხვადასხვა სიგრძისა და განივკვეთის საჰაერო ელექტროგადამცემი ხაზებითაა დაკავშირებული. მნიშვნელოვანია, რომ ელექტროგადამცემ ხაზებს განსხვავებული აქტიური, ინდუქციური და ტევადური წინააღმდეგობები გააჩნიათ. ამავე დროულად, ელექტრომომარაგების სისტემის ქვესადგურების გამანაწილებელ მოწყობილობებთან მიერთებული არიან ელექტრომომხმარებლები, რომლებიც აღჭურვილნი არიან განსხვავებულ მოქმედების პრინციპზე დაფუძნებული დამუშაობის რეჟიმის მქონე სხვადასხვა ტექნოლოგიური დანიშნულების მრავალი ელექტროტექნოლოგიური დანადგარითა და ელექტროტექნოლოგიური კომპლექსებით (ლაოშვილი, 2006).

შესაბამისად, ელექტრომომარაგების ქსელის ცალკეულ უბნებში განვითარებულ ელექტრომაგნიტურ პროცესებს და შექმნილ ელექტრომაგნიტურ გარემოს გამანაწილებელ მოწყობილობასთან მიერთებული ტექნოლოგიური დანადგარები განაპირობებს. ასევე, ელექტრომაგნიტური პროცესების მიერ წარმოქმნილი ელექტრომაგნიტური დაბროლებების ამპლიტუდურ მნიშვნელობას დატვირთვის დენის სიდიდე და ქსელის პარამეტრები განსაზღვრავს (Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б., Севостьянов. А.А., 2004).

უნდა აღინიშნოს, რომ ყოველ ელექტროტექნოლოგიურ დანადგარს ქსელში არსებული ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებების მიმართ განსხვავებული მგრძობიარობა გააჩნიათ. შესაბამისად, გამანაწილებელ მოწყობილობის სალტებზე არსებული ელექტრომაგნიტური გარემოს მიმართ განსხვავებული მოთხოვნები გააჩნიათ.

მაშასადამე, ელექტრომომარაგების ქსელის ნებისმიერ დონეზე, ერთიდაიგივე სალტესთან მიერთებული ელექტრომომხმარებლების ელექტრომაგნიტური თავსებადობის უზრუნველყოფისათვის საჭიროა გამოკვლეულ იქნას ყველა მიერთებული ტექნოლოგიური დანადგარის მიერ ქსელში წარმოქმნილი ელექტრომაგნიტური დინამიკური პროცესები, დადგენილ იქნას შექმნილი ელექტრომაგნიტური გარემო და დადგენილ იქმას წარმოქმნილი და ქსელში გავრცელებული ემდ-ები.

1.1.2 ელექტრომომხმარებლების მიერ ელექტრული ენერჯის ხარისხისადმი წაყენებული ძირითადი მოთხოვნები

ელექტრომომარაგების ქსელში ჩართული ელექტროტექნოლოგიური დანადგარებისა და კომპლექსების მდგრად და გამართულ მუშაობას, ტექნოლოგიური პროცესის მართვის სიზუსტეს, მუშაობის საექსპლუატაციო ხანგრძლივობას, ენერგეტიკული მაჩვენებლებისა და ენერგოეფექტურობის დონეს დიდ წილადად ქსელიდან მიწოდებული ელექტროენერჯის ხარისხი განაპირობებს (Dugan R. C., McGranaghan M.F., Santoso S., Beauty H. W., 2012). ამავდროულად, ქსელის გამანაწილებელ მოწყობილობებთან მიერთებული ელექტრომიმღებების ელექტრომაგნიტური თავსებადობა მთლიანად ძაბვის ხარისხზეა დამოკიდებული. ასევე, ძაბვის ხარისხზეა დამოკიდებული ელექტრომომარაგების სისტემის ცალკეული ელემენტების გამართული მუშაობა და ენერგოეფექტურობა მაგალითად: ქსელის ცალკეული ელემენტების რელეური დაცვის სელექტიურობა, მგრძობიარობა და სწრაფმოქმედება; ელექტროენერჯის აღრიცხვის სისტემის სიზუსტე; დისპეტჩერული მართვის სისტემების გამართული მუშაობა; ძაბვის დენისა და სიმძლავრეების გაზომვისა და კონტროლის სისტემების სიზუსტე (Perera S., Elphick S., 2022).

თავის მხრივ, ელექტროენერჯის ხარისხს ძირითადად ძაბვის რამოდენიმე პარამეტრის, ანუ მაჩვენებლების მიხედვით განსაზღვრავენ და აფასებენ. მომხმარებელზე მიწოდებული ელექტროენერჯის (ძაბვის) ხარისხს ძირითადად შემდეგი მაჩვენებლების მიხედვით აფასებენ (Дьякова А.Ф. Максимов Б.К., Борисо Р.К., 2004):

- ძაბვის ნომინალური მნიშვნელობიდან გადახრა – $\delta U_{\text{დაზ}}$;
- ძაბვის რხევა (რყევა) – δU_t ;
- ძაბვის ციმციმის (ფლიკერის) მოვლენა – P_t ;
- ძაბვის მრუდის სინუსოიდალურობის დამახინჯების კოეფიციენტი – K_u ;
- ძაბვის n-ური ჰარმონიული მდგენელის კოეფიციენტი – $KU(n)$;
- ნულოვანი მიმდევრობის ძაბვის კოეფიციენტი – KOU ;
- ძაბვის არასიმეტრიულობა უკუმიმდევრობის მდგენელის მიხედვით – $K2U$;
- ძაბვის არასიმეტრიულობა ნულოვანი მიმდევრობის მდგენელის მიხედვით – KOU ;
- სიხშირის გადახრა ნომინალური მნიშვნელობიდან – Δf ;
- ძაბვის ჩავარდნის ხანგრძლივობა – Δt_x ;
- იმპულსური ძაბვის მნიშვნელობა – $U_{\text{იმპ}}$;
- დროებითი გადაძაბვის კოეფიციენტი – δU_t ;

აღსანიშნავია, რომ ელექტროენერჯის ხარისხის მაჩვენებლების შეფასება მოცემული ნორმების მიხედვით წარმოებს 24 საათიან საანგარიშო პერიოდისათვის.

მნიშვნელოვანია, რომ ელექტროენერჯის მაჩვენებლები საერთაშორისო კანონმდებლობითაა ნორმირებული (Muhammad Zaki, 2012). ქვემოთ მოცემულია ევროპის EN 50160 სტანდარტებით მიღებული მრკ-ის საშუალო მნიშვნელობის ნორმები.

კენტი რიგის ჰარმონიკებისათვის				ლუწი რიგის ჰარმონ.	
სამის არაჯერადი		სამის ჯერადი			
ჰარმონიკის რიგი, γ	ჰარმონიკის ძაბვა, %	ჰარმონიკის რიგი, γ	ჰარმონიკის ძაბვა, %	ჰარმონიკის რიგი, γ	ჰარმონიკის ძაბვა, %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1

11	3.5	15	0.5	6-24	0.5
13	3	21	0.5		
17	2	-	-	-	-
19	1.5	-	-	-	-
23-25	1.5	-	-	-	-

ელექტრომომარაგების სისტემის ქვესადგურებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესების შედეგად ძირითადად შემდეგი სახის ემდ-ები წარმოიქმნება (Axelberg P., Bollen H.J., 2002):

- 1 კვ-ზე მეტი ძაბვის გამანაწილებელ მოწყობილობებში მიწასთან წარმოქმნილი მშ-ს (დამიწების) შედეგად წარმოქმნილი ძაბვა და დენი;
- გამანაწილებელ მოწყობილობებში კომუტაციისა და მშ -ის შედეგად წარმოქმნილი იმპულსური გადაძაბვები (ემდ-ბი);
- ელექტრომომარაგების ქსელის ელემენტებზე ატმოსფერული განმუხტვები (მეხის დაცმ) შედეგად წარმოქმნილი იმპულსური ემდ;
- რადიოსიხშირის დიაპაზონის ელექტრომაგნიტური ველები;
- იმპულსური მაგნიტური ველები;
- ტექნოლოგიური პროცესების ავტომატური მართვის სისტემების კვების წყაროს მიერ წარმოქმნილი ემდ-ები;
- ელექტროსტატიკური განმუხტვები.

1.1.3 ელექტრომომარაგების მუშაობის რეჟიმებით ქსელში განვითარებული ელექტრომაგნიტური პროცესები და მათი გავლენა ელექტროენერჯის ხარისხზე

ისეთი მძლავრი, არაწრფივი, არასიმეტრიული და სწრაფად ცვალებადი დატვირთების ფართო გამოყენებამ მრეწველობაში, რომელთაც შეუძლიათ შესამჩნევად დაამახინჯონ ელექტრული ქსელის ძირითადი მახასიათებლები, იწვევენ ელექტრომაგნიტური თავსებადობის პრობლემას ელექტრულ სისტემებში. ელექტრომაგნიტური თავსებადობის ქვეშ იგულისხმება მოწყობილობების უნარი,

რომ მათ ნორმალურად იფუნქციონიროს და არ შეიტანონ ქსელში დაუშვებელი დამახინჯებები, რომლებიც თავის მხრივ სხვა მომხმარებლებს ურთულევენ მუშა გარემოს.

დარღვეული ელექტრომაგნიური თავსებადობის პირობებში, პირველ რიგში, მცირდება და ზარალდება ელექტრული ენერგიის ხარისხი, როგორც უმნიშვნელოვანესი პროდუქტის. ელექტრომომარაგების სისტემები და ელექტრომიმღებები შესრულებული არის ისე, რომ ოპტიმალურად იფუნქციონიროს მაშინ, როცა ისინი კვებას იღებენ ერთფაზა ან სამფაზა სიმეტრიული სისტემებისაგან, რომელთა ძაბვა სინუსოიდურია და მითითებული ამპლიტუდის ზღვარში ჯდება, ხოლო სიხშირე შეადგენს 50 ჰერცს. თუმცა, რეალურ ელექტრულ სისტემებში სხვადასხვა ელექტრომაგნიტური ხარვეზების გამო ხდება გადახრა იდეალური პარამეტრებისაგან, რაც თავის მხრივ ართულებს ელექტრომოწყობილობების მუშაობის პირობებს, ეს ყოველივე კი თავს იჩენს ტექნიკურ-ეკონომიკური ზარალის შეფასებისას (Карташев И.И., Тульский В.Н., Шаманов Р.Г., 2006).

ქსელში ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებების წარმოქმნით გამოწვეული ელექტრული ენერგიის ხარისხის მაჩვენებლების დარღვევა უარყოფითად მოქმედებს როგორც ცალკეულ ელექტრულ მიმღებებზე, ასევე ენერგოსისტემის ნორმალურ ფუნქციონირებაზე. ელექტრულ სისტემებში ელექტრული ენერგიის ხარისხის შემცირებას თან ახლავს შემდეგი უარყოფითი შედეგები:

1. ელექტრული ქსელის ყველა ელემენტში დანაკარგების ზრდა;
2. მზრუნავი მანქანების გადახურება, იზოლაციის ინტენსიური ცვეთა, ელექტრომოწყობილობების საექსპლუატაციო მუშაობის ხანგრძლივობის შემცირება და რიგ შემთხვევაში მწყობრიდან გამოსვლა;
3. ელექტრული ენერგიის მოხმარებისა და ელექტრომოწყობილობებისათვის აუცილებელი სიმძლავრის ზრდა;
4. რელეური დაცვისა და ავტომატიკის ელემენტების მუშაობის პირობების დარღვევა და არასელექციური ამოქმედება;
5. აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრისა და ენერგიის დანადგარების გაზრდა ენერგეტიკული მაჩვენებლებისა და ენერგოეფექტურობის შემცირება.

ენერგოსისტემების ერთმანეთთან ელექტრული კავშირის არსებობა ართულებს და აფართოებს ელექტროენერჯის, როგორც პროდუქტის ხარისხის შემცირების უარყოფითი გავლენის მოქმედების ზონას, რითიც ამწვავებს ელექტრომაგნიტური თავსებადობის პრობლემას (Железко, Ю.С. , 1991).

ყოველივე ზემოთ თქმულიდან გამომდინარე, გამოჩნდა ელექტრული ენერჯის ხარისხის კონტროლისა და შეფასების აუცილებლობა არა მხოლოდ მომხმარებლის ელექტრომომმარაგებელ ორგანიზაციასთან მიერთების წერტილში, აგრეთვე ელექტრული ქსელის სხვადასხვა წერტილებში.

ელექტროენერჯის ხარისხის უგულვებელყოფას ელექტრული ქსელების ექსპლუატაციისას მივყავართ პროგრესირებად დარღვევებთან ელექტრომომხმარებლების ელექტრული ენერჯით მომარაგებისა და ელექტრომიმღებების მუშაობის პირობების დარღვევამდე.

ელექტრული ენერჯია, როგორც პროდუქტი, რიგი სპეციფიკური თვისებების მატარებელია. იგი უშუალოდ გამოიყენება სხვა სახის პროდუქტების შესაქმნელად და მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს წარმოებული პროდუქციის ღირებულებასა თუ ხარისხზე. ელექტრული ენერჯის ხარისხის ცნება განსხვავდება სხვა პროდუქტებისაგან, რადგან ელექტრული ენერჯის ხარისხი დამოკიდებულია ელექტრომომხმარებლების მუშაობის რეჟიმებზე (Жежеленко, И.В., 2005).

ცნობილია, რომ მოწყობილობის, ელექტრული ქსელების და ელექტრომომარაგების სისტემების შედარებით ეფექტური ფუნქციონირებისათვის საჭიროა ძაბვა იყოს ნომინალური სიდიდისა და სინუსოიდური ფორმის, ნომინალური სიხშირის პირობებში. ელექტრულ სადგურებში ელექტრული ენერჯის წარმოება ხდება ნომინალურთან მიახლოებული მაჩვენებლებით, ამ პარამეტრების გადახრას იწვევს ელექტროენერჯის გადაცემის პროცესი და განსაკუთრებით ელექტრომიმღებების მიერ ელექტროენერჯის მოხმარება-გარდაქმნა სხვა სახის ენერჯიად. ამ ტიპის მომხმარებლებს მიეკუთვნებიან არაწრფივი, არასიმეტრიული და სწრაფად ცვალებადი მახასიათებლის მქონე ნახევარგამტარული გარდამქმნელები, რკალური ლითონსადნობი ღუმელები, შედულების აპარატები და სხვადასხვა მძლავრი დანადგარების ამძრავი სისტემები.

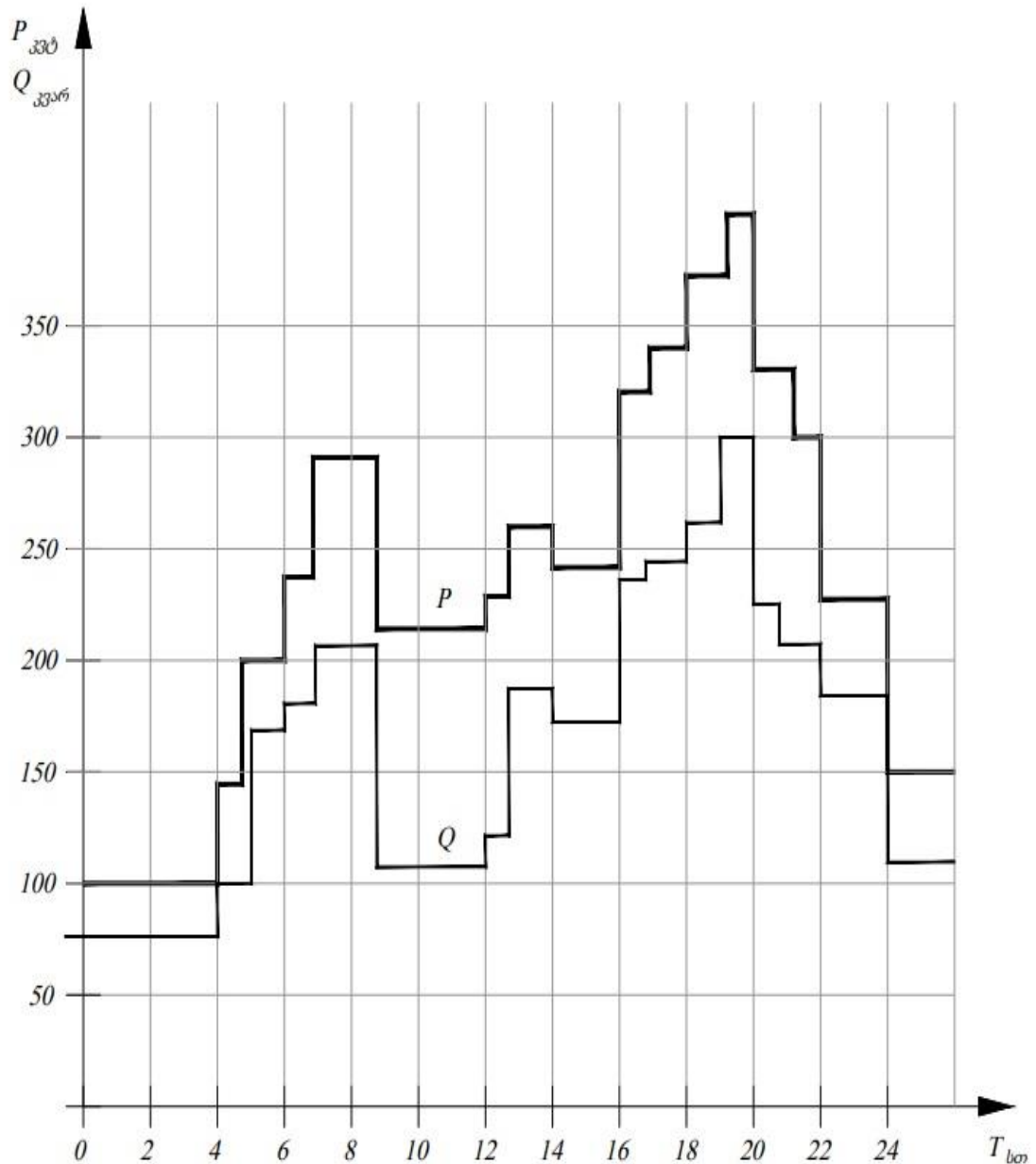
ასე რომ, ელექტრული ენერჯის ხარისხი ხასიათდება ელექტრული სისტემების კვანძებში რეჟიმის პარამეტრებით. იდეალური პარამეტრებიდან

გადახრა (გადახრის ხასიათი, ინტენსიურობა და ხანგრძლივობა) ახდენს არასასურველ ზემოქმედებას ძალურ ელექტრომოწყობილობებზე, ავტომატიკის სისტემებსა და რელეური დაცვის მოწყობილობებზე. ამ ყველაფერს მივყავართ იქამდე, რომ მცირდება ელექტრომომარაგების საიმედოობა, იზრდება ელექტრული ენერჯის დანაკარგები, უარსდება ელექტროენერჯის ხარისხი და მცირდება გამოშვებული პროდუქციის რაოდენობა.

1.1.4 ელექტრომომარაგების სისტემის აქტიური და რეაქტიული დატვირთვების თავისებურებანი და დატვირთვების გრაფიკები

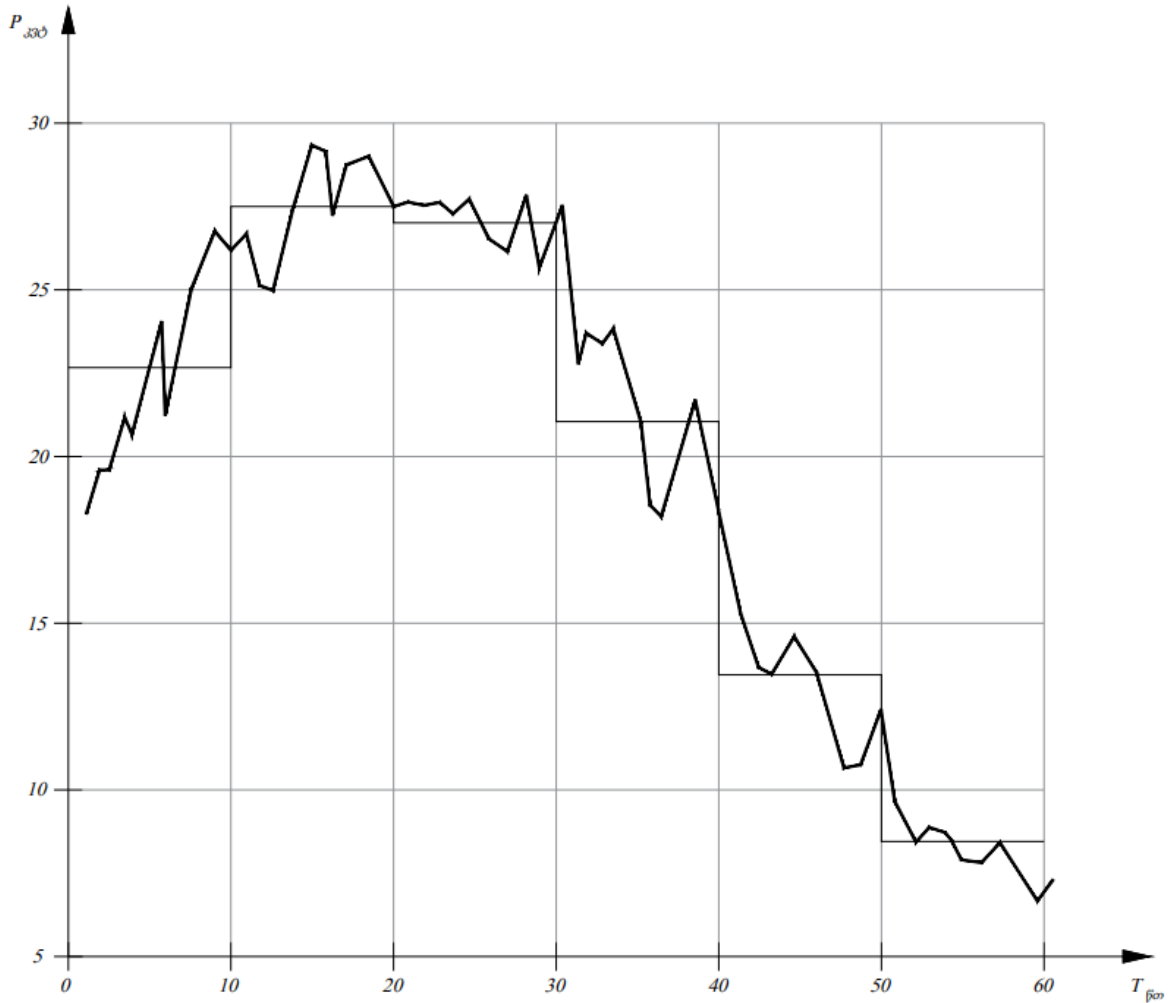
ელექტრომომარაგების სისტემის აქტიური და რეაქტიული დატვირთვები მუდმივ ცვალებადობას განიცდის და იგი განპირობებულია ქსელში ჩართული სხვადასხვა სიმძლავრისა და განსხვავებული ტექნოლოგიური დანიშნულების ელექტროტექნოლოგიური დანადგარებისა და კომპლექსების მუშაობის რეჟიმებით (Шидловский А.К., Жежеленко И.В., Пивняк Г.Г., 2012). მნიშვნელოვანია, რომ დატვირთვების ცვალებადობის წინასწარ ზუსტი განსაზღვრა პრაქტიკულად შეუძლებელია, რადგან ისინი არამკაფიო ლოგიკის პრინციპებს ექვემდებარება (Дзюба М.А., Сафонов В.И.). შესაბამისად, ელექტრული დატვირთვების წინასწარ პროგნოზირება და განსაზღვრა მომხმარებელთა შეუფერხებელ და ხარისხიანი ელექტრული ენერჯით მომარაგების გარანტიას წარმოადგენს.

ელექტრომომარაგების ქსელის ელემენტების ენერგეტიკული მაჩვენებლების განსაზღვრისა და ენერგოეფექტურობის დადგენის ამოცანის გადაწყვეტა აქტიური და რეაქტიული დატვირთვის დღე-ღამური და წლიური გრაფიკების ანალიზის საშუალებითაა შესაძლებელი.



ნახ. 1. აქტიური და რეაქტიული დატვირთვების დღე-ღამური გრაფიკები.

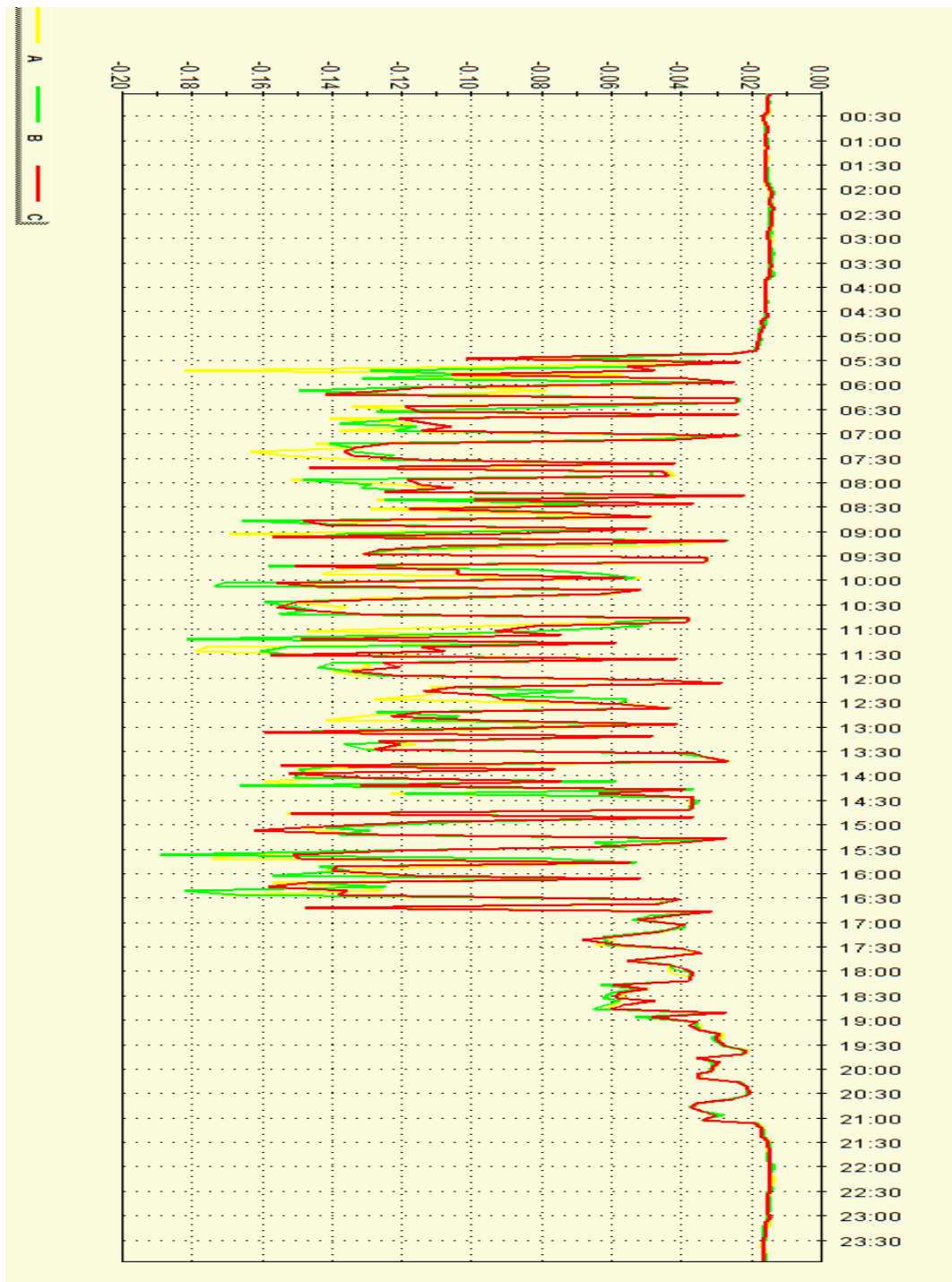
ინდივიდუალური გრაფიკები აუცილებელია მძლავრი ელექტრომიმღებების დატვირთვების განსაზღვრისათვის. ამ გრაფიკების ხასიათი და ფორმა მთლიანად არის დამოკიდებული მოწყობილობის ტექნოლოგიურ პროცესზე (Кабышев, А.В., 2007).



ნახ. 2. 60 წუთინი დატვირთვის გრაფიკები: ა) წერტილოვანი, ანალიზატორიდან ამოღებული და ბ) საფეხუროვანი, დამუშავებული.

უნდა აღინიშნოს, რომ თანამედროვე ეტაპზე, ელექტრომომარაგების ქსელში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური დინამიკური პროცესების გამოკვლევა შესაძლებელია ანალიზატორებიდან მიღებული შედეგების ანალიზის საშუალებით. შესაბამისად, ნაშრომში, ქ, თბილისის ელექტრომომარაგების ქსელში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესები გამოკვლეულ იქნა ქვესადგურების გამანაწილებელ მოწყობილობებში დადგმული ანალიზატორებიდან ამოღებული მასალის შესწავლის საფუძველზე.

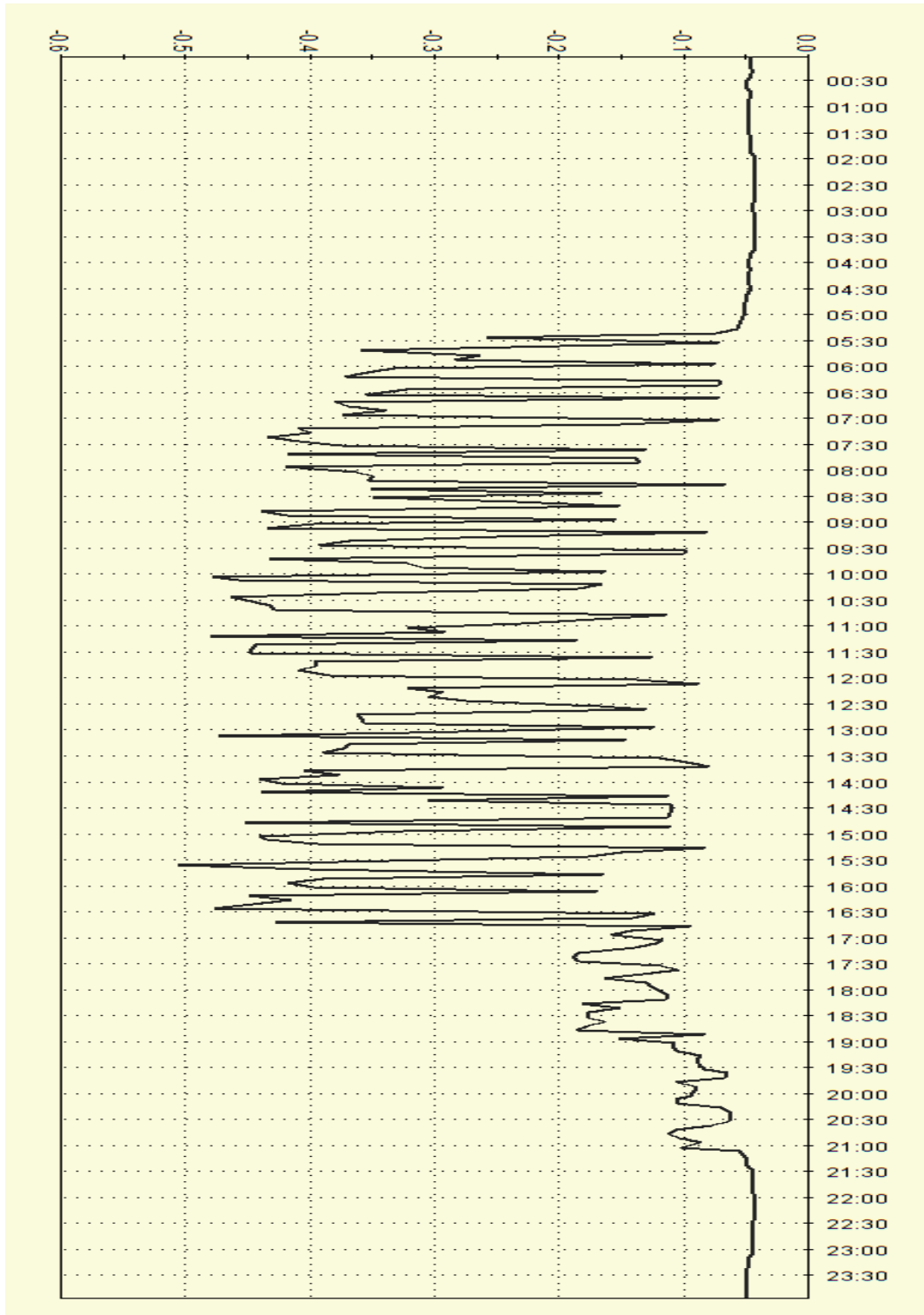
ქვემოთ მოყვანილიდან ნათლად ჩანს, თუ რამდენად ცვალებადია დატვირთვა დროში ელექტრომომხმარებლის მუშობის რეჟიმით გამოწვეული.



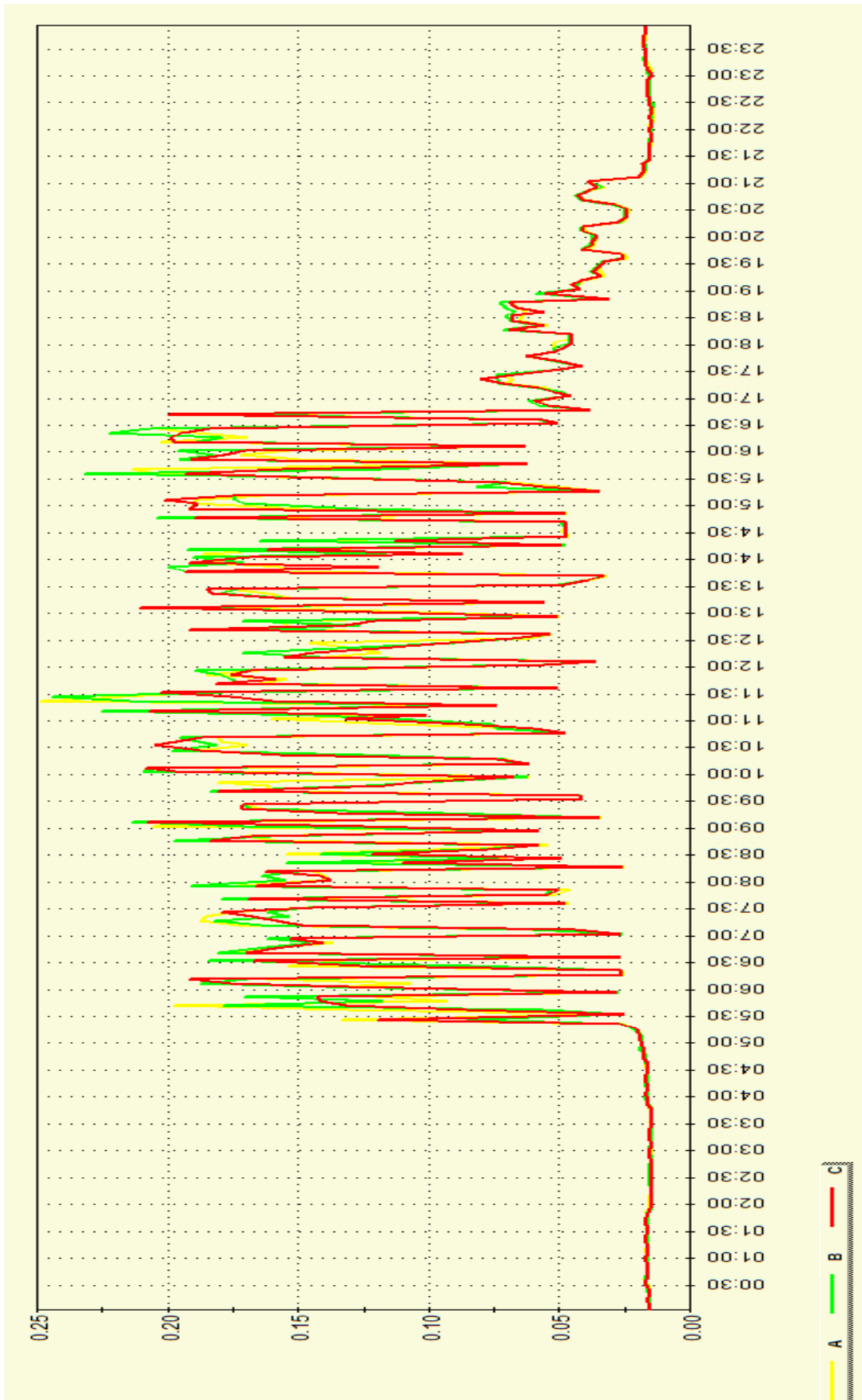
ნახ. 3. №1 ქვესადგურის ცალკეული ფაზების ჯამური აქტიური დატვირთვის გრაფიკები.

დინამიკური პროცესების ანალიზისათვის გამოუსადეგარია დატვირთვის გრაფიკების მხოლოდ საფეხუროებრივი მახასიებლის ანალიზი, რადგან მასზე არ ჩანს დროის მცირე ინტერვალში მიმდინარე სწრაფად ცვალებადი პროცესების

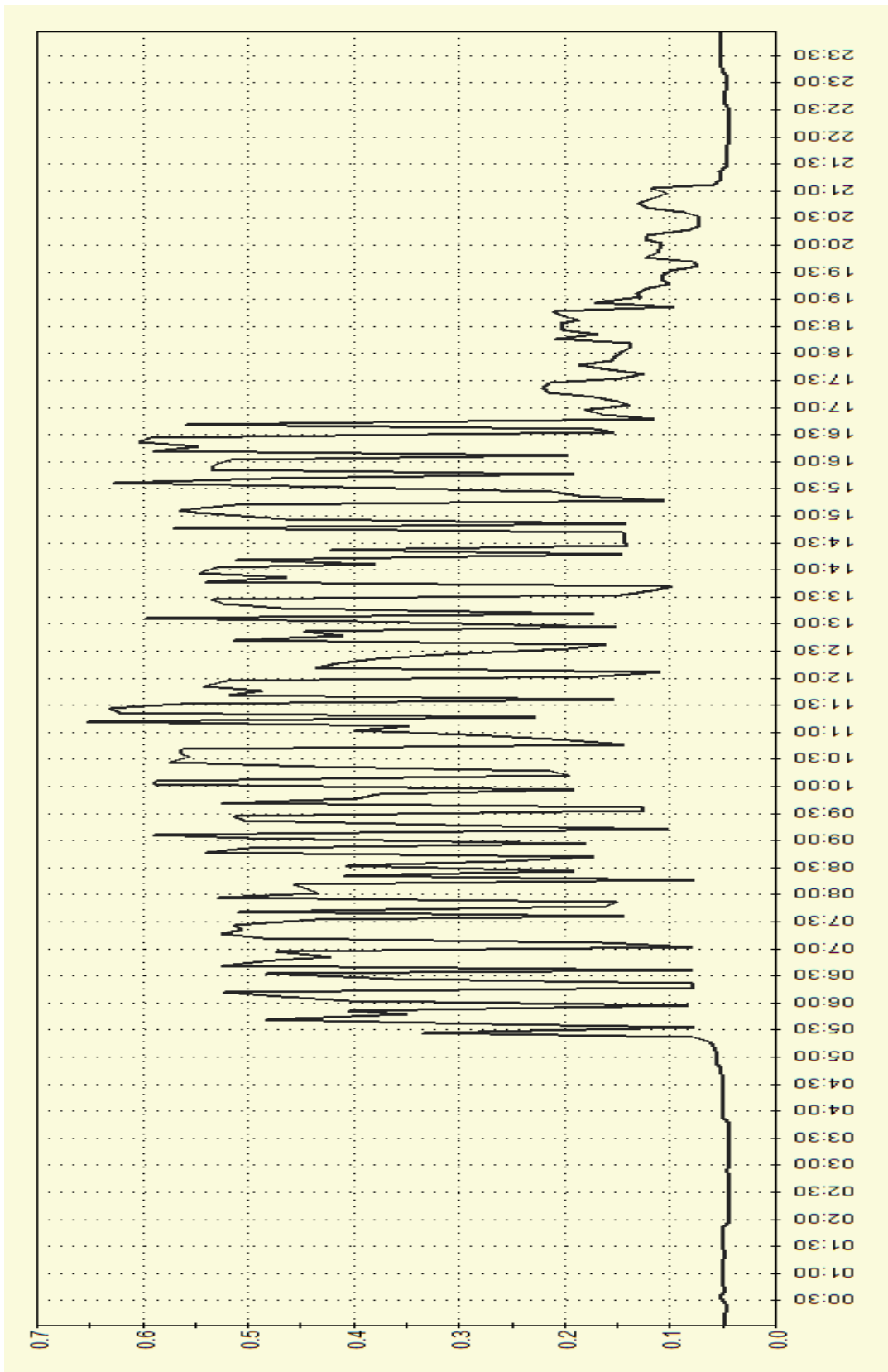
რეალური სახე. წარმოდგენილი გრაფიკები ამოღებულია სასისტემო ქვესადგურების შემკრებ სალტებსა და გამსვლელ უჯრედებზე დაყენებული ქსელის ანალიზატორებიდან.



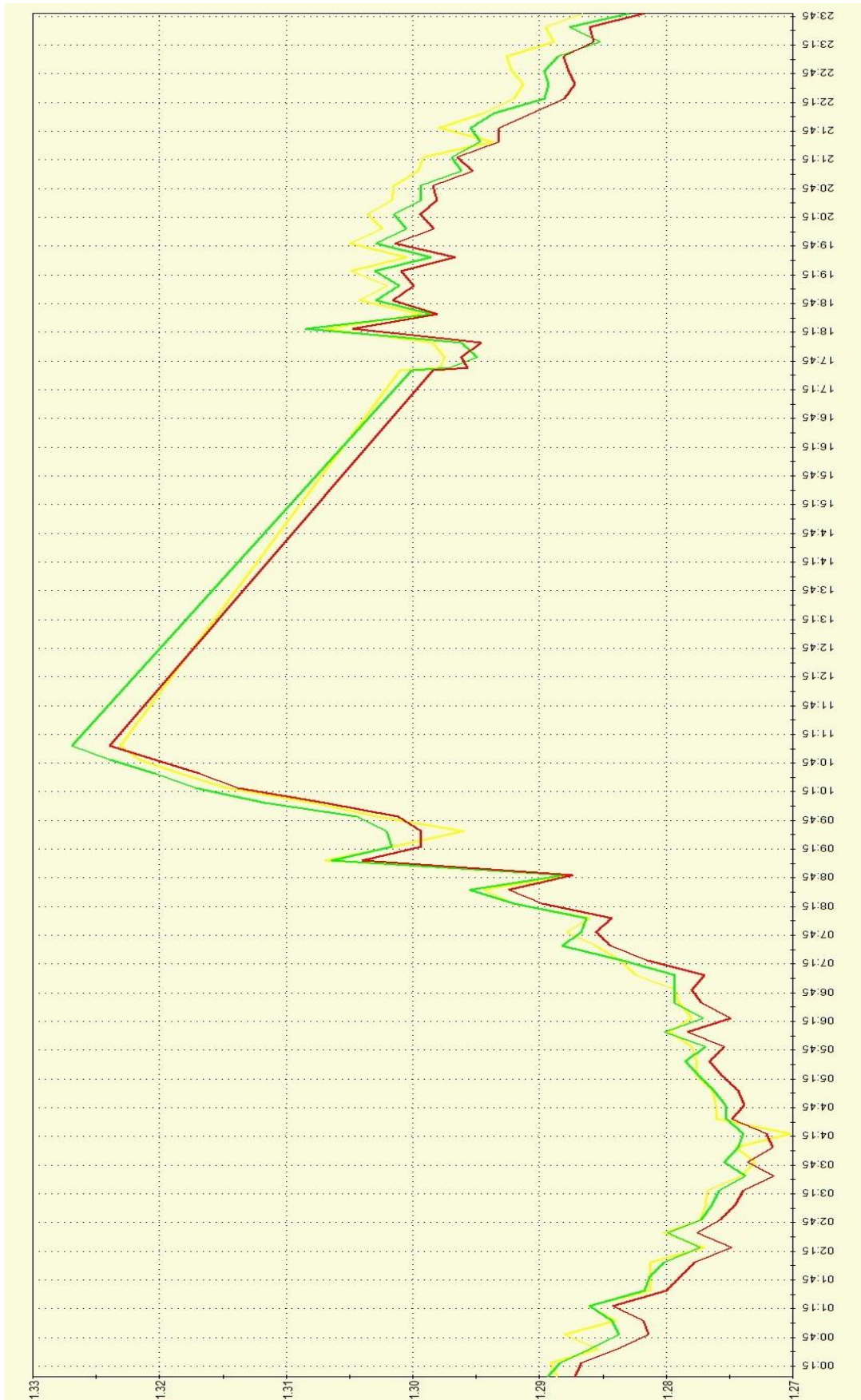
ნახ. 4. №1 ქვესადგურის ჯამური სამფაზა აქტიური დატვირთვის გრაფიკი.



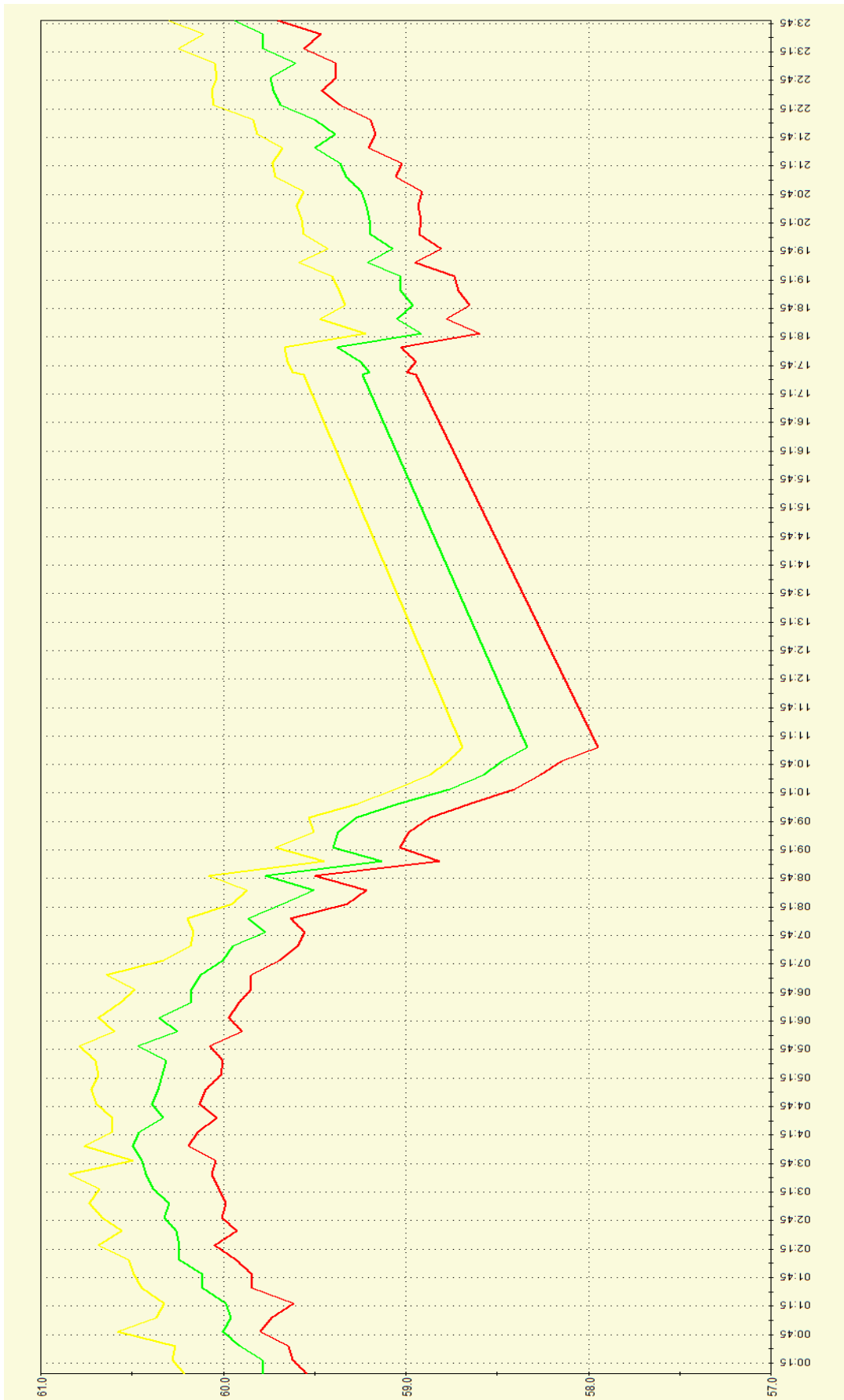
ნახ. 5. №1 ქვესადგურის ცალკეული ფაზების აქტიური დატვირთვის დღე-ღამური გრაფიკები.



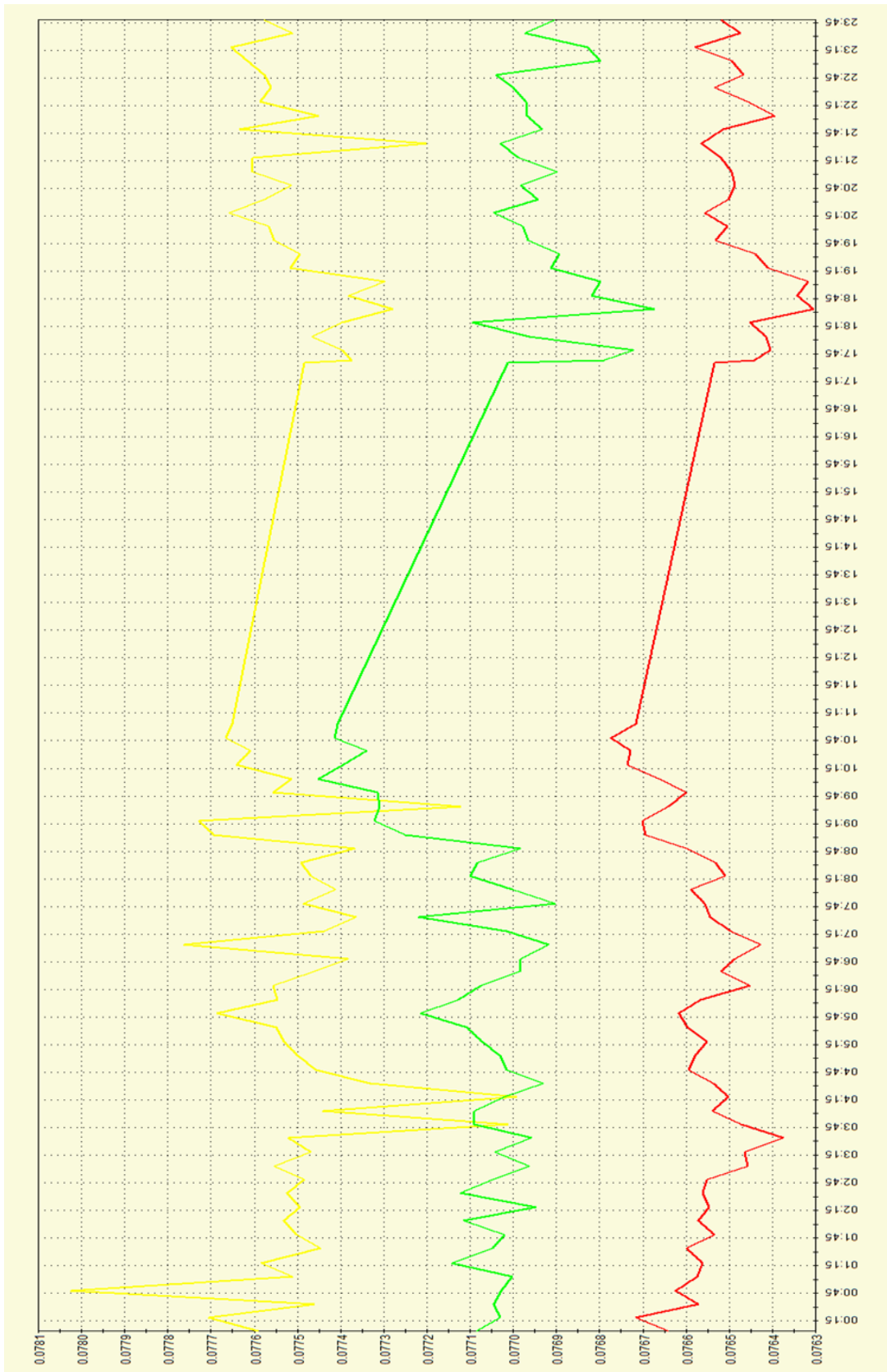
ნახ. 6. ქვესადგური №1-ის სამფაზა აქტიური დატვირთვის დღე-ღამური გრაფიკი.



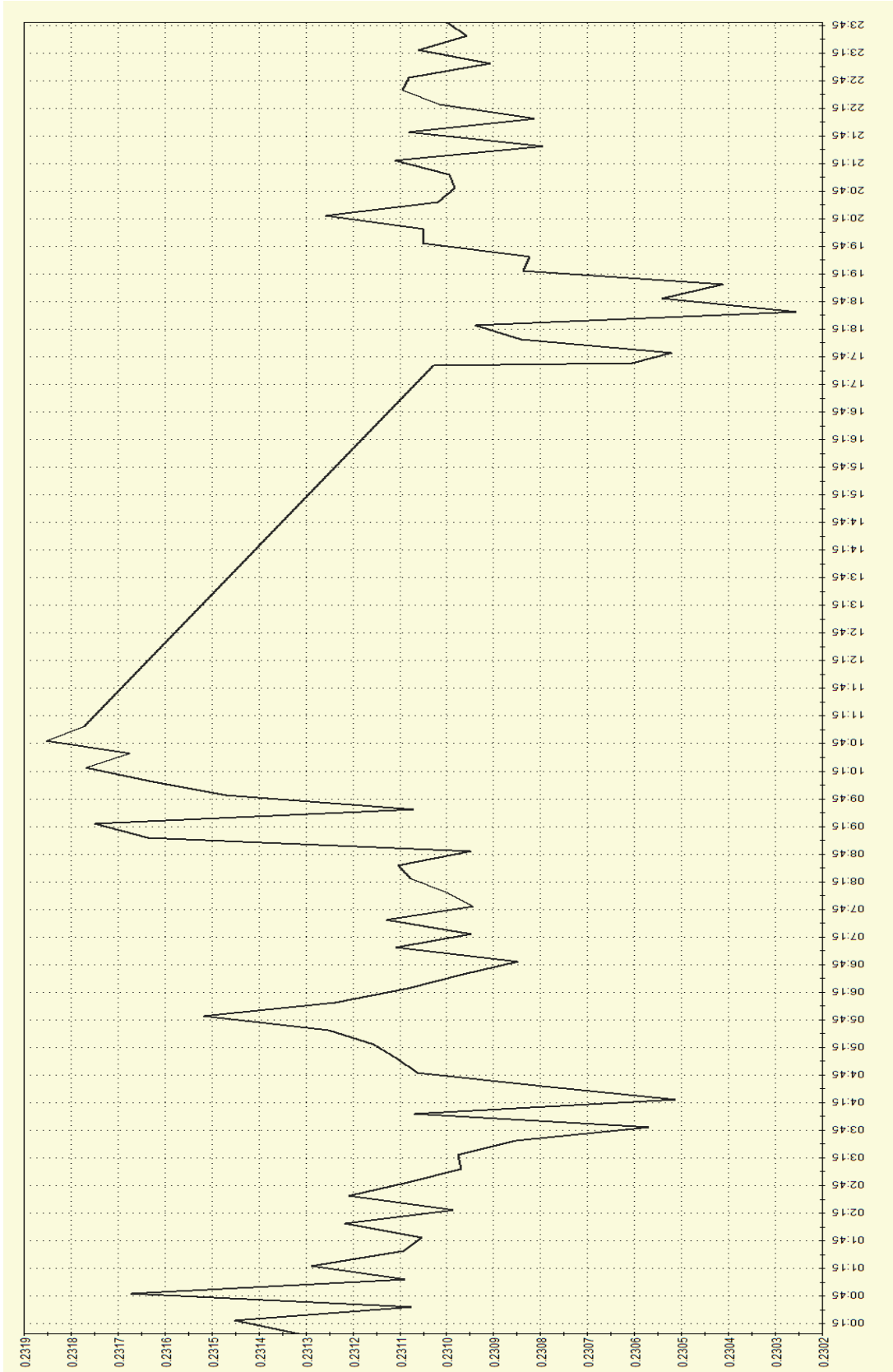
ნახ. 7. ქვესადგური №2 - ცალკეული ფაზების აქტიური დატვირთვის დენის ცვლილების მრუდეები.



ნახ. 8. ქვესადგური №2 - ცალკეული ფაზის ძაბვის ცვლილების მრუდები.



ნახ. 9. ქვესადგური №2 - სრული სიმბლავრის გრაფიკი თითოეული ფაზისათვის.



ნახ.10. კვესადგური №2 - ჯამბური სრული სიმძლავრის გრაფიკი.

1.1.5 დატვირთვების ასიმეტრიულობის გავლენა ელექტრომიმღებებსა და ელექტროტექნოლოგიურ დანადგარებზე

ელექტრულ ქსელებში ძაბვის ასიმეტრია გამოწვეულია მძლავრი ერთფაზა (ინდუქციური სადნობი და გამახურებელი ღუმელები, შედუღების აპარატები, ლითონსადნობი მოწყობილობები), და ასევე სამფაზა დატვირთვებით, რომლებიც ხანგრძლივი პერიოდის მანძილზე მუშაობენ არასიმეტრიულ რეჟიმში (Kennedy, 2000).

სამფაზა ქსელებში ძაბვის ასიმეტრის გაჩენისას წარმოიქმნება დამატებითი დანაკარგები ელექტრული ქსელის ელემენტებში, მცირდება რიგი ელექტრული მოწყობილობების მუშაობის ხანგრძლივობა და მცირდება მათი მუშაობის ეკონომიკური მახასიათებლები.

ცვლადი დენის ელექტრულ მანქანებში ძაბვის ასიმეტრიისას წარმოიქმნება მაგნიტური ველი, რომელიც ბრუნავს არა მხოლოდ როტორის ბრუნვის მიმართულებით სინქრონული სიჩქარით, არამედ ორმაგი სინქრონული სიჩქარით ოღონდ ამჯერად, როტორის ბრუნვის საწინააღმდეგო მიმართულებით. შედეგად წარმოიქმნება ელექტრომაგნიტური მამუხრუჭებელი მომენტი და ასევე ადგილი აქვს მანქანის აქტიური ელემენტების დამატებითი გახურებას. ძირითადად ეს შეეხება როტორს, რაც გამოწვეულია ორმაგი სიხშირის დენებით.

პრაკტიკაში ასინქრონულ მანქანებში, როცა უკუმიმდევრობის ძაბვის კოეფიციენტი $k_{2u} \leq 0,05 \div 0,06$ ტოლია, ასინქრონული მანქანის მბრუნავი მომენტის შემცირება უმნიშვნელო სიდიდეებს აღწევს. ელექტრულ ძრავში არასიმეტრიულობის გავლენით გაზრდილი დანაკარგებს შედეგად მოსდევს მისი გახურება და მუშაობის ხანგრძლივობის შემცირება, იზოლაციის ცვეთა რაც მნიშვნელოვან პრობლემას წარმოადგენს (ПИНЧУК О.Г., 2007).

ასინქრონული ძრავას მუშაობისას, როდესაც მას განვითარებული აქვს ნომინალური მბრუნავი მომენტი და ძაბვის უკუმიმდევრობის კოეფიციენტი ტოლია 4%-ის იზოლაციის სამუშაო პერიოდი დაახლოებით ორჯერ მცირდება, რაც დამატებითი გახურებით არის გამოწვეული. თუ ძაბვა ერთ-ერთ ფაზაზე გაცილებით მეტი იქნება მის ნომინალურ სიდიდესთან შედარებით, მაშინ იზოლაციის ნორმალური სამუშაო დრო კიდევ უფრო დიდი მნიშვნელობით

შემცირდება. ამ პირობებში ძრავას ნორმალური სამუშაო პირობების აღსადგენად საჭიროა შევამციროთ მისი სიმძლავრე, ხოლო პროექტორების ეტაპზე სასურველია გავზარდოთ ძრავას ნომინალური სიმძლავრე, თუ ქსელში არ არის გათვალისწინებული სპეციალური ღონისძიებები ძაბვების სიმეტრიზაციისთვის.

სინქრონულ მანქანაში ელექტრულ ქსელში ძაბვის ასიმეტრიულობის პირობებში ძრავა ერთდროულად იმუშავებს, როგორც ძრავულ, ასევე უკუჩართვისა და დინამიკურ სამუხრუჭო რეჟიმებში, რაც გამოიწვევს სტატორის გრაგნილში ელექტროენერჯის დანაკარგების გაზრდას და მქვ-ის მნიშვნელოვან შემცირებას.

ძაბვის ასიმეტრიის სახეები. ელექტრომომარაგების ქსელებში არსებული ძაბვის ასიმეტრია გამოწვეულია ქსელის ელემენტებში არასიმეტრიული დატვირთვის დენების გადინებით. მნიშვნელოვანია, რომ ასიმეტრიის ხარისხი მით მეტია რაც მეტია დატვირთვის დენებისა და ქსელის ელემენტების წინააღმდეგობის მნიშვნელობები. არსებობს ასიმეტრიის შემდეგი სახეები (Plummer I., 2003):

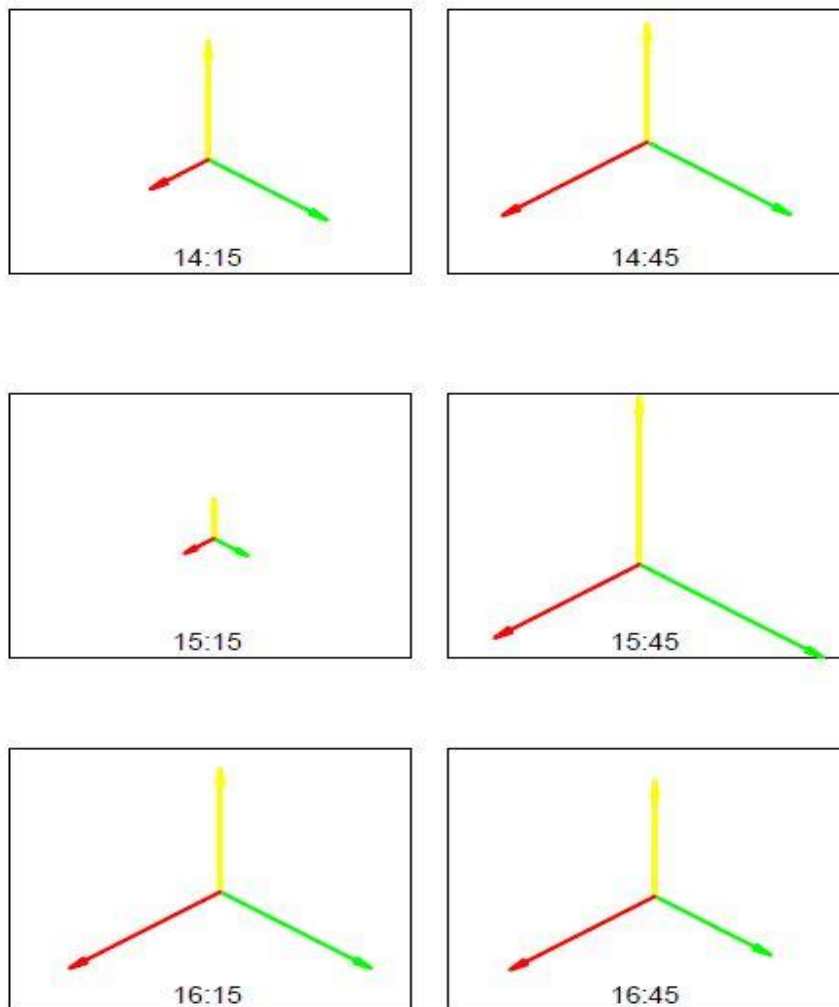
1. ძაბვის ამპლიტუდური ასიმეტრია. აღნიშნული განპირობებულია ძაბვის ვექტორების ამპლიტუდური მნიშვნელობების უთანაბრობით. ამ შემთხვევაში ვექტორებს შორის ძვრის კუთხე დარღვეული არაა და 120° - 120° -ის ტოლია. აღნიშნული ასიმეტრია გამოწვეულია მხოლოდ აქტიური დატვირთვის დენების უთანაბრობით.
2. ძაბვის ფაზური ასიმეტრია. აღნიშნული განპირობებულია ძაბვის ვექტორებს შორის ძვრის კუთხეების უთანაბრობით. ამ შემთხვევაში ძაბვის ვექტორების ამპლიტუდური მნიშვნელობები ერთმანეთის ტოლია. აღნიშნული ასიმეტრია გამოწვეულია მხოლოდ რეაქტიული დატვირთვის დენების უთანაბრობით.
3. ძაბვის ამპლიტუდურ-ფაზური ასიმეტრია. ამ შემთხვევაში განსხვავებულია, როგორც ვექტორების ამპლიტუდური მნიშვნელობები, ასევე მათ შორის არსებული ძვრის კუთხეები. ძაბვის ამპლიტუდურ-ფაზური ასიმეტრია განპირობებულია, ერთდროულად, აქტიური და რეაქტიული დატვირთვის დენების უთანაბრობით.

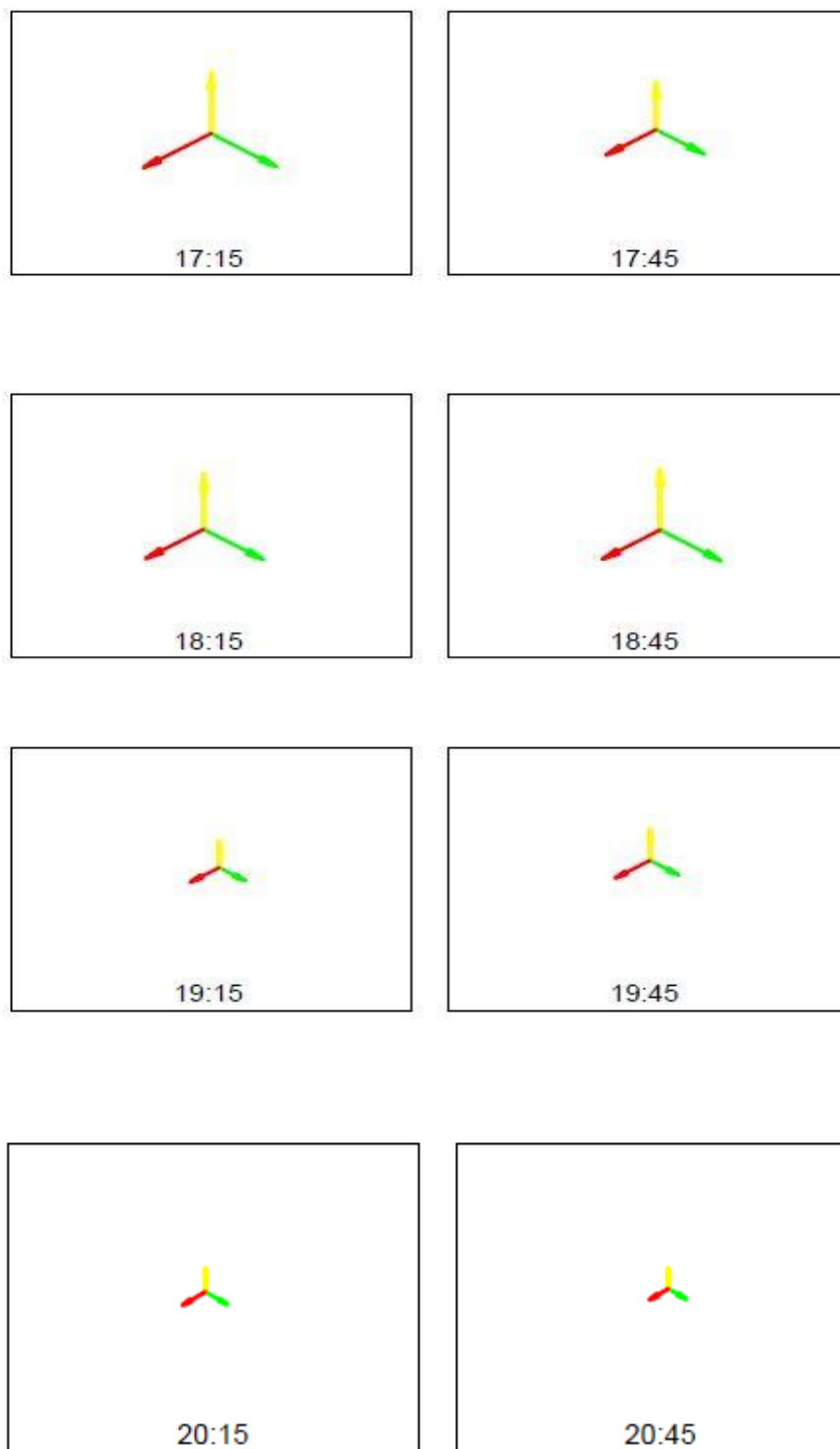
ქვემოთ წარმოდგენილ ვექტორულ დიაგრამებზე (ნახ.11.) მოცემულია ქ. თბილისის ელექტრომომარაგების ქსელის დამწვევი ქვესადგური „ჩუღურეთი“-ის 6 კვ-ის ძაბვის №7 ფიდერის A, B და C ფაზების აქტიური დატვირთვის დენების

ვექტორული დიაგრამები 30 წუთიანი ინტერვალით. ვექტორული დიაგრამებიდან ნათლად ჩანს, რომ აქტიური დატვირთვების ასიმეტრიულობა დროში არასტაბილურია და დინამიკურ ხასიათს ატარებს. ე. ი. ქვესადგურში ადგილი აქვს აქტიური დატვირთვის დენების დინამიკურ ასიმეტრიულ რეჟიმებს.

ქ. თბილისის ელექტრომომარაგების სისტემის ქვესადგურების გამანაწილებელი მოწყობილობების ექსპერიმენტული გამოკვლევების შედეგების ანალიზიდან სჩანს, რომ ელექტრულ გამანაწილებელ ქსელებში ყველაზე უფრო ხშირად ძაბვის ამპლიტუდორ-ფაზური ასიმეტრია გვხვდება.

ამავდროულად, ანალიზატორებიდან მიღებული მასალებიდან ნათლად ჩანს, რომ ქსელში ერთდროულად გვაქვს, როგორც სტატიკური, აგრეთვე დინამიკური ასიმეტრიული რეჟიმები.

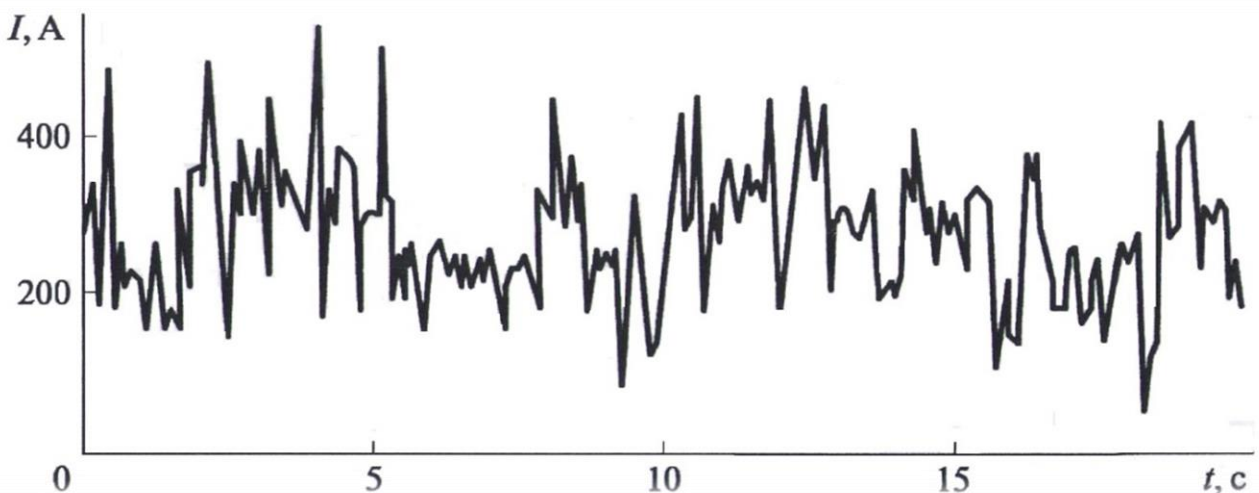




ნახ.11. ქვესადგური „ჩულურეთი“-ის 6 კვ-ის ძაბვის №7 ფიდერის აქტიური დატვირთვის დენების ვექტორული დიაგრამა 30 წუთიანი ინტერვალით.

1.1.6 ელექტრორკალური ღუმელების მიერ განვითარებული ელექტრომაგნიტური დინამიკური პროცესების გამოკვლევა

ელექტრომომარაგების ქსელში ჩართული ელექტროტექნოლოგიური დანადგარებსა და კომპლექსებს შორის განსაკუთრებით მძიმე რეჟიმით ერთფაზა და სამფაზა ელექტრორკალური ღუმელები გამოირჩევა (Madias J., 2013). ელექტრორკალური ღუმელების სიმძლავრე ფართო დიაპაზონში იცვლება (0.4 დან 140 მვტ-მდე). მათი კვება ხორციელდება 6, 10, 35 და 110კვ ცვლადი ძაბვით (Луценко В., Павлов В., Докшицкая А., 2006). ელექტრორკალური ღუმელის, მუშაობის რეჟიმი, მოქმედების პრინციპიდან გამომდინარე რადიკალურად განსხვავდება სხვა დანადგარებისაგან რადგან ისინი მოკლედ

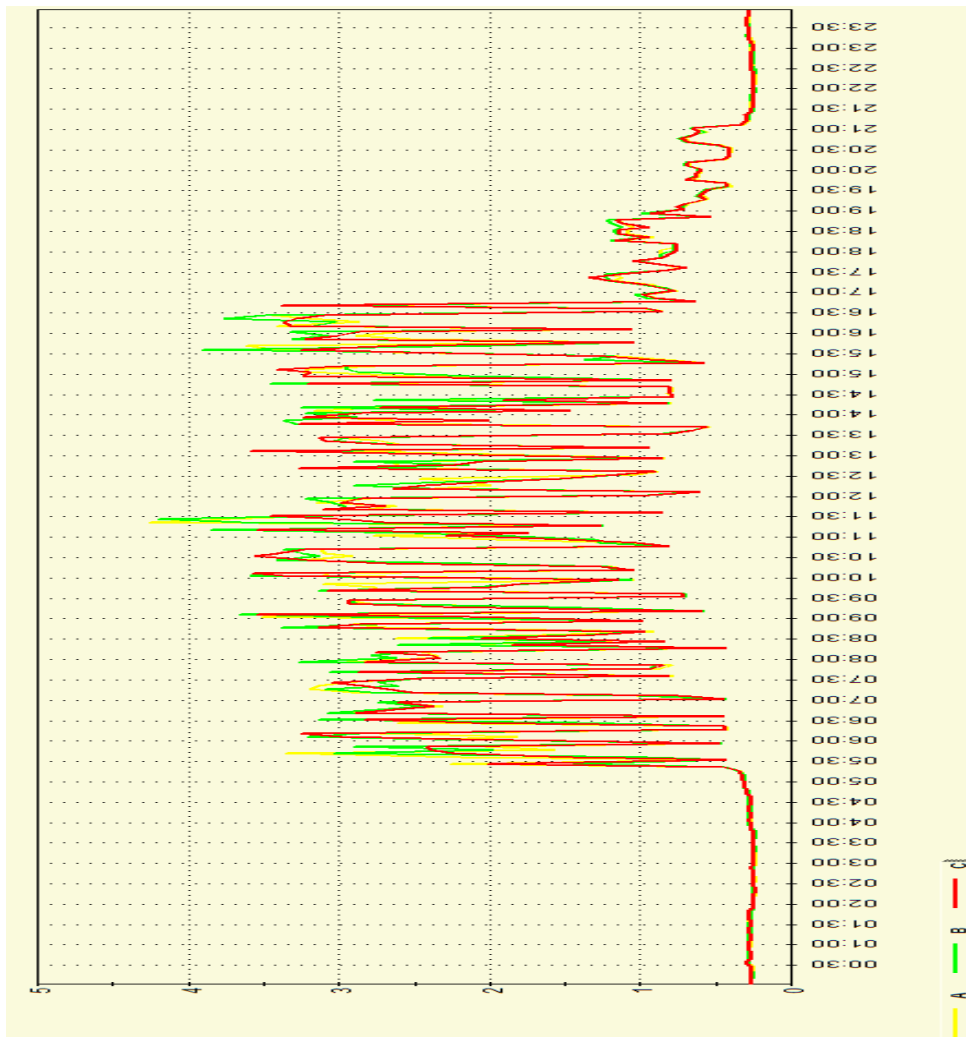


ნახ. 12. ელექტრორკალური ღუმელის საღუმელე ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის აქტიური დატვირთვის დენის მრუდი.

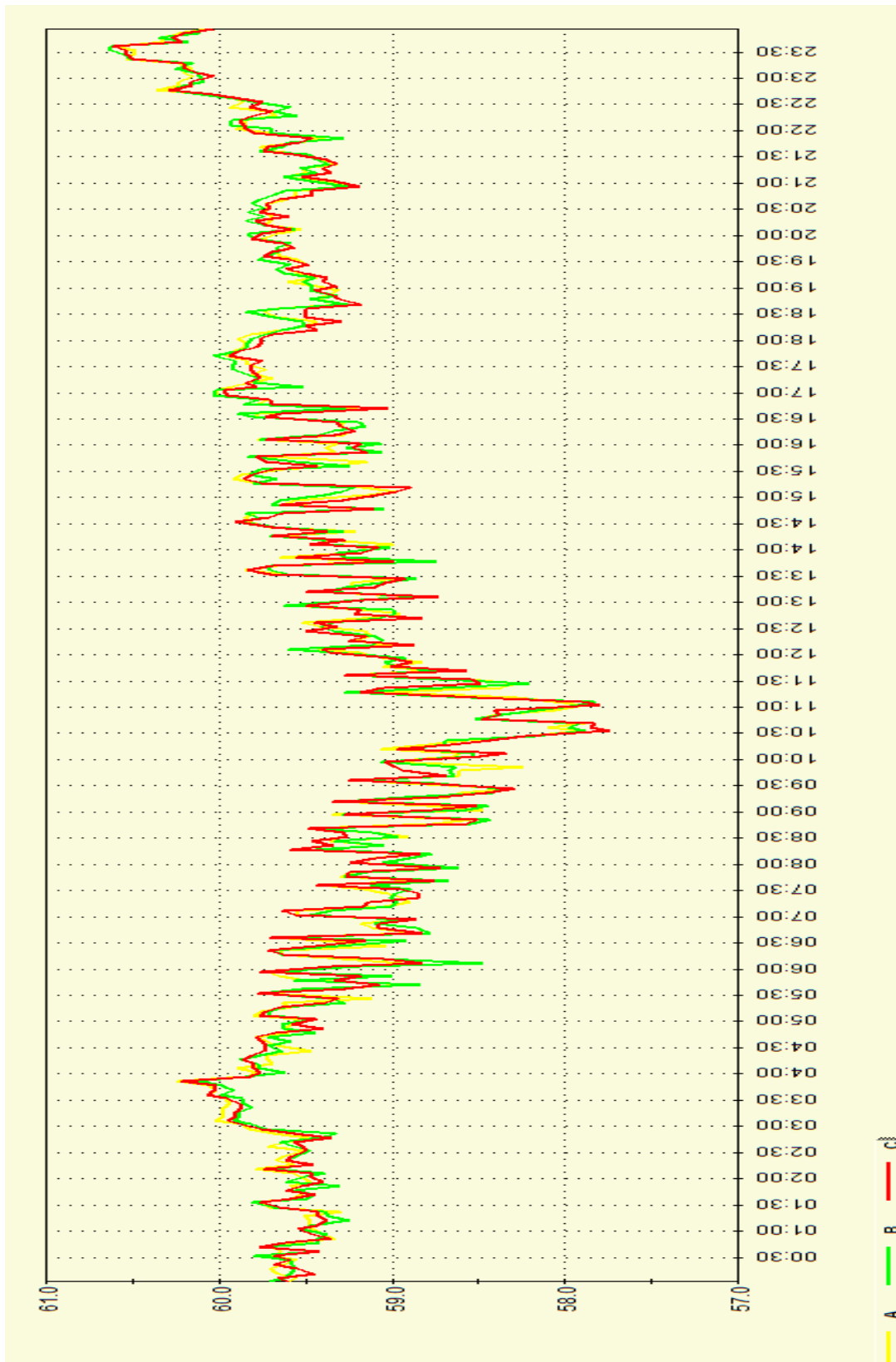
შერთვის საექსპლუატაციო რეჟიმში მუშაობენ. მათი მუშაობის საექსპლუატაციო ციკლი მოკლედ შერთვის, რკალის მდგრადი ნთების და პაუზის (ჩაქრობის) რეჟიმებს მოიცავს. შესაბამისად, ელექტრორკალური ღუმელების დატვირთვის დენი დიდ დიაპაზონში იცვლება ნახტომისებრი ბიძგებით ხასიათდება. ამავდროულად, ელექტრული რკალის მდგრადი ნთების პერიოდში დატვირთვის დენის მრუდის ფორმა ნაცვლად სინუსოიდალურისა კვაზი ტრაპეციული ფორმისაა.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, ელექტრორკალური ღუმელების ელექტრომომარაგების ქსელში თითქმის ყველა სახის ემდ-ებს წარმოქმნიან რომელთაგან ძირითადად ძაბვის ჩავარდნა, სტატიკური და დინამიკური ასიმეტრია, ფლიკერის მოვლენა და დიდ დიაპაზონში ცვალებადი პარამეტრების მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრი დომინირებს (ჭუნაშვილი ბ., პეტროსიანი ა., გამრეკელაშვილი თ., ხარებავა დ., 2016).

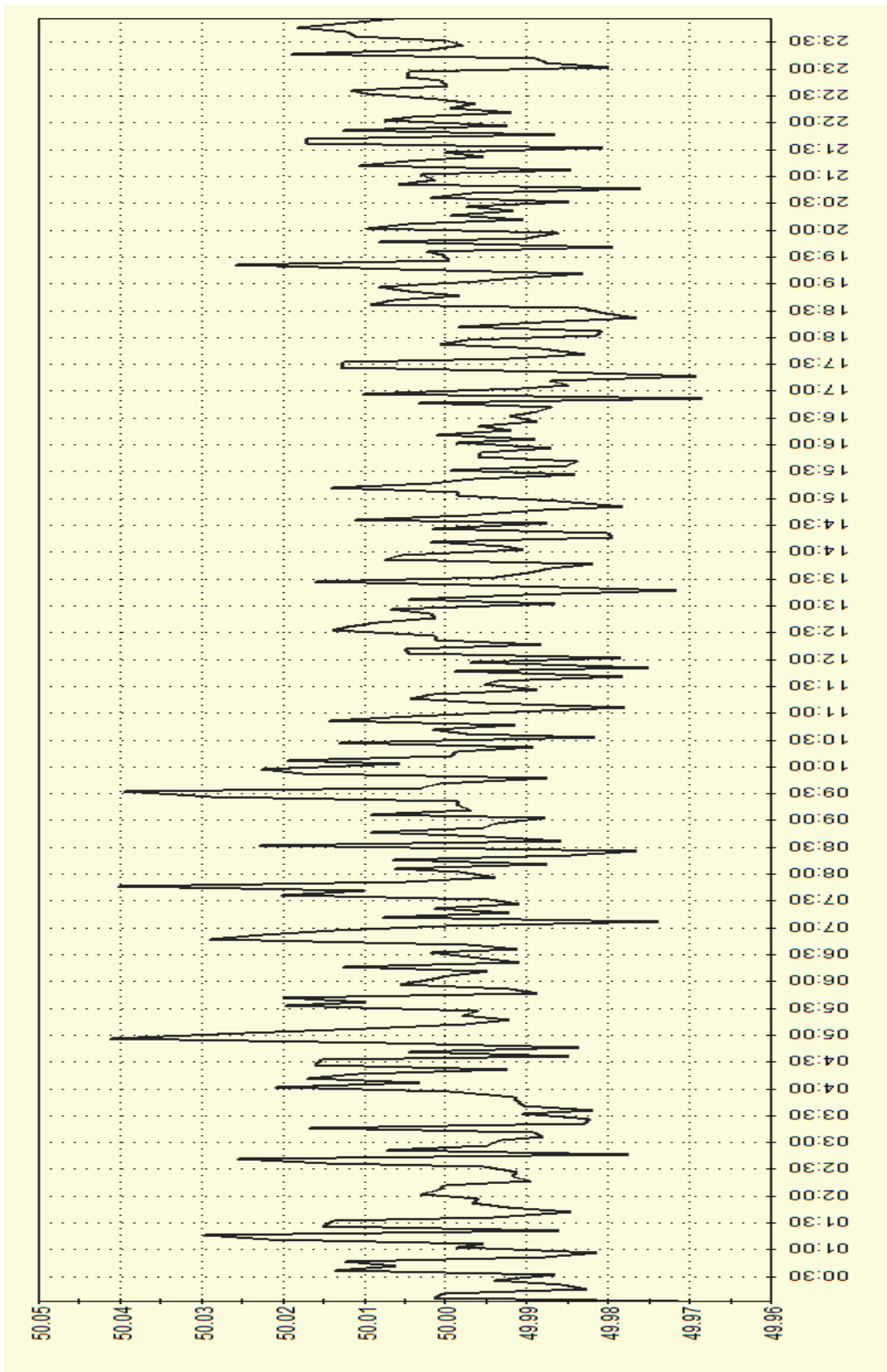
ქვემოთ (ნახ. 13, 14 და 15) წარმოდგენილია დამწვევი ქვესადგურის 110 კვ-ის სასალტე ანალიზატორებიდან ამოღებული ელექტრორკალური ღუმელის საღუმელე ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის ცალკეული ფაზების დატვირთვის დენის მრუდები.



ნახ.13. საწარმოს 110 კვ-ის სასალტე ანალიზატორებიდან ამოღებული ელექტრორკალური ღუმელის 24 საათიანი დენის გრაფიკი თითოეული ფაზისათვის.



ნახ. 14. საწარმოს 110 კვ-ის სასაღატის ანალიზატორებიდან ამოღებული ელექტრორკალური ღუმელის ცალკეული ფაზის 24 საათიანი ძაბვის მრუდი.



ნახ. 15. საწარმოს 110 კვ-ის სალტის ანალიზატორებიდან ამოღებული სიხშირის 24 საათიანი ცვალებადობის მრუდი.

წარმოდგენილი მრუდეების ანალიზიდან ნათლად სჩანს, რომ ელექტრორკალური ღუმელის ცალკეული ფაზების დენები ურთიერთ განსხვავებულად იცვლება. ე.ი. ელექტრომაგნიტური პროცესები ცალკეულ ფაზებში დამოუკიდებლად მიმდინარეობს.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, ელექტრორკალური ღუმელების ელექტრომომარაგების ქსელში თითქმის ყველა სახის ემდ-ებს წარმოქმნიან რომელთაგან ძირითადად ძაბვის ჩავარდნა, სტატიკური და დინამიკური ასიმეტრია, ფლიკერის მოვლენა და დიდ დიაპაზონში ცვალებადი პარამეტრების მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრი დომინირებს (ჭუნაშვილი ბ., ქობალია მ., ხარებავა დ., 2016).

თავი 2. ელექტრომომარაგების სისტემის ელექტროდინამიკური პროცესების ექსპერიმენტული გამოკვლევის არსებული ფიზიკური მოდელების შეფასება

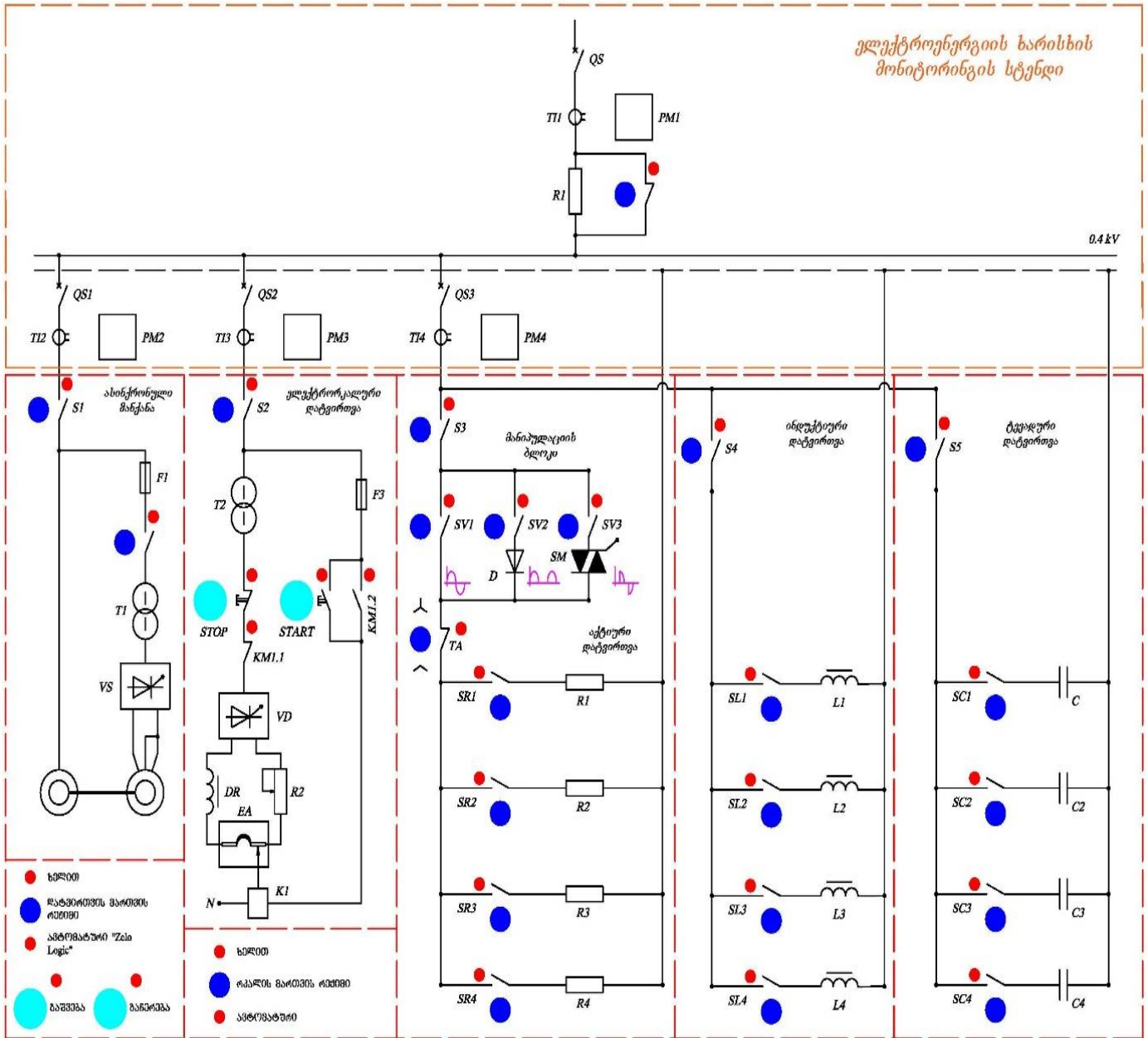
2.1 ელექტრომომარაგების სისტემის ექსპერიმენტული გამოკვლევის არსებული ფიზიკური მოდელი

დღეისათვის ელექტრომომარაგების სისტემაში მიმდინარე ელექტროდინამიკური პროცესების ექსპერიმენტალური გამოკვლევის არსებულ ფიზიკურ მოდელებს შორის ყველაზე უფრო სრულყოფილია ფიზიკური მოდელი რომელიც შექმნილია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ელექტრომომარაგების ტექნოლოგიების დეპარტამენტში. ფიზიკური მოდელის ცალხაზოვანი სქემა მოცემულია ნახ. 16-ზე.

ფიზიკური მოდელი (სტენდი) შედგება მართვის სისტემისა და ხუთი უჯრედისაგან:

- 1) ასინქრონული ძრავას უჯრედი;
- 2) აქტიური დატვირთვის უჯრედი;
- 3) ინდუქციური დატვირთვის უჯრედი;
- 4) ელექტრორკალური დატვირთვის უჯრედი.
- 5) ტევადური დატვირთვის უჯრედი.

ქვემოთ ჩატარებულია მოდელის ცალკეული უჯრედების ექსპერიმენტული გამოკვლევა (Чунашвили Б.М., Кобалия М.И., Петросян А.М., Харебава Д.Н. , 2017).

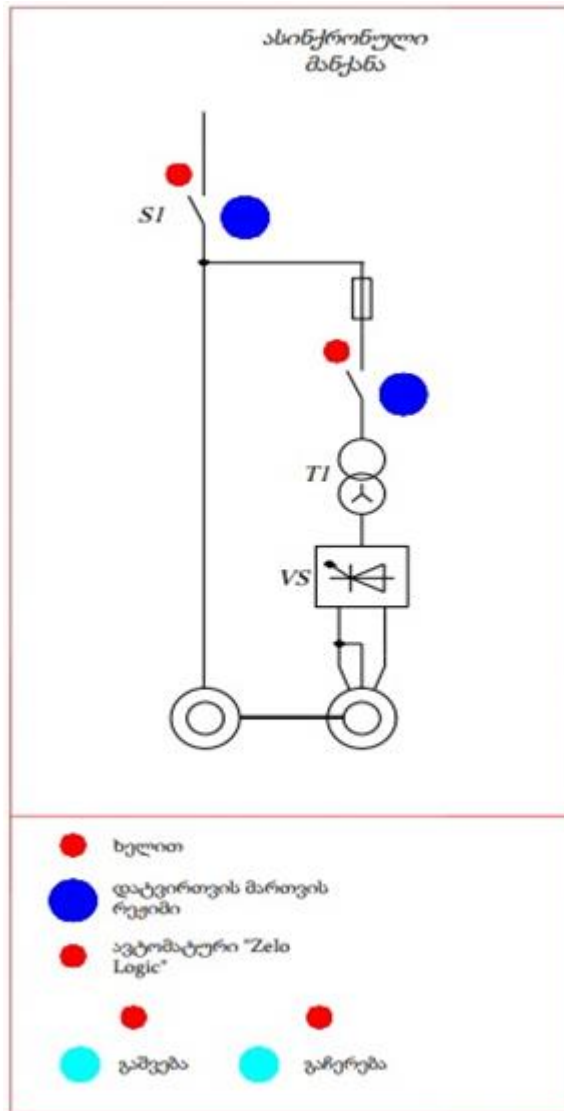


ნახ. 16. ექსპერიმენტალური გამოკვლევის ფიზიკური მოდელის ცალხაზოვანი სქემა

2.2 ასინქრონული ძრავას უჯრედის გამოკვლევა

ასინქრონული ძრავას უჯრედი მოიცავს ორ ერთმანეთთან მექანიკურად (ქუროს საშუალებით ლილვებით) დაკავშირებულ ასინქრონულ მანქანას (AM1, AM2). მათ შორის ერთ-ერთი გათვლილია ძრავულ რეჟიმში სამუშაოდ და იგი

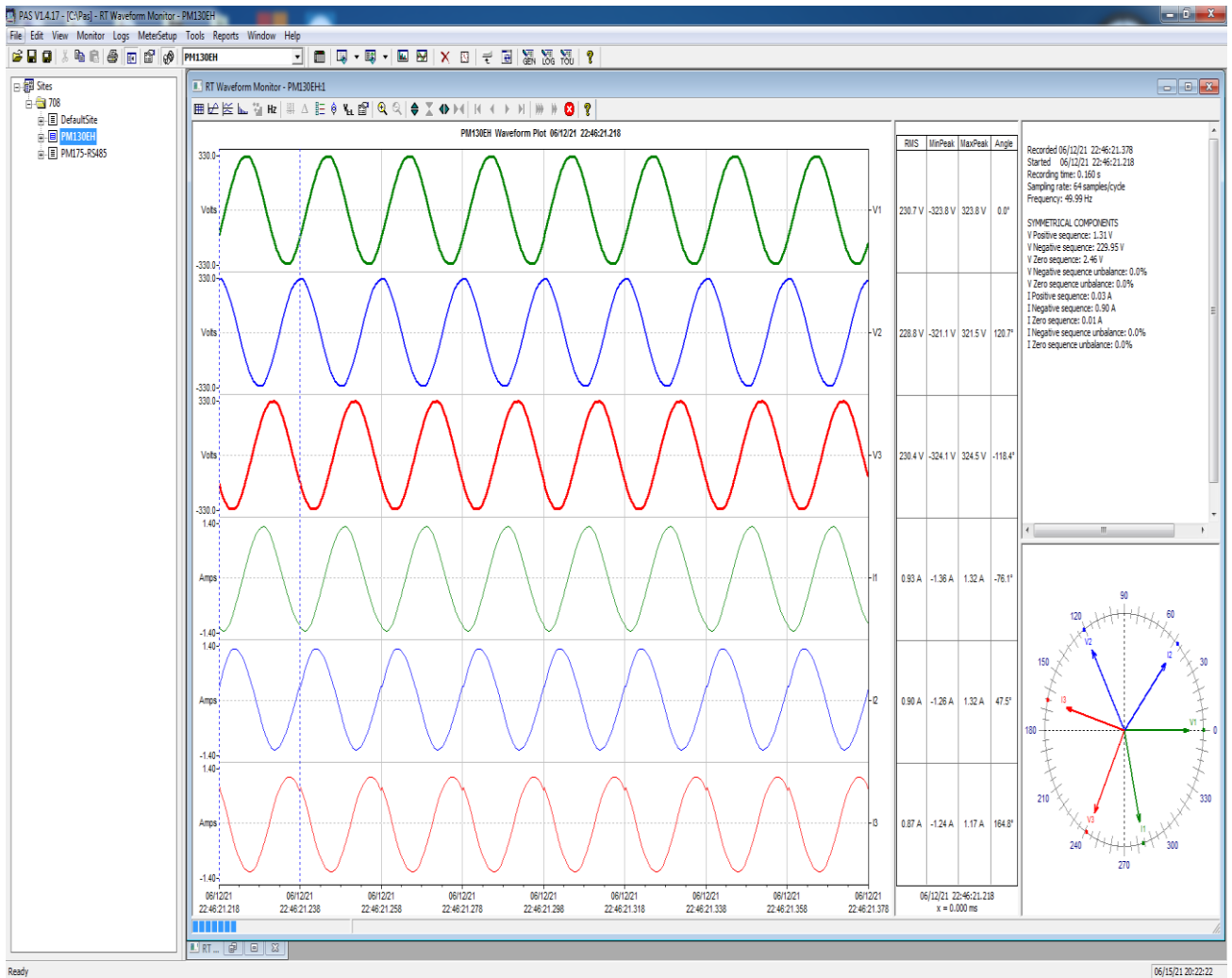
შემკრებ სალტესთან დაკავშირებულია ავტომატური ამომრთველითა (QAM1) და სახაზო კონტაქტორით (KMAM1). ამასთანავე, დატვირთვის დენის კონტროლისათვის იგი აღჭურვილია ერთ ფაზაში ჩართული დენის ტრანსფორმატორ - ამპერმეტრის კომპლექტით.



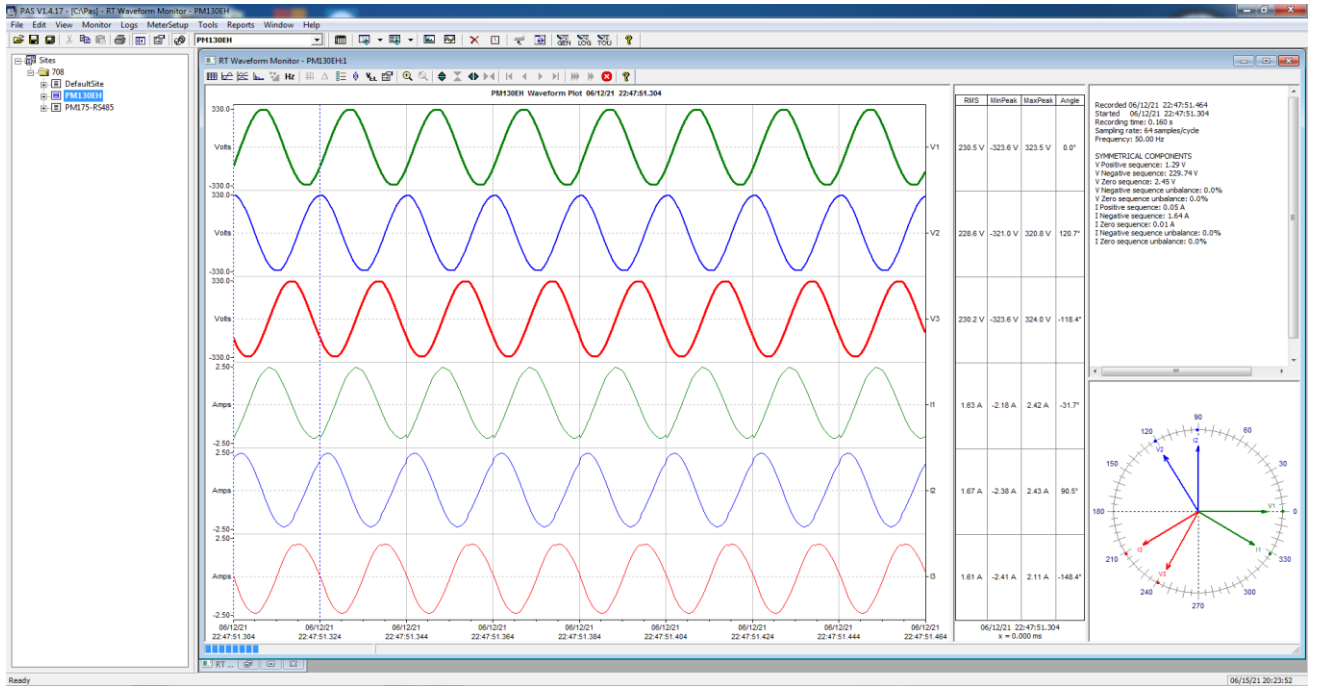
ნახ. 17. ფიზიკური მოდელის ასინქრონული ძრავას უჯრედის პრინციპიალური სქემა.

რაც შეეხება მეორე მანქანას, იგი გათვლილია პირველი მანქანის დატვირთვის მომენტის შესაქმნელად და დინამიკური დამუხრუჭების რეჟიმში ფუნქციონირებს. აქედან გამომდინარე, AM2-ს დინამიკური დამუხრუჭების დენით უზრუნველყოფს ბოგირული სქემით შესრულებული მართვადი მუდმივი დენის გამმართველი (ნახ.17), რომელიც შემკრებ სალტესთან დაკავშირებულია ავტომატური

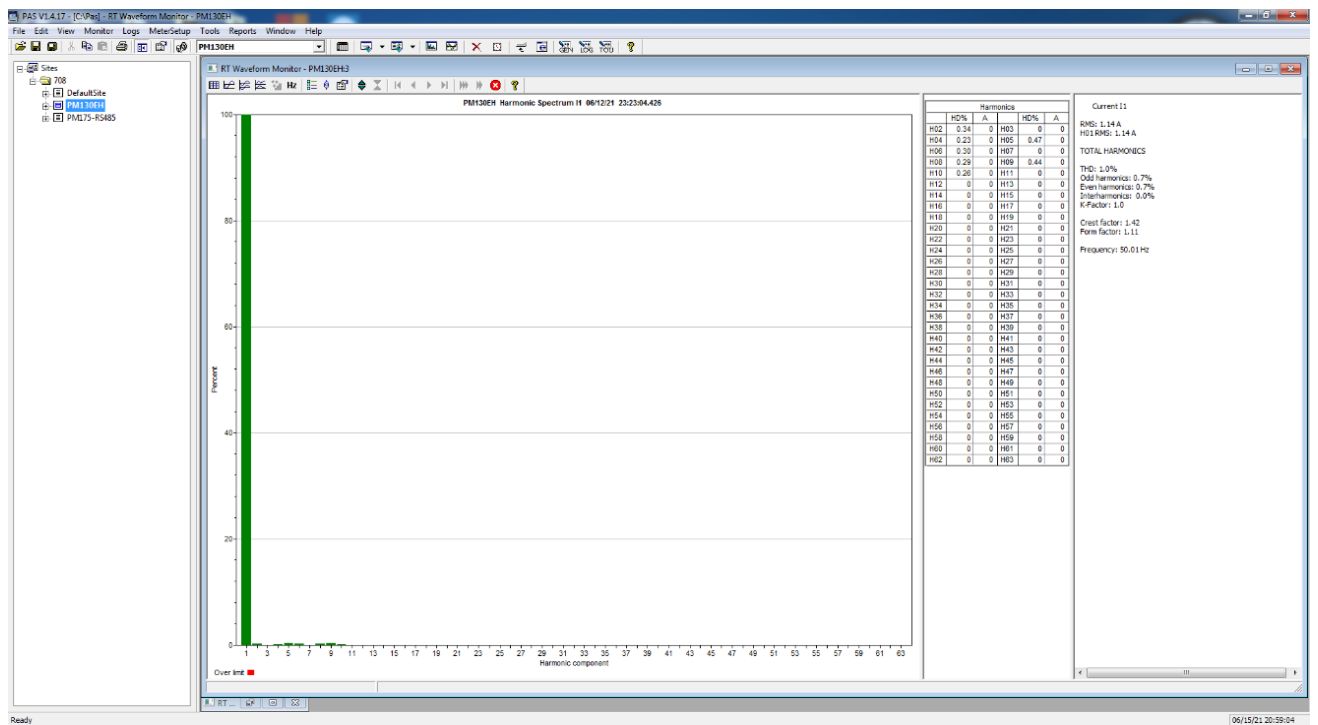
ამომრთველისა (QAM2) და კონტაქტორის (KMAM2) გავლით. გამმართველის ცვლადი დენის წრედში ჩართულია დენის ტრანსფორმატორ-ამპერმეტრის კომპლექტი რათა გაკონტროლდეს დინამიკური დამუხრუჭების დენი. სამუხრუჭე დენი რეგულირდება მართვის პულტზე განთავსებული რეზისტორის გამოყენებით.



ნახ.18. ფიზიკური მოდელის ასინქრონული დატვირთვის უჯრედის ძაბვისა და დატვირთვის დენის მრუდები ძრავას უქმ სვლაზე მუშაობისას.



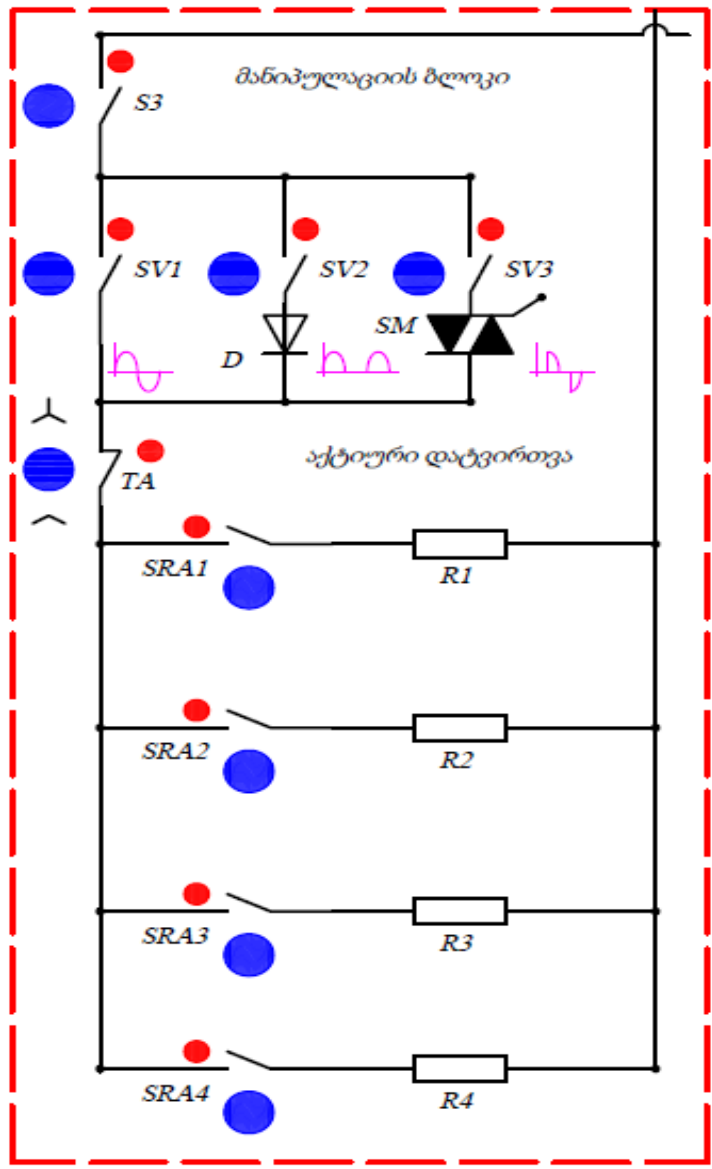
ნახ. 19. ფიზიკური მოდელის ასინქრონული დატვირთვის უჯრედის ძაბვისა და დატვირთვის დენის მრუდეები ძრავას დატვირთვისას.



ნახ. 20. ფიზიკური მოდელის დატვირთვის ქვეშ მყოფი ძრავას მაღალი რიგის ჰარმონების სპექტრი.

2.3 აქტიური დატვირთვის უჯრედის გამოკვლევა

აქტიური დატვირთვის უჯრედში ელექტრომიმღები, რომელიც მოიხმარს გარკვეულ სიმძლავრეს, ასრულებს სასარგებლო მუშაობას და ტრანსფორმირდება ჩვენთვის სასურველი სახის ენერჯიაში. ესენია: თბური, განათების, ხმოვანი და სხვ. ძირითადად, აქტიური ენერჯის მოხმარება-გარდაქმნის ხარჯზე მუშაობს ცალკეული ელექტრომიმღებელი, როგორც მაგალითად: გამათბობლები, ვარვარა ნათურები, ელექტროსახურებელი მოწყობილობები და სხვ.



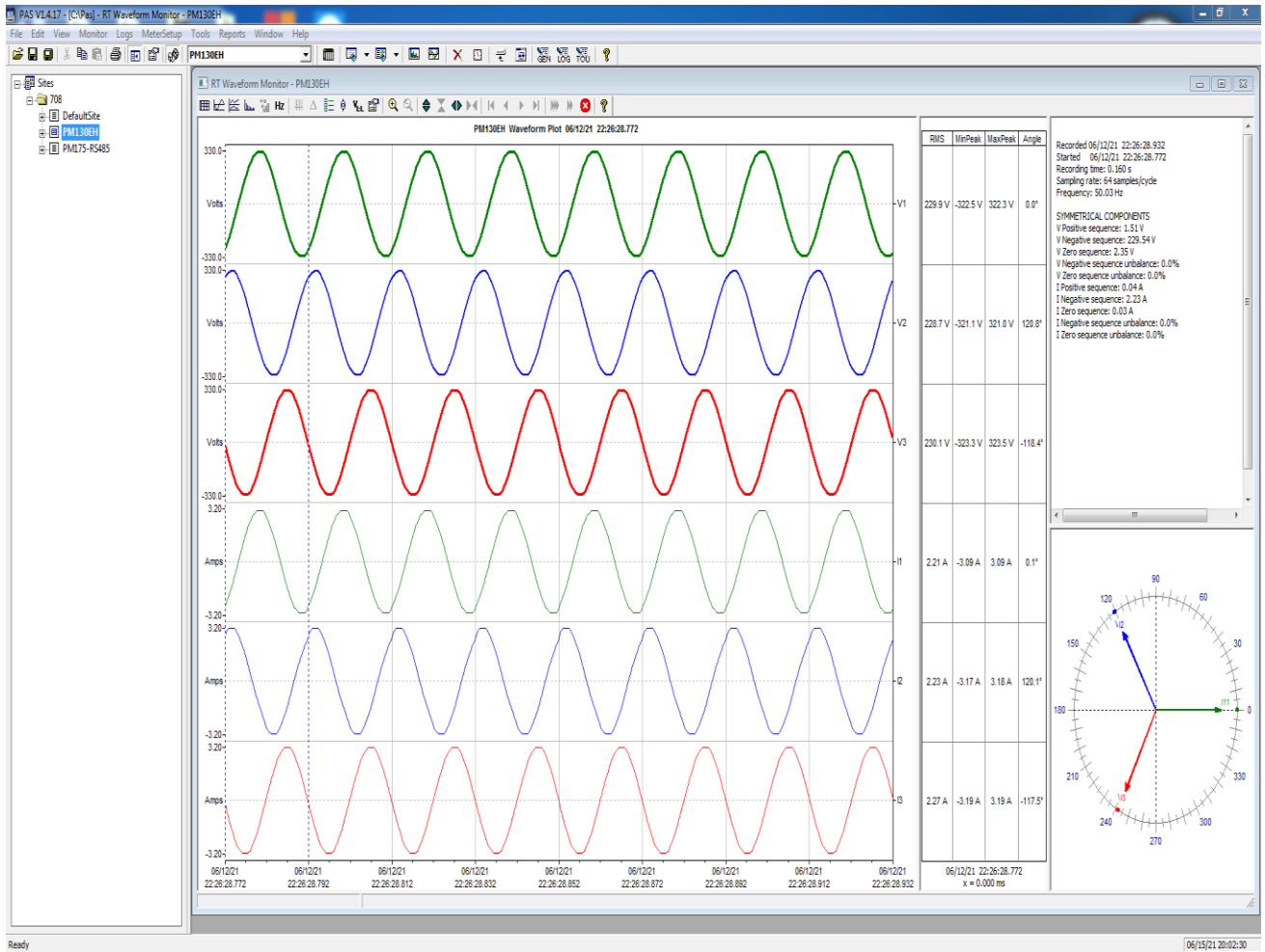
ნახ. 21. ფიზიკური მოდელის აქტიური დატვირთვის უჯრედი.

კვების წყაროსგან მიღებულ ენერჯიას სრულიად შთანთქავს აქტიური სიმძლავრის მომხმარებელი და გარდაქმნის მას სასარგებლო სამუშაოდ. ამავდროულად, აქტიური მომხმარებლის დენის ფორმა იდენტურად იმეორებს მასზე მოდებული ძაბვის ფორმას. ეს კი იმის მანიშნებელია, რომ ძვრის კუთხე არის ნულის ტოლი.

აქტიური დატვირთვის უჯრედი მოიცავს მანიპულირების ბლოკებს (MB), რომლის საშუალებითაც სამფაზა ოთხ საფეხუროვან აქტიურ წინაღობათა ბატარეის მართვა ხორციელდება. გამანაწილებელ ფართან იგი დაკავშირებულია Q ავტომატური ამომრთველით და K კონტაქტორით. ამასთანავე, ერთ ფაზაში ჩართული დენის ტრანსფორმატორ-ამპერმეტრის კომპლექტი გათვლილია სიმეტრიული რეჟიმის დატვირთვის დენის კონტროლისთვის, ხოლო ნეიტრალის წრედში ჩართული კომპლექტი ასიმეტრიული რეჟიმისათვის.

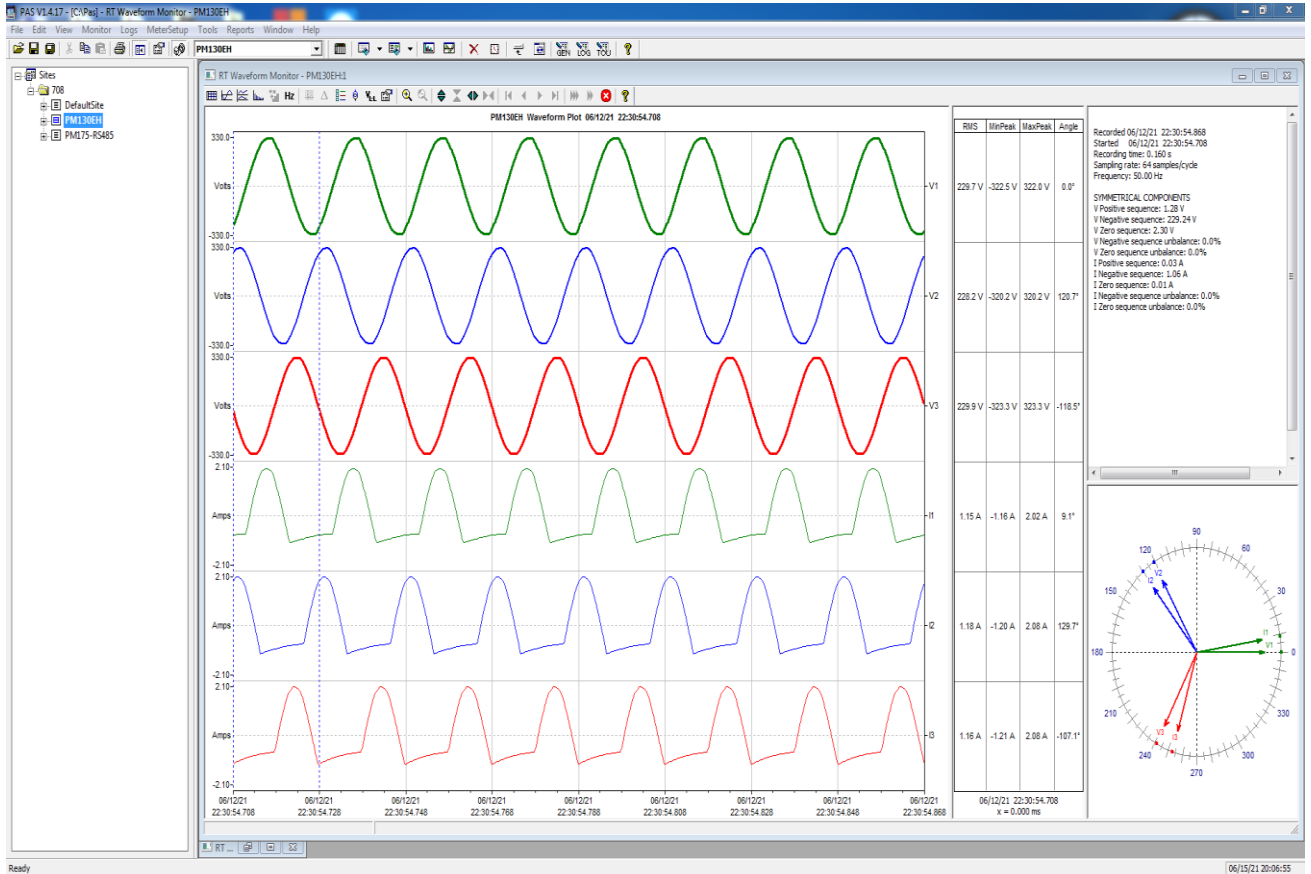
აქტიური წინაღობათა ბატარეის თითოეული საფეხურის სექციის სამივე ფაზაში ჩართული წინაღობები ერთნაირია ($R1=R2=R3$, $R4=R5=R6$, $R7=R8=R9$, $R10=R11=R12$), ხოლო სექციების წინაღობები განსხვავებული და პირველი სექციის წინაღობის ჯერადია ($R4=2R1$, $R7=3R1$, $R10=4R1$), რათა შედეგად მიღწეულ იქნეს ჯამური დატვირთვის 10%-იანი ცვლილება. თითოეული საფეხურის კომპლექტს გააჩნია დამოუკიდებელი კონტაქტორი (KMR1, KMR2, KMR3, KMR4) და მათი მართვა - გამორთვა ხდება, როგორც ხელით (სტუდენტის მიერ) სტენდის მართვის პულტზე გამოტანილი ტუმბლერების საშუალებით, ასევე ავტომატურად - პროგრამირებადი რელე Zelio logic-დან, კონკრეტული ელექტროტექნოლოგიური დანადგარის (კომპლექსის) ტიპური გრაფიკის საფუძველზე შედგენილი პროგრამის მიხედვით. აქედან გამომდინარე, მართვის პულტზე გათვალისწინებულია რეჟიმის გადამრთველი ტუმბლერი.

აქტიურ წინაღობათა ბლოკი შესასვლელით მიერთებულია მანიპულირების ბლოკთან და მისი დანიშნულებაა ასიმეტრიული რეჟიმის შექმნა, ასევე დატვირთვის დენის ფორმის დამახინჯება სისტემაში ძაბვის მაღალი სიხშირის ჰარმონიკების წარმოქმნისათვის. ბლოკს შეუძლია ერთდროულად გამოიწვიოს დატვირთვის დენის ფორმის სხვადასხვა ხარისხით დამახინჯება და წარმოქმნას ასიმეტრიული რეჟიმი.



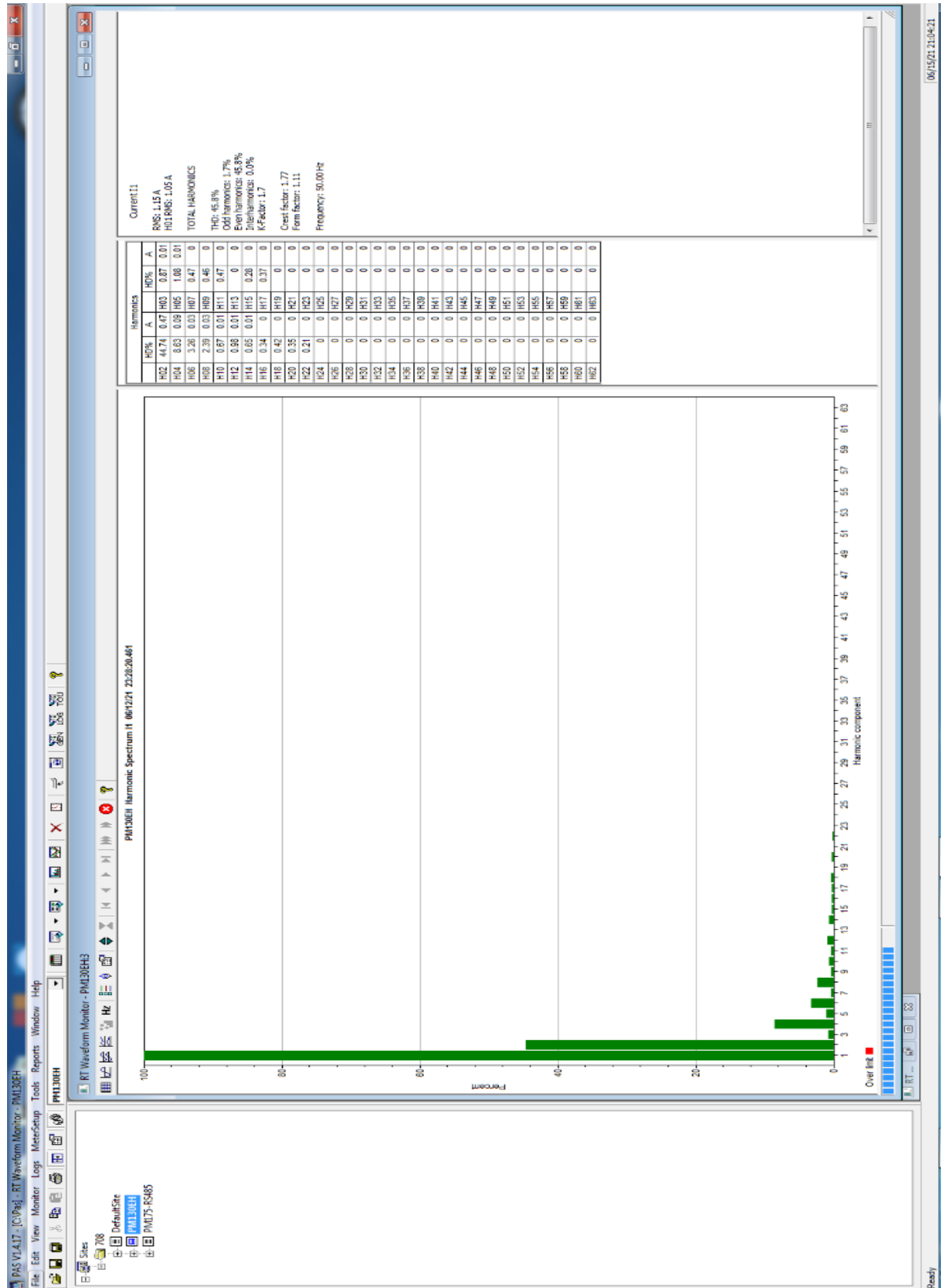
ნახ. 22. ფიზიკური მოდელის აქტიური დატვირთვის უჯრედის ძაბვისა და დატვირთვის დენის მრუდები პირდაპირი ჩართვისას.

მანიპულირების ბლოკს აქვს სამი არხი, ესენია: პირველი -პირდაპირი ჩართვის არხი. ის KM1 კონტაქტორის სახით არის წარმოდგენილი და უზრუნველყოფს წინააღმართა ბლოკზე ქსელის ძაბვის პირდაპირ და შეუზღუდავად მიწოდებას. ამ შემთხვევაში დატვირთვის დენის ფორმა არ მახინჯდება(ნახ.22).



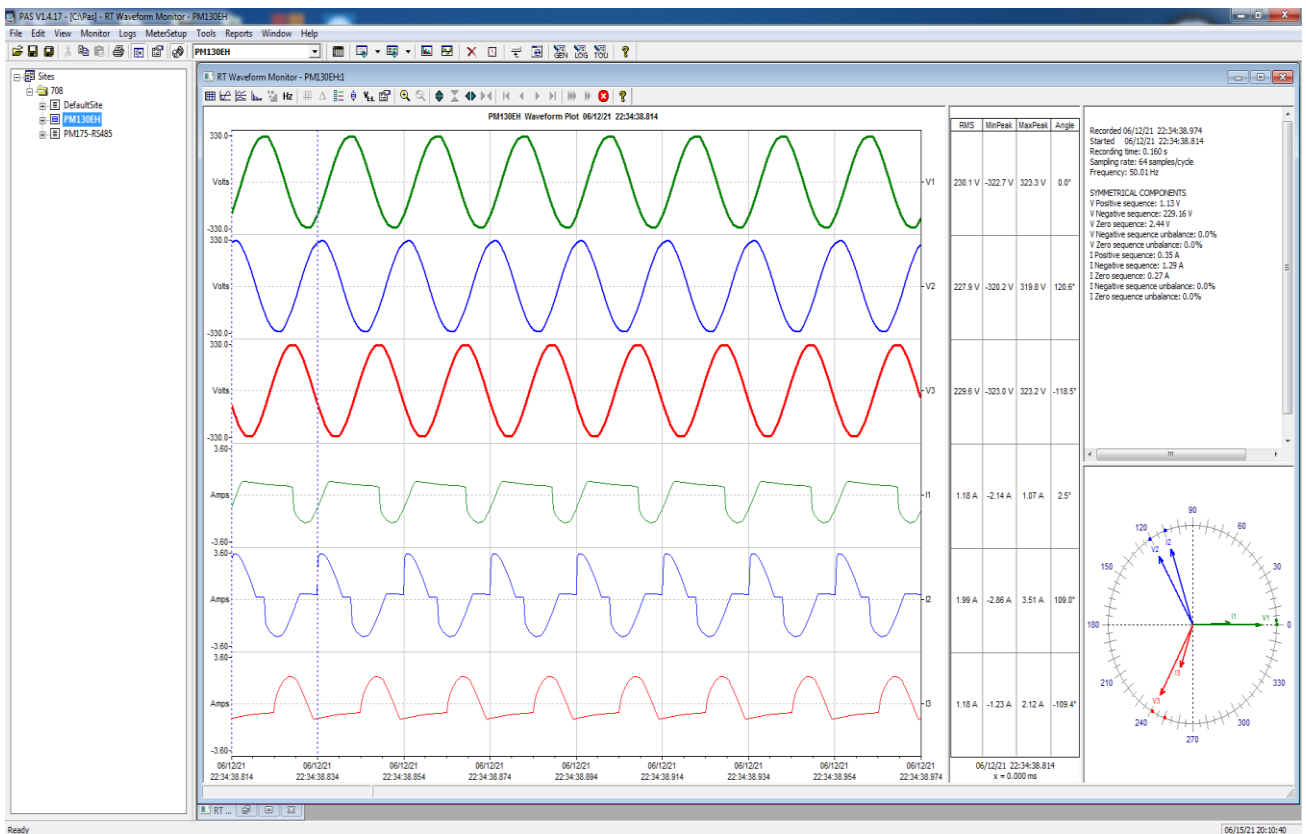
ნახ. 23. ფიზიკური მოდელის აქტიური დატვირთვის უჯრედის ძაბვისა და დატვირთვის დენის მრუდები დიოდების არხის ჩართვისას.

მეორე, დიოდების არხი. მასში KM2 კონტაქტორის ძალურ კონტაქტების შემდეგ, ყოველ ფაზაში, ჩართულია ერთნაირი მიმართულების თითო VD1, VD2, VD3 დიოდი. არხი თითოეულ ფაზაში დენს ატარებს მხოლოდ ერთი ნახევარპერიოდის განმავლობაში და შედეგად იწვევს დატვირთვის დენის ფორმის 50%-იან დამახინჯებას(ნახ.23).

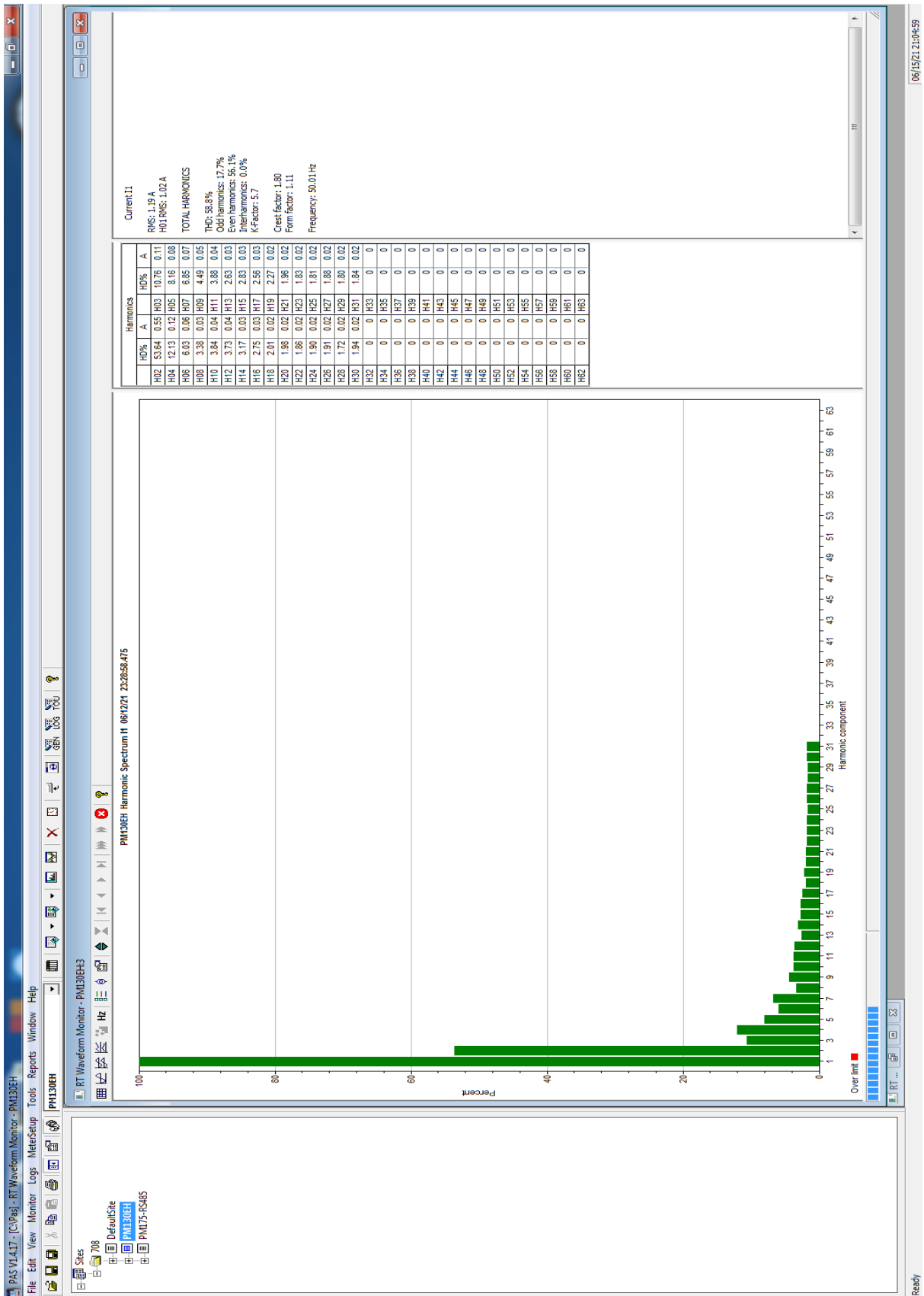


ნახ. 24. ფიზიკური მოდელის აქტიური დატვირთვის მაღალი რივის ჰარმონიკების სპექტრი დიოდების ჩართვისას.

მესამე არის ძაბვის ტირისტორული რეგულატორის არხი და იგი მოიცავს KM3 კონტაქტორსა და მასთან ჩართულ სამფაზა ძაბვის ტირისტორულ რეგულატორებს(თღ). ტირისტორული რეგულატორის არხის მიერ გენერირებული დაბრკოლებები დატვირთვის დენის დამახინჯების თვალსაზრისით ყველაზე უფრო გავრცელებული თანამედროვე ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების ძალოვან წრედებში გამოყენებული გარდამქმნელების ტიპურ ნიმუშს წარმოადგენს. მათი დატვირთვის დენის დიდ დიაპაზონში (0-1მახ) რეგულირება მიიღწევა ტირისტორების გახსნის კუთხის 0-180 ფარგლებში ცვლილების შესაძლებლობიდან გამომდინარე. ყოველივე ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე შესაძლებელია ვთქვათ, რომ მესამე, ტირისტორული რეგულირების არხი უზრუნველყოფს დატვირთვის დენის 0-100% დიაპაზონში დამახინჯებას.

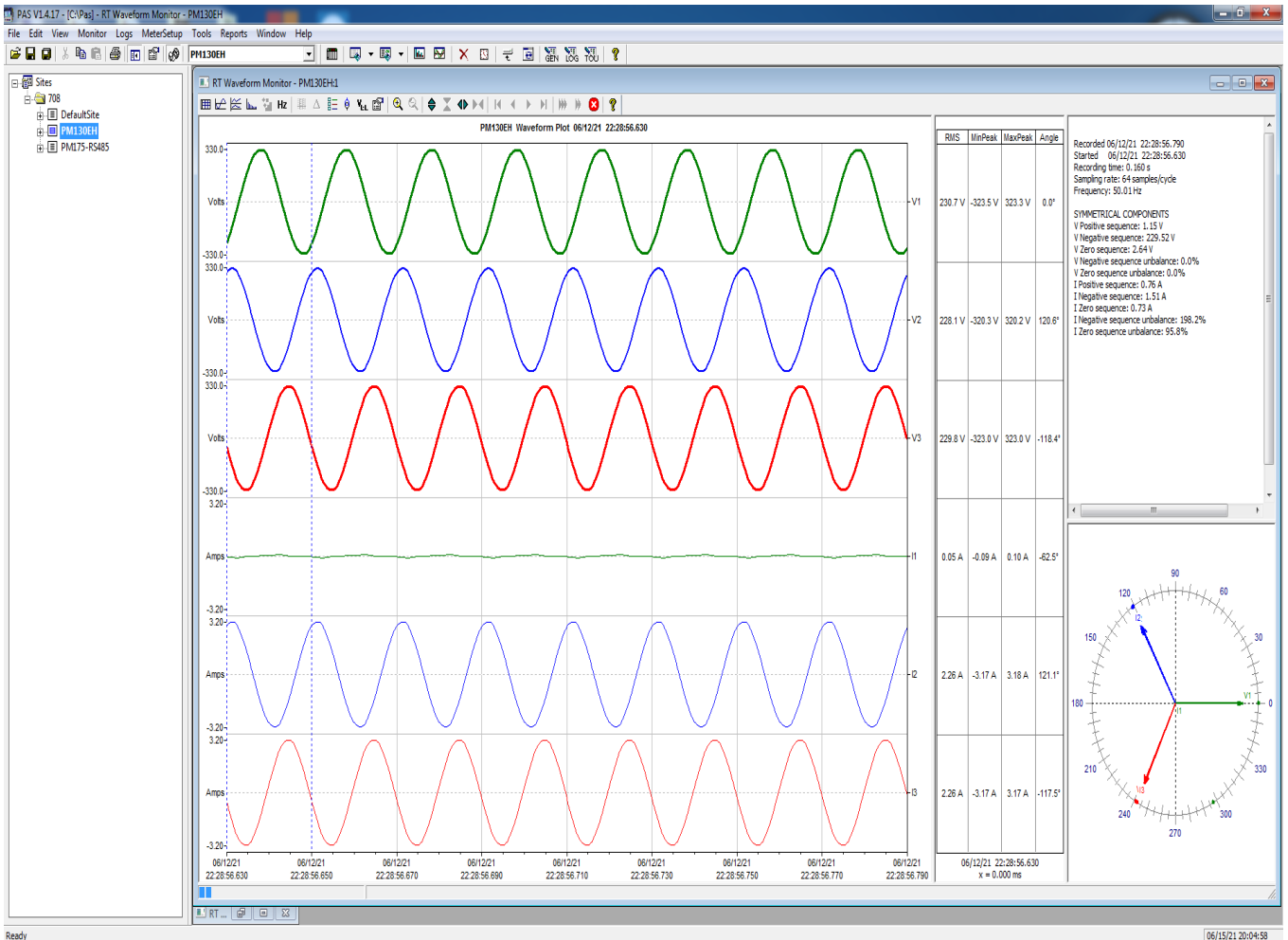


ნახ. 25. ფიზიკური მოდელის აქტიური დატვირთვის უჯრედის ძაბვისა და დატვირთვის დენის მრუდეები ტირისტორული არხის ჩართვისას.



ნახ. 26. ფიზიკური მოდელის აქტიური დატვირთვის ძაბვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრი ტირისტორული არხის ჩართვისას.

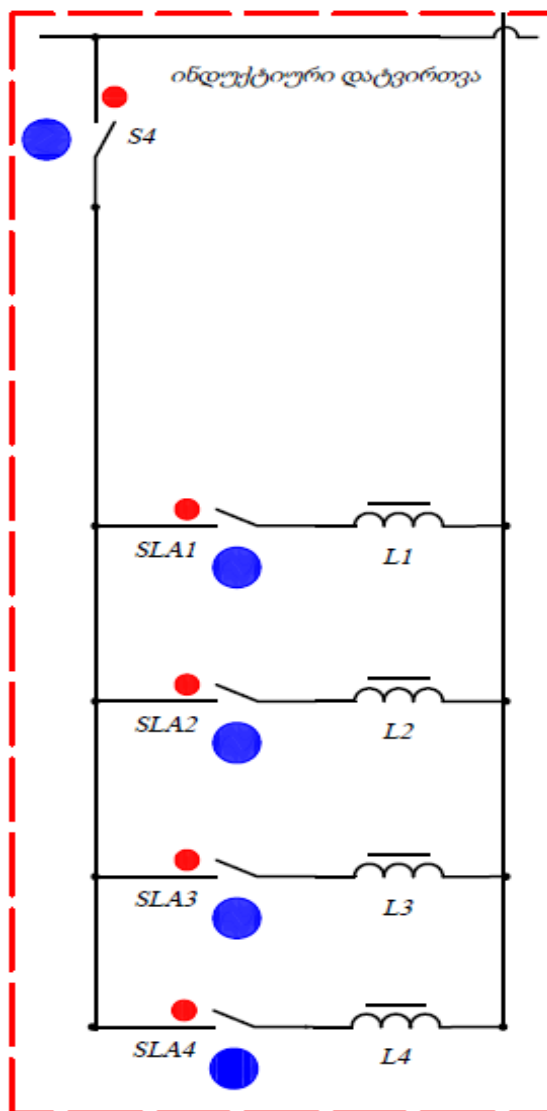
აქტიური დატვირთვის უჯრედში ასიმეტრიული რეჟიმი უზრუნველყოფილია ერთ-ერთი ფაზის გამორთვის გზით. ამ მიზნით, მანიპულირების ბლოკის გამოსასვლელის ერთ-ერთ ფაზაზე ჩართულია KM4 კონტაქტორი, რომელიც თავდაპირველად ნორმალურად ჩაკეტილ კონტაქტს წარმოადგენს(ნახ.16).



ნახ. 27. ფიზიკური მოდელის აქტიური დატვირთვის უჯრედის ძაბვისა და დატვირთვის დენის მრუდეები ასიმეტრიული რეჟიმისას.

აქედან გამომდინარე, აქტიური დატვირთვის უჯრედის რეჟიმს განსაზღვრავს მანიპულირების ბლოკის KM1, KM2, KM3, KM4 კონტაქტორების მდგომარეობა.

2.4 ინდუქციური დატვირთვის უჯრედის გამოკვლევა



ნახ. 28. ფიზიკური მოდელის ინდუქციური დატვირთვის უჯრედის სქემა.

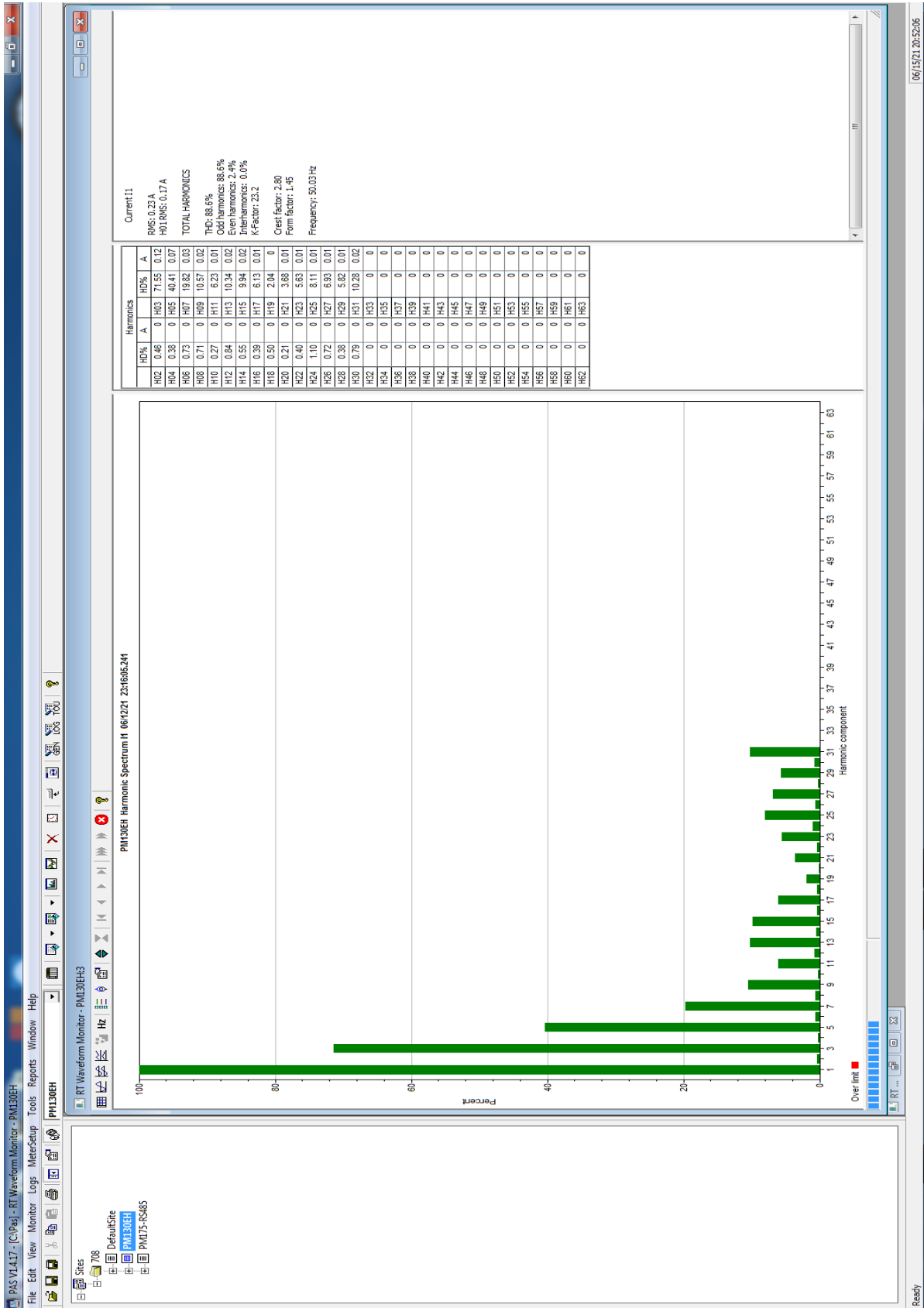
როგორც ცნობილია, რეაქტიული სიმძლავრე წარმოიქმნება ისეთ წრედებში, რომელიც შეიცავს რეაქტიულ ელემენტებს (ინდუქციურობასა და ტევადობას) და ჩვეულებრივ, იხარჯება იმ გამტარების ფუჭ გათბობაზე, რომლებისგანაც შედგენილია ეს წრედი. რეაქტიული დატვირთვების მაგალითებია: გადასატანი ელექტრომოწყობილობები, სხვადასხვა ტიპის ელექტრული ძრავა, განსხვავებული საყოფაცხოვრებო ტექნიკა. ამ მოწყობილობების სრული სიმძლავრე გაზომილი ვოლტ-ამპერებში და აქტიური სიმძლავრე (ვატი) ერთმანეთს უკავშირდებიან

სიმძლავრის კოეფიციენტით ($\cos\varphi$). სიმძლავრის კოეფიციენტმა ($\cos\varphi$) შეიძლება მიიღოს მნიშვნელობები 0,5-დან 0,99-მდე.

რეაქტიული სიმძლავრის დატვირთვას ახასიათებს თავიდან მასში კვების წყაროსგან მიღებული ენერჯის დაგროვება შემდგომ კი, დაგროვებული ენერჯის გაცემა უკან კვების წყაროსთვის. ასეთი ტიპის დატვირთვების მაგალითებია ელექტრული ქსელის ისეთი ელემენტები, როგორებიცაა, კონდენსატორი, ინდუქციურობის კოჭა და სხვა ნებისმიერი მოწყობილობა, რომლებიც შეიცავენ ზემოთ ჩამოთვლილ ელემენტებს. ამავდროულად, რეაქტიული ხასიათის მქონე დატვირთვაში ადგილი აქვს ფაზურ ძვრას, რომელიც 90° - ის ტოლიც შეიძლება იყოს. რადგან არსებული ელექტრომომარაგების სისტემების საბოლოო და მთავარი მიზანია გენერირებული ელექტრული ენერჯის გადაცემა პირდაპირ მომხმარებლისათვის და არა სიმძლავრეების წინ და უკან ხეტიალი სისტემაში, ამიტომაც მიიჩნევა რომ რეაქტიული სიმძლავრე წარმოადგენს სრული სიმძლავრის უსარგებლო მდგენელს, რომელიც ქსელში დამატებით დანაკარგებს იწვევს.

ელექტრულ ქსელში არსებული რეაქტიული სიმძლავრის დანაკარგები პირდაპირ არის დაკავშირებული სიმძლავრის კოეფიციენტთან და რაც უფრო მაღალია $\cos\varphi$ მით უფრო მცირეა სიმძლავრის დანაკარგები, შესაბამისად კი უფრო იაფი ელექტროენერჯის მიწოდება მომხმარებელამდე. აქედან გამომდინარე, შეგვიძლია ვიმსჯელოთ რომ სწორედ სიმძლავრის კოეფიციენტი მიგვითითებს ელექტრული ენერჯის წყაროს მიერ გამომუშავებული სიმძლავრის ათვისების ეფექტურობაზე. ამიტომაც, ყველა სახის ელექტრულ მოწყობილობაში შემუშავებულია სპეციალური საკომპენსაციო მოწყობილობები, რათა უზრუნველყოფილ იქნეს სიმძლავრის კოეფიციენტის ამაღლება.

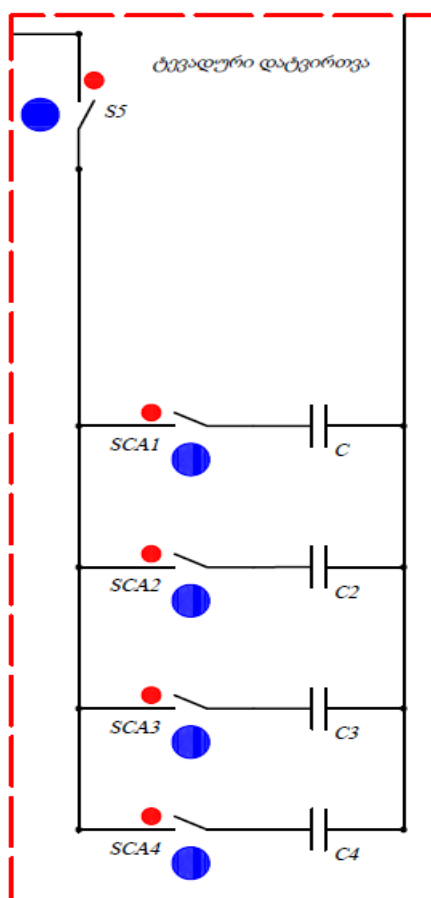
რეაქტიული დატვირთვის უჯრედი წარმოადგენს ოთხი სამფაზა დროსელისაგან შემდგარ ბატარეას, რომლებსაც განსხვავებული ინდუქტიური წინაღობი გააჩნიათ. უჯრედი გამანაწილებელ ფართან მიერთებულია KML კონტაქტორის და QL ავტომატური ამომრთველის გავლით. ბატარეის ცალკეული სექციების ყოველ ფაზაში ჩართული ინდუქტიური წინაღობები ($XL1=XL2=XL3, XL4=XL5=XL6, XL7=XL8=XL9, XL10=XL11=XL12$) ერთნაირია.



ნახ. 29. ფიზიკური მოდელის ინტელექტური დატვირთვის უწყრედის ძაბვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრი.

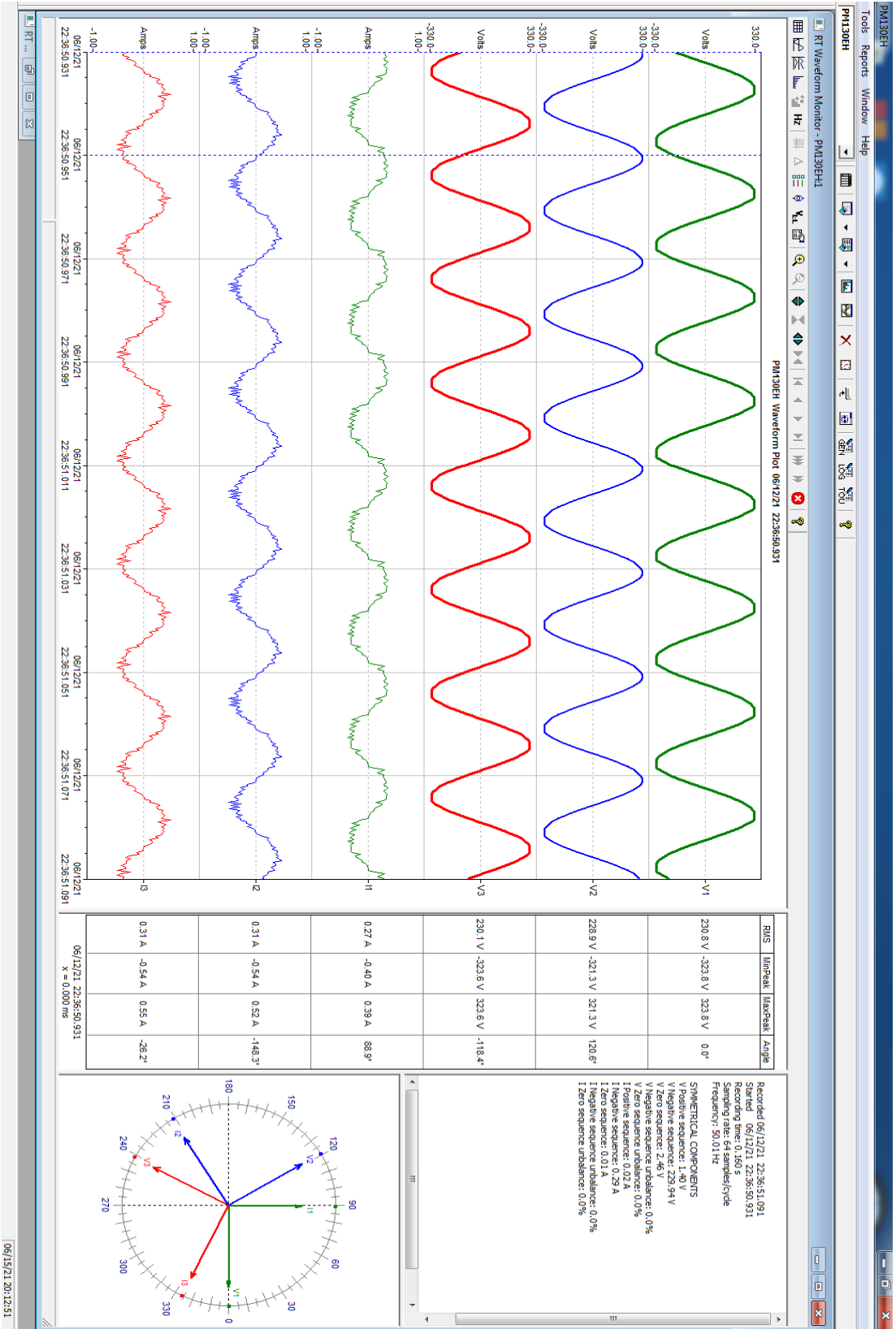
ბლოკში ჩართული ყოველი სექცია აღჭურვილია საკომუტაციო აპარატით (KML1, KML2, KML3, KML4), რომელთა ჩართვა-გამორთვა ხორციელდება ხელით ლაბორანტის მიერ სტენდის მართვის პულტზე გამოტანილი ტუმბლერების გამოყენებით და ავტომატურად კი პროგრამირებადი რელე Zelio logic-დან კონკრეტული ელექტროტექნოლოგიური დანადგარის ან კომპლექსის ტიპური გრაფიკის საფუძველზე შედგენილი პროგრამის მიხედვით, ჯგუფურად აქტიური დატვირთვის ბატარეასთან ერთად.

2.5 ტევადური დატვირთვის უჯრედის გამოკვლევა



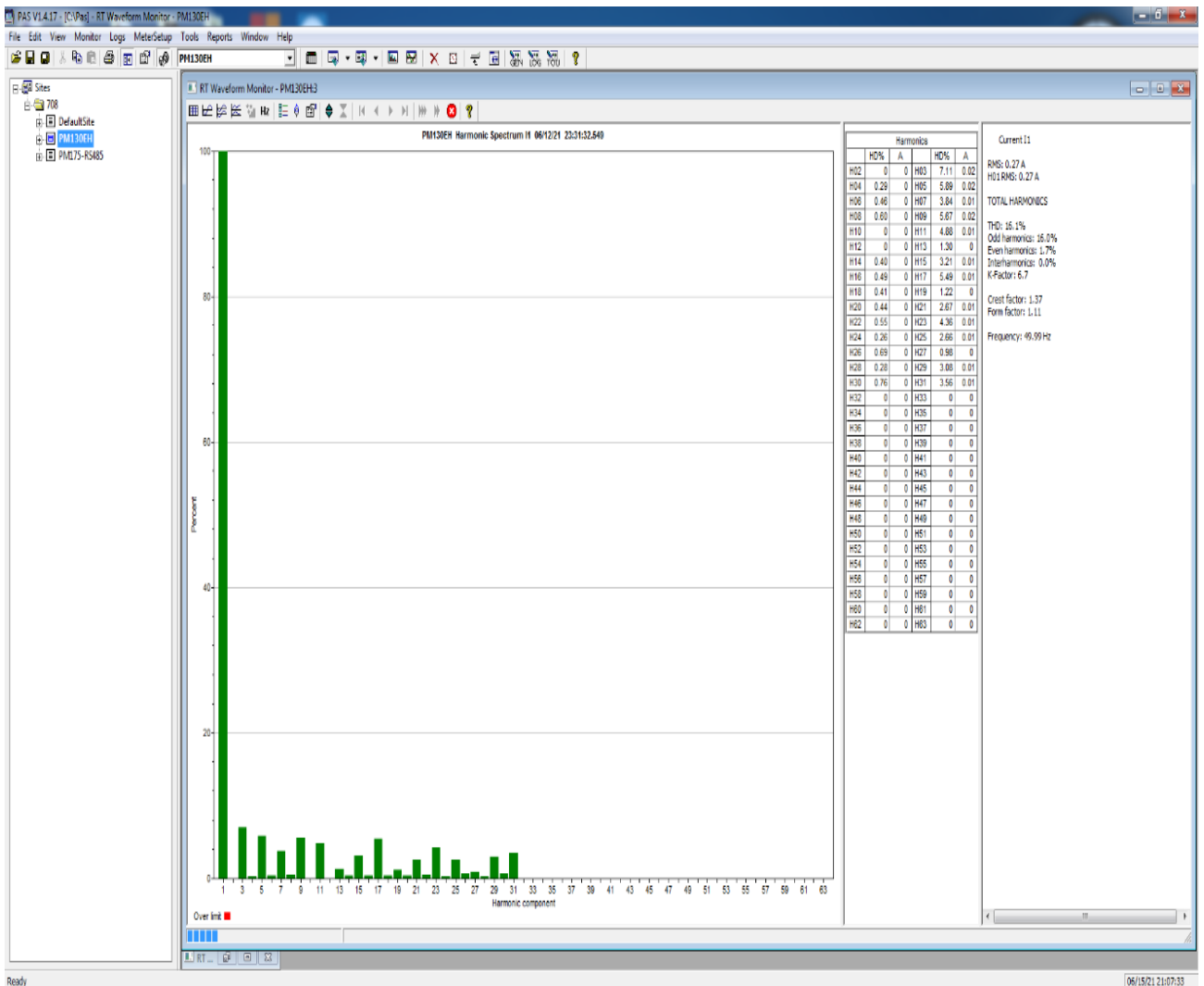
ნახ. 30. ფიზიკური მოდელის ტევადური დატვირთვის უჯრედი.

ტევადური დატვირთვის უჯრედი წარმოადგენს ოთხი სამფაზა კონდესატორებისაგან შემდგარ ბატარეას, რომლებსაც განსხვავებული ინდუქციური წინაღობი გააჩნიათ.



ნახ. 31. ფიზიკური მოდელის ტევადური დატვირთვის უჯრედის ძაბვისა და დატვირთვის დენის მრუდეები.

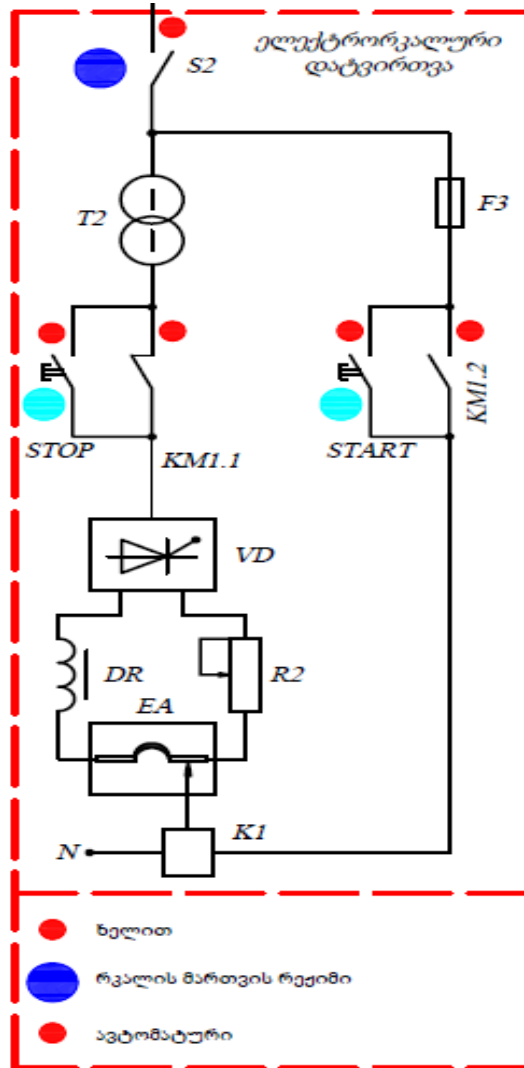
უჯრედი გამანაწილებელ ფართან მიერთებულია KMC კონტაქტორის და QC ავტომატური ამომრთველის გავლით. ბლოკში ჩართული ყოველი სექცია აღჭურვილია საკომუტაციო აპარატით (KMC1, KMC2, KMC3, KMC4), რომელთა ჩართვა-გამორთვა ხორციელდება ხელით ლაბორანტის მიერ სტენდის მართვის პულტზე გამოტანილი ტუმბლერების გამოყენებით და ავტომატურად კი პროგრამირებადი რელე Zelio logic-დან კონკრეტული ელექტროტექნოლოგიური დანადგარის ან კომპლექსის ტიპური გრაფიკის საფუძველზე შედგენილი პროგრამის მიხედვით, ჯგუფურად აქტიური დატვირთვის ბატარეასთან ერთად(ნახ.31).



ნახაზი 32. ფიზიკური მოდელის ტევადური დატვირთვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრი.

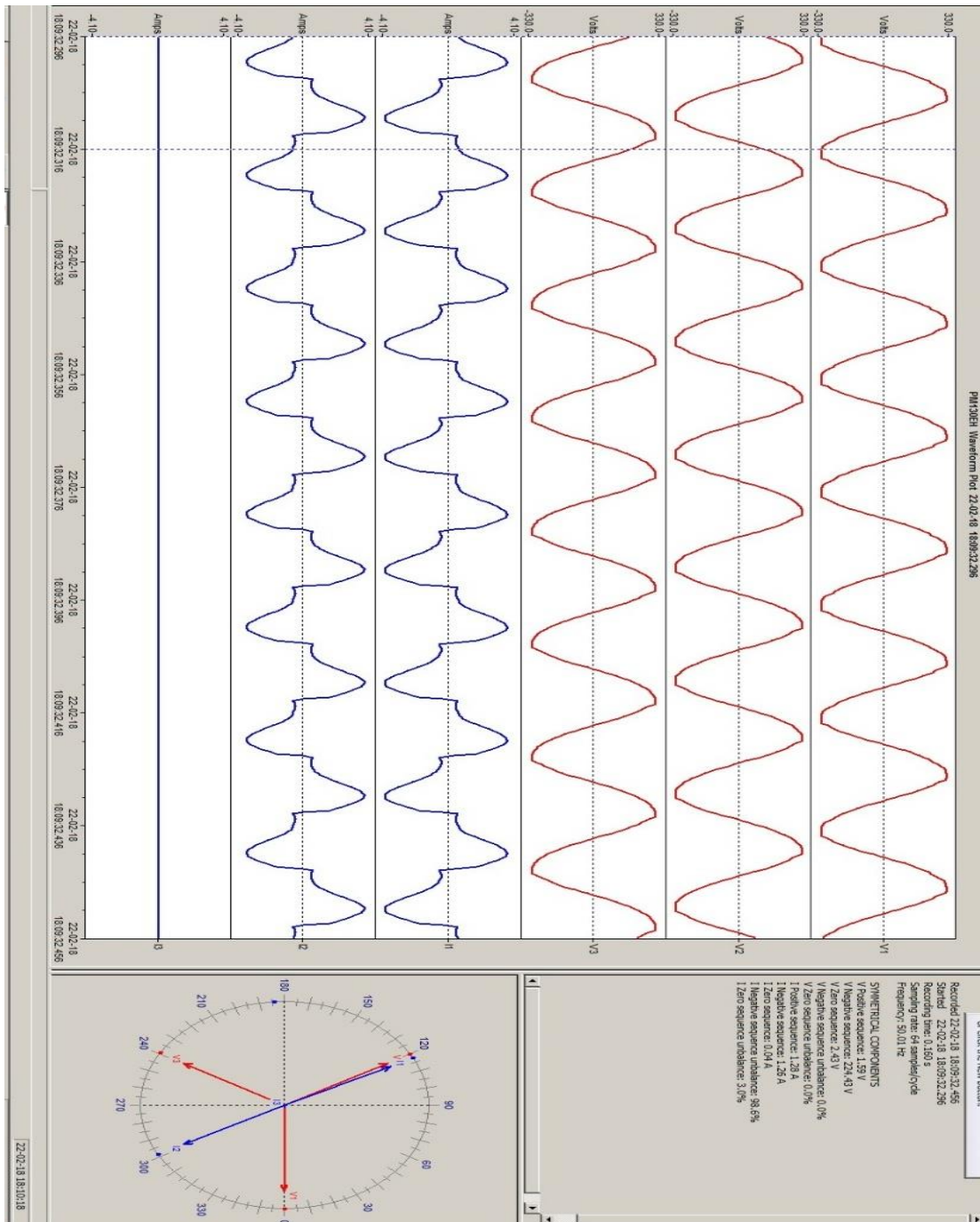
2.6 ელექტრორკალური დატვირთვის უჯრედის გამოკვლევა

ლითონგადამამუშავებელი საწარმოსათვის ელექტრორკალური ღუმელი წარმოადგენს უმთავრეს მოწყობილობას და მასზე მოდის საწარმოს ელექტრომიმღებთა სიმძლავრის 80 პროცენტი. როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ ამ ტიპის ელექტროტექნოლოგიური დანადგარისთვის დამახასიათებელია განმეორებადი, სწრაფად ცვალებადი, არასიმეტრიული და არასწორხაზოვანი მუშაობის რეჟიმი. მნიშვნელოვანია იმ ამოცანების გადაჭრა, რომელებიც ხელს შეუწყობენ ელექტრორკალური ღუმელის ელექტრომომარაგების სისტემის ეფექტურობის ამაღლებას და მკვებავ ქსელზე გავლენის შემცირებას.

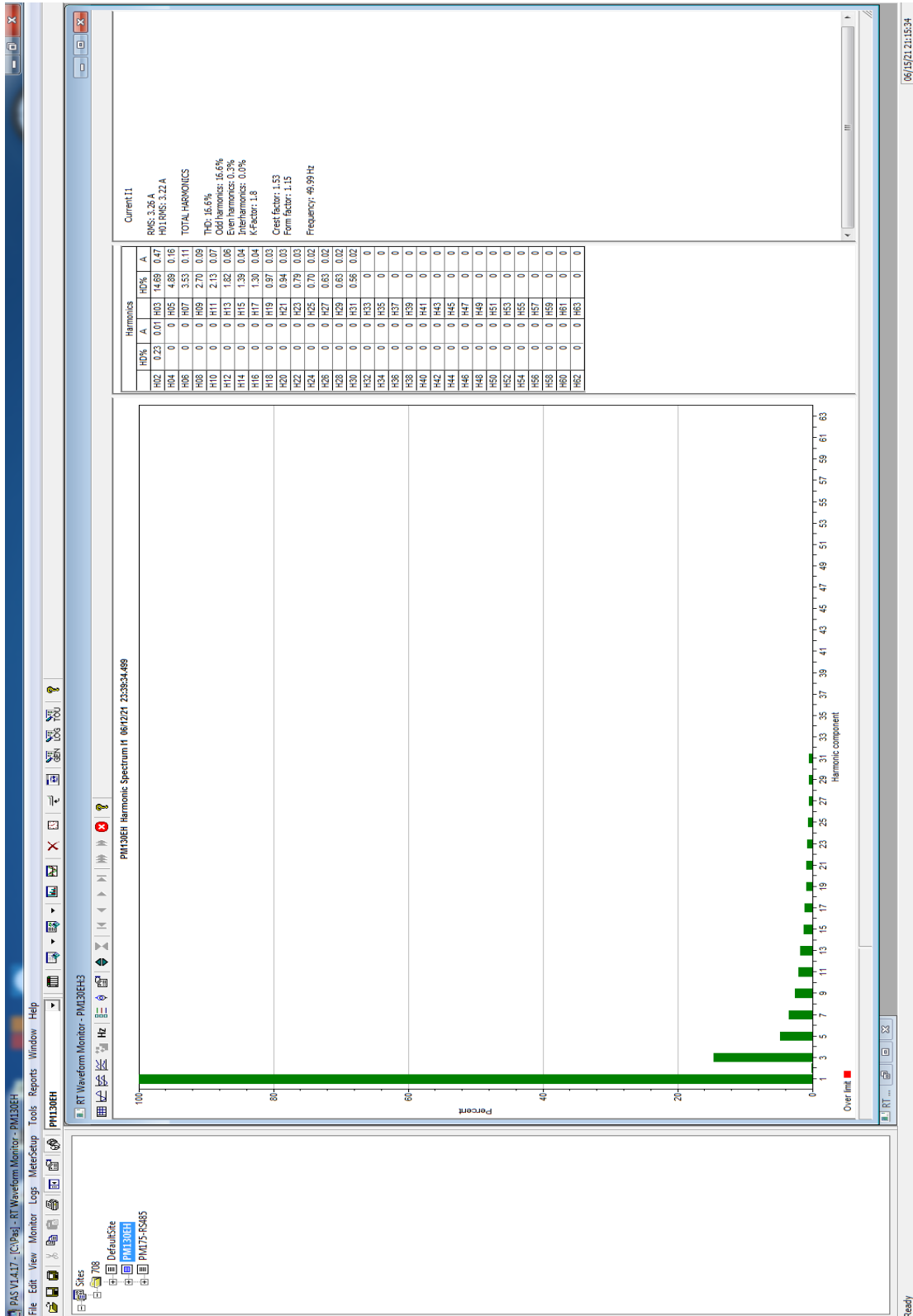


ნახაზი 33. ფიზიკური მოდელის ელექტრორკალური დატვირთვის უჯრედი.

ქვემოთ, ნახაზზე (34) წარმოდგენილია ექსპერიმენტალურად დატვირთვების ფიზიკურ მოდელზე მიღებული ელექტრორკალური უჯრედის მიერ გენერირებული დატვირთვის დენის სინუსოიდა და ვექტორული დიაგრამა. შემდეგ ნახაზზე(35) კი ნაჩვენებია ამავე ღუმელის მიერ ქსელში წარმოქმნილი ჰარმონიკების სპექტრი.



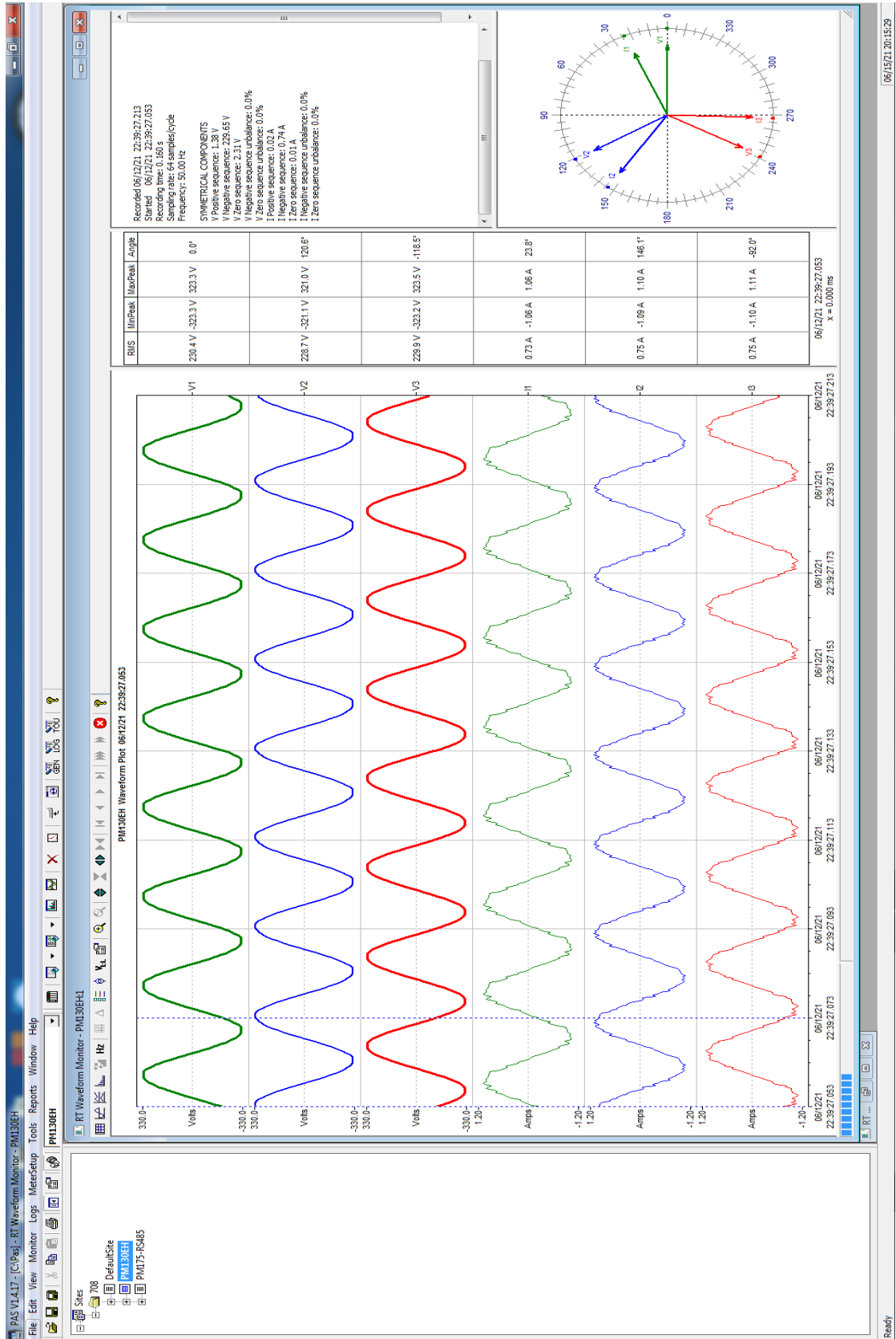
ნახ. 34. ფიზიკური მოდელის ელექტრორკალური ღუმელის უჯრედის დენისა და ძაბვის მრუდეები.



ნახ. 35. ფიზიკური მოდელის ელექტროკალური ღუმელის უჯრედის ძაბვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრი.

ელექტრორკალური დატვირთვის უჯრედი შედგება ერთფაზა ორგრაგნილა ძალოვანი ტრანსფორმატორისაგან (TA), მასთან, დაბალი ძაბვის მხარეს მიერთებულ ბოგირული სქემით შესრულებულ გამმართველისა და ელექტრორკალური კამერისაგან (EA). უჯრედი (ძალოვანი ტრანსფორმატორი) გამანაწილებელი ფარის ორ ფაზასთან მიერთებულია QA ავტომატური ამომრთველისა და KMA კონტაქტორის საშუალებით. ელექტრორკალური უჯრედი დატვირთვის დენის კონტროლისათვის აღჭურვილია ფაზაში ჩართული დენის ტრანსფორმატორ - ამპერმეტრის კომპლექტით. კამერაში მოთავსებული მაღალი ტემპერატურული სიმტკიცის ელექტროდებით, რომელთაგან ერთ-ერთი ხისტადაა დამაგრებული, ხოლო მეორე მოძრავია და აღჭურვილია გადაადგილების მექანიზმით, რომელიც თავის მხრივ მის უძრავ ელექტროდთან შეხების საშუალებით უზრუნველყოფს მოკლედ შერთვის წარმოქმნას და შედეგად იწვევს ელექტრული რკალი. ამასთან ერთად, უძრავ ელექტროდს გააჩნია სარკალე შუალედის მარეგულირებელი.

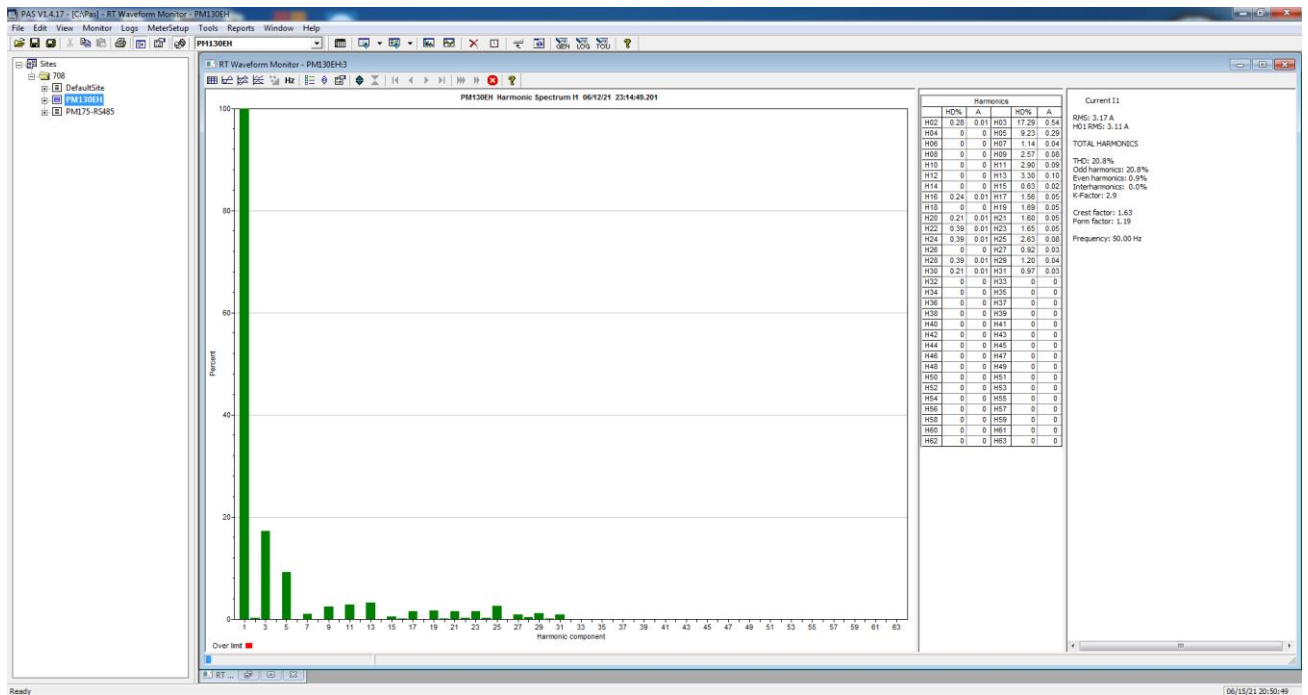
მომდევნო ნახაზზე, მრავალფეროვნებისა და დატვირთვების იმიტირების ფიზიკური მოდელის შესაძლებლობების პრეზენტაციისათვის, მოყვანილია სხვადასხვა მომხმარებლების ერთდოული, კომბინირებული ჩართვის შედეგად ქსელში წარმოქმნილი დაბრკოლებების შესაბამისი მრუდები, მათი სინუსოიდები, ვექტორული დიაგრამები, ჰარმონიკების სპექტრი და სხვა.



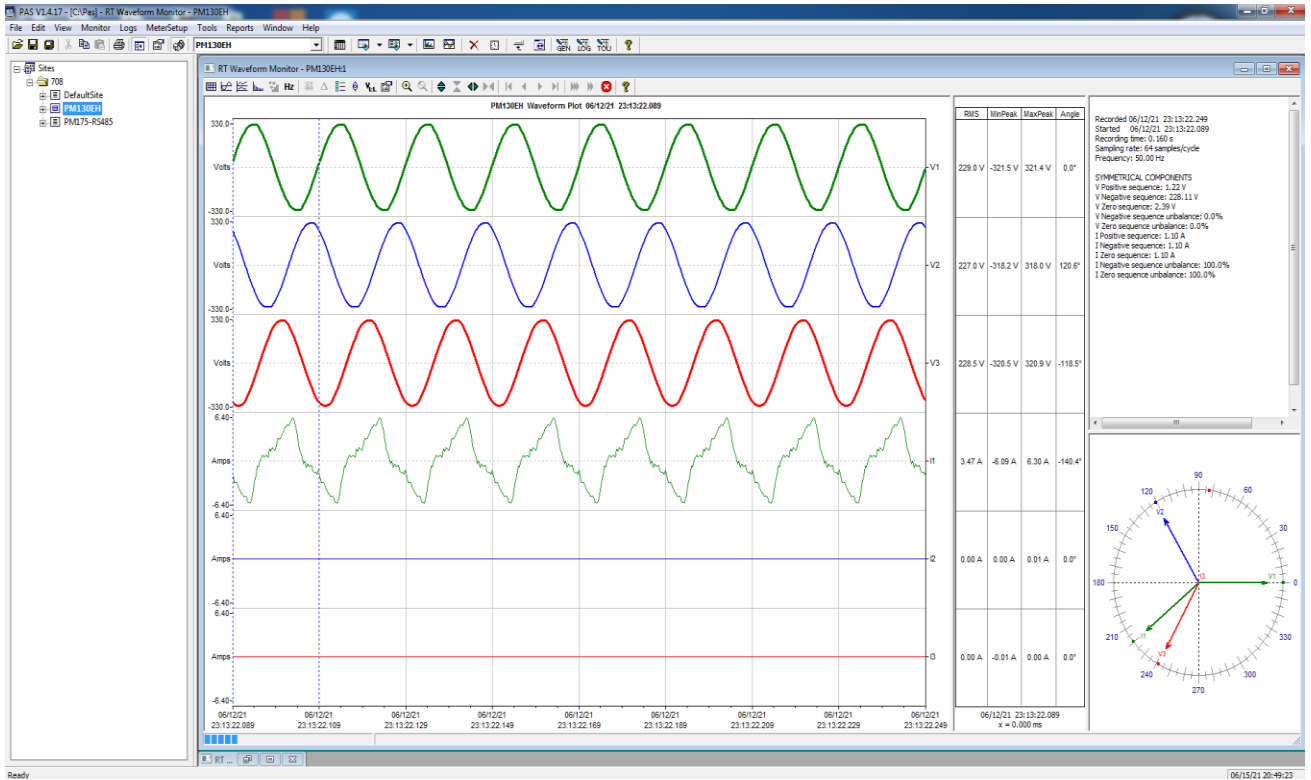
ნახაზი 36. ფიზიკური მოდელის აქტიურ - ტევადური ძაბვისა და დატვირთვის დენის მრუდეები.

ცხრ. 1. ფიზიკური მოდელის აქტიურ - ტევადური დატვირთვის ელექტრული პარამეტრების ცხრილი.

PM130EH Harmonic Spectrum L1 06/12/21 22:39:49.055										
	V%	I%	P%	Q%	Angle	V	A	kW	kvar	
H01	100.0	100.0	100.0	-100.0	-23.42°	230.2	0.72	0.152	-0.066	
H02	0	0.3	0	0	0°	0	0	0	0	
H03	1.1	1.9	0	0	-121.31°	2.5	0.01	0	0	
H04	0	0	0	0	0°	0	0	0	0	
H05	0.5	1.9	0	0	-86.34°	1.1	0.01	0	0	
H06	0	0.5	0	0	0°	0	0	0	0	
H07	0.7	1.3	0	0	-64.62°	1.6	0.01	0	0	
H08	0	0.3	0	0	0°	0	0	0	0	
H09	0.4	2.0	0	0	-50.29°	0.9	0.01	0	0	
H10	0	0	0	0	0°	0	0	0	0	
H11	0.4	1.7	0	0	-98.84°	0.9	0.01	0	0	
H12	0	0.3	0	0	0°	0	0	0	0	
H13	0.2	0.7	0	0	0°	0.5	0	0	0	
H14	0	0.4	0	0	0°	0	0	0	0	
H15	0	1.4	0	0	0°	0	0.01	0	0	
H16	0	0.4	0	0	0°	0	0	0	0	
H17	0.4	3.0	0	0	-98.82°	0.9	0.02	0	0	
H18	0	0.3	0	0	0°	0	0	0	0	
H19	0	1.4	0	0	0°	0	0.01	0	0	
H20	0	0.3	0	0	0°	0	0	0	0	
H21	0.2	2.4	0	0	-75.34°	0.5	0.02	0	0	
H22	0	1.3	0	0	0°	0	0.01	0	0	
H23	0	0.4	0	0	0°	0	0	0	0	
H24	0	1.9	0	0	0°	0	0.01	0	0	
H25	0	0.9	0	0	0°	0	0.01	0	0	
H26	0	1.2	0	0	0°	0	0.01	0	0	
H27	0	1.0	0	0	0°	0	0.01	0	0	
H28	0	0.3	0	0	0°	0	0	0	0	
H29	0	1.7	0	0	0°	0	0.01	0	0	
H30	0	0.6	0	0	0°	0	0	0	0	
H31	0	1.0	0	0	0°	0	0.01	0	0	



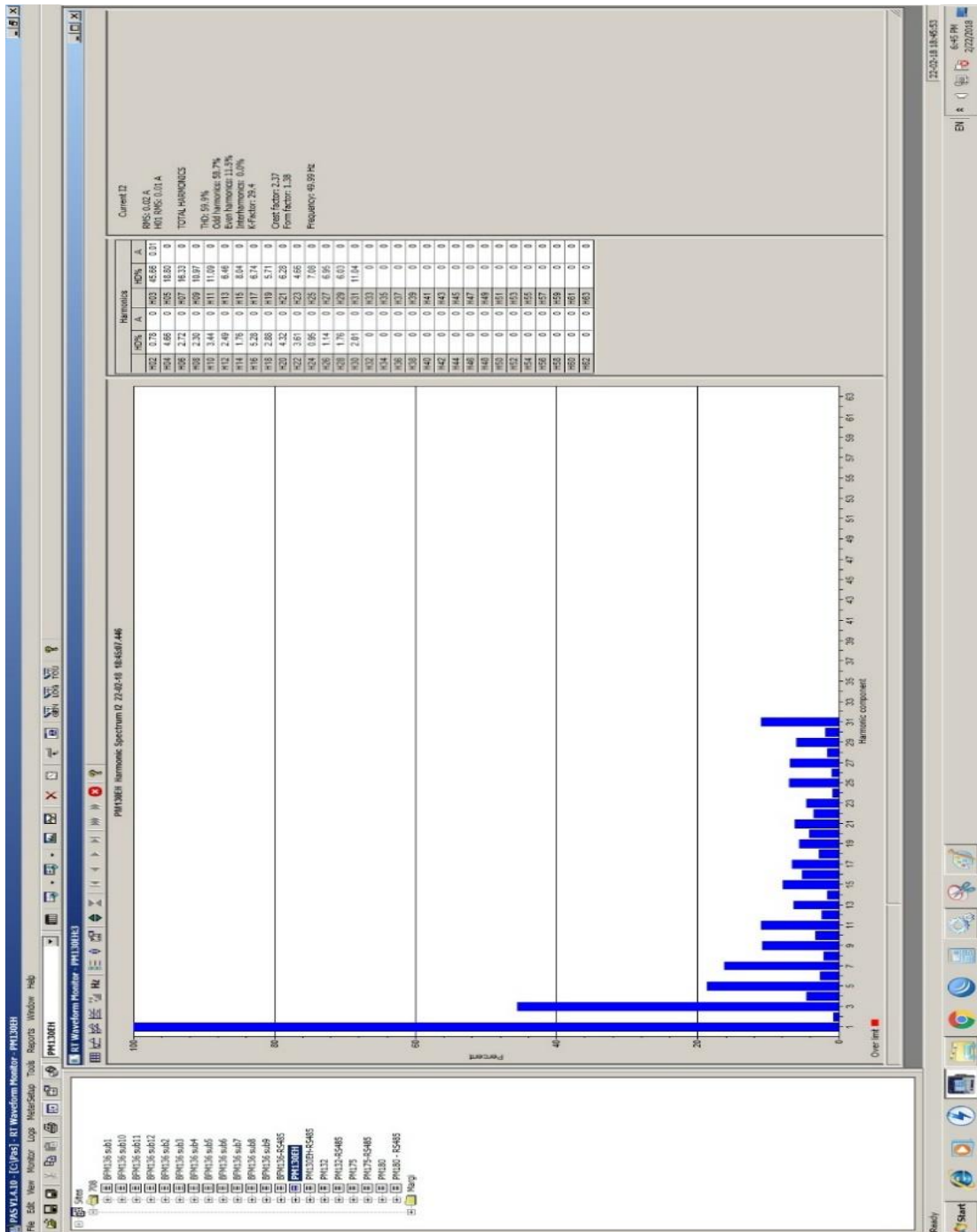
ნახ. 37. აქტიურ- ტევადური დატვირთვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრი.



ნახ. 38. ფიზიკური მოდელის აქტიურ - ინდუქციური ძაბვისა და დატვირთვის დენის მრუდები.

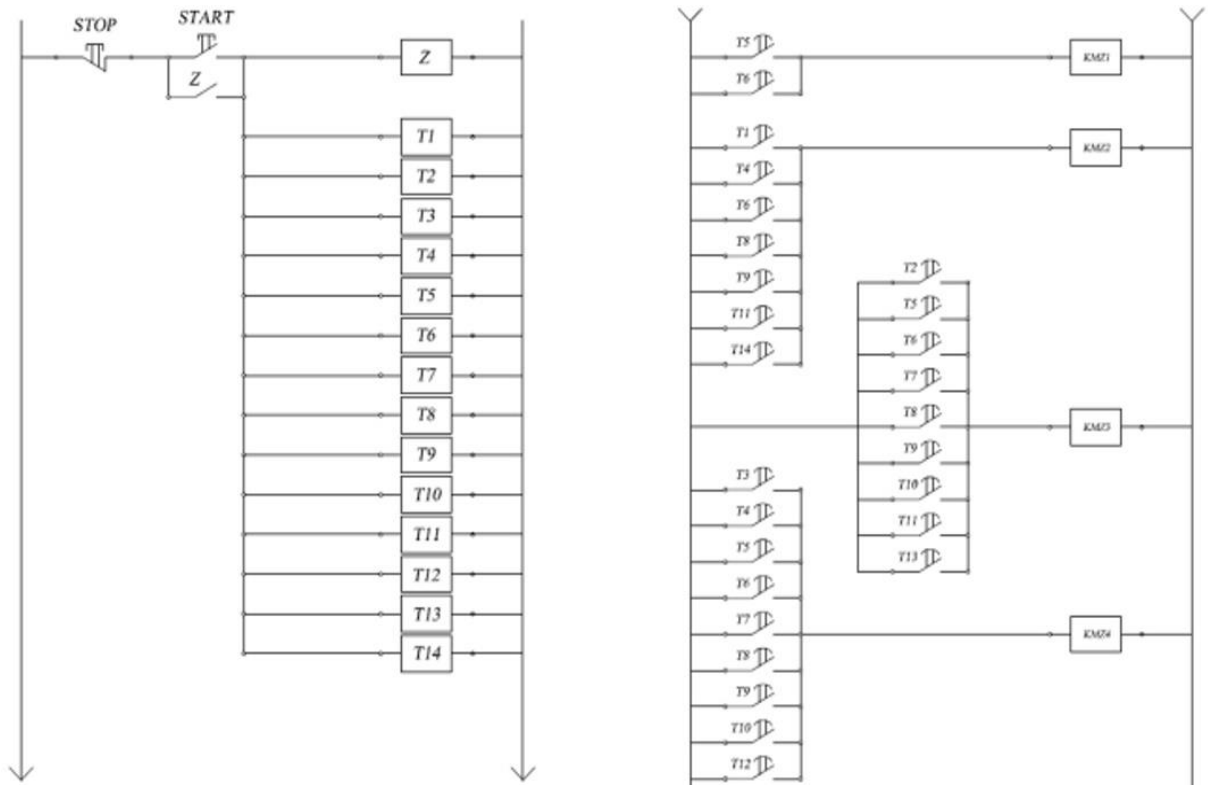
ცხრ. 2. აქტიურ - ინდუქციური დატვირთვის მაღალი რიგის ჰარმონიკული სპექტრი.

PM130EH Harmonic Spectrum L1 06/12/21 23:14:10.109									
	V%	I%	P%	Q%	Angle	V	A	kW	kvar
H01	100.0	100.0	-100.0	100.0	125.87°	229.0	3.14	-0.421	0.582
H02	0	0.4	0	0	0°	0	0.01	0	0
H03	1.3	19.1	0.4	-0.1	-15.68°	3.0	0.60	0.002	0
H04	0	0	0	0	0°	0	0	0	0
H05	0.5	9.0	0.1	0	-21.09°	1.2	0.28	0	0
H06	0	0.4	0	0	0°	0	0.01	0	0
H07	0.5	0.7	0	0	0°	1.1	0.02	0	0
H08	0	0	0	0	0°	0	0	0	0
H09	0.5	2.7	0	0	-142.92°	1.2	0.09	0	0
H10	0	0.3	0	0	0°	0	0.01	0	0
H11	0.5	2.1	0	0	-131.13°	1.1	0.07	0	0
H12	0	0.5	0	0	0°	0	0.01	0	0
H13	0	3.5	0	0	0°	0	0.11	0	0
H14	0	0	0	0	0°	0	0	0	0
H15	0.2	0.9	0	0	0°	0.5	0.03	0	0
H16	0	0	0	0	0°	0	0	0	0
H17	0.4	1.5	0	0	-2.99°	0.9	0.05	0	0
H18	0	0.4	0	0	0°	0	0.01	0	0
H19	0	1.4	0	0	0°	0	0.05	0	0
H20	0	0.6	0	0	0°	0	0.02	0	0
H21	0.2	1.4	0	0	0°	0.5	0.04	0	0
H22	0	1.0	0	0	0°	0	0.03	0	0
H23	0	2.8	0	0	0°	0	0.09	0	0
H24	0	1.1	0	0	0°	0	0.03	0	0
H25	0	1.8	0	0	0°	0	0.06	0	0
H26	0	0.6	0	0	0°	0	0.02	0	0
H27	0	1.8	0	0	0°	0	0.06	0	0
H28	0	1.6	0	0	0°	0	0.05	0	0
H29	0	1.0	0	0	0°	0	0.03	0	0
H30	0	1.6	0	0	0°	0	0.05	0	0
H31	0	0.9	0	0	0°	0	0.03	0	0

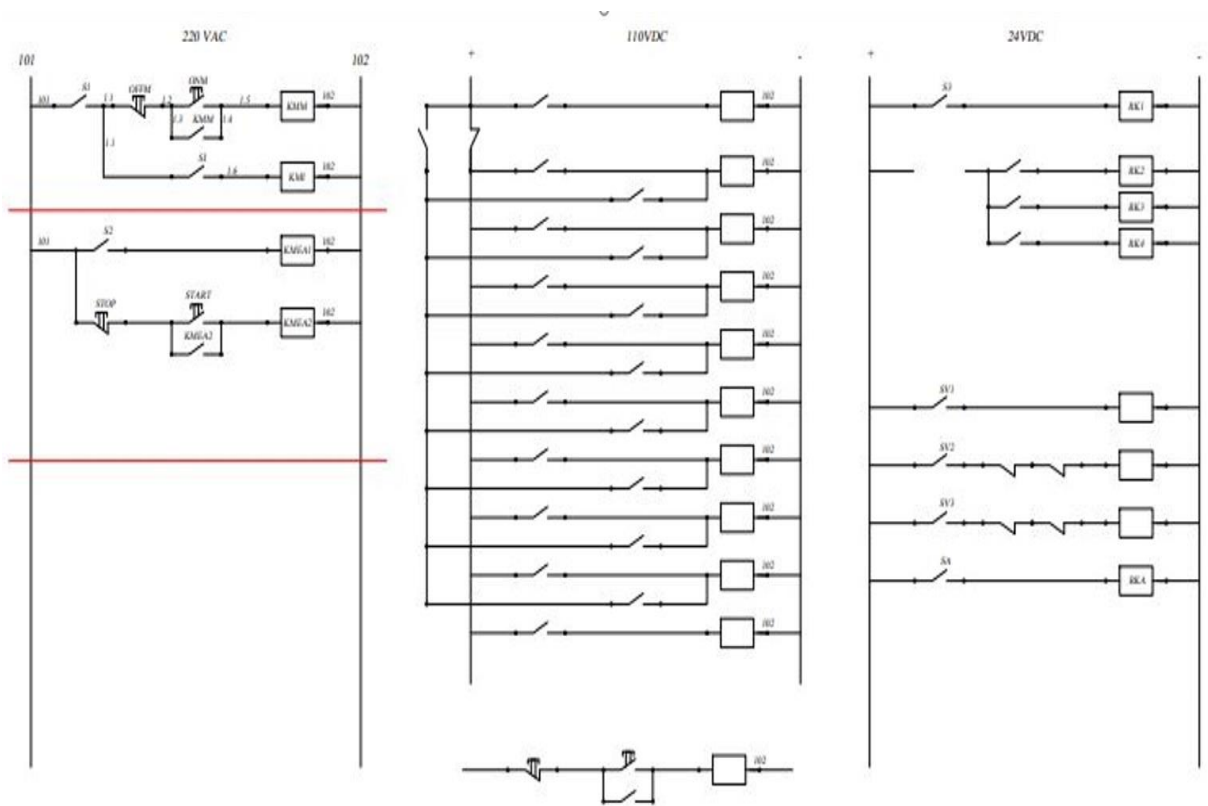


ნახ. 39. აქტიურ- ინდუქციური დატვირთვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრი.

ნაშრომში, ქვემოთ მოყვანილია ექპერიმენტული გამოკვლევის ფიზიკურ მოდელზე ბლოკების ავტომატური მართვის სისტემის რელე-კონტაქტორული საფეხუროვანი სქემა, რომლის საშუალებითაც მოხდა ნაშრომში ნაჩვენები მრუდების გენერირება.



ნახაზი 40. Zelio Logic SR2B121FU - საფეხუროვანი მართვის სქემა.



ნახაზი 41. Zelio Logic SR2B121FU - საფეხუროვანი მართვის სქემა.

აღნიშვნა	დასახელება
<i>STOP</i>	გაჩერების ღილაკი
<i>START</i>	გაშვების ღილაკი
<i>Z</i>	ლოგიკური რელე და მისი ბლოკონტაქტი
<i>T1</i>	ტაიმერი 1, დროის მონაკვეთი 0-7 სთ
<i>T2</i>	ტაიმერი 2, დროის მონაკვეთი 7-8 სთ
<i>T3</i>	ტაიმერი 3, დროის მონაკვეთი 8-9 სთ
<i>T4</i>	ტაიმერი 4, დროის მონაკვეთი 9-10 სთ
<i>T5</i>	ტაიმერი 5, დროის მონაკვეთი 10-11 სთ
<i>T6</i>	ტაიმერი 6, დროის მონაკვეთი 11-12 სთ
<i>T7</i>	ტაიმერი 7, დროის მონაკვეთი 12-13 სთ
<i>T8</i>	ტაიმერი 8, დროის მონაკვეთი 13-15 სთ
<i>T9</i>	ტაიმერი 9, დროის მონაკვეთი 15-16 სთ
<i>T10</i>	ტაიმერი 10, დროის მონაკვეთი 16-17 სთ
<i>T11</i>	ტაიმერი 11, დროის მონაკვეთი 17-18 სთ
<i>T12</i>	ტაიმერი 12, დროის მონაკვეთი 18-19 სთ
<i>T13</i>	ტაიმერი 13, დროის მონაკვეთი 19-20 სთ
<i>T14</i>	ტაიმერი 14, დროის მონაკვეთი 20-24 სთ
<i>KMZ1</i>	Zelio Logic-ის რელეური გამოსასვლელი Q1
<i>KMZ2</i>	Zelio Logic-ის რელეური გამოსასვლელი Q2
<i>KMZ3</i>	Zelio Logic-ის რელეური გამოსასვლელი Q3
<i>KMZ4</i>	Zelio Logic-ის რელეური გამოსასვლელი Q4

ცხრ. 3. მართვის სქემის ელემენტების ნომენკლატურა.

როგორც ცალკეული ბლოკების კვლევის შედეგებიდან სჩანს არსებული მოდელი ვერ უზრუნველყოფს ცალკეულ ფაზებში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური პროცესების იმიტირებას და წარმოქმნილი ემდ-ების სრულყოფილ დადგენას.

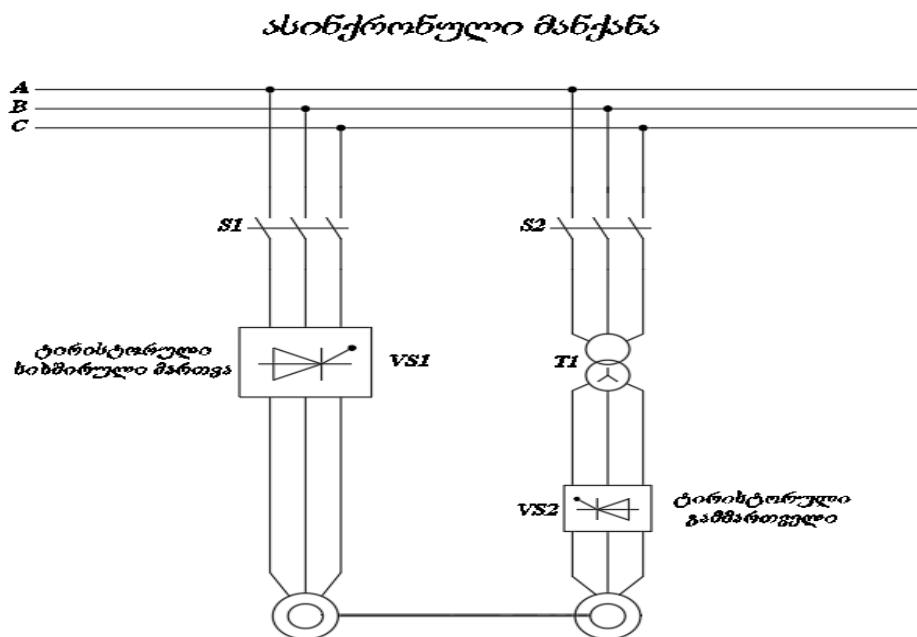
თავი 3. ელექტრომომარაგების სისტემის ელექტროდინამიკური პროცესების ექსპერიმენტული გამოკვლევის სრულყოფილი ფიზიკური მოდელის დამუშავება

3.1 დატვირთვის ფიზიკური მოდელის ბლოკების მართვის სისტემის დამუშავება

3.1.1 ასინქრონული ძრავას უჯრედის მართვის სისტემა

ასინქრონული დატვირთვის უჯრედის მართვის პრინციპი დაფუძნებულია პრაქტიკაში ყველაზე უფრო ფართოდ გამოყენებული ტიპური მექანიზმების ელექტრული ამძრავების სტატიკურ და დინამიკურ მუშაობის რეჟიმების შესაბამის დატვირთვის დიაგრამაზე.

ასინქრონული ძრავას უჯრედი მოიცავს სახაზო ავტომატურ ამომრთველს, „მოკლედშერთულ როტორიან ასინქრონულ ელექტროამძრავს სიხშირული მართვით“ (ნახ.40) და ძრავას დამტვირთავ ელექტროამძრავს. დამტვირთავი მანქანა აღჭურვილია, დინამიკური დამუხრუჭების რეჟიმში მომუშავე, მოკლედშერთულ როტორიანი ასინქრონული ელექტროამძრავით.



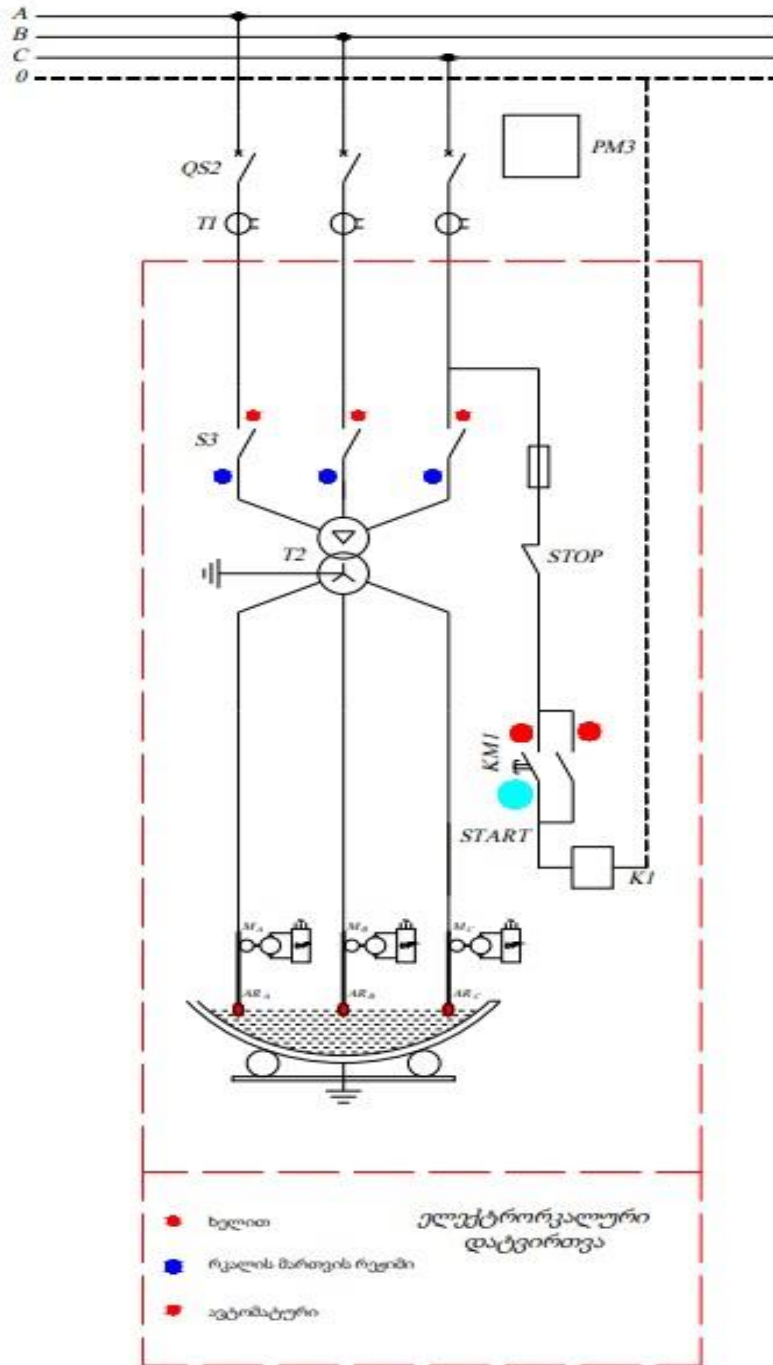
ნახ. 42. ასინქრონული ძრავას უჯრედის ძალური ნაწილის სქემა.

დამტვირთავი ძრავას დინამიკური სამუხრუჭო რეჟიმის მართვისათვის გათვალისწინებულია, სამფაზა ლარიონოვის სქემით შესრულებული, მდოვრე რეგულირების, მუდმივი დენის ტირისტორული გარდამსახი, განივ-იმპულსური მართვით. ტირისტორული გარდამსახის მართვა ხორციელდება, ელექტრომომარაგების ქსელის, გამოსაკვლევ გამანაწილებელ მოწყობილობასთან მიერთებული, ელექტროამძრავის მუშაობის რეჟიმის შესაბამისი დატვირთვის დიაგრამის მიხედვით ფორმირებული, მართვის მოკარნახე ანალოგიური სიგნალის საშუალებით. შესაბამისად, სამუხრუჭო (დამტვირთავი) ძრავას დატვირთვის დიაგრამა დაპროგრამებულია პროგრამირებად კონტროლერში, რომელიც აღჭურვილია ანალოგიური სიგნალის გამომავალი ბლოკით.

3.1.2 ელექტრორკალური დატვირთვის უჯრედი

ელექტრორკალური დატვირთვის უჯრედი მოიცავს სამფაზა ძალოვან ტრანსფორმატორს, რომლის მეორადი გრაგნილები შეერთებულია ნეიტრალდამიწებული ვარსკვლავური სქემით, ხოლო პირველადი გრაგნილები - ვარსკვლავური ან სამკუთხედური სქემით, იმის და მიხედვით, თუ როგორია რკალის (დნობის) დენის სიდიდე (ნახ.43). ასევე, ელექტრორკალური ღუმელის (ერდ) ყოველი ელექტროდი აღჭურვილია დამოუკიდებელი ელექტროდის გადაადგილების მექანიზმით.

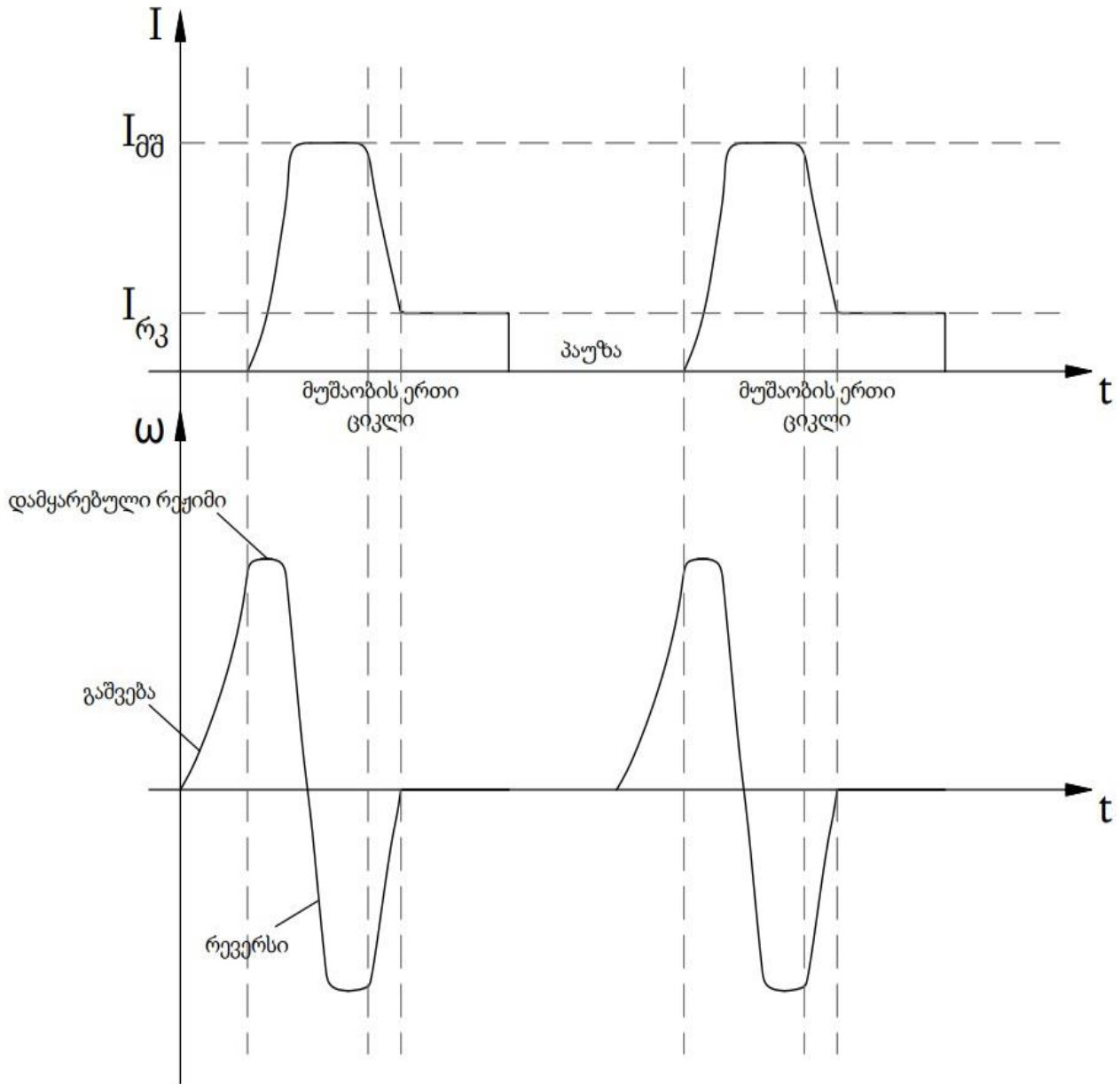
სამივე ფაზის ელექტროდის გადაადგილების მექანიზმი მოძრაობაში მოდის ტირისტორული გარდამსახ-ძრავას სისტემაზე დაფუძნებული, დამოუკიდებელი, რევერსიული ელექტრული ამძრავით. ამასთან, ელექტროდის მართვის მექანიზმებს გააჩნიათ დამოუკიდებელი მართვის სისტემები, რომელიც რეალიზებულია პროგრამირებადი კონტროლერის საშუალებით.



ნახ. 43. ელექტროკალური უჯრედის ძალური ნაწილის სქემა.

პროგრამირებად კონტროლერში დაპროგრამებულია ერდ-ის ტიპური მუშაობის ციკლის (მოკლედშერთვა - რკალის ანთება - რკალის მდგრადი ნთება რკალის ჩაქრობა - პაუზა) მიხედვით (ნახ.44) შედგენილი დატვირთვის დიაგრამის

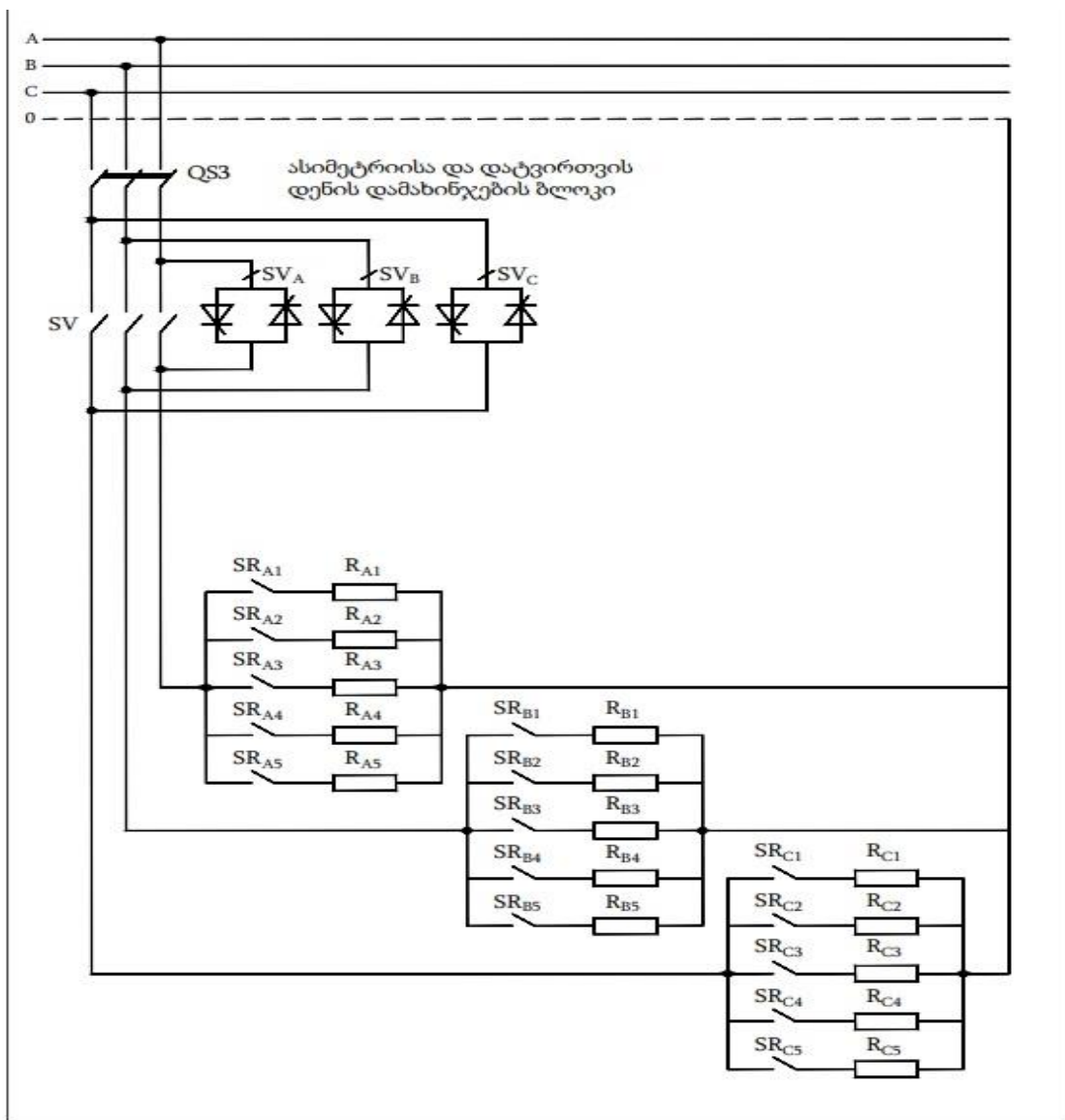
მიხედვით შედგენილი ელექტროამპრავის მართვის მოკარნახე სიგნალის საშუალებით (ნახ. 44).



ნახ. 44. ა) ერლ-ის ტიპური დატვირთვის დიაგრამა; ბ) ელექტროამპრავის მართვის მოკარნახე სიგნალის დიაგრამა.

3.1.3 აქტიური, ინდუქციური და ტევადური დატვირთვის უჯრედები

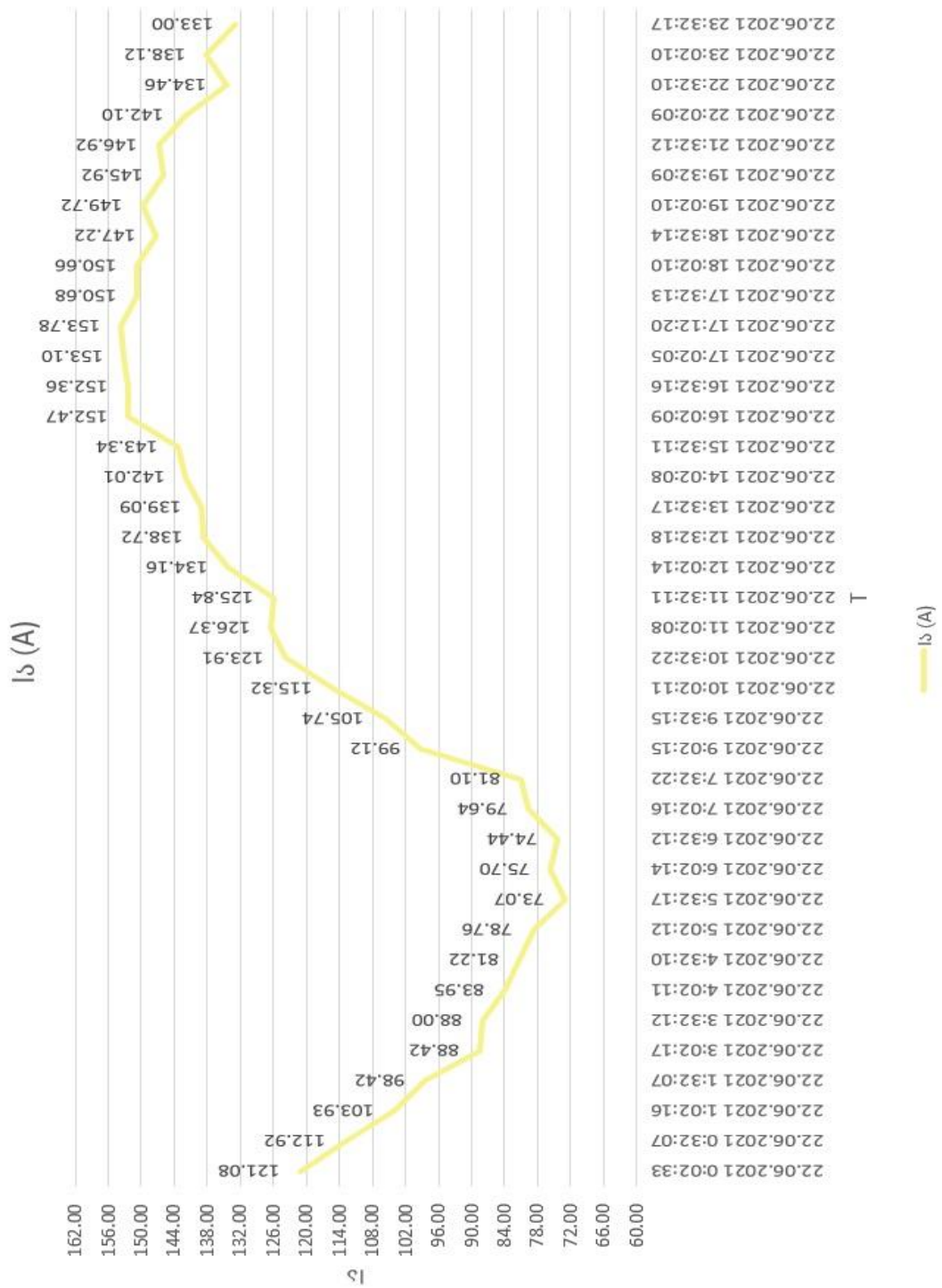
დატვირთვის ფიზიკური მოდელის აქტიური დატვირთვის უჯრედი მოიცავს სახაზო ავტომატურ ამომრთველს, ასიმეტრიისა და დატვირთვის დენის მრუდის ფორმის დამახინჯების ბლოკს და ქსელის ცალკეულ ფაზასთან (A, B, და C) მიერთებულ, სამ აქტიური წინააღმდეგობის ბლოკს (ნახ.45). აქტიური წინააღმდეგობის თითოეული კომპლექტი შედგება ხუთი, ურთიერთ განსხვავებული პარამეტრების საფეხურისაგან.



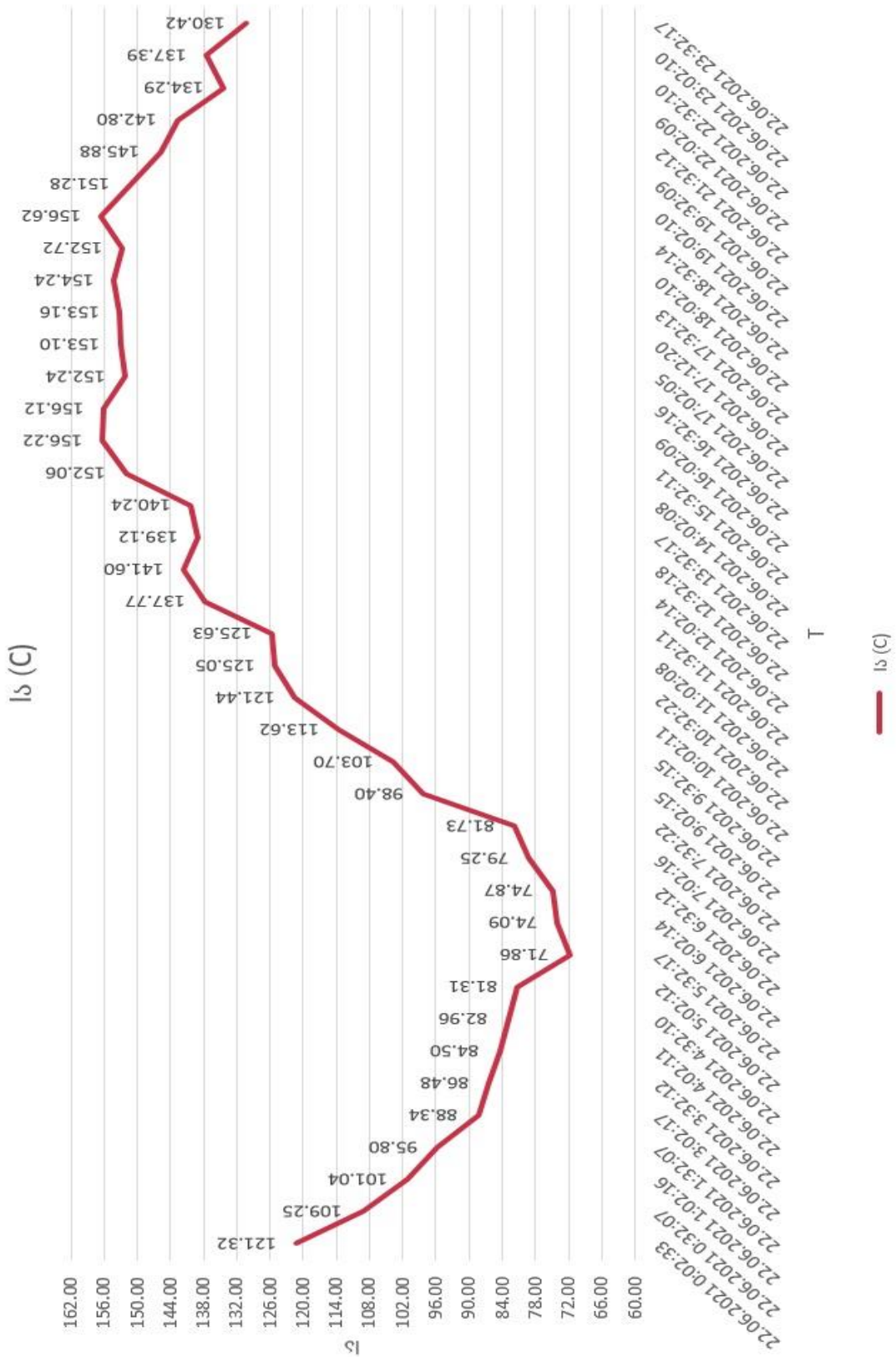
ნახ. 45. აქტიური დატვირთვის უჯრედის ძალური ნაწილის სქემა.

საფეხურების პარამეტრები შერჩეულია 5%-იანი რეგულირებისათვის ელემენტების რაოდენობისა და ჯამური სიმძლავრის მინიმალურობის პრინციპით. კერძოდ, 100%-იანი დატვირთვისას მაქსიმალურად რომ იყოს გამოყენებული ყველა ელემენტი. შესაბამისად, პირველი საფეხურის ჩართვა-გამორთვა უზრუნველყოფს უჯრედის დატვირთვის 5, მეორე 10, მესამე 20, მეოთხე 30, ხოლო მეხუთე 40 პროცენტთან რეგულირებას.

აქტიური დატვირთვის უჯრედების ცალკეული ფაზისათვის დამუშავებულია მართვის სისტემა პროგრამირებადი კონტროლერის ბაზაზე შესრულებულ. იგი დაპროგრამებულია საფეხუროვანი (რელე კონტაქტორული), პრინციპით. მართვა დაფუძნებულია გამანაწილებელი მოწყობილობის ცალკეული ფაზის აქტიური დატვირთვის დღე-ღამური გრაფიკის მიხედვით. დღე-ღამურ დატვირთვის გრაფიკად აღებულია ქ.თბილისის ელექტრომომარაგების ქსელის 6-10 კვ-ისა და სასისტემო ქვესადგურების გამანაწილებელი მოწყობილობების, მუშაობის რეჟიმების შესწავლის მიხედვით შედგენილი, ჯამური და ცალკეული ფაზების, აქტიური დატვირთვის დღე-ღამური გრაფიკები (ნახ.46,;ნახ.47; ნახ.48).



ნახ. 46. ქს „ჩუღურეთი“ 6 კვ-ის ფ№7 A ფაზის დენი 24 საათიანი გრაფიკი.



ნახ. 48. ქს „ჩუღურეთი“ 6 კვ-ის ფ№7 C ფაზის დენი 24 საათიანი გრაფიკი.

ქ. თბილისის ელექტრომომარაგების სისტემის ქვესადგურის 10 კვ ძაბვის გამანაწილებელი მოწყობილობის A ფაზის აქტიური და რეაქტიული დატვირთვის დღე-ღამური გრაფიკების ცხრილი

ცხრ. 4. გამანაწილებელი მოწყობილობის A ფაზის აქტიური და რეაქტიული დატვირთვის დღე-ღამური გრაფიკების ცხრილი.

#	აქტიური დატვირთვა			რეაქტიული დატვირთვა		
	ხანგრძლივობა	აქტიური სიმძლავრე, P		ხანგრძლივობა	რეაქტიული სიმძლავრე, Q	
	სთ	%	კვტ	სთ	%	კვარ
1	0-1	85%	1350	0-1	86%	394
2	1-2	83%	1300	1-2	83%	379
3	2-3	89%	1396	2-3	89%	407
4	3-4	84%	1320	3-4	84%	385
5	4-5	80%	1260	4-5	80%	368
6	5-6	87%	1370	5-6	87%	400
7	6-7	76%	1200	6-7	76%	350
8	7-8	87%	1360	7-8	87%	397
9	8-9	80%	1250	8-9	80%	365
10	9-10	88%	1380	9-10	88%	403
11	10-11	83%	1310	10-11	83%	382
12	11-12	76%	1200	11-12	76%	350
13	12-13	78%	1230	12-13	78%	359
14	13-14	79%	1235	13-14	79%	360
15	14-15	79%	1235	14-15	79%	360
16	15-16	79%	1240	15-16	79%	362
17	16-17	79%	1240	16-17	79%	362
18	17-18	80%	1250	17-18	80%	365
19	18-19	81%	1270	18-19	81%	370
20	19-20	85%	1340	19-20	85%	391
21	20-21	89%	1390	20-21	88%	405
22	21-22	86%	1350	21-22	86%	394
23	22-23	80%	1260	22-23	80%	368
24	23-24	85%	1340	23-24	85%	391

ქ. თბილისის ელექტრომომარაგების სისტემის ქვესადგურის 10 კვ ძაბვის
 გამანაწილებელი მოწყობილობის B ფაზის აქტიური და რეაქტიული დატვირთვის
 დღე-ღამური გრაფიკების ცხრილი

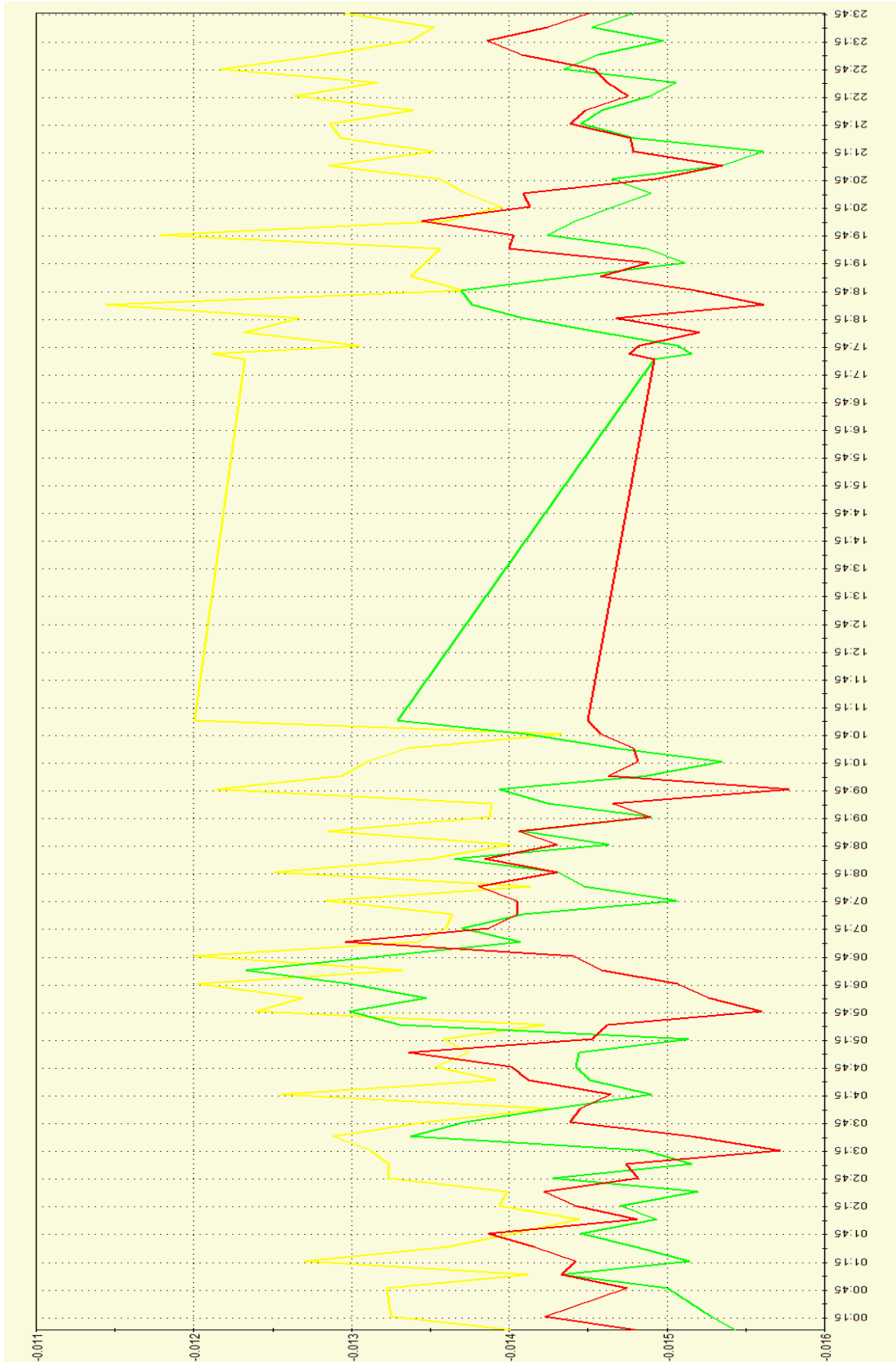
ცხრილი 5. გამანაწილებელი მოწყობილობის B ფაზის აქტიური და რეაქტიული
 დატვირთვის დღე-ღამური გრაფიკების ცხრილი

#	აქტიური დატვირთვა			რეაქტიული დატვირთვა		
	ხანგრძლივობა	აქტიური სიმძლავრე, P		ხანგრძლივობა	რეაქტიული სიმძლავრე, Q	
	სთ	%	კვტ	სთ	%	კვარ
1	0-1	97%	1530	0-1	100	97%
2	1-2	96%	1510	1-2	95	96%
3	2-3	94%	1470	2-3	95	94%
4	3-4	85%	1340	3-4	85	85%
5	4-5	94%	1480	4-5	95	94%
6	5-6	96%	1510	5-6	95	96%
7	6-7	83%	1305	6-7	85	83%
8	7-8	87%	1370	7-8	85	87%
9	8-9	92%	1440	8-9	90	92%
10	9-10	94%	1480	9-10	95	94%
11	10-11	97%	1530	10-11	100	97%
12	11-12	85%	1340	11-12	85	85%
13	12-13	87%	1360	12-13	85	87%
14	13-14	89%	1390	13-14	90	88%
15	14-15	90%	1410	14-15	90	90%
16	15-16	92%	1440	15-16	90	92%
17	16-17	93%	1460	16-17	95	93%
18	17-18	94%	1480	17-18	95	94%
19	18-19	90%	1420	18-19	90	90%
20	19-20	96%	1510	19-20	95	96%
21	20-21	93%	1460	20-21	95	93%
22	21-22	99%	1560	21-22	100	99%
23	22-23	94%	1480	22-23	95	94%
24	23-24	96%	1500	23-24	95	96%

ქ. თბილისის ელექტრომომარაგების სისტემის ქვესადგურის 10 კვ ძაბვის
 გამანაწილებელი მოწყობილობის C ფაზის აქტიური და რეაქტიული დატვირთვის
 დღე-ღამური გრაფიკების ცხრილი

ცხრილი. 6 გამანაწილებელი მოწყობილობის C ფაზის აქტიური და რეაქტიული
 დატვირთვის დღე-ღამური გრაფიკების ცხრილი

#	აქტიური დატვირთვა			რეაქტიული დატვირთვა		
	ხანგრძლივობა	აქტიური სიმძლავრე, P		ხანგრძლივობა	რეაქტიული სიმძლავრე, Q	
	სთ	%	კვტ	სთ	%	კვარ
	0-1	90%	1420	0-1	90%	414
2	1-2	92%	1440	1-2	92%	420
3	2-3	91%	1430	2-3	91%	417
4	3-4	100%	1570	3-4	100%	458
5	4-5	93%	1460	4-5	93%	426
6	5-6	86%	1350	5-6	86%	394
7	6-7	97%	1520	6-7	97%	443
8	7-8	84%	1320	7-8	84%	385
9	8-9	91%	1430	8-9	91%	417
10	9-10	94%	1480	9-10	94%	432
11	10-11	94%	1470	10-11	94%	429
12	11-12	92%	1450	11-12	92%	423
13	12-13	93%	1460	12-13	93%	426
14	13-14	93%	1465	13-14	93%	427
15	14-15	94%	1475	14-15	94%	430
16	15-16	94%	1480	15-16	94%	432
17	16-17	95%	1490	16-17	95%	435
18	17-18	95%	1490	17-18	95%	435
19	18-19	93%	1460	18-19	93%	426
20	19-20	94%	1480	19-20	94%	432
21	20-21	87%	1360	20-21	87%	397
22	21-22	89%	1400	21-22	89%	408
23	22-23	93%	1460	22-23	93%	426
24	23-24	89%	1390	23-24	88%	405



ნახაზი 49. გამანაწილებელი მოწყობილობის ცალკეული ფაზების აქტიური დატვირთვის დღე-ღამური გრაფიკები.



ნახაზი 50. გამანაწილებელი მოწყობილობის ჯამური აქტიური დატვირთვის დღე-ღამური გრაფიკი.

დატვირთვის გრაფიკების საფუძველზე შედგენილია დატვირთვის ფიზიკური მოდელის აქტიური, ინდუქციური და ტევადური დატვირთვის ბლოკების მართვის სისტემის ალგორითმი.

დატვირთვის ფიზიკური მოდელის ბლოკების მართვის სისტემის ალგორითმი

ცხრ. 7. დატვირთვის ფიზიკური მოდელის ბლოკების მართვის სისტემის ალგორითმი

საფეხურის კონტაქტორის ნომერი	დატვირთვა, %	კონტაქტის მდგომარეობა				
		K _I (5%)	K _{II} (10%)	K _{III} (20%)	K _{IV} (30%)	K _V (40%)
1	5	+	-	-	-	-
2	10	-	+	-	-	-
3	15	+	+	-	-	-
4	20		-	+	-	-
5	25	+	-	+	-	-
6	30	-	-	-	+	-
7	35	+	-	-	+	-
8	40	-	-	-	-	+
9	45	+	-	-	-	+
10	50	-	+	-	-	+
11	55	+	+	-	-	+
12	60	-	-	+	-	+
13	65	+	-	+	-	+
14	70	-	-	-	+	+
15	75	+	-	-	+	+
16	80	-	-	+	+	+
17	85	+	-	+	+	+
18	90	-	-	+	+	+
19	95	+	-	+	+	+
20	100	-	+	+	+	+

დატვირთვის დღე-ღამური გრაფიკისა და მართვის სისტემის ალგორითმის საფუძველზე შედგენილია მართვის სისტემის პროგრამა (ცხრ.7).

მართვის სისტემის პროგრამა

ცხრ. 8. მართვის სისტემის პროგრამა

დროის რელეს #	დროის რელეს, დანაყენები, წთ	საფეხურის დატვირთვა, %	საფეხურის რელეს #	ჩართული რელეები (კონტაქტები)
t ₁	t ₁	20	K _I	k ₁
t ₂	t ₁ + t ₂	35	K _{II}	k ₁ + k ₅
t ₃	t ₁ + t ₂ + t ₃	50	K _{III}	k ₂ + k ₅
.
.
.
t _n	$t_n = \sum_{i=1}^n t_i$		K _n	K ₂ + K ₃ + K ₄ + k ₅

ყოველი საფეხურის რელეს დროის დაყოვნება განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით[1]:

$$t_i = \sum_{i=1}^n t_i$$

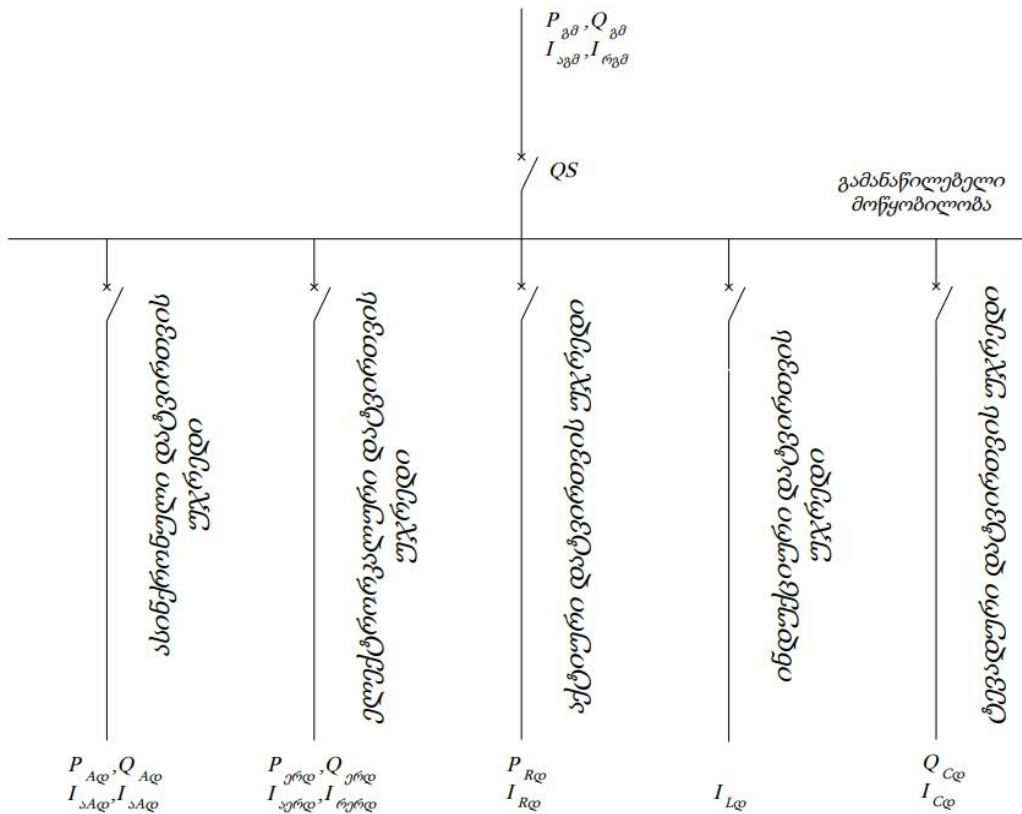
სადაც *i* – საფეხურის რიგია;

საფეხურის რელეს სქემატურად ამ საფეხურის დროს ჩართული რელეების მიხედვით განისაზღვრება. მაგალითად, მე-11 საფეხურისათვის (K_{XI}) ჩართული უნდა იყოს K₁, K₂ და K₅ რელეს. ინდუქციური და ტევადური დატვირთვის უჯრედების მართვის სისტემები შედგენილია ანალოგიურად და მართვის სისტემები მოცემულია ქვემოთ .

გამანაწილებელი მოწყობილობის ჯამური აქტიური და რეაქტიული დატვირთვებია:

$$[2] P_{გმ} = P_{Aდ} + P_{ერდ} + P_R$$

$$[3] Q_{გმ} = Q_{Aდ} + Q_{ერდ} + Q_{რდ} + R_{ცდ}$$



ნახ. 51. გამანაწილებელი მოწყობილობა

ყველა ეს დატვირთვა დროის ფუნქციაში იცვლება და გმ-ზე მიერთებული ეტდ-ის მოქმედების პრინციპისა და მუშაობის რეჟიმითაა განპირობებული.

$$P_{Aდ} = f_{Aდ}(t),$$

$$P_{ეტდ} = f_{ერდ}(t),$$

$$P_R = f_R(t)$$

$$Q_{Aდ} = f_{Aდ}(t),$$

$$Q_{ერდ} = f_{ერდ}(t),$$

$$Q_{რდ} = f_{რდ}(t),$$

$$Q_C = f_C(t)$$

საბოლოოდ გმ-ის დატვირთვები განისაზღვრება:

$$P_{გმ} = f_{Aდ}(t) + f_{ეტდ}(t) + f_R(t);$$

[4]

$$P_{\text{გმ}} = f_{A\text{დ}}(t) + f_{\text{ეზღ}}(t) + f_{\text{რღ}}(t) + f_c(t) . \quad [5]$$

მნიშვნელობანია, რომ ელევროტექნოლოგიური დანადგარების მოქმედების პრინციპებისა და მუშაობის რეჟიმების შედეგად გამანაწილებელი მოწყობილობის უჯრედების დატვირთვის დენების მრუდის ფორმის დამახინჯება.

$$I_{\text{გმ}} = I_{A\text{დ}} + I_{\text{ერღ}} + I_{R\text{ღ}} ; \quad [6]$$

$$I_{\text{რგმ}} = I_{\text{რAდ}} + I_{\text{რერღ}} + I_{\text{რღ}} + I_{\text{ცღ}} , \quad [7]$$

სადაც $I_{A\text{დ}}$, $I_{\text{ერღ}}$, $I_{R\text{ღ}}$ - შესაბამისად ასინქრონული დატვირთვის, ელექტრორკალური დატვირთვისა და აქტიური დატვირთვის უჯრედების დატვირთვის აქტიური დენებია;

$I_{\text{რAდ}}$, $I_{\text{რერღ}}$, $I_{\text{რღ}}$, $I_{\text{ცღ}}$ - შესაბამისად ასინქრონული დატვირთვის, ელექტრორკალური დატვირთვის, ინდუქციური დატვირთვისა და ტევადური დატვირთვის უჯრედების რეაქტიული დენებია;

მნიშვნელოვანია, რომ აღნიშნული დატვირთვის დენების მრუდის ფორმა არა სინუსოიდური - დამახინჯებულია. ისინი სხვადასხვა სიხშირის ჰარმონიკების ჯამს წარმოადგენს.

ფურიეს მწკრივები ტრიგონომეტრიულ ფორმაში შემდეგი სახით ჩაიწერება [8]

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + (a_1 \cos nx + b_1 \sin x) + (a_2 \cos nx + b_2 \sin x) + \dots + (a_n \cos nx + b_n \sin x) = \\ = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin x),$$

სადაც

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx ;$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx ;$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(nx) dx ;$$

3.2. ელექტრომომარაგების სისტემაში მიმდინარე ელექტროდინამიკური პროცესების ექსპერიმენტული გამოკვლევის სრულყოფილი მოდელის მართვის სისტემის დამუშავება

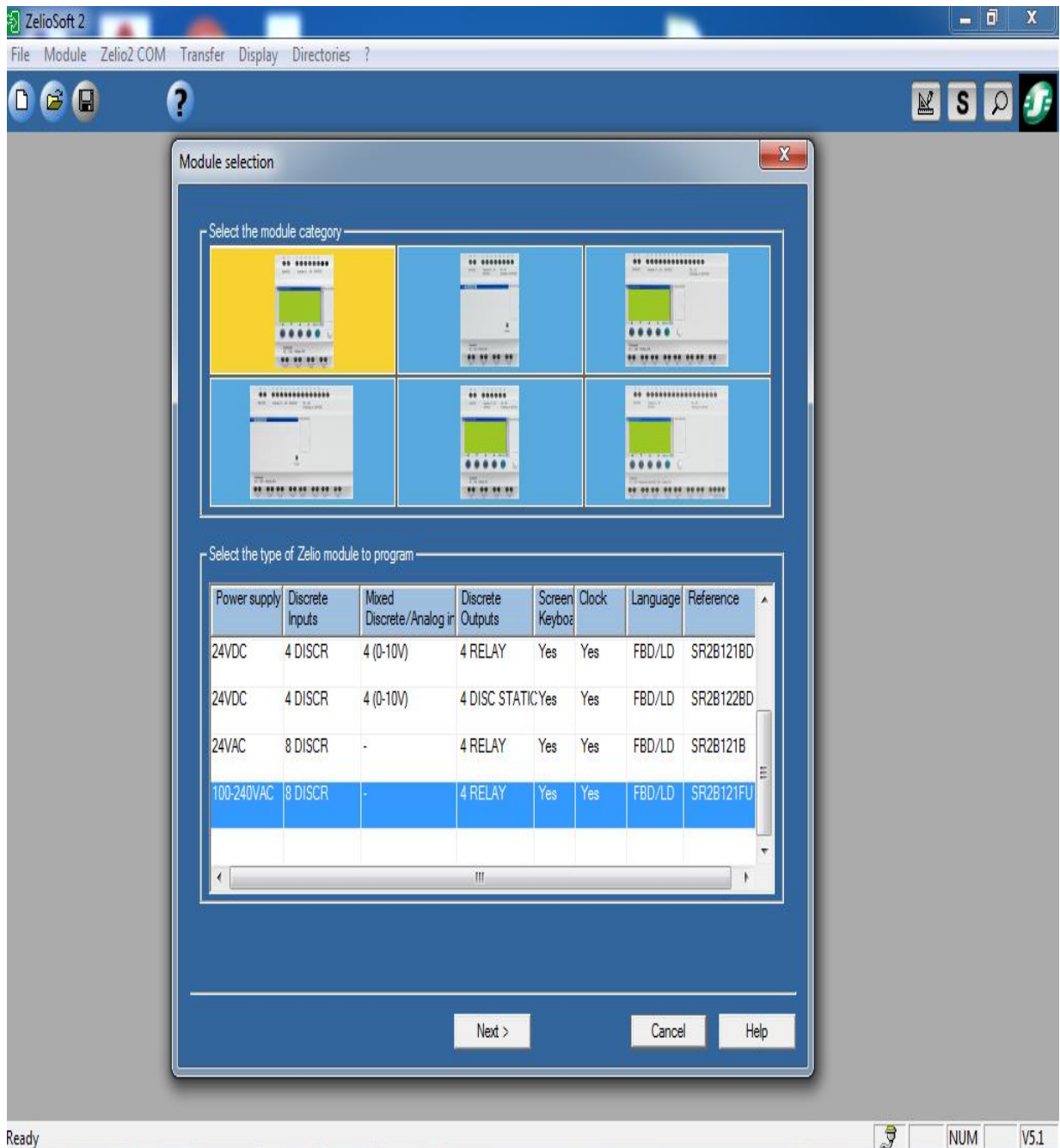
3.2.1 Zelio Logic SR2A201FU - პროგრამირებადი ლოგიკური კონტროლერი

პროგრამირებადი ლოგიკური კონტროლერი და შესაბამისი პროგრამული უზრუნველყოფა განხორციელებულია Zelio soft -ის საშუალებით, რომელიც წარმოადგენს კომპანია Schneider Electric-ის პროდუქტს. მისი საშუალებით ინტელექტუალური პროგრამირებადი რელეების სერიის Zelio logic-ის კონფიგურირება და დაპროგრამება შესაძლებელია. ამ ტიპის რელეები გამოიყენება მარტივი და საშუალო სირთულის სისტემების მართვისა და ავტომატიზირებისათვის. ის გამოიყენება ავტომატური განმეორებითი ჩართვის, განათების, მცირე და საშუალო საწარმოსა და სხვა მრავალი მსგავსი სისტემების მართვის, ავტომატიზაციისა და მონიტორინგისათვის. პროგრამული უზრუნველყოფა, წარმოდგენილი პროგრამირებადი კონტროლერის შემთხვევაში, საშუალებას გვაძლევს შევადგინოთ რელე-კონტაქტორული სქემა 240 სტრიქონამდე, გამოვიყენოთ 28 დროის რელე ერთმანეთისგან განსხვავებული დრო-დენური მახასიათებლით. ასევე შეგვიძლია 28 მთვლელისა და 56-მდე დამხმარე რელეების ინტეგრირება (Product data sheet, 2023).

Zelio soft-ის საშუალებით ჩვენ შეგვიძლია პირდაპირ ეთერში დავაკვირდეთ რელეში ჩატვირთული სქემის მუშაობას არა მხოლოდ რელეზე მიერთების შემთხვევაში, არამედ დისტანციურად ოპტიკური და GSM კავშირის არხების გამოყენების გზით, ამასთან, მუშაობისას ხარვეზის აღმოჩენის შემთხვევაში შეგვიძლია დისტანციურად შევწყვიტოთ მიმდინარე პროცესი და შევიტანოთ სასურველი ცვლილებები.

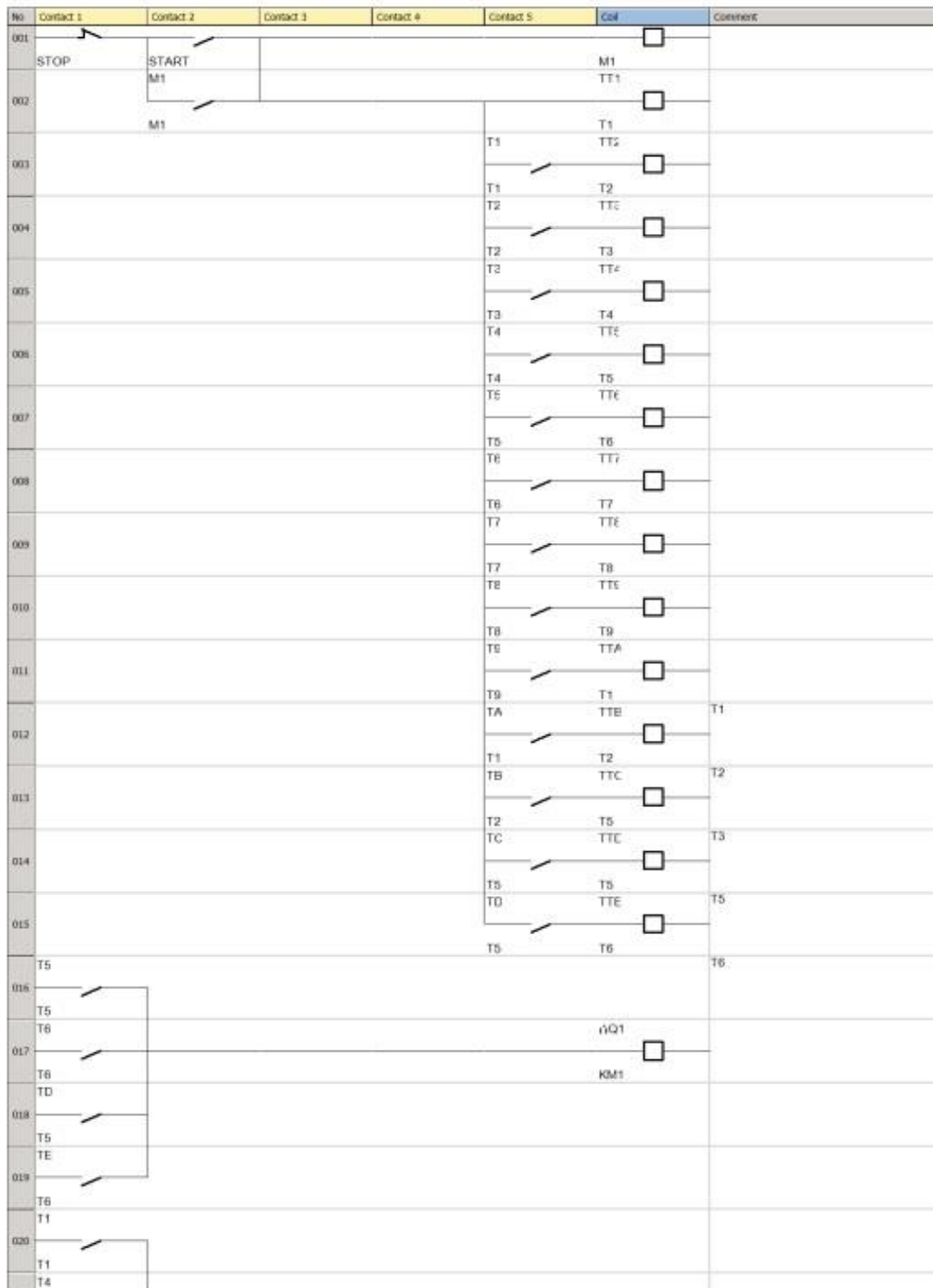
ქვემოთ ნახაზზე მოყვანილია არსებული დატვირთვების ფიზიკური მოდელის სამართავად გამოყენებული ინტელექტუალური პროგრამირებადი კონტროლერი Zelio Logic SR2A201FU და მასში ჩატვირთული ალგორითმი. თითოეულ ამ ტიპის რელეს აქვს 8 რელეური გამოსასვლელი, რომელთა ჩართვა-გამორთვის საშუალებითაც ხდება ჩვენთვის სასურველი საწარმოს დატვირთვის გრაფიკთან მიახლოებული, იმიტირებული სამუშაო რეჟიმის შექმნა. მოყვანილია

რელე-კონტაქტორული სქემის ჩვენს მიერ დამუშავებული 24 საათიანი მართვის ერთერთი მაგალითი. ნაშრომში მოყვანილია ექსპერიმენტის ჩატარების შედეგად მიღებული რეალური დიაგრამები, რომელიც კონტროლერში ჩართვირთული პროგრამის შესაბამისად დატვირთვის იმიტირების ფიზიკურ მოდელზე შესრლებულ მანიპულაციებს ასახავს.

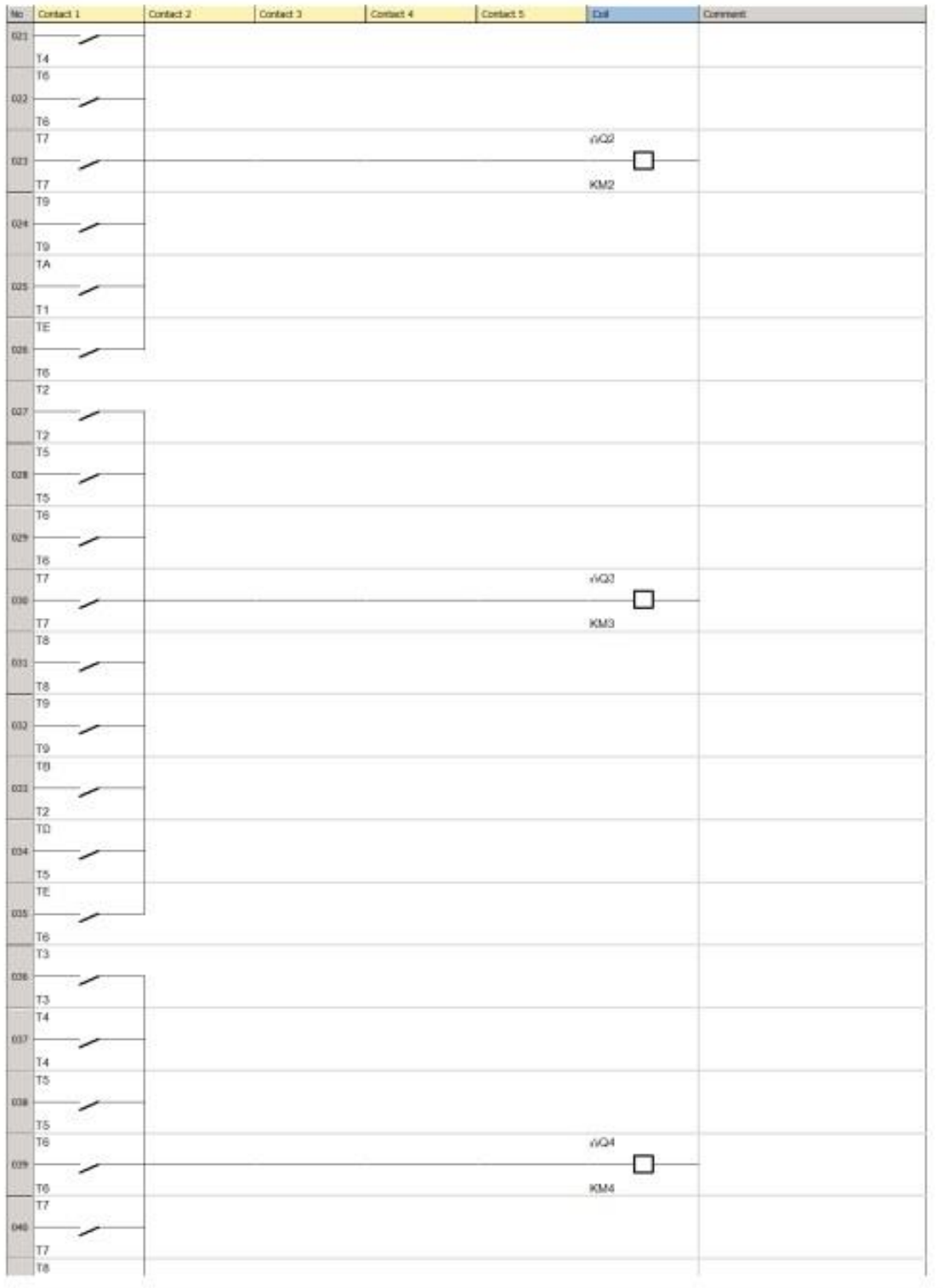


ნახ. 52. Zelio soft - პროგრამის ინტერფეისი

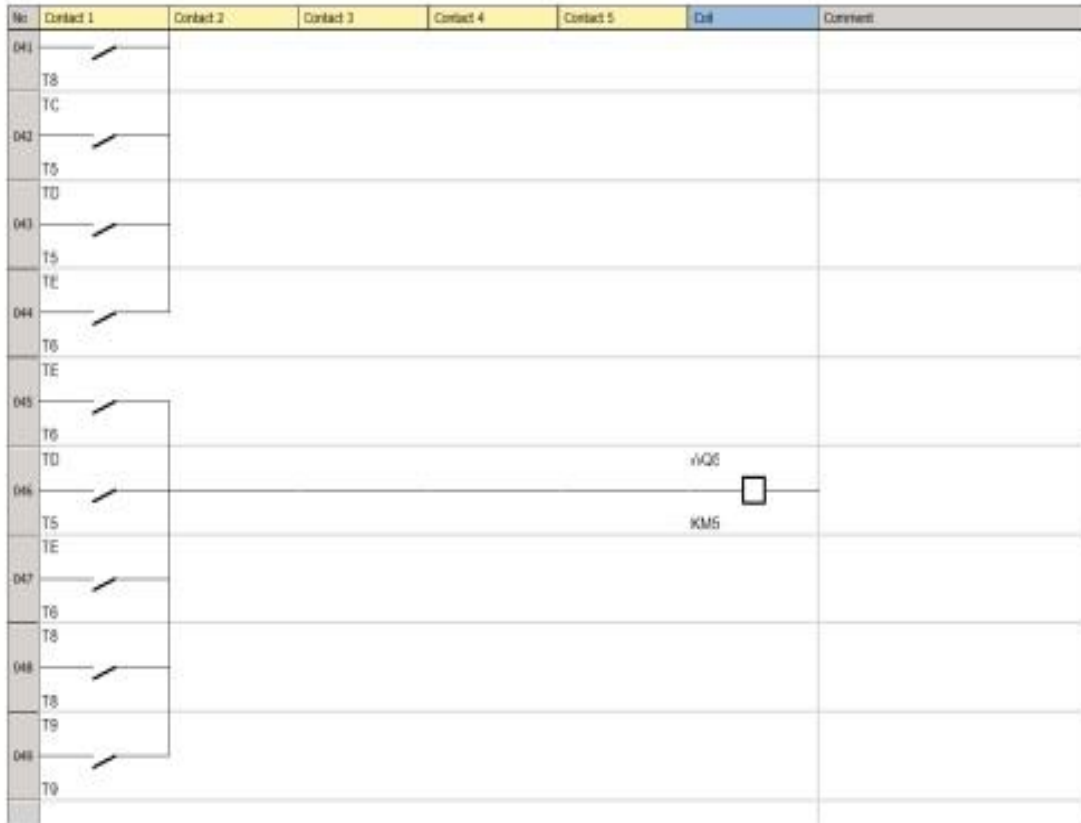
Program diagram



ნახ. 53. Zelio Logic SR2A201FU - Zelio soft -საფეხუროვანი მართვის სქემა I.



ნახ. 54. Zelio Logic SR2A201FU - Zelio soft -საფეხუროვანი მართვის სქემა II



ნახ. 55. Zelio Logic SR2A201FU - Zelio soft -საფეხუროვანი მართვის სქემა III

ცხრ. 9. Zelio soft - მართვის სქემის ელემენტების ნომენკლატურა I

Physical inputs

No	Symbol	Function	Lock	Parameters	Location of (L/C)	Comment
I1		Discrete inputs	---	No parameters	(1/2)	START
I2		Discrete inputs	---	No parameters	(1/1)	STOP

Physical outputs

No	Symbol	Function	Latching	Location of (L/C)	Comment
Q1		Discrete outputs	No	(17/6)	KM1
Q2		Discrete outputs	No	(23/6)	KM2
Q3		Discrete outputs	No	(30/6)	KM3
Q4		Discrete outputs	No	(39/6)	KM4
Q5		Discrete outputs	No	(46/6)	KM5

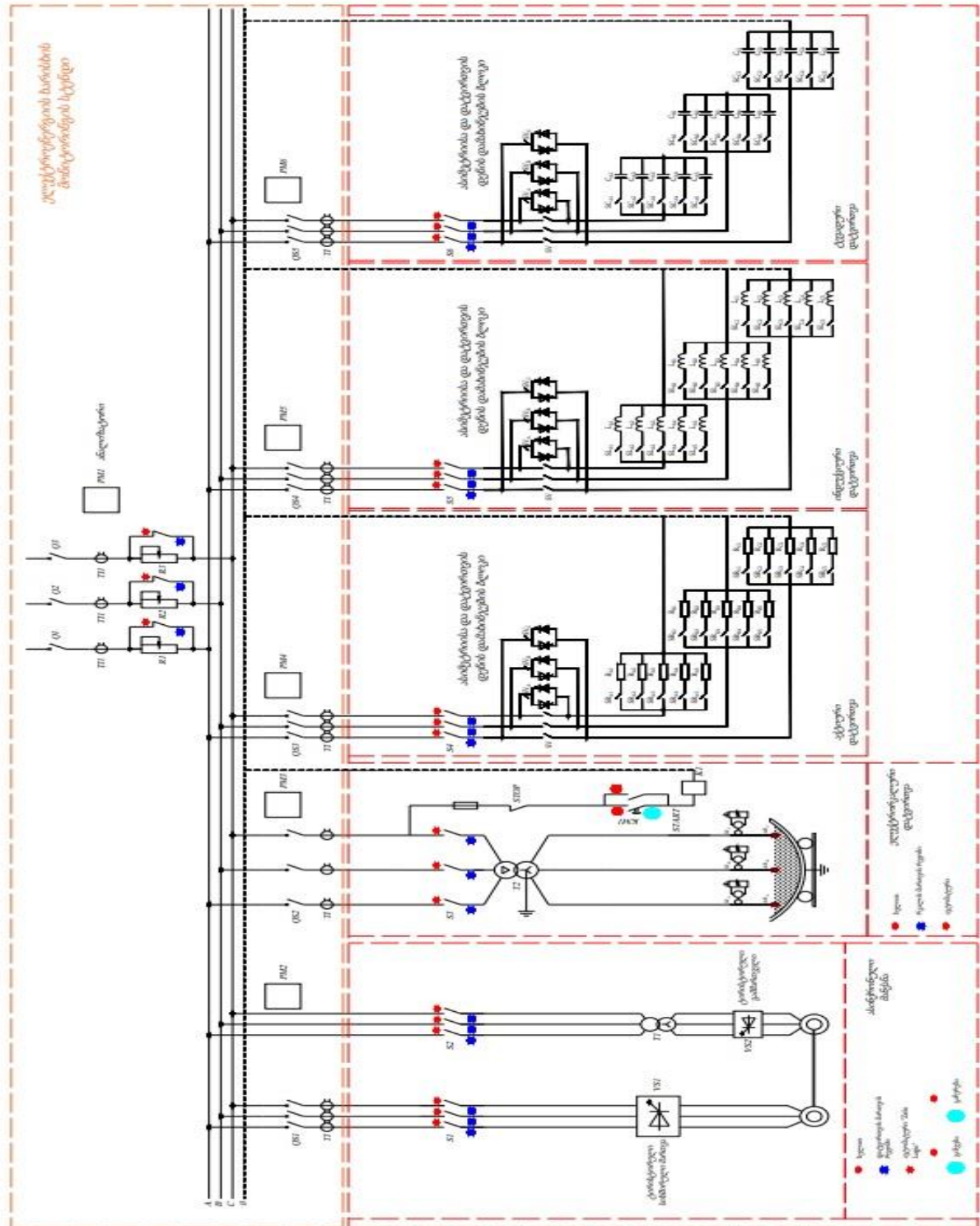
Configurable functions

No	Symbol	Function	Lock	Latching	Parameters	Location of (L/C)	Comment
M1		Auxiliary relays	---	No	No parameters	(1/6) (2/2)	M1
T1		Timers	No	Yes	See details below	(2/6) (3/5) (20/1)	T1
T2		Timers	No	Yes	See details below	(3/6) (4/5) (27/1)	T2
T3		Timers	No	Yes	See details below	(4/6) (5/5) (36/1)	T3
T4		Timers	No	Yes	See details below	(5/6) (6/5) (21/1) (37/1)	T4
T5		Timers	No	Yes	See details below	(6/6) (7/5) (16/1) (28/1) (38/1)	T5
T6		Timers	No	Yes	See details below	(7/6) (8/5) (17/1) (22/1) (29/1) (39/1)	T6
T7		Timers	No	Yes	See details below	(8/6) (9/5) (23/1) (30/1) (40/1)	T7

No	Symbol	Function	Lock	Latching	Parameters	Location of (L/C)	Comment
T8		Timers	No	Yes	See details below	(9/6) (10/5) (31/1) (41/1) (48/1)	T8
T9		Timers	No	Yes	See details below	(10/6) (11/5) (24/1) (32/1) (49/1)	T9
TA		Timers	No	Yes	See details below	(11/6) (12/5) (25/1)	T1
TB		Timers	No	Yes	See details below	(12/6) (13/5) (33/1)	T2
TC		Timers	No	Yes	See details below	(13/6) (14/5) (42/1)	T5
TD		Timers	No	Yes	See details below	(14/6) (15/5) (18/1) (34/1) (43/1) (46/1)	T5
TE		Timers	No	Yes	See details below	(15/6) (19/1) (26/1) (35/1) (44/1) (45/1) (47/1)	T6

ცხრ. 10. Zelio soft - მართვის სქემის ელემენტების ნომენკლატურა II

3.2.2 ელექტრომომარაგების სისტემაში მიმდინარე ელექტროდინამიკური პროცესების ექსპერიმენტალური გამოკვლევის სრულყოფილი მოდელის სქემა



ნახაზი 56. ელექტროდინამიკური პროცესების ექსპერიმენტალური გამოკვლევის სრულყოფილი მოდელის სქემა

დასკვნები

ნაშრომში ჩატარებული სამუშაოების, საფუძველზე შეიძლება გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნები:

1. ქ. თბილისის ელექტრომომარაგების სისტემის ოთხი დამწვევი ქვესადგურის 6-10 კვ ძაბვის გამანაწილებელი მოწყობილობების უჯრედების (ჯამური და გამავალი ხაზების) დატვირთვის დენების გამოკვლევის საფუძველზე დასაბუთებულია, რომ ქსელის ელემენტებში წარმოქმნილი ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებებიდან ძირითადად დომინირებს ცალკეული ფაზების აქტიური და რეაქტიული დატვირთვების დენების სტატიკური და დინამიკური არასიმეტრიულობა, ცალკეულ ფაზებში გამავალი დატვირთვის დენების მრუდის ფორმის დამახინჯებით განპირობებული, დიდ დიაპაზონში ცვალებადი პარამეტრების მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრი და მნიშვნელოვნად დაბალი რეაქტიული სიმძლავრის კოეფიციენტი;

2. დადგენილია, რომ ელექტრომომარაგების ქსელის ელემენტებში მიმდინარე ემპ-ბის წარმოქმნის ძირითად მიზეზს შემდეგი სამი აღმაშფოთებელი ფაქტორი განაპირობებს ქვესადგურის 6-10 კვ ძაბვის გამანაწილებელ მოწყობილობებთან დიდი აქტიური და რეაქტიული დატვირთვების მყისიერი ჩართვა და გამორთვა და ელექტროტექნოლოგიური დანადგარებისა და ელექტრომომარაგების ქსელების ელემენტებში წარმოქმნილი მოკლედშერთვები;

3. დატვირთვის ფიზიკური მოდელების შესწავლის საფუძველზე დადგენილია, რომ დატვირთვის არსებული მოდელები მიუღებელია, რადგან, ისინი ვერ უზრუნველყოფენ ცალკეულ ფაზებში მიმდინარე ემპ-ებსა და მათ მიერ ქსელის ელემენტებში გავრცელებულ ემდ-ების გათვალისწინებას;

4. ჩატარებული კვლევების შედეგების შეფასების საფუძველზე, დამუშავებულია „ელექტრომომარაგების ქსელის დატვირთვების ფიზიკური მოდელი“, რომელიც საშუალებას გვაძლევს, ემს-ის დაბალი და საშუალო ძაბვის გაფართოება-რეკონსტრუქციისა და ახალი ქსელების პროექტირებისას, ჩავატაროთ სრულყოფილი გამოკვლევა გამანაწილებელი მოწყობილობებთან მიერთებული ელექტროტექნოლოგიური კომპლექსების მუშაობის რეჟიმების შედეგად,

თითოეულ ფაზაში წარმოქმნილი ემპ-ები და ქსელის ელემენტებში გავრცელებული ემდ-ებები;

5. ელექტრომომარაგების ქსელის ფიზიკური მოდელის ცალკეული ფაზებისათვის შედგენილია აქტიური და რეაქტიული დატვირთვების, ერთსაათიანი ინტერვალის, საფეხუროვანი, დღე-ღამური გრაფიკები;

6. შემოთავაზებული დატვირთვის ფიზიკური მოდელისათვის დამუშავებულია ძალური ნაწილის ცალხაზოვანი სქემა და მიკროპროცესორული მართვის სისტემა. მართვის სისტემა შესრულებულია კომპანია „შნიდერ ელექტრიკის“ მიერ წარმოებული პროგრამირებადი კონტროლერის (ინტელექტუალური რელე **Zelio Logic** -ის) საშუალებით. მართვის სისტემა მოიცავს: აქტიური, ინდუქციური და ტევადური უჯრედების ცალკეული ფაზების დამოუკიდებელ მართვის ბლოკებს;

7. ელექტრომომარაგების ქსელის დატვირთვების ფიზიკური მოდელის ცალკეული უჯრედის პარამეტრების განსაზღვრისათვის შედგენილია მათემატიკური გამოსახულებები;

8. დასაბუთებულია, რომ შემოთავაზებული დატვირთვების ფიზიკური მოდელი საშუალებას გვაძლევს ჩავატაროთ ელექტრომომარაგების ქსელის ცალკეულ ფაზებში მიმდინარე ემპ-ების შესწავლა, მათ მიერ წარმოქმნილი და ქსელის ელემენტებში გავრცელებული ემდ-ებების სრულყოფილი გამოკვლევა, დავადგინოთ ემდ-ების ხასიათი, პარამეტრები და წარმოქმნის მიზეზები ქსელის მუშაობის საიმედოობისა და მდგრადობის, ენერგეტიკული მაჩვენებლებისა და ენერგოეფექტურობის ამაღლების მისაღწევად.

გამოყენებული ლიტერატურა

- (2023). (Z. L. Compact smart relay, პროდიუსერი, & Schneider Electric) მოპოვებული www.se.com: <https://www.se.com/ww/en/product/download-pdf/SR2A201FU>-დან
- Axelberg P., Bollen H.J. (2002). INTERNATIONAL STANDARDS FOR POWER QUALITY MEASUREMENT SYSTEMS. მოპოვებული https://www.unipower.se/wp-content/uploads/2022/10/cired2002_paper.pdf.-დან
- Dugan R. C., McGranaghan M.F., Santoso S., Beauty H. W. (2012). Electrical Power Systems Quality. 3rd edition. McGraw-Hill.
- Kennedy, B. (2000). Power Quality Primer. McGraw-Hill.
- Madias J. (2013). Electric Arc Furnace. Elsevier. მოპოვებული https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Madias/publication/261710722_Electric_Arc_Furnace/links/0deec53639d9fa10ef000000/Electric-Arc-Furnace.pdf?origin=publication_detail-დან
- Muhammad Zaki, B. (2012). POWER QUALITY ANALYSIS OF AN INDUSTRIAL PLANT. UniversitiTeknologi PETRONAS. მოპოვებული http://utpedia.utp.edu.my/id/eprint/3974/1/Final_Project_Report_Muhammad_Zaki_B_Mohd_Amir.pdf-დან
- Perera S., Elphick S. (2022). Applied Power Quality : Analysis, Modelling, Design and Implementation of Power Quality Monitoring Systems. Elsevier - Health Sciences Division.
- Plummer I. (2003). ASYMMETRY IN DISTRIBUTION SYSTEMS:CAUSES, HARMFUL EFFECTS AND REMEDIES. B.S., Louisiana State University. მოპოვებული https://digitalcommons.lsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=2489&context=gradschool_theses-დან
- Tchunashvili B., Kobalia M., Petrosyan A., Gamrekelashvili T., Kharebava D. (2020). Improvement of the Physical Model of Power Supply Systems Dynamic Loads. Kremenchuk, Ukraine: IEEE. მოპოვებული <https://ieeexplore.ieee.org/document/9240833>-დან
- Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б., Севостьянов. А.А. (2004). Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. Н.Новгород: НГТУ.
- Дзюба М.А., Сафонов В.И. (ო. გ.). Вклад питающей сети и промышленного предприятия в качество электроэнергии в точке поставки электроэнергии. 2022: Вестник Магнитогорского государственного технического университета. მოპოვებული <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-147-154>-დან

- Дьякова А.Ф., Максимов Б.К., Борисо Р.К. (2004). Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях. МЭИ.
- Жежеленко, И.В. (2005). Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. Энергоатомиздат.
- Железко, Ю.С. . (1991). Влияние потребителя на качество электроэнергии в сети и технические условия на его присоединение. Промышленная энергетика.
- Кабышев, А.В. (2007). Электроснабжение объектов. . Расчет электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования. Томск: Изд-во Томского политехнического университета.
- Карташев И.И., Тульский В.Н., Шаманов Р.Г. (2006). Управление качеством электроэнергии. МЭИ.
- Кудрин, Б.И. (2006). Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для студентов высших учебных заведений. Интернет Инжиниринг.
- Луценко В., Павлов В., Докшицкая А. (2006). ДУГОВАЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНАЯ ПЕЧЬ. Екатеринбург: ГОУ-ВПО УГТУ-УПИ 620002.
- ПИНЧУК О.Г. (2007). ОЦЕНКА ТОКОВ И ТЕМПЕРАТУР АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МОЩНОСТЬЮ ДО 400 кВт ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ НЕСИММЕТРИИ СЕТИ. Kharkov: <https://core.ac.uk/>. მოპოვებული /core.ac.uk: <https://core.ac.uk/download/pdf/162874122.pdf>-დაბ
- Сафонов, В.И. (2014). Электротехнологические установки: учебное пособие. Челябинск: ЮУрГУ.
- Чунашвили Б., Кобаля М., Петросян А., Гамрекелашвили Т., Ртвеладзе Н. (2020). Исследование электромагнитных процессов проходящих в однофазных и трехфазных и кабельных линиях в направлении определения потери мощности. თბილისი: ენერჯია.
- Чунашвили Б.М., Кобаля М.И., Петросян А.М., Харева Д.Н. . (2017). Физическая модель динамических нагрузок систем электроснабжения. . Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ", 156-159. მოპოვებული <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/33728>-დაბ
- Шидловский А.К., Жежеленко И.В., Пивняк Г.Г. (2012). Электромагнитная совместимость потребителей. Э45 моногр. Машиностроение.

ლაოშვილი დ. (2006). ელექტრომომარაგება. ზოგადი კურსი. თბილისი: ტექნიკური უნივერსიტეტი.

ჭუნაშვილი ბ., პეტროსიანი ა., გამრეკელაშვილი თ., ხარებავა დ. (2016). ელექტრომომხმარებლების მიერ ქსელში წარმოქმნილი ძაბვის მაღალი სიხშირის ჰარმონიკების სიმეტრიულობის გამოკვლევა. IV საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის - „ენერჯეტიკა: რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები (გვ. 5–8). ქუთაისი: მოხსენებების კრებული.

ჭუნაშვილი ბ., პეტროსიანი ა., გამრეკელაშვილი თ., ხარებავა დ. (2016). ელექტრომომხმარებლების მიერ ქსელში წარმოქმნილი ძაბვის მაღალი სიხშირის ჰარმონიკების სიმეტრიულობის გამოკვლევა. ქუთაისი: ენერჯეტიკა. მოპოვებული <http://science.gtu.ge/cat/7/38/>-დან

ჭუნაშვილი ბ., ქობალია მ., ხარებავა დ. (2016). ელექტრომომხმარებლების მიერ ქსელში წარმოქმნილი მაღალი სიხშირის ჰარმონიკების სიმეტრიულობის გამოკვლევა. თბილისი: საქაქრთველოს საინჟინრო სიახლენი. მოპოვებული <https://gen.techinformi.ge/>-დან

ჭუნაშვილი ბ., ქობალია მ., ხარებავა დ. (2016). ელექტრომომხმარებლების მიერ ქსელში წარმოქმნილი მაღალი სიხშირის ჰარმონიკების სიმეტრიულობის გამოკვლევა. საქაქრთველოს საინჟინრო სიახლენი, 57-61.

ხარებავა დ. (2021). ელექტრომომარაგების სისტემაში მიმდინარე ელექტროდინამიკური პროცესების ექსპერიმენტული გამოკვლევის მოდელი. თბილისი: ენერჯია. მოპოვებული http://www.energyonline.ge/2020/ENERGY_MPPE_21_2_2021_Part_II.pdf. -დან