

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თეიმურაზ გამრეკელაშვილი

ელექტრომომარაგების ქსელებში ძაბვის მაღალი რიგის
ჰარმონიკების წარმოქმნის მიზეზების გამოკვლევა

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა: “ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“

შიფრი: 0405

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

ივლისი, 2018 წელი

საავტორო უფლება © 2018 წელი, თეიმურაზ გამრეკელაშვილი

თბილისი

2018 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით გამრეკელაშვილი თეიმურაზის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ელექტრომომარაგების ქსელებში ძაბვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების წარმოქმნის მიზეზების გამოკვლევა“ და ვამლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

ივლისი, 2018

ხელმძღვანელი ----- პროფესორი გ. შაველაშვილი

რეცენზენტი -----

რეცენზენტი -----

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2018

ავტორი: თეიმურაზ გამრეკელაშვილი

თემის დასახელება: ელექტრომომარაგების ქსელებში ძაბვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების წარმოქმნის მიზეზების გამოკვლევა

ფაკულტეტი : ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

აკადემიური ხარისხი: აკადემიური დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: ივლისი, 2018

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

ავტორის ხელმოწერა

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

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით 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, ახალი ტექნოლოგიების დანერგვის შედეგად ელექტრომომარაგების სისტემებში შექმნილია ურთულესი მდგომარეობა. ერთისმხრივ, სისტამატიურად მიმდინარეობს ელექტრომომარაგების სისტემის თანამედროვე ელექტრონული და მიკროპროცესორული მოწყობილობებით აღჭურვა და მეორეს მხრივ, მუდმივად იზრდება რაოდენობა და სიმძლავრე იმ ელექტრომიმღებების, რომელებიც ელექტრომომარაგების ქსელში სხვადასხვა სახის ელექტრომაგნიტურ დაბრკოლებებს წარმოქმნიან.

მნიშვნელოვანია რომ, ელექტრომომარაგების სისტემაში ჩართულ ელექტრომომხმარებლებს, რომელთა შემადგენლობაში მრავალი პრაქტიკული დანიშნულების ელექტროტექნოლოგიური დანადგარები, კომპლექსები, საყოფაცხოვრებო ხელსაწყოები და ელექტრული განათების ხელსაწყოები შედიან, გააჩნიათ ურთიერთ განსხვავებული მოქმედების პრინციპი და მუშაობის რეჟიმი. აქედან გამომდინარე, მკვეთრად განსხვავებულია მათ მიერ ელექტრომომარაგების ქსელისადმი ელექტროენერჯის მიწოდების საიმედოობისა და ხარისხისადმი წაყენებული მოთხოვნები. განსხვავებულია აგრეთვე მათი მუშაობის რეჟიმებით გამოწვეული დატვირთვის დენის ფორმის დამახინჯების შედეგად წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრის პარამეტრები.

შესაბამისად, ელექტრომომარაგების ქსელში ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებები დიდ მანძილზე ვრცელდება და როგორც მომხმარებლების, აგრეთვე ქსელის ელემენტებსა და მართვის სისტემებში მნიშვნელოვან ელექტრომაგნიტურ შეუთავსებლობას წარმოქმნის, რომელიც ხშირ შემთხვევაში ავარიებისა და დიდი ზარალის მიზეზი ხდება. ამიტომ, ელექტროენერგეტიკის სხვადასხვაგვარი (განსხვავებული) ობიექტების ქსელში ერთობლივი მუშაობის, ე. ი. ელექტრომაგნიტური თავსებადობის პრობლემა ყოველწლიურად უფრო და უფრო აქტუალური ხდება.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, ელექტრომომარაგების სისტემებში მომხმარებელთა ელექტრომაგნიტური თავსებადობის უზრუნველყოფას, ელექტრომომარაგების სისტემების საიმედოობის ამაღლებისა და ენერგეტიკული მაჩვენებლების გაუმჯობესების ერთ-ერთ უმთავრეს პირობას წარმოადგენს ელექტროტექნოლოგიური დანადგარებისა და ელექტრომომარაგების ქსელის ძალოვან ელემენტებში მიმდინარე ელექტროდინამიკური პროცესების ღრმა მეცნიერული შესწავლა და ამ პროცესების შედეგად მაღალი რიგის ჰარმონიკების წარმოქმნის მიზეზების, პარამეტრების დადგენა და ქსელის ელემენტებში გავრცელების შეზღუდვა.

ნაშრომში განხილულია, ყველაზე უფრო ფართოდ გავრცელებული, ურთიერთ განსხვავებული მოქმედების პრინციპზე დაფუძნებული და მუშაობის რეჟიმების მქონე ელექტრომიმღებებით დაკომპლექტებული

ტიპიური ელექტრომომხმარებლების მუშაობით გამოწვეული დატვირთვის დენის ფორმის დამახინჯების შედეგად ელექტრომომარაგების ქსელში წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრი და პარამეტრები. დასაბუთებულია, რომ ელექტრო მომხმარებლების მიერ ჰარმონიკების წარმოქმნის ძირითად მიზეზს ქსელში ჩართული ელექტრორკალური ღუმელები და მართვადი გარდამქმნელებით აღჭურვილი ელექტროტექნოლოგიური დანადგარები წარმოადგენს.

ჩატარებულია ელექტრომომარაგების ქსელებში გამოყენებული მაღალი რიგის ჰარმონიკების ჩახშობისა და შეზღუდვის (გაუვნებელყოფის) არსებული თანამედროვე მეთოდების გამოკვლევა და შეფასებულია გრძივი და განივი ჩართვის შემზღუდავი ფილტრების გამოყენების შედეგად მიღებული შედეგები. შემოთავაზებულია დაბრკოლებების ჩახშობის საშუალებების შერჩევისა და პარამეტრების განსაზღვრის მეთოდი.

ცალკეული რიგის ჰარმონიკის დანადგარზე ზემოქმედების შეფასებისათვის შემოღებულია ეგრედ წოდებული - „ჰარმონიკის ზემოქმედების ეფექტურობის კოეფიციენტი“ და შემოთავაზებულია სპექტრში შემავალი ჰარმონიკების ჯამური ზემოქმედების ეფექტის საანგარიშო გამოსახულება.

ელექტრორკალური დანადგარების მოქმედების პრინციპისა და მუშაობის რეჟიმების გამოკვლევის საფუძველზე დადგენილია, რომ მათ მიერ ელექტრომომარაგების ქსელის თითოეულ ფაზაში წარმოიქმნება ურთიერთმონაცვლე სამი (უქმი სვლის, მოკლედშერთვის და რკალის მდგრადი ნთების) რეჟიმის შესაბამისი მაღალი რიგის ჰარმონიკების სამი სპექტრი. ამასთან, რადგან სპექტრთა მონაცვლეობა თითოეულ ფაზაში მიმდინარეობს ურთიერთ დამოუკიდებლად ქსელში გავრცელებული ჰარმონიკები ასიმეტრიულია და დინამიკურ ხასიათს ატარებს.

ელექტრორკალური დანადგარების მიერ წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების შემზღუდავი მოწყობილობისათვის დამუშავებულია თითოეული ფაზის სამ საფეხუროვანი ფილტრის კომპლექტის დამოუკიდებელი მართვის სისტემა, რომელთა მართვა თითოეული ფაზის დატვირთვის დენის ფუნქციაში ხორციელდება.

რადგან განივ-იმპულსურ რეგულირებადი მართვადი გარდამქმნელებით აღჭურვილი ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების დატვირთვის დენის დამახინჯების ხარისხი დიდ ფარგლებში იცვლება და დამოკიდებულია გარდამქმნელის ვენტილების მართვის ელექტროდებზე მიყვანილი იმპულსების გახსნის კუთხეზე. ელექტრომომარაგების ქსელში წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრის პარამეტრებიც დიდ ფარგლებში იცვლება და იგი დამოკიდებულია, როგორც დანადგარის დატვირთვაზე, აგრეთვე გახსნის კუთხეზე. შესაბამისად, ასეთი ცვალებადი სპექტრის ჰარმონიკების ეფექტური შეზღუდვა არსებული მეთოდებით ძალიან რთულია.

მართვადი გამმართველებით აღჭურვილი ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების დატვირთვის დენის ფორმის დამახინჯების გამასწორებელი მდოვრე რეგულირების (საკომპენსაციო) მაშუნტირებელი ფილტრისათვის

დამუშავებულია მართვის სისტემა, რომლის მართვა ხორციელდება გამმართველის ვენტილების გახსნის კუთხის მიხედვით.

ელექტრორკალური და მართვადი გამმართველებით აღჭურვილი ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების მიერ წარმოქმნილი ჰარმონიკების შემზღუდავი ფილტრებისათვის დამუშავებული მართვის სისტემების პრაქტიკული რეალიზაცია უზრუნველყოფს ელექტრომომარაგებისა და ელექტრომომხმარებელთა ქსელების ელემენტების მაღალი რიგის ჰარმონიკებისაგან განტვირთვას 50-60%-ით და შესაბამისად, ენერგეტიკული მაჩვენებლებისა და ენერგოეფექტურობის ამაღლებას.

Abstract

At present stage, development and introduction of modern technologies in energy supplying systems formed difficult situation. On one hand, systematically, introduction of advanced digital technologies, and in other side, constantly growing number and power of those consumers, who create of any sorts of electromagnetic interferences.

That much, consumers have diversity of technology and equipment, works in different principles and regimen. Coming out of this, the requirement of power supply reliability and quality are very different. Also varied the parameters of the spectra of high frequency distortion due to operation modes and currents.

Accordingly, electromagnetic interference is spread over a long distance, and creates incompatibilities in the network control systems, which often causes accidents and damage. For this reason, problem the joint work of various consumers from year to year becomes more and more urgent.

Proceeding from the foregoing, the condition for achieving electromagnetic compatibility of electric consumers in the power supply system, reliability of power supply system and energetic indicators improvement are deep scientific investigation of processes passing in the electro technological facilities, investigation of high harmonics production reasons and restriction of their propagation.

In this paper, the spectrum and properties of high harmonics are given, caused by current distortion in the power supply, for mostly spread, based on different working principles consumers. Is proven that main reason for high harmonics production are arc ovens and electro technological facilities which are using controlled inverters.

Investigation of high harmonics suppression modern methods is made and results of using longitudinal and transverse filters are evaluated. A method for reducing interference and determining parameters is presented.

For evaluation of influence of one stand alone harmonic on the electro technical facility, co-called "coefficient of harmonic influence" is adopted and expression for counting of total influence of harmonics which are in the spectrum is presented.

By investigating acting principles and working conditions of arc ovens evaluated, that in the each phase are consequently arising three (idle, short circuit and stable arc) spectra for each mode. Because of this that the sequence of these spectra is independent in each phase, the harmonics in the power supply are asymmetric and have dynamic behavior

For the high harmonics reduction device produced by arc facility, developed management system of three stage filter for each phase. Management of these filters is realized in the load current function.

Load current distortion level of electro technological facilities which have Inverters working on pulse wide regulation is varying in high limits and is

depended on the angle of gates control impulses. Parameters of high harmonics produced in the power supply also are varying in the high limits and they are depended on load and on the angle of control impulses. Therefore, effective restriction of harmonics spectra varying in such a high limits is too complicated using existing methods.

For fixing load current distortion caused by electro technological facilities which have a controlled rectifier a shunt (compensation) filter control system management is depended on the angle of control pulses.

Harmonics (produced by electro technological facilities which have arcs and controlled rectifiers) reduction filter control system practical realization decreases high harmonics till 50-60% and therefore improving efficiency and energetic indicators.

შინაარსი

შესავალი	16
ლიტერატურის მიმოხილვა	18
თავი I. ელექტრომომარაგების სისტემის ქსელის ელემენტებში არსებული ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებების წარმოქმნისა და გავრცელების მიზეზები	20
1.1. ელექტროტექნოლოგიური დანადგარებისა და კომპლექსების შედეგად წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკები	20
1.2. მაღალი რიგის ჰარმონიკების ზემოქმედება ელექტრომომარაგების ქსელის ელემენტებსა და ელექტრომიმღებებზე	20
1.3. მაღალი რიგის ჰარმონიკების შეზღუდვა	22
თავი II. ელექტრომომარაგების ქსელის ელემენტებში წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების წარმოქმნის მიზეზების გამოკვლევა.....	31
2.1. მაღალი რიგის ჰარმონიკების წარმოქმნის ელექტრომომხმარებლების ელექტრომიმღებები	31
2.2. ძაბვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების ელექტრომიმღებებზე ზეგავლენის შეფასება	32
2.3. ელექტრორკალური ღუმელის მუშაობის რეჟიმები და მათ მიერ ქსელში წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკები.....	42
2.4. მართვადი გარდამქმნელით აღჭურვილი ეტდ-ის მუშაობის რეჟიმების მიერ ქსელში წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკები	49
2.5. ელექტრომომხმარებლების მიერ ქსელში წარმოქმნილი.....	52
2.5.1. ძაბვის მაღალი სიხშირის ჰარმონიკების სიმეტრიულობის გამოკვლევა	52
თავი III. ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებების წარმოქმნისა და გავრცელების შემზღუდავი მოწყობილობის მართვის სისტემის დამუშავება	64
3.1. ელექტრორკალური დანადგარების მიერ წარმოქმნილი მრკ-ის შემზღუდავი მოწყობილობის მართვის სისტემის დამუშავება.....	64
3.2. მართვადი გამმართველებით აღჭურვილი ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების დატვირთვის დენის ფორმის დამახინჯების გამასწორებელი ფილტრის მდოვრე რეგულირების მართვის სისტემის დამუშავება.....	69

დასკვნები.....	72
გამოყენებული ლიტერატურა	75
დანართები.....	81

ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1. ფოლადსადნობი ელექტრორკალური ღუმელების მუშაობის რეჟიმების შედეგად გამოწვეული ძაბვის მაჩვენებლების გადახრა 47

ცხრილი 2. ელექტრორკალური ღუმელების მიერ წარმოქმნილი მრკ-ების საშუალო მნიშვნელობები..... 48

ნახაზების ნუსხა

ნახ. 1. ერთ სიხშირეზე აწყობილი პარალელური ჩართვის ფილტრის სქემა ა) და მისი გამტარებლობის მახასიათებელი ბ).....	24
ნახ. 2. ორმაგი სიხშირის აწყობის ფილტრები. (ა) –ორი ერთსიხშირიანი ფილტრი; ორმაგი გამართვის ფილტრად (ბ) –ორმაგი სიხშირის ფილტრი	26
ნახ. 3. ფართოზოლური მაღალსიხშირიანი ფილტრების სქემები: ა) - პირველი რიგის, ბ) - მეორე რიგის, გ) - მესამე რიგის, დ) - C - ტიპის ..	28
ნახ. 4. აქტიური ფილტრის ქსელში ჩართვის სქემა	29
ნახ. 5. გაზური განმუხტვის სინათლის წყაროს ჰარმონიკების სპექტრი.....	34
ნახ. 6. ელექტრომიმღების ჰარმონიკების მიმართ მგრძნობიარების მახასიათებლები.	35
ნახ. 7. გაზური განმუხტვის სინათლის წყაროს ჰარმონიკების ზემოქმედების ეფექტურობის კოეფიციენტი.....	37
ნახ. 8. ლუმინესენტური სინათლის წყაროს ჰარმონიკების ზემოქმედების ეფექტურობის კოეფიციენტი.....	38
ნახ. 9. სერვერის ჰარმონიკების ზემოქმედების ეფექტურობის კოეფიციენტი	39
ნახ. 10. ფერადი ჰარმონიკების ზემოქმედების ეფექტურობის კოეფიციენტი	40
ნახ. 11. შუქდიოდური სინათლის წყაროს ჰარმონიკების ზემოქმედების ეფექტურობის კოეფიციენტი.....	41
ნახ. 12. ელექტრორკალური ღუმელის ავტომატური მართვის სისტემის ფუნქციონალური სქემა	43
ნახ. 13. ელექტრორკალური ღუმელის დატვირთვის დენის მოქმედი მნიშვნელობის მრუდები	46
ნახ. 14. გარდამსახის ძალური ტრანსფორმატორის გრაგნილების ვარსკვლავი ვარსკვლავზე შეერთების ჯგუფის გათვალისწინებით	50
ნახ. 15. დატვირთვის დენის მრუდის ფორმა	50
ნახ. 16. “დამტვირთავი სტენდის” სქემა.....	55

ნახ. 17. „დამტვირთავი სტენდის“ დატვირთვის დენის და ძაბვის მრუდები (ფაზა A).....	57
ნახ. 18. „დამტვირთავი სტენდის“ დატვირთვის დენის და ძაბვის მრუდები (ფაზა B).....	58
ნახ. 19. „დამტვირთავი სტენდის“ დატვირთვის დენის და ძაბვის მრუდები. (ფაზა C).....	59
ნახ. 20. „დამტვირთავი სტენდის“ დატვირთვის დენის მაღალი რიგის ჰარმონიკების ამპლიტუდები ფაზა A.....	60
ნახ. 21. „დამტვირთავი სტენდის“ დატვირთვის დენის მაღალი რიგის ჰარმონიკების ამპლიტუდები. (ფაზა B)	61
ნახ. 22. „დამტვირთავი სტენდის“ დატვირთვის დენის მაღალი რიგის ჰარმონიკების ამპლიტუდები. (ფაზა C)	62
ნახ. 23. ელექტრორკალური ღუმელის ძაბვისა და დატვირთვის დენის მრუდები მუშაობის რეჟიმისას.....	65
ნახ. 24. ელექტრორკალური ღუმელის მიერ წარმოქმნილი მრკ-ების ჩამხშობი სამსაფეხუროვანი ფილტრის მართვის სისტემის ბლოკ სქემა	68
ნახ. 25. მართვადი გარდამქმნელით აღჭურვილი ეტდ-ის მიერ წარმოქმნილი მრკ-ის შემზღუდავი მოწყობილობის მდოვრე რეგულირების მართვის სისტემის ფუნქციონალური სქემა:	70

გამოყენებული აბრევიატურები

ემს – ელექტრომომარაგების სისტემა;

ეტდ - ელექტროტექნოლოგიური დანადგარები;

ემთ - ელექტრომაგნიტური თავსებადობა;

ემჰმკ - ელექტრომიმღების ჰარმონიკის მიმართ მგრძნობიარობის
კოეფიციენტი;

ჰზეკ - ჰარმონიკის ზემოქმედების ეფექტის კოეფიციენტი;

ჰზე - ჰარმონიკის ზემოქმედების კოეფიციენტი;

ერდ - ელექტრორკალური ღუმელი;

ემდ - ელექტრომაგნიტური დაბრკოლება.

მადლიერება

დიდ მადლობას ვუხდით საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის „ელექტრომობილარების ტექნოლოგიების“ დეტარტამენტის ყველა აკადემიურ და დამხმარე პერსონალს სადისერტაციო ნაშრომზე მუშაობისას გაწეული დახმარებისათვის. განსაკუთრებით დეტარტამენტის უფროსის მოადგილეს ასოცირებულ პროფესორს ალექსანდრე პეტროსიანს „Sedmax“-ის და „ელექტრული განათების“ სასწავლო-სამეცნიერო ლაბორატორიების სტენდებზე ექსპერიმენტული გამოკვლევების ჩატარებაში გაწეული ღვაწლისათვის.

აგრეთვე, უღრმესი მადლიერებით მიიღია ავღნიშნო სტუ-ს ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სასწავლო ცენტრ „შნეიდერ ელექტრიკ – თელასის“ თანამშრომლობის, განსაკუთრებით კი მთავარ სპეციალისტის რევაზ გურგენაძის მიერ სადისერტაციო ნაშრომის გაფორმებაში გაწეული დახმარებისათვის.

შესავალი

მნიშვნელოვანია რომ, ელექტრომომხმარებლებს, რომელთა შემადგენლობაში მრავალი პრაქტიკული დანიშნულების ელექტროტექნოლოგიური დანადგარები, კომპლექსები, საყოფაცხოვრებო ხელსაწყოები და ელექტრული განათების ხელსაწყოები შედიან, გააჩნიათ ურთიერთ განსხვავებული მოქმედების პრინციპი და მუშაობის რეჟიმი. აქედან გამომდინარე, მკვეთრად განსხვავებულია მათ მიერ ელექტრომომარაგების ქსელისადმი ელექტროენერჯის მიწოდების საიმედოობისა და ხარისხისადმი წაყენებული მოთხოვნები. განსხვავებულია აგრეთვე მათი მუშაობის რეჟიმების გავლენა, როგორც ერთმანეთის, აგრეთვე ელექტრომომარაგების ქსელის მუშაობაზე. ამასთან ერთად, განსხვავებულია მათი მართვის, კონტროლის, დაცვისა და აღრიცხვის სისტემები, როგორც დანიშნულებით, აგრეთვე მოწყობის პრინციპებითა და ტექნიკური შესრულებით. შესაბამისად, ელექტროტექნოლოგიური დანადგარები, კომპლექსები და მათი ელექტრომომარაგების ქსელი ერთიან ციკლში ჩართულ და „ელექტრომომარაგება-მომხმარების ტრაქტში“ ჩართულ განუყოფელ ენერგეტიკულ სუბიექტს წარმოადგენს. შესაბამისად, თანამედროვე ეტაპზე ელექტროენერგეტიკაში შექმნილია პარადოქსალური სიტუაცია. ერთისმხრივ, ყოველდღიურად მიმდინარეობს ელექტრომომარაგების სისტემის თანამედროვე ელექტრონული და მიკროპროცესორული მოწყობილობებით აღჭურვა და მეორეს მხრივ, მუდმივად იზრდება რაოდენობა და სიმძლავრე იმ ელექტრომიმღებების, რომელებიც ელექტრომომარაგების ქსელში სხვადასხვა სახის ელექტრომაგნიტურ დაბრკოლებებს წარმოქმნიან. შესაბამისად, რადგან ელექტრომომარაგების სისტემის ყველა ობიექტი ურთიერთ ელექტროგადამცემი ხაზების საშუალებითაა დაკავშირებული, ამიტომ ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებები დიდ მანძილზე ვრცელდება და, როგორც მომხმარებლების, აგრეთვე ქსელის ელემენტებსა და მართვის

სისტემებში მნიშვნელოვან ელექტრომაგნიტურ შეუთავსებლობას წარმოქმნის, რომელის ხშირ შემთხვევაში დიდი ზარალის მიზეზი ხდება. ამიტომ, ელექტროენერგეტიკის სხვადასხვაგვარი (განსხვავებული) ობიექტების ქსელში ერთობლივი მუშაობის, ე. ი. ელექტრომაგნიტური თავსებადობის პრობლემა ყოველწლიურად უფრო და უფრო აქტუალური ხდება.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, ელექტრომომარაგების სისტემებში მომხმარებელთა ელექტრომაგნიტური თავსებადობის უზრუნველყოფას ელექტრომომარაგების სისტემების საიმედოობის ამაღლებისა და ენერგეტიკული მაჩვენებლების გაუმჯობესების ერთ-ერთ უმთავრეს პირობას ელექტროტექნოლოგიური დანადგარებში მიმდინარე ელექტროდინამიკური პროცესების ღრმა მეცნიერული შესწავლა წარმოადგენს.

ელექტრონული ხელსაწყოები, აპარატები და ელექტრომოწყობილობები შექმნილია სხვადასხვა საექსპლუატაციო პირობებში ნორმალური ფუნქციონირებისთვის. ამასთან ხდება მათი ურთიერთქმედება გარემოსთან, სადაც ელექტრონული მოწყობილობების ფუნქციონალური თვისებები მჟღავნდება. გარემო შეიძლება მოქმედებდეს ტექნიკურ საშუალებებზე უარყოფითად (აგრესიულად) ან დადებითად, მათი ფუნქციონალური შესაძლებლობების შეზღუდვით ან გაფართოვებით. უარყოფითი ზემოქმედება გამოიხატება იმაში, რომ თავის მხრივ, ტექნიკური საშუალებები შეიძლება მოქმედებდეს გარემოზე. თუ მოქმედებას აგრესიული ხასიათი აქვს, გარემო და ტექნიკური საშუალებები შეუთავსებელია, რასაც მივყავართ ელექტრომოწყობილობების ფუნქციონალური თვისებების დაუშვებელ დარღვევებამდე. ამიტომ ურთიერთქმედება უნდა იყოს დაბალანსირებული გარემოსა და ტექნიკური საშუალებების შეთავსების დონემდე, როცა მათი ურთიერთ მოქმედება არ არღვევს, აუცილებელი ნორმულური ფუნქციონირებისთვის, საჭირო პირობებს.

ლიტერატურის მიმოხილვა

ელექტრომომარაგების სისტემის ელექტრული ქსელის სხვადასხვა დონეზე (საფეხურზე) მიერთებული ელექტროტექნოლოგიური დანადგარებისა და კომპლექსების თანამედროვე ტექნიკური მოწყობილობების აღჭურვის პირობებში, სისტემატურად იზრდება მათ მიერ ქსელისადმი წაყენებული მოთხოვნები მიწოდებული ელექტროენერჯის ხარისხისადმი. ამ მხრივ, მსოფლიოში აღიარებული მეცნიერების განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა ელექტრომომარაგების ქსელში ელექტრომიმღებების მიერ არსებული მაღალი რიგის ჰარმონიკების წარმოქმნის მიზეზების, ქსელში გავრცელებისა და ქსელის ელემენტებისა და ელექტრომიმღებებზე ზემოქმედებისა და ზემოქმედების შემცირების საშუალებების მეცნიერულ გამოკვლევებს.

მრავალი უცხოური და საერთაშორისო ნორმატიული დოკუმენტი [67-76] ეძღვნება ელექტრომომარაგების ხარისხის მაჩვენებლების ნორმატივების დადგენას.

აღსანიშნავია, რომ ბევრი წამყვანი მეცნიერის ნაშრომი მიძღვნილია ელექტროტექნოლოგიური დანადგარებისა და კომპლექსების მიერ ქსელში წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების შესწავლას [1-7], რომლებშიც დეტალურადაა განხილული ელექტრომომარაგების ქსელის ძალოვანი ელემენტებისა და ელექტრომომხმარებლების ეტდ-ების მოქმედების პრინციპებსა და მუშაობის რეჟიმები [8,9,52]. მრკ-ების წარმოქმნის მიზეზების გამოკვლევასა და შესწავლას ეძღვნება სამეცნიერო და სასწავლო ლიტერატურა [61,62], სადაც დასაბუთებულია, რომ ქსელში მრკ-ებს წარმოქმნიან დატვირთვის დენის ფორმის ძლიერ დამახინჯების მქონე ეტდ-ები. ამ ეტდ-ებს მიეკუთვნება ელექტრორკალური შედეგების ტრანსფორმატორები და ფოლადსამსხმელო ელექტრორკალური ღუმელები, რომლებიც მუშაობის რეჟიმებიდან გამომდინარე, ქსელში წარმოქმნიან დიდი სიმძლავრის მრკ-ების სპექტრს.

ასევე დიდი სიმძლავრის მრკ-ების სპექტრს წარმოქმნიან მართვადი გამმართველებით აღჭურვილი ეტდ-ები (დიდი სიმძლავრის მუდმივი დენის ელექტროამძრავები, დიდი სიმძლავრის სიხშირული აასინქრონული ელექტროამძრავები, მუდმივი დენის ელექტრული ღუმელები, ელექტროქიმიური დანადგარები და ა.შ.).

ბევრ სამეცნიერო შრომასა და მონოგრაფიაშია [10-49, 77-80] განხილული და შესწავლილი კონდუქტიური მრკ-ების ქსელში გავრცელების საკითხები.

ყველა არსებულ თანამედროვე ლიტერატურაში, განსაკუთრებული ყურადღება აქვს დათმობილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების ელექტრომომარაგების ქსელისა და მომხმარებლების ეტდ-ებისა და კომპლექსების მოქმედების პრინციპებზე, მუშაობის რეჟიმებზე და ტექნოლოგიური პროცესების მიმდინარეობაზე გავლენას [50, 63-66].

მრავლადაა ლიტერატურა [51,53-60], სადაც განხილული ელექტრომომარაგების ქსელის ელემენტების მრკ-ებისგან განტვირთვის საკითხები. მოცემულია მრკ-ების შემზღუდავი საკომპენსაციო ფილტრების გამოყენების შესაძლებლობები, მათი ქსელში კონკრეტული გამოყენების პრინციპები, ფილტრების სქემები და სქემის ელემენტების ანგარიშის მეთოდები. დეტალურადაა აღწერილი ყოველი საკომპენსაციო მოწყობილობის ღირსებები და ნაკლოვანებები.

თავი I. ელექტრომომარაგების სისტემის ქსელის ელემენტებში არსებული ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებების წარმოქმნისა და გავრცელების მიზეზები

1.1. ელექტროტექნოლოგიური დანადგარებისა და კომპლექსების შედეგად წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკები

ელექტროტექნიკური ხელსაწყოები, აპარატები და ელექტრომოწყობილობები შექმნილია სხვადასხვა საექსპლუატაციო პირობებში ნორმალური ფუნქციონირებისთვის. ამასთან ხდება მათი ურთიერთქმედება გარემოსთან, სადაც ელექტრონული მოწყობილობების ფუნქციონალური თვისებები მყდავდება. გარემო შეიძლება მოქმედებდეს ტექნიკურ საშუალებებზე უარყოფითად (აგრესიულად) ან დადებითად, მათი ფუნქციონალური შესაძლებლობების შეზღუდვით ან გაფართოვებით. თავის მხრივ, ტექნიკური საშუალებები შეიძლება მოქმედებდეს გარემოზე. რიგ შემთხვევაში მოქმედებას აგრესიული ხასიათი აქვს და გარემოსთან ტექნიკური საშუალებების ფუნქციონირება შეუთავსებელია, რადგან ზემოქმედებას მივყავართ ელექტრომოწყობილობების ფუნქციონალური თვისებების დაუშვებელ დარღვევებამდე. ამიტომ, ურთიერთქმედება უნდა იყოს დაბალანსებული გარემოსა და ტექნიკური საშუალებების შეთავსების დონემდე, როცა მათი ურთიერთ მოქმედება არ არღვევს, აუცილებელი ნორმულური ფუნქციონირებისთვის, საჭირო პირობებს.

1.2. მაღალი რიგის ჰარმონიკების ზემოქმედება ელექტრომომარაგების ქსელის ელემენტებსა და ელექტრომიმღებებზე

მაღალი რიგის ჰარმონიკები ზეგავლენას ახდენს, როგორც ელექტრომომარაგების ქსელის ელემენტების, აგრეთვე ქსელში ჩართული მომხმარებლების ელექტრომიმღებების მუშაობის რეჟიმებზე და ენეგეტიკულ მაჩვენებლებზე. მრკ-ის ზემოქმედების ეფექტი ელექტრომიმღებზე დამოკიდებულია ელექტრომიმღების

ელექტროტექნიკურ თვისებებზე და ჰარმონიკის პარამეტრებზე. აქედან გამომდინარე, ელექტრომომარაგების ქსელის ერთიდაიგივე სალტესთან მიერთებული ელექტრომიმღებების ელექტრომაგნიტური თავსებადობის განსაზღვრისათვის საჭიროა შესწავლილ იქნეს ცალკეული ელექტროტექნოლოგიური დანადგარის მიერ ქსელში წარმოქმნილი დაბრკოლებების პარამეტრები და მათი ემდ-ბი მიმართ მგრძობიარებაზე. განვიხილოთ თუ რა გავლენას ახდენს მრკ ელექტრომომარაგების ქსელში ჩართული ყველაზე გავრცელებული ელექტრომიმღებების მუშაობაზე.

ძალოვანი ტრანსფორმატორები. სამფაზა ძალოვანი ტრანსფორმატორები ელექტრულ ქსელში არსებული მრკ-ების წყაროს წარმოადგენენ. ტრანსფორმატორების მიერ ჰარმონიკების წარმოქმნა ფაზათა დამამაგნიტებელი დენების მოქმედი მნიშვნელობების უთანაბრობითაა განპირობებული. მაგალითად, სამფაზა ხუთღეროიანი ძალოვანი ტრანსფორმატორის მაგნიტური სისტემის განაპირა ფაზების დამამაგნიტებელი დენების მოქმედი მნიშვნელობები 1.3-1,35 -ჯერ მეტია ვიდრე შუა ფაზისა. აღნიშნული მიზეზის შედეგად ტრანსფორმატორები ძირითადად კენტი რიგის ჰარმონიკებს გენერირებენ აღსანიშნავია, რომ ვარსკვლავი-ვარსკვლავზე და ვარსკვლავი-სამკუთხედზე შეერთების ჯგუფის ტრანსფორმატორების დამამაგნიტებელი დენის ამპლიტუდური სპექტრი პრაქტიკულად ერთნაირია [8,56].

სინქრონული და ასინქრონული ელექტრული ძრავები. სინქრონული და ასინქრონული ძრავის მომჭერებზე მიწოდებული ძაბვის სიხშირის გადახრისას იცვლება ძრავას სტატორის მიერ შექმნილი მბრუნავი მაგნიტური ველის ბრუნვის სიჩქარე. უფრო მეტიც ძრავას მომჭერებზე მრკ-ების მიწოდებისას ძრავას სტატორი ერთდროულად წარმოქმნის სპექტრში შემავალი ყველა ჰარმონიკის შესაბამისი სიხშირის მბრუნავ მაგნიტურ ველებს. ამ მბრუნავი მაგნიტური ველების მიერ შექმნილი მბრუნვი მომენტები ერთმანეთს ეწინააღმდეგება. შედეგად, მცირდება მ.ქ.კ.,

იზრდება დანაკარგები ძრავას გრაგნილებში და უარესდება ენერგეტიკული მაჩვენებლები.

რეაქტიული ციმბლავრის საკომპენსაციო მოწყობილობები. ძაბვის მაღალი რიგის ჰარმონიკები საკომპენსაციო მოწყობილობების სტატიკურ კონდენსატორებში წანაცვლების დენების გაზრდას განაპირობებს. ამის გამო ინტენსიურად მიმდინარეობს კონდენსატორის იზოლაციის ტემპერატურის გაზრდა, რაც იწვევს გადახურებას და მწყობრიდან გამოსვლას.

საკაბელო ხაზები. მრკ-ები ელექტრომომარაგების გამანაწილებელი ქსელის კაბელებში, ანალოგიურად სტატიკური კონდენსატორებისა, იწვევს კაბელების ძარღვებს შორის არსებული იზოლაციის გახურებას, ინტენსიურ ცვეთასა და საექსპლუატაციო ვადაზე ადრე მწყობრიდან გამოსვლას.

რელეური დაცვის სისტემები. მრკ-ები რელეური დაცვის სისტემის ლოგიკური ნაწილის ელემენტებში წარმოქმნის გაუთვალისწინებელ ელექტრომაგნიტური პროცესების წარმოქმნას რომელიც იწვევს დაცივი სელექტიურობის დარღვევას და ყალბ ამოქმედებას.

ელექტროენერჯის აღრიცხვის ხელსაწყოები. ყველა ელექტრული ენერჯისაღრიცხვის მრიცხველი დამზადებულია ქსელის (50ჰც) სიხშირეზე. მაღალი სიხშირის ჰარმონიკების შედეგად, ანალოგიურად ცვლადი დენის ელექტრული მანქანებისა, ინდუქციური პრინციპზე დაფუძნებული მრიცხველების დისკიში ერთდროულად წარმოქმნება რამოდენიმე სიხშირის მარბუნი მომენტი. ამის გამო, ირღვევა მრიცხველის აღრიცხვის სიზუსტე.

1.3. მაღალი რიგის ჰარმონიკების შეზღუდვა

ელექტრომომარაგების სისტემებში ელექტრომიმდებების მიერ წარმოქმნილი მრკ-ის ჩახრშობისათვის გამოიყენება აქტიურ, ინდუქტიურ და ტევადურ (R, L, C) ელემენტებზე შესრულებული შემზღუდავი

ფილტრები. შესაბამისად, ფილტრები უზრუნველყოფენ ერთი ან რამდენიმე ფიქსირებული სიხშირის ჰარმონიკის ამპლიტუდის შემცირებას [50,56].

ელექტრული ქსელში ჩართვის მიხედვით არსებობს ორი, მიმდევრობითი და პარალელური ჩართვის ფილტრები. იმ შემთხვევაში როდესაც საჭიროა ერთი ელექტრომიმდების ან ელექტრომიმდებთა ჯგუფის ქსელში არსებული კონკრეტული ჰარმონიკის ზემოქმედებისგან დაცვა, შეირჩევა აღნიშნული სიხშირის ჰარმონიკის შემზღუდავი ფილტრი და იგი ჩაერთვება ელექტრომიმდებთა მიმდევრობით. ასეთ ფილტრებს სამრეწველო სიხშირის მიმართ უნდა გააჩნდეს ძალიან მცირე წინააღმდეგობა, ხოლო შესაზღუდი სიხშირის ჰარმონიკის მიმართ უნდა ჰქონდეს მნიშვნელოვნად დიდი წინააღმდეგობა. ამ შემთხვევაში ფილტრი წარმოადგენს საცობს აღნიშნული სიხშირის დენის ჰარმონიკისათვის.

პარალელური ჩართვის ფილტრები გამოიყენება შემკრებ სალტებზე ძაბვის ჰარმონიკების ამპლიტუდების შესამცირებლად. ასეთ ფილტრებს სამრეწველო სიხშირის მიმართ უნდა გააჩნდეს ძალიან დიდი წინააღმდეგობა, ხოლო შესაზღუდი სიხშირის ჰარმონიკის მიმართ უნდა ჰქონდეს მნიშვნელოვნად მცირე. შესაბამისად, პარალელური შეერთების ფილტრები ამოკლებენ ანუ აშშუნტებენ შესაზღუდი ჰარმონიკის ძაბვას. ამიტომ მათ ხშირად მაშუნტირებელ ფილტრებს უწოდებენ.

არსებობს ერთ სიხშირეზე აწყობილი ფილტრები, ფილტრები ორმაგი აწყობის სიხშირით, ფილტრები ავტომატურად აწყობადი სიხშირით, ფართოხოლოვანი სიხშირის ფილტრები და აქტიური ფილტრები.

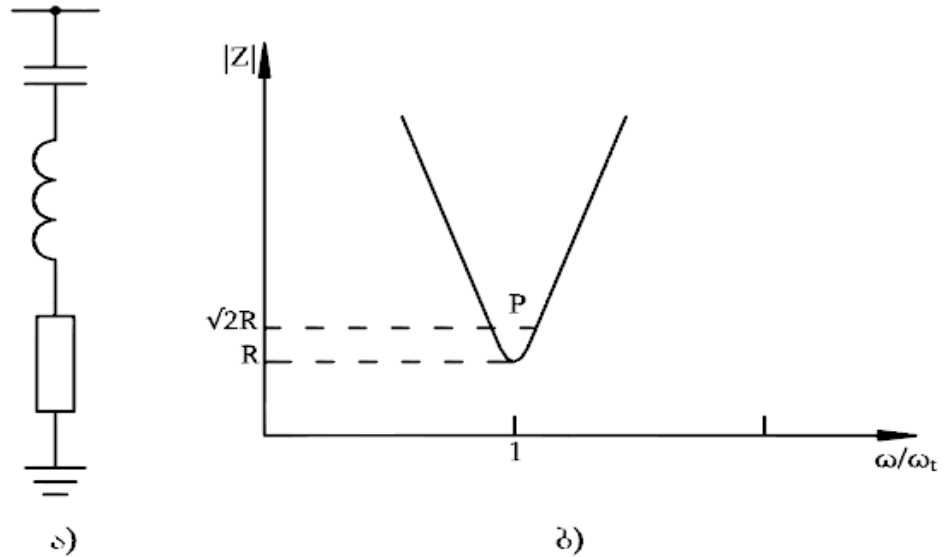
ერთ სიხშირეზე აწყობილი პარალელური ჩართვის ფილტრის სქემა და მისი მახასიათებელი მოცემულია ნახ. 1-ზე.

ერთ სიხშირეზე აწყობილი პარალელური ფილტრის სრული წინააღმდეგობა შეიძლება გამოვსახით შემდეგნაირად:

$$Z_1 = R + j[\omega L - 1/(\omega C)] \quad (1)$$

ფილტრის წინააჰმდეგობა რეზონანსულ სიხშირეზე R წმინდა აქტიურ წინააღმდეგობამდე მცირდება. განვიხილოთ ფილტრის

მახასიათებელი ორი ძირითადი პარამეტრი - მისი Q ვარგისიანობა და δ სიხშირის ფარდობითი გადახრა.



ნახ. 1. ერთ სიხშირეზე აწყობილი პარალელური ჩართვის ფილტრის სქემა ა) და მისი გამტარებლობის მახასიათებელი ბ)

იმისთვის რომ გამოვსახოთ ფილტრის სრული წინააღმდეგობა Q - ს და δ -ს საშუალებით, დავადგინოთ შემდეგი თანაფარდობები:

$$\omega = \omega_n(1 + \delta) \quad (2)$$

$$\omega_n = 1/\sqrt{LC}, \quad (3)$$

სადაც ω_n - არის აწყობის კუთხური სიხშირე, რად/წმ.

კონდენსატორის ან ინდუქტიურობის კოჭას რეაქტიული წინააღმდეგობა რეზონანსულ სიხშირეზე ტოლია:

$$X_{0n} = \omega_n L = 1/(\omega_n C) = \sqrt{L/C} \quad (4)$$

მაშინ შეიძლება ჩაიწეროს

$$Q = X_0/R \quad (5)$$

$$C = 1/(\omega_n X_0) = 1/(\omega_n RQ) \quad (6)$$

$$L = X_0/\omega_n = RQ/\omega_n \quad (7)$$

სადაც R არის კონდენსატორი ან ინდუქტიურობის კოქას აქტიური წინააღმდეგობა რეზონანსულ სიხშირეზე.

(2), (6) და (7) გამოსახულებების (1)-ში ჩასმისას მივიღებთ ფილტრის სრულ წინააღმდეგობას:

$$Z_{\Phi} = R \left[1 + jQ\delta \left(\frac{2+\delta}{1+\delta} \right) \right]$$

თუ გავითვალისწინებთ რომ δ ერთზე გაცილებით მცირეა მივიღებთ:

$$Z_{\Phi} \approx R(1+j2\delta Q) = X_0(Q^{-1} + j2\delta);$$

$$|Z_{\Phi}| \approx R(1 + 4\delta^2 Q^2)^{1/2}$$

ფილტრების ანგარიშისას დროს შედარებით მოხერხებულია გამოვიყენოთ სრული გამტერებლობის მიხედვით შედგენილი გამოსახულება:

$$Y_{\Phi} \approx \frac{1}{R(1+j2\delta Q)} = G_{\Phi} + jB_{\Phi}$$

სადაც

$$G_{\Phi} = \frac{Q}{X_0(1+4\delta^2 Q^2)} ;$$

$$B_{\Phi} = \frac{2\delta Q^2}{X_0(1+4\delta^2 Q^2)}$$

მაზვის ჰარმონიკა ფილტრის მომჭერებზე

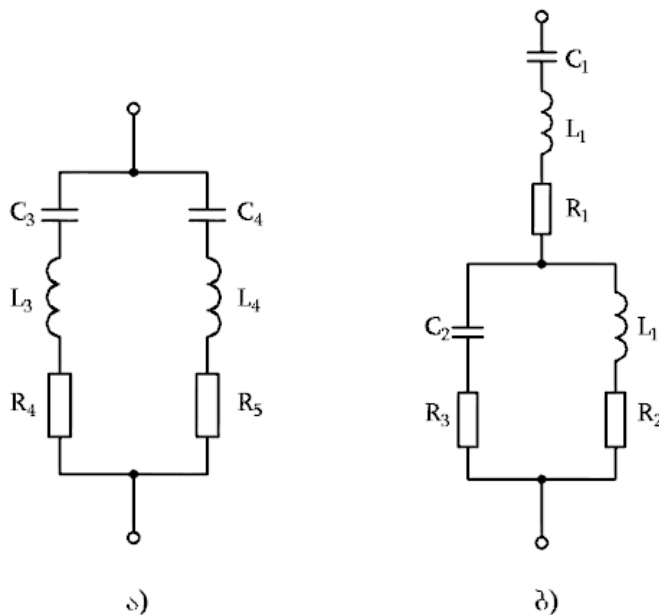
$$U_n = \frac{I_n}{|Y_{\phi n} + Y_{cn}|} = \frac{I_n}{|Y_n|} \quad (8)$$

სადაც $Y_{\phi n}$ არის ფილტრის სრული გამტარობა; Y_{cn} - ცვლადი დენის სისტემის სრული გამტარობა.

მაშასადამე, იმისთვის რომ შევამციროთ მაზვის მრუდის ფორმის დამახინება, საჭიროა გავზარდოთ წრედის ჯამური გამტარობა.

ორმაგი სიხშირის აწყობის ფილტრების (ორ სიხშირეზე აწყობილი ფილტრების) სქემა მოცემულია ნახ. 2-ზე.

$$C_1 = C_a + C_6; \quad (9)$$



ნახ. 2. ორმაგი სიხშირის აწყობის ფილტრები. (ა) –ორი ერთსიხშირიანი ფილტრი; ორმაგი გამართვის ფილტრად (ბ) –ორმაგი სიხშირის ფილტრი

ავტომატური გამართვის ფილტრები.

ავტომატური გამართვის ფილტრების დამუშავებისას სასურველია უზრუნველყოფილი იქნეს სიხშირის მაქსიმალური გადახრის შემცირება, რაც შესაძლებელია განხორციელდეს ტევადობის ავტომატური გამორთვით ან ინდუქტიურობის შეცვლის საშუალებით. პრაქტიკული ანგარიშებისას, უმრავლეს შემთხვევაში, დასაშვებ გადახრად დასაშვებად ითვლება სიხშირის $\pm 5\%$ –იანი რეგულირება.

ავტომატური გამართვის ფილტრებს ფიქსირებული სიხშირის მქონე ფილტრებთან შედარებით შემდეგი უპირატესობები გააჩნიათ:

- კონდენსატორების ნაკლები ტევადობა;
- სიმძლავრისა და ელექტროენერგიის დანაკარგები.

ფართოზოლური ფილტრები.

აღნიშნულ ფილტრებს ზემოთ განხილულ ფილტრებთან შედარებით გააჩნიათ შემდეგი ღირებულებები:

- ნაკლები მგრძობელობა ტემპერატურის, სიხშირის გადახრის, ტევადურ ელემენტებში დანაკარგებისა და სხვა ცვლილებებისადმი;
- ჰარმონიკების ფართო სპექტრისადმი მცირე წინააღმდეგობა, ფილტრის პარალელურ განშტოებებზე დაშლის აუცილებლობის არარსებობა, რაც იწვევს გართულებებს გადართვებისა და მომსახურების დროს;
- მოხერხებულობა ექსპლუატაციის პირობებში.

ფართოზოლური ფილტრების ტიპები.

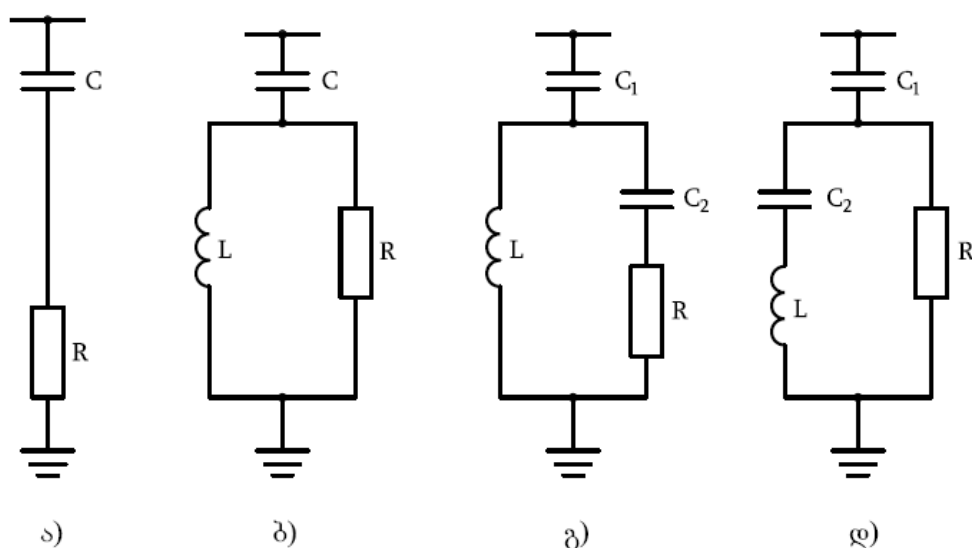
არსებობს ჩამქრობი ფილტრების ოთხი ტიპი: პირველი, მეორე, მესამე რიგის და C - ტიპის (ნახ. 3). პირველი რიგის ფილტრი გამოიყენება იშვიათად, ვინაიდან იგი საჭიროებს დიდი სიმძლავრის კონდენსატორს, ხოლო სიმძლავრის დანაკარგი ძირითად სიხშირეზე დიდია. მეორე რიგის ფილტრი მოხერხებულია ექსპლუატაციისას, მაგრამ მისი სიმძლავრის დანაკარგი ძირითად სიხშირეზე, მესამე რიგის ფილტრთან შედარებით, დიდია. მესამე რიგის ფილტრის უპირატესობებია იმაში მდებარეობს, რომ ძირითად სიხშირეზე სიმძლავრის დანაკარგი მცირეა (მეორე რიგის ფილტრთან შედარებით), ეს კი განპირობებულია ამ სიხშირეზე დიდი სრული წინააღმდეგობით C_2 ტევადობის არსებობის შედეგად, რომელიც გაცილებით ნაკლებია C_1 ტევადობაზე. C - ტიპის ფილტრის ძირითადი უპირატესობებია არის ძირითად სიხშირეზე სიმძლავრის არსებითად ნაკლები დანაკარგი იმის გამო, რომ ამ სიხშირეზე C_2 და L გამართულნი არიან თანამიმდევრულად. ეს ფილტრები ბევრად უფრო მგრძობიარეები არიან ძირითადი სიხშირისა და ელემენტების პარამეტრების გადახრის ცვლილებებისადმი. ქვემოთ მოცემული ფართოზოლური მაღალსიხშირული ფილტრების სქემები (ნახ.3):

ფართოზოლური ფილტრების მოქმედების პრინციპი განხილულია და დეტალურად აღწერილი [3]. შესაბამისად, გამოყენებულია შემდეგი პარამეტრები:

$$f_0 = 1/(2\pi CR); \quad (10)$$

$$m = L/(R^2C). \quad (11)$$

ჩვეულებრივ $m = (0,5 - 2)$ დიაპაზონში მდებარეობს.



ნახ. 3. ფართოზოლური მადალსიხშირიანი ფილტრების სქემები: ა) - პირველი რიგის, ბ) - მეორე რიგის, გ) - მესამე რიგის, დ) - C - ტიპის

ჩამქრობი ფილტრის სრული გამტარობის აქტიური და რეაქტიული მდგენლები შეიძლება ჩავწეროთ:

$$G_\phi = m^2 x^4 / [R_1((1 - mx^2)^2 + m^2 x^2)]; \quad (12)$$

$$B_\phi = \frac{x}{R_1} \frac{1 - mx^2 + m^2 x^2}{(1 - mx^2)^2 + m^2 x^2}, \quad (13)$$

სადაც

$$x = f / f_0.$$

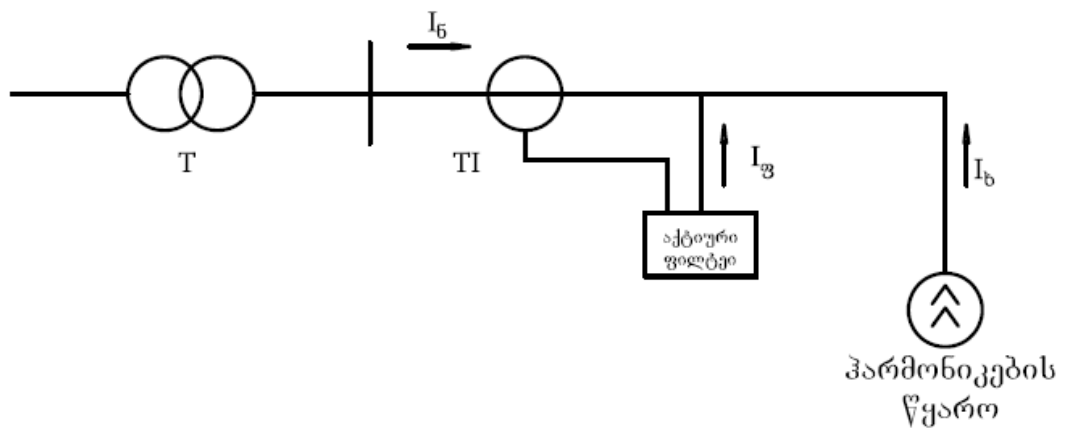
ფილტრისა \underline{Y}_ϕ და ცვლადი დენის სისტემის \underline{Y}_{CN} საერთო გამტარობის მინიმალური მნიშვნელობის დამოკიდებულება შეიძლება ჩავწეროთ:

$$Y = B_\phi \cos \varphi_m + G_\phi \sin \varphi_m, \quad (14)$$

ამასთან განტოლების (13) ორივე წევრი ნულზე მეტია, ხოლო x მნიშვნელობა ნაკლებია $\operatorname{ctg} \varphi_\phi = G_\phi / B_\phi = \operatorname{tg} \varphi_m$. მნიშვნელობაზე. X -ის დიდი მნიშვნელობებისთვის მინიმალური საერთო გამტარობა ფილტრის გამტარობის ტოლია ($\underline{Y}_{CN} = 0$).

აქტიური ფილტრები.

ბოლო წლებში პრაქტიკაში უფრო მეტად გამოყენება აქტიური ფილტრები. აღნიშნული ფილტრები საშუალებას იძლევიან გაფილტრონ უმაღლესი ჰარმონიკები, აგრეთვე შეუძლიათ რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსირება და ძაბვის ვარდნების შემცირება (ნახ. 4).



ნახ. 4. აქტიური ფილტრის ქსელში ჩართვის სქემა

აქტიური ფილტრი აკონტროლებს დატვირთვის დენს დროის რეალურ მასშტაბში. მიღებული და დამუშავებული ინფორმაციის საფუძველზე სასიგნალო პროცესორი მართავს დენის წყაროს, რომელიც გენერირებს I_3 დენს ქსელში, რომლის მნიშვნელობაც დროის ყველა მომენტში ტოლია იდეალური სინუსოიდის დენისა და დატვირთვის დენის

გრაფიკის სხვაობის. შედეგად მიღებული დენი თავისი ფორმით ძალიან ახლოს არის იდეალურ სინუსოიდურ მრუდესთან. მაღალი სიზუსტე და ფილტრის მრავალფუნქციური მუშაობა მიიღწევა მიკროპროცესორის მეშვეობით საკონტროლო ჯაჭვში. აქტიურ ფილტრებს, პარალელურ რეზონანსულ ფილტრებთან შედარებით, გააჩნიათ შემდეგი უპირატესობები:

- სამუშაო რეჟიმში დარღვევების არარსებობა, რაც დაკავშირებულია კონდენსატორული ბატარეების საფეხუროვან ჩართვასთან;
- რეაქტიული სიმძლავრის უწყვეტი კომპენსაცია მოხმარებული რეაქტიული სიმძლავრის ცვლილებების მთელ დიაპაზონში;
- ერთდროულად 20-მდე ჰარმონიკის ფილტრაციის შესაძლებლობა;
- 2 500 ჰერცამდესიხშირის ფილტრაციის შესაძლებლობა;
- ფილტრის გადატვირთვის შეუძლებლობა;
- ფილტრირების პარამეტრების პროგრამირებადობა და სიხშირეების თავისუფალი არჩევანი.

თავი II. ელექტრომომარაგების ქსელის ელემენტებში წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების წარმოქმნის მიზეზების გამოკვლევა

2.1. მაღელი რიგის ჰარმონიკების წარმოქმნის ელექტრომომხმარებლების ელექტრომიმღებები

ელექტრომომარაგების ქსელის ელემენტებში მრკ-ები ქსელის ელემენტებში (საკაბელო და საჰაერო ელექტროგადამცემი ხაზები, ძალოვანი ტრანსფორმატორები) ელექტროტექნოლოგიური დანადგარის მოქმედების პრინციპისა და მუშაობის რეჟიმის შედეგად დამახინჯებული დატვისთვის დენის გავლის შედეგად გამოწვეული დამახინჯებული ძაბვის შედეგად წარმოიქმნება.

აქედან გამომდინარე, მაღალი რიგის ჰარმონიკებს წარმოქმნიან ის ელექტრომიმღებები, რომელთაც დამახინჯებული ფორმის დატვირთვის დენი გააჩნიათ.

მაღალი რიგის ჰარმონიკებს წარმოქმნიან ელექტრორკალურ განმუხტვის პრინციპზე დაფუძნებული ელექტროტექნოლოგიური დანადგარები (მუდმივი და ცვლადი დენის ელექტრული შედუღების აპარატები, მუდმივი და ცვლადი დენის ელექტრორკალური ღუმელები, ელექტროპლაზმური გახურებისა და საჭრელი დანადგარები და ა.შ.), ავტომატიზირებული ელექტრული ამძრავები (მუდმივი დენის ტირისტორული გარდამსახ-ძრავას სისტენაზე აგებული ამძრავები, ცვლადი დენის სიხშირულ-რეგულირებადი ელექტრული ამძრავები, ვენტილური ელექტრული ამძრავები და ა.შ.), გაზური განმუხტვის პრინციპზე და შუქდიოდებზე შესრულებული ელექტრული განათების ხელსაწყოები, მართვადი გამმართველებით აღჭურვილი ელექტროქიმიური და ელექტრომექანიკური დანადგარები.

მნიშვნელოვანია, რომ ზემოთ ჩამოთვლილი ელექტრომიმღებების მიერ წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრის პარამეტრები მნიშვნელოვნად განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან. უფრო მეტიც, რიგი

ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების მიერ წარმოქმნილი მრკ-ების სპექტრი მუშაობის მთელი პერიოდისათვის უცვლელი პარამეტრებისაა, ხოლო რიგი ელექტრომიმღებების სპექტრის პარამეტრები დამოკიდებულია დანადგარის მუშაობის რეჟიმზე. ცვალებადი პარამეტრების დანადგარებს მიეკუთვნება ელექტრორკალურ განმუხტვის პრინციპზე დაფუძნებული ელექტროტექნოლოგიური დანადგარები და მართვადი გამმართველებით აღჭურვილი ელექტროტექნოლოგიური დანადგარები.

2.2. ძაბვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების ელექტრომიმღებებზე ზეგავლენის შეფასება

ელექტრომომარაგების ქსელში ჩართული მომხმარებელთა ეტდ-ების ემთ-ის უზრუნველყოფის ღონისძიებების დამუშავებისას აუცილებელია ჩატარებული იქნეს ელექტრომომარაგების ქსელის ელემენტებსა და ელექტრომიმღებებში მიმდინარე ელექტროდინამიკური პროცესების მეცნიერული საფუძვლი გამოკვლევა და შესწავლა [2].

ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს ელექტრომომარაგების ქსელში ჩართული განსხვავებული მუშაობის რეჟიმების მქონე ელექტრომიმღებების დატვირთვის დენის მრუდის ფორმის დამახინჯების ხარისხის შესწავლა, დამახინჯებული დენის შედეგად ელექტრომომარაგების ქსელში წარმოქმნილი ძაბვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრის პარამეტრების განსაზღვრა, ჰარმონიკების ელექტრომიმღებებზე ზემოქმედების დადგენა.

ელექტრომომარაგების ქსელში ჩართული მომხმარებელთა ეტდ-ების ემთ-ის უზრუნველყოფის ღონისძიებების დამუშავებისას აუცილებელ პირობას ელექტრომომარაგების ქსელის ელემენტებსა და ელექტრომიმღებებში მიმდინარე ელექტროდინამიკური პროცესები შესწავლა და მათ მიერ ქსელში წარმოქმნილი ჰარმონიკების სპექტრის პარამეტრების დადგენა წარმოადგენს [3,59]. ამ მიზნით, ლაბორატორიულ პირობებში, გამოვლელულ იქნა განსხვავებული

მოქმედების პრინციპზე დაფუძნებული და მუშაობის რეჟიმის მქონე ყველა სახასიათო ელექტროტექნოლოგიური დანადგარის დატვირთვის დენის ფორმის დამახინჯების შედეგად ქსელში წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრი. ანალიზატორიდან მიღებული გაზური განმუხტვის სინათლის წყაროს ჰარმონიკების სპექტრი წარმოდგენილია ნახ.5 - ზე.

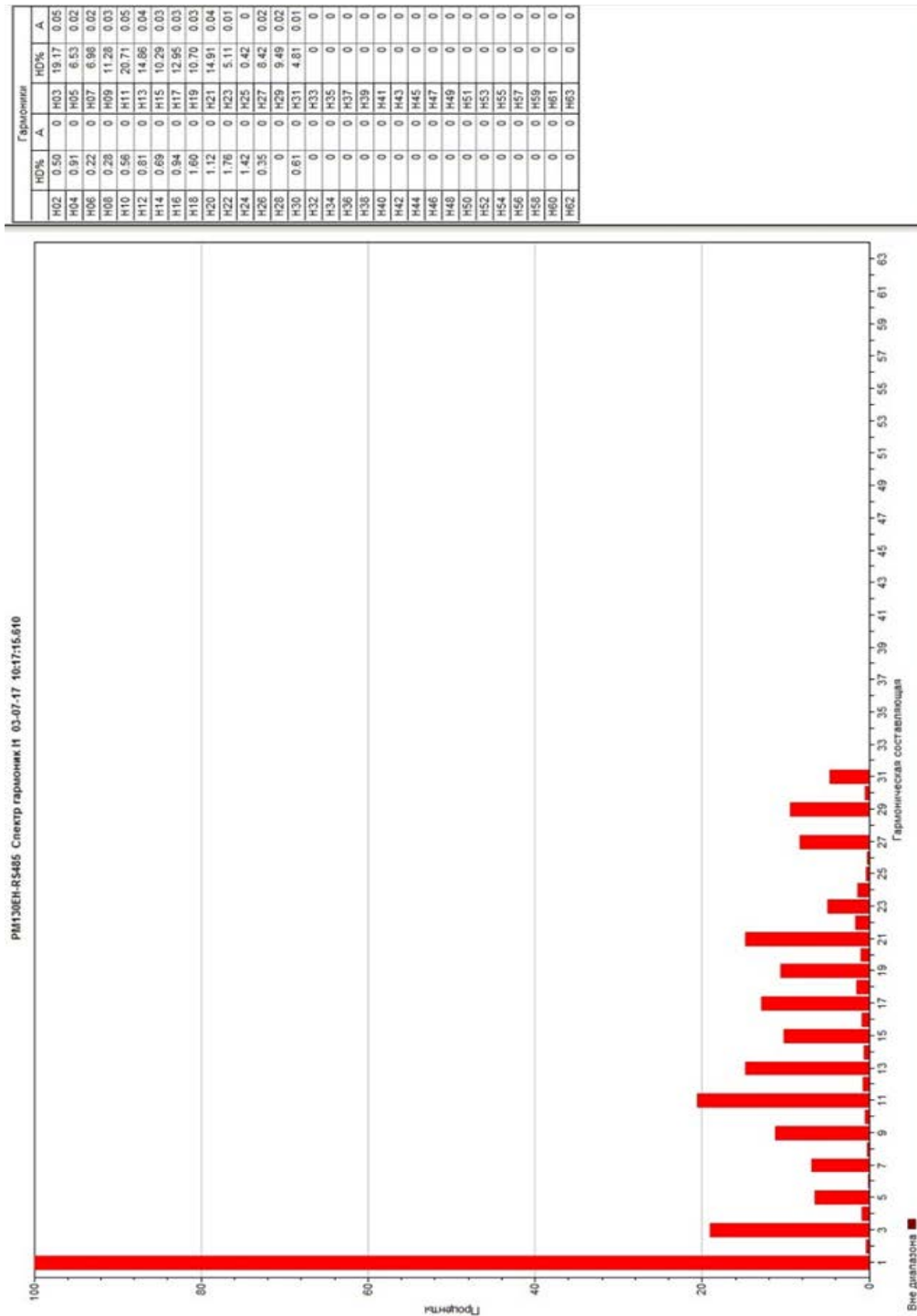
ელექტრომომარაგების სისტემებში მომხმარებელთა ემთ-ის უზრუნველყოფისას გადამწყვეტი როლი ენიჭება ემდ-ის ჩახშობასა და შესუსტებას. უნდა აღინიშნოს, რომ ელექტრომომარაგების სისტემებში რომლებიც აგებულია ემთ-ის მთხოვნების გარეშე, დაბრკოლებისგან დაცვის მოწყობილობა უნდა დაიდგას, უშუალოდ იმ ელექტრომიმღებთან რომელთა მუშაობაზეც განსაკუთრებულ ზემოქმედებას ახდენს ემდ [4].

აღსანიშნავია, რომ ყოველ ელექტრომიმღებს ქსელში არსებული ძაბვის მაღალი რიგის ცალკეული სიხშირის ჰარმონიკის მიმართ განსხვავებული მგრძობიარობა გააჩნია, რომელსაც ელექტრომიმღების ელექტრულ წრედში ჩართული ელემენტების (აქტიური ინდუქტიური და ტევადური) თანაფარდობა განაპირობებს [5]. შესაბამისად, ზოგიერთი ელექტრომიმღების მგრძობიარება დამოკიდებულია ჰარმონიკის სიხშირეზე და ზოგიერთის - არა. მაგალითად, ტევადური დატვირთვის მქონე (სტატიკური კონდენსატორის შემცველი) ელექტრომიმღების მგრძობიარება ძაბვის მაღალი რიგის ჰარმონიკის სიხშირის პროპორციულად იზრდება, ინდუქტიურის მცირდება, ხოლო აქტიურის - ჰარმონიკის სიხშირეზე დამოკიდებული არაა.

ტევადური დატვირთვის მქონე ელექტრომიმღების მგრძობიარობის გაზრდა გამოწვეულია იმით, რომ კონდენსატორის გამტარებლობა ძაბვის სიხშირის პირდაპირპროპორციულად იზრდება:

$$Y_C = \omega C,$$

სადაც ω – ქსელის ძაბვის კუთხური სიჩქარეა, რად/წმ; \square - ელექტრომიმღების ჯამური ტევადობაა, მკვ), ხოლო ინდუქტიურობის პირიქეთ - ქსელის ძაბვის



ნახ. 5. გაზური განმუხტვის სინათლის წყაროს ჰარმონიკების სპექტრი

სიხშირის უკუპროპორციულია ($Y_L=1/\omega L$, სადაც L ელექტრომიმღების ჯამური ინდუქტიურობაა, ჰნ).

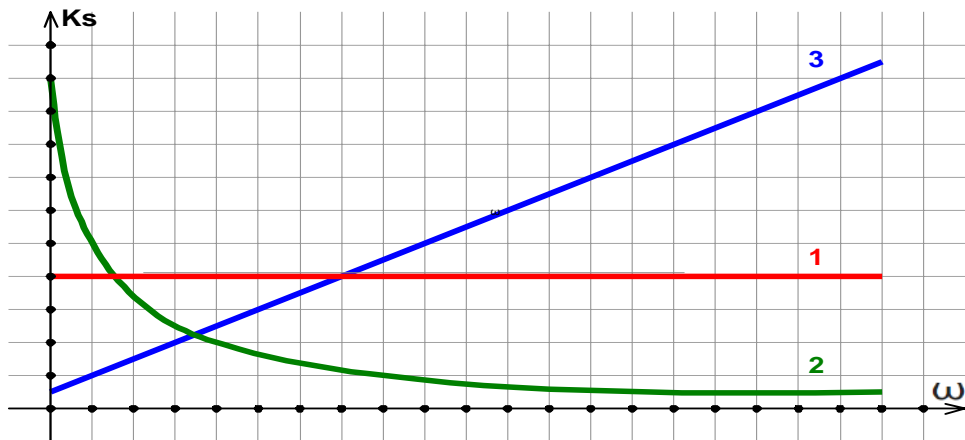
ცალკეული ელექტრომიმღების კონკრეტული რიგის ჰარმონიკის მიმართ მგრძნობიარების დონის შესაფასებლად შემოთავაზებულია “ელექტრომიმღების ჰარმონიკის მიმართ მგრძნობიარების კოეფიციენტი” (ემჰმკ):

$$K_{SI} = \varphi(\omega_i). \quad (15)$$

აღსანიშნავია, რომ ემჰმკ ფაქტიურად ელექტრომიმღების კონკრეტული ჰარმონიკის სიხშირის მიმართ გამტარებლობას წარმოადგენს და სპექტრში შემავალი ყოველი ჰარმონიკის მიმართ განსხვავებულია. შესაბამისად, შემოღებულია “ელექტრომიმღების ჰარმონიკების სპექტრის მიმართ მგრძნობიარების მახასიათებელი” და იგი წარმოადგენს ჰარმონიკის მიმართ მგრძნობიარების კოეფიციენტის დამოკიდებულებას ჰარმონიკის სიხშირეზე:

$$L_S = \psi(\omega_i). \quad (16)$$

ნახ. 6 – ზე მოცემულია აქტიური, ინდუქტიური და ტევადური ელემენტების მქონე ელექტრომიმღების მგრძნობიარობის მახასიათებლები.



ნახ. 6. ელექტრომიმღების ჰარმონიკების მიმართ მგრძნობიარების მახასიათებლები.

1-ინდუქტიური ელემენტების მქონე ელექტრომიმღების; 2-ინდუქტიური ელემენტების მქონე ელექტრომიმღების; 3 – ტევადური ელემენტების მქონე ელექტრომიმღების.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, რადგან ძაბვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრი მოიცავს ურთიერთ განსხვავებული ამპლიტუდური მნიშვნელობის სხვადასხვა სიხშირის ჰარმონიკებს (ნახ. 5), ამიტომ ყოველი სიხშირის ჰარმონიკის ელექტრომიმღებზე ზემოქმედება განსხვავებულია.

ცალკეული რიგის ძაბვის ჰარმონიკის ელექტრომიმღებზე ზემოქმედების დონის შეფასებისათვის შემოღებულია ეგრედ წოდებული - „ჰარმონიკის ზემოქმედების ეფექტის კოეფიციენტი (ჰზეკ)“:

$$K_{hi} = U_{mi} \omega_i , \quad (17)$$

სადაც U_{mi} –ჰარმონიკის მოქმედი მნიშვნელობის ამპლიტუდური მნიშვნელობაა, ვ.

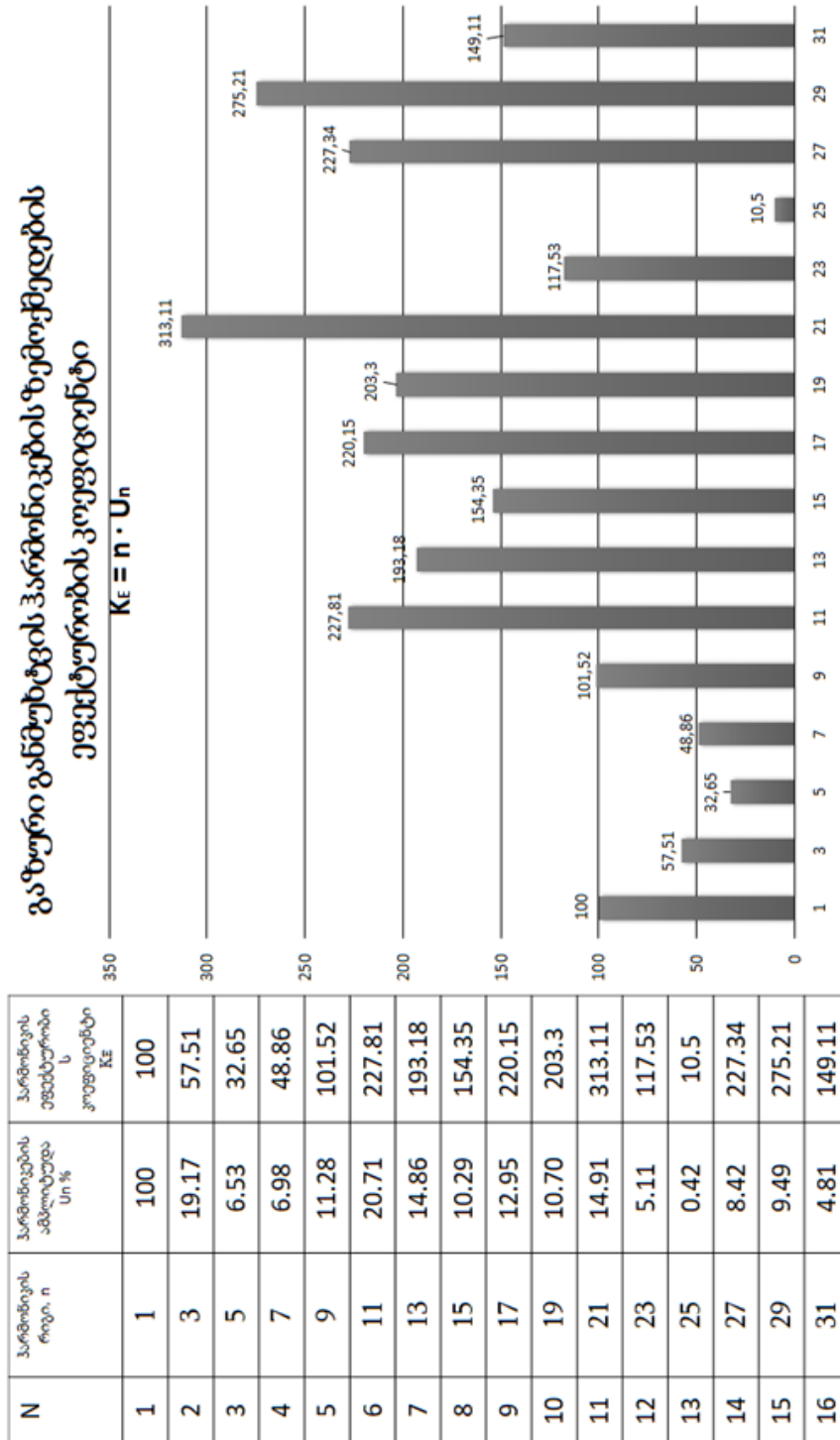
შემოთავაზებული მეთოდით (15), ანალიზატორებიდან მიღებული ტიპიური ელექტრომიმღებებისა, ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრისათვის განსაზღვრულია ჰზეკ და გაზური განმუხტვის სინათლის წყაროს ჰარმონიკების სპექტრისათვის. შედეგები გრაფიკული სახით წარმოდგენილია ნახ. 7 - ზე (სხვა დენმიმღებებისათვის ანგარიშის შედეგები მოცემულია დანართების სახით).

როგორც წარმოდგენილი გრაფიკიდან (ნახ. 7) სჩანს გაზური განმუხტვის სინათლის წყაროს ჰარმონიკების ზემოქმედების კოეფიციენტი დიდმნიშვნელოვნად ჰარმონიკის სიხშირეზეა დამოკიდებული.

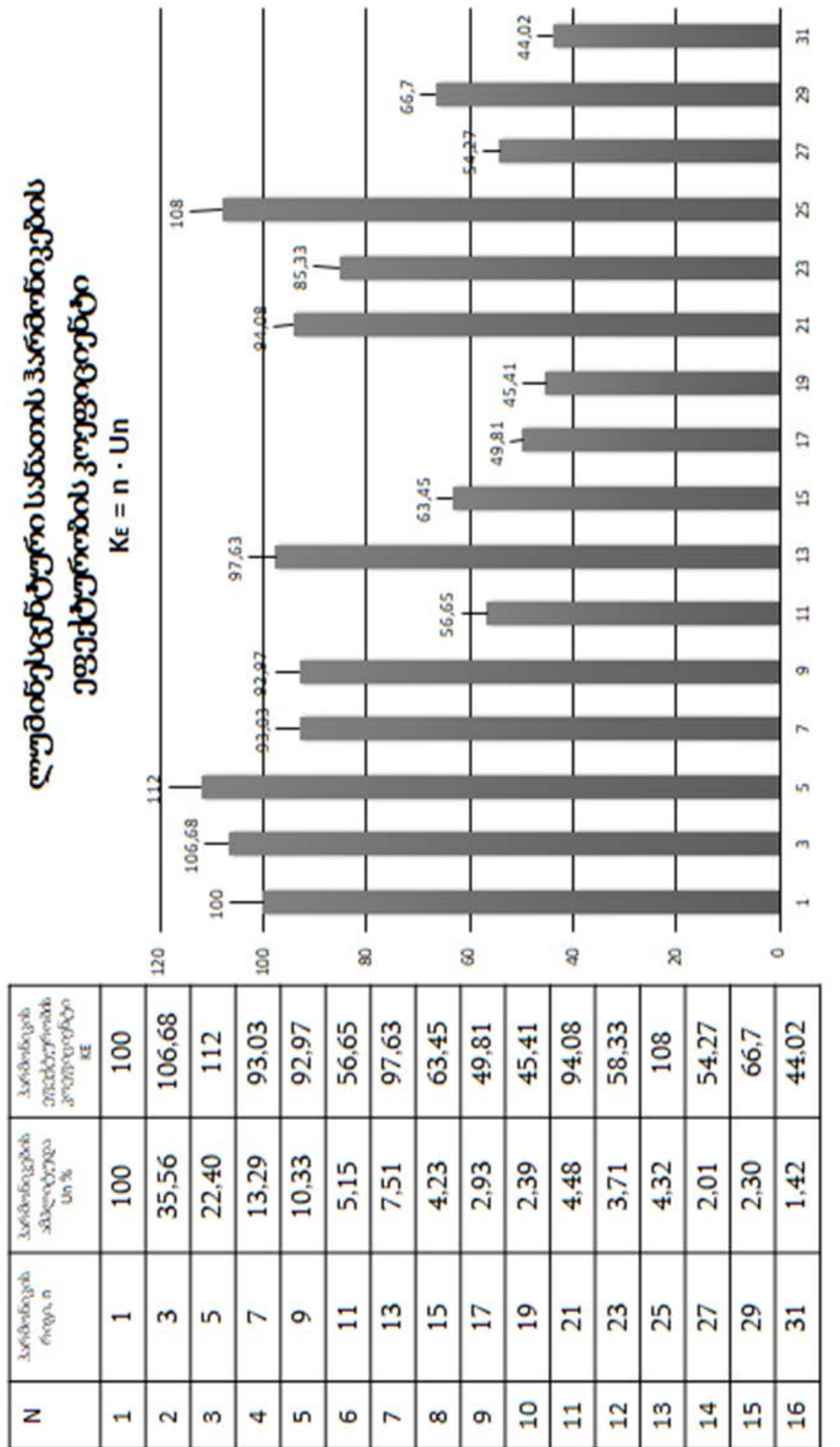
მაღალი სიხშირის სპექტრის თითოეული ჰარმონიკის ელექტრომიმღებზე ზემოქმედების დონის შეფასებისათვის შემოღებულია ეგრედ წოდებული - „ჰარმონიკის ზემოქმედების ეფექტი“ (ჰზე):

$$E_{hi} = K_{Si} U_{mi} \omega_i \cdot (18)$$

ხოლო, დამოკიდებული ემპირიკ-ს მქონეთათვის საჭიროა კონკრეტული მიდგომა.

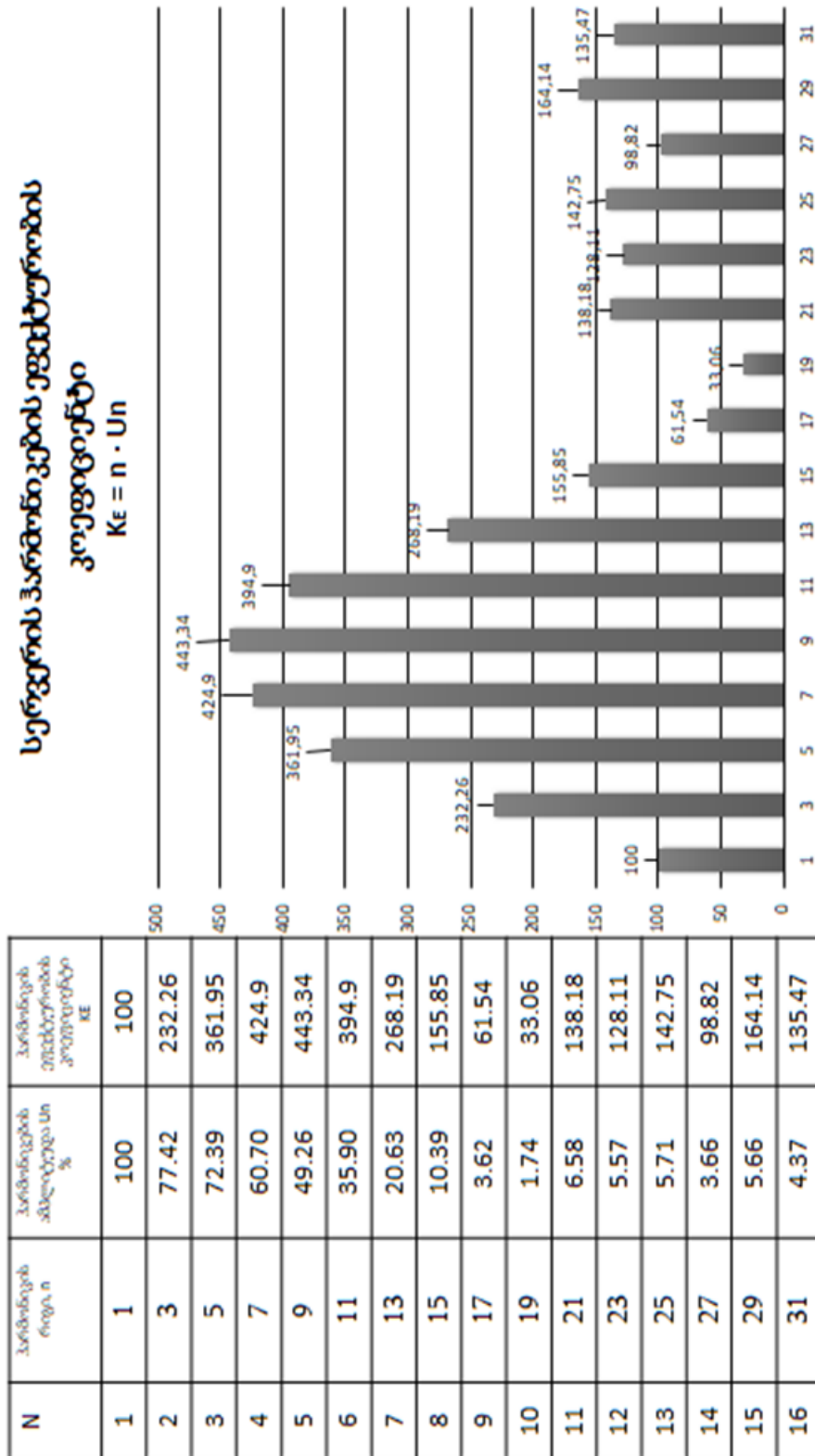


ნახ. 7. გაზური განმუხტვის სინათლის წყაროს ჰარმონიკების ზემოქმედების ეფექტურობის კოეფიციენტი



ნახ. 8. ლუმინესცენტური სინათლის წყაროს ჰარმონიკების ზემოქმედების ეფექტურობის კოეფიციენტი

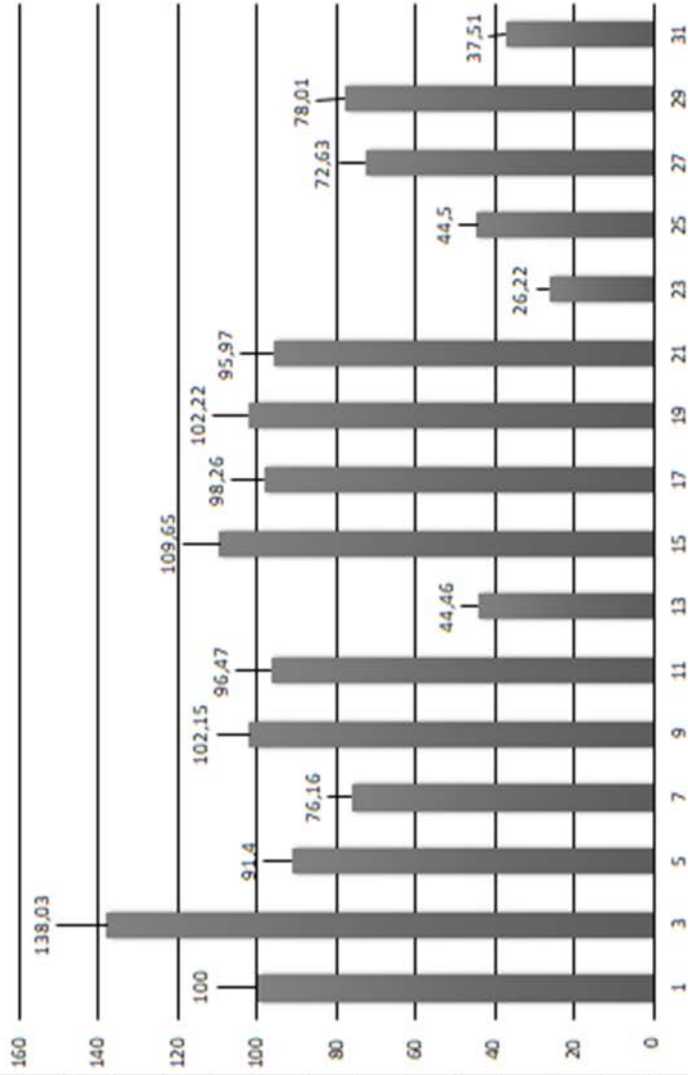
სერვერის ჰარმონიკების ეფექტურობის
კოეფიციენტი
 $KE = n \cdot Un$



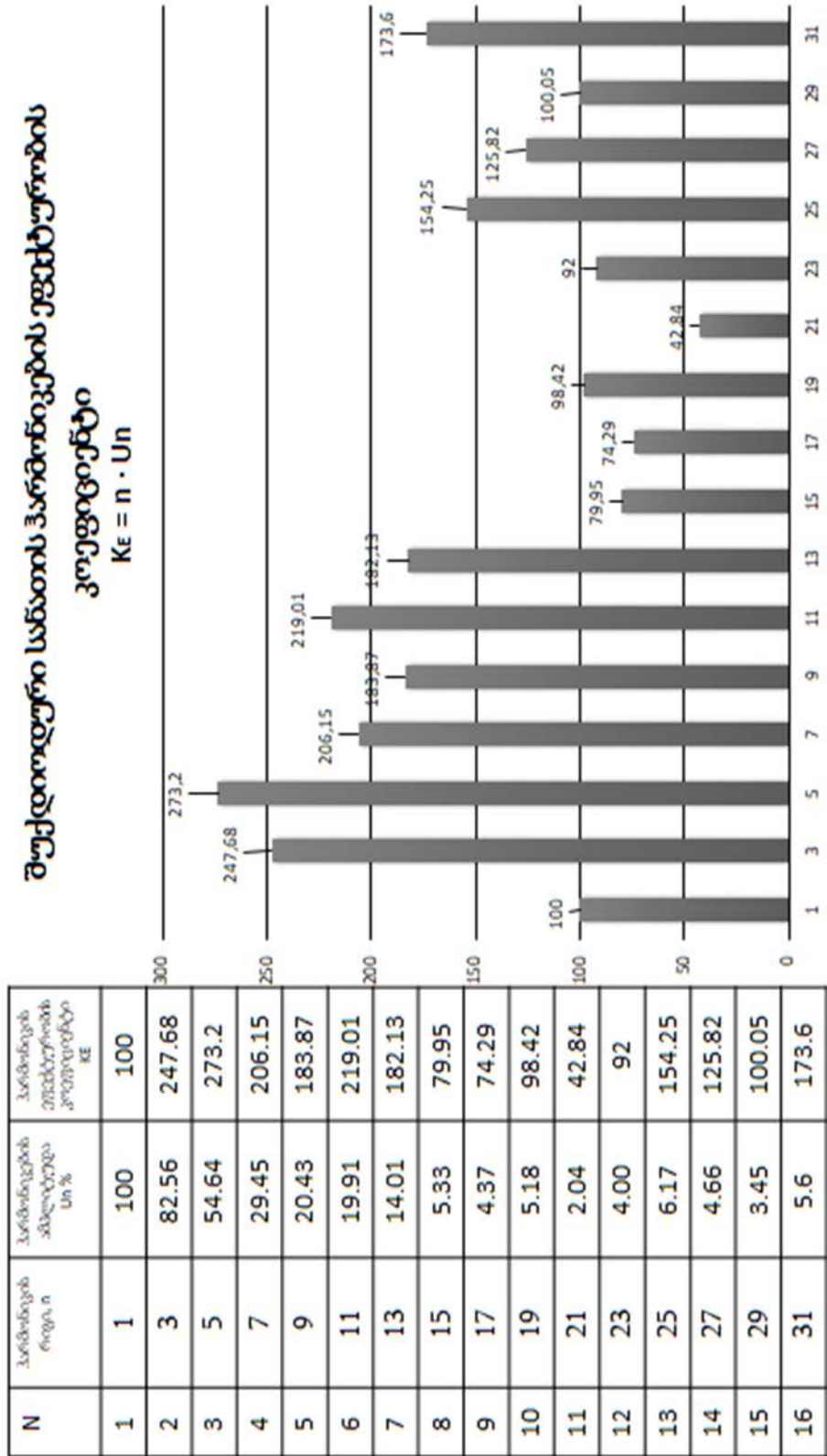
ნახ. 9. სერვერის ჰარმონიკების ზემოქმედების ეფექტურობის კოეფიციენტი

**ფერადი ტელევიზორის ჰარმონიკების ეფექტურობის
კოეფიციენტი**
 $K_e = n \cdot U_n$

N	ჰარმონიკის რაოდენობა, n	ჰარმონიკების ამალირება, Un %	ჰარმონიკების ეფექტურობის კოეფიციენტი, Ke
1	1	100	100
2	3	46.01	138.03
3	5	18.28	91.4
4	7	10.88	76.16
5	9	11.35	102.15
6	11	8.77	96.47
7	13	3.42	44.46
8	15	7.31	109.65
9	17	5.78	98.26
10	19	5.38	102.22
11	21	4.57	95.97
12	23	1.14	26.22
13	25	1.78	44.5
14	27	2.69	72.63
15	29	2.65	78.01
16	31	1.21	37.51



ნახ. 10. ფერადი ჰარმონიკების ზემოქმედების ეფექტურობის კოეფიციენტი



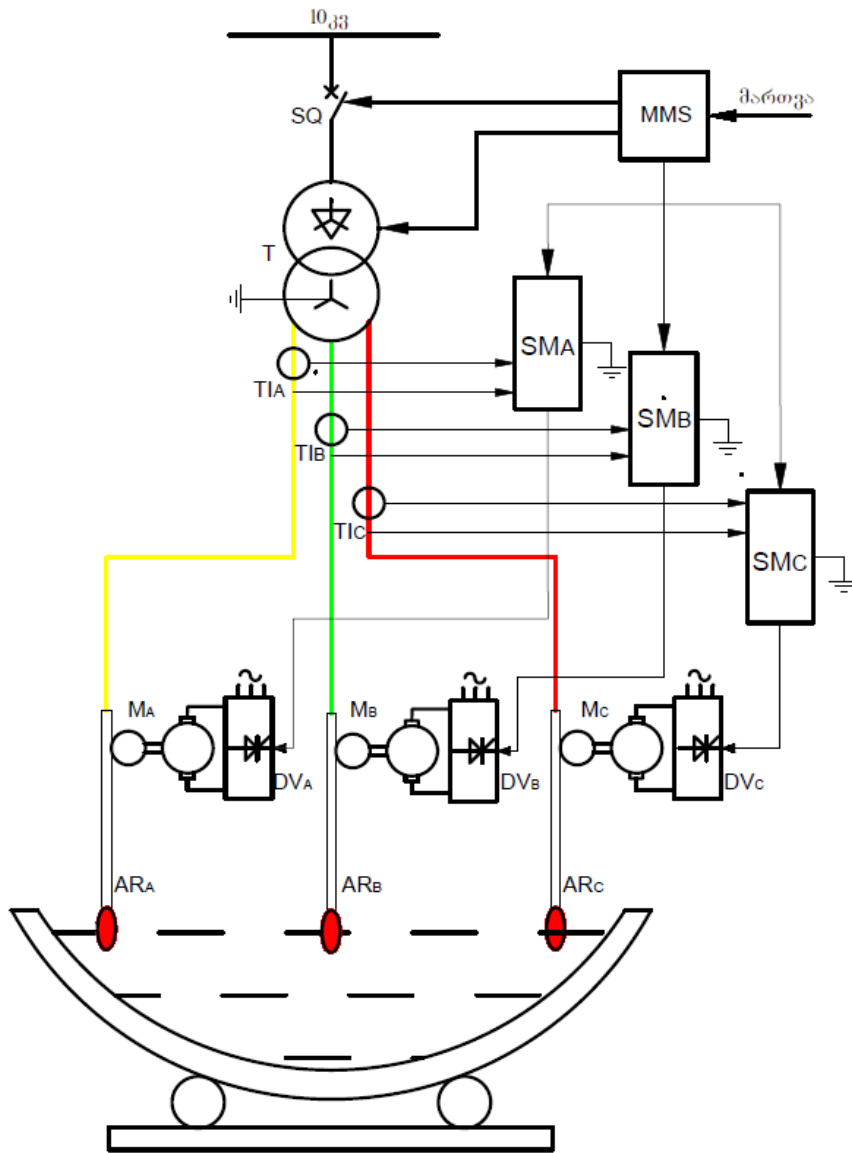
ნახ. 11. შუქდიოდური სინათლის წყაროს ჰარმონიკების ზემოქმედების ეფექტურობის კოეფიციენტი

2.3. ელექტრორკალური ღუმელის მუშაობის რეჟიმები და მათ მიერ ქსელში წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკები

ელექტრომომარაგების ქსელებში ყველაზე დიდი დონის ემდ-ებს ელექტრორკალური დანადგარები წარმოქმნიან [1,2]. რომელთაგან განსაკუთრებით რთული რეჟიმით გამოირჩევიან ფოლადსადნობი ელექტრორკალური ღუმელები (ერლ) გამოირჩევიან. ეს ღუმელები 0,4 დან 140 მეგავატამდე სიმძლავრის მზადდება [6]. ისინი სამფაზა ცვლადი დენის 6, 10, 35 და 110კვ ძაბვით იკვებებიან. ელექტრორკალური ღუმელები მოკლედშერთვის საექსპლუატაციო რეჟიმში მუშაობენ. შესაბამისად, ერლ-ის მუშაობის რეჟიმი მკვეთრად ცვალებადი, დენის დიდი პიკებით (ბიძგებით) ხასიათდება.

ქვემოთ მოცემულია ცვლადი დენის სამფაზა ფოლადსადნობი ელექტრორკალური ღუმელის ელექტროდების გადაადგილების მექანიზმის ელექტროამძრავის მართვის ფუნქციონალური სქემა (ნახ. 12). იგი მოიცავს შემდეგ ძირითად ელემენტებს: საღუმელე ტრანსფორმატორს, T; რკალურ ღუმელს; ძალური ამომრთველს SQ; ღუმელის ცენტრალურ მართვის სისტემას MMS; A, B და C ფაზის დენის ტრანსფორმატორებს TI_A , TI_B , TI_C ; A, B და C ფაზის ელექტროდებს AR_A , AR_B , AR_C ; A, B და C ფაზის ელექტროდების გადაადგილების მექანიზმის ელექტროამძრავის სისტემებს SM_A , SM_B , SM_C ; A, B და C ფაზის ელექტროდების გადაადგილების მექანიზმის ელექტროამძრავს M_A , M_B , M_C ; A, B და C ფაზის ელექტროდების გადაადგილების ელექტროამძრავის რევერსიულ ტირისტორულ გამმართველებს DV_A , DV_B , DV_C .

ღუმელის გაშვება და დნობის დენის რეგულირება შესაძლებელია MMS ცენტრალური მართვის სისტემიდან (ნახ. 12). დნობის დენის რეგულირება ხორციელდება ელექტროდებზე მიყვანილი ძაბვის საშუალებით საღუმელე ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილების ვარსკვლავური შეერთებიდან სამკუთხედზე და პირიქით გადართვით.



ნახ. 12. ელექტროკალური ღუმელის ავტომატური მართვის სისტემის ფუნქციონალური სქემა:

SQ-ძალური ამომრთველი; MMS-ცენტრალური მართვის სისტემა; T-სალუმელე ტრანსფორმატორი; TIA, TIB, TIC – A, B და C ფაზის დენის ტრანსფორმატორი; ARA, ARB, ARC – A, B და C ფაზის ელექტროდები; SMA, SMB, SMC – A, B და C ფაზის ელექტროდების გადაადგილების მექანიზმის ელექტროამბრავის მართვის სისტემა; MA, MB, MC – A, B და C ფაზის ელექტროდების გადაადგილების მექანიზმის ძრავა; DVA, DVB, DVC – A, B და C ფაზის ელექტროდების ელექტროამბრავის ტირისტორული გამმართველი; რკალური ღუმელი.

ყოველი ელექტროდი ვერტიკალური გადაადგილება ხორციელდება დამოუკიდებელი მექანიზმის საშუალებით, რომლებიც აღჭურვილია ტირისტორული გარდამსახ - ძრავას სისტემით შესრულებული,

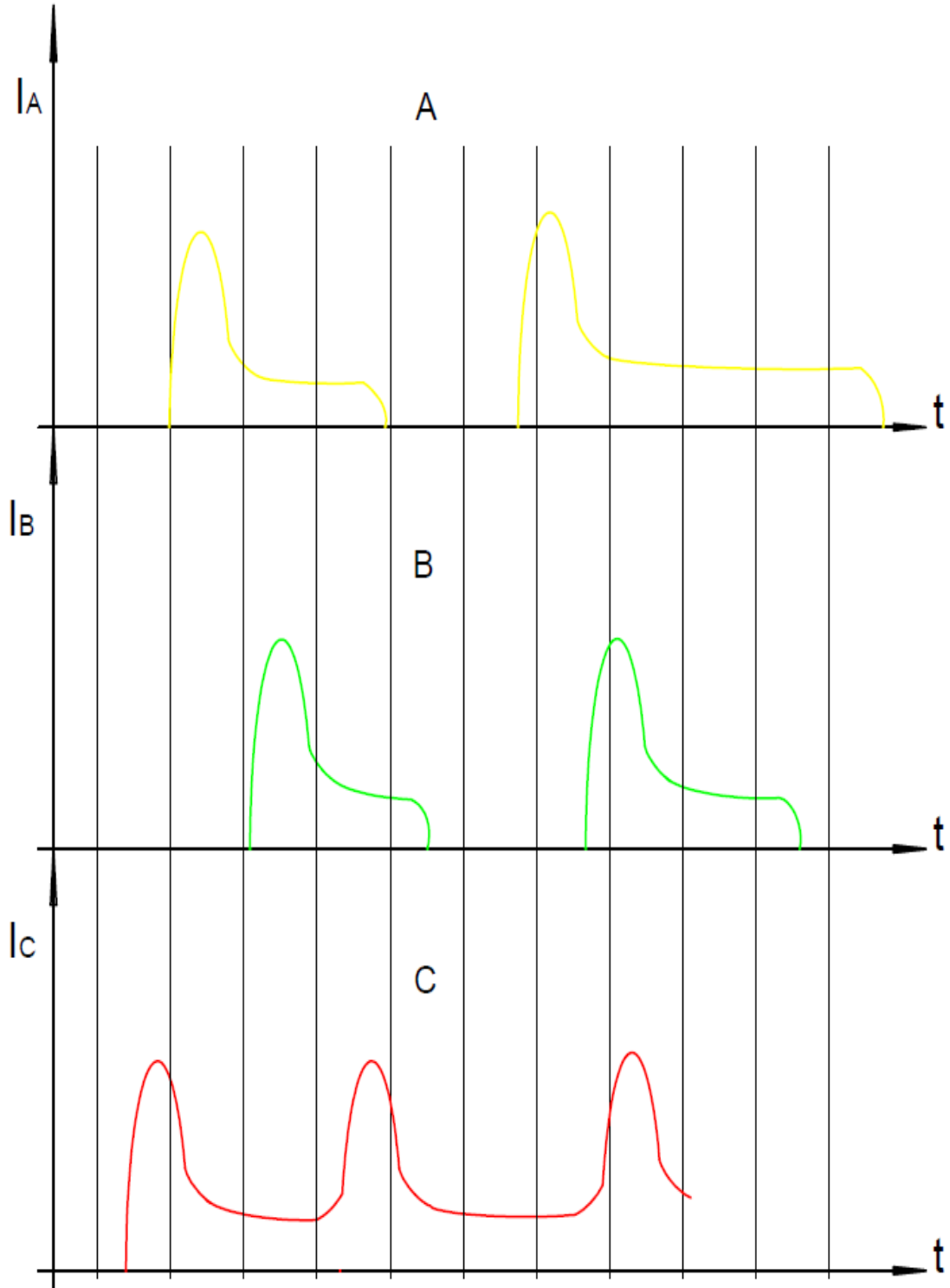
დაქვემდებარებული რეგულირების მართვის სისტემის მქონე მუდმივი დენის დამოუკიდებელი რევერსიული ელექტრული ამძრავით. ყოველი ამძრავის ტრისტორული გამმართველის (DV_A , DV_B , DV_C) მართვისათვის გამოყენებულია დამოუკიდებელი მართვის სისტემა (SM_A , SM_B , SM_C).

ელექტროდების ავტომატური მართვა დაფუძნებულია ელექტროდში გამავალი დენისა და ელექტროდსა და ღუმელში მოთავსებული კაზმს შორის არსებული ძაბვის ცვლილებაზე. კერძოდ: ელექტროდებზე ძაბვის მიწოდებისას (ნახ.12), რადგან ელექტროდი კაზმს არ ეხება, მათ შორის ელექტრული კავშირი არა არსებობს. შესაბამისად, საღუმელე ტრანსფორმატორიდან მიწოდებული ძაბვა მთლიანად მოდებულია სარკალე ღრეჩოზე და ელექტროდის წრედში დენი არ გაედინება. მაშასადამე, დენის ტრანსფორმატორის მეორადი დენი 0-ის ტოლია. ე.ი. ელექტროდის ელექტროამძრავის SM_A მართვის სისტემას მიეწოდება მაქსიმალური ძაბვისა და ნულოვანი დენის შესაბამისი ინფორმაცია. შესაბამისად, ელექტროდის ელექტრული ამძრავი ამოქმედდება და ელექტროდს მაქსიმალური სიჩქარით გადაადგილებს ქვევით მიმართულებით. ელექტროდის კაზმთან შეხებისას წარმოიქმნება საექსპლუატაციო მ. შ. და ძაბვა ელექტროდსა და კაზმს შორის შემცირდება მინიმუმამდე, ხოლო დენი გახდება მ.შ. დენის ტოლი. შედეგად, ელექტრული ამძრავი რევერსირდება და ელექტროდს გადაადგილებს ასწევის მიმართულებით. ელექტროდის გადაადგილება გაგრძელდება მანამ, სანამ ელექტროდსა და კაზმს შორის გაჩნდება ელექტრული რკალი. მ.შ. დენი შემცირდება რკალის დენის მნიშვნელობამდე და ძაბვა შემცირდება მინიმუმამდე (რკალზე ძაბვის ვარდნის მნიშვნელობამდე). ღუმელში მიმდინარე დნობის პროცესის შედეგად იზრდება სარკალე შუალედი (ღრეჩო). შესაბამისად, შეიცვლება რკალის პარამეტრები და ელექტრული ამძრავი ელექტროდს გადაადგილებს სარკალე ღრეჩოს ფუნქციაში. ე. ი. ელექტროდი მუდმივ მოძრაებაშია. რადგან, ლითონის დნობის პროცესი მიმდინარეობს არაერთგვაროვნად, ასევე ცალკეული

ფაზების დენები ცვლილება მიმდინარეობს არაერთდროულად. შესაბამისად, ელექტროდების მოკლედ შერთვა – რკალის მდგრადი დენის ნთება – ჩაქრობის ტექნოლოგიური ციკლი მიმდინარეობს ურთიერთ შეუთანხმებლად (არაერთდროულად). ამის გამო, ღუმელის მიერ ქსელის ელემენტებში გაედინება დიდ ფარგლებში ცვალებადი არასიმეტრიული დენი. ქსელში წარმოიქმნება ძაბვის არასიმეტრიული რეჟიმები. ელექტრორკალური ღუმელის ელექტროდებში გამავალი დენების მოქმედი მნიშვნელობის ცვლილების მრუდეები წარმოდგენილია ნახ. 13–ზე. ერლ–ის დენის რხევის შემთხვევითი პროცესი დნობის მთელი პერიოდის განმავლობაში არასტაციონალურია, რადგან დნობის მიმდინარეობისას მუდმივად იცვლება გამდნარი მასის მდგომარეობა და რკალის ნთების პირობები. ამასთან ერთად, იცვლება რკალის ძაბვა, დენი და სიმძლავრე [56].

თუ გავითვალისწინებთ, რომ დნობის პროცესის დამყარებულ რეჟიმში გამდნარი მასის მდგომარეობა დაბალი ტემპით იცვლება, მაშინ ერლ–ის მუშაობის ციკლი შეიძლება დაიყოს 2-5 წუთიანი ხანგრძლივობის ცალკეულ სტაციონალურ მონაკვეთებად [56].

ელექტროტექნოლოგიურ დანადგარებს შორის გაცილებით დიდი დონის ემდ–ებს ცვლადი დენის სამფაზა ფოლადსადნობი ელექტრორკალური ღუმელები წარმოქმნიან [57]. აღსანიშნავია, რომ წარმოქმნილ ემდ–ებს შორის დომინირებს ძაბვის გადახრა, ჩავარდნა და რხევა, აგრეთვე ძაბვის ფორმის არასინუსოიდალურობა და დინამიკური ასიმეტრიული რეჟიმი [62]. ფოლადსადნობ ერლ–ში განსაკუთრებით დიდი დონის დაბრკოლებები მყარი კაზმის დნობისას წარმოიქმნება, რადგან, ამ შემთხვევაში რკალის ანთების პროცესში მოკლედშერთვის დენები მძლავრი ბიძგებით ხასიათდება.



ნახ. 13. ელექტრორკალური ღუმელის დატვირთვის დენის მოკმედი მნიშვნელობის მრუდეები

ქვემოთ (ცხრ. 1) მოცემულია ფოლადსადნობი ელექტრორკალური ღუმელების მუშაობის რეჟიმების შედეგად მკვებავი გამანაწილებელი

მოწყობილობის სალტეზე წარმოქმნილი ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებების შედეგად გამოწვეული ძაბვის მაჩვენებლების გადახრა [7].

ცხრილი 1. ფოლადსადნობი ელექტრორკალური ღუმელების მუშაობის რეჟიმების შედეგად გამოწვეული ძაბვის მაჩვენებლების გადახრა

#	ღუმელის ძაბვა, კვ	ძაბვის გადახრა, %	ძაბვის რხევა, %	ძაბვის ფორმის დამახინჯება	ძაბვის ასიმეტრიულობა, %
1	6-10	-6 - +6	1,0 – 7,0	0,5 -5,0	1,0 – 6,0
2	35	-5 - +5	1,0 – 6,0	0,7- 4,0	0,5 – 5,0
3	110	-6 - +7	0,5 – 3,0	0,1 – 2,0	0,5 – 3,0

ძაბვის ანთების პროცესის გახანგრძლივება და მისი ვოლტ-ამპერული მახასიათებლების არახაზობრივობის შედეგად წარმოიქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრი მოიცავს როგორც კენტი (3, 5, 7, 9 და ა.შ.), აგრეთვე ლუწი (2, 4, 6, 8, და ა.შ) რიგის ჰარმონიკებს [7]. ამ ჰარმონიკების განსაზღვრის ზუსტი მათემატიკური გამოსახულებები არ არსებობს, რადგან მათი მნიშვნელობები შემთხვევით ხასიათს ატარებს და დამოკიდებულია ღუმელის პარამეტრებსა და მის მუშაობის რეჟიმზე.

ფოლადსადნობი ელექტრორკალური ღუმელების ექსპერიმენტული გამოკვლევების შედეგად მიღებული დენის ჰარმონიკების საშუალო მნიშვნელობები დნობის პროცესის სხვადასხვა მომენტისათვის მოცემულია ცხრილ 2-ში.

როგორც გამოკვლევების შედეგებიდან სჩანს [7] ერლ-ის მუშაობის რეჟიმების შედეგად ელექტრომომარაგების ქსელის ელემენტებში წარმოიქმნება სამი ურთიერთ მნიშვნელოვნად განსხვავებული პარამეტრების ჰარმონიკების სპექტრი განპირობებული ციკლის (მოკლედ – შერთვის – რკალის ნთებისა – პაუზის) დენებით. ამასთან ერთად, თვითოეულ ფაზაში სპექტრთა მონაცვლეობა მიმდინარეობს არა ერთდროულად.

**ცხრილი 2. ელექტრორკალური ღუმელების მიერ წარმოქმნილი მრკ-ების
საშუალო მნიშვნელობები**

სიმძლავრე კვტ	ჰარმონიკების ამპლიტუდები ძირითადი სიხშირის ძირითადი სიქშირის ამპლიტუდური მნიშვნელობის მიმართ							
	აქტიური სიმძლავრე	ძაბვა	3	5	7	9	11	13
	კვტ	კვ						
ДС-5-МТ	2800	6-10	3,7	2,4	0,9	0,6	0,4	0,3
			4,4	2,5	1,1	0,8	0,5	0,4
			4,2	3,2	1,0	0,7	0,5	0,4
			3,8	3,9	1,2	0,5	0,6	0,4
			3,5	3,7	1,0	0,6	0,4	0,3
			1,9	2,8	1,4	0,3	0,6	0,4
ДСП-25- Н01	9000	35	5,1	4,3	1,3	1,0	0,6	0,3
			12,3	5,7	1,1	0,9	0,4	0,3
			9,8	5,4	1,8	0,9	0,4	0,3
			7,2	5,7	2,7	1,2	0,6	0,4
			7,9	6,3	2,1	0,8	0,7	0,5
ДЧМ-100	2250	6-10	3,3	3,2	1,6	0,9	0,5	0,6
			3,6	3,0	0,8	0,4	0,5	0,5
			3,8	3,6	1,8	1,0	0,6	0,6
			5,3	3,8	1,9	0,9	0,6	0,4
			2,0	3,2	0,6	0,3	0,5	0,4
			0,6	1,6	0,4	0,3	0,4	0,5
			0,6	1,6	0,2	0,3	0,4	0,5

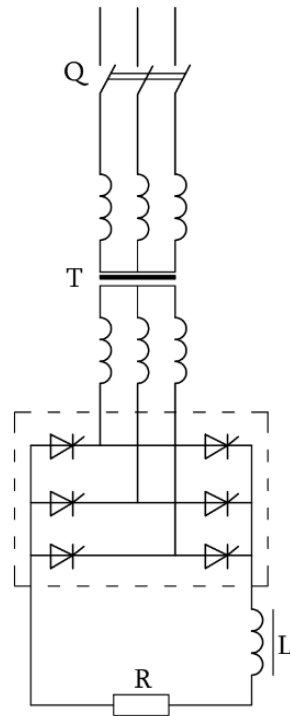
აღნიშნულიდან გამომდინარე ელექტრომომარაგების ქსელში ერლ-ის მიერ წარმოქმნილი მაღალი რივის ჰარმონიკების ჩახშობისათვის საჭიროა

თითოეული ფაზაში გამოყენებული იქნეს სხვადასხვა მინიმუმ სამ სიშირეზე აწყობილი სამი ურთიერთ განსხვავებული პარამეტრების მაკომპენსირებელი ფილტრების კომპლექტები. შესაბამისად, რადგან ელექტროდებში გამავალი დენები იცვლილება არა ერთდროულად, თითოეული ფაზის მაკომპენსირებელი ფილტრების კომპლექტების მართვა უნდა განხორციელდეს დამოუკიდებლად ფაზის დენის ფუნქციაში.

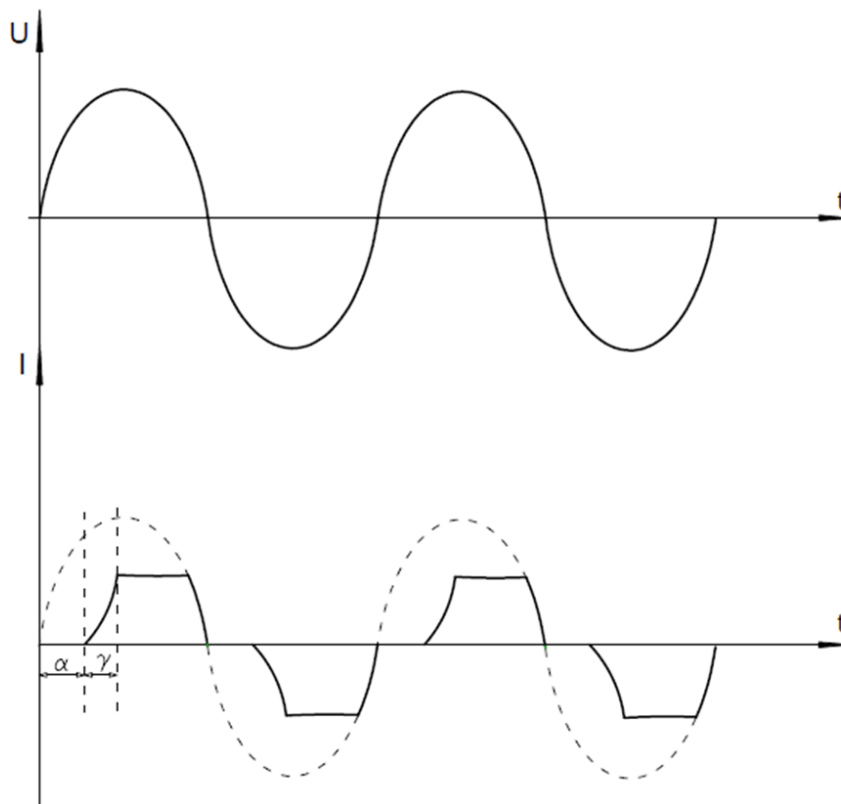
2.4. მართვადი გარდამქმნელით აღჭურვილი ეტდ-ის მუშაობის რეჟიმების მიერ ქსელში წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკები

ბოლო პერიოდში ელექტრომომარაგების სისტემაში ინტენსიურად მატულობს სამფაზა ბოგირული სქემით შესრულებული მართვადი გამმართველებით აღჭურვილი ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების ელექტრომომარაგების ქსელთან მიერთება. იგი განპირობებულია ნახევარგამტარული ხელსაწყოების (ტირისტორი, სიმისტორი და ა.შ.) ბაზაზე შესრულებული ერთფაზა და სამფაზა გამმართველების პრაქტიკაში ფართო დანერგვამ. თავის მხრივ, სამფაზა ბოგირული სხემით შესრულებული გარდამქმნელები მრავალბოგირული სქემების საფუძველს წარმოადგენს [1].

როგორც წესი, ელექტრომომარაგების ქსელთან მიერთებული გარდამქმნელები აქტიურ–ინდუქტიურ დატვირთვაზე მუშაობენ. ასეთ პირობებში, გარდამსახის მუდმივი დენის წრედში ჩართული უსასრულოდ დიდი ინდუქტიურობის (დროსელი, რეაქტორი) გამო, გარდამსახის ძალური ტრანსფორმატორის გრაგნილების ვარსკვლავი ვარსკვლავზე შეერთების ჯგუფის გათვალისწინებით (ნახ. 14), ქსელის ერთი ფაზის დატვირთვის დენის მრუდის ფორმას აქვს ნახ. 15-ზე წარმოდგენილი სახე.



ნახ. 14. გარდამსახის ძალური ტრანსფორმატორის გრაგნილების ვარსკვლავი ვარსკვლავზე შეერთების ჯგუფის გათვალისწინებით



ნახ. 15. დატვირთვის დენის მრუდის ფორმა

ელექტრომიმღებოს მიერ ელექტრომომარაგების ქსელის ელემენტებში განპირობებული დატვირთვის დენის მრუდის ფორმა დამოკიდებულია გარდამქმნელის იმპულსურ-ფაზური მართვის სისტემის მიერ ვენტილზე მიწოდებული მართვის სიგნალის გახსნის კუთხეზე α ტექნოლოგიური დანადგარის დატვირთვისა და კომუტაციის კუთხეზე γ კომუტაციის კუთხე განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$\gamma = \arccos(\cos\alpha - I_{d+} X_{k+}) \quad (19),$$

სადაც I_{d+} – გამართული დენის ფარდობითი (ნომინალური დატვირთვის მიმართ) მნიშვნელობაა; X_k – კომუტაციის კონტურის ინდუქტიური წინაღობის ფარდობითი მნიშვნელობა გარდამსახის ძალოვანი ტრანსფორმატორის სიმძიავრესთან მიყვანილი. ცხადია, არამართვადი გარდამქმნელებისათვის $\alpha=0$; $\cos \alpha=1$.

ქსელის მაღალი სიხშირის ჰარმონიკების რიგი (რიგითი ნომერი) განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$v = kp \pm 1 \quad (20)$$

სადაც p -გარდამსახის პულსირებაა; $K = 1; 2; 3; \dots$

ბოგირული გარდამსახისათვის რომელის $p=6, 5; 7; 11; 13; 17; 19 \dots$

$$I_{vm} = \sqrt{I_{va}^2 + I_{vp}^2} \quad (21)$$

(21) გამოსახულებიდან განისაზღვრება ძირითადი ჰარმონიკის დენის მნიშვნელობა

$$I_{va} = \frac{4I_d \sin\left(\frac{v\pi}{3}\right)}{\pi \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \sin\Psi} \left\{ \frac{\sin\left(\frac{v\gamma}{2}\right)}{v} \cos\alpha \sin\alpha v\Psi + \frac{\cos[v(\alpha + \gamma)]}{v} \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \sin\Psi \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \left[\frac{\sin\left[\frac{(v-1)\gamma}{2}\right]}{v} \sin[(v-1)\Psi] + \frac{\sin\left[\frac{(v+1)\gamma}{2}\right]}{v+1} \sin[(v+1)\Psi] \right] \right\} \quad (22)$$

$$I_{vp} = \frac{4I_d \sin\left(\frac{v\pi}{3}\right)}{\pi \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \sin\Psi} \left\{ -\frac{\sin\left(\frac{v\gamma}{2}\right)}{v} \cos\alpha \cos v\Psi + \frac{\sin[v(a+\gamma)] \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)}{v} \sin\Psi \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left[\frac{\sin\left[\frac{(v-1)\gamma}{2}\right]}{v-1} \cos[(v-1)\Psi] + \frac{\sin\left[\frac{(v+1)\gamma}{2}\right]}{v+1} \cos[(v+1)\Psi] \right] \right\} \quad (23)$$

სადაც α და γ - მართვის და კომუტაციის კუთხეებია; I_d - გამართული დენის საშუალო მნიშვნელობა; Ψ - დენისა და ძაბვის ძირითადი ჰარმონიკების ფაზათა შორის წანაცვლების კუთხე: $\Psi = \alpha + \gamma/2$

(22) და (23) გამოსახულებების საფუძველზე, კომუტაციის პროცესზე ანგარიშისას გამანაწილებელი მოწყობილობის და მასთან მიერთებული საკაბელო ხაზების შეიძლება უგულებელყოფილი იქნეს, მაშინ

$$I_{1\alpha} = \frac{2\sqrt{3}I_d}{\pi} \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \cos\Psi \quad (24)$$

$$I_{1\beta} = \frac{\sqrt{3}I_d}{2\pi \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \sin\Psi} [\gamma - \sin\gamma \cos 2\Psi] \quad (25)$$

საიდანაც ძირითადი ჰარმონიკის დენის მოქმედი მნიშვნელობაა

$$I_1 = \frac{\sqrt{3}I_d}{2\sqrt{2}\pi \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \sin\Psi} \sqrt{\sin^2\gamma + \gamma^2 - 2\gamma \sin\gamma \cos 2\Psi} \quad (26)$$

2.5. ელექტრომომხმარებლების მიერ ქსელში წარმოქმნილი 2.5.1. ძაბვის მაღალი სიხშირის ჰარმონიკების სიმეტრიულობის გამოკვლევა

მრავალი თანამედროვე ეტდ-ის მართვის პრინციპი და პარამეტრების რეგულირება დატვირთვის დენის მრუდის ფორმის დამახინჯებაზე დაფუძნებული [4] და ცალკეული ფაზის დენის დამახინჯების პროცესი განსხვავებულად წარიმართება.

აღნიშნულიდან გამომდინარე ქვემოთ მოყვანილი კვლევების მიზანს წარმოადგენს ელექტრომომარაგების ქსელის ელემენტებში ელექტრომომხმარებლების დიდი სიმძლავრის ერთფაზა ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების მუშაობის რეჟიმების შედეგად, ცალკეულ ფაზებში გამავალი დატვირთვის დენების მრუდის ფორმის დამახინჯების შესწავლა და მათ მიერ ქსელში წარმოქმნილი ძაბვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების არასემეტრიულობის დადგენა და ხარისხის შეფასება.

2.5.2. ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების მიერ ელექტრომომარაგების ქსელში წარმოქმნილი ჰარმონიკების გამოკვლევა

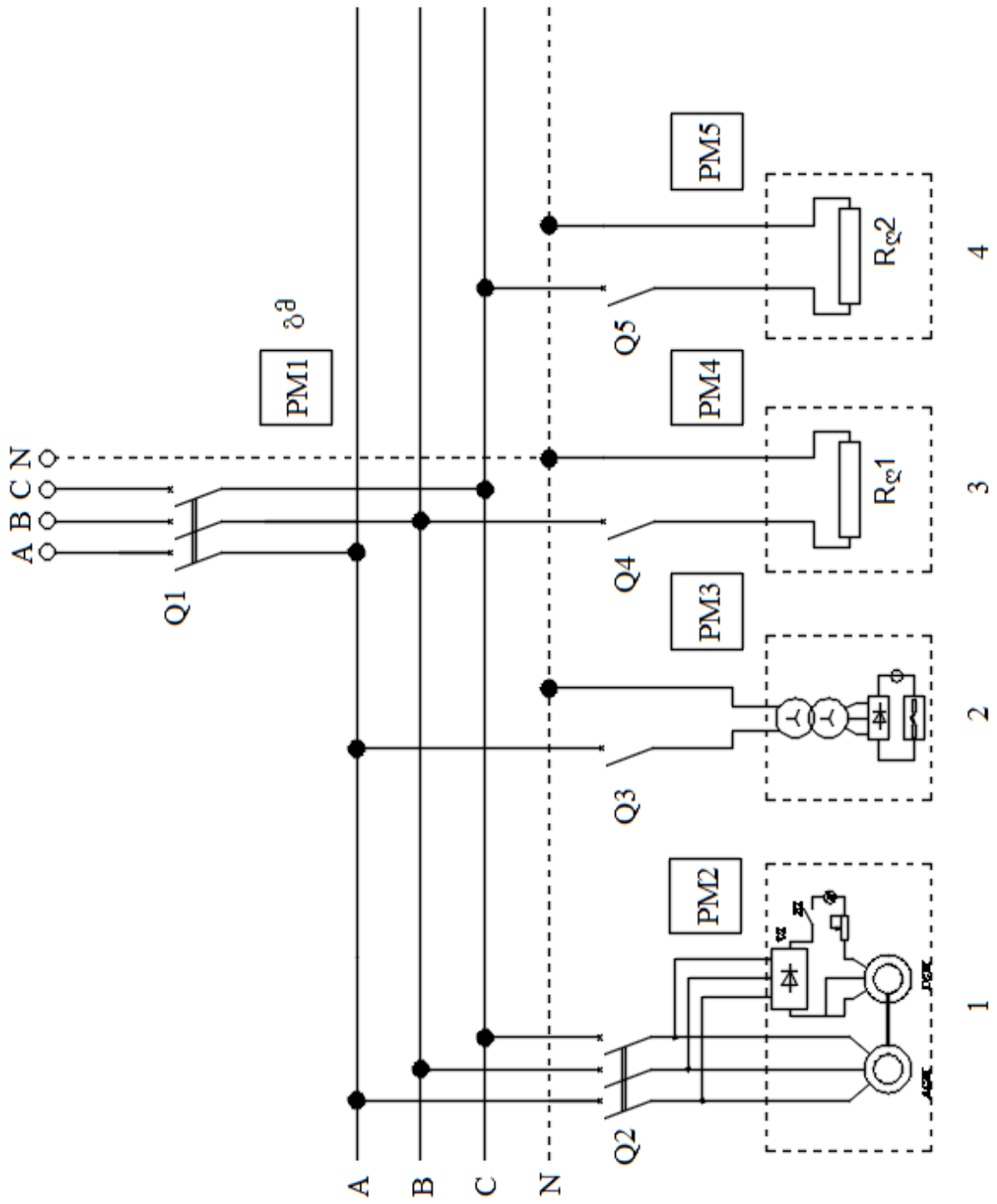
ელექტრომომხმარებლების ექსპერიმენტული გამოკვლევების ოპტიმალურად წარმართვისათვის მასში გაერთიანებული ეტდ-ბი შეიძლება დავყოთ შემდეგ ძირითად სამ ჯგუფად:

1. ელექტროტექნოლოგიური დანადგარები, რომელთა ძალური ნაწილი აღჭურვილია სამფაზა ლარიონოვის სქემით შესრულებული ტირისტორული გამმართველებით და რომელთა ყოველი ფაზის დატვირთვის დენის მართვა ურთიერთდაკავშირებულ განვი-იმპულსური რეგულირების პრინციპზეა დაფუძნებული (მუდმივი დენის ელექტრორკალური ღუმელები, ტირისტორული გარდამსახ-ძრავას სისტემა, სისხიზირულ-რეგულირებადი ასინქრონული ელექტროამძრავები და ა.შ.). ამ დანადგარების ყოველი ფაზის დატვირთვის დენის აქტიური მდგენელის მოქმედი მნიშვნელობები ერთნაირი სიდიდისაა, მათ მრუდებს ერთნაირი ფორმა გააჩნიათ და ისინი ერთმანეთის მიმართ 120° -ით არიან დაძრუნული. მაშასადამე, ამ ჯგუფში გაერთიანებული ეტდ-ბი ელექტრომომარაგების ქსელისათვის სიმეტრიულ დატვირთვას წარმოადგენს. შესაბამისად, ასეთი ეტდ-ის

დატვირთვის დენების ელექტრომომარაგების ქსელის ელემენტებში გადინების შედეგად, ერთიდაიგივე პარამეტრების ძაბვის მაღალი სიხშირის სიმეტრიული სპექტრი წარმოიქმნება.

2. სამფაზა ელექტრორკალური დანადგარები, რომელთა ყოველი ფაზის ელექტროდი გადაადგილების მექანიზმის ელექტრული ამძრავები დამოუკიდებელი მართვის სისტემებითაა აღჭურვილი. ასეთი დანადგარების თითოეული ფაზის (ელექტროდის) დატვირთვის დენი, წინასწარ გაუთვალისწინებელი ფაქტორებით განპირობებული დიაგრამის მიხედვით იცვლება, მიუხედავად ფაზათა ერთნაირი მუშაობის რეჟიმისა და ციკლისა. ეს ეტდ-ები ხასიათდებიან მკვეთრად გამოხატული არასიმეტრიული დინამიკური რეჟიმებით. მიუხედავად ამისა, ასეთი დანადგარების ყოველი ფაზის მუშაობის ციკლი ერთნაირია და რკალის ანთების (საექსპლოატაციო მოკლედშერთვის), რკალის მდგრადი ნთების რეჟიმებსა და პაუზას მოიცავს. შესაბამისად, ასეთი ეტდ-ების სამივე ფაზის დატვირთვის დენები ერთნაირი ხასიათისაა. შედეგად, მათ მიერ ელექტრომომარაგების ქსელის სამივე ფაზაში ერთნაირი პარამეტრების და ციკლის მიხედვით სამ ჯგუფად წარმოდგენილი, ძაბვის მაღალი სიხშირის სპექტრი წარმოიქმნება.

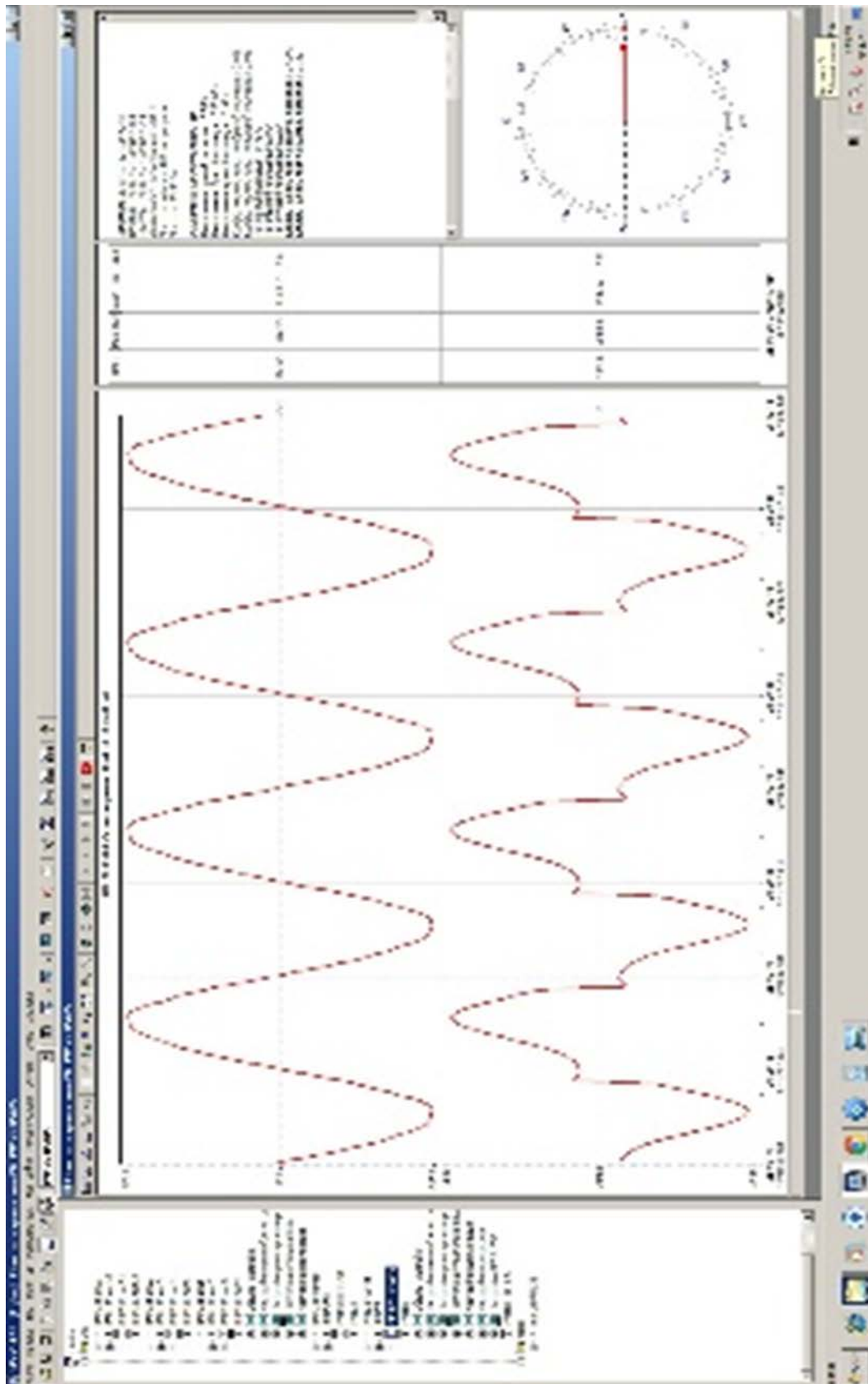
3. ერთფაზა ეტდ-ები (ელექტრორკალური შესადული აპარატები, ელექტროპლანური დანადგარები, რეგულირებადი და ა.შ.), რომელთა დატვირთვის დენის მრუდს მკვეთრად დამახინჯებული ფორმა გააჩნია. ასეთი დანადგარებით აღჭურვილ ელექტრომომხმარებლებმა, ცალკეული ფაზების აქტიური დატვირთვის დენების მოქმედი მნიშვნელობების გათანაბრების მიუხედავად, ფაზათა დატვირთვის დენების ფორმის დამახინჯების ხარისხის დიდი განსხვავების გამო, შესაძლებელია ელექტრომომარაგების ქსელში წარმოქმნას არასიმეტრიული მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრი.



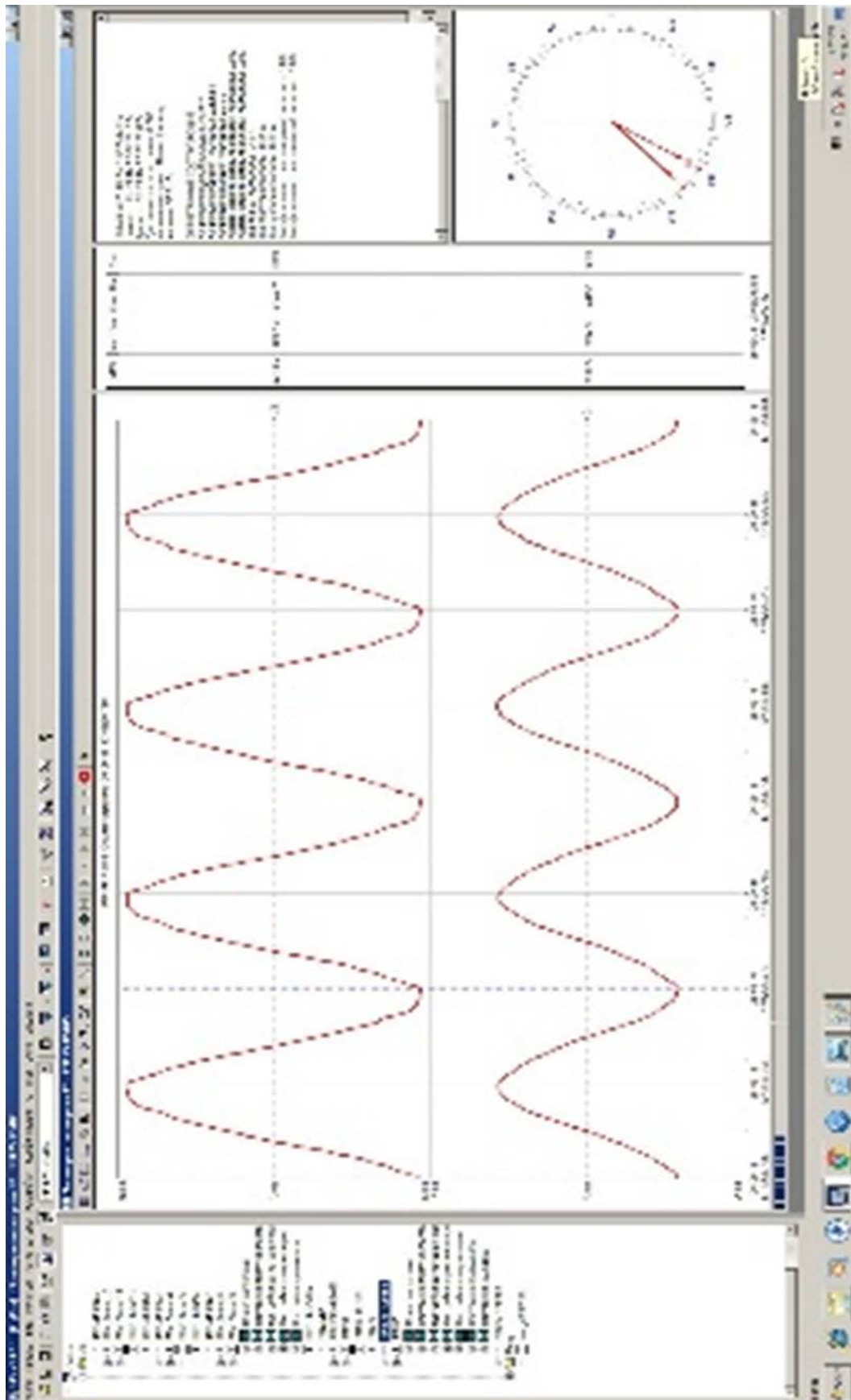
ნახ. 16. “დამტვირთავი სტენდის” სქემა

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ელექტრომომხმარების ტექნოლოგიების დეპარტამენტში, „ელექტროენერჯის ხარისხის მაჩვენებლების კონტროლისა და აღრიცხვის“ ლაბორატორიულ სტენდზე [5] გამოკვლეულ იქნა ელექტრომომარაგების ქსელის ტიპური გამანაწილებელი მოწყობილობის მკვებავი უჯრედის ცალკეულ ფაზებში გამავალი დენების დამახინჯებისა შედეგად წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების სიმეტრიულობის ხარისხი, დატვირთვის დენის მოქმედი მნიშვნელობის სიმეტრიულობის პირობებში. ექსპერიმენტი ჩატარდა „დამტვირთავი სტენდის“ (ნახ. 16) ასინქრონული, ელექტრორკალური და აქტიური დატვირთვის უჯრედების მონაწილეობით. შესაბამისად, სალტესთან, სამივე ფაზაზე, მიერთებულ იქნა დატვირთული ასინქრონული ძრავას უჯრედი. სალტის A ფაზასთან ელექტრორკალური დატვირთვის უჯრედი, B და C ფაზებთან ერთი და იგივე, აქტიური დატვირთვის უჯრედის ელექტრორკალური დატვირთვის თანაზომადი სიმძლავრის რეზისტორები. კვლევები ჩატარებული უქნა სხვადასხვა პარამეტრებისათვის (დატვირთვისათვის). ექსპერიმენტული კვლევის შედეგები დაფიქსირებული იქნა სტენდის უჯრედებთან მიერთებული PM1, PM2, PM3, PM4 და PM5 ელექტროენერჯის მაჩვენებლების კონტროლის მოწყობილობების (ანალიზატორების) საშუალებით. ექსპერიმენტული კვლევის შედეგები მოცემულია დანართებში.

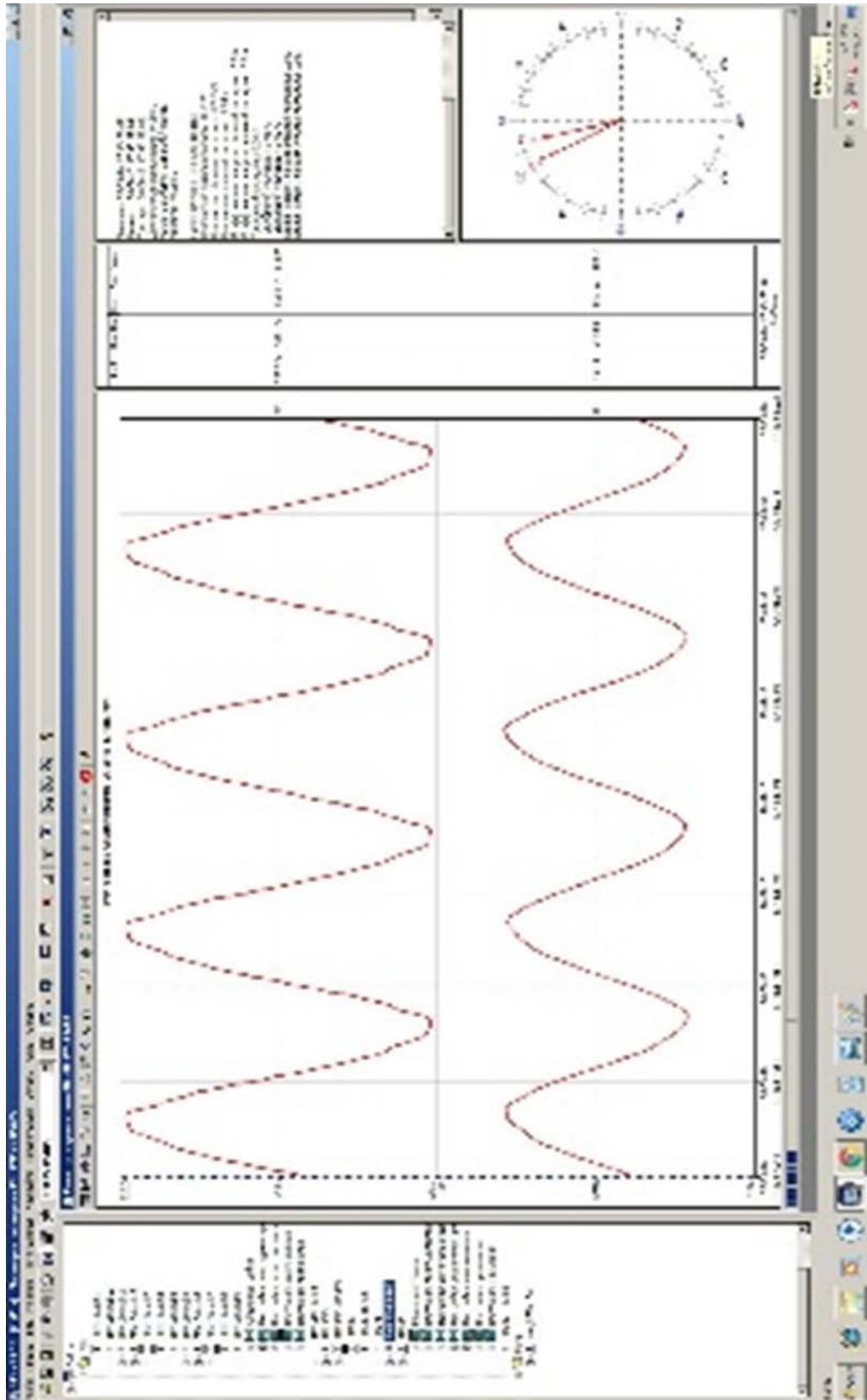
ქვემოთ (ნახ. 17-22) მოცემულია, „ელექტროენერჯის ხარისხის მაჩვენებლების კონტროლისა და აღრიცხვის“ ლაბორატორიული სტენდის ანალიზატორებიდან მიღებული, „დამტვირთავი სტენდის“ ჯამური და ცალკეული უჯრედების დატვირთვის დენის მრუდეები და მათი ფორმის დამახინჯების შედეგად წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების ამპლიტუდები.



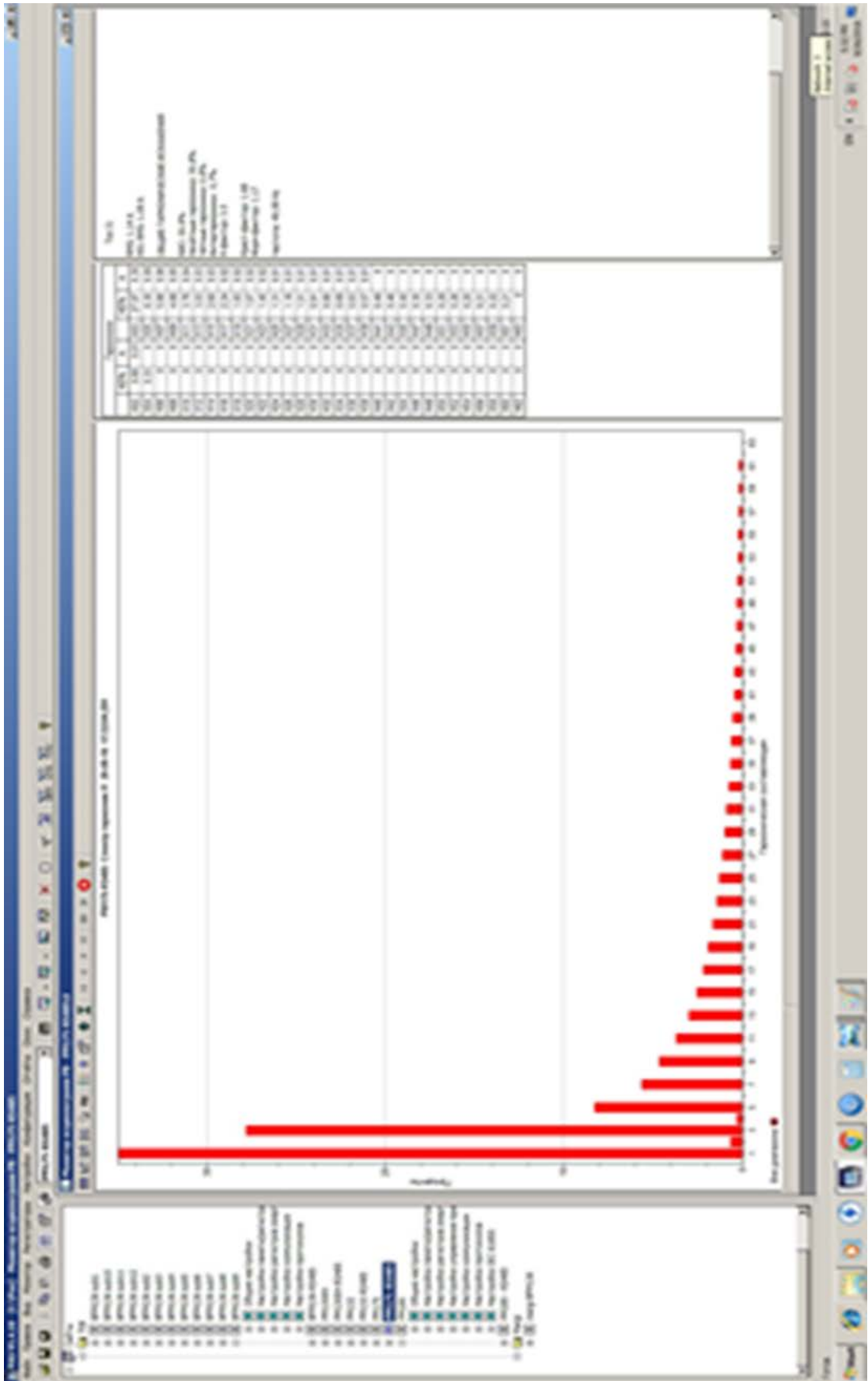
ნახ. 17. „დამტვირთავი სტენდის“ დატვირთვის დენის და ძაბვის მრუდები (ფაზა A)



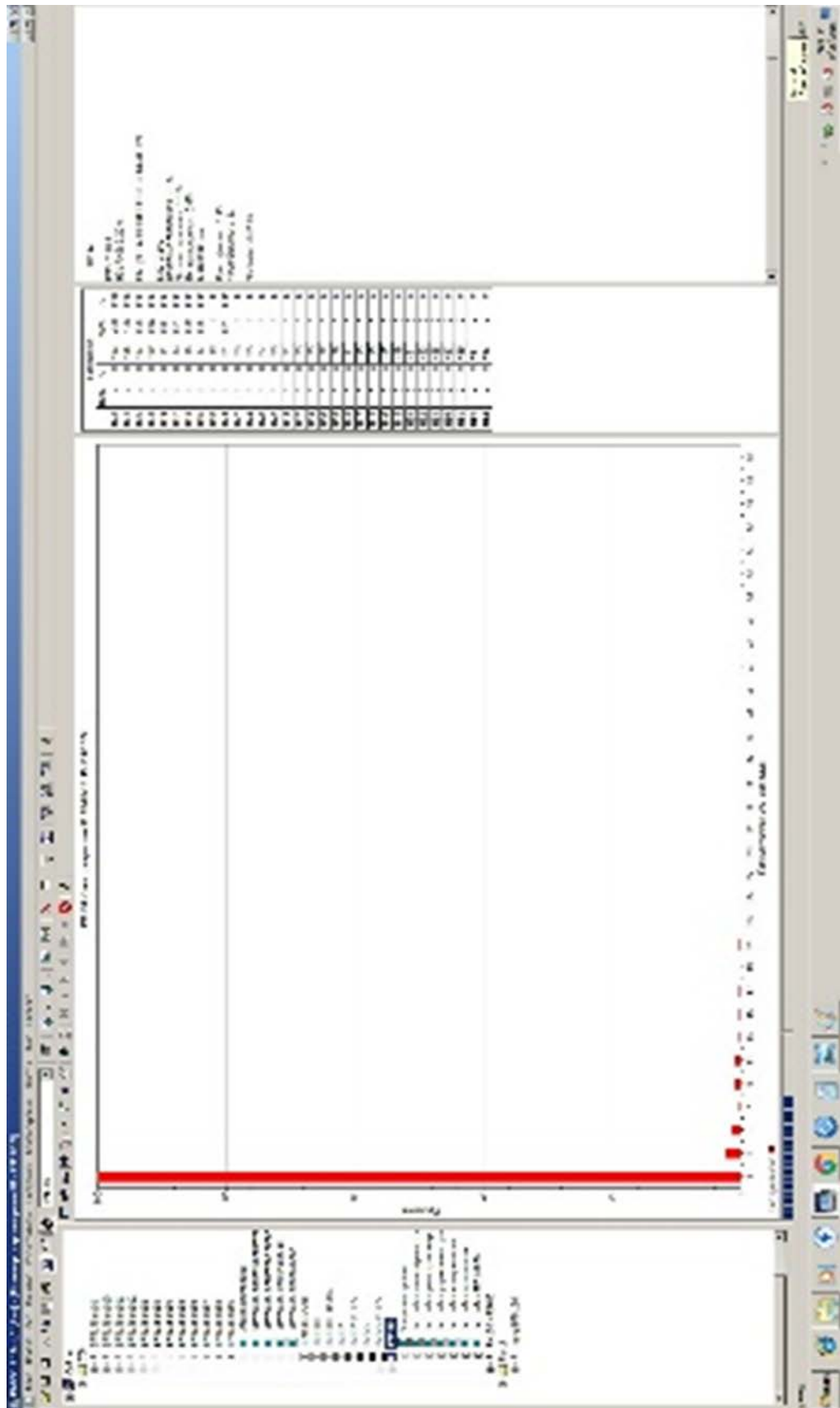
ნახ. 18. „დამტვირთავი სტენდის“ დატვირთვის დენის და ძაბვის მრუდები (ფაზა B)



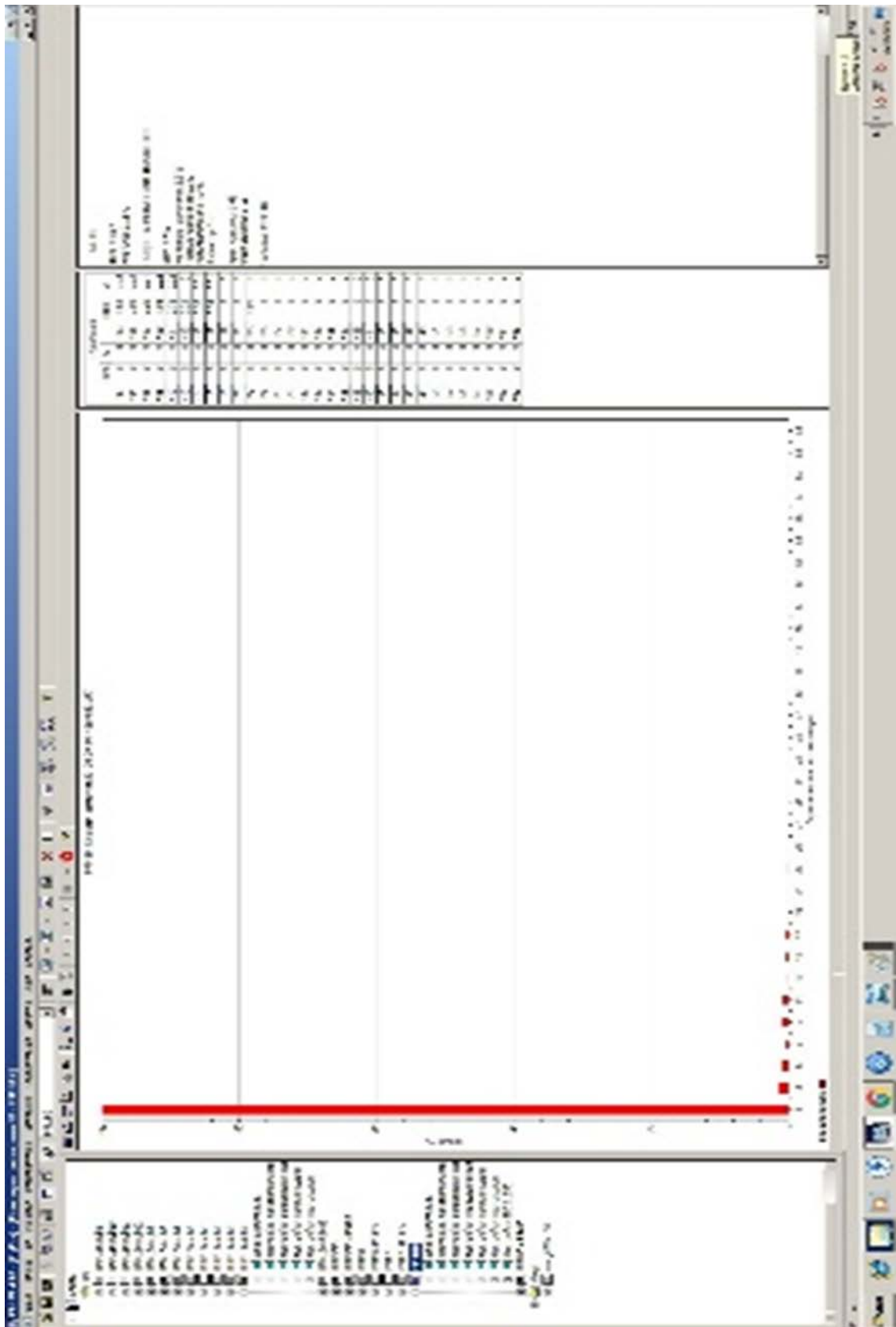
ნახ. 19. „დამტვირთავი სტენდის“ დატვირთვის დენის და ძაბვის მრუდები. (ფაზა C)



ნახ. 20. „დამტვირთავი სტენდის“ დატვირთვის დენის მაღალი რიგის ჰარმონიკების ამპლიტუდები ფაზა A



ნახ. 21. „დამტვირთავი სტენდის“ დატვირთვის დენის მაღალი რიგის ჰარმონიკების ამპლიტუდები. (ფაზა B)



ნახ. 22. „დამტვირთავი სტენდის“ დატვირთვის დენის მაღალი რივის ჰარმონიკების ამპლიტუდები. (ფაზა C)

როგორცექსპერიმენტული კვლევის დროს მიღებული შედეგებიდან სჩანს, B და C ფაზაში გამავალი დენები თითქმის სინუსოიდალური ფორმისაა, ხოლო A ფაზაში გამავალი დენი მნიშვნელოვნად დამახინჯებული ფორმისაა. შედეგად, B და C ფაზაში მაღალი სიხშირის ჰარმონიკები თითქმის არ არსებობს (უმნიშვნელოა), ხოლო A ფაზაში წარმოქმნილია მესამე რიგის 28%-იანი, მეხუთე რიგის 9%-იანი და მეშვიდე რიგის 6%-იანი ამპლიტუდის ჰარმონიკები. შესაბამისად, მომხმარებლის დატვირთვის დენის შედეგად, ქსელში წარმოქმნილი ძაბვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრის ყოველი სიხშირის მკვეთრად გამოხატული ასიმეტრიულობით ხასიათდება.

თავი III. ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებების წარმოქმნისა და გავრცელების შემზღუდავი მოწყობილობის მართვის სისტემის დამუშავება

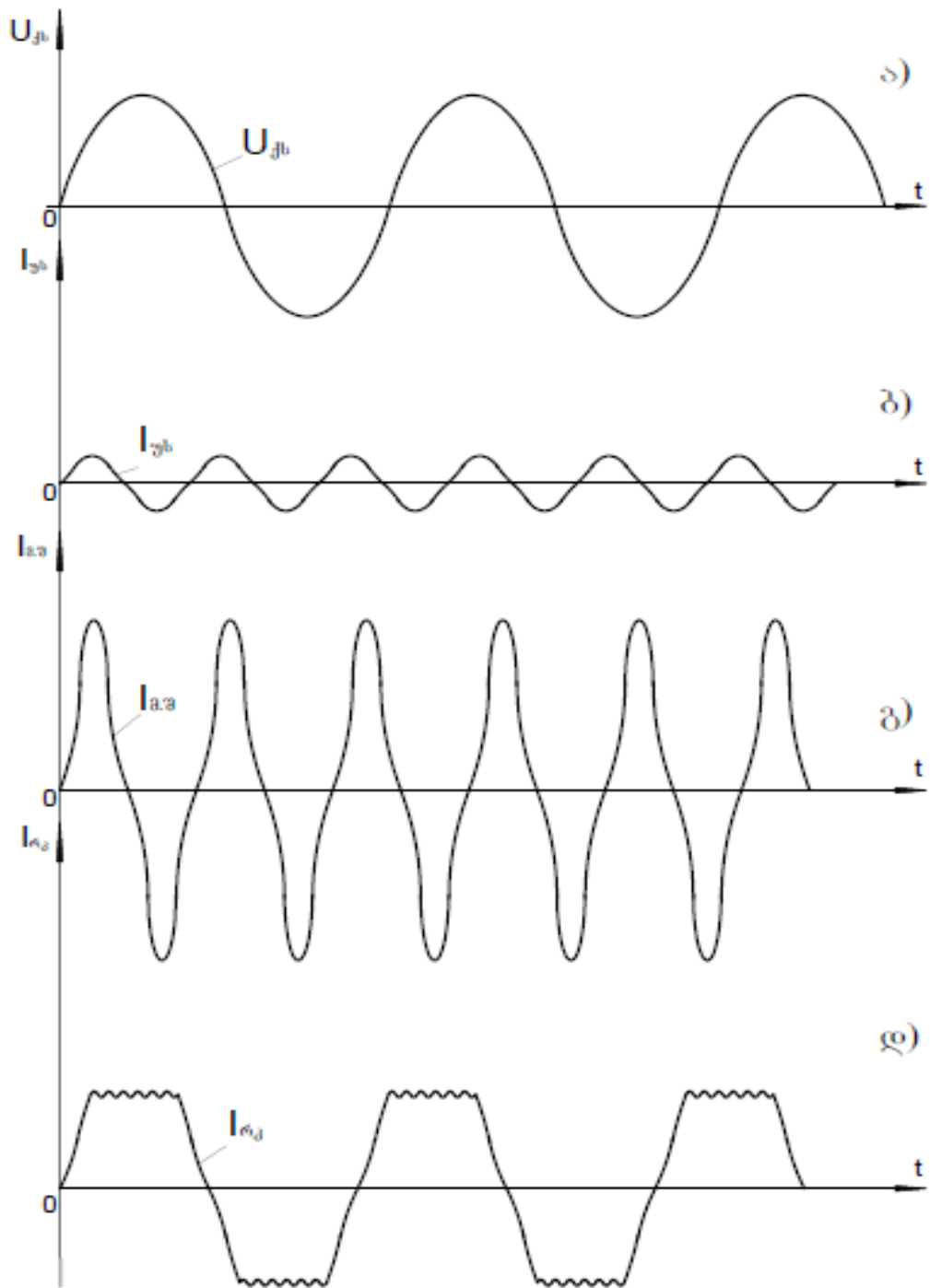
3.1. ელექტრორკალური დანადგარების მიერ წარმოქმნილი მრკ-ის შემზღუდავი მოწყობილობის მართვის სისტემის დამუშავება

როგორც თავი II-ის 2.2 პარაგრაფში იყო აღნიშნული ცვლადი დენის სამფაზა ელექტრორკალური ღუმელების მუშაობის ციკლისას დატვირთვის თითოეული ფაზის დატვირთვის დენის მოქმედი მნიშვნელობა (ნახ. 13) ურთიერთ დამოუკიდებლად იცვლება.

ამასთან ერთად, თითოეული ფაზის დატვირთვის დენის ამპლიტუდური მნიშვნელობა და დატვირთვის დენის მრუდის ფორმა დამოკიდებულია იმაზე, თუ ციკლის რომელ რეიმში (საექსპლუატაციო მ.შ.-ის, რკალის მდგრადი ნთებისა და უქმი სვლის) მუშაობს კონკრეტული ფაზა.

ქვემოთ ნახ. 23-ზე წარმოდგენილია ელექტრორკალური ღუმელის ერთი ფაზის მკვებავი ძაბვისა და ციკლში შემავალი რეჟიმების დატვირთვის დენის მრუდეები.

როგორც მრუდეებიან სჩანს უქმი სვლის რეჟიმისას (ნახ. 23 .ბ) დენის ამპლიტუდური მნიშვნელობა მცირეა და მრუდის ფორმა ახლოსაა სინუსოიდალურთან. ელექტრული რკალის ანთების პროცესში (საექსპლუატაციო მ.შ. რეჟიმისას) დენის ამპლიტუდური მნიშვნელობა მაქსიმალურია (ნახ. 23.გ) და მრუდის ფორმა დამახინჯებულია. ციკლის რკალის მდგრადი ნთების რეჟიმის შესაბამისი მრუდის ამპლიტუდური მნიშვნელობა (ნახ. 23. დ) მ.შ. რეჟიმის დენთან შედარებით მნიშვნელობნად პატარაა და დატვირთვის დენიდენის მრუდის ფორმა ძლიერ დამახინჯებულია.



ნახ. 23. ელექტორკალური ღუმელის ძაბვისა და დატვირთვის დენის მრუდეები მუშაობის რეჟიმისას

ა) ძაბვა; ბ) დენი უქმი სვლის რეჟიმისას; გ) დენი რკალის ანთების პროცესისას (საექსპლუატაციო მ.შ. რეჟიმისას); დ) დენი რკალის მდგრადი ნთების რეჟიმისას

აღსანიშნავია, რომ ერლ-ის მუშაობის რეჟიმის ქსელის ელემენტებში წარმოიქმნება ურთიერთ განსხვავებული პარამეტრების

მაზვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების სამი სპექტრი. თითოეულ სპექტრში შემავალი ჰარმონიკების ამპლიტუდური მნიშვნელობები და სიხშირეები დამოკიდებულია შესაბამისი რეჟიმის დატვირთვის დენის მოქმედი მნიშვნელობითა და დენი მრუდის ფორმის დამახინჯების ხარისხით.

ელექტრორკალური ღუმელების დატვირთვის დენის მრუდის ფორმის დამახინჯების შედეგად ქსელში წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების შეზღუდვისათვის მიზანშეწონილია გამოყენებული იქნეს პარალელური ჩართვის (ჰარმონიკის მამუნტირებელი) ფილტრები, რადგან მიმდევრობითი ჩართვის ფილტრის შემთხვევაში საჭირო იქნება ძალიან დიდი სიმძლავრის ფილტის დამდადება, რაც პრაქტიკულად მიზანშეწონილი არაა. უფრო მეტიც, რადგან ერდ –ები ქსელში წარმოქმნიან სამი ურთიერთ განსხვავებული პარამეტრების მრკ–ების სპექტრს, საჭირო იქნება სამი სხვადასხვა პარამეტრების ფილტრების საღუმელე ტრანსფორმატორის მიმდევრობით ჩართვა.

ჩახშობისათვის საჭიროა თითოეული ფაზაში გამოყენებული იქნეს სხვადასხვა მინიმუმ სამ სიშირეზე აწყობილი სამი ურთიერთ განსხვავებული პარამეტრების მაკომპენსირებელი ფილტრების კომპლექტები. შესაბამისად, რადგან ელექტროდებში გამავალი დენები იცვლილება არა ერთდროულად, თითოეული ფაზის მაკომპენსირებელი ფილტრების კომპლექტების მართვა უნდა განხორციელდეს დამოუკიდებლად ფაზის დენის ფუნქციაში.

ფუნქციონალური სქემის მოქმედების პრინციპი მდგომარეობს შემდგომში:

ღუმელის გაშვების პროცესში (უქმი სვლის რეჟიმი) (ნახ. 24), რადგან ელექტროდში გამავალი დენი ნულის ტოლია TIA , TIB , TIC დენის ტრანსფორმატორებიდან მიწოდებული ინფორმაციის საფუძველზე ჩაირთვება მხოლოდ ფაზების უქმი სვლის (პაუზის) რეჟიმის მრკ–ების შემზღუდავი ფილტრების სექციების უკონტაქტო $CA3$, $CB3$, $CC3$ ამომრთველები. შესაბამისად, ქსელთან მიერთდება მხოლოდ უქმი სვლის

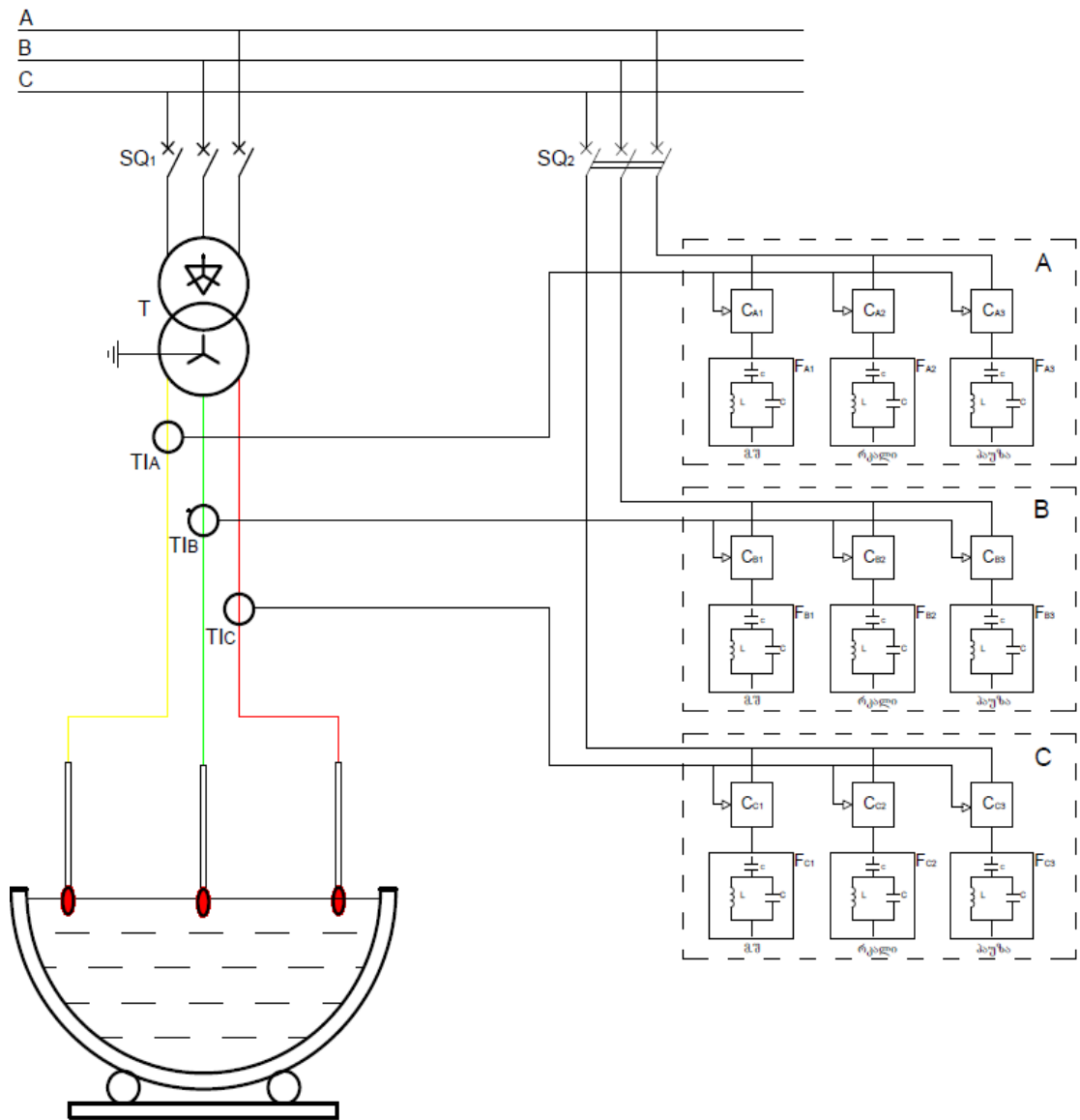
რეჟიმში დომინირებული მაღალი რიგის ჰარმონიკებისათვის გათვალისწინებული შემზღუდავი ფილტრების F_{A3} , F_{B3} , და F_{C3} სექციები. შედეგად, განხორციელდება შესაბამისი მაღალი რიგის ჰარმონიკების ამპლიტუდური მნიშვნელობის შეზღუდვა.

მოკლედ შერთვის შექმნისთანავე, დენის ტრანსფორმატორებიდან მიწოდებული ინფორმაციის საფუძველზე, ჩაირთვება მხოლოდ ფაზების მ.შ. რეჟიმის მრკ-ების შემზღუდავი ფილტრების სექციების მართვის სისტემის უკონტაქტო C_{A2} , C_{B2} , C_{C2} ამომრთველები. შესაბამისად, ქსელთან მიერთდება მხოლოდ მ.შ. რეჟიმში დომინირებული მაღალი რიგის ჰარმონიკებისათვის გათვალისწინებული შემზღუდავი ფილტრების F_{A2} , F_{B2} , და F_{C2} სექციები. შედეგად, განხორციელდება მ.შ. რეჟიმის შესაბამისი მრკ-ების კომპენსაცია.

მოკლედ შერთვის რეჟიმის დამთავრებისა და რკალის ანთებისთანავე, დენის ტრანსფორმატორებიდან მიწოდებული ინფორმაციის საფუძველზე, ჩაირთვება მხოლოდ ფაზების რკალის მდგრადი ნთების რეჟიმის მრკ-ების შემზღუდავი ფილტრების სექციების მართვის სისტემის უკონტაქტო C_{A1} , C_{B1} , C_{C1} ამომრთველები. შესაბამისად, ქსელთან მიერთდება მხოლოდ რკალის მდგრად რეჟიმში დომინირებული მაღალი რიგის ჰარმონიკებისათვის გათვალისწინებული შემზღუდავი ფილტრების F_{A1} , F_{B1} , და F_{C1} სექციები. შედეგად, განხორციელდება შესაბამისი მრკ-ების კომპენსაცია.

რომელიმე ფაზაში რკალი მდგრადი რეჟიმის დარღვევისთანავე შეწყდება ელექტროდში გამავალი დენი გამოირთვება რკალის ნთების რეჟიმის ფილტრის სექცია და ავტომატურად ჩაირთვება უქმი სვლის რეჟიმის სექცია.

აღსანიშნავია, რომ ყოველი რეჟიმის ფილტრის სექცია მოიცავს, რეჟიმის შესაბამისი პარამეტრების ორმაგი სიხშირის ფილტრს.



ნახ. 24. ელექტროკალური ღუმელის მიერ წარმოქმნილი მრკ-ების ჩამხშობი სამსაფეხუროვანი ფილტრის მართვის სისტემის ბლოკ სქემა

SQ, SQ1 – ეტდ-ისა და მრკ-ების შემზღუდავი მოწყობილობის ავტომატური ამომრთველი; T-სალუმელე ტრანსფორმატორი; FA1, FA2, FA3, FB1, FB2, FB3, FC1, FC2, FC3 -A, B და C ფაზის უქმი სვლის, მ.შ და რკალის დენის რეჟიმის მაღალი რიგის ჰარმონიკების შემზღუდავი ფილტრის სექცია; TIA , TIB , TIC - A, B და C ფაზის დენის ტრანსფორმატორი; CA1 , CA2 , CA3 - A ფაზის შესაბამისი რეჟიმის მრკ-ების შემზღუდავი ფილტრის შესაბამისი სექციის მართვის სისტემა უკონტაქტო ამომრთველით; CB1, CB2 , CB3 , - B ფაზის შესაბამისი რეჟიმის მრკ-ების შემზღუდავი ფილტრის შესაბამისი სექციის მართვის სისტემა უკონტაქტო ამომრთველით; CC1 , CC2 , CC3 - C ფაზის შესაბამისი რეჟიმის მრკ-ების შემზღუდავი ფილტრის შესაბამისი სექციის მართვის სისტემა უკონტაქტო ამომრთველით.

3.2. მართვადი გამმართველებით აღჭურვილი ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების დატვირთვის დენის ფორმის დამახინჯების გამასწორებელი ფილტრის მდოვრე რეგულირების მართვის სისტემის დამუშავება

რადგან სამფაზა ელექტრორკალური ღუმელების მუშაობის ციკლისას დატვირთვის თითოეული ფაზის დატვირთვის დენის მოქმედი მნიშვნელობა ურთიერთ დამოუკიდებლად იცვლება. უქმი სვლის რეჟიმისას დენის ამპლიტუდური მნიშვნელობა მცირეა და მრუდის ფორმა ახლოსაა სინუსოიდალურთან. ელექტრული რკალის ანთების პროცესში დენის ამპლიტუდური მნიშვნელობა მაქსიმალურია და მრუდის ფორმა დამახინჯებულია. ციკლის რკალის მდგრადი ნთების რეჟიმის შესაბამისი მრუდის ამპლიტუდური მნიშვნელობა მ.შ. რეჟიმის დენთან შედარებით მნიშვნელოვნად პატარაა და დატვირთვის დენის მრუდის ფორმა ძლიერ დამახინჯებულია.

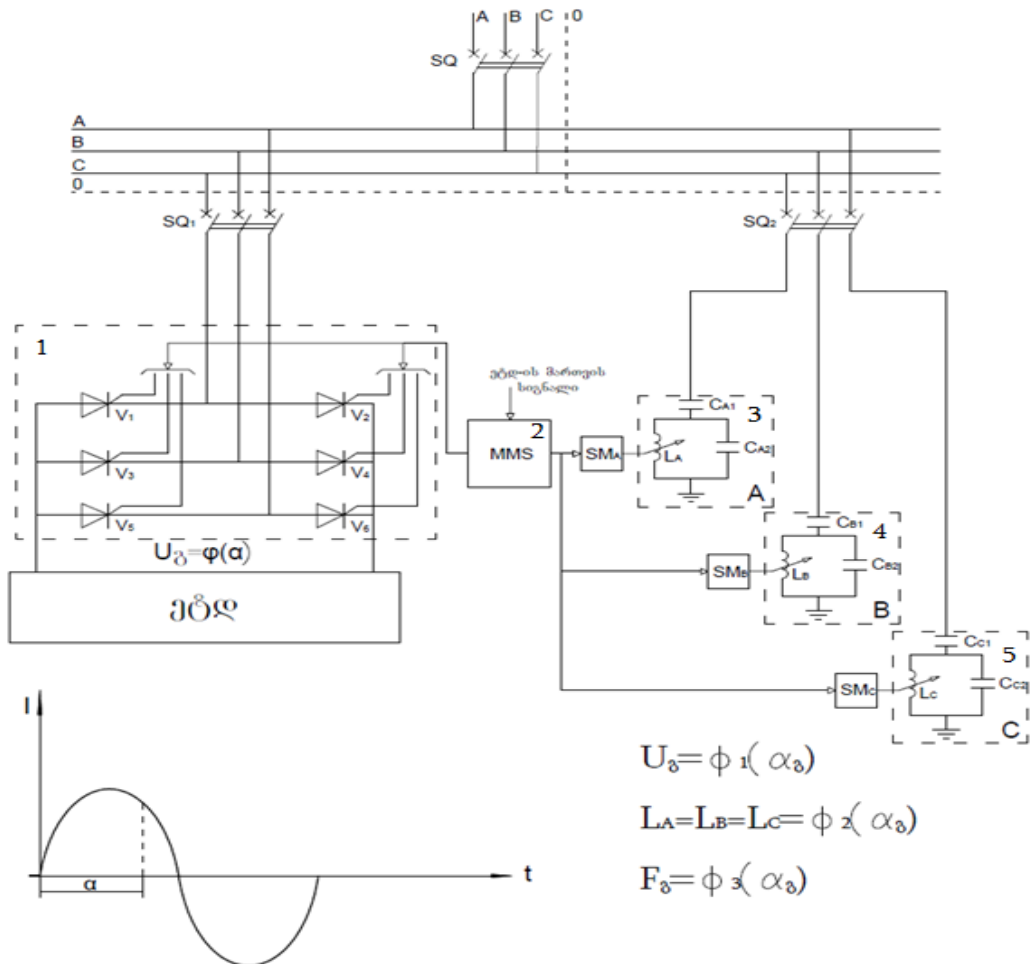
აღნიშნულიდან გამომდინარე ერლ-ის მიერ წარმოქმნილი მრკ-ის შეზღუდვისათვის საჭიროა ყოველი ფაზისათვის შეირჩეს სამი ორმაგი აწყობის სიხშირის ფილტრისების კომპლექტი და მათი მართვა უნდა განხორციელდეს დამოუკიდებლად.

ზემოაღნიშნულის საფუძველზე, დამუშავებულია ერლ-ის მიერ წარმოქმნილი მმრკ-ის შემზღუდავი მოწყობლობის მართვის სისტემა. მართვის სისტემის ფუნქციონალური სქემა მოცემულია ნახ. 25 -ზე.

ფუნქციონალური სქემა მუშაობს შემდეგნაირად:

ღუმელის გაშვება ხორციელდება MMS ცენტრალური მართვის სისტემის საშუალებით. შედეგად, მართვადი გამმართველის $V_1 - V_6$ ვენტილებს მიეწოდება მართვის იმპულსები და ღუმელის ელექტროდებს მიეწოდება გამართული ძაბვა. ღუმელის ელექტრომომარაგების ქსეიდან მოთხოვნილი დატვირთვის დენის მრუდის ფორმა დამოკიდებულია ვენილების გახსნის კუთხეზე და იგი ცენტრალური მართვის სისტემის დავალების სიგნალის ფუნქციაში პირდაპირპროპორციულად იცვლება.

იმის გამო, რომ ვენტილების გახსნის კუთხე დიდ ფარგლებში იცვლება (0–180°), ტრანსფორმატორის დენის მრუდის დამახინჯების ხარისხიც დიდ ფარგლებში იცვლება.



ნახ. 25. მართვადი გარდამქმნელით აღჭურვილი ეტდ-ის მიერ წარმოქმნილი მრკ-ის შემზლუდავი მოწყობილობის მდოვრე რეგულირების მართვის სისტემის ფუნქციონალური სქემა:

SQ, SQ₁ - შემომყვანის, ეტდ-ისა და მრკ-ების შემზლუდავი მოწყობილობის ავტომატური ამომრთველი; 1- მართვადი გამმართველი; 2 (MMS)- გამმართველის ვენტილებისა და მრკ-ების შემზლუდავი მოწყობილობის საეთო მართვის სისტემა; 3 - A ფაზის მრკ-ების შემზლუდავი რეგულირებადი ფილტრი; 4 - B ფაზის მრკ-ების შემზლუდავი რეგულირებადი რეგულირებადი ფილტრი; 5- ფაზის მრკ-ების შემზლუდავი რეგულირებადი ფილტრი; 6- ელექტროტექნოლოგიური დანადგარი; SM_A - A ფაზის მრკ-ების შემზლუდავი რეგულირებადი ფილტრის დამოუკიდებელი მართვის სისტემა; SM_B - B ფაზის მრკ-ების შემზლუდავი რეგულირებადი ფილტრის დამოუკიდებელი მართვის სისტემა; SM_C - C ფაზის მრკ-ების შემზლუდავი რეგულირებადი ფილტრის დამოუკიდებელი მართვის სისტემა

მაშასადამე, ლუმელის დატვირთვის დენის მრუდის ფორმა და შესაბამისად მის მიერ ელექტრომომარაგების ქსელის ელემენტებში წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრის პარამეტრები ლუმელის მართვის სიგნალის ფუნქციაში იცვლება.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, წარმოქმნილი ჰარმონიკების სპექტრის პარამეტრების დიდ ფარგლებში ცვლილების გამო მათი ამპლიტუდური მნიშვნელობების შეძლებისათვის საჭიროა სამივე ფაზაში ჩაერთოს დიდ ფარგლებში ცვალებადი სიხშირის მქონე შემზღუდავი ფილტრი, რომელთა სიხშირე შეიცვლება ჰარმონიკების სპექტრის პარამეტრების ფუნქციაში. ამ მიზნით, მრკ-ების საკომპენსაციოდ შეჩეულია რეგულირებადი პარამეტრების ფილტრი (ნახ. 25. პოზიცია 3, 4, 5). ფილტრის სიხშირის რეგულირება ხორციელდება მასში ჩართული ინდუქტიური წინააღმდეგობის შეცვლით. კერძოდ, LA , LB და LC ინდუქტიურობის შეცვლით. ამ მიზნით, მართვის სისტემაში, ყოველი ფაზისათვის გამოყენებულია SMA , SMB და SMC მრკ-ების შემზღუდავი რეგულირებადი ფილტრის დამოუკიდებელი მართვის სისტემები, რომელთა მართვა ხორციელდება ცენტრალური მართვის სისტემიდან გამმართველის მართვის ფუნქციაში. ე.ი. ჰარმონიკების სპექტრის პარამეტრების ფუნქციაში.

დამუშავებული მართვის სისტემის პრაქტიკული რეალიზაცია უზრუნველყოფს ელექტრომომარაგების სისტემაში მართვადი გამმართველების მიერ წარმოქმნილი, დიდ დიაპაზონში ცვალებადი, მრკ-ების შეზღუდვას.

დასკვნები

1. ჩატარებული კვლევების საფუძველზე დადგენილია, რომ ელექტრომომარაგების ქსელში წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების ძირითად წყაროს ელექტრომომხმარებლების ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების მუშაობის რეჟიმები წარმოადგენს, რომლებიც იწვევენ დამატებით სიმძლავრის და ელექტროენერჯის დანაკარგებს და აუარესებენ ტექნოლოგიური დანადგარებისა და ქსელის ენერგეტიკულ მაჩვენებლებს. შესაბამისად, ელექტრომომარაგების ქსელებში კონდუქტიური დაბრკოლებების წარმოქმნის მიზეზების მეცნიერული შესწავლა, ქსელის ელემენტებში გავრცელების შეზღუდვა ენერგეტიკული მაჩვენებლებისა და ენერგოეფექტურობის ამაღლების ერთერთ გარანტიას წარმოადგენს.

2. დასაბუთებულია, რომ ელექტროენერჯის ხარისხის მაჩვენებლების გაუარესების ძირითად მიზეზს ელექტრომომარაგების ქსელში ჩართული ელექტრორკალური ღუმელები და მართვადი გარდამქმნელებით აღჭურვილი ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების მუშაობის რეჟიმები წარმოადგენს.

3. ჩატარებულია ელექტრომომარაგების ქსელებში გამოყენებული მაღალი რიგის ჰარმონიკების ჩახშობისა და შეზღუდვის (გაუვნებელყოფის) არსებული თანამედროვე მეთოდების გამოკვლევა და შეფასებულია გრძივი და განივი ჩართვის მამუნიტირებელი და შემზღუდავი ფილტრების გამოყენების შედეგად მიღებული შედეგები.

4. ჩატარებული გამოკვლევის საფუძველზე დასაბუთებულია, რომ რიგი მოქმედი ელექტრომიმღების მგრძობიარობა ჰარმონიკის რიგის გაზრით იზრდება და პირიქით. შესაბამისად, კონკრეტულ ელექტროტექნოლოგიურ დანადგარზე დაბრკოლების ზემოქმედების ეფექტი დამოკიდებულია ჰარმონიკის რიგსა და ამპლიტუდაზე. ჩასახშობი ჰარმონიკის რიგის დადგენისათვის, ჩამხშობი ფილტრის სქემის შერჩევისა და პარამეტრების ანგარიშისათვის საჭიროა განსაზღვროს სპექტრში

შემავალი თითოეული ჰარმონიკის მიერ დანადგარზე ზემოქმედების ეფექტი.

5. ცალკეული რიგის ჰარმონიკის დანადგარზე ზემოქმედების შეფასებისათვის შემოღებულია ეგრედ წოდებული - „ჰარმონიკის ზემოქმედების ეფექტურობის კოეფიციენტი“ და შემოთავაზებულია სპექტრში შემავალი ჰარმონიკების ჯამური ზემოქმედების ეფექტის საანგარიშო გამოსახულება.

6. დასაბუთებულია, რომ განივ-იმპულსურ რეგულირებადი მართვადი გარდამქმნელებით აღჭურვილი ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების დატვირთვის დენის ფორმა (დამახინჯების ხარისხი) დიდ ფარგლებში იცვლება და დამოკიდებულია გარდამქმნელის ვენტილების მართვის ელექტროდებზე მიყვანილი იმპულსების გახსნის კუთხეზე. შედეგად, დიდ ფარგლებში იცვლება ქსელში წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების სპექტრის პარამეტრებიც, რომელიც დამოკიდებულია, როგორც დანადგარის დატვირთვაზე, აგრეთვე გახსნის კუთხეზე. შესაბამისად, შეუძლებელი ხდება ასეთი ცვალებადი სპექტრის ჰარმონიკების შეზღუდვა არსებული ფილტრების საშუალებით.

7. მართვადი გამმართველებით აღჭურვილი ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების დატვირთვის დენის ფორმის დამახინჯების გამასწორებელი მდოვრე რეგულირების (საკომპენსაციო) ფილტრისათვის დამუშავებულია მართვის სისტემა, რომლის მართვა ხორციელდება გამმართველის ვენტილების გახსნის კუთხის მიხედვით.

8. ელექტრორკალური დანადგარების მოქმედების პრინციპისა და მუშაობის რეჟიმების გამოკვლევის საფუძველზე დადგენილია, რომ მათ მიერ ქსელის თითოეულ ფაზაში წარმოიქმნება ურთიერთმონაცვლე სამი (უქმი სვლის, მოკლედშერთვის და რკალის მდგრადი ნთების) რეჟიმის შესაბამისი მაღალი რიგის ჰარმონიკების სამი სპექტრი. ამასთან, რადგან სპექტრთა მონაცვლეობა თითოეულ ფაზაში მიმდინარეობს ურთიერთ

დამოუკიდებლად და ქსელში გავრცელებული ჰარმონიკები ასიმეტრიულია და დინამიკურ ხასიათს ატარებს.

9. ელექტრორკალური დანადგარების მიერ წარმოქმნილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების შემზღუდავი მოწყობილობისათვის დამუშავებულია თითოეული ფაზის სამ საფეხუროვანი ფილტრის კომპლექტის დამოუკიდებელი მართვის სისტემა, რომელთა მართვა ხორციელდება ფაზის დატვირთვის დენის ფუნქციაში.

10. ელექტრორკალური და ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების მიერ წარმოქმნილი ჰარმონიკების შემზღუდავი ფილტრებისათვის დამუშავებული მართვის სისტემების პრაქტიკული რეალიზაცია უზრუნველყოფს ელექტრომომარაგებისა და ელექტრომომხმარებელთა ქსელების ელემენტების მაღალი რიგის ჰარმონიკებისაგან განტვირთვას 50-60%-ით, ენერგეტიკული მაჩვენებლებისა და ენერგოეფექტურობის ამაღლებას.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Железко Ю. С. Влияние потребителя на качество электроэнергии в сети и технические условия на его присоединение. "Промышленная энергетика", 1991, №8. С. 39-41.
2. Головщиков В. О., Курбацкий В. Г., Яременко В. Н. Экспериментальный анализ несинусоидальных режимов работы северовосточной части ОЭС Сибири.
3. Ариллага Дж., Бредли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах . М. : Энергоатомиздат, 1990. -320 с.
4. Основы теории цепей / Г.В. Зеревке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – 3-е изд., испр. М. – Л.: Энергия, 1965.
5. Баков Ю.В. Мощность переменного тока. Ивановский гос. энерг. ун-т, 1999.
6. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость/М.П.Бадер.- М.: УМК МПС, 2002. -638 с.
7. Вагин Г.Я. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике /Г.Я.Вагин,А.Б.Лоскутов А.А.Севостьянов. – Н.Новгород : Изд-во НГТУ, 2004. -214 с.
8. Жежеленко И.В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях /И.В. Жежеленко.- М.:Энергоатомиздат, 2005. -261 с.
9. Железко Ю.С. Стандартизация параметров электромагнитной совместимости в международной и отечественной практике /Ю.С.Железко//Электричество. – 1996. - №1.
10. Clemmensen J. M., Ferraro R. J. The Emerging Problem of Electric Power Quality / Public Utilities Fortnightly, November 28, 1985.
11. Dougherty J. G., Stebbins W. L. Power Quality: A Utility and Industry Perspective / Proceedings of the IEEE 1997 Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference. May 6-8, 1997, pp. 1-10.
12. Drantex-BMI. The Drantex-BMI Field Handbook for Power Quality Analysis. Drantex-BMI, 1998.
13. Dugan R. C., McGranaghan M.F., Santoso S., Beauty H. W. Electrical Power Systems Quality. McGraw-Hill, 2003.
14. Flores R. A. State of the Art in the Classification of Power Quality Events, an Overview. Proceedings of the 2002 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, pp. 17-20.
15. Heydt G. T. Electric Power Quality: A Tutorial Introduction. IEEE Computer Applications in Power, vol. 11, no. 1, January 1998, pp. 15-19.

16. Golkar M. A. Electric Power Quality: Types and Measurements. 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT2004). April 2004, Hong Kong, pp. 317-321.
17. Grebe T. E. Power Quality and the Utility/Customer Interface. SOUTHCON'94 Conference Record. March 29-31, 1994, pp.372-377.
18. Ise T., Hayashi Y., Tsuji K. Definitions of Power Quality Levels and the Simplest Approach for Unbundles Power Quality Services. Proceedings of the Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, October 1-4, 2000, pp.385-390.
19. Kennedy B. Power Quality Primer, McGraw-Hill, 2000.
20. MacGregor S. D. An Overview of Power Quality Issues and Solutions. Proceedings of the 1998 IEEE Cement Industry Conference. May 17-21, 1998, pp. 57-64.
21. Martluff F. D., Gruz T. M. Power Quality Site Surveys: Facts, Fiction and Fallacies. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 24, no. 6, November/December 1988.
22. Seymour J., Horsley T. The Seven Types of Power Problems. APC Whitepaper #18.
[https://www.halimeter.com/images/apc the seven types of power problems.pdf](https://www.halimeter.com/images/apc_the_seven_types_of_power_problems.pdf) უკანასკნელად იყო გადამოწმებული - 02. 02. 2018
23. Stones J., Collinson A. Power Quality / Power Engineering Journal. April, 2001, pp. 58-64.
24. IEEE Interharmonics in Power Systems / IEEE Interharmonic Task Force.
<http://grouper.ieee.org/groups/harmonic/iharm/>
უკანასკნელად იყო გადამოწმებული - 02. 02. 2018
25. Yacamini Y. Power Systems Harmonics. – Part 1: Harmonic Sources / Power Engineering Journal. August 1994, pp. 193-198.
26. Yacamini Y. Power Systems Harmonics. – Part 3: Problems Caused by Distorted Supplies/ Power Engineering Journal. October 1995, pp. 233-238.
27. Duffey C. K., Stratford R. P. Update of Harmonic Standard IEEE-519: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 25, no. 6, November/December 1989, pp. 1025-1034.
28. Hoevenaars T., LeDoux K., Colosino M. Interpreting IEEE Std. 519 and Meeting its Harmonic Limits in VFD Applications. Proceedings of the IEEE Industry Applications Society 50th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference. September 15-17, 2003, pp. 145-150.

29. IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications. (The Orange Book), IEEE Std. 446-1995.
30. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. IEEE Std. 519-1992, revision of IEEE Std. 519-1981.
31. IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment. IEEE Std. 1100-1992 (Emerald Book).
32. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. IEEE Std. 1159-1995.
33. IEEE Guide for Service to Equipment Sensitive to Momentary Voltage Disturbances. IEEE Std. 1250-1995.
34. IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment. IEEE Std. 1346-1998.
35. IEEE Recommended Practice for Measurement and Limits of Voltage Fluctuations and Associated Light Flicker on AC Power Systems. IEEE Std. 1453-2004.
36. Baran M. E., Maclaga J., Kelley A. W., Craven K. Effects of Power Disturbances on Computer Systems. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, no. 4, October 1998, pp. 1309-1315.
37. Johnson K., Zavadil R. Assessing the Impacts of Nonlinear Loads on Power Quality in Commercial Buildings – An Overview. Conference Record of the 1991 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, September 28-October 4, 1991, pp. 1863-1869.
38. Wagner V. E. Effects of Harmonics on Equipment. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no. 2, April 1993, pp. 672-680.
39. Siemens. Harmonic Distortion Damages Equipment and Creates a Host of Other Problems.
<http://www.sbt.siemens.com/HVP/Components/Documentation/SI033WhitePaper.pdf>. უკანასკნელად იყო გადამოწმებული - 10. 02. 2018
40. ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (Up to 300 MHz). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.
41. Redl R., Kislovski A. S. Telecom Power Supplies and Power Quality. Proceedings of the 17th International Telecommunications Energy Conference, INTELEC '95, October 29-November 1, 1995, pp. 13-21.
42. Armstrong K. Filters. Conformity, 2004, pp. 126-133.
43. Armstrong K. Spotlight on Filters. Conformity, July 2003, pp. 28-32.

44. ANSI. American National Standard Guide on the Application and Evaluation of EMI Power-Line Filters for Commercial Use. ANSI C63.13 1991.
45. Astec, Inc. EMI Suppression. Application note 1821, November 12, 1998.
46. Barnes J. R. Designing Electronic Systems for ESD Immunity. Conformity, February 2003, pp. 18-27.
47. Chung H., Hui S. Y. R., Tse K. K. reduction of Power Converter EMI Emission Using Soft-Switching Technique. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, vol. 40., no. 3, August 1998, pp. 282-287.
48. Curatolo T., Cogger S. Enhancing a Power Supply to Ensure EMI Compliance. EDN, February 17, 2005, pp. 67-74.
49. CEI/IEC 1000-2-1: 1990.. Electromagnetic Compatibility. 1st ed, 1990.
50. Аррила Дж. Гармоники в электрических системах: пер. С англ./ Дж. Аррила, Д. Бредли, П. Боджер. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
51. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость / М.П. Бадер. – М.: УМК МПС, 2002.
52. Вагин Г.Я. Режимы электросварочных машин / Г.Я. Вагин. - М.: Энергоатомиздат, 1985.
53. Вагин Г.Я. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, А.А. Севостьянов. – Н. Новгород: Изд-во НГТУ, 2004.
54. Вагин Г.Я. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: комплекс учебно-методических материалов для студентов заочной и дистанционной форм обучения / Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов. – Н. Новгород: Изд-во НГТУ, 2007.
55. Вагин Г.Я. О необходимости приведения норм ГОСТ 13109-97 к требованиям международных стандартов/ Г.Я. Вагин// Промышленная энергетика. -2004. - № 9.
56. Жежеленко И.В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2005.
57. Железко Ю.С. Стандартизация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю.С. Железко. - М.: Энергоатомиздат, 1985.
58. Железко Ю.С. Стандартизация параметров электромагнитной совместимости в международной и отечественной практике / Ю.С. Железко. // Электричество. – 1996. - №1.
59. Зимин Е.Ф. Электромагнитная совместимость информационных систем / Е.Ф. Зимин, Ю.А. Казанцев, В.А. Кузовкин. – М.: Изд-во МЭИ, 1995.
60. Кармашев В.С. Электромагнитная совместимость технических средств: справочник / В.С. Кармашев. – М.: Изд-во Норт, 2002.

61. Кравченко В.И. радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / В.И. Кравченко, Е.А. Болотов, Н.И. Летунова. – М.: Радио и связь, 1987.
62. Максимов Б.К. Статическое электричество в промышленности и защита от него / Б.К. Максимов, А.А. Обух, - М.: Электроатомиздат, 2002.
63. Управление качеством электроэнергии / (И.И. Карташеви др.). – М.: Изд-во МЭИ, 2006.
64. Шваб А.И. Электромагнитная совместимость: пер. С нем. / А.И. Шваб – М.: Энергоатомиздат, 1985.
65. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике / (А.Ф. Дьяков и др.). – М.: Изд-во МЭИ, 2009.
66. Электромагнитная совместимость электроприемников промышленных предприятий / (А.К. Шидловский и др.). – Киев: Наукова думка, 1992.
67. ГОСТ 13 109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации. – ИПК Изд-во стандартов, 1998.
68. ГОСТ Р 51317.2.4-2000. Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Уровни электромагнитной совместимости для низкочастотных кондуктивных помех в системах электроснабжения промышленных предприятий. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001.
69. ГОСТ Р 51317.4.1-2000 (МЭК 61000-4-1-2000). Совместимость технических средств электромагнитная. Испытания на помехоустойчивость. Виды испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 2001.
70. СО 334.35.311-2004. Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях. – М.: Изд-во МЭИ, 2004.
71. СО 153-34-21.122-2003. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникации. – М.: Изд-во МЭИ, 2003.
72. Методические указания по ограничению высокочастотных коммутационных перенапряжений и защита от них электротехнического оборудования в распределительных устройствах 110 кВ и выше. – М.: ОРГРЭС, 1998.
73. Руководства по защите электрических сетей от грозových и внутренних перенапряжений. – СПб.: Изд-во ПЭМ ПК, 1999.
74. СанПиН 2.2.4.1191-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. 2.2.4. физические факторы производственной среды.

Электромагнитные поля в производственных условиях. – М.: Минздрав РФ, 2003.

75. РД 34.20.116-93 РАО «ЕЭС России». Методические указания по защите вторичных цепей электрических станций и подстанций от импульсных помех. – М.: 1993.

76. РД 34.35.310-97 РАО «ЕЭС России». Общие технические требования к микропроцессорным устройствам защиты и автоматики энергосистем. – М.: ОРГРЭС, 1997.

77. ჭუნაშვილი ბ., პეტროსიანი ა., გამრეკელაშვილი თ. ელექტროტექნოლოგიური დანადგარების მიერ ელექტრომომარაგების ქსელებში წარმოქმნილი ძაბვის მაღალი სიხშირის ჰარმონიკები და მათი გავრცელებით გამოწვეული შედეგები. III საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის - „ენერგეტიკა: რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები“ –ს მოხსენებების კრებული. ქუთაისი, საქართველო, 2015. გვ. 38–41.

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

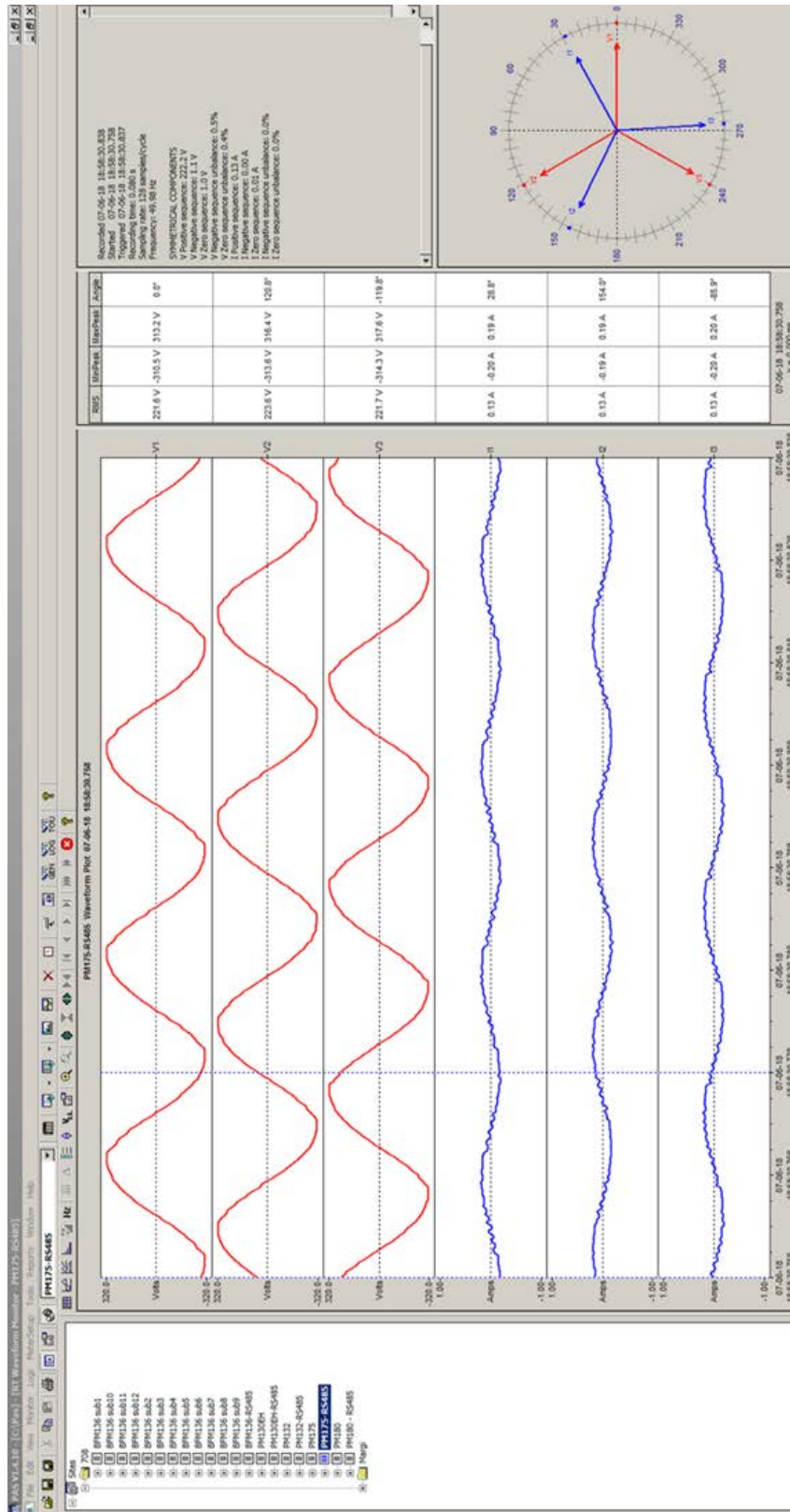
79. ჭუნაშვილი ბ., ქობალია მ., ხარებავა დ. ელექტრომომხმარებლების მიერ ქსელში წარმოქმნილი მაღალი სიხშირის ჰარმონიკების სიმეტრიულობის გამოკვლევა. „საქართველოს საინჟინრო სიახლენი“, 2016, №4(80), გვ. 57–61.

80. ჭუნაშვილი ბ., შაველაშვილი გ., ბეჟანიშვილი ჯ, გამრეკელაშვილი თ. ძაბვის მაღალი რიგის ჰარმონიკების ელექტრომიმღებებზე გავლენის შეფასება. „ენერჯია“, 2017, #3 (80), გვ. 22-27.

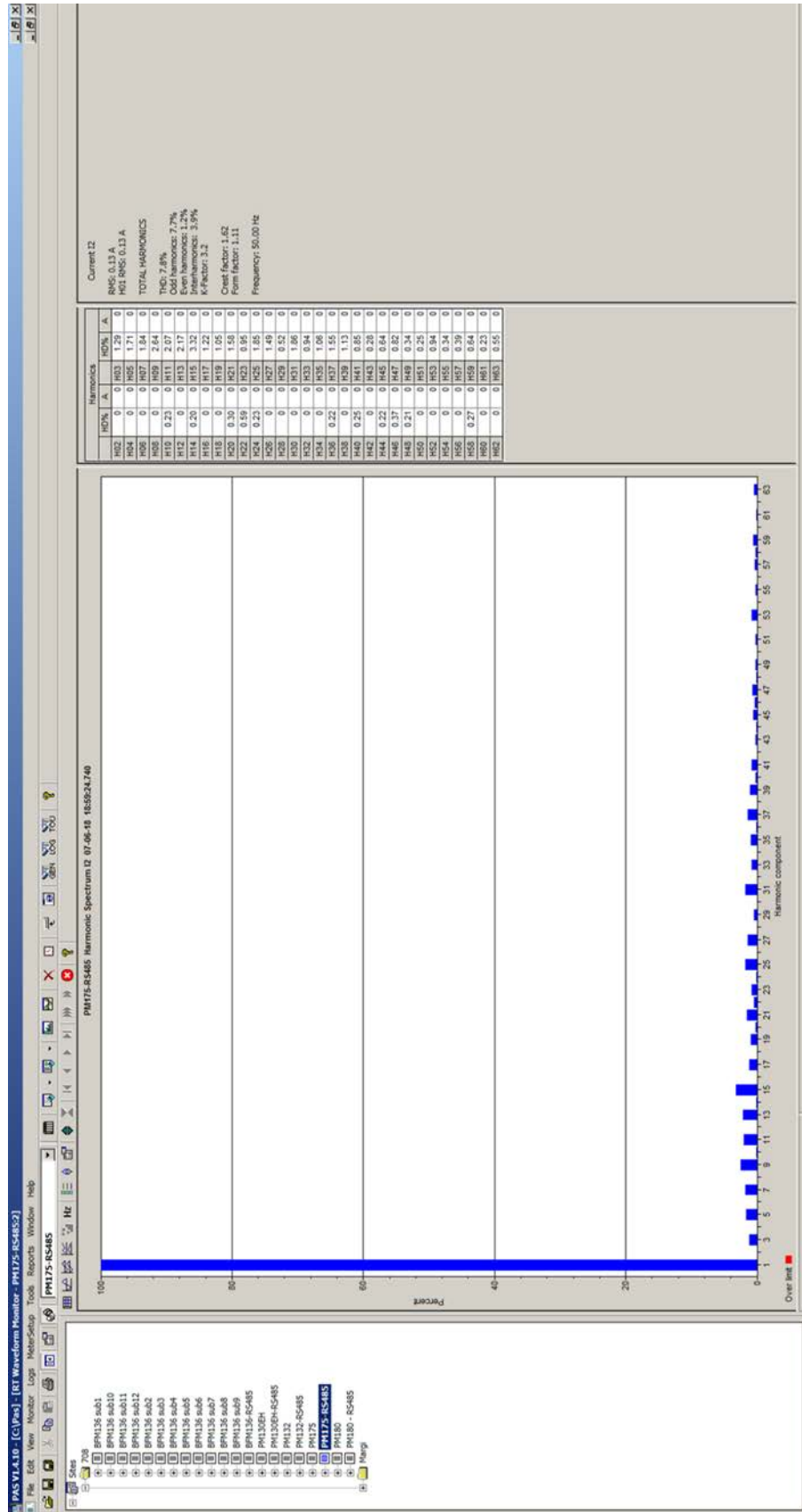
დანართები

დანართი 1

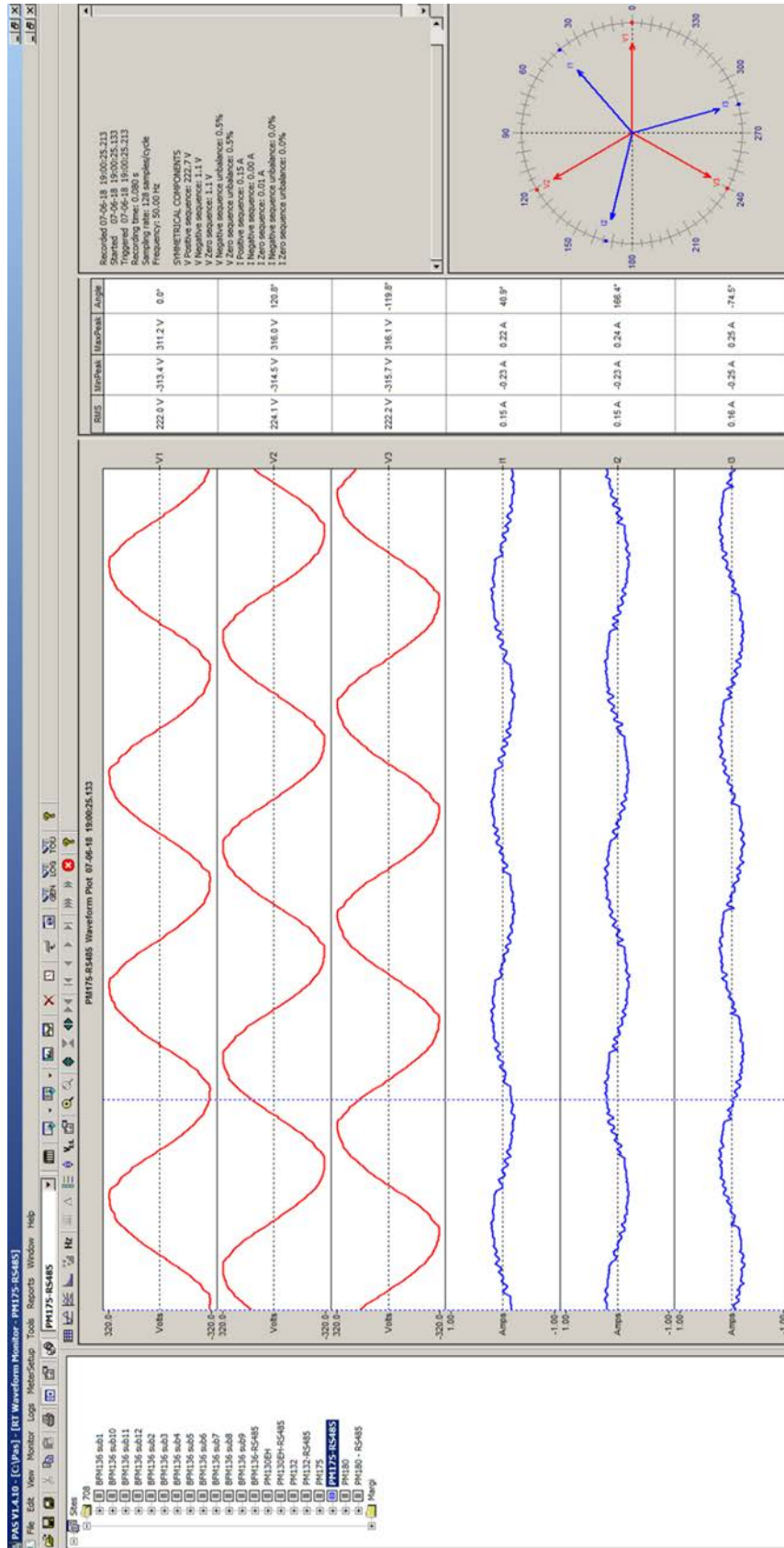
ლატვირთვის დენის და ძაბვის მრუდები R1-C2-სათვის



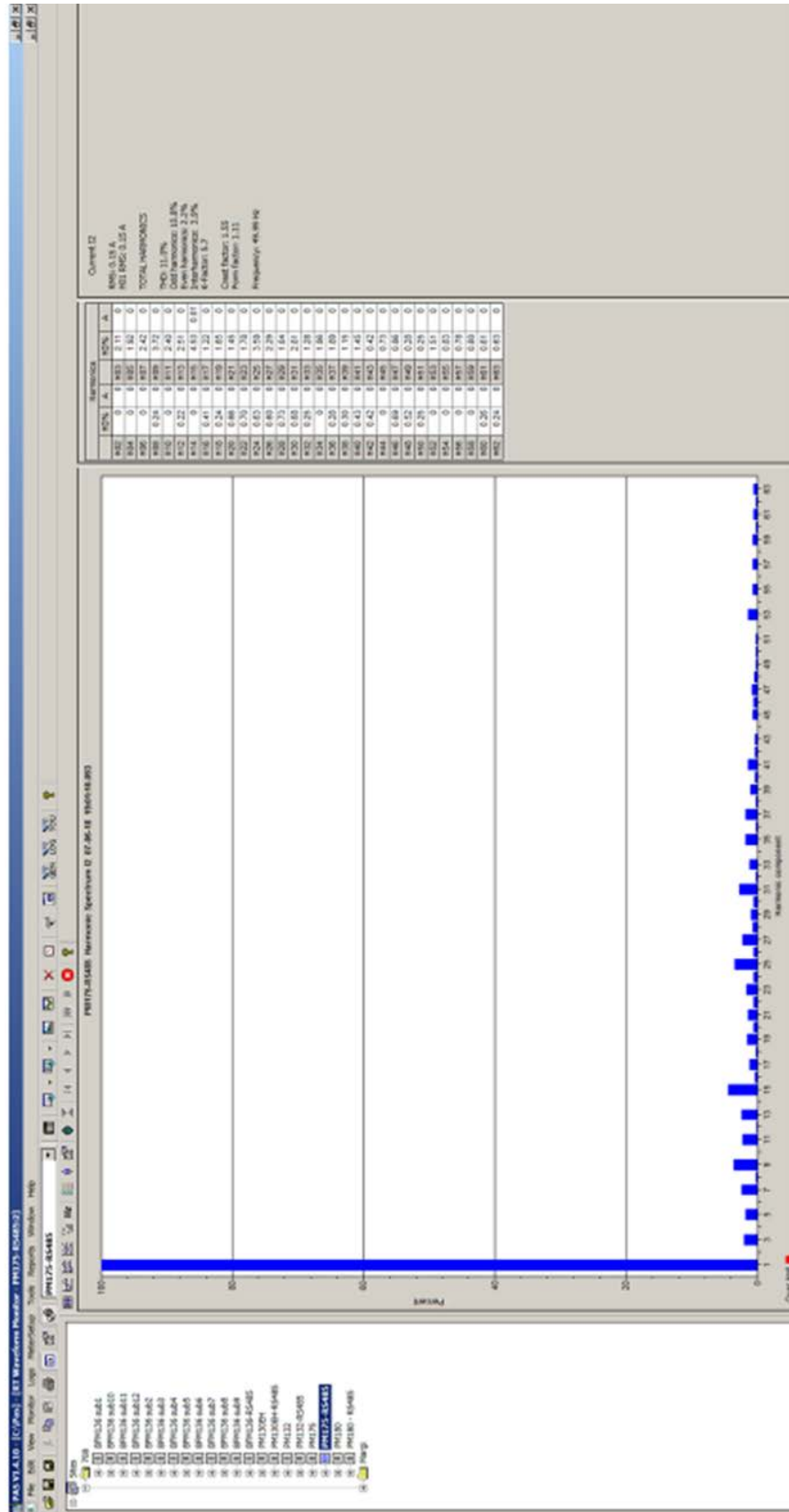
დატვირთვის ჰარმონიკები R1-C1 –სათვის



დატვირთვის დენის და ძაბვის მრუდები R1-C2 –სათვის

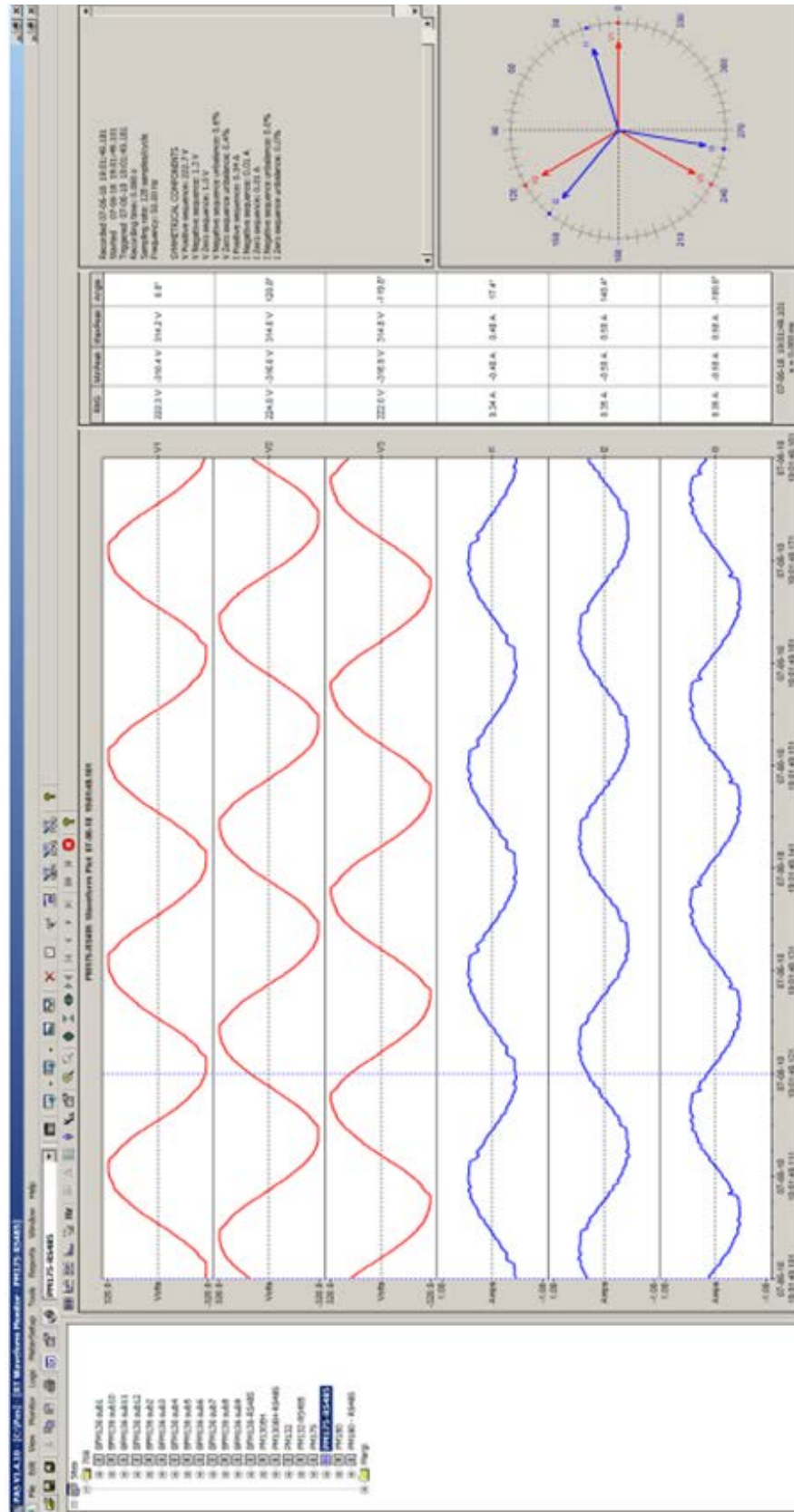


ლატვირთვის ჰარმონიკები R1-C2-სათვის

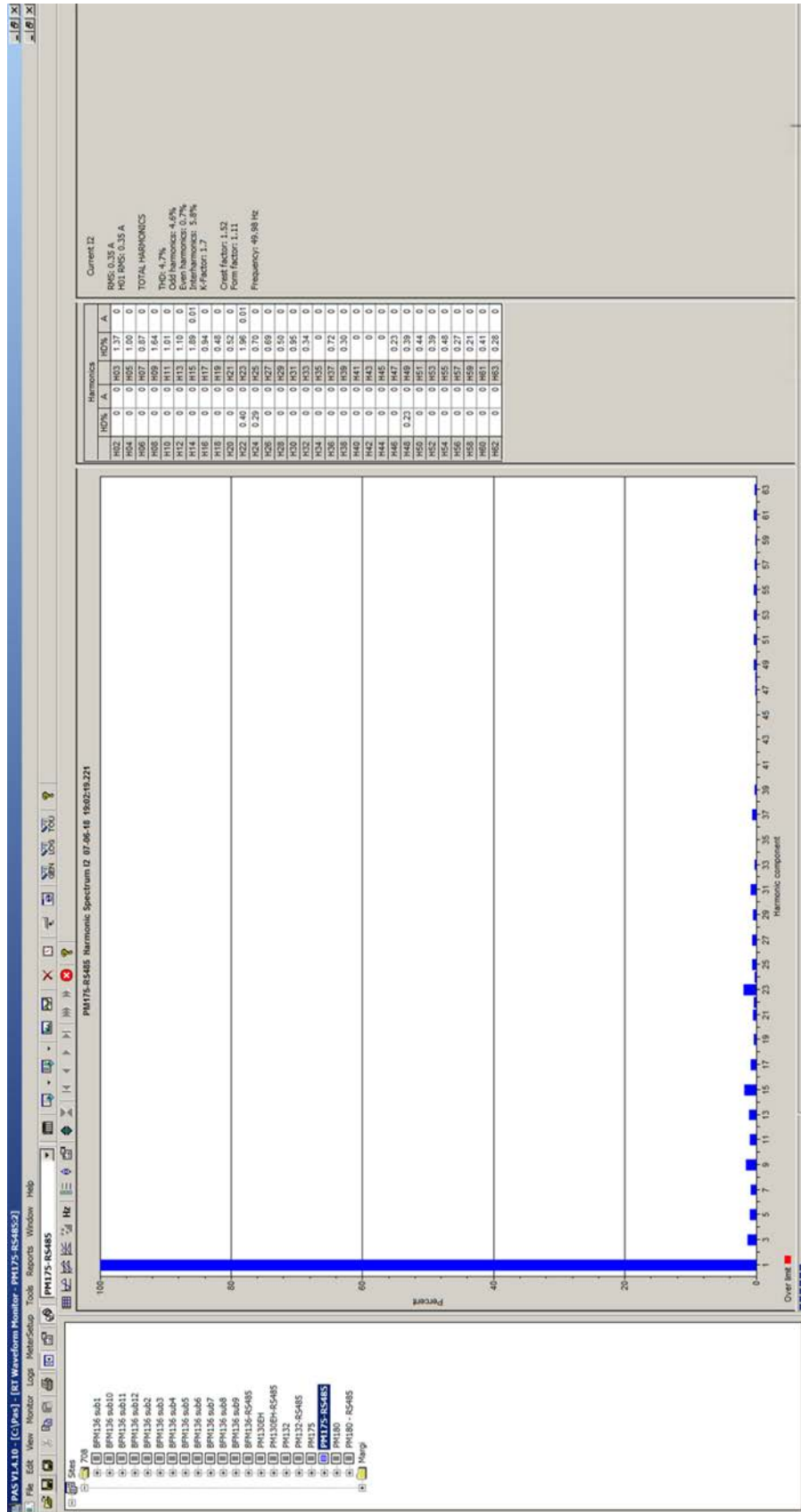


დატვირთვის დენის და ძაბვის მრუდები R2-C2 –სათვის

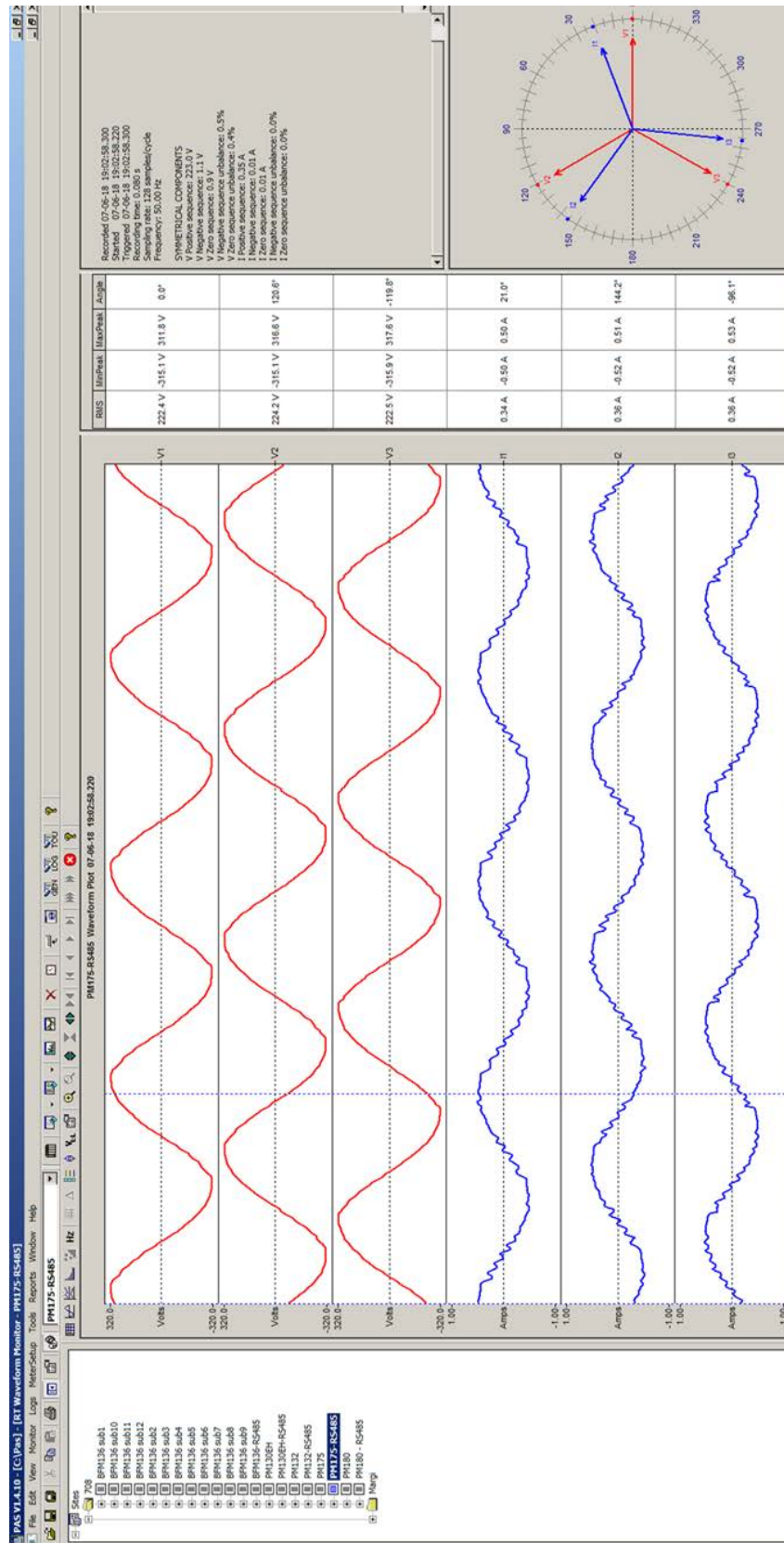
R2-C2



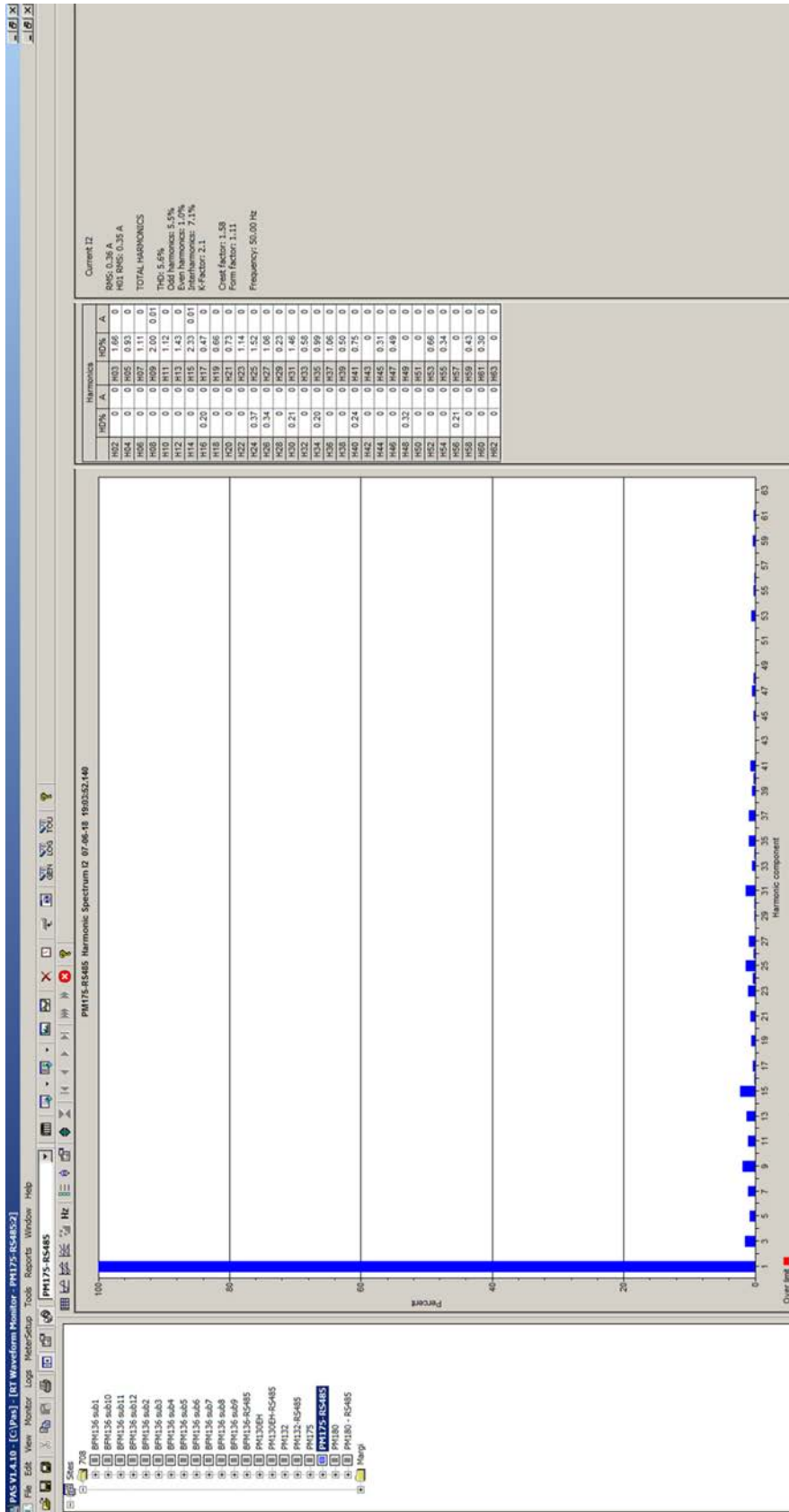
ჰარმონიკები R2-C2 –სათვის



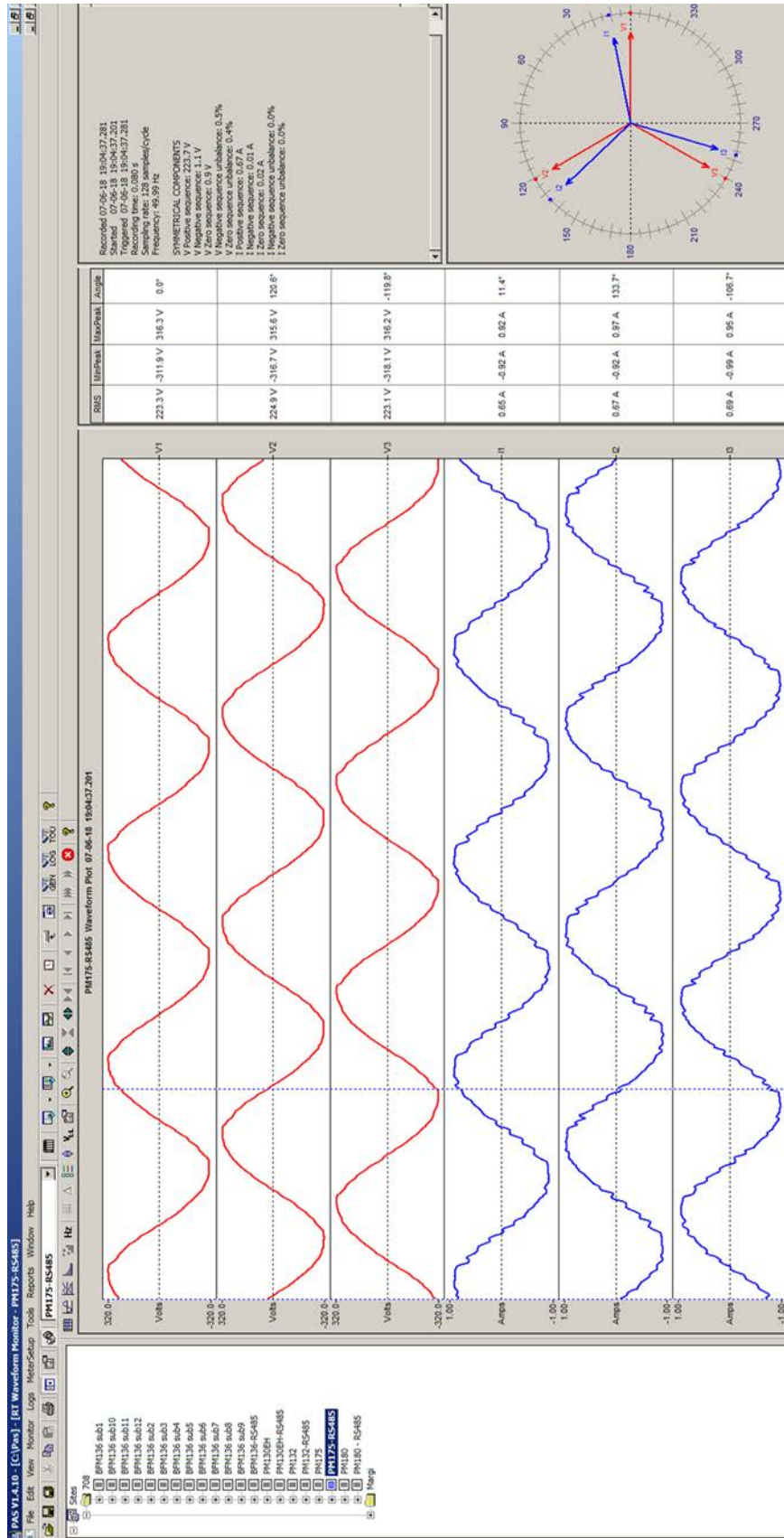
დატვირთვის დენის და ძაბვის მრუდები R2-C3-სათვის



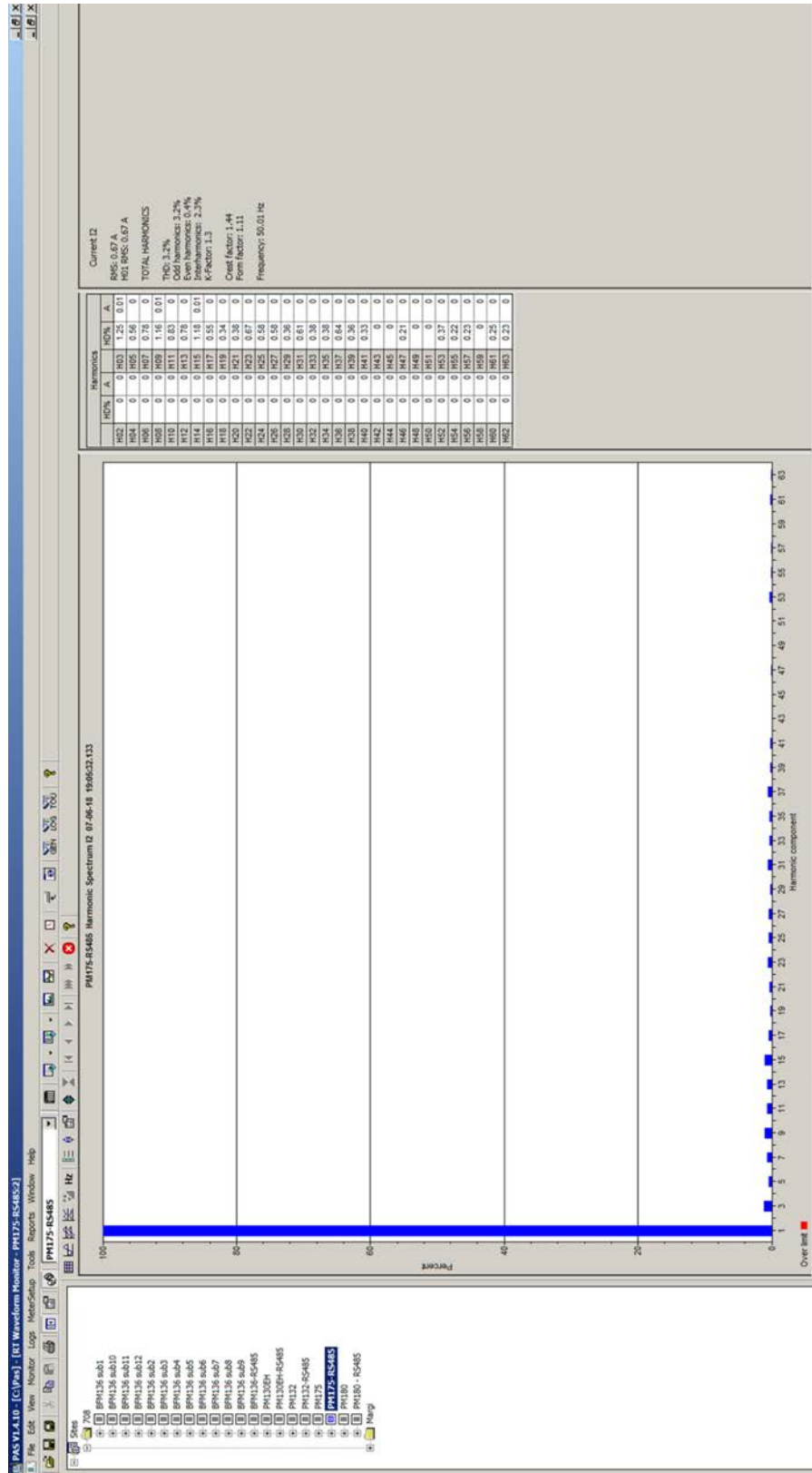
დატვირთვის ჰარმონიკები R2-C3-სათვის



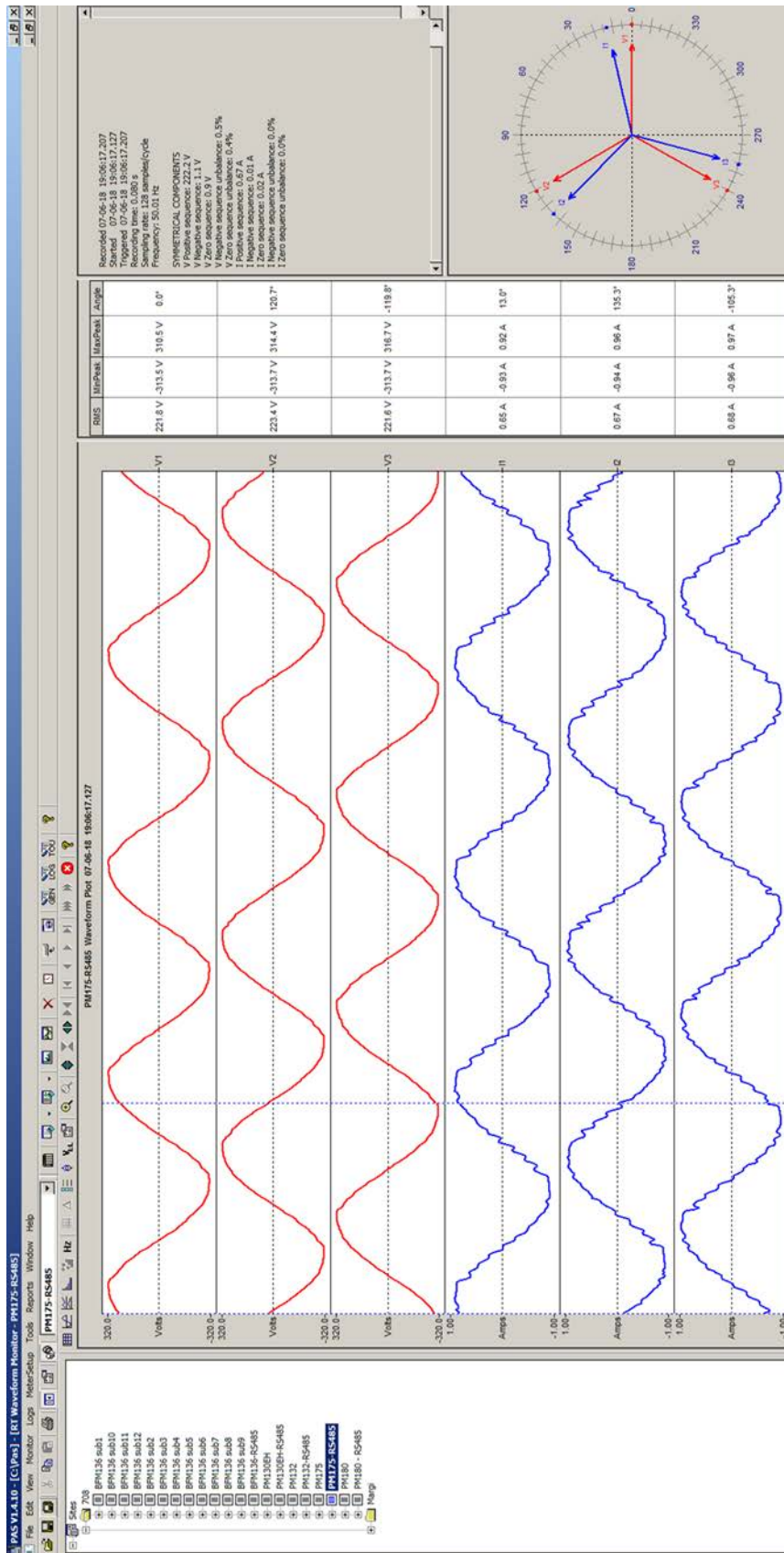
დატვირთვის დენის და ძაბვის მრუდები R3-C3-სათვის



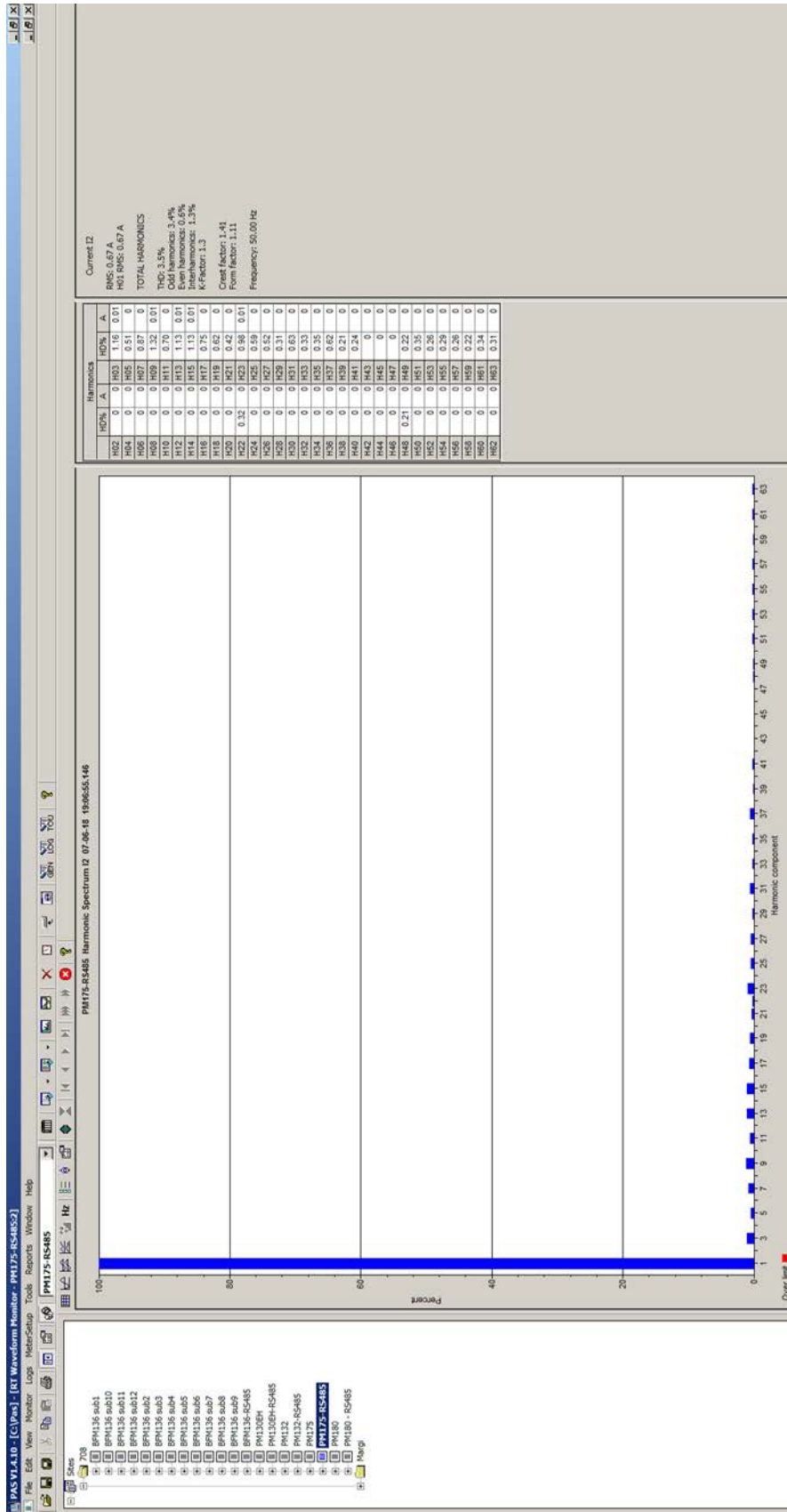
დატვირთვის ჰარმონიკები R3-C3—სათვის



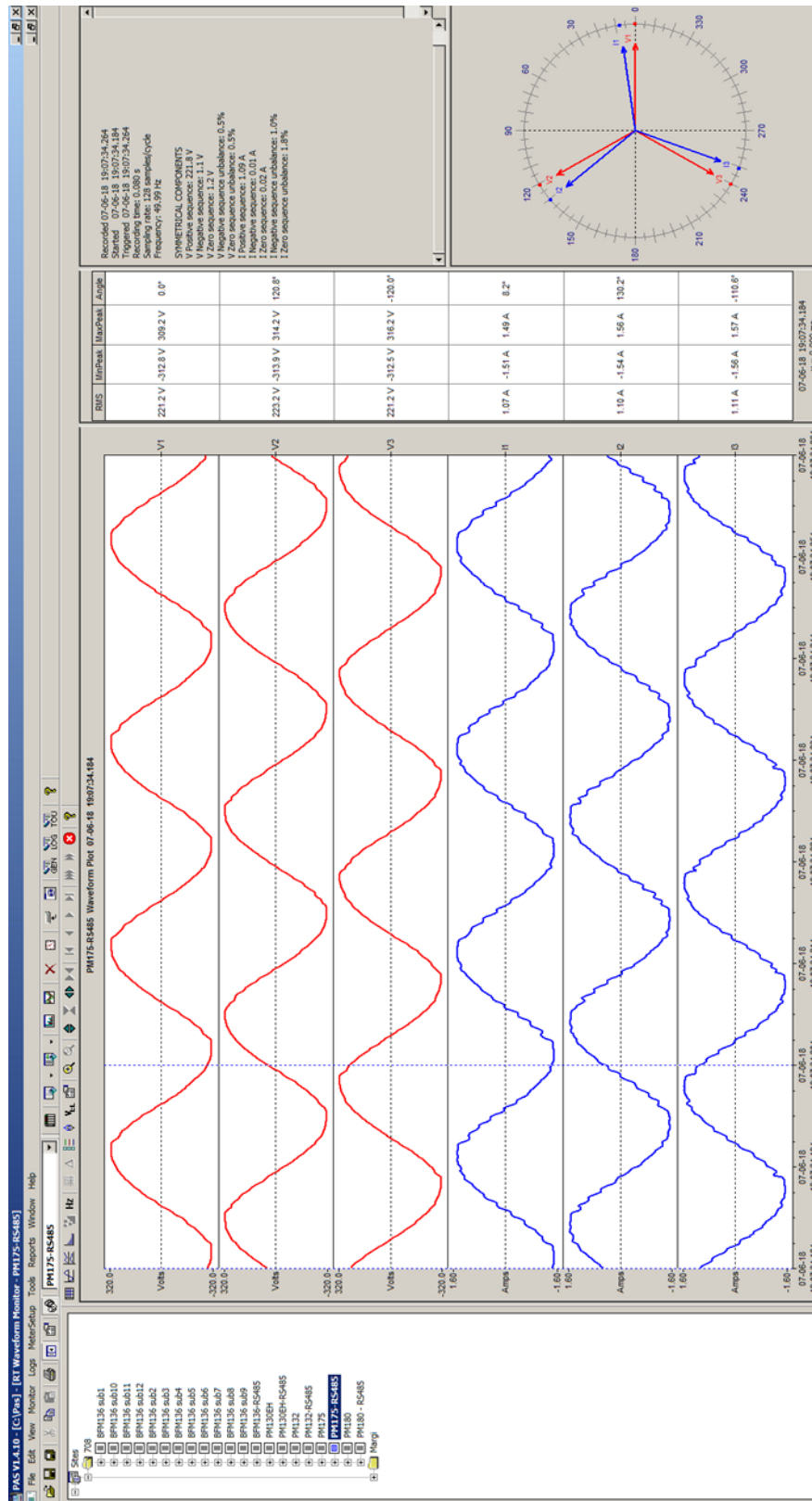
დატვირთვის დენის და ძაბვის მრუდები R3-C4 –სათვის



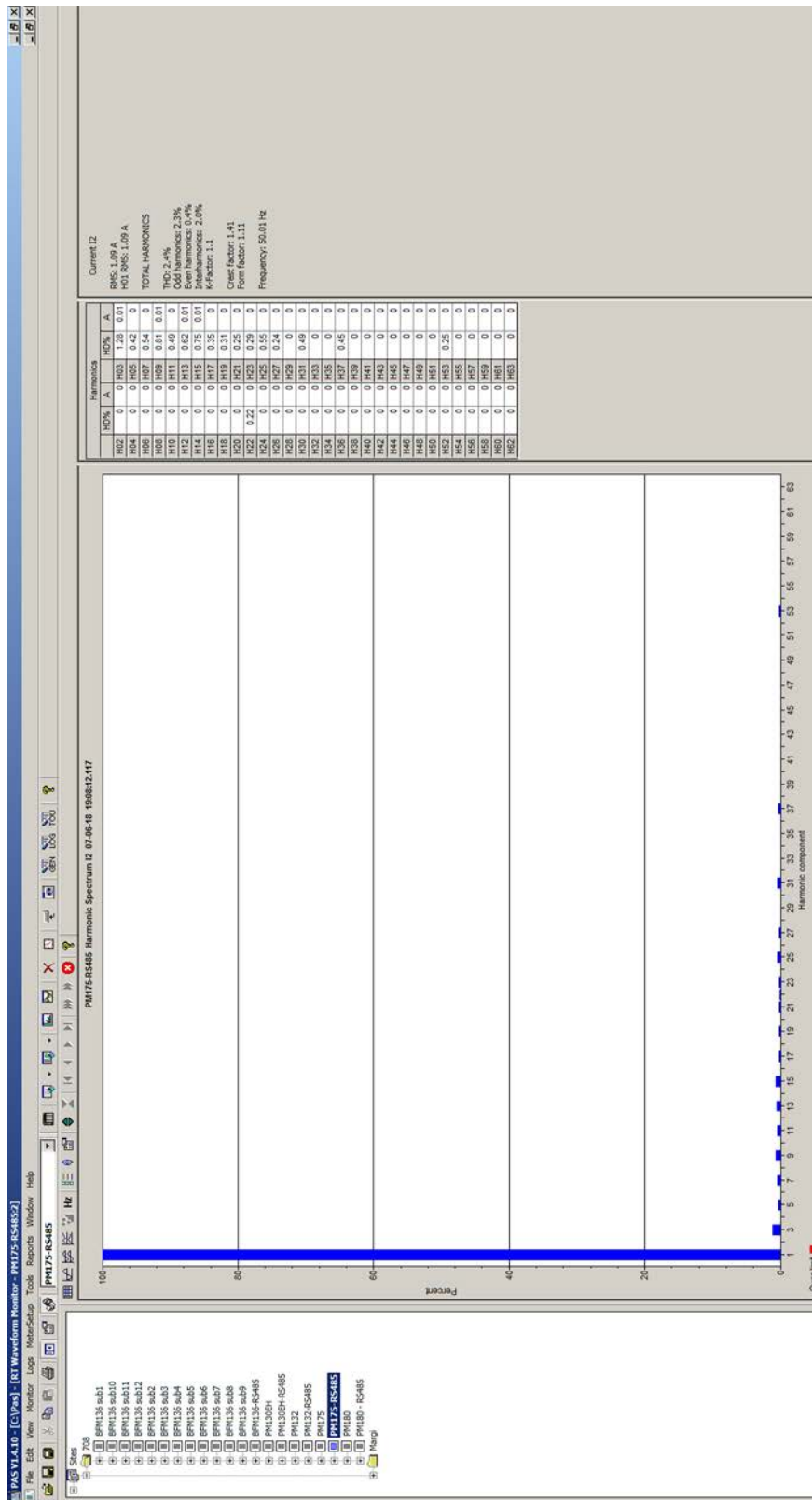
დატვირთვის ჰარმონიკები R3-C4 –სათვის



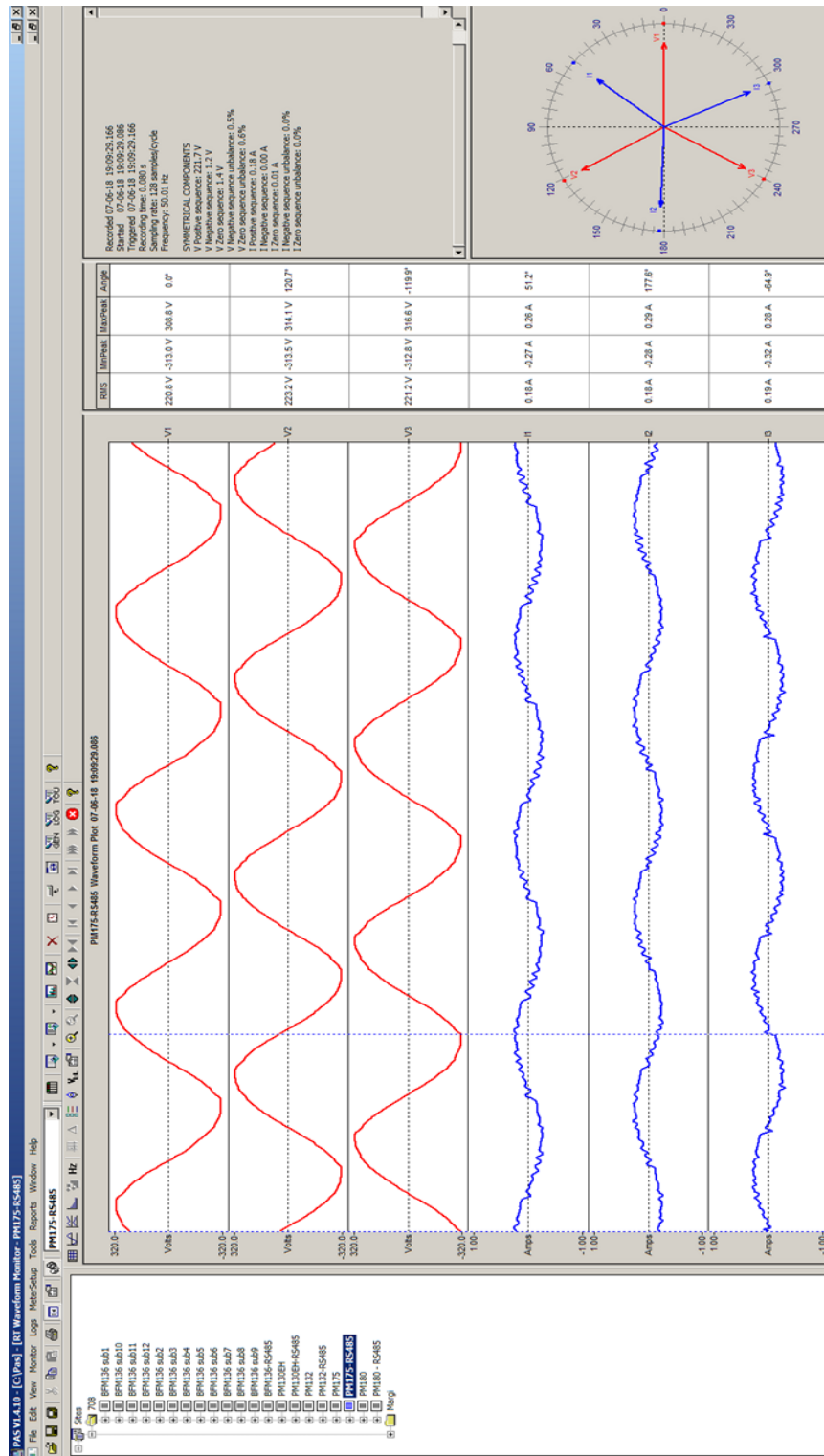
ლატვირთვის დენის და ძაბვის მრუდები R4-C4 –სათვის



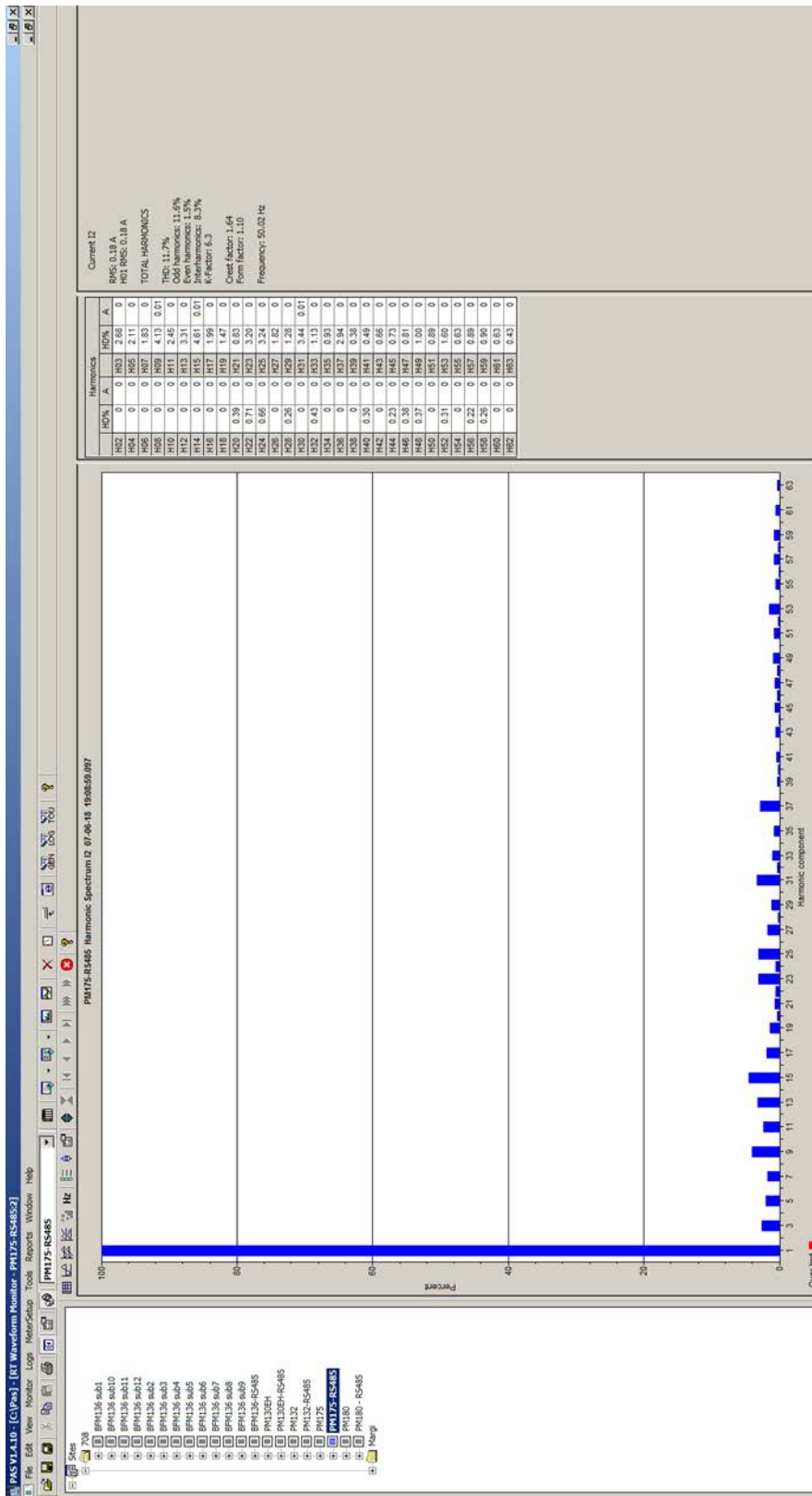
დატვირთვის ჰარმონიკები R4-C4 – სათვის



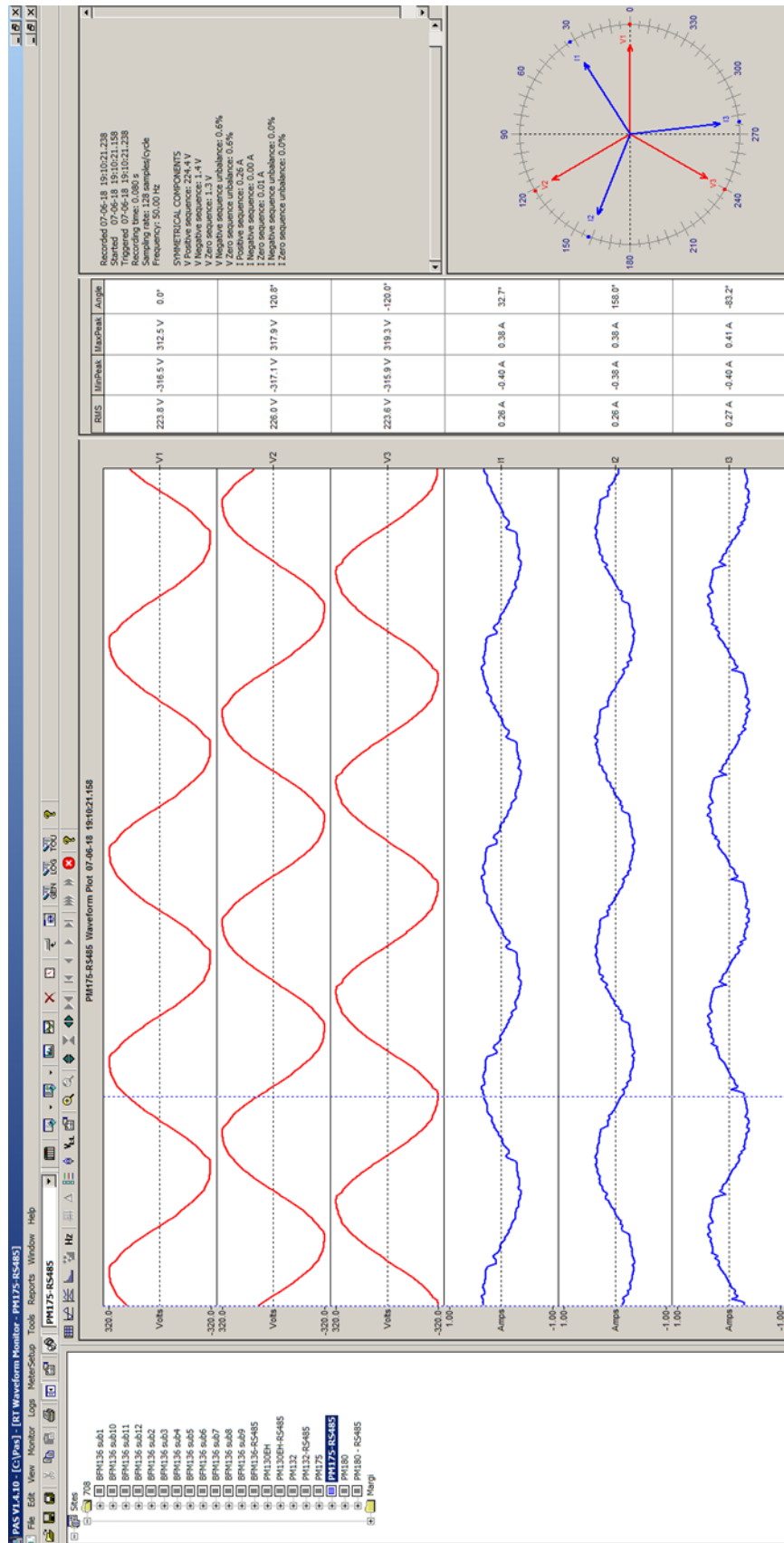
დატვირთვის დენის და ძაბვის მრუდები R1-C4-სათვის



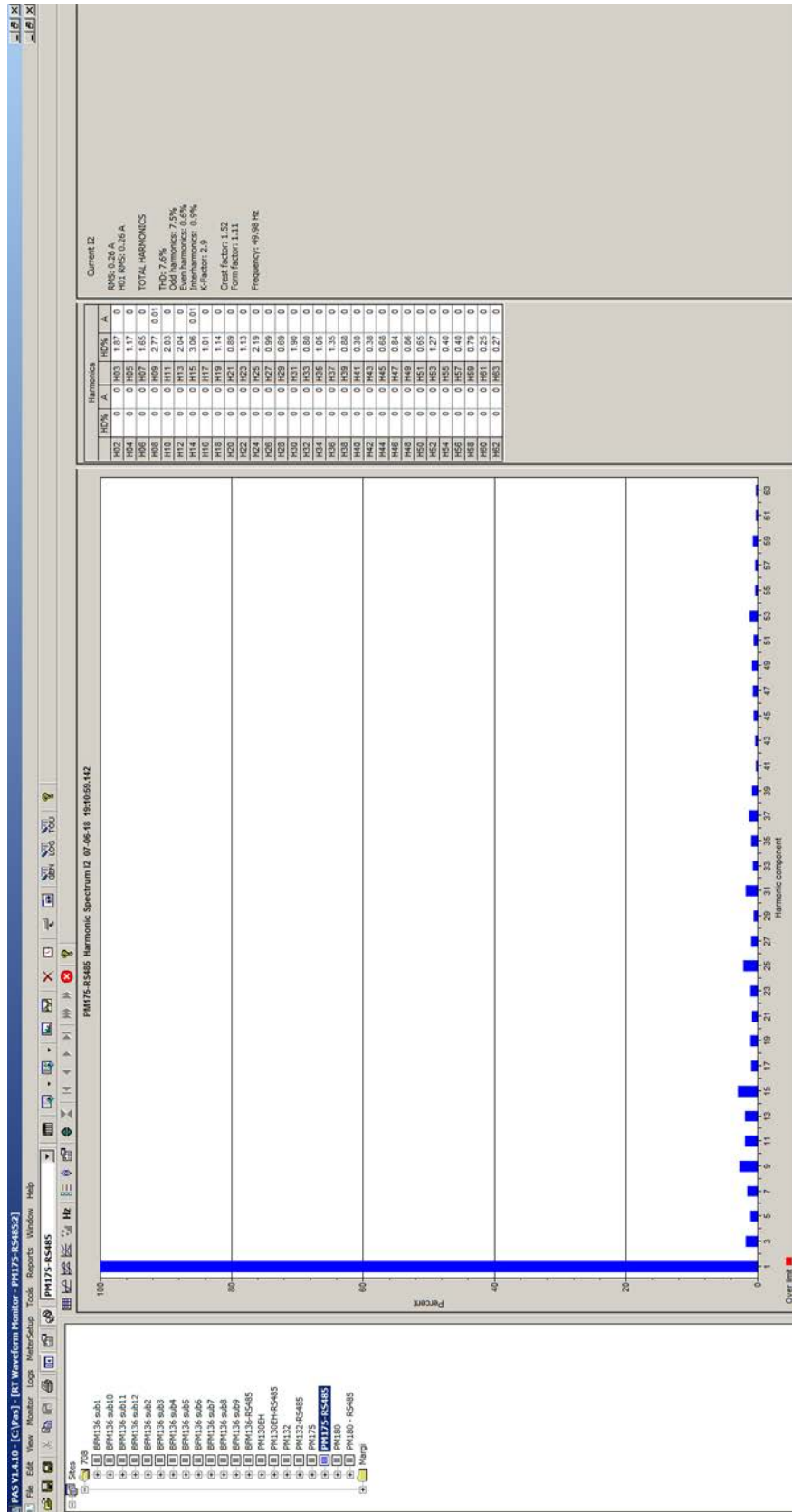
დატვირთვის ჰარმონიკები R1-C4 –სათვის



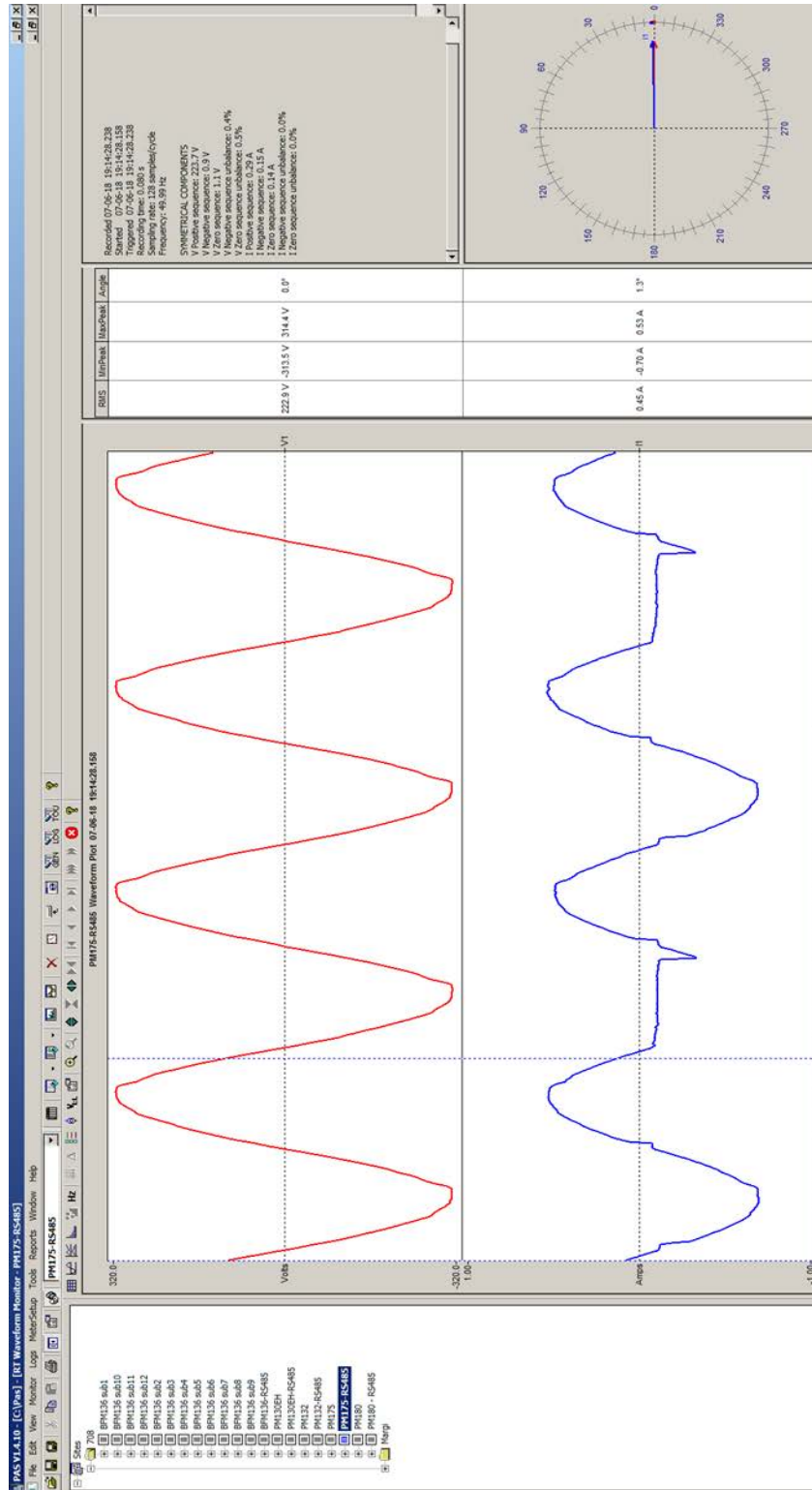
დატვირთვის დენის და ძაბვის მრუდები R2-C4 –სათვის



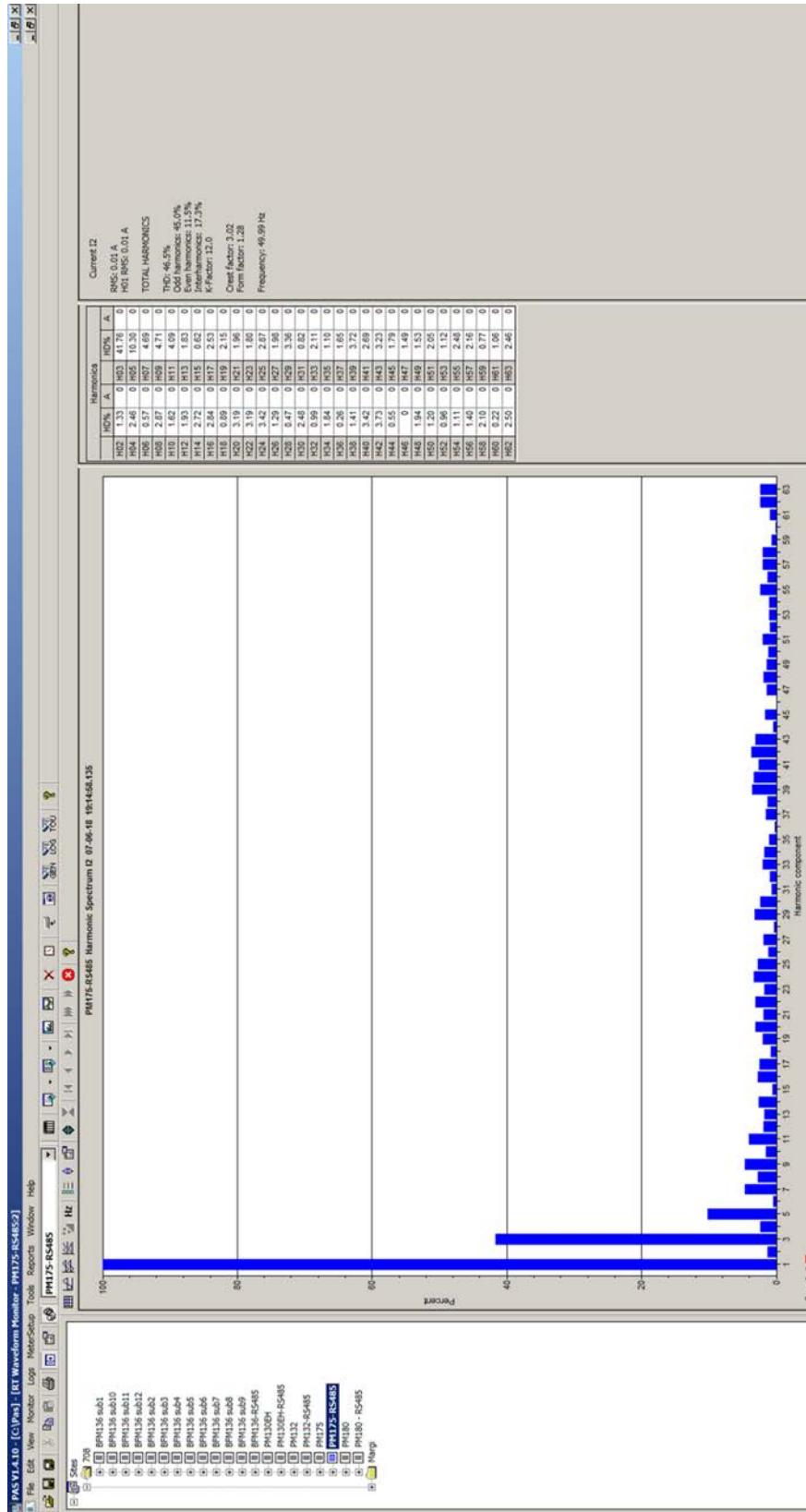
დატვირთვის ჰარმონიკები R2-C4 –სათვის



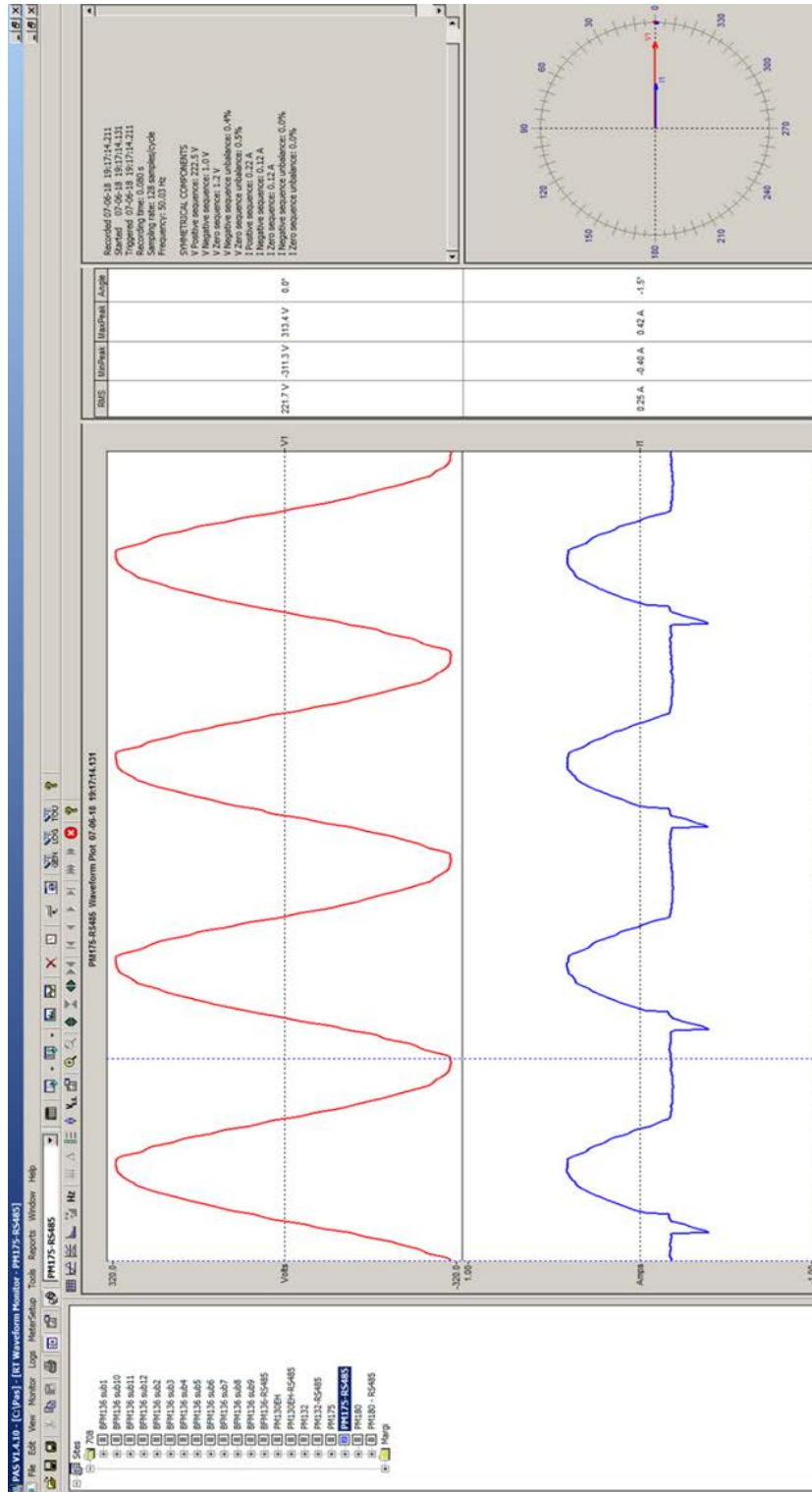
დატვირთვის A ფაზის დენის და ძაბვის მრუდები R4+SV34 (MAX გახსნილი კუთხე)



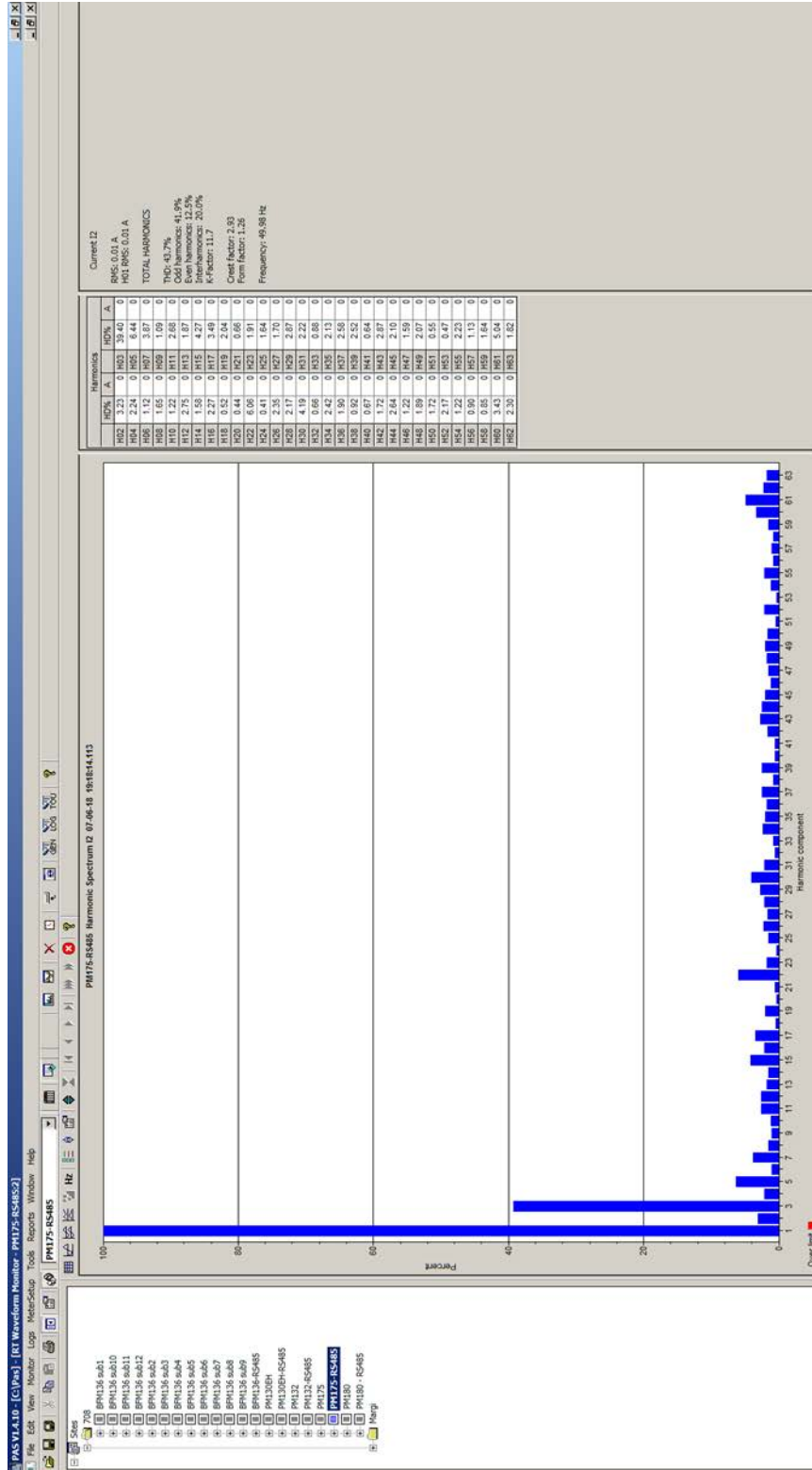
ლატვიროვის A ფაზის ჰარმონიკები R4+SV34-(MAX გახსნილი კუთხე)



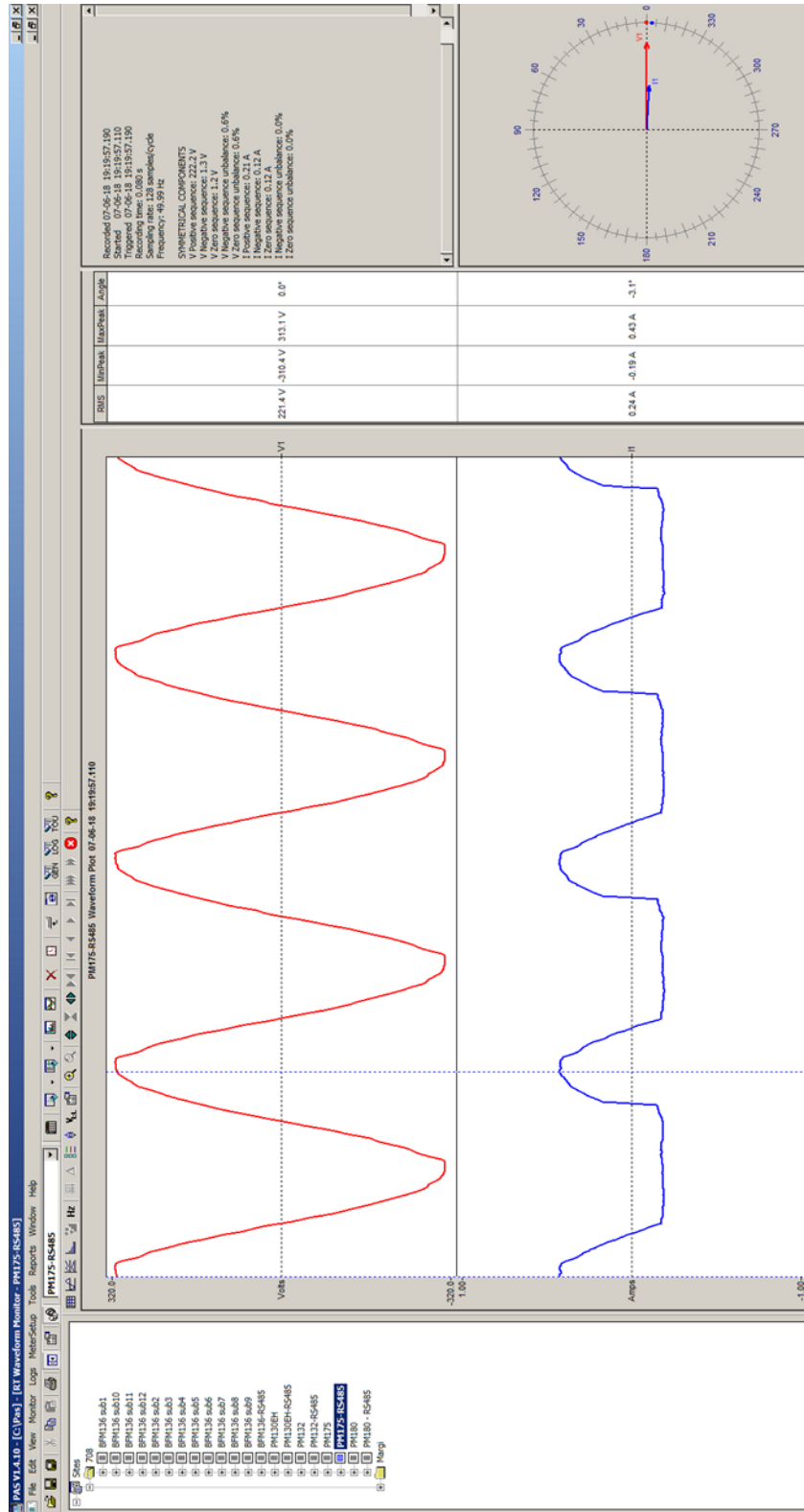
დატვირთვის A ფაზის დენის და ძაბვის მრუდები R4+SV34-(90 გრადუსით გახსნილი კუთხე)



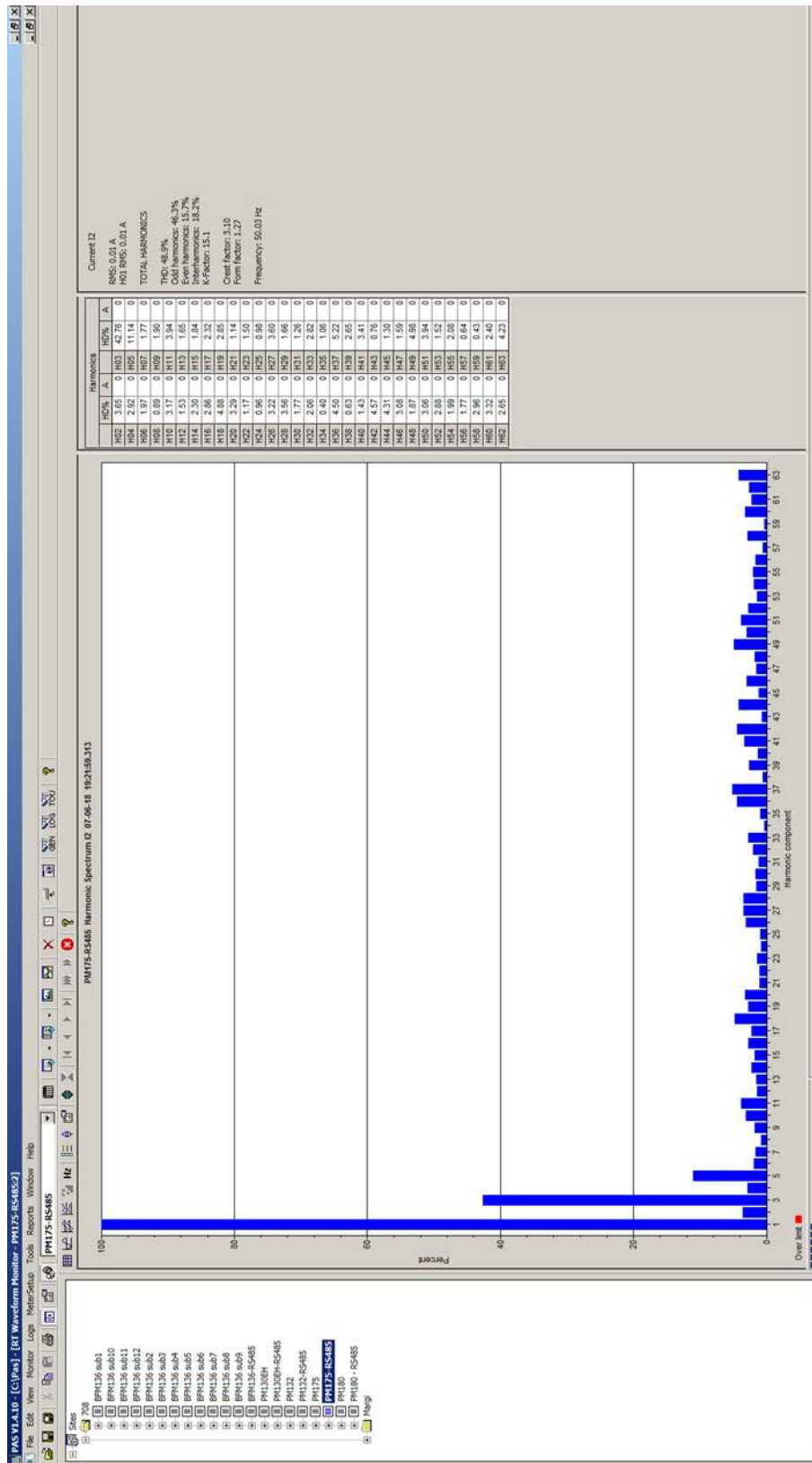
დატვირთვის A ფაზის ჰარმონიკები R4+SV34-(90 გრადუსით გახსნილი კუთხე)



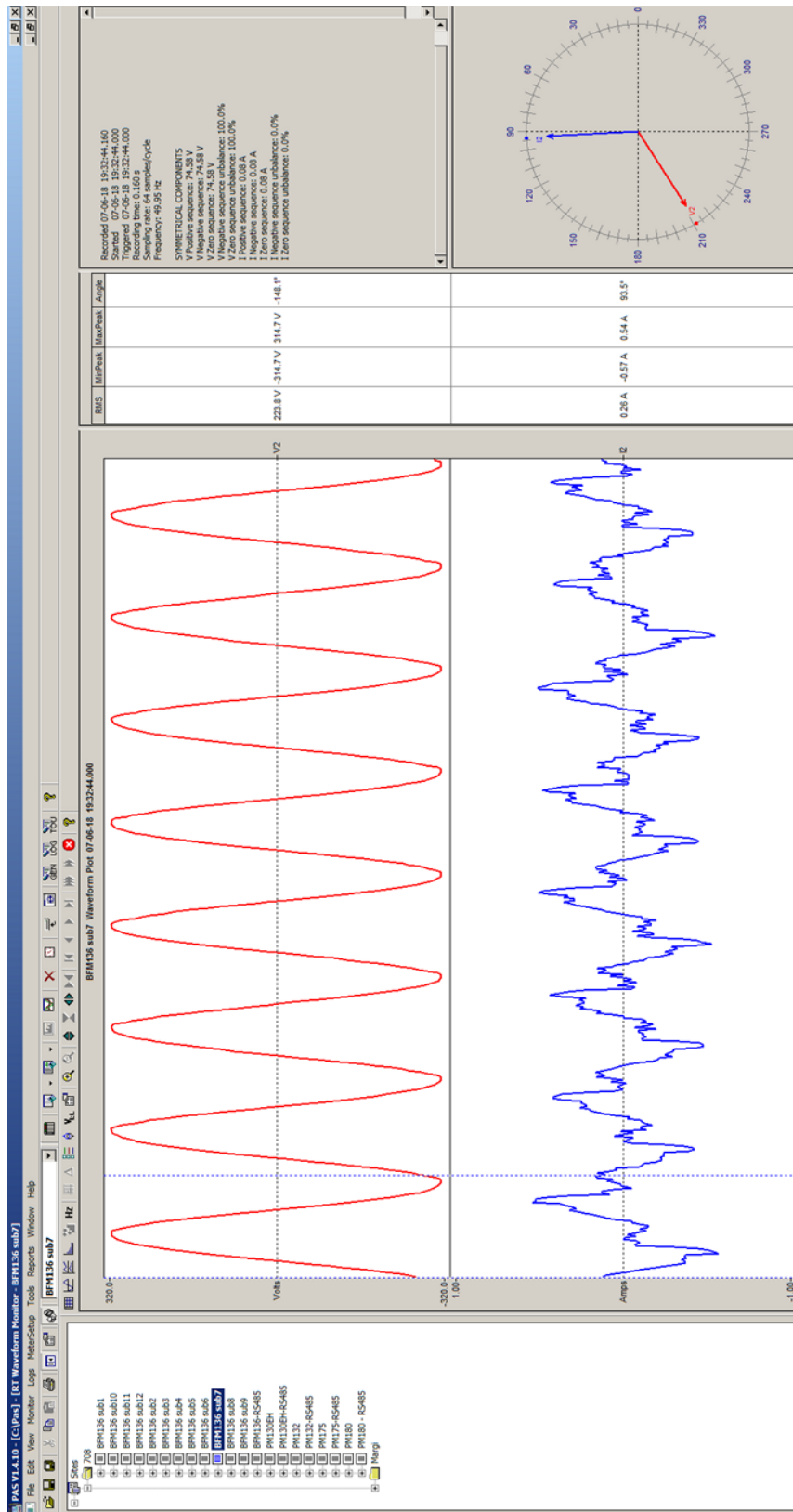
დატვირთვის A ფაზის დენის და ძაბვის მრუდები R4+SV34-(MIN გახსნილი კუთხე)



ლატვიროვის A ფაზის ჰარმონიკები R4+SV34-(MIN გახსნილი კუთხე)



კომპიუტერული ტექნიკის დენის და ძაბვის მრუდები



კომპიუტერული ტექნიკის ჰარმონიკების სპექტრი

