



საქართველოს ტექნიკური  
უნივერსიტეტი  
1922 წლიდან

ნიკა ასპანიძე

ელექტრული ენერჯის ხარისხის გამაუარესებელი  
მომხმარებლების იდენტიფიკაცია და მათი  
გავლენის შეზღუდვის ხერხები და გზები

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა: „ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“

შიფრი: 0713

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, 0160, საქართველო

2022 წ.

## საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ფაკულტეტი: ენერგეტიკა

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ნიკა ასპანიძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ელექტრული ენერჯის ხარისხის გამაუარესებელი მომხმარებლების იდენტიფიკაცია და მათი გავლენის შეზღუდვის ხერხები და გზები“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის საინჟინრო, ტექნოლოგიური და საბუნებისმეტყველო საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

-----, ----- 2022 წელი

სამეცნიერო ხელმძღვანელი/ხელმძღვანელები: ტექ. მეცნ. კანდიდატი გ. მახარაძე

რეცენზენტი: \_\_\_\_\_

რეცენზენტი: \_\_\_\_\_

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2022 წ.

ავტორი: ნიკა ასპანიძე

დასახელება: „ელექტრული ენერჯის ხარისხის გამაუარესებელი მომხმარებლების იდენტიფიკაცია და მათი გავლენის შეზღუდვის ხერხები და გზები“

სადოქტორო პროგრამა: „ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“

მისანიჭებელი კვალიფიკაცია: ენერგეტიკის და ელექტროინჟინერიის დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: \_\_\_\_\_

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

ავტორის ხელმოწერა \_\_\_\_\_

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

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

## რეზიუმე

სადისერტაციო თემაში განხილულია თანამედროვე მსოფლიოს ელექტროსისტემებისათვის ახალი გამოწვევა ელექტრული ენერჯის ხარისხის მონიტორინგის გზები. მონიტორინგის შედეგების გამოყენების სფერო და მისი საშუალებით ელექტროენერგეტიკული სისტემის ელემენტების კონტროლის ღონისძიების შემუშავების ხერხები. აგრეთვე წარმოდგენილია ელექტროენერჯის ხარისხის შემცირებისა და გაქრობის რეკომენდაციები. თანამედროვე მსოფლიოში ელექტროენერგეტიკული სისტემების სწრაფი და ფართომასშტაბიანი განვითარების ფონზე აუცილებელი გახდა ელექტრული ენერჯის ხარისხის კონტროლი. შესაბამისად, შეიქმნა სპეციალური ავტომატიზირებული მაკონტროლებელი სისტემები, რომელთა ძირითდი ამოცანა გახდა ელექტრული ენერჯის ხარისხის პარამეტრების მონიტორინგი და ანალიზი. ელექტროსისტემის განვითარების პირველ ეტაპზე ელექტრული ენერჯის ხარისხის მაჩვენებლებად განიხილებოდა მხოლოდ ორი პარამეტრი: სიხშირე ქსელში და ძაბვა ქსელის თითოეულ კვანძში. თუმცა, დროთა განმავლობაში ელექტროენერგეტიკული სისტემის განვითარებასთან ერთად ელექტრომომხმარებელთა შორის გამოჩნდნენ არასიმეტრიული, არასინუსოიდური და მკვეთრად ცვალებადი მოხმარების მქონე ელემენტები. შესაბამისად საჭირო გახდა მხედველობაში მიეღოთ ელექტრული ენერჯის ხარისხის შესაფასებლად დამატებითი მაჩვენებლები.

წარმოდგენილ სადისერტაციო ნაშრომში ასახულია ელექტრო ენერჯის ხარისხის კონტროლის მექანიზმის ერთ-ერთი მაგალითი. ნაშრომი მოიცავს ხუთ ძირითად ნაწილს რომელთა ერთობლიობაც ქმნის საქართველოს 110 კვ ძაბვისა საფეხურის ერთ-ერთ ყველაზე ფართო მოხმარების მქონე ორი ქვესადგურის ელექტრო ენერჯის ხარისხის ანალიზს და კონტროლს. ჩატარებული სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს საკვლევი პერიმეტრის ელექტრული ენერჯის ხარისხის დაბინძურების დონის განსაზღვრა, მოხდეს ქსელის დამახინჯების გამოძვევი მიზეზების აღმოჩენა (მათი არსებობის შემთხვევაში) და წარმოჩინდეს ღონისძიებები ელექტროსისტემის ქსელში ხარისხის დაბინძურების დონის შესამცირებლად ნორმის ფარგლებში ან/და სრულად აღმოსაფხვრელად.

მეორე თავი მოიცავს ნაშრომის ძირითად ნაწილს და მასში საფეხურებრივად განხილულია ლიტერატურა ელექტრული ენერჯის ხარისხის პარამეტრების შესახებ. აღნიშნული თეორიული საკითხებს თან ახლავს უშიშალოდ კვლევის შედეგად მიღებული პრაქტიკული ინფორმაცია ანთვლები. ჩამოყალიბებულია თითოეული პარამეტრის (დამახინჯების) წარმოშობის, გამოკვლევისა და გამოსწორების შესახებ ინფორმაცია. კერძოდ შემდეგი პარამეტრები: ჰარმონიკული დამახინჯებების სრული სახე: როგობრივო ჰარმონიკები, ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება, ინტერჰარმონიკული დამახინჯება და სუბჰარმონიკული დამახინჯება; ძაბვის უბალანსობა; სინათლის ციმციმი გრძელპერიოდული (PLT) და მოკლეპერიოდული (PST). სიხშირისე და მისი ფარდობითი გადახრა; ძაბვის ცვლილება (ვარიაცია) (voltage variation); ძაბვისა და დენის სინუსოიდის ანომალიები (sag, swell, notch) და ძაბვის წყვეტა (Voltage interruptions). აგრეთვე განხილულია K ფაქტორი, რომელიც წარმოადგენს დენის ჰარმონიკების გავლენის კოეფიციენტს ტრანსფორმატორის გადახურებაზე.

ელექტრული ენერჯის ხარისხის კვლევა ჩატარდა სადისერტაციო სამუშაოს კვლევის ობიექტებზე. მოცემული ნაშრომის კვლევის ძირითად მიზანს წარმოადგენს საქართველოში, ქალაქ თბილისის შემოგარენში ელექტროსისტემის 110 კვ ძაბვის საფეხურის ქსელის ელექტრული ენერჯის ხარისხის ჯამური დამახინჯების დონის გამოკვლევა. ექსპერიმენტული გაზომვები ჩატარდა ექსპლუატაციაში მყოფ ოთხ ქსესადგურში. კვლევის მიზანია საქართველოში ყველაზე მჭიდროდ დასახლებული და ფართოდ ინდუსტრირებული ტერიტორიის ელექტრული ენერჯის ხარისხის ღრმა კვლევა და ხარისხის დამახინჯების ნორმის განსაზღვრა. ერთდროულად ყველა ქვესადგურში განხორციელდა საქართველოს ელექტროსისტემაში 2021 წლის ზაფხულის პერიოდის პიკური დატვირთვის დროს, კერძოდ ივლისის თვეში და საქართველოს ელექტროსისტემაში 2022 წლის ზამთრის პერიოდის პიკური დატვირთვის დროს, კერძოდ იანვრის თვეში. ყველა მოწყობილობა კვლევის პერიოდში იყო სინქრონიზირებული. მონიტორინგისთვის გამოყენებული იქნა მაღალი სიზუსტის კლასის ელექტრული ენერჯის ხარისხის სამონიტორინგო მოწყობილობება რომელიც მონიტორინგს ახორციელებს EN50160 სტანდარტის საშუალებით. ამასთანავე ექსპერიმენტის შედეგად მიღებული შედეგები შეფასდა 2014 წლის 17 აპრილს საქართველოს ენერჯეტიკისა და წყალმომარაგების მარეგულირებელი ეროვნული კომისიის № 10 დადგენილებით მიღებულ „ქსელის წესებს“, რომელიც შესაბამისად განსაზღვრავს საქართველოს ელექტრო სისტემის მონაწილეთა მიერ გადამცემი ქსელის განვითარების, მართვის, ხელმისაწვდომობისა და უსაფრთხო სარგებლობის პროცედურებს, პირობებს, პრინციპებსა და სტანდარტებს. კვლევის შედეგები მოცემულია დიაგრამების სახით. თითოეული დიაგრამა მოიცავს სრულ ინფორმაციას თითოეული ხარისხის პარამეტრის შესახებ. შესაბამისად შეძლებისდაგვარად მათზე დატანილია ელექტრული ენერჯის ხარისხის ზღვრები და ნორმები „ქსელის წესები“-ს შესაძლებლობებიდან გამომდინარე.

მესამე თავი მოცავს საერთაშორისოდ მიღებულ რეკომენდაციებს რომლებიც გამოიყენება ელექტრული ენერჯის ხარისხის დამახინჯების დონის შესამცირებლად. რეკომენდაციების მიხედვით აღნიშნული საკითხის გამოსასწორებლად გამოიყენება სხვადასხვა ელექტროდანადგარები, ფილტრები და არასიმეტრიული დატვირთების სწორი გადანაწილება, რომლებიც უზრუნველყოფენ საერთაშორისო სტანდარტებით მოთხოვნილი განსაზღვრული ნორმების დაცვას. ესენია გადამეტაბვისგან დამცავი მოწყობილობა, ძაბვის რეგულატორები, გარდამავალი პროცესისგან დაცვა, სიმძლავრის კოეფიციენტის გასწორება, სინქრონული კომპენსატორების გამოყენება, არაფაზირებული დატვირთვების დასტაბილურება, ჰარმონიკული ფილტრები, სტატიკური ვარ კომპენსატორები და სინქრონული სტატიკური კომპენსატორები.

მეოთხე თავი მოცავს საქართველოში მდებარე ელექტრო რკალურ ღუმელზე მომუშავე ერთ-ერთი ქარხნის ორ კვირიანი შედეგები ზაფხულის პიკური დატვირთვის პერიოდში. ეს ქარხანა აღჭურვლია სინქრონული სტატიკური კომპენსატორი, რომლისაც აქვს ჩაშენებული ჰარმონიკული ფილტრებიც. მონიტორინგის პირველ კვირაში ელექტრორკალურ ქარხანა მუშაობდა დილის 06:00 საათიდან საღამოს 18:00 საათამდე. ხოლო მეორე კვირის განმავლობაში საღამოს 18:00 საათიდან დილის 06:00 საათამდე. აღსანიშნავია, რომ ამ ორი კვირის პერიოდში ქარხანა მუშაობდა სრული დატვირთვით. ამან კი საშუალება მოგვცა დაგვენახა რა გავლენას ახდენს ელექტრორკალური ქარხანა ელექტროსისტემაზე

სინქრონული სტატკური კომპენსატორის მუშაობის პირობებში და მისი გამორთულ მდგომარეობაში ყოფნის დროს. აღნიშნული კვლევი მიხედვით დადგინდა, რომ სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის მუშაობა ქარხნის სალტეებზე ანხორციელებს ელექტრულკბი ენერგიის ხარისხის ორი პარამეტრის სინათლის ციმციმისა და ჰარმონიკული სპექტრის მკაფიო შემცირებას და დამახიჯების დონის შემცირებას.

ნაშრომის დასკვთინითი წაწილი მოიცავს უშუალოდ იმ შედეგებს და რეკომენდაციებს რომლრბიც დაისახა ჩატარებული კვლევის მიხედვით. ელექტრული ენერგიის ხარისხის კონტროლის განსავითარებლად ამ ეტეპზე აუცილებელია დამუშავდეს და შეიქმნას სტანდარტები, რომლებიც მორგებული იქნება საქართველოს ელექტრომომარაგების სისტემის სპეციფიკასთან. მასში ნათლად უნდა იყოს განსაზღვრული დამახინჯების ლიმიტები. იგი უნდა დამტკიცდეს საქართველოს ენერგეტიკისა და წყალმომარაგების მარეგულირებელი ეროვნული კომისიის მიერ. ამის შემდეგ სტანდარტების საფუძველზე მოხდეს ელექტრო ქსელის ნაწილების კონტროლი.

## Resume

The dissertation discusses a new challenge for electrical systems in the modern world, ways to monitor the power quality. Recommendations for reducing and disappearing power quality are also presented. In the modern world, against the background of rapid and large-scale development of power systems, it has become necessary to control the quality of electricity. In the first stage of the development of the electrical system, only two parameters were considered as indicators of power quality: frequency in the network and voltage in each node of the network. However, over time, with the development of the power system, asymmetric, non-sinusoidal, and variable consumption elements have emerged among power consumers. It was therefore necessary to take into account additional indicators to assess the power quality.

The presented dissertation presents one of the examples of electricity quality control mechanism. The paper includes five main parts, the combination of which creates an analysis and quality control of electricity of two substations with one of the most widely consumed 110 kV voltage levels in Georgia. The aim of the work is to determine the level of pollution quality of the electricity perimeter of the study perimeter, to identify the causes of grid distortion (if any) and to present measures to reduce the level of quality pollution in the grid within the norm and / or eliminate it completely.

The second chapter covers the main part of the paper and discusses step by step the literature on electricity quality parameters. These theoretical issues are accompanied by practical information obtained directly from research on inflammation. Information on the origin, investigation and correction of each parameter (distortion) is established. In particular, the following parameters: Complete type of harmonic distortions: Rogonic harmonics, total harmonic distortion, interharmonic distortion and subharmonic distortion; Voltage imbalance; Light flicker long-term (PLT) and short-term (PST). Frequency and its relative deviation; Voltage variation; Voltage and current sinusoidal anomalies (sag, swell, notch) and voltage interruptions (Voltage interruptions). The factor  $K$  is also considered, which is the coefficient of influence of current harmonics on the overheating of the transformer. Electricity quality research was conducted at dissertation research facilities. The main purpose of this paper is to investigate the level of total distortion of the quality of electricity of the 110 kV voltage grid of the electrical system in the suburbs of Tbilisi, Georgia. Experimental measurements were performed at four operating power plants. The aim of the research is to conduct an in-depth study of the quality of electricity in the most densely populated and widely industrialized area of Georgia and to determine the norm of quality distortion. Simultaneously in all substations during the peak load of the summer period of 2021 in the Georgian power system, in particular in July, and during the peak load of the winter period of 2022 in the Georgian power system, in particular in January. All devices were synchronized during the study period. Power quality monitoring device was used for monitoring, which is monitored by EN50160 standard. In addition, the results of the experiment were evaluated by the "Network Rules" adopted by Resolution 10 of the Georgian National Energy and Water Regulatory Commission on April 17, 2014, which defines the procedures, conditions, principles and principles of transmission network development, management, access and safe use.

The third chapter contains the generally accepted recommendations that are used to reduce the level of distortion of the quality of electricity. According to the recommendations, various electrical installations, filters and correct distribution of asymmetric loads are used to correct this issue, which ensure compliance with the norms required by international standards.

The fourth chapter covers the two-week components of one of the factories operating electric arc furnaces in Georgia during the peak summer period. This plant is equipped with a synchronous static compensator, which also has built-in harmonic filters. During the first week of monitoring, the electric plant operated from 06:00 in the morning until 18:00 in the evening. And for the second week from 6:00 pm to 6:00 am. It is noteworthy that during these two weeks the factory was operating at full capacity. This allowed us to see the effect that the power plant has on the electrical system during the operation of the synchronous static compensator and when it is off.

The concluding part of the paper includes directly the results and recommendations that were drawn according to the research conducted. In order to develop quality control of electricity at this stage, it is necessary to develop and create standards that will be adjusted to the specifics of the Georgian electricity supply system. It must clearly define the distortion limits. It must be approved by the Georgian National Energy and Water Regulatory Commission. After that, the parts of the electricity network should be inspected based on the standards.



# შინაარსი

შესავალი .....	15
თავი 1. ელექტროენერჯის ხარისხის, მისი ნორმირების სტანდარტები .....	19
1.1 ელექტრო ენერჯის ხარისხის მნიშვნელობა .....	19
1.2 ელექტრო ენერჯის ხარისხის სამონიტორინგო მოწყობილობები.....	30
1.3 ელექტრო ენერჯის ხარისხის კონტროლის საერთაშორიეო სტანდარტები.....	32
1.4 ელექტრო ენერჯის ხარისხის კონტროლის ნორმები საქართველოში..	33
1.4.1 სიხშირის ზღვრები.....	33
1.4.2 ძაბვის ზღვრები.....	34
1.4.3 ჰარმონიკული დამახინჯების ზღვრები.....	34
1.4.4 ძაბვის ასიმეტრის ზღვრები.....	35
1.4.5 ძაბვის რხევისა და სინათლის ციმციმის ზღვრები.....	35
თავი 2 ნაშრომის ძირითადი კვლევა.....	36
2.1 ჰარმონიკები.....	40
2.1.1 ინტრჰარმონიკები.....	42
2.1.2 ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება (THD).....	45
2.1.3 რიგობრივი ჰარმონიკები.....	48
2.2 ძაბვის უბალანსობა.....	51
2.3 სინათლის ციმციმი (Flicker PST; PLT;).....	56
2.4 სიხშირე და მისი ფარდობითი გადახრა.....	68
2.5 ძაბვის ცვალებადობა (ვარიაცია) (voltage variation) .....	71
2.6 ძაბვის წყვეტა (Voltage interruptions).....	72
2.7 ძაბვის და დენის სინუსოიდის ანომალიები (sag, swell, notch).....	73
2.7.1 ძაბვის სინუსოიდის ღრიჩოები (voltage notch).....	74
2.7.2 ძაბვის უეცარი მატება რამოდენიმე პერიოდის განმავლობაში (voltage swell).....	77

2.7.3 ძაბვის უეცარი ჩავარდნა რამდენიმე პერიოდის განმავლობაში (Voltage sag).....	77
2.8 K ფაქტორი.....	84
<b>თავი 3. ელექტრული ენერჯის ხარისხის პარამეტრების ნორმის ფარგლებში შენარჩუნების ხერხები.....</b>	<b>84</b>
<b>თავი 4. მკვეთრად ცვალებადი და არასიამებრივი დატვირთვის მქონე მეტალურგიული ქარხნის ელექტრული ენერჯის ხარისხის გამოკვლევა.....</b>	<b>93</b>
<b>დასკვნა.....</b>	<b>102</b>
<b>გამოყენებული ლიტერატურა.....</b>	<b>105</b>

## ნახაზების ნუსხა

ნახაზი 1. ელექტრულიენერჯის ხარისხის სამონიტორინგო მოწყობილობის დაერთების სქემა .....	37
ნახაზი 2. ტევადური ძაბვის ტრანსფორმატორის ჩანაცვლების სქემა .....	38
ნახაზი 3. ძაბვის ინტერფარმონიკული დამახინჯება A ქვესადგურში ფაზების მიხედვით 2021 წლის ივლისის თვეში .....	43
ნახაზი 4. ძაბვის ინტერფარმონიკული დამახინჯება A ქვესადგურში ფაზების მიხედვით 2021 წლის იანვრის თვეში .....	44
ნახაზი 5. ძაბვის ინტერფარმონიკული დამახინჯება B ქვესადგურში ფაზების მიხედვით 2021 წლის ივლისის თვეში .....	44
ნახაზი 6. ძაბვის ინტერფარმონიკული დამახინჯება B ქვესადგურში ფაზების მიხედვით 2021 წლის იანვრის თვეში .....	45
ნახაზი 7. ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება A ქვესადგურში ფაზების მიხედვით 2021 წლის ივლისის თვეში .....	46
ნახაზი 8. ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება A ქვესადგურში ფაზების მიხედვით 2021 წლის იანვრის თვეში .....	46
ნახაზი 9. ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება B ქვესადგურში ფაზების მიხედვით 2021 წლის ივლისის თვეში.....	47
ნახაზი 10. ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება B ქვესადგურში ფაზების მიხედვით 2021 წლის იანვრის თვეში .....	47
ნახაზი 11. ძაბვის რიგობრივი ჰარმონიკების სპექტრი A ქვესადგურში ივლისის თვეში .....	49
ნახაზი 12. ძაბვის რიგობრივი ჰარმონიკების სპექტრი A ქვესადგურში იანვრის თვეში .....	49
ნახაზი 13. ძაბვის რიგობრივი ჰარმონიკების სპექტრი B ქვესადგურში ივლისის თვეში .....	50
ნახაზი 14. ძაბვის რიგობრივი ჰარმონიკების სპექტრი B ქვესადგურში იანვრის თვეში .....	51
ნახაზი 15. ძაბვის უბალანსობის სრული სახე A ქვესადგურში ივლისის თვეში .....	53
ნახაზი 16. ძაბვის უბალანსობის სრული სახე A ქვესადგურში იანვრის თვეში .....	54

ნახაზი 17. ძაბვის უზალანსობის სრული სახე B ქვესადგურში ივლისის თვეში .....	54
ნახაზი 18. ძაბვის უზალანსობის სრული სახე B ქვესადგურში იანვრის თვეში .....	55
ნახაზი 19. მოკლეპერიოდული ციმციმი B ქვესადგურში იანვრის თვეში .....	59
ნახაზი 20. მოკლეპერიოდული ციმციმის დონე B ქვესადგურში იანვრის თვეში .....	60
ნახაზი 21. მოკლეპერიოდული ციმციმი B ქვესადგურში ივლისის თვეში .....	60
ნახაზი 22. მოკლეპერიოდული ციმციმის დონე B ქვესადგურში ივლისის თვეში .....	61
ნახაზი 23. გრძელპერიოდული ციმციმი B ქვესადგურში იანვრის თვეში .....	61
ნახაზი 24. გრძელპერიოდული ციმციმის დონე B ქვესადგურში იანვრის თვეში .....	62
ნახაზი 25. გრძელპერიოდული ციმციმი B ქვესადგურში ივლისის თვეში .....	63
ნახაზი 26. გრძელპერიოდული ციმციმის დონე A ქვესადგურში ივლისის თვეში .....	63
ნახაზი 27. მოკლეპერიოდული ციმციმი A ქვესადგურში იანვრის თვეში .....	64
ნახაზი 28. მოკლეპერიოდული ციმციმის დონე A ქვესადგურში იანვრის თვეში .....	65
ნახაზი 29. მოკლეპერიოდული ციმციმი A ქვესადგურში ივლისის თვეში .....	65
ნახაზი 30. მოკლეპერიოდული ციმციმის დონე A ქვესადგურში ივლისის თვეში .....	66
ნახაზი 31. გრძელპერიოდული ციმციმი A ქვესადგურში იანვრის თვეში .....	66
ნახაზი 32. გრძელპერიოდული ციმციმის დონე A ქვესადგურში იანვრის თვეში .....	67
ნახაზი 33. გრძელპერიოდული ციმციმი A ქვესადგურში ივლისის თვეში .....	68
ნახაზი 34. გრძელპერიოდული ციმციმის დონე A ქვესადგურში ივლისის თვეში .....	68
ნახაზი 35. სიხშირე და მისი ფარდობითი გადახრა A ქვესადგურში ივლისის თვეში .....	69

ნახაზი 36. სიხშირე და მისი ფარდობითი გადახრა A ქვესადგურში იანვრის თვეში .....	70
ნახაზი 37. სიხშირე და მისი ფარდობითი გადახრა B ქვესადგურში ივლისის თვეში .....	71
ნახაზი 38. სიხშირე და მისი ფარდობითი გადახრა B ქვესადგურში იანვრის თვეში .....	71
ნახაზი 39. ძაბვის სინუსოიდის ღრჩოები A ქვესადგურში .....	76
ნახაზი 40. ძაბვის სინუსოიდის ღრჩოები B ქვესადგურში .....	76
ნახაზი 41. ძაბვის სინუსოიდის უეცარი ჩავარდნა რამდენიმე პერიოდის განმავლობში B ქვესადგურში .....	77
ნახაზი 42. ძაბვის სინუსოიდის უეცარი ჩავარდნა რამდენიმე პერიოდის განმავლობში A ქვესადგურში .....	77
ნახაზი 43. ძაბვის სინუსოიდის უეცარი ჩავარდნა რამდენიმე პერიოდის განმავლობში B ქვესადგურში 2022 წლის იანვრის თვეში .....	79
ნახაზი 44. ძაბვისა და დენის სინუსოიდების ანომალიები B ქვესადგურში .....	80
ნახაზი 45. ძაბვისა და დენის სინუსოიდების ანომალიები A ქვესადგურში .....	81
ნახაზი 46. ძაბვისა და დენის სინუსოიდების ანომალიები B ქვესადგურში იანვრის თვეში (სინუსოიდა) .....	81
ნახაზი 47. ძაბვისა და დენის სინუსოიდების ანომალიები B ქვესადგურში იანვრის თვეში .....	82
ნახაზი 48. ძაბვისა და დენის სინუსოიდების ანომალიები .....	82
ნახაზი 49. K ფაქტორი .....	84
ნახაზი 50. სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის ჩანაცვლების სქემა .....	91
ნახაზი 51. სინქრონული ვარ კომპენსატორი .....	93
ნახაზი 52. ძაბვისა და დენის საშუალო მნიშვნელობები .....	95
ნახაზი 53. ძაბვისა და დენის საშუალო მნიშვნელობების დამოკიდებულება .....	96
ნახაზი 54. აქტიური რეაქტიული და სრული სიმძლავრეები .....	96
ნახაზი 55. მოკლეპერიოდული სინათლის ციმციმი .....	97
ნახაზი 56. სინათლის ციმციმის შემცირება .....	97

ნახაზი 57. გრძელპერიოდური სინათლის ციმციმი .....	98
ნახაზი 58. გრძელპერიოდური სინათლის ციმციმის შემცირება .....	98
ნახაზი 59. ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება .....	99
ნახაზი 60. ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯების შემცირება .....	100
ნახაზი 61. რიგობრივი ჰარმონიკული სპექტრი .....	100
ნახაზი 62. რიგობრივი ჰარმონიკული სპექტრის შემცირება .....	101
ნახაზი 63. ძაბვის სინუსოიდის ღრჩოები .....	101
ნახაზი 64. ძაბვის სინუსოიდის ანომალიები .....	102

## შესავალი

**თემის აქტუალურობა.** ელექტრო-ენერგეტიკულ სექტორისა და ელექტროინდუსტრიის განვითარებამ მნიშვნელოვანი გახადა ხარისხიანი ელექტროენერჯის წარმოება და მომხმარებლებისათვის მიწოდება. შესაბამისად უკანასკნელ წლებში დიდი ყურადღება ეთმობა ელექტრომომხმარებელი ობიექტების ელექტროენერგეტიკული მახასიათებლების განსაზღვრას. თანამედროვე ელექტროსისტემების უმნიშვნელოვანესია განვითარება და გაფართოება. ელექტროენერჯის ხარისხის მონიტორინგი/კონტროლი წარმოადგენს თანამედროვე გამოწვევას, რომლის აუცილებლობაც ქვეყნის ელექტროინდუსტრიის განვითარებამ და ზრდამ გამოიწვია. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ელექტროინდუსტრიის განვითარების პირველ ეტაპზე ელექტრული ენერჯის ხარისხის მაჩვენებლებად განიხილებოდა მხოლოდ ორი პარამეტრი: სიხშირე ქსელში და ძაბვა ქსელის თითოეულ კვანძში. თუმცა, დროთა განმავლობაში ელექტროენერგეტიკული სისტემის განვითარებასთან ერთად ელექტრომომხმარებელთა შორის გამოჩნდნენ არასიმეტრიული, არასინუსოიდური და მკვეთრად ცვალებადი მოხმარების მქონე ელემენტები. შესაბამისად საჭირო გახდა მხედველობაში მიეღოთ ელექტრული ენერჯის ხარისხის შესაფასებლად დამატებითი მაჩვენებლები. მრავალ სამრეწველო და კომერციულ მომხმარებელს გააჩნიათ აღჭურვილობა, რომელიც განსაკუთრებით მგრძობიარეა ელექტროსისტემაში არსებულ ელექტროენერჯის ხარისხის დამახინჯებების მიმართ. აქედან გამომდინარე წარმოიშვება პირობა, რომელიც გულისხმობს ხარისხიანი ენერჯით მომარაგებას. ეს ყველაფერი ფართოდ არის დამოკიდებული გადამცემ და დისტრიბუციის სისტემებში ხარისხიანი ელექტროენერჯის არსებობაზე და მიმოცვლაზე, რომელიც თავისთავად დამოკიდებულია ელექტროსადგურების მიერ გამომუშავებული ელექტრული ენერჯის ხარისხზე. შესაბამისად დგება აუცილებლობა, რომ ნებისმიერ კვანძურ წერტილში, რომლებშიც ხდება ელექტრული ენერჯის მიმოცვლა, განხორციელდეს ხარისხის მონიტორინგი და კონტროლი. ამასთანავე, ჩამოყალიბდა ელექტროენერგეტიკის ახალი მიმართულება, რომელიც მოიცავს

ელექტრული ენერჯის ხარისხის მონიტორინგს, ანალიზსა და კონტროლს. ამიტომ დადგა საკითხი, ფართოდ დაინერგოს ელექტრული ენერჯის ხარისხის მონიტორინგი/კონტროლი, როგორც ენერჯეტიკის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი დარგი.

**სამუშაოს მიზანი.** წარმოდგენილ სადისერტაციო ნაშრომში ასახულია ელექტრო ენერჯის ხარისხის კონტროლის მექანიზმის ერთ-ერთი მაგალითი. კეროდ საქართველოს ელექტროსისტემის მძლავრი მომხმარებლების მქონე ზონის ქვესადგურებში 110 კვ ძაბვის საფეხურზე ჩატარებული ექპერიმენტული კვლევა. ჩატარებული სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს საკვლევი პერიმეტრის ელექტრული ენერჯის ხარის დაბინძურების დონის გამსაზღვრა, მოხდეს ქსელის დამახინჯების გამომწვევი მიზეზების აღმოჩენა (მათი არსებობის შემთხვევაში) და წაროჩინდეს ღონისძიებები ელექტროსისტემის ქსელში ხარისხის დაბინძურების დონის შესამცირებლად ნორმის ფარგლებში ან/და სრულად აღმოსაფხვრელად.

**კვლევის ობიექტი და მეთოდები.** მოცემულ ნაშრომის კვლევის ობიექტია საქართველოს ელექტროსისტემის ერთ-ერთი დიდი მოხმარების მქონე ზონაში, 110 კვ ძაბვის საფეხურზე ელექტრული ენერჯის ხარისხის დაბინძურების დონე. საკვლევ პერიმეტრზე შესაბამისი მოწყობილობებით განხორციელდება ზამთრისა და ზაფხულის მოხმარების პიკური დატვირთვის პერიოდში მონიტორინგი. მიღებული მონაცემების დამუშავდება ელექტრული ენერჯის ხარისხის ანალიზატორი პროგრამა „PQsecures“ საშუალებით. აგრეთვე შედეგების შეფასება მოხდება საქართველოში არსებული ქსელის წესებით მიღებული ნორმების მიხედვით.

**ნაშრომის ძირითადი შედეგები და სიახლე.** ბოლო წლებში ზოგადად მსოფლიოში და საქართველოშიც მკვეთრად გაიზარდა ელექტრო ენერჯის მოხმარება. ამასთანავე იმატა მუდმივი დენის ჩანარეთების, ნახევარგამტარულ ელემენტებზე დაფუძნებული ელექტრო-მოწყობილობების, მკვეთრად ცვალებად დატვირთვის მქონე მოწყობილობებისა და არასიმეტრიული მომხმარებლების რიცხვმა. ამ ყველაფერმა კი გამოიწვია ელექტროენერჯის ხარისხის დაბინძურების დონის ზრდა. აღნიშნული საკითხის გაკონტროლება/მონიტორინგი შესაძლებელია ნაშრომში წარმოდგენილი კვლევის სახით.



**შედეგების გამოყენების სფერო.** ნაშრომში ჩატარებული ანალიზის შედეგების საფუძველზე შესაძლოა გაიცეს რეკომენდაციები საქართველოს ელექტროსისტემაში თუ, როგორ უნდა განხორციელდეს ელექტრო ენერჯის ხარისხის გამაუარესებელი მომხმარებლების იდენტიფიკაცია. აგრეთვე როგორ უნდა მოხდეს ხარისხის გამაუარესებელი მომხმარებლების ელექტროსისტემაზე გავლენის შეზღუდვა. ელექტროსისტემაში ნებისმიერი დროის ინტერვალით შეწყვეტილი ელექტრო ენერჯის მიწოდება წარმოადგენს გარკვეული სახის ეკონომიკურ დანაკარგს და ამასთანავე იზრდება საფრთხე მიმდინარე ტექნიკური პროცესის ჩამოშლის. ხოლო როდესაც ჩნდება საფრთხე, რომ პროცესის მოშლა, ელექტროენერჯის მიწოდების წყვეტა მოხდება ელექტროენერჯის ხარისხის პარამეტრების ზღვრული ნორმების დარღვევით, დამატებით წარმოიშვება მატერიალური ზარალი, რომელსაც განიცდის ელექტროსისტემის მუშა პროცესში მონაწილე გენერაცია, გადაცემა, განაწილება, მოხმარების ელემენტები. მატერიალურ ეკონომიკური ზარალი დამოკიდებულია ელექტროენერჯის ხარისხის დაბინძურების დონეზე. ამჟამად საქართველოს ოთხ მეზობელ ელექტროსისტემასთან აქვს კავშირი და სისტემატიურად ახორციელებს ელექტროენერჯის ექსპორტ/ინმპორტს. თითოეულ მეზობელ სისტემასთან ენერჯის მიმოცვლის ერთერთი მთავარი პირობაა ხარისხიანი ელექტროენერჯის არსებობა საქართველოში და მისი კონტროლი. აგრეთვე აღსანიშნავია ის ფაქტი, რომ საქართველო სამომავლო უახლოესი პერსპექტივაა ჩაერთოს ევროპაში ელექტროენერჯით ვაჭრობაში და ქვეყნის ელექტროსისტემა აქციოს ელექტროენერჯის გამტარ, ტრანზიტორ სისტემად. შესაბამისად, აღნიშნულ პროცესში ერთ-ერთ ყველაზე რთულ დეტალს წარმოადგენს ევროპის ელექტროსისტემასთან ინტეგრაცია და მათთვის ელექტროენერჯის ხარისხის მისაღები ნორმების შეთავაზება. ელექტრომომხმარებელთა ბაზაზე საქართველოს ელექტროსისტემაში არსებობენ მომხმარებლები, რომელთა გათიშვაც მუშა პროცესის გამო მიზანშეუწონელია. მაგალითად, რომ ავიღოთ ლითონგადამამუშავებელი ქარხნები და მათი ელექტრო დანადგარები. რიგ შემთხვევებში ეს დანადგარები მუშაობს უწყვეტ რეჟიმში. კვლევებმა აჩვენა, რომ მსგავსი სახის მძლავრი მომხმარებლები განსაკუთრებით მგრძნობიარენი არიან ელექტროენერჯის ხარისხის პარამეტრების დარღვევის მიმართ.

ელექტროენერჯის ხარისხის ნორმების დარღვევით გამოწვეული ზარალი დიდ გავლენა აისახება ქვეყნის ინდუსტრიული თუ სასიცოცხლო მნიშვნელობის ნებისმიერ ობიექტზე. მათ შორის საავადმყოფოებსა და სხვა სასწრაფო დახმარების ობიექტებზე. აგრეთვე აღსანიშნავია, რომ ელექტროენერჯის ხარისხის მონიტორინგი/კონტროლის არ არსებობა რიგში ელექტროსისტემაში ზრდის ელექტროენერჯის გადაცემით გამოწვეული დანაკარგებს. დასაშვებზე მეტი დანაკარგები პირდაპირი ეკონომიკური ზარალი ხდება ელექტროინდუსტრიის. მცირდება ძვირადღირებულ ელექტროდანადგართა ექსპლუატაციის პერიოდი. ხორციელდება მათი მუშა ელემენტების ნაადრევი დაბერება და მწყობრიდან გამოსვლა. საქართველოს პირობებში აღნიშნული მატერიალური ზარალი კრიტიკულია, რადგან ელექტროსისტემის მხოლოდ ნაწილია რეაბილიტირებული და ისედაც მოძველებულ აღჭურვილობას აღარ აქვს მდგრადობის უნარი. ამასთანავე რეაბილიტირებული ელექტროდანადგართა ნაადრევი დაბერებაც გვაშორებს გზას ელექტროსისტემის სრულ რეაბილიტაციამდე.

# თავი 1. ელექტრო ენერჯის ხარისხი, მისი ნორმირების სტანდარტები

## 1.1 ელექტრო ენერჯის ხარისხი მნიშვნელობა

უშუალოდ ელექტრული ენერჯის ხარისხი წარმოადგენს დენის, ძაბვის და სიხშირის მნიშვნელობების ნომინალურიდან გადახრით გამოვლენილ ნებისმიერი პრობლემას, რომელმაც შესაძლოა გამოიწვიოს მოწყობილობებისა და დანადგარების გაუმართაობა და დაზიანება. მისი გამომწვევი მიზეზია ნებისმიერი არასიმეტრიული და არასინუსოიდური მოვლენა თუ გადახრა. ხოლო უპირველეს მიზანს წარმოადგენს იყოს ელექტროენერჯის გამომუშავება, გადაცემა, განაწილება და მოხმარების სისტემების საუკეთესო პირობებში დაკავშირების ერთ-ერთი პირობა. ელექტრული ენერჯის ხარისხის მონიტორინგის სრულ ციკლს წარმოადგენს საჭირო (სასარგებლო) ინფორმაციის შეგროვება, ანალიზი და გაზომილი მონაცემების დამუშავებულად ინტერპრეტაცია. მონაცემთა შეგროვების პროცესი, როგორც წესი, ხორციელდება ძაბვის და დენის უწყვეტი გაზომვებით შესაძლო მაქსიმალური დისკრეტულობით აღიარებული სტანდარტის მოთხოვნების დაცვით. გაზომვის, ანალიზისა და ინტერპრეტაციის პროცესი ტრადიციულად ხორციელდებოდა კონკრეტული მოწყობილობის ინფორმაციის, ადამიანის მიერ დამუშავებით. მაგრამ ბოლო დროს მიღწეული პროგრესით შემუშავებულმა ავტომატურმა და ინტელექტუალურმა სისტემებმა შესაძლებელი გახადა დაუმუშავებელი მონაცემების ავტომატური ანალიზი და ინტერპრეტაცია, რადგან მოხდეს დაუმუშავებელი ინფორმაციის სასარგებლო ინფორმაციად გარდაქმა ადამიანის მინიმალური ჩარევით.

ენერჯის ხარისხის მონიტორინგი (PQM) არის ელექტრული მონაცემების შეგროვება, ანალიზი და გამოყენება ენერჯის ხარისხისა და სისტემის მუშაობის გასაუმჯობესებლად. ის უზრუნველყოფს ენერჯის მენეჯმენტს, ხარისხის კონტროლს, პრევენციულ მოვლას და მთლიანი ხარჯების გამოქვითვას. დღესდღეობით მომხმარებლებმა კარგად იციან ენერჯის ხარისხი და ელიან ეფექტურ ელექტრომომსახურებას. ამ მიზეზით, ელექტრო მოწყობილობები შემფოთებულია ენერჯის ხარისხის მონიტორინგით და იყენებენ ციფრული

ხარვეზის ჩამწერებს, ჭკვიან რელეებს ან სხვა სპეციალური დანიშნულების დენის ხარისხის აღჭურვილობას. თანამედროვე ელექტროსადგურები რეგულარულად აკონტროლებენ მომხმარებლისთვის მიწოდებული ძაბვისა და დენების ხარისხს ენერჯის ხარისხის ოპტიმიზაციის მიზნით. ყველა ენერგოსისტემამ უნდა გააუმჯობესოს მისი შესრულება, ეფექტურობა და გაახანგრძლივოს აღჭურვილობის სიცოცხლე.

დენის ხარისხის პრობლემები ხშირად ურთიერთდაკავშირებულია. სავალდებულოა ელექტროენერჯის ხარისხის საკითხების ანალიზი მთელი ქარხნის ასპექტიდან და სრული ფოკუსირება იმაზე, თუ როგორ მოქმედებს ისინი ცალკეულ დატვირთვაზე. ზოგჯერ ელექტროენერჯის ხარისხის პრობლემის გადაჭრამ შეიძლება სხვა პრობლემა გააუარესოს. დიდი სურათის გადახედვით, დენის ხარისხის ანალიზი საშუალებას გაძლევთ ამოიცნოთ და შეამციროთ ენერჯის ხარისხის პრობლემების მიზეზები. ელექტროენერჯის ხარისხის მზარდი პრობლემები ასევე იწვევს ელექტროენერჯის ხარისხის შესახებ ინფორმირებულობას კომუნალურ კომპანიებსა და მომხმარებლებს შორის. დრმა ანალიზი და გაგებაა საჭირო ყველა ენერგოსისტემაში.

ელექტრული ენერჯის ხარისხის სამონიტორინგოდ/საკონტროლოდ გამოიყენება ორი სახის სიტემა: პირველი არის ლოკალური მაშტაბების და ხორციელდება კონკრეტული ელემენტების კავშირის წერტილებში სამონიტორინგო მოწყობილობების დამონტაჟებით და მათი ინფორმაციის ანალიზით. ხოლო მეორე წარმოადგენს მასობრივს. იგი ეწყობა მთელი ელექტროსისტემის მაშტაბით და მონიტორინგ/კონტროლს ანხორციელებს ცენტრალიზებული სისტემა. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ საქართველოში ჯერჯერობით არ გვხვდება მეორე სახის სამონიტორინგო/მაკონტროლებელი სისტემები.

ელექტროსისტემაში მიმდინარე ტექნიკურ-ეკონომიკური პროცესი პირდაპირ დამოკიდებულია მოთხოვნილი ელექტროენერჯის უწყვეტ მიწოდებაზე. ნებისმიერი დროის ინტერვალით შეწყვეტილი მიწოდება წარმოადგენს გარკვეული სახის ეკონომიკურ დანაკარგს და ამასთანავე იზრდება საფრთხე მიმდინარე ტექნიკური პროცესის ჩამოშლის. ხოლო როდესაც ჩნდება საფრთხე, რომ პროცესის მოშლა, ელექტროენერჯის მიწოდების წყვეტა მოხდება

ელექტროენერჯის ხარისხის პარამეტრების ზღვრული ნორმების დარღვევით, დამატებით წარმოიშვება მატერიალური ზარალი, რომელსაც განიცდის ელექტროსისტემის მუშა პროცესში მონაწილე გენერაცია, გადაცემა, განაწილება, მოხმარების ელემენტები. მატერიალურ ეკონომიკური ზარალი დამოკიდებულია ელექტროენერჯის ხარისხის დაბინძურების დონეზე. აღნიშნულ შემთხვევაში ყველაზე სავალალო მდგომარეობას წარმოადგენს ელექტროსისტემის სრული ჩაქრობა (Black Out), რომელსაც თან ახლავს დიდი რაოდენობით მიუწედებელი ელექტროენერჯია და ქვეყნის სრულიად ჩაქრობა რამდენიმე საათის განმავლობაში სისტემის აღდგენამდე. სხვადასხვა ქვეყნის ელექტროსისტემების ერთმანეთსა და საიმედო პირობებში დაკავშირება დიდი გამოწვევაა. მეზობელ სისტემასთან ენერჯის მიმოცვლის ერთერთი მთავარი პირობაა ხარისხიანი ელექტროენერჯის არსებობა და მისი კონტროლი. შესაბამისად, აღნიშნულ პროცესში ერთ-ერთ ყველაზე რთულ დეტალს წარმოადგენს დიდი ზომის ელექტროსისტემებთან ინტეგრაცია და მათთვის ელექტროენერჯის ხარისხის მისაღები ნორმების შეთავაზება. ელექტრომომხმარებელთა ბაზაზე ელექტროსისტემებში არსებობენ მომხმარებლები, რომელთა გათიშვაც მუშა პროცესის გამო მიზანშეუწონელია. მაგალითად, რომ ავიღოთ ლითონგადამამუშავებელი ქარხნები და მათი ელექტრო დანადგარები. რიგ შემთხვევებში ეს დანადგარები მუშაობს უწყვეტ რეჟიმში. კვლევებმა აჩვენა, რომ მსგავსი სახის მძლავრი მომხმარებლები განსაკუთრებით მგრძობიარენი არიან ელექტროენერჯის ხარისხის პარამეტრების დარღვევის მიმართ. ელექტროენერჯის ხარისხის ნორმების დარღვევით გამოწვეული ელექტროსისტემის ტექნიკურ-ეკონომიკური პროცესის ჩამოშლის უმძიმესი გავლენა აისახება ქვეყნის ინდუსტრიული თუ სასიცოცხლო მნიშვნელობის ნებისმიერ ობიექტზე. მათ შორის საავადმყოფოებსა და სხვა სასწრაფო დახმარების ობიექტებზე.

ელექტროენერჯის ხარისხის მონიტორინგი/კონტროლის მნიშვნელობა ელექტროენერჯის გადაცემაში მონაწილე ელემენტებისათვის თანამედროვე მსოფლიოში იქცა ახალ მნიშვნელოვან გამოწვევად. ამის გაუთვალისწინებლობა იწვევს დიდ მატერიალურ ზარალს. პირველ რიგში ელექტროსისტემაში იზრდება ელექტროენერჯის გადაცემით გამოწვეული დანაკარგები და დასაშვებზე მეტი დანაკარგები პირდაპირი ეკონომიკური ზარალი ხდება ელექტროინდუსტრიის.

შემდეგ მცირდება ძვირადღირებულ ელექტროდანადგართა ექსპლუატაციის პერიოდი. ხორციელდება მათი მუშა ელემენტების ნაადრევი დაბერება და მწყობრიდან გამოსვლა. საქართველოს პირობებში აღნიშნული მატერიალური ზარალი კრიტიკულია, რადგან ელექტროსისტემის ნახევარი არის რეაბილიტირებული და ისედაც მოძველებულ აღჭურვილობას აზიანებს. ამასთანავე რეაბილიტირებული ელექტროდანადგართა ნაადრევი დაბერებაც გვაშორებს გზას ელექტროსისტემის სრულ რეაბილიტაციამდე.

აღსანიშნავია, რომ თანამედროვე მსოფლიო სულ უფრო აქტიურად ახორციელებს მზისა და ქარის ენერჯის პოტენციალის ათვისებას და არსებული, ტრადიციული პირველი სახის ენერჯების ჩანაცვლებას. მზისა და ქარის ინტეგრაცია ნებისმიერი ელექტროსისტემისათვის რთული პროცესია, მათი არასტაბილურობის გამო. არ გააჩნიათ შესაძლებლობა სტაბილურად ამუშაონ ელექტროენერჯის საგენერაციო დანადგარები. აღნიშნული ენერჯის წყაროები წარმოადგენენ ელექტროენერჯის ხარისხის დაბინძურების დიდ წყაროს. აუცილებელია მათი მუდმივი კონტროლი და ხარისხის ნორმების შესანარჩუნებელი ღონისძიებების გამოყენება. საქართველოს მსგავსი პატარა ელექტროსისტემისათვის უდიდესი პოტენციალის მქონე განახლებად ენერჯებზე მომუშავე ელექტროსადგურების ინტეგრაცია ელექტროსისტემასთან ორმაგად გართულებულია.

ელექტრული ენერჯის ხარისხის მონიტორინგი წარმოადგენს საჭირო (სასარგებლო) ინფორმაციის შეგროვებას, ანალიზსა და გაზომილი მონაცემების დამუშავებულად ინტერპრეტაციას. მონაცემთა შეგროვების პროცესი, როგორც წესი, ხორციელდება ძაბვის და დენის უწყვეტი გაზომვებით შესაძლო მაქსიმალური დისკრეტულობით: მაგ. EN 50160 სტანდარტის მიხედვით ეს დისკრეტულობა წარმოადგენს 512 მყისა მნიშვნელობის გაზომვას პერიოდის ჭრილში (0,02 წამში). აგრეთვე შესაძლებელია შეგვხდეს უფრო ღრმა გაზომვები კონკრეტული მოთხოვნებიდან გამომდინარე, შესაბამისად არსებობს 1024 მყისა მნიშვნელობის გაზომვა პერიოდის ჭრილში (0,02 წამში) ან/და 5000 მყისა მნიშვნელობის გაზომვა პერიოდის ჭრილში (0,02 წამში). გაზომვის, ანალიზისა და ინტერპრეტაციის პროცესი ტრადიციულად ხორციელდებოდა კონკრეტული ხელით მართვადი მოწყობილობების ინფორმაციის, ადამიანის მიერ დამუშავებით

[8, 9 და 12]. მაგრამ ბოლო დროს მიღწეული პროგრესით შემუშავებულმა ავტომატურმა და ინტელექტუალურმა სისტემებმა შესაძლებელი გახადა დაუმუშავებელი მონაცემების ავტომატური ანალიზი და ინტერპრეტაცია, რადგან მოხდეს დაუმუშავებელი ინფორმაციის სასარგებლო ინფორმაციად გარდაქმა ადამიანის მინიმალური ჩარევით.

უშუალოდ ელექტრული ენერჯის ხარისხი წარმოადგენს დენის, ძაბვის და სიხშირის მნიშვნელობების ნომინალურიდან გადახრით გამოვლენილ ნებისმიერი პრობლემას, რომელმაც შესაძლოა გამოიწვიოს მოწყობილობებისა და დანადგარების გაუმართაობა და დაზიანება. მისი გამომწვევი მიზეზია ნებისმიერი არასიმეტრიული და არასინუსოიდური მოვლენა თუ გადახრა. ხოლო უპირველეს მიზანს წარმოადგენს იყოს ელექტროენერჯის გამომუშავება, გადაცემა, განაწილება და მოხმარების სისტემების საუკეთესო პირობებში დაკავშირების ერთ-ერთი პირობა. ელექტრული ენერჯის ხარისხის მონიტორინგის სრულ ციკლს წარმოადგენს საჭირო (სასარგებლო) ინფორმაციის შეგროვება, ანალიზი და გაზომილი მონაცემების დამუშავებულად ინტერპრეტაცია. მონაცემთა შეგროვების პროცესი, როგორც წესი, ხორციელდება ძაბვის და დენის უწყვეტი გაზომვებით შესაძლო მაქსიმალური დისკრეტულობით აღიარებული სტანდარტის მოთხოვნების დაცვით. გაზომვის, ანალიზისა და ინტერპრეტაციის პროცესი ტრადიციულად ხორციელდებოდა კონკრეტული მოწყობილობის ინფორმაციის, ადამიანის მიერ დამუშავებით. მაგრამ ბოლო დროს მიღწეული პროგრესით შემუშავებულმა ავტომატურმა და ინტელექტუალურმა სისტემებმა შესაძლებელი გახადა დაუმუშავებელი მონაცემების ავტომატური ანალიზი და ინტერპრეტაცია, რადგან მოხდეს დაუმუშავებელი ინფორმაციის სასარგებლო ინფორმაციად გარდაქმა ადამიანის მინიმალური ჩარევით [6].

ელექტრული ენერჯის ხარისხის სამონიტორინგოდ/საკონტროლოდ გამოიყენება ორი სახის სიტემა: პირველი არის ლოკალური მაშტაბების და ხორციელდება კონკრეტული ელემენტების კავშირის წერტილებში სამონიტორინგო მოწყობილობების დამონტაჟებით და მათი ინფორმაციის ანალიზით. ხოლო მეორე წარმოადგენს მასობრივს. იგი ეწყობა მთელი ელექტროსისტემის მაშტაბით და მონიტორინგ/კონტროლს ანხორციელებს ცენტრალიზებული სისტემა. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ საქართველოში

ჯერჯერობით არ გვხვდება მეორე სახის სამონიტორინგო/მაკონტროლებელი სისტემები.

ელექტროსისტემაში მიმდინარე ტექნიკურ-ეკონომიკური პროცესი პირდაპირ დამოკიდებულია მოთხოვნილი ელექტროენერჯის უწყვეტ მიწოდებაზე. ნებისმიერი დროის ინტერვალით შეწყვეტილი მიწოდება წარმოადგენს გარკვეული სახის ეკონომიკურ დანაკარგს და ამასთანავე იზრდება საფრთხე მიმდინარე ტექნიკური პროცესის ჩამოშლის. ხოლო როდესაც ჩნდება საფრთხე, რომ პროცესის მოშლა, ელექტროენერჯის მიწოდების წყვეტა მოხდება ელექტროენერჯის ხარისხის პარამეტრების ზღვრული ნორმების დარღვევით, დამატებით წარმოიშვება მატერიალური ზარალი, რომელსაც განიცდის ელექტროსისტემის მუშა პროცესში მონაწილე გენერაცია, გადაცემა, განაწილება, მოხმარების ელემენტები. მატერიალურ ეკონომიკური ზარალი დამოკიდებულია ელექტროენერჯის ხარისხის დაბინძურების დონეზე. აღნიშნულ შემთხვევაში ყველაზე სავალალო მდგომარეობას წარმოადგენს ელექტროსისტემის სრული ჩაქრობა (Black Out), რომელსაც თან ახლას დიდი რაოდენობით მიუწოდებელი ელექტროენერჯია და ქვეყნის სრულიად ჩაქრობა რამდენიმე საათის განმავლობაში სისტემის აღდგენამდე. ამჟამად საქართველოს ოთხ მეზობელ ელექტროსისტემასთან აქვს კავშირი და სისტემატიურად ახორციელებს ელექტროენერჯის ექსპორტ/ინმპორტს. თითოეულ მეზობელ სისტემასთან ენერჯის მიმოცვლის ერთერთი მთავარი პირობაა ხარისხიანი ელექტროენერჯის არსებობა საქართველოში და მისი კონტროლი. აგრეთვე აღსანიშნავია ის ფაქტი, რომ საქართველო სამომავლო უახლოესი პერსპექტივაა ჩაერთოს ევროპაში ელექტროენერჯით ვაჭრობაში და ქვეყნის ელექტროსისტემა აქციოს ელექტროენერჯის გამტარ, ტრანზიტორ სისტემად. შესაბამისად, აღნიშნულ პროცესში ერთ-ერთ ყველაზე რთულ დეტალს წარმოადგენს ევროპის ელექტროსისტემასთან ინტეგრაცია და მათთვის ელექტროენერჯის ხარისხის მისაღები ნორმების შეთავაზება. ელექტრომომხმარებელთა ბაზაზე საქართველოს ელექტროსისტემაში არსებობენ მომხმარებლები, რომელთა გათიშვაც მუშა პროცესის გამო მიზანშეუწონელია. მაგალითად, რომ ავილოთ ლითონგადამამუშავებელი ქარხნები და მათი ელექტრო დანადგარები. რიგ შემთხვევებში ეს დანადგარები მუშაობს უწყვეტ რეჟიმში. კვლევებმა აჩვენა, რომ



მსგავსი სახის მძლავრი მომხმარებლები განსაკუთრებით მგრძობიარენი არიან ელექტროენერჯის ხარისხის პარამეტრების დარღვევის მიმართ. ელექტროენერჯის ხარისხის ნორმების დარღვევით გამკზოწვეული ელექტროსისტემის ტექნიკურ-ეკონომიკური პროცესის ჩამოშლის უმძიმესი გავლენა აისახება ქვეყნის ინდუსტრიული თუ სასიცოცხლო მნიშვნელობის ნებისმიერ ობიექტზე. მათ შორის საავადმყოფოებსა და სხვა სასწრაფო დახმარების ობიექტებზე [5].

ელექტროენერჯის ხარისხის მონიტორინგი/კონტროლის მნიშვნელობა ელექტროენერჯის გადაცემაში მონაწილე ელემენტებისათვის თანამედროვე მსოფლიოში იქცა ახალ მნიშვნელოვან გამოწვევად. ამის გაუთვალისწინებლობა იწვევს დიდ მატერიალურ ზარალს. პირველ რიგში ელექტროსისტემაში იზრდება ელექტროენერჯის გადაცემით გამოწვეული დანაკარგები და დასაშვებზე მეტი დანაკარგები პირდაპირი ეკონომიკური ზარალი ხდება ელექტროინდუსტრიის. შემდეგ მცირდება ძვირადღირებულ ელექტროდანადგართა ექსპლუატაციის პერიოდი. ხორციელდება მათი მუშა ელემენტების ნაადრევი დაბერება და მწყობრიდან გამოსვლა. საქართველოს პირობებში აღნიშნული მატერიალური ზარალი კრიტიკულია, რადგან ელექტროსისტემის ნახევარი არის რეაბილიტირებული და ისედაც მოძველებულ აღჭურვილობას აზიანებს. ამასთანავე რეაბილიტირებული ელექტროდანადგართა ნაადრევი დაბერებაც გვაშორებს გზას ელექტროსისტემის სრულ რეაბილიტაციამდე.

აღსანიშნავია, რომ თანამედროვე მსოფლიო სულ უფრო აქტიურად ახორციელებს მზისა და ქარის ენერჯის პოტენციალის ათვისებას და არსებული, ტრადიციული პირველი სახის ენერჯების ჩანაცვლებას. მზისა და ქარის ინტეგრაცია ნებისმიერი ელექტროსისტემისათვის რთული პროცესია, მათი არასტაბილურობის გამო. არ გააჩნიათ შესაძლებლობა სტაბილურად ამუშაონ ელექტროენერჯის საგენერაციო დანადგარები. აღნიშნული ენერჯის წყაროები წარმოადგენენ ელექტროენერჯის ხარისხის დაბინძურების დიდ წყაროს. აუცილებელია მათი მუდმივი კონტროლი და ხარისხის ნორმების შესანარჩუნებელი ღონისძიებების გამოყენება. საქართველოს მსგავსი პატარა ელექტროსისტემისათვის უდიდესი პოტენციალის მქონე განახლებად ენერჯიებზე

მომუშავე ელექტროსადგურების ინტეგრაცია ელექტროსისტემასთან ორმაგად გართულებულია.

ელექტრული ენერჯის ხარისხის მონიტორინგი/კონტროლი წარმოადგენს საქართველოს ელექტროსისტემისათვის თანამედროვეობის უახლოს გამოწვევას, რომლის აუცილებლობის მიზეზი მრავლად იჩენს თავს. იგი შეიძლება დიდი ეკონომიკური ზიანის მომტანი გახდეს ქვეყნის ეკონომიკისათვის. გამოიწვიოს მასშტაბური ავარიები და ყალბი ავარიული გამორთვები ელექტროსისტემის ყველა კომპონენტზე. ამ მიზეზების გამო დგას საქართველოს ელექტროსისტემა ელექტროენერჯის ხარისხის მონიტორინგი/კონტროლის, როგორც ელექტროენერჯეტიკის დარგად ჩამოყალიბების აუცილებლობის წინაშე.

მრავალ სამრეწველო და კომერციულ მომხმარებელს გააჩნიათ აღჭურვილობა, რომელიც განსაკუთრებით მგრძობიარეა ელექტრული სისტემის დამახინჯებებზე. აქედან გამომდინარე წარმოიშვება პირობა, რომელიც გულისხმობს ხარისხიანი ენერჯით მომარაგებას. ეს ყველაფერი ფართოდ არის დამოკიდებული გადამცემ და დისტრიბუციის სისტემებში ხარისხიანი ელექტროენერჯის არსებობაზე და მიმოცვლაზე, რომელიც თავისთავად დამოკიდებულია ელექტროსადგურების მიერ გამომუშავებული ელექტრული ენერჯის ხარისხზე. შესაბამისად დგება აუცილებლობა, რომ ნებისმიერ კვანძურ წერტილში, რომლებშიც ხდება ელექტრული ენერჯის მიმოცვლა, განხორციელდეს ხარისხის მონიტორინგი და კონტროლი.

ელექტრული ენერჯის ხარისხის კონტროლისა და მონიტორინგისათვის განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ელექტრულ ქსელში ხარისხის დამახინჯებელი წერტილების აღმოჩენა. მიუხედავად იმისა ელექტრული ქსელის რომელ ნაწილს წარმოადგენს გამომუშავებელს, მომხმარებელს თუ გადამცემს. შესაბამისად ელექტრულ ქსელში გვხვდება მრავალი კომპონენტი, რომელიც თავისმხრივ გარკვეულ გავლენას ახდენს ქსელის საერთო ხარისხის დაბინძურების დონეზე. ეს კომპონენტებია:

1. კომპიუტერული ქსელი;
2. სატელეკომუნიკაციო სადგურები;
3. ნახევარგამტარულ ელემენტებზე მომუშავე ქარხნები;
4. ბიოტექნოლოგიური და ფარმაცევტული ლაბორატორიები;

5. ფინანსური მონაცემების გადამამუშავებელი ცენტრები;
6. ქარხნები მჩარხველი და შემდუღებელი მძლავრი დანადგარებით;
7. რკალური ღუმლები;
8. მუდმივი დენის ჩანართები;
9. განახლებადი ენერჯის ელექტროსადგურები (მაგალითად ქარის ელექტროსადგურები);
10. ნებისმიერი სახის მართვადი ელექტროძრავები;
11. ელექტროფიცირებული რკინიგზა;
12. ინდუქციური დატვირთვა;
13. დიდი დატვირთვის მქონე მომხმარებლების ჩართვა-გამორთვა;
14. კონდესატორების ჩართვა-გამორთვა;
15. სისტემაში დიდი შეშფოთებების მოხდენა;
16. მოკლე ჩართვები;
17. ელექტროსისტემაში ძაბვის რეგულირება;
18. არაწრფივი დატვირთვები;
19. რეაქტიული ენერჯის მომხმარებელი აღჭურვილობა;
20. ნებისმიერი სახის გენერაციის დაკარგვა
21. ელექტროსისტემის გადატვირთვა;
22. მძლავრი ძრავების გაშვება;
23. ელექტრომოწყობილობების გაუმართაობა;
24. დაბალი სიმძლავრის კოეფიციენტი;

ელექტრული ენერჯის ხარისხის კონტროლის მიზნებს წარმოადგენს:

1. ელექტროსისტემის გამართულად და მდგრადად მუშაობა;
2. ახალი მომხმარებლებისათვის საიმედო და მდგრადი ქსელის შეთავაზება მათი მოწყობილობების სტაბილურად მუშაობისათვის;
3. მოკლევადიანი მონიტორინგი გამოიყენება სპეციფიური მომხმარებლების სადგურების თვისებების განსასაზღვრად. შემდგომი ნომინალური ექსპლუატაციის შესაქმნელად;
4. ელექტრული ენერჯის ხარისხის მონიტორინგი საშუალებას გვაძლევს უკვე არსებული ელექტრული ენერჯის მომხმარებლებსა

და ენერჯის მიმწოდებელს შორის ნორმალური მუშაობის პირობების შესაქმნელად.

5. ელექტრული ენერჯის ხარისხის მონიტორინგით დამახინჯებების აღმოჩენა და მათ გამოსწორებაზე მუშაობის დაწყება;
6. ელექტრო სისტემის მოწყობილობების ნაადრევი დაბერების თავიდან არიდება.

ელექტრული ენერჯის ხარისხის მონიტორინგის ერთ-ერთ მიზნად შეგვიძლია აღვიქვათ, რომ გვეძლევა საშუალება ვიწინასწარმეტყველოთ გარკვეული სახის საშიშროებები, რომლებიც შესაძლებელია საფუძველი აღმოჩნდეს კატასტროფული შედეგების.

ელექტრული ენერჯის ხარისხის (PQ) მონიტორინგის მნიშვნელობა და მიზნები ხშირად განსაზღვრავს სამონიტორინგო მოწყობილობის არჩევანს, აყალიბებს ზღვრებს, მონაცემთა შექმნისა და შენახვის მეთოდებსა და ანალიზისა და ინტერპრეტაციის მოთხოვნებს. ელექტროენერჯის ხარისხის მონიტორინგის პროგრამები ხშირად განპირობებულია სისტემური სიმძლავრის ხარისხის ფართოდ გაუმჯობესების მოთხოვნების გამო. სხვადასხვა ინსტრუმენტები შესაძლოა გამოყენებული იყოს ელექტრული ენერჯის ხარისხის პრობლემების შესაფასებლად:

1. კაბელებისა და დამიწების ტესტირების მოწყობილობები;
2. მრავალფუნქციური მზომი მოწყობილობები;
3. ოსცილოსკოპები;
4. დარღვევების ანალიზატორები;
5. ჰარმონიკული და სპექტრის ანალიზატორები;
6. ციმციმის მზომი მოწყობილობები;
7. ენერჯის მონიტორები.

აგრეთვე ელექტრული ენერჯის ხარისხის მონიტორინგისას ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანე ფაქტორს წარმოადგენს ხარისხის მზომი მოწყობილობების შერჩევის ფაქტორები კონკრეტული მიზნებიდან გამომდინარე. ესენია:

1. გასაზომი არხების რაოდენობა (მაზვა და დენი);
2. ხელსაწყოს ტემპერატურული სპეციფიკაცია;
3. შემავალი ძაბვის დიაპაზონი ( 0 -დან 600 ვ-მდე);

4. ელექტრული ენერჯის მოთხოვნები;
5. სამ-ფაზა ძაბვის გაზომვის უნარი;
6. შემაჯალი არხების იზოლაცია (იზოლაცია შემაჯალ არხებსა და თითოეული არხის მიწის მიმართ)
7. დენისა და ძაბვის მნიშვნელობების გაზომვის დისკრეტულობა;
8. საკომუნიკაციო მოწყობილობების შერჩევა;
9. სამართავი და ანალიზატორი პროგრამული უზრუნველყოფა; (საკომუნიკაციო შესაძლებლობების გათვალისწინებით);
10. მზომი მოწყობილობებისა რამდენიმე საკომუნიკაციო არხის არსებობა პარალელურ რეჟიმში;
11. გასაანალიზებელი პარამეტრების ზუსტი რაოდენობა;
12. სასურველ წრედში ჩასართვად მოდიფიკაციის შესაძლებლობა;
13. ლოკალური მეხსიერების ზომა;
14. სასურველი ანალიზისათვის შესაბამისად დაკონფიგურების შესაძლებლობა.

ენერჯის ხარისხის მონიტორინგი არის ნედლეულის შეგროვების, ანალიზისა და ინტერპრეტაციის პროცესი გაზომვის მონაცემები ასარგებლო ინფორმაციად. მონაცემების შეგროვების პროცესი ჩვეულებრივ ხორციელდება ძაბვისა და დენის უწყვეტი გაზომვა დიდი ხნის განმავლობაში. ანალიზის პროცესი და ინტერპრეტაცია ტრადიციულად შესრულდა ხელით, მაგრამ ბოლოდროინდელი მიღწევები სიგნალში დამუშავებისა და ხელოვნური ინტელექტის სფეროებმა შესაძლებელი გახადა დაპროექტება და განხორციელება ინტელექტუალური სისტემები, რომლებიც ავტომატურად აანალიზებენ და ინტერპრეტაციას უკეთებენ ნედლეულ მონაცემებს სასარგებლო ინფორმაციად მინიმალური ადამიანის ჩარევა. ენერჯის ხარისხის მონიტორინგის პროგრამები ხშირად გამოწვეულია გაუმჯობესების მოთხოვნით სისტემის ფართო სიმძლავრის ხარისხის შესრულება. ბევრ სამრეწველო და კომერციულ მომხმარებელს აქვს მოწყობილობა, რომელიც მგრძნობიარეა დენის დარღვევის მიმართ და, შესაბამისად, უფრო მნიშვნელოვანია გაიგეთ მიწოდებული ენერჯის ხარისხი. ამ საშუალებების მაგალითებია კომპიუტერი ქსელური და სატელეკომუნიკაციო საშუალებები, ნახევარგამტარებისა და ელექტრონიკის წარმოება ობიექტები,

ბიოტექნოლოგიური და ფარმაცევტული ლაბორატორიები და ფინანსური მონაცემთა დამუშავების ცენტრები. აქედან გამომდინარე, ბოლო ათწლეულის განმავლობაში ბევრმა კომუნალურმა კომპანიამ დანერგა ენერჯის ფართო ხარისხი მონიტორინგის პროგრამები.

## 1.2 ელექტრული ენერჯის ხარისხის სამონიტორინგო მოწყობილობები

პირველი თაობის ელექტრული ენერჯის ხარისხის სამონიტორინგო მოწყობილობების წარმოება 1970-იანი წლებიდან დაიწყო, როდესაც „Dranetz Engineering Laboratories“-მ (ახლა უკვე dranetz –BMI) წარმოადგინა სერია 606 PLDA. ეს იყო მიკროპროცესორი დაფუძნებული მონიტორ-ანალიზატორზე, რომელიც პირველად 1975 წელს დამზადდა და ბევრი ერთეული ჯერ ისევ მომსახურებაშია. მოწყობილობა ინფორმაციას იძლეოდა მხოლოდ ტექსტურად დაბეჭდილს და აღწერდა მხოლოდ ძაბვის ჩავარდნებს, წყვეტებსა და მნიშვნელობებს. ამ მონიტორებს ჰქონდათ შეზღუდული ფუნქციები თანამედროვე მონიტორებთან შედარებით. შემდეგი ელექტრული ენერჯის ხარისხის სამონიტორინგო მოწყობილობა გამოვიდა 1980 წელს და მოგვიანებით 1990-იანი წლებიდან უკვე ფართო წარმოება განვითარდა შესაბამისად გზადაგზა დაიხვეწა სამონიტორინგო მოწყობილობები და მივიღე თანამედროვე მრავალ ფუნქციონირებადი ელექტრული ენერჯის სამონიტორინგო და ანალიზატორი მოწყობილობები რომლებსაც უკვე 5000 პარამეტრის დამუშავება შეუძლიათ.

იდეალური ელექტროენერჯის სიგნალებს აქვთ სპეციფიკური პარამეტრები, როგორცაა ფუნდამენტური სიხშირე და ამპლიტუდების კონკრეტული დიაპაზონი, რომლებიც ასევე ცნობილია როგორც ნომინალური მნიშვნელობები. ამრიგად, ამ მნიშვნელობებიდან ნებისმიერი გადახრა განისაზღვრება, როგორც ელექტროენერჯის დარღვევა და მისი წარმოშობა შეიძლება გამოვლინდეს PQ მონიტორინგის მეშვეობით. IEEE 1159 მიხედვით, დაქვეითება განისაზღვრება, როგორც ძაბვის საშუალო მნიშვნელობის შემცირება ხანგრძლივობისთვის, რომელიც მოიცავს 0,5 ციკლიდან 1 წუთამდე, ტიპური შემცირებით 0,1 ერთეულზე. მეორე მხრივ, შემუშავდა განისაზღვრება, როგორც საშუალო

მნიშვნელობის ზრდა და ის შეიძლება მოხდეს 1.1 მნიშვნელობებისთვის, ხანგრძლივობით 0.5 ციკლიდან 1 წთ-მდე. წინააღმდეგ შემთხვევაში, რყევები განისაზღვრება, როგორც ძაბვის ცვლილებების სერია, რომელიც შეიძლება შემთხვევით გამოჩნდეს სიგნალის კონვერტში ტიპიური მნიშვნელობებით 0.95-დან 1.05-მდე. ტალღის ფორმის დამახინჯების კატეგორიაში შედის ჰარმონიები, რომლებიც არის სინუსოიდური ძაბვები ან დენები სიხშირეებით, რომლებიც ფუნდამენტური სიხშირის მთელი რიცხვებია. გარდა ამისა, სხვა სახის დარღვევები ცნობილია როგორც გარდამავალი, რომელიც ასახავს ფენომენს, რომელიც წარმოადგენს ვარიაციებს ორ თანმიმდევრულ სტაბილურ მდგომარეობას შორის, ანუ დროის მოკლე ინტერვალის დროს და შეიძლება იყოს ცალმხრივი იმპულსი ან რხევადი ტალღა.

ელექტროენერჯის ხარისხის საკითხები რთულია მიკროქსელში, სხვადასხვა ტიპის განახლებადი ენერჯის რესურსების არსებობის გამო, ჩვეულებრივი ენერგოსისტემებისგან განსხვავებით. ამრიგად, ამ კვლევის მთავარი მიზანია სიმძლავრის ხარისხის რაოდენობრივი დადგენა ძაბვის, სიხშირის, სიმძლავრის კოეფიციენტისა და მთლიანი ჰარმონიული დამახინჯების (THD) ცვალებადობის გათვალისწინებით ძაბვის ვარდნის, შეშუპების, შეფერხების და გაუწონასწორებლობის გამოვლენის გამო სამფაზაში. ცვლადი მიკროქსელის კვების სტატიკური და ბრუნვითი დატვირთვები. ამიტომ, ენერჯის ხარისხის მონიტორინგის ახალი ინდექსი არის შემოთავაზებული დენის ხარისხის სტატუსის დასადგენად. სულ 256 წესის რაოდენობა ჩამოყალიბებულია ბუნდოვანი დასკვნის სისტემისთვის PQMI-ის შესაფასებლად ზემოთ აღნიშნული ოთხი შეყვანის ცვლადის მისაღები ზღვრების გათვალისწინებით IEEE/IEC სტანდარტების მიხედვით. შემოთავაზებული მეთოდოლოგია დამოწმებულია ტიპის FIS-ის საშუალებით Matlab-Simulink პროგრამული უზრუნველყოფის გამოყენებით. ასევე აღმოჩნდა, რომ შემოთავაზებული მნიშვნელოვანია მიკროქსელის სტატუსის დასადგენად, მაშინაც კი, როდესაც ქსელთან დაკავშირებულია კუნძულურ რეჟიმში გადასვლისას და პირიქით.

### 1.3 ელექტრული ენერჯის ხარისხის კონტროლის საერთაშორისო სტანდარტები

[5, 6]

ელექტრული ენერჯის ხარისხის ანალიზისათვის და დარღვევის ზღვრების დასაფიქსირებლად შემოღებული იქნა სხვადასხვა სტანდარტები. შესაბამისად დროთა განმავლობაში მოხდა სტანდარტების და მათში დაფიქსირებული ზღვრების დამუშავება და ოპტიმალურად მორგება ელექტრული ქსელის ნორმალური მუშაობისათვის. საბოლოო ჯამში მოქმედებაში შევიდა და დამყარდა რამდენიმე სახის სტანდარტი, რომლებიც გამოცდილია და მიღებულია მოწინავე ქვეყნების მიერ, ესენია: IEEE, IEC და EN [5, 6].

საერთაშორისოდ მიღებულ ყველა სტანდარტები რომლებიც გამოიყენება კონკრეტული ენერჯის ხარისხის პარამეტრისათვის შემდეგია:

IEEE 141-1993 ელექტროენერჯის განაწილება სამრეწველო ქარხნებისთვის სახელმძღვანელო აღჭურვილობისა და სიცოცხლის უსაფრთხოების, საიმედოობის, ძაბვის რეგულაციებისა და გაფართოების მოქნილობის შესახებ და ა.შ.

IEEE 242-1986 სამრეწველო და კომერციული გამოყენების დაცვა და კოორდინაცია. დაცვის კომპონენტის სათანადო შერჩევის, გამოყენებისა და კოორდინაციის სტანდარტი.

IEEE 519-1992 ჰარმონიული კონტროლი ელექტროენერგეტიკულ სისტემაში რეკომენდირებულია ჰარმონიული კონტროლისთვის და რეაქტიული კომპენსაციისთვის.

IEEE 1159-1995 ელექტროენერჯის ხარისხის მონიტორინგი. სახელმძღვანელო მიზნების მონიტორინგის, საზომი ხელსაწყო, მონიტორინგის გამოყენების ტექნიკისთვის.

IEEE 1250-2018 ძაბვის ხარისხი ენერჯოსისტემაში. ელექტრულ სისტემაში სიმძლავრის ხარისხის იდენტიფიცირებისა და გაუმჯობესების გზების სტანდარტი.

SEMI F-47-1999 აღჭურვილობის საიმედოობა, ხელმისაწვდომობა და შენარჩუნება. აღჭურვილობის საიმედოობის, ხელმისაწვდომობისა და მისი შენარჩუნების სტანდარტი დენის უკეთესი ხარისხისთვის.



ANSI C84.1-1995 ელექტროენერგეტიკული სისტემა და აღჭურვილობა - ძაბვის რეიტინგი. რეკომენდაცია აღჭურვილობისა და ენერგოსისტემის ძაბვის რეიტინგების შესახებ თავსებადობის მისაღწევად.

NEMA MG 1-1998 ძრავები და გენერატორები. სტანდარტი ტექნიკური სპეციფიკაციისთვის, რომელსაც იყენებენ მწარმოებლები ენერჯის ხარისხის მისაღწევად.

NEMA LSI-1992 დაბალი ძაბვის დენის დამცავი მოწყობილობები. ინსტრუქცია მოწყობილობების ხარისხიანი მშენებლობისთვის.

IEC 816-1984 გარდამავალი დაბალი ძაბვის სიმძლავრისა და სიგნალის ხაზზე. რეკომენდებული პრაქტიკა დაბალი ძაბვის სიმძლავრისა და სიგნალის ხაზზე მოკლე ხანგრძლივობის გარდამავალი გაზომვის მეთოდებისთვის.

IEC 868-0-1991 ციმციმის მრიცხველი ძაბვის რყევების სიმძიმის შეფასება სინათლის ციმციმებზე.

#### 1.4 ელექტრული ენერჯის ხარისხის კონტროლის ნორმები საქართველოში

საქართველოში მოქმედ ელექტრული ქსელის წესებში ამჟამად არცთი მოცემული სტანდარტი არ არის მიღებული. მაგრამ არსებობს გარკვეული ზღვრული შეზღუდვები კონკრეტული ელექტრული ენერჯის ხარისხის პარამეტრების მიმართ, რომლებიცაა:

##### 1.4.1 სიხშირის ზღვრები

ელექტრო გადამცემ ქსელში ნომინალური სიხშირე უნდა იყოს 50 ჰც. ამასთან, ქვემოთ მოყვანილ გაუთვალისწინებელ შემთხვევაშიც 53.0 ჰერცზე მაღალი სიხშირე დაუშვებელია[4]. სიხშირე შენარჩუნებული უნდა იყოს შემდეგ ფარგლებში:

1. პარალელურ, სინქრონულ რეჟიმში მუშაობის პირობებში  $f=50\pm 0.5$  ჰც დღე-ღამის არანაკლებ 95%-ის განმავლობაში[4].
2. იზოლირებულ რეჟიმში მუშაობის პირობებში  $f=50\pm 1$  ჰც დღე-ღამის არანაკლებ 95%-ის განმავლობაში[4].

3. ავარიის შემდგომ დამყარებულ რეჟიმში: 49.0-51 ჰვ ხანგრძლივი პერიოდის მანძილზე; 48.0-49.0 ჰვ არაუმეტეს 15 წუთისა; 47.5.0-48.0 ჰვ არაუმეტეს 2 წუთისა; 50.5-51.0 ჰვ არაუმეტეს 20 წუთისა; სიხშირის ნომინალური მაჩვენებლიდან მდგრადი მაქსიმალური გადახრა არ უნდა აღემატებოდეს  $\pm 0.3$  ჰვ-ს; სიხშირის მაქსიმალური დინამიური გადახრა არ უნდა აღემატებოდეს  $\pm 0.8$  ჰვ-ს [4].

#### 1.4.2 ძაბვის ზღვრები

ნორმალურ და ავარიულ რეჟიმში ძაბვის სიდიდეების ცვლილება დასაშვებია შემდეგ ზღვრებში:

1. ნორმალურ პირობებში ძაბვის დასაშვები გადახრა სხვადასხვა ნომინალური ძაბვისათვის მოცემულია ცხრილში [4]:

ნომინალური ძაბვა(კვ)	110	220	330	400	500
დასაშვები ზღვრები	-5%/+0%	- 5%/+7%	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$

2. ავარიული სიტუაციის შემდგომ ძაბვის დასაშვები გადახრა სხვადასხვა ნომინალური ძაბვისათვის მოცემულია ცხრილში [4]:

ნომინალური ძაბვა(კვ)	110	220	330	400	500
დასაშვები ზღვრები	-10%/+15%	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$

#### 1.4.3 ჰარმონიკული დამახინჯების ზღვრები

გადამცემ ქსელზე მიერთებული არცერთი ელექტრომოწყობილობა-დანადგარი არ უნდა იწვევდეს გადამცემ ქსელში ძაბვის ჰარმონიკულ დამახინჯებას 1.5%-ზე მეტით, ხოლო რიგობრივი ჰარმონიკების შემთხვევაში 1%-ზე მეტით [4].

#### 1.4.4 ძაბვის ასიმეტრიის ზღვრები

ელექტრო ენერჯიის მომხმარებელმა ელექტრომომწოდებლობა-დანადგარმა არ უნდა გამოიწვიოს გადამცემ ქსელზე მიერთების წერტილებში, უქმი სვლიდან ნომინალურ დატვირთვამდე ფაზათაშორისი ძაბვის ასიმეტრია ერთ პროცენტზე (1%) მეტით [4].

#### 1.4.5 ძაბვის რხევისა და სინათლის ციმციმის ზღვრები

ელექტრო ენერჯიის მომხმარებელმა უნდა უზრუნველყოს, რომ:

1. ძაბვის რხევა მისი ელექტრომომწოდებლობა-დანადგარის მიერთების ნებისმიერ წერტილში, დატვირთვის ცვლილების დროს არ აღემატებოდეს ძაბვის ნომინალური სიდიდის ერთ პროცენტს (1%) [4];

2. მიერთების წერტილში ძაბვის ციმციმი არ უნდა აღემატებოდეს  $P_{st}=0.8$  და  $P_{lt}=0.6$  ზღვრებს, 95%-ის სანდოობის ინტერვალით, გაზომვების ერთი კვირის განმავლობაში [4].

## თავი 2. ნაშრომის ძირითადი კვლევა

ნაშრომი მოიცავს ექსპერიმენტალურ გამოკვლევებს, რომლებიც ჩატარდა სადისერტაციო სამუშაოს კვლევის ძირითად ობიექტებზე. მოცემული ნაშრომის კვლევის ძირითად მიზანს წარმოადგენს საქართველოში, ქალაქ თბილისის შემოგარენში ელექტროსისტემის 110 კვ ძაბვის საფეხურის ქსელის ელექტრული ენერჯის ხარისხის ჯამური დამახინჯების დონის გამოკვლევა. ექსპერიმენტული გაზომვები ჩატარდა ექსპლუატაციაში მყოფ ოთხ ქვესადგურში, რომლებსაც პირობითად ქვიათ A, და B ქვესადგურები.

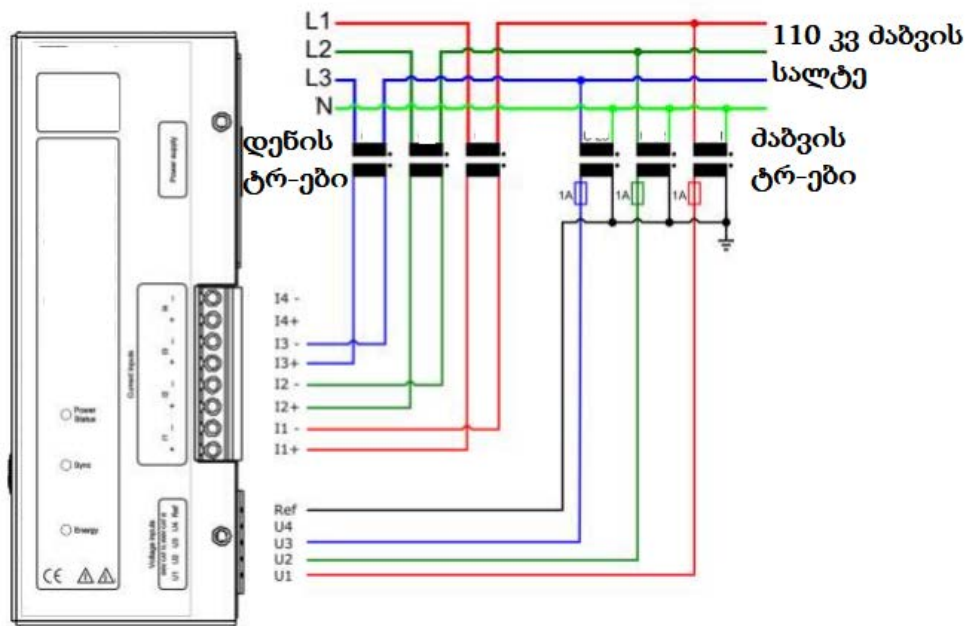
ექსპერიმენტალური კვლევის მიზანია საქართველოში ყველაზე მჭიდროდ დასახლებული და ფართოდ ინდუსტრირებული ტერიტორიის ელექტრული ენერჯის ხარისხის დრმა კვლევა და ხარისხის დამახინჯების ნორმის განსაზღვრა.

კვლევა ერთდროულად ყველა ქვესადგურში განხორციელდა საქართველოს ელექტროსისტემაში 2021 წლის ზაფხულის პერიოდის პიკური დატვირთვის დროს, კერძოდ ივლისის თვეში და საქართველოს ელექტროსისტემაში 2022 წლის ზამთრის პერიოდის პიკური დატვირთვის დროს, კერძოდ იანვრის თვეში. ყველა მოწყობილობა კვლევის პერიოდში იყო სინქრონიზირებული.

ექსპერიმენტალური კვლევისათვის გამოყენებული იქნა UP 2210 – III ტიპის ელექტრული ენერჯის ხარისხის სამონიტორინგო მოწყობილობება რომელიც მონიტორინგს ახორციელებს განსაზღვრულია EN50160 სტანდარტის საშუალებით. ამასთანავე ექსპერიმენტის შედეგად მიღებული შედეგები შეფასდა 2014 წლის 17 აპრილს საქართველოს ენერჯეტიკისა და წყალმომარაგების მარეგულირებელი ეროვნული კომისიის № 10 დადგენილებით მიღებულ „ქსელის წესებს“, რომელიც შესაბამისად განსაზღვრავს საქართველოს ელექტრო სისტემის მონაწილეთა მიერ გადამცემი ქსელის განვითარების, მართვის, ხელმისაწვდომობისა და უსაფრთხო სარგებლობის პროცედურებს, პირობებს, პრინციპებსა და სტანდარტებს.

ელექტრული ენერჯის ხარისხის სამონიტორინგო მოწყობილობა დაერთებულია 110 კვ ძაბვის საფეხურზე მზომი დენისა და ძაბვის ტრენსფორმატორების მეორად წრედებში. კერძოდ ციფრული დაცვისა და

ავტომატიკის ციფრულ. პანელებში. ნახაზ 1-ზე მოცემულია მოწყობილობის დაერთების სქემა.

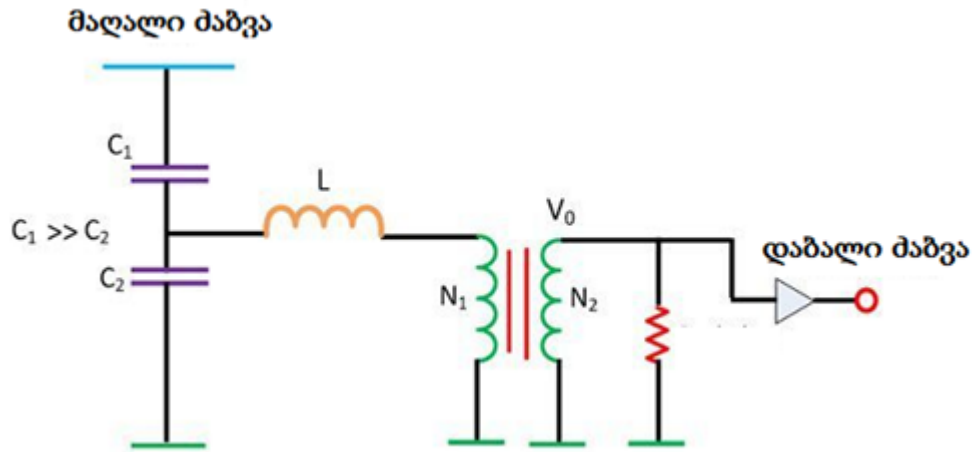


ნახ. 1. ელექტრული ენერჯის ხარისხის სამონიტორინგო მოწყობილობის დაერთების სქემა

სამონიტორინგო მოწყობილობის ქსელთან დასაკავშირებლად გამოყენებულია სამი ცალი მზომი დენის ტრანსფორმატორი და სამი ცალი ძაბვის ტრანსფორმატორი რომლებიც აკრეფიალია ვარსკვლავად და გამოყვანილი ნეიტრალის წვერც დაკავშირებული მოწყობილობასთან. აღსანიშნავია რომ მოწყობილობა გაზომვას აწარმოებს დენისა და ძაბვის მზომი ტრანსფორმატორების მეორადი წრედების 5R და 3R გრაგნილებიდან. რომლებიც გამოიყენება სარელეო დაცვისა და ავტომატიკის მოწყობილობებისათვის და მათი სიზუსტის კლასი შედარებით სუსტია. უშუალოდ მოწყობილობა არის 0.5 სიზუსტის კლასის. შესაბამისად ელექტრული ენერჯის ხარისხის სამონიტორინგოდ და განსაკუთრებით კონტროლისათვის რეკომენდირებულია გამოყენებული იქნას დენისა და ძაბვის ტრანსფორმატორების უფრო მაღალი სიზუსტის კლასის მქონე გრაგნილები როგორებიცაა 0.5 ან 0.2 კლასი.

კვლევის პროცესის მიმდინარეობისას გამოვლინდა ელექტრო ენერჯის ხარისხის მონიტორინგი/კონტროლის დროს გასათვალისწინებელი კიდევ ერთი

მნიშვნელოვანი ფაქტი. მსოფლიოს უმრავლეს განვითარებულ ელექტროსისტემებში ძეგვის მზომ ტრანსფორმატორებად გამოიყენება კონდენსატორული ტიპის ძეგვი ტრანსფორმატორები. მისი უმარტივესის სქემა წარმოდგენილია ნახაზ 2-ზე:



ნახ. 2. ტევადური ძაბვის ტრანსფორმატორის ჩანაცვლების სქემა

ტევადური ტიპის ძაბვის ტრანსფორმატორების მუშაობის პრინციპი შემდეგია: კონდენსატორების ბლოკების გამოყენებით ხდება მაღალი ძაბვის საფეხურის სიგნალების შემცირება დაბალი ძაბვის სიგნალად. ტევადი პოტენციური ტრანსფორმატორის გამომავალი ძაბვა კიდევ უფრო მცირდება დამხმარე ტრანსფორმატორის დახმარებით. კონდენსატორი ან პოტენციური გამყოფი მოთავსებულია ხაზის გასწვრივ, რომლის ძაბვა გამოიყენება გასაზომად ან გასაკონტროლებლად. კონდენსატორის ადგილებს მიწასთან ახლოს აქვთ მაღალი ტევადობა გადამცემ ხაზთან შედარებით. ტევადობის მაღალი მნიშვნელობა ნიშნავს, რომ პოტენციური გამყოფის ამ ნაწილის წინაღობა დაბალი ხდება. ამრიგად, დაბალი ძაბვები გადადის დამხმარე ტრანსფორმატორზე. დამხმარე ტრანსფორმატორი კიდევ უფრო ამცირებს ძაბვებს.  $N_1$  და  $N_2$  არის ტრანსფორმატორის პირველადი და მეორადი გრაგნილის. მრიცხველი, რომელიც გამოიყენება ძაბვის დაბალი მნიშვნელობის გასაზომად, არის რეზისტენტული, ხოლო პოტენციური გამყოფი არის ტევადი. ამრიგად, ფაზური ცვლა ხდება და გამომავალ სიგნალზე ახდენს გავლენას. ამ პრობლემის გადასაჭრელად ინდუქციურობა მოთავსებულია სერიულად დამხმარე ტრანსფორმატორთან. ეს ინდუქციური  $L$  არის დამხმარე ტრანსფორმატორის დამხმარე გრაგნილის

გაჟონვის ნაკადი. ინდუქციების მნიშვნელობა მოცემულია შემდეგი ფორმულის საშუალებით:

$$L = \frac{1}{\omega^2(C_1 + C_2)}$$

ინდუქციურობა ანაზღაურებს ტრანსფორმატორში წარმოქმნილ ძაბვის ვარდნას პოტენციური გამყოფიდან დენის შემცირების გამო. მაგრამ, რეალურ პრაქტიკაში, კომპენსაცია შეუძლებელია ინდუქციური დანაკარგების გამო. ტრანსფორმატორის ძაბვის მობრუნების თანაფარდობა გამოსახულია:

$$\frac{V_0}{V_1} = \left[ \frac{C_2}{C_2 + C_1} \right] \times \frac{N_2}{N_1}$$

რადგან  $C_1$ -ის მნიშვნელობა  $C_2$ -ზე მეტია. ამრიგად, მნიშვნელობა  $C_1/(C_1+C_2)$  მცირეა. მიიღება ძაბვის დაბალი მნიშვნელობა. ტევადობის პოტენციური ტრანსფორმატორის ძაბვის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი თავისუფალია ტვირთისგან. ტვირთი არის დატვირთვა ტრანსფორმატორის მეორად გრაგნილზე.

ტევადური ძაბვის მზომ ტრანსფორმატორში კონდენსატორების არსებობის გამო იგი თავისთავად ხდება მაღალი რიგის ძაბვის ჰარმონიკების ფილტრი. შესაბამისად იგი ახდენს მაღალი რიგის ჰარმონიკების 21 ჰარმონიკა და ზევით გაფიტრაც რომელთა მნიშვნელობაც ისედაც მცირეა ქსელში. ჰარმონიკები აღარ გენერირდება მეორად გრაგნილში სადაც ჩართულია ელექტრული ენერჯის ხარისხის სამონიტორინგო მოწყობილობა. კვლევის მანძილზე ჩატარებულმა გაზომვებმა ნათლად აჩვენა, რომ მზომ მოწყობილობების მიერ გაზომილ ინფორმაციაში მაღალი რიგის ჰარმონიკების ნაწილის 21 რიგი და ზევით მნიშვნელობა ყოველთვის ნულია. რომელიც გამოწვეულია ტევადური მზომი ძაბვის ტრანსფორმატორების გამოყენებით [15, 12, 11].

აღნიშნული ხარვეზი გამოსწორების ერთ-ერთ ძირითად გზად მიჩნეულია დენისა და ძაბვის უპტიკური გარდამსახებით ჩანაცვლება დენისა და ძაბვის

მზომი ტრანსფორმატორების მაგრამ ეს ყველაფერი დამოკიდებულია დიდ ფინანსურ დანახარჯებთან ამითომ მათი გამოყენება ჯერ არ ითვლება რენტაბელურად. მიუხედავად მსგავსი მზომი ტრანსფორმატორების მაღალი სიზუსტის კლასისა.

ენერჯის ხარისხის მონიტორინგი არის ნედლეულის შეგროვების, ანალიზისა და ინტერპრეტაციის პროცესი გაზომვის მონაცემები ასარგებლო ინფორმაციად. მონაცემების შეგროვების პროცესი ჩვეულებრივ ხორციელდება ძაბვისა და დენის უწყვეტი გაზომვა დიდი ხნის განმავლობაში. ანალიზის პროცესი და ინტერპრეტაცია ტრადიციულად შესრულდა ხელით, მაგრამ ბოლოდროინდელი მიღწევები სიგნალში დამუშავებისა და ხელოვნური ინტელექტის სფეროებმა შესაძლებელი გახადა დაპროექტება და განხორციელება ინტელექტუალური სისტემები, რომლებიც ავტომატურად აანალიზებენ და ინტერპრეტაციას უკეთებენ ნედლეულ მონაცემებს სასარგებლო ინფორმაციად მინიმალური ადამიანის ჩარევით. ენერჯის ხარისხის მონიტორინგის პროგრამები ხშირად გამოწვეულია გაუმჯობესების მოთხოვნით სისტემის ფართო სიმძლავრის ხარისხის შესრულება. ბევრ სამრეწველო და კომერციულ მომხმარებელს აქვს მოწყობილობა, რომელიც მგრძნობიარეა დენის დარღვევის მიმართ და, შესაბამისად, უფრო მნიშვნელოვანია გაიგეთ მიწოდებული ენერჯის ხარისხი. ამ საშუალებების მაგალითებია კომპიუტერი ქსელური და სატელეკომუნიკაციო საშუალებები, ნახევარგამტარებისა და ელექტრონიკის წარმოება ობიექტები, ბიოტექნოლოგიური და ფარმაცევტული ლაბორატორიები და ფინანსური მონაცემთა დამუშავების ცენტრები. აქედან გამომდინარე, ბოლო ათწლეულის განმავლობაში ბევრმა კომუნალურმა კომპანიამ დანერგა ენერჯის ფართო ხარისხი მონიტორინგის პროგრამები. ამიტომ ქვემოთ მოცემული კვლევა აღნიშნული წარმოდგენილი ხაზით.

## 2.1 ჰარმონიკები

იდეალურ შემთხვევაში ელექტრო სისტემაში შემავალი გენერატორები უზრუნველყოფენ 50/60 ჰერცი სიხშირის სინუსოიდური ძაბვის გენერაციას და ძლიერი დატვირთვის რეჟიმშიც კი, გენერატორში გამავალი დენის ფორმა არ



განსხვავდებოდეს სინუსოიდისაგან. 50/60 ჰც დაბვას ვუწოდებთ ძირითად შემდგენს ანუ ფუნდამენტურ (ძირითად) ჰარმონიკას.

ელექტრული მოწყობილობების უმრავლესობა მოქმედებს მკვებავი ცვლადი დაბვის განმეორებადი (პერიოდული) ბუნებიდან გამომდინარე. ასეთი მოწყობილობა შესაძლოა გამოიმუშავებდეს მკვებავი სინუსოიდური დაბვის ნულზე გადასვლასთან დაკავშირებულ სინქრონულ დროით სიგნალებს. 50/60 ჰც-იანი სისტემისათვის ცვლადი დაბვა და დენი ყოველ ნახევარ პერიოდში უნდა კვეთდეს ნულს. თუ ცვლადი დაბვის ან დენის სინუსოიდა ყოველ ნახევარ ციკლში ერთხელ არ გადაკვეთს ნულს მაშინ აღნიშნული მოწყობილობის ნორმალური ფუნქციონირება დიდი ალბათობით დაირღვევა. ელექტროსისტემა დაბვის ფუნდამენტალური ჰარმონიკის გარდა შეიცავს განსხვავებული სიხშირის მქონე კომპონენტებსაც. მეორე ნახაზზე ნაჩვენებია დამახინჯებული დაბვის ფორმა, რომლის მსგავსიც შეიძლება წარმოქმნას ნებისმიერ ელექტროსისტემაში [2].

იგი არა არის სუფთა სინუსოიდა და გააჩნია დამახინჯებული მონაკვეთები. მოცემულ შემთხვევაში დამახინჯებული სინუსოიდა ფუნდამენტური შემდგენის გარდა შეიცავს 50/60 ჰც-ისგან განსხვავებულ უფრო მაღალი რიგის შემდგენებს.

არსებობს კარგად დამუშავებული მეთოდი რომლის საშუალებითაც პერიოდული ფუნქციებისათვის შესაძლებელია შევისწავლოთ და განვსაზღვროთ მსგავსი ფუნქციების ჰარმონიკული შემადგენლობა. ამ მეთოდს ფურიეს ანალიზს ვუწოდებთ. მისი საშუალებით შესაძლებელია სხვადასხვა სიხშირის ჰარმონიკების რიგის (ნომრის) განსაზღვრა მაგალითად თუ გვაქვს ძირითადი 50 ჰც-იანი ჰარმონიკა და მასთან შერეული 100 ჰც-იანი ჰარმონიკა, მაშინ 100 ჰც-იან კომპონენტს ვუწოდებთ მეორე რიგის ჰარმონიკს. სახელწოდება გამომდინარეობს ფაქტიდან, რომ მისი სიხშირე მიღებული ძირითადი ჰარმონიკის სიხშირის 2-ზე გამრავლებით. ზოგადად დამახინჯებულ სინუსოიდაში შეიძლება არსებობდეს ნებისმიერი რიგის ჰარმონიკა რომლის სიხშირეც მიიღება ფუნდამენტალური სიხშირის რომელიმე ნატურალურ რიცხვზე გამრავლებით. მაგალითად დამახინჯებულ სინუსოიდაში ხშირად არსებობს საკმაოდ ხშირი მესამე რიგის ჰარმონიკა (150 ჰც), მაგრამ არის შემთხვევები როდესაც იგი შეიცავს სხვა ნებისმიერი რიგის ჰარმონიკებსაც [2,3].

ჰარმონიკები კლასიფიცირდებიან შემდეგ ნაწილებად:

1. ინდივიდუალური ჰარმონიკები წარმოადგენს ნომინალურზე (50/60 ჰც) მეტი სიხშირის მქონე კომპონენტებს. ისინი იყოფიან კენტი და ლუწი რიგის ჰარმონიკებად. როგორც წესი მათი სიხშირე გამოითვლება ინდივიდუალური ჰარმონიკის რიგისა და ნომინალური სიხშირის ნამრავლით. მაგ. მეორე რიგის ჰარმონიკს აქვს 100ჰც სიხშირე, მესამე რიგისას 150 ჰც და ა. შ.

2. ჰარმონიკული გავლენით სინუსოიდური ტალღის დამახინჯების ხარისხის განსაზღვრისათვის გამოიყენება კოეფიციენტი, რომელსაც ჯამური დამახინჯების კოეფიციენტს, THD(Total Harmonic Distortions) ვუწოდებთ. იგი გამოითვლება მრუდში შემავალი მაღალი რიგის ჰარმონიკების ამპლიტუდების კვადრატების ჯამიდან კვადრატული ფესვის შეფარდებით ფუნდამენტალური შემადგენლობის ჰარმონიკასთან [8,9].

$$THD = \frac{\sqrt{f_2^2 + f_3^2 + f_4^2 + \dots + f_n^2}}{f_1}$$

3. ინტერჰარმონიკები წარმოადგენს ჰარმონიკულ დამახინჯებებს, რომლებსაც გააჩნიათ არამთელი 1-ზე მეტი ინდივიდუალური რიგი. შესაბამისად მათი სიხშირე არაკანონზომიერია და შეიძლება იყოს 70, 80, 130 ჰც და ა. შ.

4. საბჰარმონიკები წარმოადგენს ჰარმონიკულ დამახინჯებას, რომელთა ინდივიდუალური რიგი მოთავსებულია 0-დან 1-მდე შუალედში. შესაბამისად საბჰარმონიკების სიხშირე მოთავსებულია (50 ჰც ნომინალური სიხშირის დროს) 0 ჰც-დან 50 ჰც-მდე.

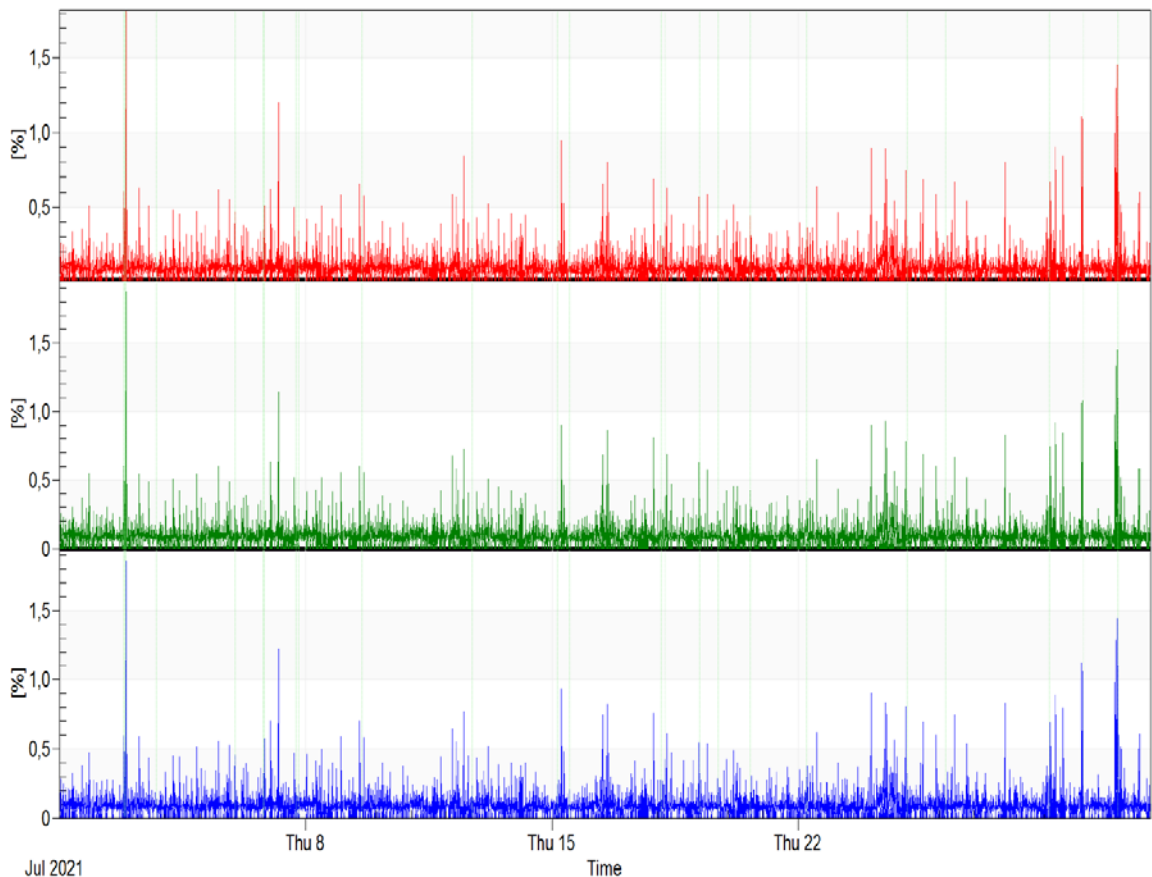
ყველა ზემოთ ჩამოთვლილი ჰარმონიკული დამახინჯება დამახასიათებელია როგორც დენის აგრეთვე ძაბვის სინუსოიდებისათვის. მათი ძირითადი გავლენა ელექტრული ენერჯის ხარისხზე არის ნომინალური სიხშირისაგან (50/60 ჰც) განსხვავებული კომპონენტების არსებობა, რომლებიც ცვლადი დენისა და ძაბვის სინუსოიდების ფორმირების დამახინჯებას იწვევს [8,9].

### 2.1.1 ინტერჰარმონიკები

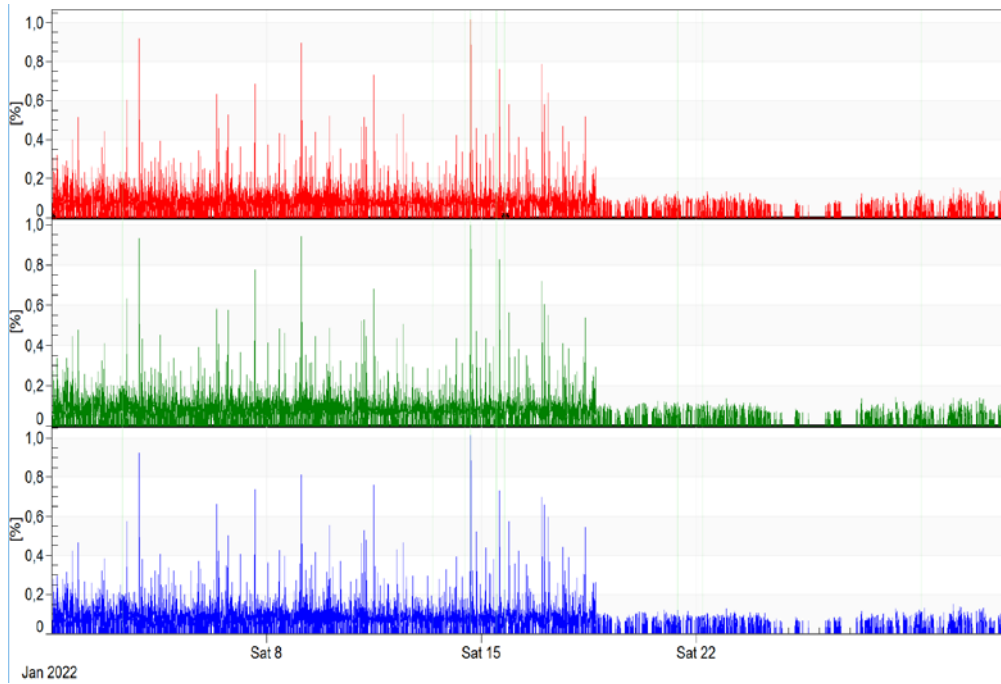
საქართველოში მოქმედი „ქსელის წესები“-თ ელექტრომომარაგების ქსელში ინტერჰარმონიკული დამახინჯების ნორმები განსაზღვრული არ არის. ინტერჰარმონიკები წარმოადგენს არასრული რიგის ჰარმონიკებს. ქვემოთ

მოცემულ დიაგრამებზე წარმოდგენილია საკვლევ ქვესადგურებში ძაბვის ინტერჰარმონიკული დამახინჯებების (პირველი 50 რიგი (25, 75,...2425, 2475 ჰც)) საშუალო მნიშვნელობები პროცენტებში ფუნდამენტური რიგის (50 ჰც) ჰარმონიკის მიმართ [10].

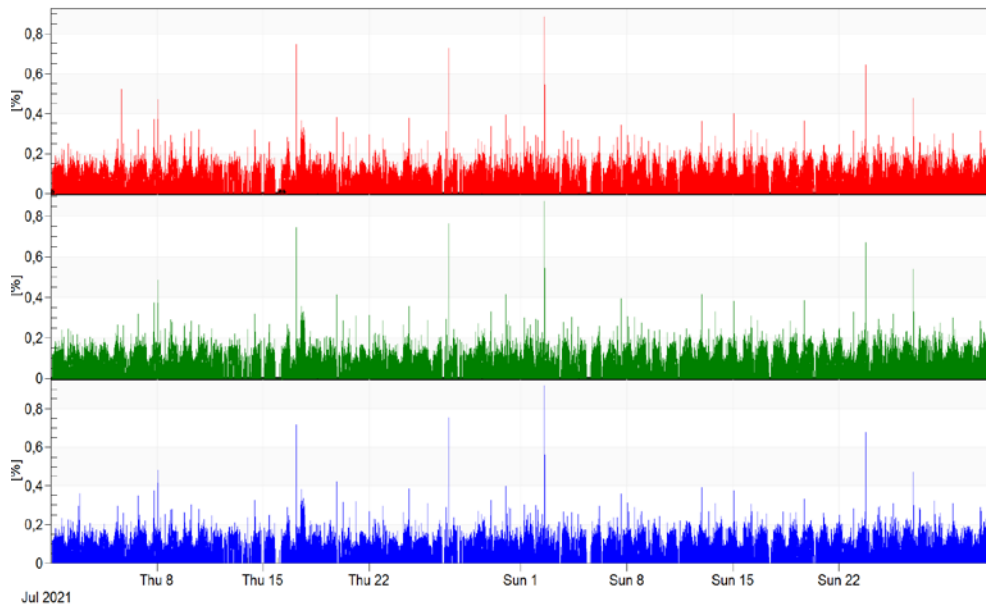
დიაგრამების მიხედვით ჩანს, რომ A ქვესადგურში ინტერჰარმონიკების დონე განსხვავებულია იანვრისას და ივლისის თვეებს შორის. ივლისის თვეში შედარებით მაღალია და 1.5% უახლოვდება. მიუხედავად იმისა რომ საქართველოს ქსელის წესების მიხედვით არ გვაქვს განსაზღვრული ინტერჰარმონიკები საერთაშორისო სტანდარტებით მისი ნომინალური მნიშვნელობა დასაძვებია 1%-მდე. ამ კონკრეტულ შემთხვევაში კი მცირედით გვაქვს გადახრა ზაფხულის სეზონზე, მაგრამ ასეთი მნიშვნელობა დასაძვებია რადგან არ ცდება გაზომვებიდს ჩატარების პერიოდის 5 პროცენტთან ზღვარს.



ნახ. 3. ძაბვის ინტერჰარმონიკული დამახინჯება A ქვესადგურში ფაზების მიხედვით 2021 წლის ივლისის თვეში



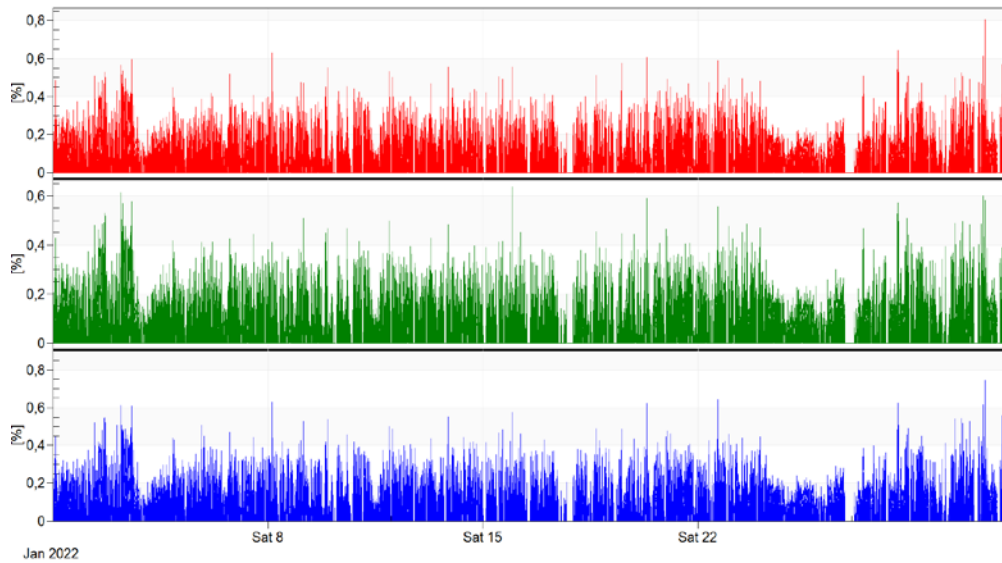
ნახ. 4. ძაბვის ინტერჰარმონიკული დამახინჯება A ქვესადგურში ფაზების მიხედვით 2022 წლის იანვრის თვეში



ნახ. 5. ძაბვის ინტერჰარმონიკული დამახინჯება B ქვესადგურში ფაზების მიხედვით 2021 წლის ივლისის თვეში

ამ შემთხვევაში ძაბვის ინტერჰარმონიკული დამახინჯება B ქვესადგურში ფაზების მიხედვით 2021 წლის ივლისის თვეში არის ძალიან მცირე და არ ხდება

განსაზღვრული ნორმების გადაჭარბება დარღვევა შესაბამისად შეგვიძლია მისი მნიშვნელობა ვუგულვებლყოთ.



**ნახ. 6. ძაბვის ინტერჰარმონიკული დამახინჯება B ქვესადგურში ფაზების მიხედვით 2022 წლის იანვრის თვეში**

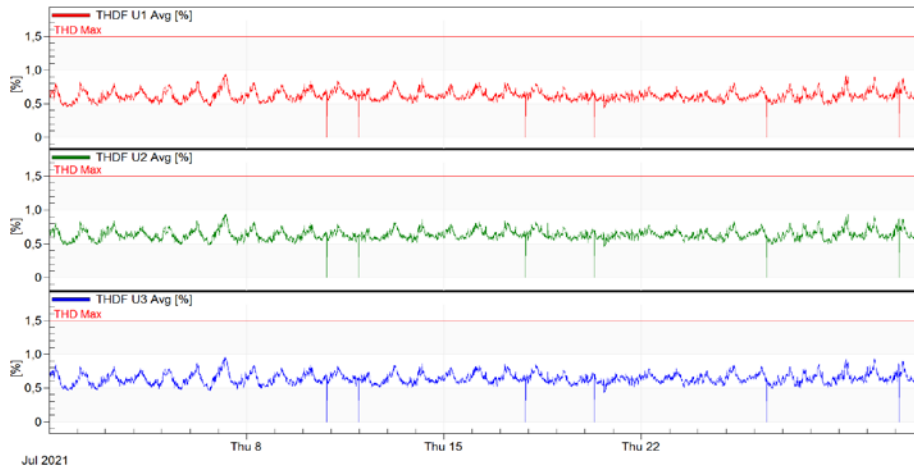
B ქვესადგურში არცერთ სეზონზე არ გვხვდება ინტერჰარმონიკული სპექტრის 1% ნომინალური ზღვრის გადაჭარბება შესაბამისად ამ შემთხვევაში ნორმის ფარგლებშია. ნახაზებზე 3,4,5 და 6 მოყვანილი დიაგრამების მიხედვით შეგვიძლია ვიგულისხმოთ რომ ძაბვის ინტერჰარმონიკული დამახინჯების დონე საკვლევ ქვესადგურებში საკმაოდ მცირეა. EN 50160 სტანდარტის გათვალისწინებით ჯერ-ჯერობით პარამეტრი ზის ნომინალური ნორმების ფარგლებში და არ საჭიროებს დამატებითი მაკონტროლებელი ღონისძიებების ჩატარებას.

### 2.1.2 ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება (THD)

საქართველოს ტერიტორიაზე მოქმედი „ქსელის წესები“-ს მიხედვით ძაბვის ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯების მაქსიმალურ ზღვარს წარმოადგენს 1,5 პროცენტი. დენის შემთხვევაში არ არის განსაზღვრული. სტანდარტ EN 50160-ის მიხედვით ძაბვის ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯების მაქსიმალურ ზღვარს

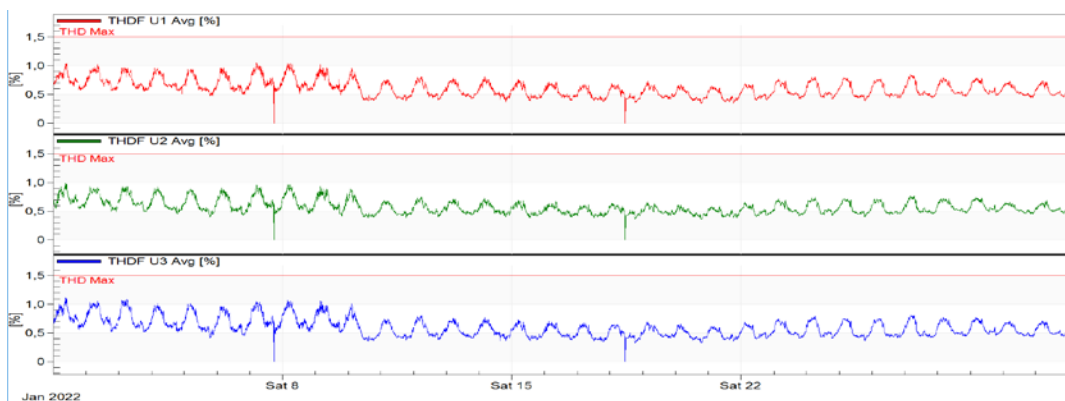
წარმოადგენს 8 პროცენტი ხოლო დენის შემთხვევაში ეს ზღვარი 50 პროცენტია [4, 13].

წარმოდგენილ ნახაზებზე 7,8,9 და 10 მოცემულია დენისა და ძაბვის ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯებების საშუალო მნიშვნელობები პროცენტებში ყველა ქვესადგურში ფაზების მიხედვით. ჯამურ ჰარმონიკულ დამახინჯებას საკვლევ ქვესადგურებში აქვს შემდეგი სახე:



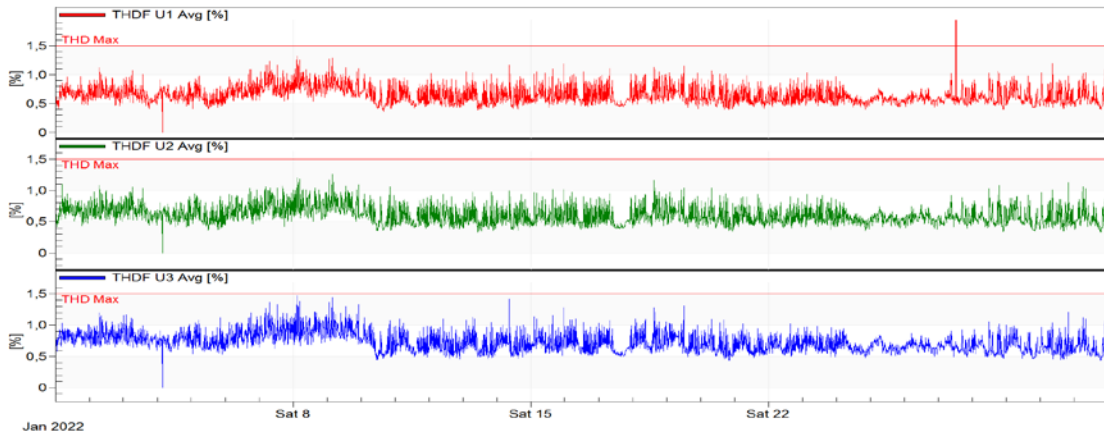
**ნახ. 7. ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება A ქვესადგურში ფაზების მიხედვით 2021 წლის ივლისის თვეში**

ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება A ქვესადგურში 2021 წლის ივლისის თვეში ჯდება საქართველოს ტერიტორიაზე მოქმედი „ქსელის წესები“-თ განსაზღვრულ ნორმებში. რაც შესაბამისად გამორიცხავს ქსელში მთლიანი ჰარმონიკულის სპექტრის სიმცირეს.



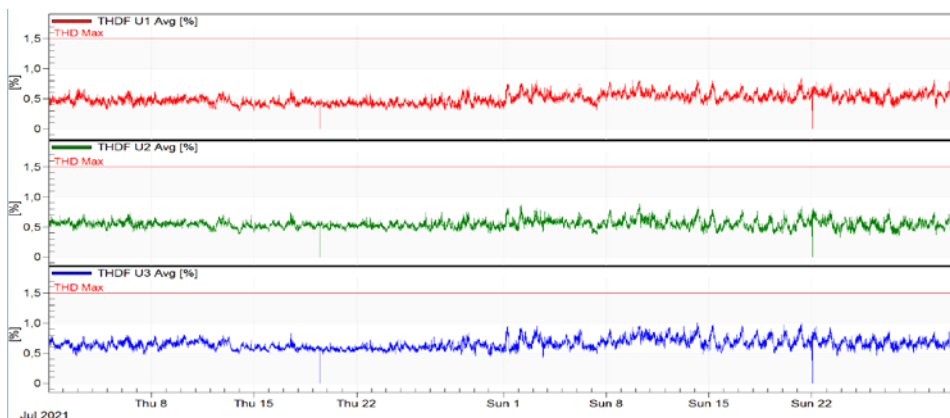
**ნახ. 8. ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება A ქვესადგურში ფაზების მიხედვით 2022 წლის იანვრის თვეში**

შესაბამისად A ქვესადგურში 2021 წლის ივლისისა და 2022 წლის იანვრის თვეების განმავლობაში არ გამოვლენის ჯამური ჰარმონიკული დარღვევა მაგრამ უნდა აღი იშნოს რომ იანვრის თეში ანუ ზამთრის პიკური მომარების დროს ქსელში მცირედით (დაახლოებით 0.1) მაინც მოიმატა პარამეტრის დაბინძურების დონემ.



ნახ. 9. ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება B ქვესადგურში ფაზების მიხედვით 2021 წლის ივლისის თვეში

B ქვესადგურში ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება 2022 წლის იანვრის თვეში ჯდება საქართველოს ტერიტორიაზე მოქმედი „ქსელის წესები“-თ განსაზღვრულ ნორმებში.



ნახ. 10. ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება B ქვესადგურში ფაზების მიხედვით 2022 წლის იანვრის თვეში

შესაბამისად B ქვესადგურში 2021 წლის ივლისისა და 2022 წლის იანვრის თვეების განმავლობაში ჯამური ჰარმონიკული დარღვევა მცირედით განსხვავდება ერთმანეთისაგან, მაგრამ უნდა აღინიშნოს რომ B ქვესადგურში იანვრის თვეში ანუ ზამთრის პიკური მომარების დროს ქსელში მცირედით (დაახლოებით 0.1) მაინც დაიკლო პარამეტრის დაბინძურების დონემ.

წარმოდგენილი დიაგრამების მიხედვით შეგვიძლია ვთქვათ რომ ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯების დონე საკვლევ ქვესადგურებში ჯდება ნორმის ფარგლებში არ შეიმძნევა ზღვრული ნორმების დარღვევები რომლების მოთხოვნილია საქართველოს ეროვნული მარეგულირებელი კომისის „ქსელის წესები“-ს წესების მიხედვით. შესაბამისად აღნიშნული არ წარმოადგენს სტანდარტ EN 50160-ის მოთხოვნების დარღვევასაც.

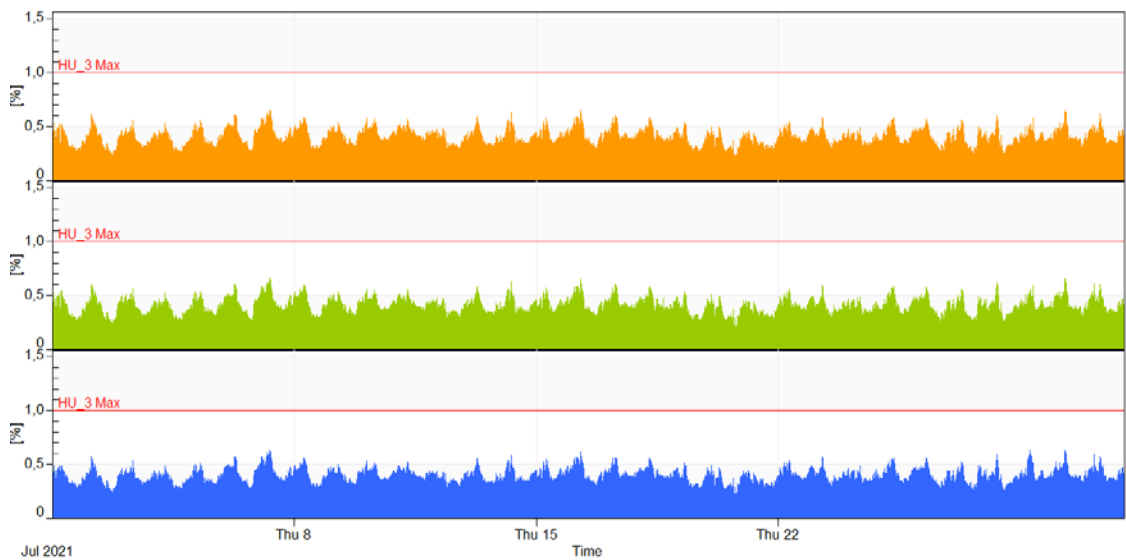
### 2.1.3 რიგობრივი ჰარმონიკები

ქვემოთ მოცემულ დიაგრამებზე წარმოდგენილია დენისა და ძაბვის რიგობრივი ჰარმონიკების სრული სპექტრი. ექსპერიმენტის პერიოდის განმავლობაში დაფიქსირებული რიგობრივი ჰარმონიკები. თითოეულ დიაგრამაზე დატანილია დენისა და ძაბვის 50 რიგის ჰარმონიკა ფაზების მიხედვით (შესაბამისად დიაგრამების პირველი სტრიქონი წარმოადგენს ა ფაზას, მეორე სტრიქონი ბ ფაზას და მესამე სტრიქონი ც ფაზას) პროცენტებში პირველი რიგის (50ჰც) შემდგენის მიმართ.

საქართველოს ტერიტორიაზე მოქმედი „ქსელის წესები“-ს მიხედვით ძაბვის რიგობრივი ჰარმონიკული დამახინჯების მაქსიმალურ ზღვარს წარმოადგენს 1 პროცენტი. დენის შემთხვევაში არ არის განსაზღვრული. სტანდარტ EN 50160-ის მიხედვით ძაბვისა და დენის რიგობრივი ჰარმონიკული დამახინჯებების მაქსიმალურ ზღვარი განსაზღვრულია თითოეული რიგიდან გამოდინარე და შესაბამისად თითქმის ყველა მათგანს გააჩნია განსხვავებული მნიშვნელობა.

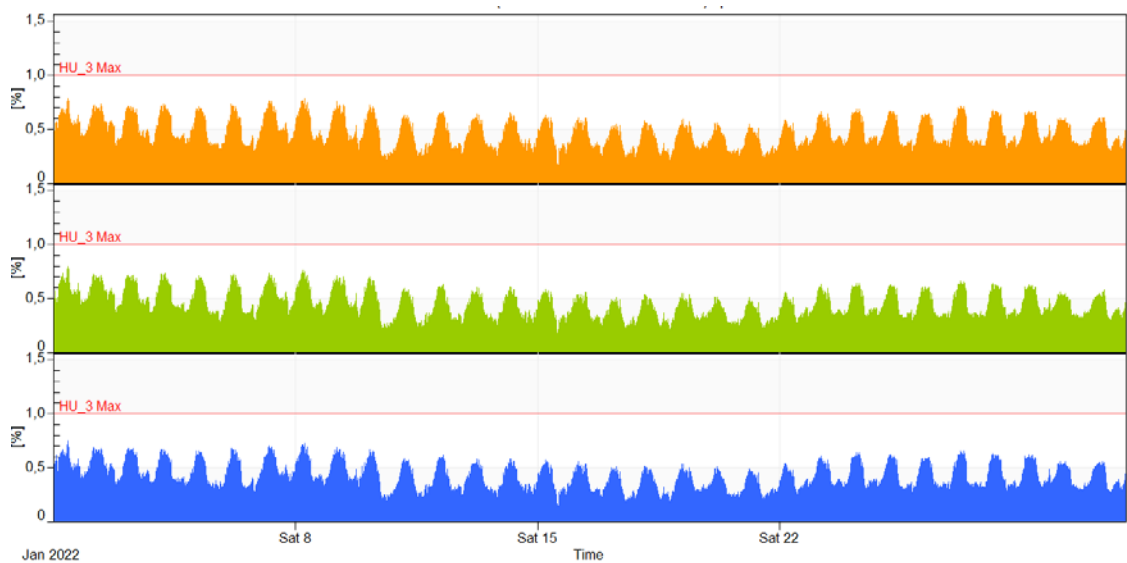
ნახაზებზე 11, 12, 13 და 14 წარმოდგენილ დიაგრამებზე დატანილია საქართველოს ქსელის წესების მიხედვით განსაზღვრული ზღვარი. რიგობრივი ჰარმონიკული სპექტრი:





ნახ. 11. ძაბვის რიგობრივი ჰარმონიკების სპექტრი A ქვესადგურში ივლისის თვეში

ნახაზ 11-ზე წარმოდგენილია რიგობრივი კენტი და ლუწი რიგის ჰარმონიკების სრული სპექტრი. 1-ლი დან 50 რიგის ჩათვლით, რომელიც დაყოფილია ფაზების მიხედვით. დიაგრამებზე ასევე ასახულია საქართველოს „ქსელის წესების“ მოთხოვნების მიხედვით გასაზღვრული ნორმა რომელიც წარმოადგენს 1%. როგორც დიაგრამა გვაჩვენებს ამ შემთხვევაში ელექტრული ენერჯის ხარისხის ერთ-ერთი პარამეტრის რიგობრივი ჰარმონიკების სპექტრის გადაჭატბება არ შეინიშნება.

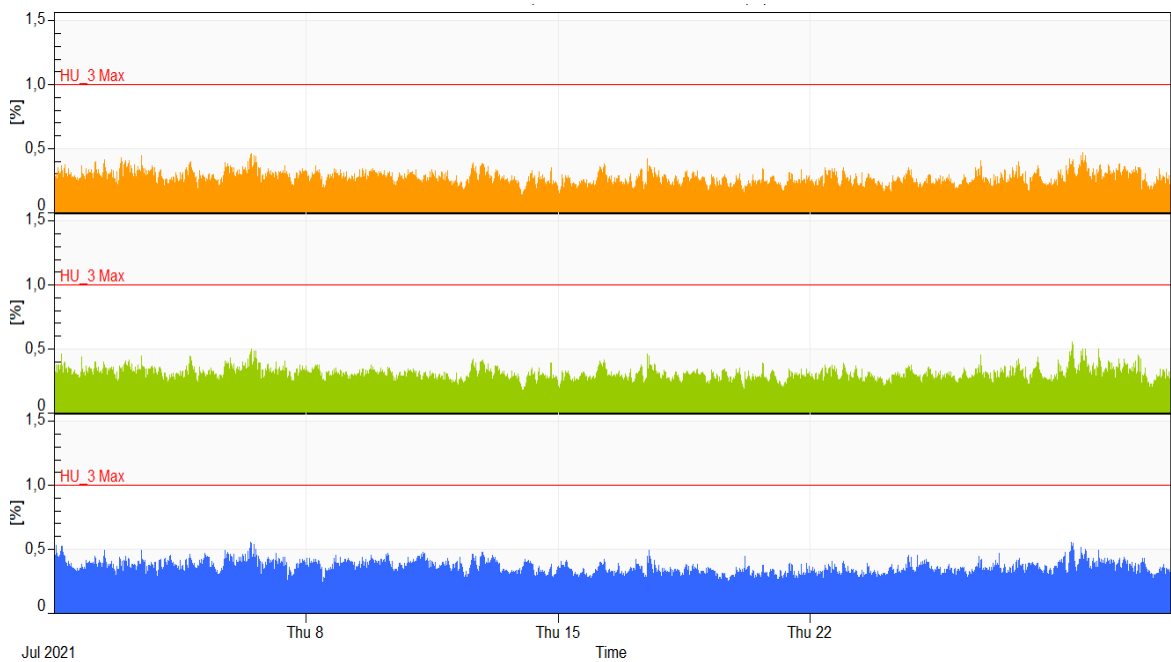


ნახ. 12. ძაბვის რიგობრივი ჰარმონიკების სპექტრი A ქვესადგურში იანვრის თვეში

ნახაზ 12-ზე ასახული ძაბვის რიგობრივი კენტი და ლუწი რიგის ჰარმონიკების სრული სპექტრი იანვრის თვეში . რომელიც დაყოფილია ფაზების მიხედვით. დიაგრამაზე ასევე ასახულის საქართველოს „ქსელის წესების“ მოთხოვნების მიხედვით გასაზღვრული ნორმა რომელიც წარმოადგენს 1%. როგორც დიაგრამა გვაჩვენებს ამ შემთხვევაში ელექტრული ენერჯის ხარისხის ერთ-ერთი პარამეტრის რიგობრივი ჰარმონიკების სპექტრის გადაჭატება არ შეინიშნება.

B ქვესადგურის დენისა და ძაბვის ჰარმონიკული სპექტრი.

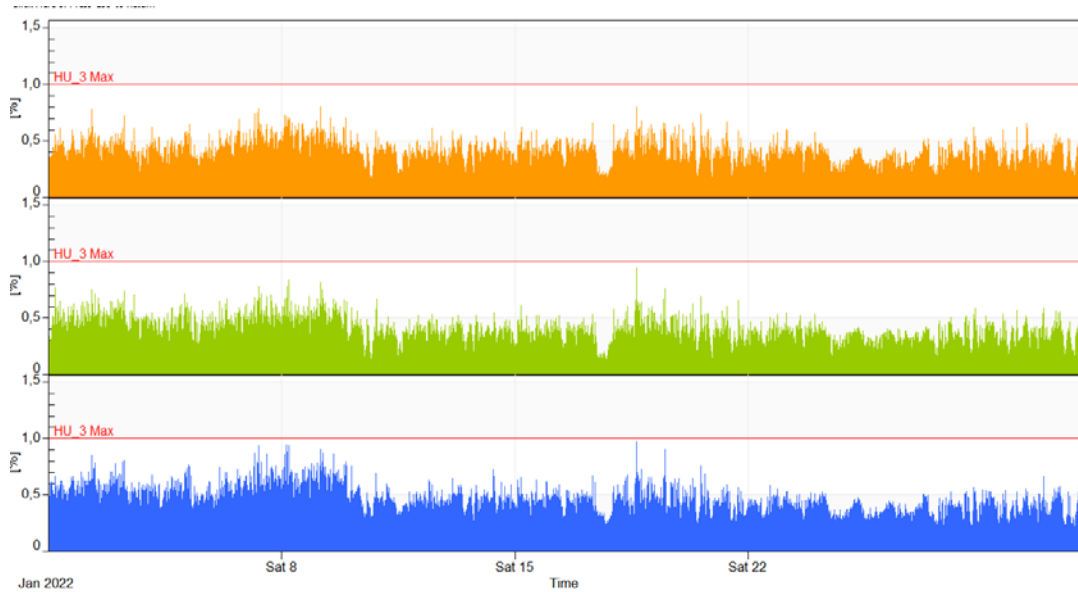
ძაბვის რიგობრივ ჰარმონიკული დამახინჯების სპექტრს B ქვესადგურში ივლისის თვეში აქვს ზემოთ წარმოდგენილი სტრუქტურა რომელიც მისახებია ელექტრული ენერჯის ხარისხის კონტროლის პრიციპებისათვის.



**ნახ. 13.** ძაბვის რიგობრივი ჰარმონიკული სპექტრი B ქვესადგურში ივლისის თვეში

ნახაზ 13-ზე ნაჩვენებია კენტი და ლუწი რიგის ჰარმონიკების სრული სპექტრი. რომელიც დაყოფილია ფაზების მიხედვით. დიაგრამაზე ასევე ასახულის საქართველოს „ქსელის წესების“ მოთხოვნების მიხედვით გასაზღვრული ნორმა რომელიც წარმოადგენს 1%. როგორც დიაგრამა გვაჩვენებს ამ შემთხვევაში

ელექტრული ენერჯის ხარისხის ერთ-ერთი პარამეტრის რიგობრივი ჰარმონიკების სპექტრის გადაჭატება არ შეინიშნება.



ნახ. 14. ძაბვის რიგობრივი ჰარმონიკული სპექტრი B ქვესადგურში იანვრის თვეში

B ქვესადგურში 110 კვ ძაბვაზე ჰარმონიკული სპექტრის ძირითად ნაწილს წარმოადგენს მე-3, მე-5, მე-7 და მე-11 რიგის ჰარმონიკები, მაგრამ იგი არ წარმოადგენს ჰარმონიკული სპექტრის ნორმიდან გადახვევას.

## 2.2 ძაბვის უბალანსობა

ძაბვის უბალანსობა (ან დისბალანსი) განისაზღვრება (IEEE- ს მიერ), როგორც უარყოფითი ან ნულოვანი მიმდევრობის კომპონენტის თანაფარდობა დადებითი მიმდევრობის კომპონენტის მიმართ. მარტივი თვალსაზრისით, ეს არის ძაბვის ცვალებადობა ელექტრო სისტემაში, სადაც ძაბვის სიდიდე ან ფაზური ძვრის კუთხეები არ არის თანაბარი. აქედან გამომდინარე აღნიშნული ელექტრული ენერჯის ხარისხის პრობლემა მრავალფაზურ სისტემებში (მაგალითად სამფაზა სისტემებში). ძაბვები იშვიათად არის ზუსტად დაბალანსებული ფაზებს შორის. თუმცა, როდესაც ძაბვის უბალანსობა გადაჭარბებულია, მას შეუძლია შექმნას პრობლემები მრავალფაზიანი ძრავებისთვის და სხვა დატვირთვებისთვის. უფრო მეტიც, რეგულირებად სიჩქარიანი ძრავები (ASD) შეიძლება უფრო მგრძობიარე იყოს, ვიდრე

სტანდარტული ძრავები. ძაბვის უბალანსობა უპირველეს ყოვლისა განაპირობებულია დისტრიბუციის ხაზებზე ან არასიმეტრიული მომხმარებლების უთანასწორო ტვირთების გამო. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, ელექტროსისტემაში უარყოფითი ან ნულოვანი მიმდევრობის ძაბვებს იწვევს არათანაბარი დატვირთვა უარყოფითი ან ნულოვანი მიმდევრობის დენების დინების გამო.

ძაბვის დისბალანსი შეიძლება გამოიწვიოს სამფაზა ქსელში სხვადასხვა ფაზაზე დატვირთვის არათანაბარმა განაწილებამ. აგრეთვე ელექტროსისტემაზე მიერთებული ძრავები შეიძლება თავად გახდნენ ძაბვის უბალანსობის წყარო. აქტიური და ინდუქტიური დატვირთვების უბალანსობა ელექტრო ძრავის აღჭურვილობაში იწვევს დენისა და ძაბვის უბალანსობას. ელექტრო ძრავების წრედში, მომჭერებზე ან სტატორისა და როტორის გრაგნილებში, შეიძლება დეფექტები გამოიწვიოს ფაზებში უბალანსობის პირობებმა.

უბალანსო სისტემები მიუთითებენ უარყოფითი (უკუ) მიმდევრობის არსებობას, რაც საზიანოა მრავალფაზა დატვირთვებისთვის, განსაკუთრებით სამფაზა მანქანებისათვის. ძირითად ეფექტს წარმოადგენს ელექტრო მოწყობილობების (ძირითადად მბრუნავი მანქანების) გადახურებით დაზიანება. ძაბვის უბალანსობას შეუძლია შექმნას დენის უბალანსობა თავისზე 6-10-ჯერ დიდი. თავის მხრივ, დენის უბალანსობა იწვევს ელექტრო ძრავების გრაგნილებზე გადახურებას, რომელიც ამცირებს იზოლაციას, შედეგად ვიღებთ მოწყობილობების ნაადრევ დაბერებას და მუდმივ დაზიანებას. ქვემოთ მოცემულ გრაფაში გვიჩვენებს ძაბვის უბალანსობისა და ტემპერატურის ზრდის ურთიერთდამოკიდებულებას.

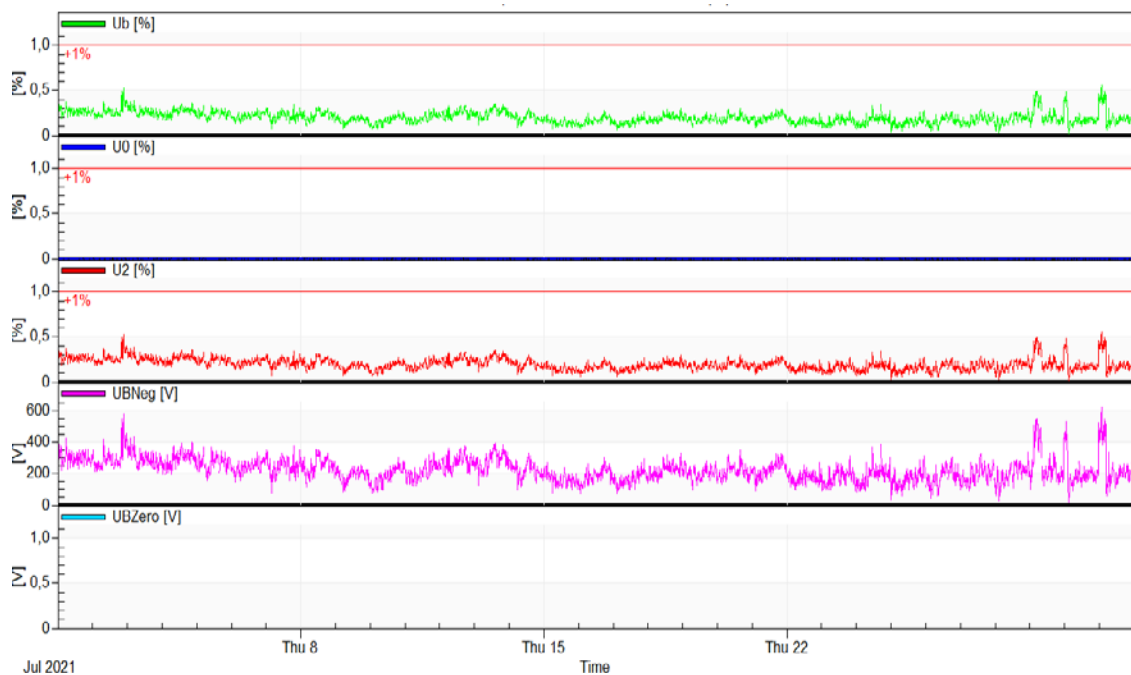
ძაბვის უბალანსობა შეიძლება განისაზღვროს, როგორც სამი ფაზის საშუალო ძაბვის მაქსიმალური გადახრა ფაზების მნიშვნელობებისგან, შეფარდებული სამი ფაზის ძაბვის საშუალო მნიშვნელობასთან, პროცენტებში.

$$U_{\text{უბ.}} = \frac{U_{\text{max/min}} - (U_A + U_B + U_C/3)}{U_A + U_B + U_C/3} * 100\%$$

ელექტრული ენერჯის ხარისხის კონტროლის სტანდარტებისა და აგრეთვე საქართველოს ტერიტორიაზე „ქსელის წესები“-ს მიხედვით

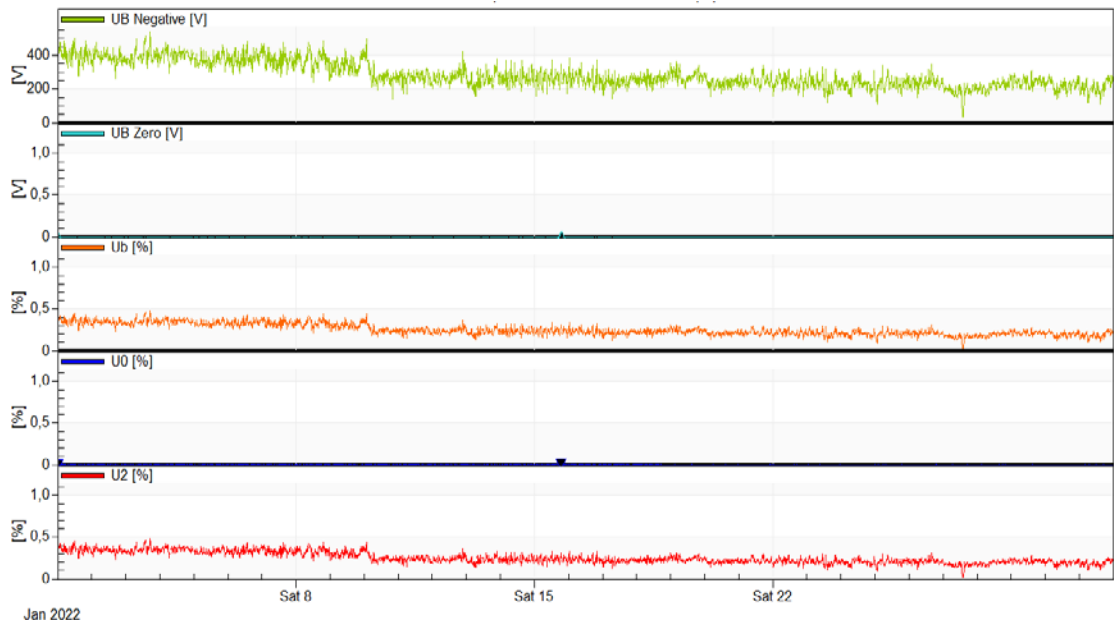
ელექტრომომარაგების ქსელში ძაბვის უზღვევითობის ზღვარს, ანუ ნულოვანი და უკუ მიმდევრობის ძაბვის შემდგენების სიდიდეს წარმოადგენს ძაბვის პირდაპირი შემდგენის 1% [11, 14, 17, 19].

ნახაზებზე 15, 16, 17 და 18 ასახულია A, B ქვესადგურებში არსებული ძაბვის უზღვევითობის სრული სახე. ნახაზები დალაგებულია ქვესადგურების ჩამონათვლის შესაბამისად. გრაფიკის პირველ სტრიქონში ასახულია ძაბვის უკუ და ნულოვანი შემდგენების საშუალო და მაქსიმალური მნიშვნელობები პროცენტებში პირდაპირი შემდგენის მიმართ. გრაფიკის მეორე და მესამე სტრიქონში მოიცავს ძაბვის დადებით, უარყოფით და ნულოვანი მიმდევრობების შესაბამისად საშუალო და მაქსიმალურ მნიშვნელობებს. გრაფიკის მეოთხე სტრიქონში ასახულია ძაბვის დადებით, უარყოფით და ნულოვანი მიმდევრობების ძვრის კუთხეები გრადუსებში.



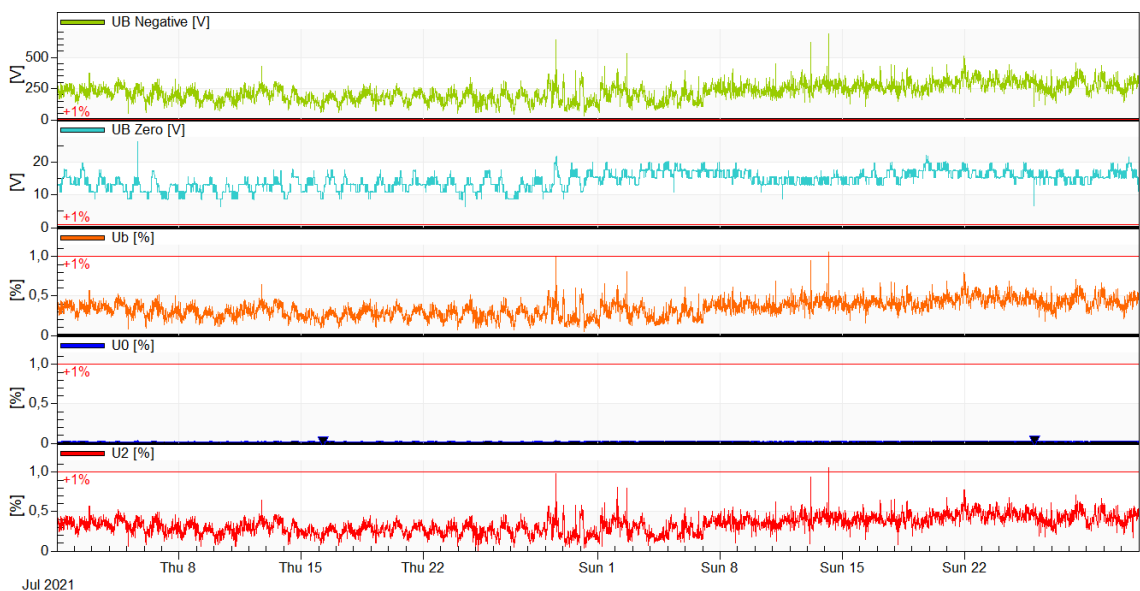
**ნახ. 15. ძაბვის უზღვევითობის სრული სახე A ქვესადგურში ივლისის თვეში**

ძაბვის უზღვევითობის სრული სახე A ქვესადგურში ივლისის თვეში წარმოდგენილია ნახაზ 15-ზე. დიაგრამაზე დატანილია აგრეთვე პროცენტული ზღვარი და შეგვიძლია დავინახოთ, რომ ძაბვის უზღვევითობს პროცენტული დონე არ ცვდება მას.



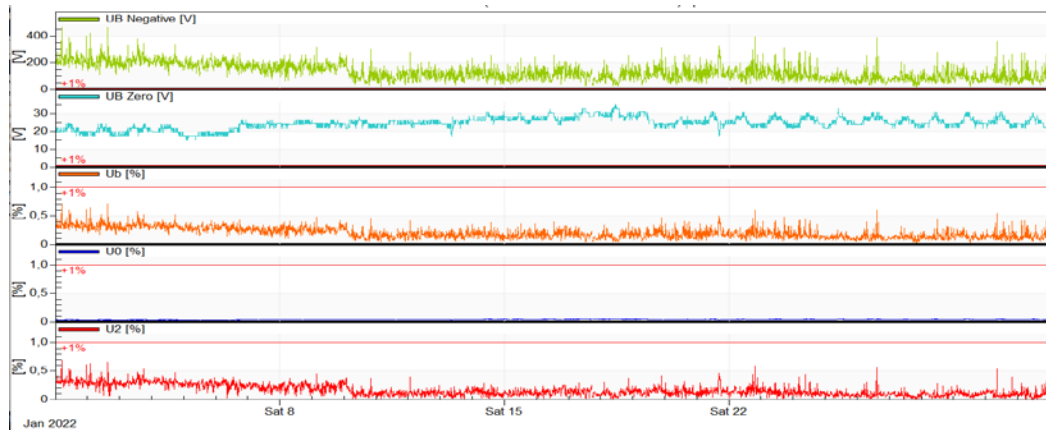
ნახ. 16. ძაბვის უბალანსობის სრული სახე A ქვესადგურში იანვრის თვეში

ნახაზებზე 15 და 16 გამოსახული დიაგრამები გვაჩვენებს რომ ძაბვის უბალანსობის სრული სახე A ქვესადგურში 2022 წლის იანვრისა და 2021 წლის ივლისის თვეებში არ იჩენდა თავს. შესაბამისად აღნიშნული პიკები ამ კუთხით გავლილია დარღვევების გარეშე.



ნახ. 17. ძაბვის უბალანსობის სრული სახე B ქვესადგურში ივლისის თვეში

ნახაზ 18-ის დიაგრამაზე ჩანს პროცენტული ზღვარი და შეგვიძლია დავინახოთ, რომ ძაბვის უბალანსობს პროცენტული დონე არ ცვდება ნორმირებულ ფარგლებს. ძაბვის უბალანსობის სრული სახე B ქვესადგურში ივლისის თვეში წარმოდგენილია ნახაზზე.



**ნახ. 18. ძაბვის უბალანსობის სრული სახე B ქვესადგურში იანვრის თვეში**

გრაფიკებიდან გამომდინარე ძაბვის უბალანსობის ზღვრების დაღვევები არ გვხვდება მხოლოდ A და B ქვესადგურებში 110 კვ ძაბვის საფეხურზე. აღნიშნული დარღვევები ძირითადად დამოკიდებულია ქვესადგურის მომხმარებლის სპეციფიკურობაზე. შესაბამისად სიმცირის გამო ვერ ახდენს გავლენას მთლიან ქსელზე. ამიტომ შეგვიძლია ვთქვათ რომ ძაბვის უბალანსობის დონე საკვლევ ქვესადგურებში ჯდება ნორმის ფარგლებში არ შეიმძნევა ზღვრული ნორმების დარღვევები რომლების მოთხოვნილია საქართველოს ეროვნული მარეგულირებელი კომისის „ქსელის წესები“-ს წესების მიხედვით. შესაბამისად აღნიშნული არ წარმოადგენს სტანდარტ EN 50160-ის მოთხოვნების დარღვევასაც.

დაუბალანსებელი ძაბვები ნიშნავს, რომ 3 ფაზიანი სისტემის ძაბვები განსხვავებულია ან სიდიდით ან ფაზური სხვაობით, როდესაც სხვაობა ორ ფაზას შორის არ არის იგივე, ანუ 120 გრადუსისგან განსხვავებული. დატვირთვების არათანაბარი განაწილება 3 ფაზიან სისტემაში არის ენერგოსისტემებში ძაბვის დისბალანსის ძირითადი მიზეზი. ასეთმა დაუბალანსებელმა ძაბვამ შეიძლება გამოიწვიოს ელექტრომოწყობილობის დაზიანება.

### 2.3 სინათლის ციმციმი (Flicker PST; PLT;)

ელექტრო და ელექტრონიკის ინჟინერთა ინსტიტუტის აღწერით ძაბვის ხშირი გადაბმული რხევათა სერია ზღვრული მნიშვნელობებიდან, როდესაც ძაბვის ცვალებადობა მერყეობს ნომინალური ძაბვის 0,1%-დან და 7%-მდე 25 ჰც-ზე ნაკლები სიხშირით. არსებითად შეიძლება განისაზღვროს ყველაზე მნიშვნელოვან ელექტრული ენერჯის ხარისხის პრობლემად სხვადასხვა განათების წყაროების სინათლის გამომუშავებისას. რომელსაც ეწოდება ციმციმი. ზოგადად შეგვიძლია აღვწეროთ როგორც გამოხატულება ვიზუალური აღქმის არასტაბილურობის, განხორციელებული სინათლის წყაროს ცვალებადი, ციმციმისებური ნათების ზეგავლენით, რომლის სიკაშკაშეც დროთა განმავლობაში იცვლება.

მიუხედავად იმისა, რომ ძაბვის რხევა და ციმციმი განსხვავებული ცნებებია ისინი მაინც მჭიდროდ არიან დაკავშირებული ერთმანეთთან. ხშირად ხდება მათი ერთმანეთში არევა, შესაბამისად ხშირად გვხვდება ტერმინი ძაბვის ციმციმი (voltage flicker), რომელიც გაუმართლებელია. საქმე იმაშია, რომ ციმციმი წარმოიქმნება ძაბვის რხევის გავლენისგან და ვლინდება სინათლის ინტენსივობაში, გამომდინარე დიდი დატვირთვებისგან, რომელიც იცვლება აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრეების მოთხოვნით. რეალურად ძაბვის ცვალებადობა მინიმუმ 0,5% შემთხვევაშიც შეძლებს გამოიწვიოს საგრძნობ, შესამჩნევ სინათლის ციმციმს თუ ცვალებადობის სიხშირე მერყეობს 6 ჰც-დან 8 ჰც-მდე. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ ძაბვის რხევა არის ელექტრული ენერჯის სისტემის მომხმარებლების დატვირთვების სწრაფის ცვლილება. მეორეს მხრივ სინათლის ციმციმი წარმოადგენს განათების სისტემის რეაქციას, რომელიც ზემოქმედებს და აღქმადია ადამიანის თვალისათვის. მეტიც საერთაშორისო სტანდარტების შემუშავება მოხდა ძაბვის რხევაზე რომელიც ეფუძნება განათების პოტენციურ ეფექტებს და ადამიანის აღქმას განათების ცვლილებისას [6,7].

ამჟამად, ძირითადი პარამეტრები რომლებიც განსაზღვრავს სინათლის ციმციმს არის მოკლევადიანი ციმციმი, რომელიც მოიცავს 10 წუთიანი გაზომვების ანალიზს (PST) და გრძელვადიანი ციმციმი, რომელიც მოიცავს 60 წუთიანი გაზომვების ანალიზს (PLT). ეს პარამეტრები გულისხმობს ძაბვის რხევის ეფექტს განათებაზე და მის გავლენას ადამიანის მხედველობაზე.



სინათლის ციმციმის გაზომვები პირველ რიგში შეესაბამება მიწოდების ხარისხის შეფასებას, შედარებით არსებული ციმციმის დონის გაზომვის წერტილში საერთაშორისო სატანდარტებისათვის. ხოლო მეორე გაზომვას წარმოადგენს მოწყობილობების სავარაუდო ზეგავლენის გაზომვა და განსაზღვრა მათ ბაზარზე გატანამდე.

წარმოშობის მიზეზები:

აღჭურვილობები და მოწყობილობები, რომლებიც წარმოადგენენ მკვეთრად ცვლადი დატვირთვის დენის მომხმარებლებს (ძირითადად რეაქტიული კომპონენტებში) შეუძლიათ გამოიწვიონ ძაბვის რხევები და სინათლის ციმციმი. ჩვეულებრივ მსგავს დატვირთვებს გააჩნიათ ცვლილების მაღალი მაჩვენებელი. ასეთ მომხმარებლებს წარმოადგენს:

1. ელექტრო რკალური ღუმელები;
2. უძრავი (სტატიკური) სიხშირის კონვერტორები;
3. ციკლოკონვერტორები;
4. ქარის ელექტროსადგურები;
5. მძლავრი ძრავები.

ანალოგიურად მცირე მომხმარებლებმაც (როგორებიცაა: შემდუღებელი აპარატები, ელექტრული ენერჯის მარეგულირებლები, ელექტრო ენერჯიაზე მომუშავე მაღალი ქვაბები, ელექტრო ამწეები და ლიფტები) შეუძლიათ გამოიწვიონ ძაბვის რხევა და სინათლის ციმციმი, მაგარამ დამოკიდებულია ელექტროსისტემასთან მიერთების წერტილზე. აგრეთვე სხვა მიზეზებად შეიძლება ჩაითვალოს: კონდენსატორის ჩართვა, ძაბვის ტვირთვის ქვეშ რეგულირება, ძაბვის რეგულატორები და სხვა მოწყობილობები რომლებიც ცვლიან წყაროს წინააღობის ინდუქციურ კომპონენტებს, ცვალებადი ატომური და ქარის ელექტროსადგურების წყვეტილი გამომუშავებები და დაბალსიხშირული ინტერჰარმონიკები [5, 6].

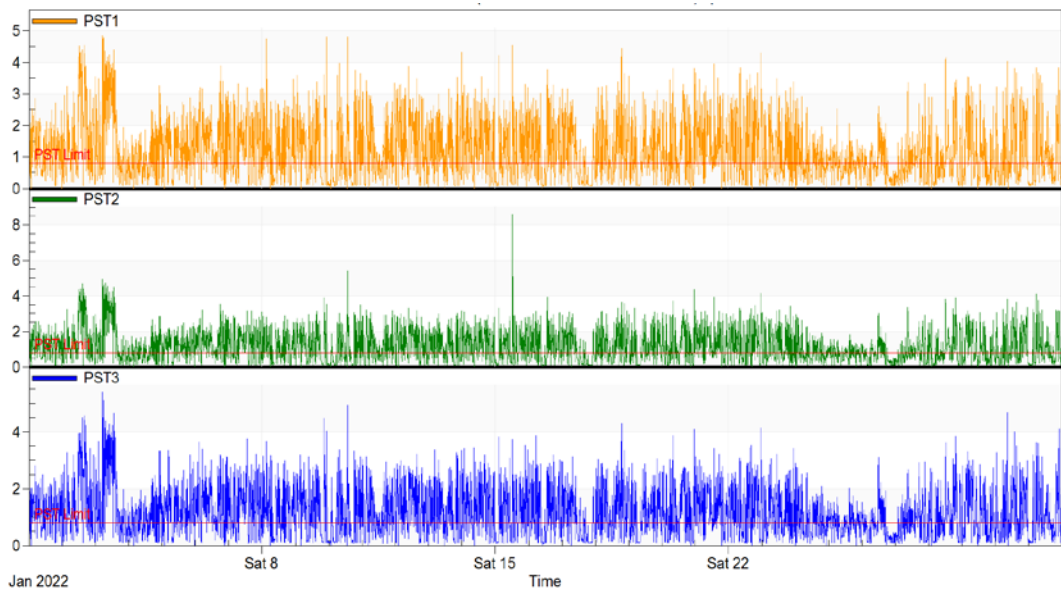
შედეგები:

სინათლის ციმციმი მიჩნეული როგორც ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი შედეგი ძაბვის რხევის, რადგან მას შეუძლია გავლენა მოახდინოს მომუშავე პერსონალის გარემოზე, შედეგიანობაზე და შექმნას სამუშაოზე დაბალი კონცენტრაციის დონე. ამასთანავე ციმციმს შეუძლია გამოიწვიოს ელექტრო

მოწყობილობების დაძველების დაჩქარება რომელიც თავისთავად დაკავშირებულია ფინანსებთან. განსაკუთრებით მგრძობიარენი არიან ციმციმის მიმართ მუდმივ ძაბვაზე მომუშავე მოწყობილობები (მაგალითად სამედიცინო ლაბორატორიები).

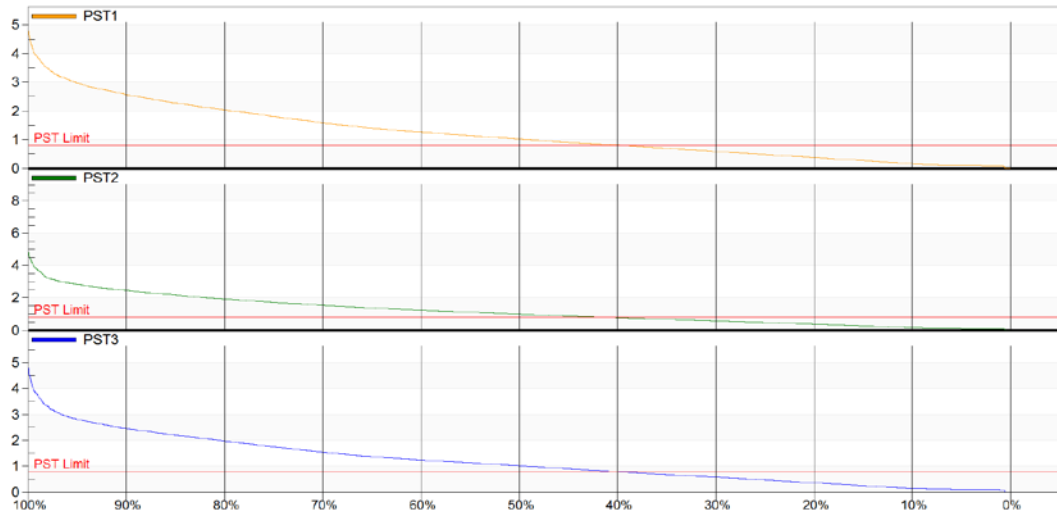
ამ ეტაპზე პარამეტრები რომლებიც განსაზღვრავს სინათლის ციმციმს არის მოკლევადიანი ციმციმი, რომელიც მოიცავს 10 წუთიანი გაზომვების ანალიზს (PST) და გრძელვადიანი ციმციმი, რომელიც მოიცავს 60 წუთიანი გაზომვების ანალიზს (PLT). ეს პარამეტრები გულისხმობს ძაბვის რხევის ეფექტს განათებაზე და მის გავლენას ადამიანის მხედველობაზე.

თავ 2.3-ში მოცემულ ნახაზებზე მოყვანილია A და B ქვესადგურში 110 კვ ძაბვის საფეხურის გრძელპერიოდული (PLT) და მოკლექპერიოდული (PST) ციმციმი სამივე ფაზაში მიხედვით, რომელზეც დატანილია EN 50160 სტანდარტით განსაზღვრული ზღვარი გრძელპერიოდულისათვის (PLT) – 0.8 და მოკლექპერიოდულისათვის (PST) – 1. საქრთველოში მიღებული „ქსელის წესებს“-ის მიხედვით ეს ზღვარი წარმოადგენს გრძელპერიოდულისათვის (PLT) – 0.6 და მოკლექპერიოდულისათვის (PST) – 0.8.



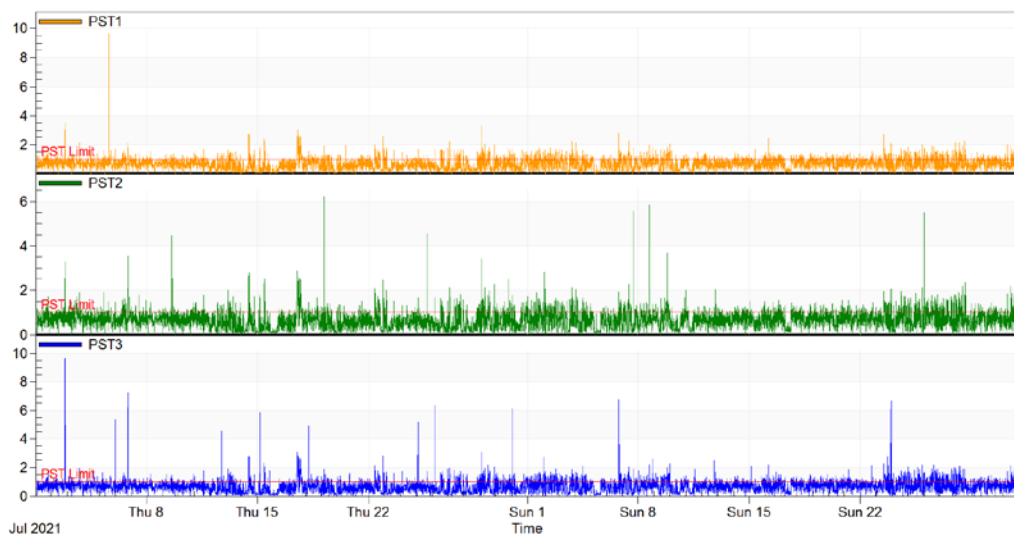
ნახ. 19. მოკლპერიოდული ციმციმი B ქვესადგურში იანვრის თვეში

ნახაზ 19-ზე მოცემულია B ქვესადგურში მოკლეპერიოდისანი ციმციმი სამივე ფაზაში და როგორ ვხედავთ საქმე გვაქვს ზღვრული ნორმების დარღვევასთან. ქვემოც მოცემულია იგივე დროის მონაკვეთის დონე დროის მიხედვით.



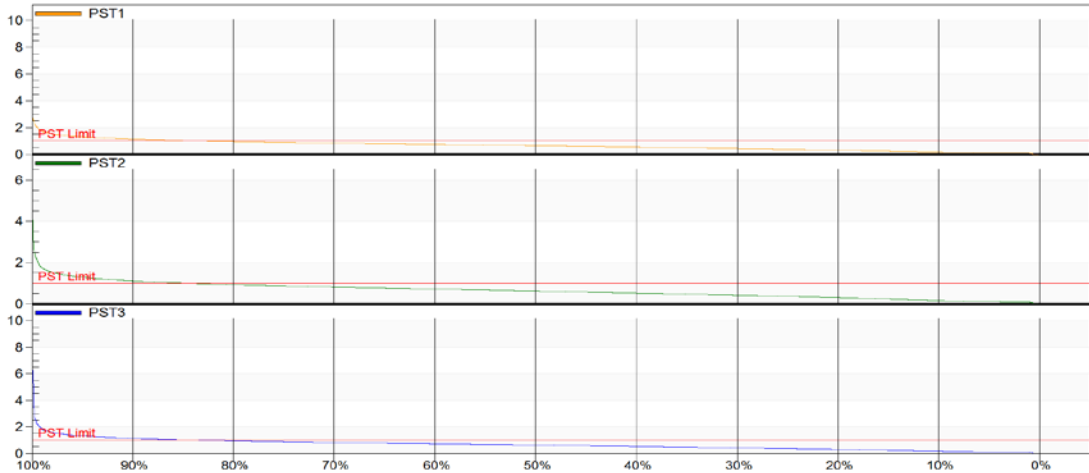
ნახ. 20. მოკლეპერიოდისანი ციმციმის დონე B ქვესადგურში იანვრის თვეში

ნახაზი 20-ის მიხედვით ვარკვევთ, რომ B ქვესადგურში იანვრის თვეში დროის 50 პროცენტი და მეტი პერიოდის განმავლობაში ხდებოდა მოკლე პერიოდისანი ციმციმის დონის დარღვევა რაც ეწინააღმდეგება საქართველოში მიღებულ ქსელის წესებს.



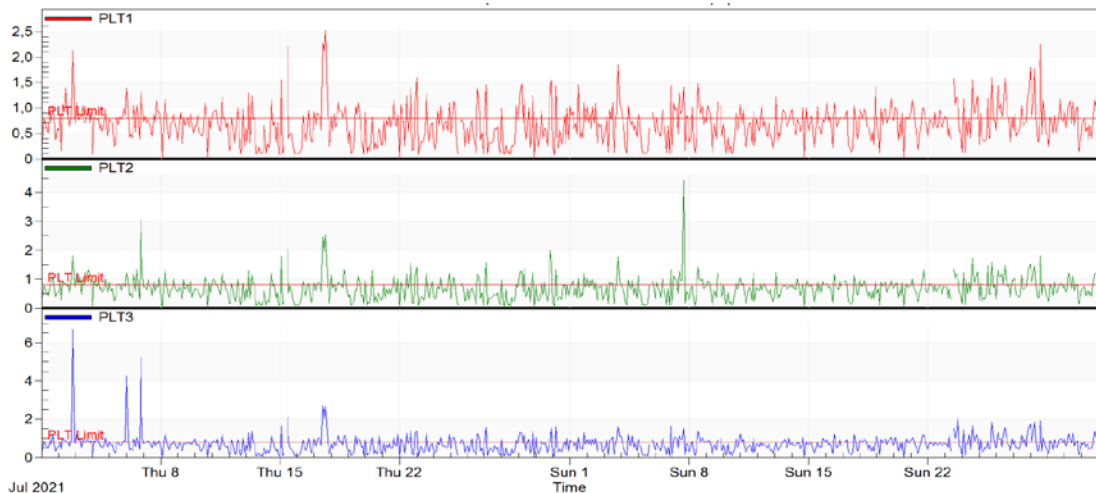
ნახ. 21. მოკლეპერიოდისანი ციმციმი B ქვესადგურში ივლისის თვეში

ნახაზ 21-ზე მოცემულია B ქვესადგურში მოკლებერიოდინი ციმციმი სამივე ფაზაში 2022 წლის იანვრის თვეში. ამ შემთხვევაში ციმციმის დონე ახლავს არის ზღვართან.



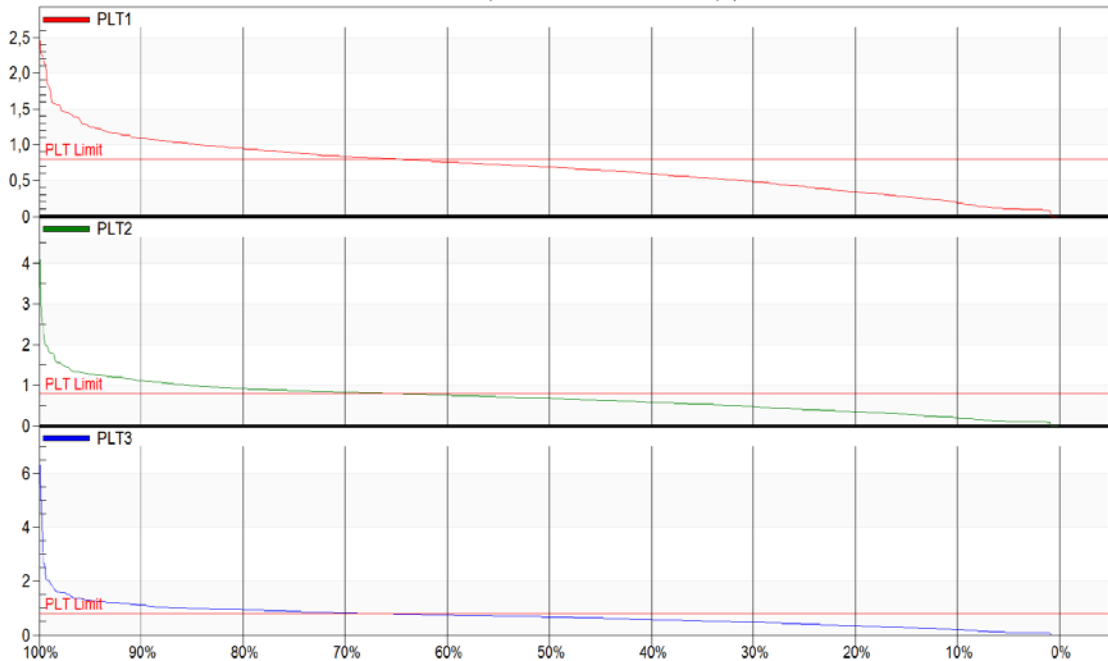
ნახ. 22. მოკლებერიოდინი ციმციმის დონე B ქვესადგურში ივლისის თვეში

დიაგრამებზე B ქვესადგურში 110 კვ ძაბვის საფეხურის გრძელპერიოდინი (PLT) და მოკლებერიოდინი (PST) ციმციმი სამივე ფაზაში მიხედვით, რომელზეც დატანილია საქრთველოში მიღებული „ქსელის წესებს“-ის მიხედვით ეს ზღვარი წარმოადგენს მოკლებერიოდინი ციმციმისათვის (PST) – 0.8. EN 50160 სტანდარტით განსაზღვრული ზღვარი გრძელპერიოდინისათვის მოკლებერიოდინი ციმციმისათვის (PST) – 1.



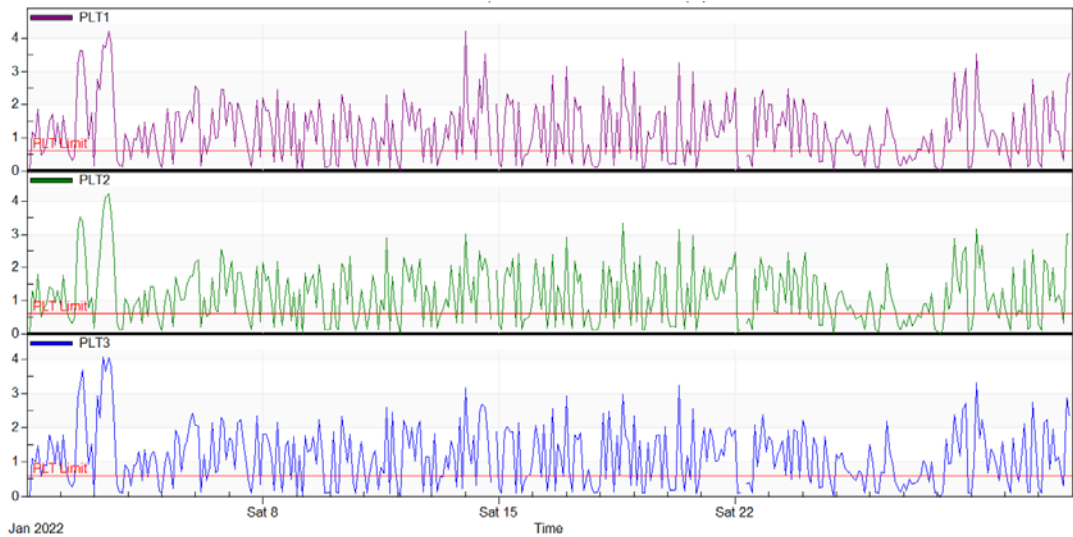
ნახ. 23. გრძელპერიოდინი ციმციმი B ქვესადგურში ივლისის თვეში

ნახაზ 23-ზე მოცემულია B ქვესადგურში გრძელპერიოდული ციმციმი სამივე ფაზაში 2021 წლის იანვრის თვეში რომელის დონეც არღვევს ელექტრული ენერჯის ხარისხის მოთხოვნებს.



ნახ. 24. გრძელპერიოდული ციმციმის დონე B ქვესადგურში ივლისის თვეში

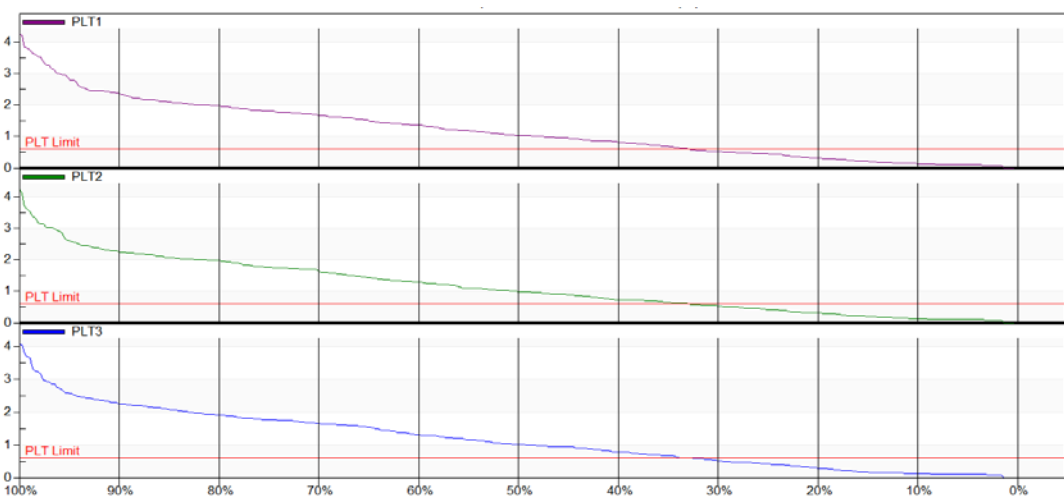
ძირითადად, ფლიკერი არის ვიზუალური შეგრძნების არასტაბილურობის შთაბეჭდილება, რომელიც გამოწვეულია სინათლის წყაროს მიერ, რომლის სიკაშკაშე ან სპექტრული განაწილება დროთა განმავლობაში იცვლება. ჩვეულებრივ, ეს ეხება სინათლის ინტენსივობის ციკლურ ცვალებადობას, რომელიც გამოწვეულია მიწოდების ძაბვის ცვალებადობით, რაც, თავის მხრივ, შეიძლება გამოწვეული იყოს ელექტროენერჯის წარმოების, გადაცემის ან განაწილების დროს წარმოქმნილი დარღვევებით. თუმცა, ციმციმი, როგორც წესი, გამოწვეულია დიდი დატვირთვების გამოყენებით, რომლებსაც აქვთ სწრაფად ცვალებად აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის მოთხოვნა. სინათლის წყაროებში ციმციმის ფენომენი აქტუალურია ელექტროენერჯის განაწილების სისტემების დაწყებიდან. თუმცა, მომხმარებელთა რაოდენობის მატებასთან ერთად და დაყენებული სიმძლავრე, ციმციმის პრობლემა სწრაფად გაიზარდა.



ნახ. 25. გრძელპერიოდისანი ციმციმი B ქვესადგურში იანვარი თვეში

ნახაზ 25-ზე მოცემულ დიაგრამებზე ნათალდ ჩანს გრძელპერიოდისანი ციმციმის დონის დარღვევა 2022 წლის იანვრის თვეში B ქვესადგურში ამ შემთხვევაში პერიოდის 35% არის მხოლოდ ნორმის ფარგლებში რაც სრული ანომალიას წარმოადგენს და სასწრაფოდ ესაჭიროება შესამცირებელი ღონისიებების მიღება.

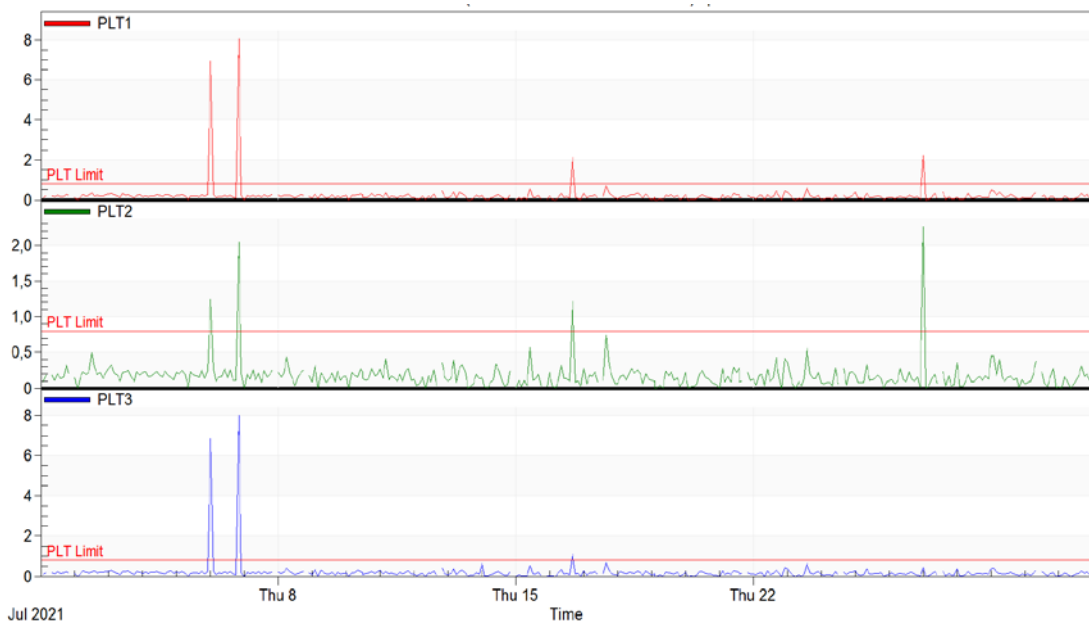
აღნიშნული დარღვევის არსებობის გამო ქვესადგურში და მის მიდებარე ტერიტორიაზე არსებულ მომხმარებელთა აუცილებლად იქნება შესამჩნევი ციმციმი სინათლის ინტენსივობაში, რომელიც საოდისე მუშაობის პირობებში ადამიანის მხედველობისათვის ზიანის მომტანია.



ნახ. 26. გრძელპერიოდისანი ციმციმის დონე B ქვესადგურში იანვრის თვეში

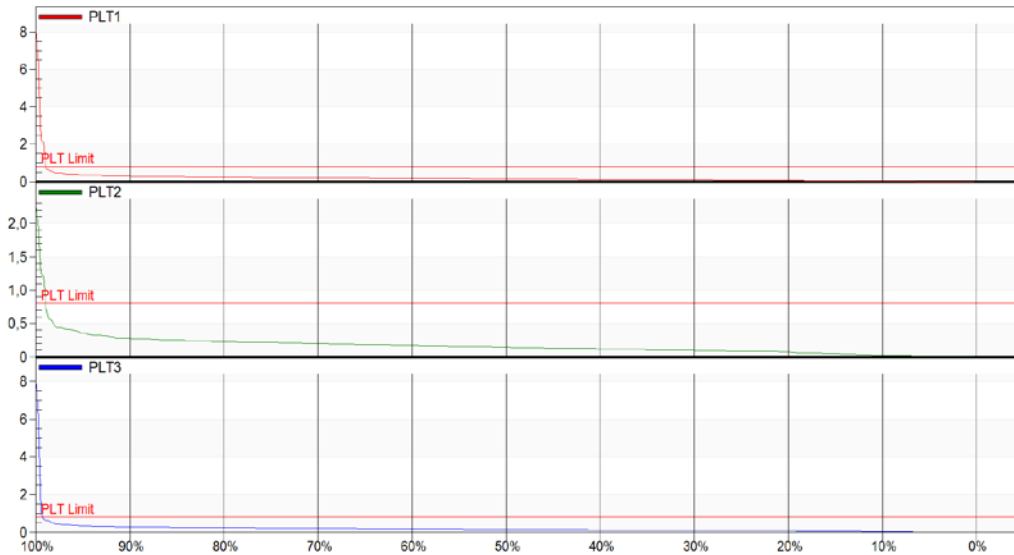
ნახაზებზე 19-დან 26-მდე მოყვანილია B ქვესადგურში გრძელპერიოდულიანი (PLT) ციმციმი სამივე ფაზაში ფაზების მიხედვით, რომელზეც დატანილია საქართველოში მიღებული „ქსელის წესებს“-ის მიხედვით ზღვარი, რომელიც წარმოადგენს გრძელპერიოდულიანისათვის (PLT) – 0.6. EN 50160 სტანდარტით განსაზღვრული ზღვარი გრძელპერიოდულიანისათვის (PLT) – 0.8.

სინათლის ციმციმი მიჩნეული როგორც ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი შედეგი ძაბვის რხევის, რადგან მას შეუძლია გავლენა მოახდინოს მომუშავე პერსონალის გარემოზე, შედეგიანობაზე და შექმნას სამუშაოზე დაბალი კონცენტრაციის დონე. ამასთანავე ციმციმს შეუძლია გამოიწვიოს ელექტრო მოწყობილობების დაძველების დაჩქარება რომელიც თავისთავად დაკავშირებულია ფინანსებთან. განსაკუთრებით მგრძობიარენი არიან ციმციმის მიმართ მუდმივ ძაბვაზე მომუშავე მოწყობილობები (მაგალითად სამედიცინო ლაბორატორიები).



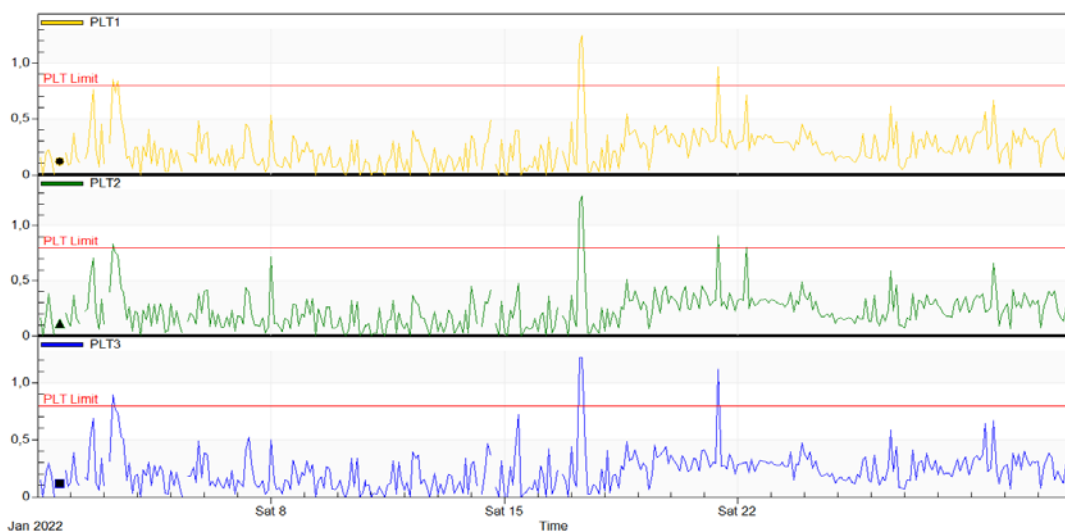
ნახ. 27. გრძელპერიოდულიანი ციმციმი A ქვესადგურში ივლისის თვეში

გრძელპერიოდულიანი ციმციმის დონე A ქვესადგურში ივლისის თვეში არის ნორმის ფარგლებში საქართველოს ქსელის წესების გათვალისწინებითაც და საერთაშორისო სტანდარტების მოთხოვნების მიხედვითაც.



ნახ. 28. გრძელპერიოდული ციმციმის დონე A ქვესადგურში ივლისის თვეში

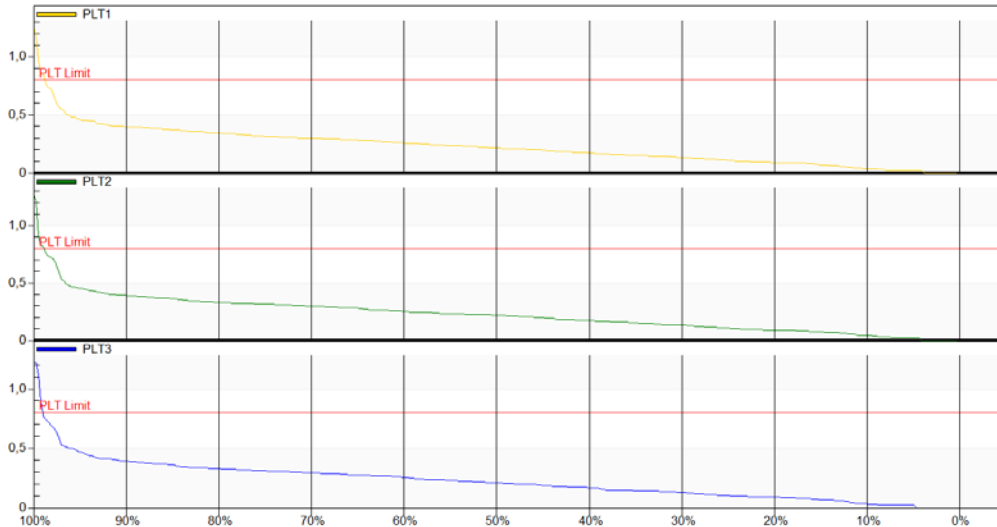
შესაბამისად A ქვესადგურში 2021 წლის ივლისის თვეში გრძელპერიოდული ციმციმის დონე ნორმის ფარგლებშია, როგორც საქართველოს ენერგეტიკისა და წყალმომარაგების ეროვნული კომისიის მიღებული „ქსელის წესები“-ს მიხედვით ასევე EN 50160 სტანდარტის მიხედვით. გვხვდება რამდენიმე გადაჭარბება მაგრამ მხოლოდ მცირეპერიოდული ამიტომ მისი მხედველობაში არ მიღება შესაძლებელია ამ ეტაპისთვის. ქსელის განვითარებიდან გამომდინარე არსებობს დიდი ალბათობა რომ აღნიშნული შეიძლება სწრაფად გაიზარდოს.



ნახ. 29. გრძელპერიოდული ციმციმი A ქვესადგურში იანვრის თვეში

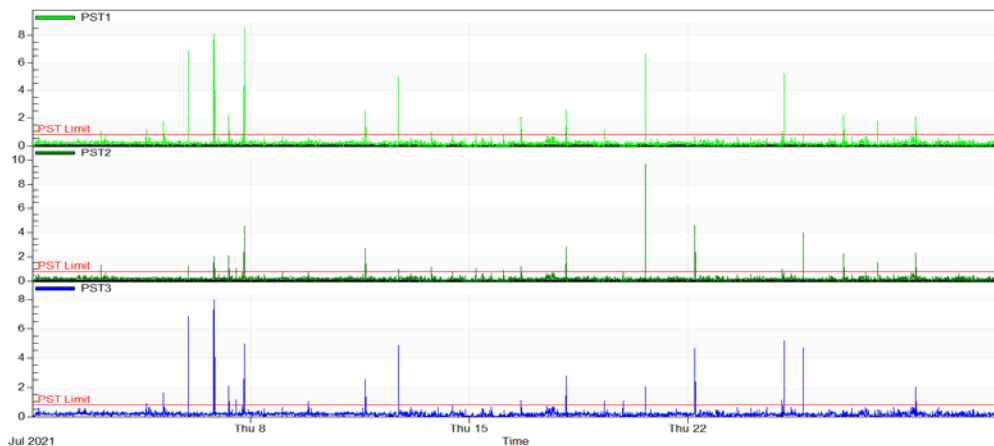


ნახაზ 30-ზე ნაჩვენებ დიაგრამებზე მოცემულია გრძელპერიოდული ციმციმის დონე A ქვესადგურში იანვრის თვეში ამ პერიოდში არ შეინიშნება ნორმირებული მნიშვნელობების დარღვევები.



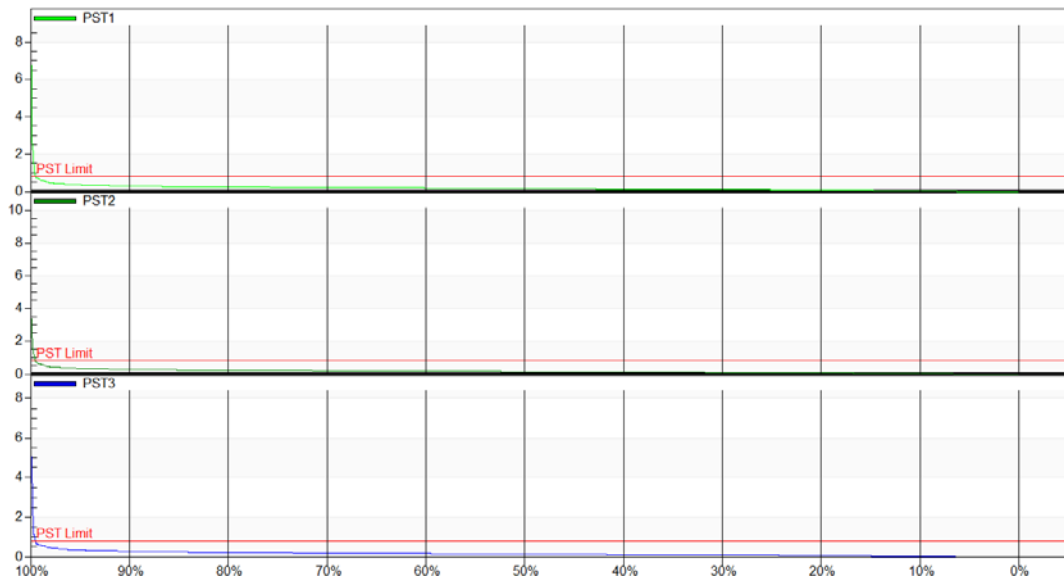
ნახ. 30. გრძელპერიოდული ციმციმის დონე A ქვესადგურში იანვრის თვეში

ნახაზებზე 27-დან 34-ის ჩათვლით დიაგრამებით ნაჩვენებია A ქვესადგურში 110 კვ ძაბვის საფეხურის გრძელპერიოდული (PLT) ციმციმი სამივე ფაზაში ფაზების მიხედვით, რომელზეც დატანილია ზღვრული ნორმების ესენია: EN 50160 სტანდარტით განსაზღვრული ზღვარი გრძელპერიოდული ციმციმის (PLT) – 0.8. საქართველოში მიღებული „ქსელის წესებს“-ის მიხედვით ეს ზღვარი წარმოადგენს გრძელპერიოდული ციმციმის (PLT) – 0.6.



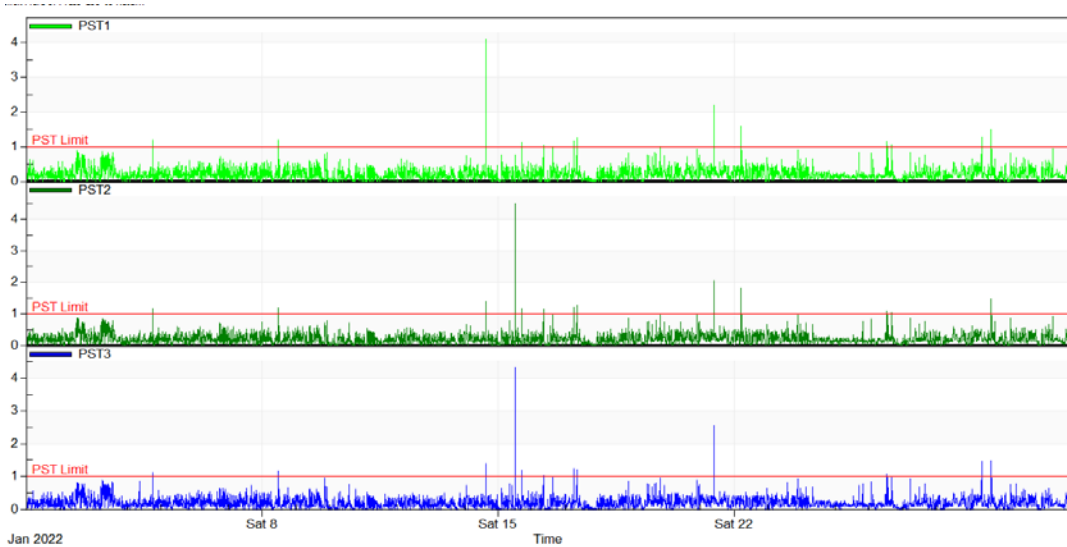
ნახ. 31. მოკლესპერიოდული ციმციმი A ქვესადგურში ივლისის თვეში

ნახაზი 32-ის დიაგრამაზე მოცემულია A ქვესადგურში მოკლეპერიოდული ციმციმი სამივე ფაზაში რომლის მიხედვითაც ნორმების გადაჭარბება არ გვხვდება.



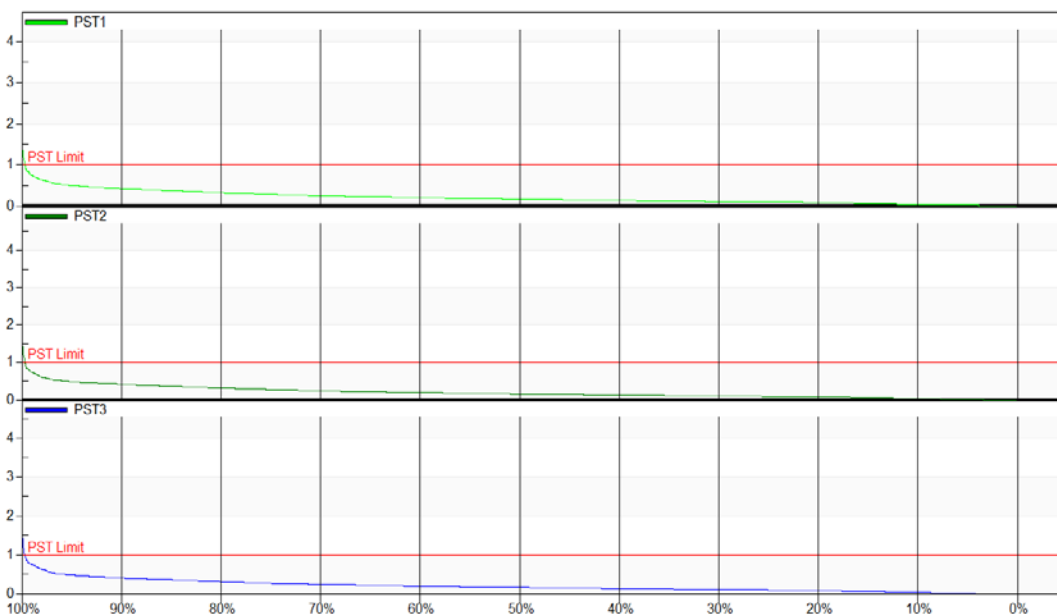
ნახ. 32. მოკლეპერიოდული ციმციმის დონე A ქვესადგურში ივლისი თვეში

ელექტრული დატვირთვის ცვლილება, მიწოდებულ ძაბვაზე პროპორციულად მოქმედებს. ამის დანახვა შეგვიძლია სახის პირობებით, როდესაც მაცივარს ან ღუმელს ამუშავებ, ზოგიერთი განათება შეიძლება ჩაქრეს. თუ საკმარისად დიდი ცვლილება მოხდება, როგორცაა დიდი სამრეწველო ძრავის გაშვება, ნათებამ შეიძლება დაიცვოს ციმციმი არა მხოლოდ ამ მომხმარებლისთვის, არამედ მთელ ქალაქში. ჩვეულებრივ, მომხმარებელი, რომლის დატვირთვაც იცვლება, ყველაზე მეტად ზარალდება, მაგრამ სხვა კლიენტები გარკვეულწილად განიცდიან გავლენას, იმისდა მიხედვით, თუ რამდენად დიდია დატვირთვის ცვლილება და რამდენად ახლოს არიან ისინი ცვალებად დატვირთვასთან. თუ დიდი ძაბვის ცვლილებები ხდება სწრაფი თანმიმდევრობით, სინათლის დონე შეიცვლება და როდესაც ცვალებადობა საკმარისად დიდი ხდება შესამჩნევი ან შემამფოთებელი, ეფექტს ეწოდება სინათლის ციმციმი.



ნახ. 33. მოკლეპერიოდული ციმციმი A ქვესადგურში იანვრის თვეში

ნახაზები 33 და 34-ის მიხედვით მოკლეპერიოდული ციმციმის დონე A ქვესადგურში 2022 წლის იანვრის თვეში არის ნორმის ფარგლებში. ამ ქვესადგურში B ქვესადგურთან შედარებით უფრო კარგო პონური დაბინძურების დონეა და ძაბვის ვარიაციასთან თითქმის აქ გვაქვს საქმე . შესაბამისად ელექტრული ენერჯის ხარისხის ნორმებიც ფარგლებშია.



ნახ. 34. მოკლეპერიოდული ციმციმის დონე A ქვესადგურში იანვრის თვეში

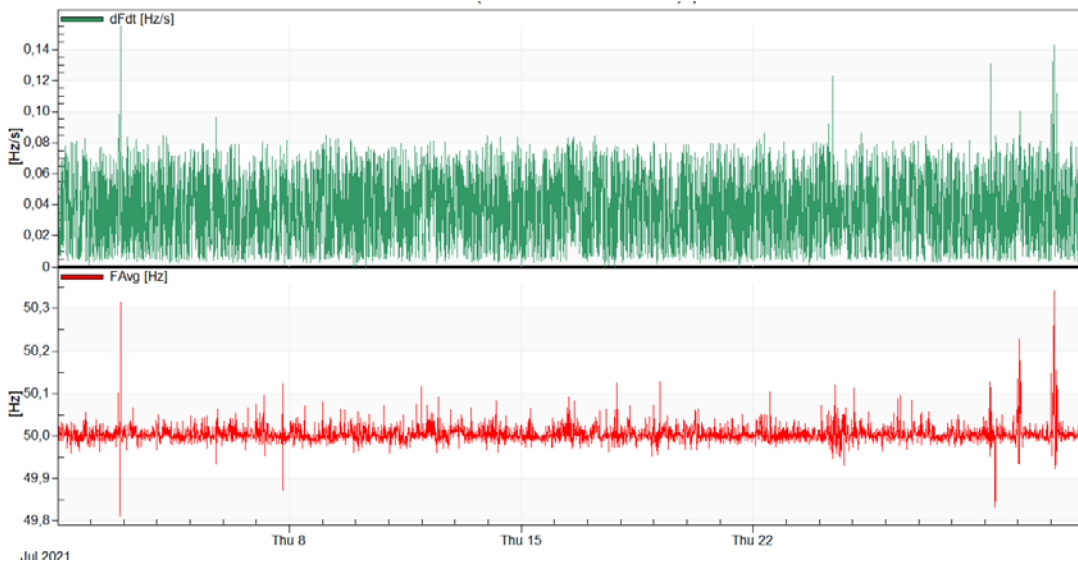
საბოლოო შედეგების მიხედვით ელექტრული ენერჯის ხარისხის ერთ-ერთი პარამეტრის სინათლის ციმციმის ნორმების გადაჭარბების მრავლობითი შემთხვევა შექსირდება კვლევი ორივე ქვესადგურში. და შეიძლება ითქვას რომ უკვე ამ ეტაპზე საჭიროა დაისახოს შესაბამისი ღონისძიებების საკითხის გამოსასწორებლად. აღნიშნული გამოწვეულია არასიმეტრიული და მკვეთრად ცვალებადი მომხმარებლების არსებობით ქვესადგურის უშუალოდ დაკავშირებულ მომხმარებლებთან.

## 2.4 სიხშირე და მისი სიხშირის ფარდობითი გადახრა

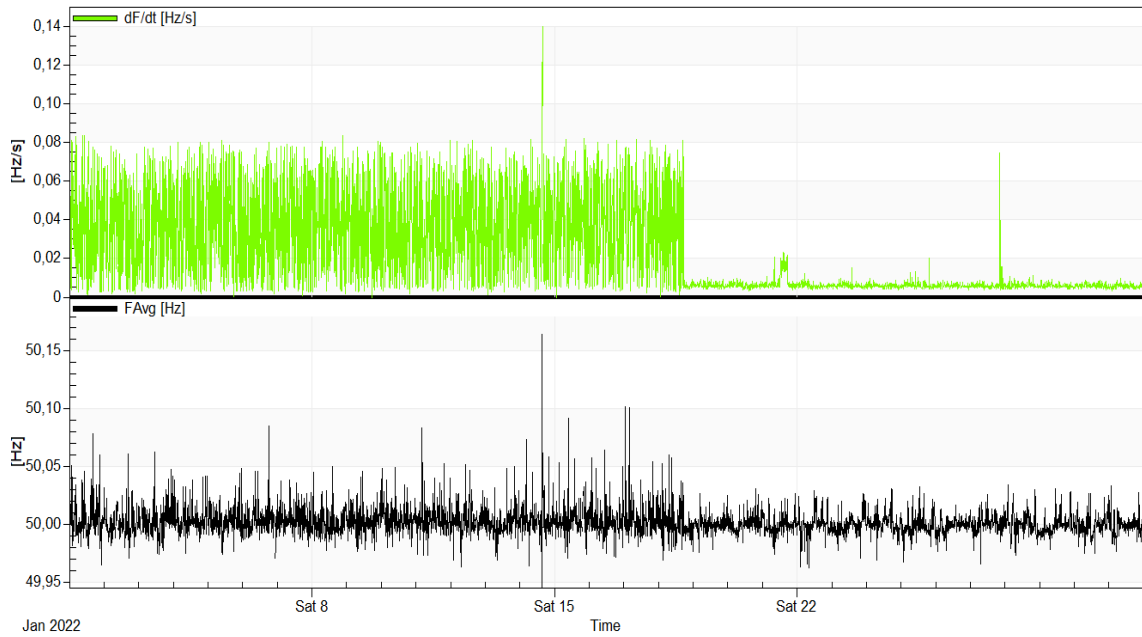
ელექტროსისტემაში სიხშირის გადახრა წარმოადგენს ელექტრომომარაგების ქსელში სხვაობას რეალურ სიხშირესა  $f$  და მის ნომინალურ წმომიზნელობებს შორის და განისაზღვრება ტოლობით:

$$\delta f = f - \text{წმომ}$$

ნახაზებზე 35-38 დიაგრამების სახით მოცემულია A და B ქვესადგურების სიხშირე და მისი ფარდობითი გადახრა, დროის ერთსა და იმავე პერიოდში 2021 წლის ივლისი და 2022 წლის იანვრის თვეების.



ნახ. 35. სიხშირე და მისი ფარდობითი გადახრა A ქვესადგურში ივლისის თვეში



**ნახ. 36. სიხშირე და მისი ფარდობითი გადახრა A ქვესადგურში იანვრის თვეში**

ელექტროსისტემაში ცვლადი დენის სიხშირე განისაზღვრება ელექტროსადგურების გენერატორების ბრუნვის სიჩქარით. საქართველოს ელექტროსისტემაში სიხშირის ნომინალური მნიშვნელობა 50 ჰც შეიძლება უზრუნველყოფილი იყოს აქტიური სიმძლავრის რეზერვის არსებობის პირობებში. ელექტრულ სისტემაში დროის ყოველ მომენტში უნდა იყოს უზრუნველყოფილი ელექტროსადგურის გენერატორების სიმძლავრეებსა და დატვირთვების მიერ მოხმარებულ სიმძლავრეებს შორის ტოლობა (ბალანსი) ელექტრულ ქსელში გადაცემაზე სიმძლავრის დანაკარგების გათვალისწინებით.

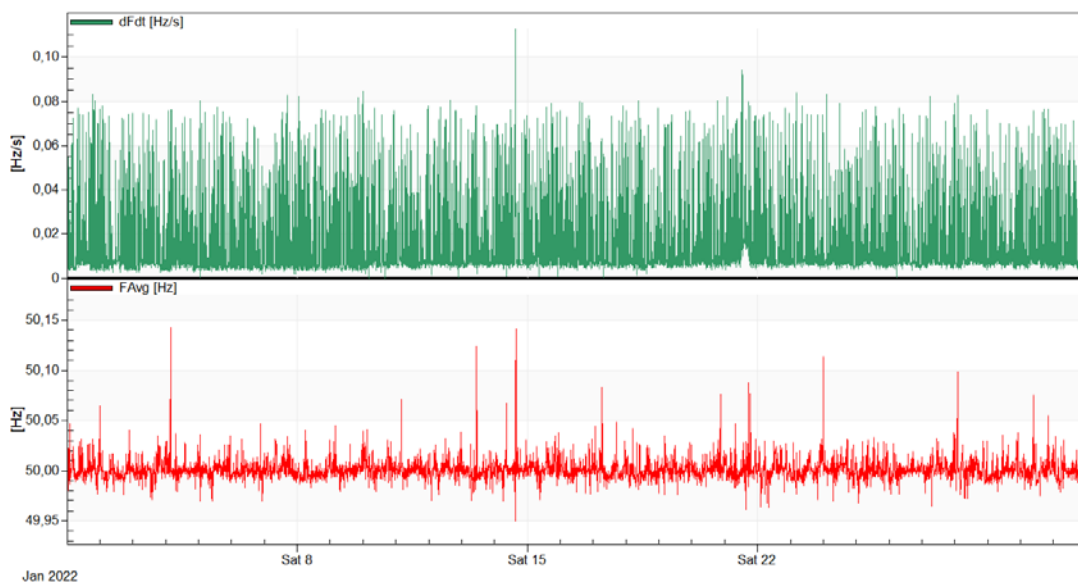
საქართველოს ტერიტორიაზე მოქმედი „ქსელის წესები“-ს მიხედვით ელექტრო გადამცემ ქსელში ნომინალური სიხშირე უნდა იყოს 50 ჰერცი. შესაბამისად შენარჩუნებული უნდა იყოს შემდეგ ფარგლებში:

1. პარალელურ, სინქრონულ რეჟიმში მუშაობის პირობებში  $f=50\pm 0.5$  ჰერცი დღე-ღამის არანაკლებ 95%-ის განმავლობაში.
2. იზოლირებულ რეჟიმში მუშაობის პირობებში  $f=50\pm 1$  ჰერცი დღე-ღამის არანაკლებ 95%-ის განმავლობაში.

ექსპერიმენტული კვლევის პერიოდში საქართველოს ელექტრო სისტემა მუშაობდა მეზობელ ელექტროსისტემასთან პარალელურ რეჟიმში.



ნახ. 37. სიხშირე და მისი ფარდობითი გადახრა B ქვესადგურში ივლისის თვეში



ნახ. 38. სიხშირე და მისი ფარდობითი გადახრა B ქვესადგურში იანვრის თვეში

ანათვლების მიხედვით ქსელში, რომელშიც ექსპერიმენტში მონაწილე ქვესადგურებია გაერთიანებული სიხშირის ზღვრების დარღვევები არ გვხვდება. შეინიშნება მცირედი გადახრები ნომინალური მნიშვნელობიდან (ქსელის წესების ზღვრების დარღვევის გარეშე), რომელიც გამოწვეული მთლიანად ელექტროსისტემაში ავარიული გამორთვებით და მოკლენ შერთვებით. შესაბამისად საქართველოს ელექტროსისტემის საკვლევ ზონაში ელექტრო ენერჯის ხარისხის პარამეტრის სიხშირის ფარდობითი გადახრის ნორმები არ ირღვევა. აღსანიშნავია ის ფაქტიც, რომ გაზომვების ჩატარებისა პერიოდში

საქართველოს ელექტროსისტემა იმყოფებოდა მეზობელ ელექტროსისტემასთან პარალელურ რეჟიმში, ამიტომ აღნიშნული პარამეტრის სისტემურიდან გამომდინარე საქართველოს ტერიტორიაზე მისი ზუსტი მნიშვნელობის დადგენა სხვა ელექტროსისტემასთან სინქრონული მუშაობის დადგენის პირობებში ვერ მოხერხდება.

## 2.5 ძაბვის ცვლილება (ვარიაცია) (voltage variation)

ძაბვის ცვლილებები ხდება მრავალ ფორმით და თითოეულ მათგანს გააჩნია თავისი შესაბამის ტექნოლოგია. ძაბვის ცვლილება არის გადახვევა ნომინალური ძაბვის მნიშვნელობიდან, რომელიც მიმდინარეობს მცირე პერიოდის (მილიწამებიდან წამებში) ან დიდი პერიოდის განმავლობაში (უფრო მეტი ვიდრე ერთი წუთი). მოკლევადიანი ძაბვის ცვლილება უმეტესად თავს იჩენს, როგორც ძაბვის სინუსოიდის რამდენიმე პერიოდიანი ჩაზნექვა ან ამოზნექვა და ძაბვის სინუსოიდის მყისიერი ჩაზნექვა ან ამომხექვა. ხოლო გრძელვადიანი ძაბვის ცვალებადობა თავს იჩენს, როგორც ძაბვის რხევები, ძაბვის ვარდნები, გადაძაბვა და ძაბვის შეწყვეტა. ძაბვის ცვლილება წარმოადგენს შედეგს გადამცემი და განაწილების ქსელის ხარვეზებისა და დატვირთვის პრობლემებს.

მიწოდების ძაბვის ცვალებადობა განისაზღვრება, როგორც ძაბვის ამპლიტუდის მატება ან შემცირება მის ნომინალურ მნიშვნელობასთან მიმართებაში, რაც შეიძლება გამოწვეული იყოს შეყვანის სიმძლავრის ცვალებადობით, დატვირთვების ცვალებადობით (მაგ. ძრავების გაშვება, მანევრები სისტემა) ან სისტემის გაუმართაობისგან. ძაბვის ცვალებადობის ფენომენი არის ენერჯის ხარისხის ერთ-ერთი მთავარი პრობლემა, რადგან ამან შეიძლება გამოიწვიოს ელექტრო/ელექტრონული მოწყობილობების დაზიანება და ასევე მნიშვნელოვანი არაეფექტურობა [10].

ძაბვის ცვალებადობის გამო ყველაზე განმეორებადი პრობლემები შეიძლება იყოს გამორთვა და/ან ანომალიები პროცესებში/მოწყობილობაში, ელექტროენერჯის ელექტრონიკის დაცვის ჩარევები, სისტემის კომპონენტების დაზერება, ელექტრონული მოწყობილობების გაუმართაობა და ა.შ. ამრიგად, მიწოდების ძაბვის ამპლიტუდა შეიძლება ხასიათდებოდეს როგორც გაზრდილ

(ზედმეტად) და შემცირებით (დაბალძაბვა), რომლებიც ხდება შემთხვევით, ხანგრძლივობით, რომელიც იცვლება დროთა განმავლობაში სისტემის პირობებთან და ელექტრო განაწილებასთან დაკავშირებით [21].

## 2.6 ძაბვის წყვეტა (Voltage interruptions)

კონკრეტულ წერტილებში ძაბვის წყვეტა იჩენს თავს, როდესაც მნიშვნელობა ეცემა ნომინალურის 10 %-მდე და უფრო ნაკლებზე პერიოდიდან (0,02 წამი) 60 წამადე ინტერვალში. წარმოქმნის მიზეზებია: იზოლაციის გარღვევა, გაუმართავი დამიწება და იზოლატორების გარღვევა.

ძაბვის რყევები არის ენერჯის ხარისხის მთავარი პრობლემა, რომელსაც აწყდება PV-ზე დაფუძნებული ჰიბრიდული სისტემები მზის გამოსხივების ხანმოკლე ცვალებადობის გამო. ამან ასევე შეიძლება გაააქტიუროს სადისტრიბუციო ტრანსფორმატორებზე გადაჭარბებული ავტომატური ონკანის შეცვლა, რაც გავლენას ახდენს ტრანსფორმატორის სიცოცხლის ხანგრძლივობაზე და გაზრდის წლიურ ტექნიკურ ხარჯებს. სისტემური ბლოკირება შეიძლება მოხდეს ქსელში გახანგრძლივებული ძაბვის გამო, რომელიც წარმოიქმნება ძალიან მაღალი PV გამომავალი ვარდნის გამო. მეორეს მხრივ, მდგრადი მაღალი ძაბვები არასახარბიელო გავლენას ახდენს ქსელის აღჭურვილობის სიცოცხლის ხანგრძლივობაზე. PV სისტემებიდან წარმოქმნილი „ძაბვის მერყეობა“ შეიძლება კლასიფიცირდეს ძაბვის დისბალანსად და ძაბვის აწევად, რაც იწვევს დენის უკუ ნაკადს [29]. ქსელის მახასიათებლები ასევე გავლენას ახდენს ენერჯის ხარისხის საკითხზე, რადგან ძაბვის მატება ხდება მაშინ, როდესაც არის მაღალი წინაღობა PV გამომავალსა და უახლოეს ბოძზე ზედა ტრანსფორმატორს შორის. როდესაც PV გამომავალი სწრაფად იზრდება სუსტ სისტემაში ღრუბლის მოძრაობის გამო, ძაბვა საერთო შეერთების წერტილში იზრდება და პირიქით. ძაბვის ცვალებადობის გავლენა უფრო ღრმად დაბალი ძაბვის მიმწოდებლებში საშუალო ძაბვის მიმწოდებლებთან შედარებით, რადგან X/R-ის მნიშვნელობა ამ უკანასკნელ შემთხვევაში უფრო მაღალია. ელექტროენერჯის საპირისპირო ნაკადის საკითხი წარმოიქმნება მიმწოდებელში ძაბვის დისბალანსის გამო, რაც გამოწვეულია მიმწოდებელში PV წარმოქმნასა და მოთხოვნას შორის დისბალანსის გამო.



ინვერტორული კონტროლირებადი რეაქტიული სიმძლავრის მექანიზმი დაგეხმარებათ ადგილობრივი ძაბვის პრობლემების შემსუბუქებაში. ამრიგად, თანამედროვე ინვერტორებს შეუძლიათ იმუშაონ სიმძლავრის კოეფიციენტზე ნაკლები, ვიდრე ერთიანობის წამყვანი ან ჩამორჩენილი ძაბვის მხარდაჭერა საერთო შეერთების წერტილში [20].

## 2.7 ძაბვის და დენის სინუსოიდის ანომალიები (sag, swell, notch)

ძაბვისა და დენის სინუსოიდების ანომალიები ძირითადი წარმომქმნელი მიზეზებია ამინდი, მოკლედ ჩართვა, სისტემის გადატვირთვა პიკურ დონემდე და ელექტრო ძრავის გაშვება. მათი ხანგრძლივობა გრძელდება ერთიდან რამდენიმე ციკლის (პერიოდის 0,02 წმ) განმავლობაში. მათ დასაფიქსირებლად აუცილებელია განსაკუთრებით მგრძობიარე და მაღალი კლასის ელექტრული ენერჯის ხარისხის სამონიტორინგო მოწყობილობების გამოყენება. სინუსოიდის ანომალიების მცირე რაოდენობა ელექტროსისტემაში არ იწვევს რაიმე სახის გართულებებს და ისე შეუმჩნეველია ღრმა კვლევების ცატარების გარეშე. მაგრამ მათი რაოდენობის უკონტროლო და უზომოდ ზრდა უკვე პირდაპირი საფრთხე მამტაბური ვაგარიული სიტუაციების წარმოსაქმნელად ან მცირე ავარიული დიტუაციის გასამძაბრებლად.

კვლევის პერიოდში B ქვესადგურში დაფიქსირდა 129 ძაბვისა და დენის სინუსოიდების ანომალია აქედან ივლისის თვეში იყო დაფიქსირებული 72 შემთხვევა ხოლო იანვრის თვეში 57. რაც შეეხება A ქვესადგურს იანვლისის თვეში დაფიქსირდა 61 შემთხვევა, იანვრის თვეში კი 24 შემთხვევა ჯამში 85. მოყვანილი სტატისტიკის მიხედვით შეგვიძლია ვთქვათ, რომ ამ ეტაპზე დენისა და ძაბვის სინუსოიდების ანომალიების რაოდენობა შესამჩნევია მარა მათ არ შეუძლიათ რაიმე გავლენა მოახდინონ ელექტროსისტემაზე. შემდეგი უმიზეზო ზრდა კი ნამდვილად შესაძლებელია გახდეს გართულებების წარმოქმნის მიზეზი.

### 2.7.1 ძაბვის სინუსოიდის ღრიჩოები (voltage notch)

ძაბვის სინუსოიდის ღრიჩოები შეიძლება აღიწეროს, როგორც გარემოება როდესაც ცვლადი ძაბვის სიდიდე ეცემა ნულამდე მცირე პერიოდის განმავლობაში (ჩვეულებისამებრ მიკროწამების განმავლობაში).

გამომწვევი მიზეზები:

ძაბვის სინუსოიდის ღრიჩოები უპირველეს ყოვლის გამოწვეულია სამფაზიანი ბოგური განმართველი ან კონვერტორი რომლებიც წარმოქმნიან მუდმივ დენს. აღნიშნულ მოვლენას ადგილი აქვს სხვადასხვა ფაზების დაკავშირებისას და ფაზათშორის მოკლემერთვების დროს. გარდა ამის სიღრმისეული ჩავარდნა სისტემის ნებისმიერ წერტილში ინდუქციური გავლენის შედეგია. შესაბამისად დამახინჯების ჩავარდნის კუთხე ჩავთვალოთ კომუტაციის კუთხედ.

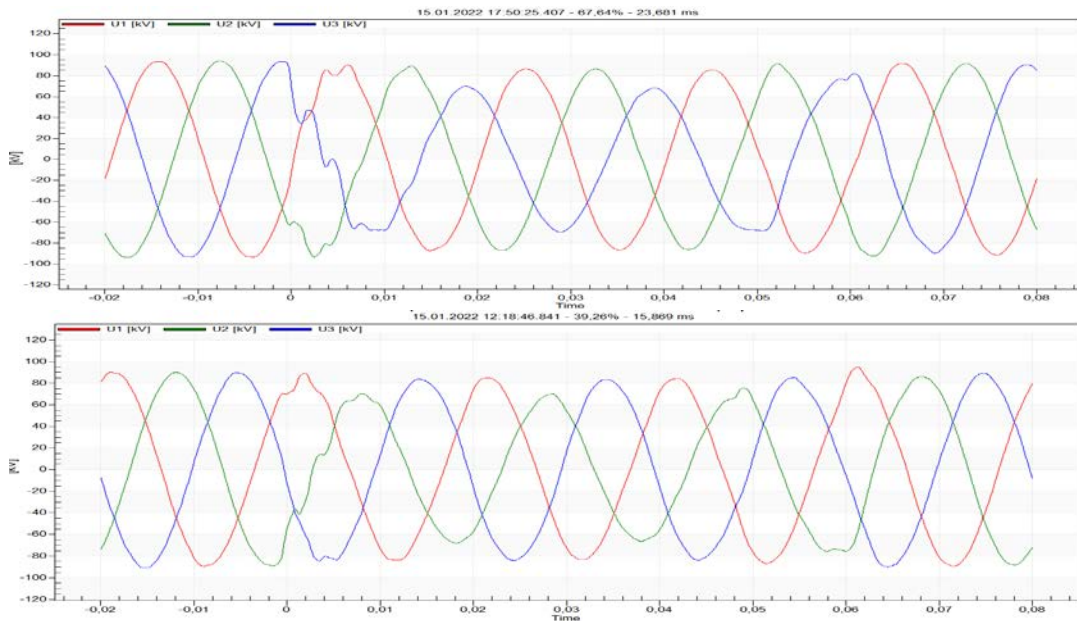
$$\mu = \cos^{-1}(\cos a - (X_s + X_t)I_{dc}) - a$$

$$\cos \mu = 1 - \left(\frac{2E_x}{E_{d0}}\right)$$

სადაც:  $\mu$  - კომუტაციის კუთხეა;  $a$  - ძვრის კუთხეა;  $X_s$  - სისტემის რეაქტიული წინაღობა კონვერტორის ბაზაზე ერთეულში;  $X_t$  - კონვერტორის ტრანსფორმატორის რეაქტიული წინაღობა კონვერტორის ბაზაზე ერთეულში;  $I_{dc}$  - მუდმივი დენი კონვერტორის ბაზაზე ერთეულებში;  $E_x$  - რეალური მუდმივი ძაბვის;  $E_{d0}$  - თეორიული მუდმივი ძაბვა [6].

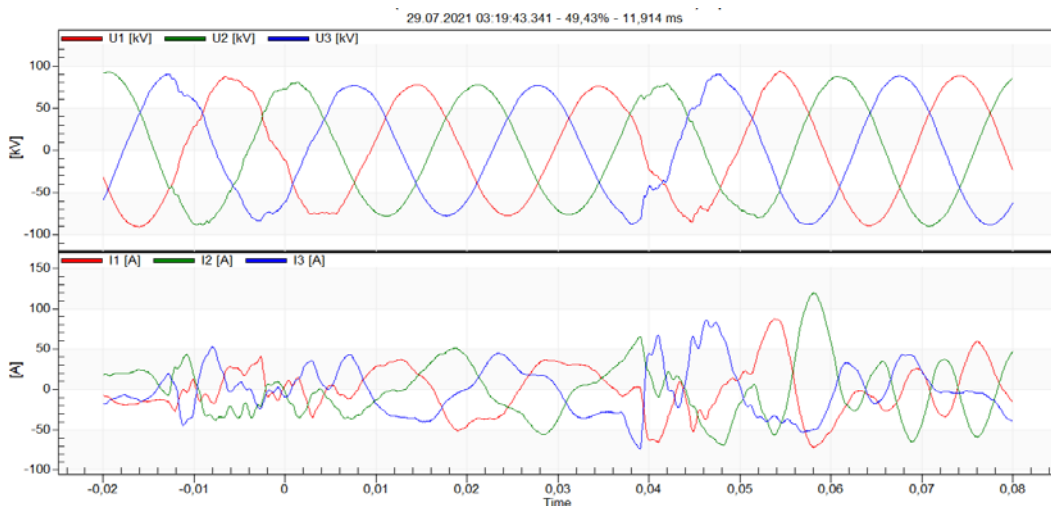
ეფექტები:

ძაბვის სინუსოიდის ღრიჩოები წარმოადგენს ჰარმონიკულ და არაჰარმონიკული სიხშირეებს რომლებიც უფრო მაღალია ვიდრე ისინი რომლებიც აღმოჩენილია მაღალი ძაბვის სისტემებში. ჩვეულებრივ ეს სიხშირეები არიან რადიო სიხშირეების მაჩვენებელში, რომლებიც იწვევენ უარყოფით ეფექტებს როგორებიცაა სიგნალის შეფერხება ლოგიკურ და საკომუნიკაციო სქემებში.



**ნახ. 39. ძაბვის სინუსოიდის ღრიჩოები A ქვესადგურში**

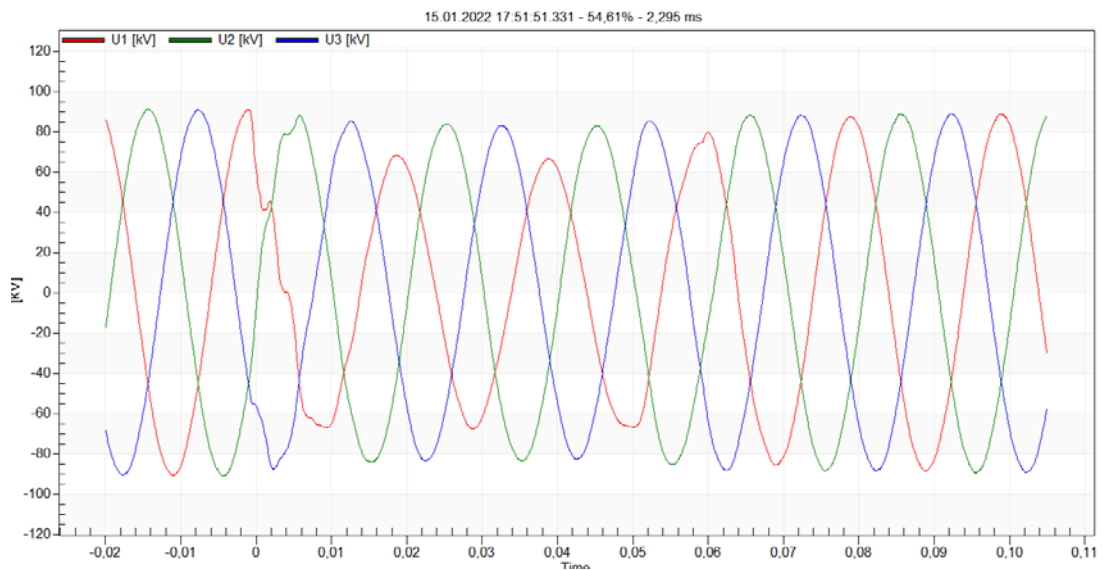
ნახაზების 39 და 40 დიაგრამებზე წარმოდგენილია ძაბვის სინუსოიდის ღრიჩოები (თვალთ ყველაზე კარგად აღსაქმელი შემთხვევები) რომელიც დაფიქსირდა B ქვესადგურში იანვრის თვეში.



**ნახ. 40. ძაბვის სინუსოიდის ღრიჩოები B ქვესადგურში**

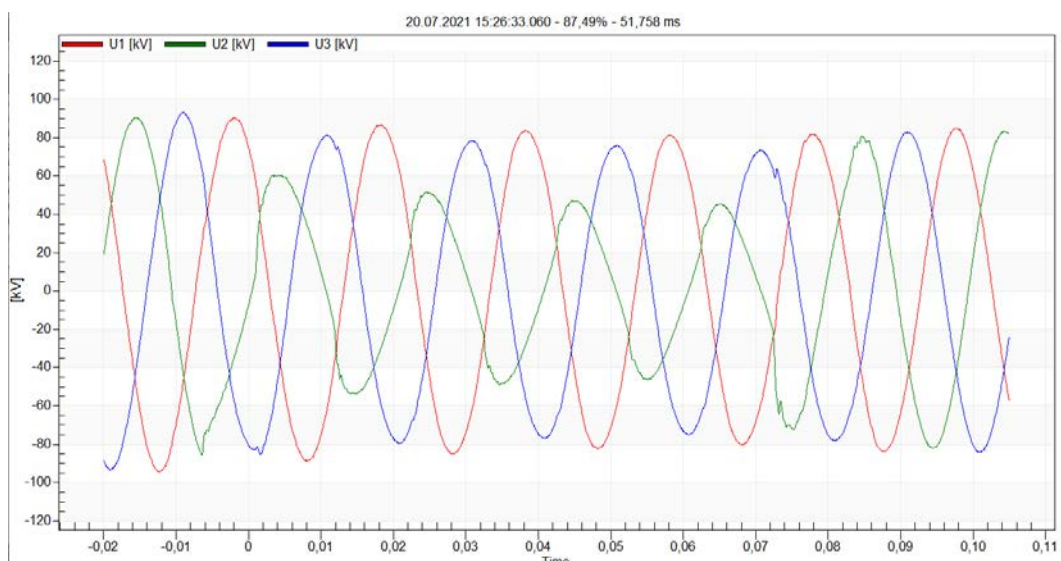
B ქვესადგურში ივლისის თვეში ერთერთი შემთხვევის დროს ძაბვის სინუსოიდის ღრიჩოებს და მის დენის სინუსოიდას აქვს ნახაზ 40-ზე მოცემული სახე. როგორც დიაგრამიდან ჩანს ამ შემთხვევაში ნათლადაა ასახული

არასიმეტრიული დენის გავლენა ძაბვის სინუსოიდაზე. არასიმეტრიული დენი პირდაპირ სულ მცირე დროის პერიოდში ახდენს გავლენას სინუსოიდის სახეზე.



ნახ. 41. ძაბვის სინუსოიდის უეცარი ჩავარდნა რამდენიმე პერიოდის განმავლობაში B ქვესადგურში

ნახაზი 41 -ის დიაგრამა გვაჩვენებს ძაბვის სინუსოიდის ღრიჩოებს კერძოდ ა და ბ ფაზებზე. რომელიც დაფიქსირდა A ქვესადგურში იანვრის თვეში. ძაბვის სინუსოიდი ღრიჩოები წარმოიქმნება მხოლოდ ნახევარი პერიოდის განმავლობაში შემდეგ კი იგი გარდაიქმნება ეგრედწოდებულ ძაბვის რამდენიმე პერიოდიან კლებაში.



ნახ. 42. ძაბვის სინუსოიდის უეცარი ჩავარდნა რამდენიმე პერიოდის განმავლობაში A ქვესადგურში

### 2.7.2 ძაბვის უეცარი მატება რამოდენიმე პერიოდის განმავლობაში (voltage swell)

ძაბვის უეცარი მატება წარმოადგენს ნომინალური მნიშვნელობიდან მცირე ზრდა მცირე ხანგრძლივობით. ეს ჩვეულებრივ გამოწვეულია ამომრთველებისა და გამთიშველების მოქმედების შედეგად გამოწვეული რკალის ანთებით.

### 2.7.3 ძაბვის უეცარი ჩავარდნა რამოდენიმე პერიოდის განმავლობაში (Voltage sag).

ძაბვის უეცარი ჩავარდნა წარმოადგენს გარკვეულ მცირე პერიოდიან ძაბვის მნიშვნელობის საშუალო მნიშვნელობის ჩავარდნას, რომლის ჩავარდნის დონე მერყეობს ნომინალური მნიშვნელობის 10%-დან 90%-მდე IEEE სტანდარტის მიხედვით (ხოლო EN 50160 სტანდარტის მიხედვით 1%-დან 90%-მდე ნომინალური ძაბვის). ძაბვი უეცარი ჩავარდნის ხანგრძლივობა მერყეობა  $\frac{1}{2}$  პერიოდიდან (0,01 წამი) 1 წუთამდე. შესაბამისად ძაბვი ჩაზნექვის ხანგრძლივობას ყოფენ სამ კატეგორიად.

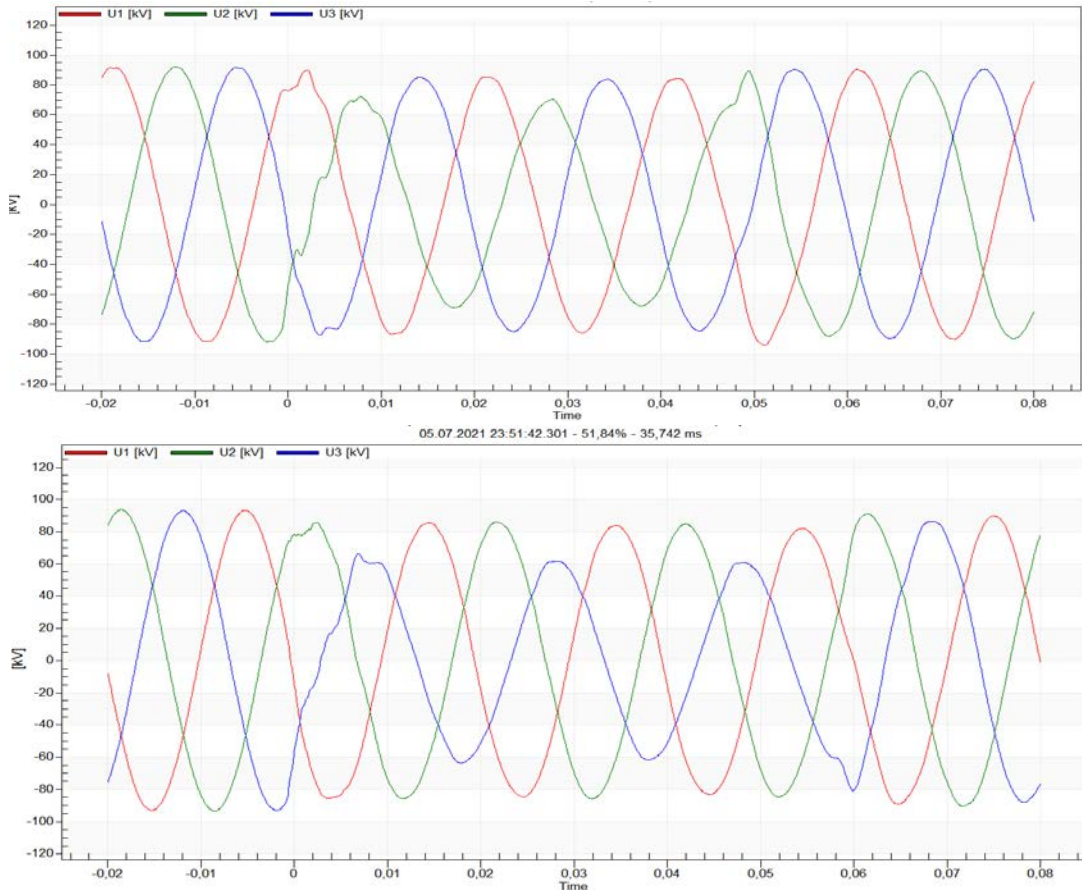
1. მცირე -  $\frac{1}{2}$  პერიოდიდან 30 პერიოდის ხანგრძლივობის;
2. წუთიერი - 30 პერიოდიდან 3 წამამდე ხანგრძლივობის;
3. დროებითი - 3 წამიდან 1 წუთამდე ხანგრძლივობის.

ძაბვი უეცარი ჩავარდნამ შეიძლება განსაკუთრებული გავლენა მოახდინოს კომერციულ და ინდუსტრიულ მომხმარებლებზე. იგი შეიძლება გახდეს ინდუსტრიული პროცესის ჩაქრობის მიზეზიც კი, მიუხედავად იმისა, რომ ის თითქმის არ შეიმჩნევა განათების სისტემებში როგორც ციმციმად. აგრეთვე მის შესაძლო ეფექტად შეგვიძლია ჩავთვალოთ ელექტრო სისტემის ჩაქრობა და მოწყობილობების  $k^2$  ნაადრევი დაბერება განსაკუთრებით ძრავების. აქედან გამომდინარე ასეთი დამახინჯებები განსაკუთრებით აქტუალურია იმ ინდუსტრიისთვის სადაც მოწყობილობების გაუმართავობამ შესაძლოა გამოიწვიოს უზარმაზარი ფინანსური დანაკარგები.

წარმოშობის მიზეზები:

ზოგადად ძაბვი უეცარი ჩავარდნის გამომწვევი მიზეზებია: ამინდი, მოკლედ ჩართვა (განსაკუთრებით ერთ ფაზა მოკლედ ჩართვა მიწასთან), სისტემის გადატვირთვა პიკურ დონემდე და ელექტრო ძრავის გაშვება. შესაბამისად შედეგად ვიღებთ გადამცემ ან დისტრიბუციის სისტემებში ხარვეზებს. მაგალითად

ქვესადგურის რომელიმე სალტის მინაერთზე აღნიშნული ხარვეზების შემთხვევაში მიმდინარეობს მოცემული სალტის მინაერთებზე ანალოგიური ხარვეზების გაჩენა სანამ საწყისი ხარვეზი არ გამოსწორდება. ძაბვის ჩავარდნის ყველაზე ცუდ თვისებად შეგვიძლია ჩავთვალოთ მისი მოქმედების არეალის გაზრდა, რომელიც განსაკუთრებულად ზემოქმედებს გადამცემ სისტემებში მიუხედავად მაღალი ძაბვის საფეხურისა.

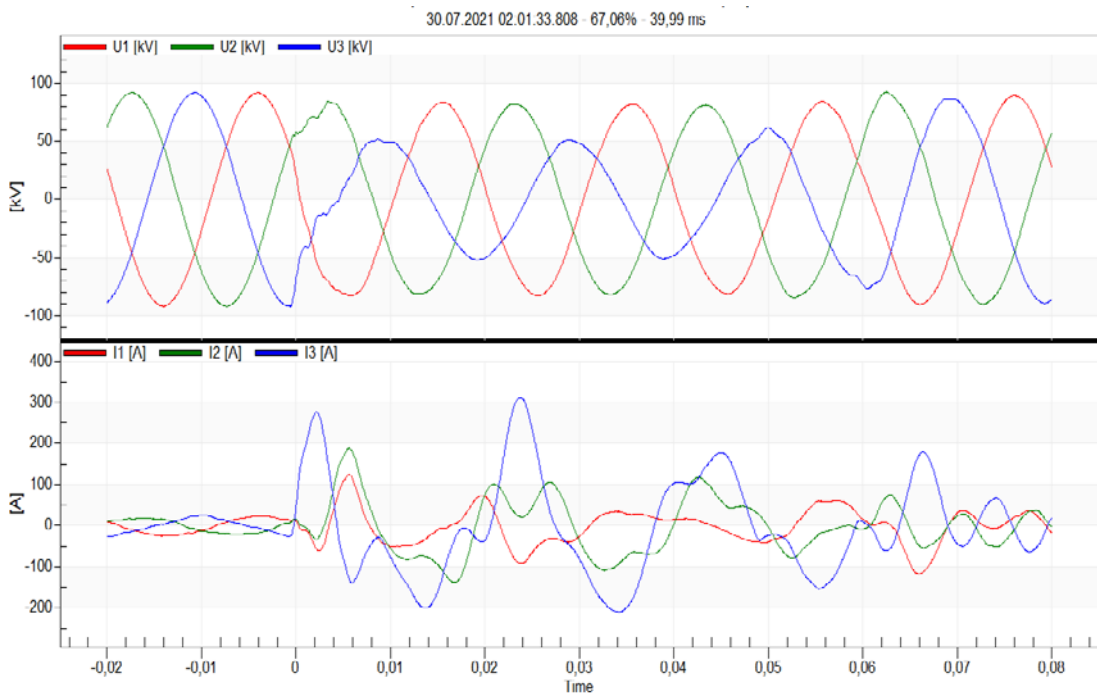


**ნახ. 43. ძაბვის სინუსოიდის უეცარი ჩავარდნა რამდენიმე პერიოდის განმავლობაში B ქვესადგურში 2022 წლის იანვრის თვეში**

ექსპერიმენტის პერიოდში A ქვესადგურებში დაფიქსირდა ძაბვისა სინუსოიდის უეცარი ჩავარდნის ნახაზ 43-ზე მოცემული შემთხვევები. პირველ შემთხვევაში წარმოდგენილია ივლისის თვე დიაგრამაზე ჩანს ბ ფაზის შემთხვევა რომელის 3 პერიოდის განმავლობაში განიცდის ვარდნას, ხოლო მეორე შემთხვევაში იანვრის თვე როდესაც ც ფაზის სინუსოიდა 4 პერიოდის განმავლობაში განიცდის

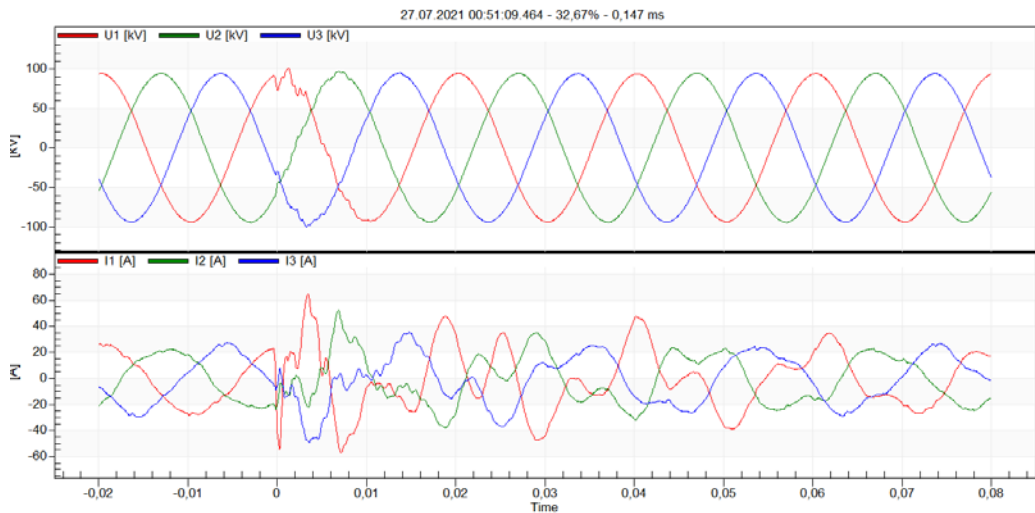
ვარდნას. აღნიშნული გამოწვეულია დიდი სიმძლავრის მქონე არასიამეტრიული დატვირთვის მომხმარებელი.

ნახაზ 44-ზე წარმოდგენილია 2021 წლის ივლისის და 2022 წლის იანვრის თვეებში საკვლევ A და B ქვესადგურებში დენისა და ძაბვის ანომალიების ველაზე გამოკვეთილი და რთული შემთხვევების რამდენიმე მაგალითი. მათი უმრავლესობა სისტემაში გამოწვეულია გრაკვეული შეშფოთებების წარმოქმნით.



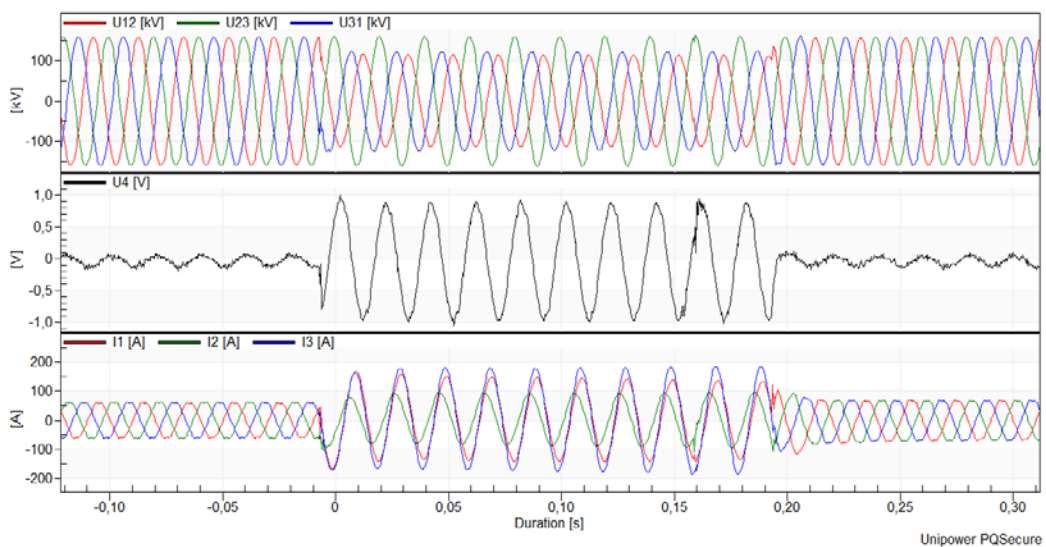
ნახ. 44. ძაბვისა და დენის სინუსოიდის ანომალიები B ქვესადგურში

ძაბვის რამდენიმე პერიოდული ვარდნა მომხმარებლის ობიექტისთვის იქნება დამოკიდებული იმაზე, თუ რა ხარისხის ენერგია მიეწოდება მომხმარებელს გადამცემი სისტემიდან ან განაწილების სისტემიდან. გადამცემი სისტემიდან მიწოდებულ მომხმარებელს, ძაბვის ვარდნა მცირეპერიოდული დამოკიდებული იქნება მხოლოდ გადამცემის სისტემის ენერგიაზე. გადამცემი ხაზის გაუმართაობა და დამცავი მოწყობილობების შემდგომი ავარიული გამორთვა იშვიათად ნებისმიერი მომხმარებლისთვის შეფერხების გამომწვევი გახდეს. თუმცა, ეს ხარვეზები იწვევს ძაბვის შემცირებას. დამოკიდებულია იმაზე რამდენად მგრძნობიარეა ელექტრო აღჭურვილობა. დანადგარების გამორთვა კი ყოველთვის იწვევს მნიშვნელოვან ფულად ზარალს.



ნახ. 45. ძაბვისა და დენის სინუსოიდის ანომალიები A ქვესადგურში

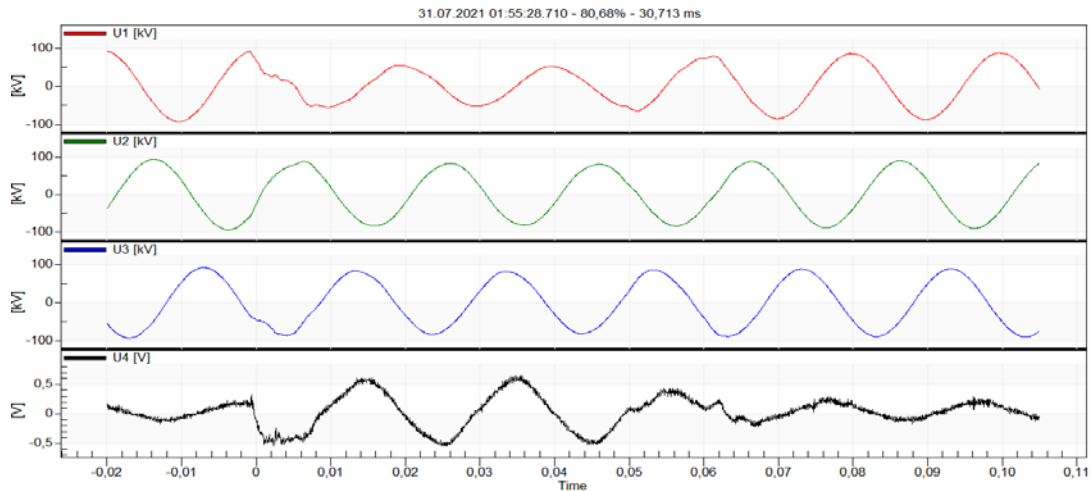
ძაბვის გადაჭარბება უკიდურესად გარდამავალი მოვლენაა, რომელიც იშვიათად ხდება, მაგრამ არანაკლებ შეიძლება უარყოფითად იმოქმედოს ელექტრონულ აღჭურვილობაზე და შეუძლია მათი სრული დაზიანებაც კი გამოიწვიოს. მთლიანი დანაკარგები გამოწვეულია არა მხოლოდ ტექნიკის დაზიანების გამო და რემონტის შედეგად მიღებული ხარჯებით. არამედ მიმდინარე ტექნიკურ ეკონომიკური პროცესის გამო უპირველეს ყოვლისა, შეჩერების გამო ძირითადი თანმდევი ხარჯები ჯანმრთელობის დაწესებულებების ოფისებსა და საწარმოო ქარხნებში.



ნახ. 46. ძაბვის უეცარი ჩავარდნა A ქვესადგურში (სინუსოიდა)

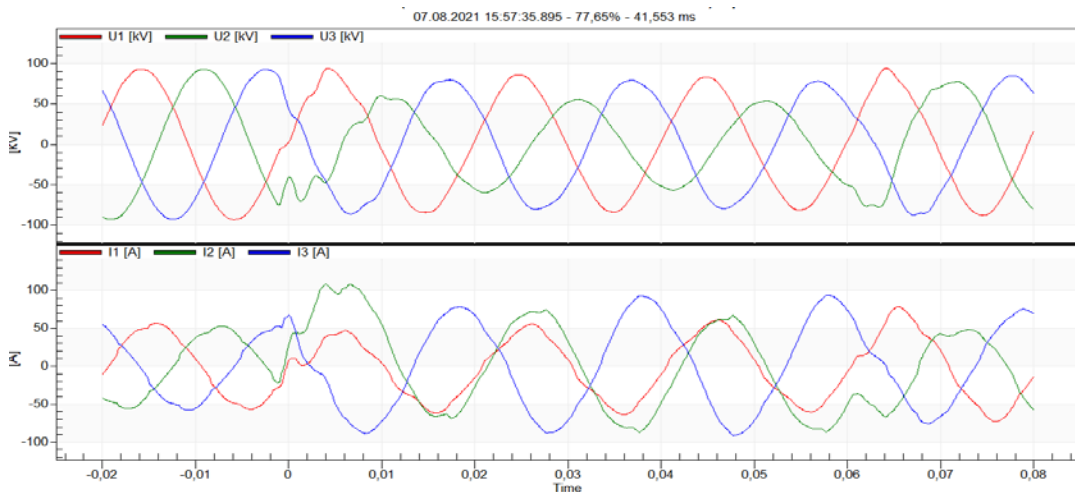


ნახაზ 46-ზე მოცემულია ანომალის დროს დენისა და ძაბვის სინუსოიდები ფაზების მიხედვით. დიაგრამის მიხედვით ანომალია წარმოადგენს ძაბვის უცვარ ჩავარდნას რამდენიმე პერიოდის განმავლობაში (Voltage sag).



ნახ. 47. ძაბვისა და დენის სინუსოიდის ანომალიები B ქვესადგურში იანვრის თვეში

მიუხედავად იმისა, რომ ზედმეტად ძაბვის გამო დაზიანება ძირითადად ხდება ინდუსტრიაში და დიდ სათემო და საოფისე კომპლექსებში, კერძო სექტორის ზარალის გამო მნიშვნელოვან რაოდენობას შეიძლება მიაღწიოს დაზიანებულმა ვიდეომასალამ, ტელევიზორის აღჭურვილობამ და პერსონალურ კომპიუტერებმა. ძაბვისგან დამცავი დანადგარები, როგორცაა დენის დამჭერები და სხვა დამცავი სისტემები შეიძლება დამონტაჟდეს დაბალ ფასად პოტენციურ დანაკარგებთან მიმართებაში, ამიტომ ეკონომიური აზრი აქვს ასეთი აღჭურვილობის დაყენებას.



ნახ. 48. ძაბვისა და დენის სინუსოიდის ანომალიები

გადამცემი სისტემაზე ძაბვის ვარდნის მიზეზები მსგავსია განაწილების სისტემის. მათ შორისაა ამინდი (განსაკუთრებით ელვა), სამშენებლო ავარიები, სატრანსპორტო ავარიები (ვერტმფრენი ან მსუბუქი თვითმფრინავი საერთო დამნაშავეა), ცხოველები ან სისტემის სხვა ნაწილზე არსებული გაუმართაობა, რაც იწვევს ძაბვის ვარდნას. ფიქსირდება დიდი ფრინველების ბუდეები რის შედეგადაც ხდება ფაზა მიწაზე მოკლედ შერთვები ან დამიწებები. ელვას ხშირად მიაწერენ გადამცემ და გამანაწილებელ ხაზებზე ავარიების გამომწვევ მიზეზებს, ის ყველაზე გავრცელებულ ფორმა ქსელში სინოსოიდური ანომალიების დაგენერირების. გარემო პირობების წემოქმედება ელექტროსისტემის ნაწილებზე ყოველთვის ხდება და ჩვენ არ შეგვიძლია მისი შეზღუდვა. არსებობს გარკვეული სახის დაცვის მექანიზმები მაგრამ ამ ეტაპზე მისი აღმოფხვრა ადამიანის შესაძლებლობების ზღვარს სცდება. ელექტროსისტემების ელემენტებზე გარემო პირობების ზემოქმედება შეიძლება ჩაითვალოს დენისა და ძაბვის სინუსოიდების ანომალიების ერთერთ მთავარ წყაროდ.

## 2.8 K ფაქტორი

K ფაქტორი წარმოადგენს საზომ ერთეულს ჰარმონიკული დატვირთვის დენების ეფექტს ტრანსფორმატორების გადახურებაზე. რომლის მნიშვნელობაც მერყეობს 1-დან 50-მდე და დასაშვები ნორმაა 1. როდესაც არასიმეტრიული დატვირთვა მიეწოდებელია ტრანსფორმატორიდან, საჭიროა მისი განტვირთვა მისი გადახურებისა და იზოლაციის გარღვევისაგან თავის ასარიდებლად. გრიგალური დენების და ტრანსფორმატორში ჰარმონიკული დანაკარგების ზრდა იწვევს დამატებით სითბოს გამოყოფას გრაგნილებში, რომლის ინდიკაცია ხდება K ფაქტორით. ტრანსფორმატორების მწარმოებელ ქარხანაში განისაზღვრება ტრანსფორმატორების ნომინალურ სიმძლავრეს, რომლის დროსაც K ფაქტორი ტოლი იქნება ერთის. შესაბამისად K ფაქტორის გაზრდის შემთხვევაში შეუძლებელია ტრანსფორმატორის ნომინალურად დატვირთვა, რადგან იწვევს გადახურებას და იზოლაციის დარღვევას.

K ფაქტორი არის რიცხვითი გაანგარიშება, რომელიც ეფუძვნება არასიმეტრიული დატვირთვის მიერ გენერირებულ ჰარმონიკებს.

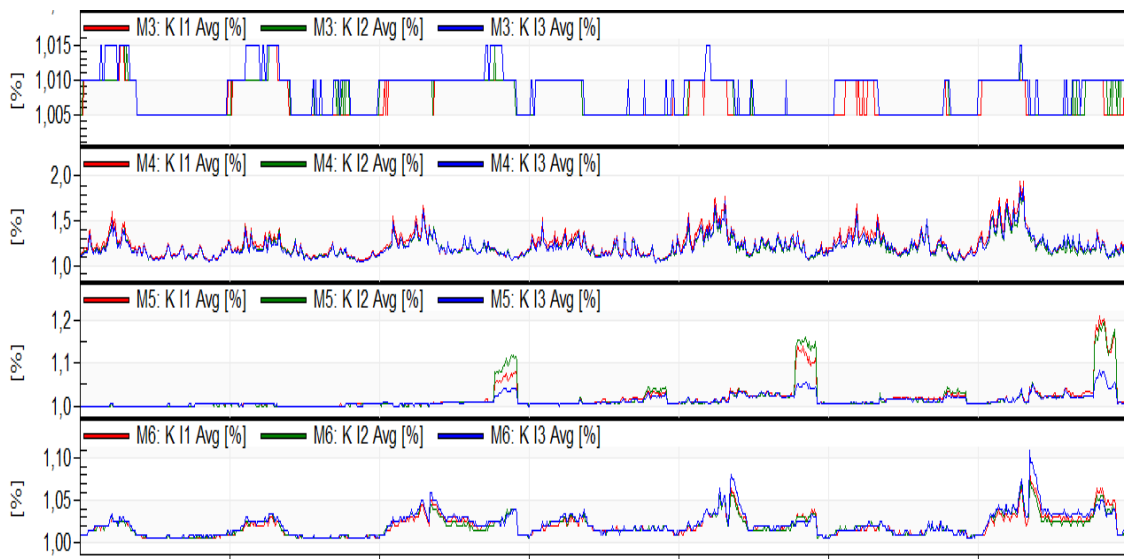
K ფაქტორი გამოითვლება შემდეგი ფორმულით

$$\frac{\sum_1^{34} (i_h * h)^2}{\sum_1^{34} i_h^2}$$

სადაც h წარმოადგენს ჰარმონიკების რიგს.

საქართველოში მოქმედ ქსელის წესებში არ არის გათვალისწინებული მისი ზღვრები. შესაბამისად მისი შეფასება მოხდება ლიტერატურიდან გამომდინარე [15].

ნახაზ 49-ზე მოცემულ დიაგრამაზე წარმოდგენილია K ფაქტორი პროცენტებში ყველა ქვესადგურში ფაზების მიხედვით.



ნახ. 49. K ფაქტორი

დიაგრამიდან გამომდინარე K ფაქტორი მიახლოებულია 1-თან რომელიც საუკეთესო მდგომარეობაა აღნიშნული პარამეტრისათვის. მხოლოდ ქვესადგურ A-ში უახლოვდება 2 მცირე პერიოდიანი ინტერვალებით.

### თავი 3. ელექტრული ენერჯის ხარისხის პარამეტრების ნორმის ფარგლებში შენარჩუნების ხერხები

ელექტრული ენერჯის ხარისხის პარამეტრების ნორმირების დონის გასაკონტროლებლად გამოიყენებენ სხვადასხვა სახეობის ელექტრო მოწყობილობებს ან/და ფილტრებს.

**გადამეტაბვისგან დამცავი მოწყობილობა:** მოწყობილობა, რომელიც იცავს ელექტრო აღჭურვილობას ძაბვის პიკური ზვავებისგან, ცნობილია როგორც გადამეტაბვისგან დამცავი, ჩამხშობი. როდესაც ხდება ძაბვის სწრაფი ზრდა, მოწყობილობა ამოიცივებს ასეთ ზრდას და ზღუდავს ძაბვის დონეს იმ სიდიდემდე, რომელიც შეიძლება გადაიტანოს სისტემის მიერ გადაჭარბებული ენერჯის დაცლით მიწაზე [12].

**ძაბვის რეგულატორები:** მოწყობილობა, რომელიც ავტომატურად ინარჩუნებს მუდმივ ძაბვის დონეს, ცნობილია როგორც ძაბვის რეგულატორი. იგი აწარმოებს ფიქსირებულ გამომავალ ძაბვას, მიწოდებული შეყვანის ან დაკავშირებული დატვირთვის შესაბამისად [12].

**გარდამავალი პროცესისგან დაცვა:** ელექტრონული მოწყობილობა დაცული უნდა იყოს გარდამავალი ფაქტორებისგან არასიმეტრიული დენის ჩახშობის ან მისგან დამცავი მოწყობილობებით. ასიმეტრიული დენის ჩახშობი შეიძლება დამონტაჟდეს მიერთების წერტილში, სადისტრიბუციო პანელებზე და ცალკეულ დატვირთვებზე მგრძობიარე ელექტრონული აღჭურვილობის დასაცავად [12].

**მაღალი ძაბვის რეზონანსული სქემები:** შეიძლება გამოყენებულ იქნას ინდუქციურ დატვირთვებზე, რათა ჩაახშოს გარდამავალი პროცესი, რომელიც ბუნებრივად წარმოიქმნება დატვირთვის გამორთვისას. ტიპური მაღალი ძაბვის რეზონანსული სქემები იყენებენ რეზისტორ-კონდენსატორის (RC) წრედს, ლითონის ოქსიდის ვარისტორს ან დიოდს [13].

**სიმძლავრის კოეფიციენტის გასწორება:** დაბალი სიმძლავრის კოეფიციენტი შეიძლება გამოსწორდეს კონდენსატორის ბანკების გამოყენებით ინდუქციური დატვირთვების გასაწესებლად. ბანკები შეიძლება განთავსდეს თითოეულ ინდუქციურ დატვირთვაზე, ან ისინი შეიძლება დამონტაჟდეს ზევით ძრავების

ჯგუფის დასაცავად, ან ერთი კომპენსაციის სისტემა შეიძლება დამონტაჟდეს ინსტალაციის დასაწყისში. ყველა შემთხვევაში, კონდენსატორის ბანკები ასწორებენ სიმძლავრის კოეფიციენტს ბანკის ზემოთ, მაგრამ არა ქვემოთ [14].

**სინქრონული კომპენსატორების გამოყენება:** სინქრონული ძრავები შეიძლება გამოყენებულ იქნას სისტემის სიმძლავრის კოეფიციენტის მუდმივი კორექტირებისთვის სინქრონული ძრავის ველის აგზნების რეგულირებით. ძრავა შეიძლება შეიქმნას ისე, რომ მოიქცეს ცვლადი კონდენსატორის მსგავსად, მოწყობილობა, რომელსაც სინქრონული კომპენსატორი ეწოდება [14].

**არაფაზირებული დატვირთვების დასტაბილურება:** დისბალანსის გამოსწორება შესაძლებელია ერთფაზიანი დატვირთვების გადანაწილებით სხვადასხვა სქემებზე, რათა მინიმუმამდე დაიყვანოს მაქსიმალური დისბალანსი გარკვეული პერიოდის განმავლობაში, როგორცაა მთელი კვირა [13].

**ჰარმონიკული ფილტრები:** შეიძლება გამოყენებულ იქნას ჰარმონიკული დამახინჯების დასაშვებ დონემდე შესასუსტებლად. ჰარმონიკული ფილტრის თითოეული ეტაპი შედგება კონდენსატორებისგან, ინდუქტორებისგან და რეზისტორებისგან, რომლებიც შექმნილია გარკვეული ჰარმონიკული სიხშირის შესუსტებისთვის. ფილტრები არის მოწყობილობები, რომლებიც გამოიყენება სისტემაში არაწრფივი დატვირთვების შედეგად წარმოქმნილი ჰარმონიკების მოსაშორებლად. ფილტრები მოთავსებულია არაწრფივი დატვირთვების მახლობლად, ისინი ან გვერდს უვლიან ჰარმონიკულ დენებს ან ბლოკავს ჰარმონიკას ენერგოსისტემაში შესასვლელად [11].

**უწყვეტი ელექტრომომარაგება (UPS):** არის ელექტრო მოწყობილობა, რომელიც მუშაობს როგორც სარეზერვო და უზრუნველყოფს სისტემის მიწოდებას გადაუდებელი ან ძირითადი დენის უკმარისობის დროს [13].

**კონდენსატორთა ბანკის გამოყენება** მაღალი ძაბვის საფეხურზე ძაბვის ვარიაციის გასასწორებლად. განსაკუთრებით დიდ დანადგარებზე რეკომენდირებულია ფაქტობრივი ოპერაციული პირობების შემოწმება და შედარება იმ სავარაუდო პირობებთან, რომლებისთვისაც შეიქმნა კონდენსატორის დანადგარები, რათა უზრუნველყონ, რომ ისინი არ განსხვავდებოდეს დასაშვებ ზღვარზე მეტით. ეს იმიტომ ხდება, რომ კონდენსატორი ძალიან მგრძობიარეა ზოგიერთი სამუშაო პირობების მიმართ, როგორცაა ძაბვის რყევები და სისტემაში

ჰარმონიული შინაარსი. რომელიმე ამ ან V და Vh-ის გადაჭარბებამ შეიძლება შეამციროს კონდენსატორის ერთეულების სიცოცხლე და გამოიწვიოს ცალკეული ერთეულების ხშირი ჩავარდნები. ამან ასევე შეიძლება გამოიწვიოს ერთეულებზე გადაჭარბებული დაზიანება და გაზარდოს ჰარმონიული შინაარსი. ამ ყველაფერმა შეიძლება გამოიწვიოს კონდენსატორის ერთეულების უკმარისობა, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს კასკადის უკმარისობაც კი, გაზარდოს დაზიანება და kVAr-ის დისბალანსი თითოეულ ფაზაში და მოახდინოს მთლიანი კონდენსატორის ქსელის დესტაბილიზაცია. დაზიანების და დაზიანების რყევების ეფექტი შეიძლება შემოწმდეს კონდენსატორის ხაზის დენის მეშვეობით,  $I_c$ , რომელიც წარმოადგენს კონდენსატორის ერთეულების ტევადობის C საზომს. კონდენსატორის დენი უნდა შეესაბამებოდეს დაპროექტებულ (რეიტინგულ) დენს პლუს დასაშვებ ცვალებადობას. ამაზე მაღალი დენი ნიშნავს დაზიანების ცვალებადობას ან სისტემაში ჰარმონიის არსებობას ან ორივეს ერთად. მიუხედავად იმისა, რომ დაზიანება შეიძლება გაიზომოს ვოლტმეტრით და დენი ამპერმეტრის მეშვეობით სამ ხაზში, ჰარმონიის შემცველობა შეიძლება შემოწმდეს ოსცილოსკოპით. თუ ფაქტობრივი ოპერაციული პირობები განსხვავდება დაპროექტებული პარამეტრებისგან დასაშვებზე მეტად, შესაბამისი ზომები იქნება აუცილებელი სამუშაო პირობების დასაშვებ საზღვრებში აღსადგენად, მაგალითად, სისტემაში სერიული რეაქტორების ან ფილტრის სქემების მიწოდებით, როგორც უკვე განვიხილეთ.

ელექტრული ენერჯის ხარისხის საკონტროლოდ და მისი პარამეტრების ნორმის ფარგლებში შესაანარჩუნებლად ფართოდ გამოიყენება ტევადურ-ინდუქციური ფილტრები. რომელთა საშუალებით ხდება დამახინჯებული დენისა და დაზიანების სინუსოიდის ფორმის აღდგენა. ელექტრული ენერჯის ხარისხის კონტროლთან ერთად აუცილებელია მოხდეს პარამეტრების ფიზიკურად გამოსწორების გზების დასახვაც. ამისათვის გამოიენება სინქრონული სტატიკური კომპენსატორი (STATCOM) და სტატიკური ვარ კომპენსატორი (SVC) [13].

**სინქრონული სტატიკური კომპენსატორი** არის უკიდურესად სწრაფი და საიმედო სისტემა, რომლის რეაგირების დრო 1 მილიწამზე ნაკლებია. ამ ცალკეულ მოწყობილობას შეუძლია გადაჭრას მომხმარებლის სხვადასხვა გამოწვევა, მათ შორის დაზიანების ცვალებადობის მინიმალიზაცია და ციმციმის შერბილება, რომელიც

გამოწვეულია მძიმე ინდუსტრიული დატვირთვით, როგორცაა ელექტრული რკალის ღუმელები, მაღაროს სახვევები, ნავსადგურის ამწეები და ექსკავატორები და სხვა. იგი კლასიფიცირებულია მოქნილი ცვლადი დენის გადამცემი სისტემის მოწყობილობებით. ტექნოლოგია დაფუძნებულია ნახევრადგამტარი ელემენტებით მოდულური მრავალი დონის კონფიგურაციაში.

დინამიური რეაქტიული დენის გამომავალი დიაპაზონი არის სიმეტრიული (ჩვეულებრივი დარღვეული ქსელის პირობებში); თუმცა, არასიმეტრიული კონსტრუქციები. შესაძლებელია მექანიკურად ან ტირისტორული გადართვის შუნტის ელემენტების შემოღებით ერთიანი კონტროლის სისტემებით, რათა დაფაროს ყველაზე ჩვეულებრივი აპლიკაციები. სტატიკური ვარ კომპესატორის დიზაინი და სწრაფი რეაგირება ხდის ტექნოლოგიას ძალიან მოსახერხებელი ძაბვის შესანარჩუნებლად ქსელის გაუმართაობის დროს (რადგან სტატიკური ვარ კომპესატორის შეუძლია უზრუნველყოს მოკლედ შერთვის დენის სწრაფი შეზღუდვა, რომელიც შემოიფარგლება ნომინალური დენით), რაც აძლიერებს ძაბვის მოკლევადიანი სტაბილურობას. გარდა ამისა, სტატიკურ ვარ კომპესატორებს შეუძლიათ უზრუნველყონ სიმძლავრის კოეფიციენტის კორექტირება, რეაქტიული სიმძლავრის კონტროლი, დაბალი სიხშირის სიმძლავრის რხევების დემპიტირება (ჩვეულებრივ, რეაქტიული სიმძლავრის მოდულაციის საშუალებით), აქტიური ჰარმონიკული ფილტრაცია, ციმციმის შერბილება და ენერჯის ხარისხის გაუმჯობესება. ტიპური აპლიკაციებია ელექტროენერჯის გადაცემაში, ელექტროენერჯის განაწილებაში, მძიმე სამრეწველო ქარხნების ელექტრო ქსელებში, რკალის ღუმელებში, მაღალსიჩქარიანი სარკინიგზო სისტემებში და სხვა ელექტრო სისტემებში, სადაც ძაბვის სტაბილურობასა და დენის ხარისხს უდიდესი მნიშვნელობა აქვს.

ტიპური სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის კონფიგურაცია შედგება მრავალ დონის ნახევრადგამტარებისაგან, რომლებიც დაფუძნებულია ფაზურ რეაქტორებზე და ამაღლებული ტრანსფორმატორის საფეხურებზე. იგი შუნტურად არის დაკავშირებული ქსელთან. რეაქტიული დენი უზრუნველყოფილია ან ქრება კონტროლირებადი შიდა ძაბვის ტალღის ფორმის წარმოქმნით. დღეს ბაზარზე არსებული სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის უმეტესობა ფუნქციონირებისთვის საჭიროებს ქსელის ძაბვის მითითებას (ქსელის

სიმტკიცის განსაზღვრული დონით). ძაბვის ტალღის ფორმა მორგებულია ქსელის კავშირის წერტილის ძაბვის მითითებით. ზოგადად, სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის ფუნქციონირებს როგორც ცვლადი დენის კონტროლირებადი მოწყობილობა, თუმცა გამომავალი დენის კონტროლი მიიღწევა სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის შიდა ძაბვის რეგულირებით (ფაზის რეაქტორის უკან) ამპლიტუდაში, ხოლო კუთხე ახლოს არის 90 გრადუსთან მიმართებაში. თუ სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის ძაბვის ამპლიტუდა უფრო მაღალია, ვიდრე სისტემის ძაბვის ამპლიტუდა, ტევადობის რეაქტიული სიმძლავრე მიეწოდება ქსელს.

თუ, პირიქით, დენი მიედინება სისტემიდან სინქრონული სტატიკური კომპენსატორიში და უზრუნველყოფილია ინდუქციური რეაქტიული სიმძლავრე. რეაქტიული დენის რაოდენობა დამოკიდებულია ტრანსფორმატორის მოკლე ჩართვის რეაქტიულობაზე და ძაბვის განსხვავებაზე და შემოიფარგლება თერმული ლიმიტებით. ნორმალურ მუშაობაში, ანუ სისტემის ძაბვა გარკვეულ საზღვრებშია, ძაბვის ორივე ამპლიტუდა თანაბარია და რეაქტიული სიმძლავრე არ იცვლება ქსელთან. დადგენილი კონტროლია, თუ ქსელის ძაბვა ზღვრულ მნიშვნელობას აღემატება, სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის კონტროლი შეამცირებს სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის ძაბვის ტალღის ფორმის ამპლიტუდას, შესაამისად სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის იმოქმედებს როგორც ინდუქციური ელემენტი და შთანთქავს რეაქტიულ ძალას ქსელიდან. როდესაც ქსელის ძაბვა ზღვრულ მნიშვნელობას აღემატება, ძაბვის ტალღის ფორმის სიდიდე გაიზრდება და სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის იმოქმედებს როგორც ტევადობის ელემენტი და უზრუნველყოფს რეაქტიულ დენს ქსელში.

თანამედროვე დიზაინები მოდულარულია და იძლევა მასშტაბურობისა და მოქნილობის მაღალ დონეს. შესაბამისად უზრუნველყოფს მთლიან საჭირო დინამიურ და სტაბილურ მდგომარეობას. შუნტის ელემენტების დამატებით, სუფთა სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის მოწყობილობის სიმეტრიული გამომავალი დიაპაზონი შეიძლება დარეგულირდეს ისე, რომ დააკმაყოფილოს შესრულების არასიმეტრიული მოთხოვნები. პირობებისთვის, სადაც საჭიროა სწრაფი არასიმეტრიული დინამიური დიაპაზონი, ერთის მხრივ, ტირისტორებით



გადართვადი რეაქტორები და კონდენსატორები შეიძლება მუშაობდეს პარალელურად. მეორეს მხრივ, მექანიკურად გადართული რეაქტორები და კონდენსატორები შეიძლება დაემატოს ნელი რეაგირების მუშაობის ოპტიმიზაციას და უზრუნველყოს დამატებითი სტაბილური სიმძლავრე, როგორც ამას მოითხოვს ტიპური შიდა დღის დატვირთვის ნაკადის ცვლილებები.

სტატიკური სინქრონული კომპენსატორი, ან სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის არის აქტიური ჰარმონიკული ფილტრისა და დინამიური რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსატორის კომბინაცია, რომელიც უზრუნველყოფს რეალურ დროში რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაციას და აქტიურ ჰარმონიკულ ფილტრაციას.

სინქრონული სტატიკური კომპენსატორს, რომლებსაც შეუძლიათ გადაჭრას ენერჯის ხარისხის რიგი გამოწვევები ერთი ერთეულის ფარგლებში, უზრუნველყოფენ სტაბილურ და ზუსტ რეაქტიული სიმძლავრის ნაკადს ჩვეულებრივი გადაწყვეტილებების ნაკლოვანებების გარეშე, როგორცაა კონდენსატორის ბანკები, შუნტირებადი რეაქტორების ბანკები და სინქრონული კონდენსატორები. ეს ჩვეულებრივი ტექნოლოგიები ხშირად ძალიან ნელია ტევადობის ან ინდუქციური სიმძლავრის გასაკონტროლებლად და სტაბილური ენერგოსისტემის უზრუნველსაყოფად.

სინქრონული სტატიკური კომპენსატორი არის უკიდურესად სწრაფი და საიმედო ენერგო სისტემა, რომლის რეაგირების დრო 1 მილიწამზე ნაკლებია. ამ ცალკეულ მოწყობილობას შეუძლია გადაჭრას მომხმარებლის სხვადასხვა გამოწვევა, მათ შორის ძაბვის ცვალებადობის მინიმიზაცია და ციმციმის შერბილება, რომელიც გამოწვეულია მძიმე ინდუსტრიული დატვირთვით, როგორცაა ელექტრული რკალის ღუმელები, მადაროს სახვევები, ნავსადგურის ამწეები და ექსკავატორები და სხვა.

სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის არის სწორი გადაწყვეტა მძიმე ინდუსტრიისთვის ენერჯის ხარისხის შემდეგი გამოწვევების გადასაჭრელად:

- ძაბვის ცვალებადობა და ციმციმი
- სიმძლავრის კოეფიციენტი
- ჰარმონიკული დამახინჯებები
- ძაბვის დაცემა და გადაძაბვა

- გადამცემი და გამანაწილებელი ქსელის ჩაკეტილი სიმძლავრეები ოპერატიული მახასიათებლები:

ციმციმის შემცირება – თანამედროვე მაღალსიხშირის ტექნოლოგია და რეალურ დროში კონტროლის სტრატეგია საშუალებას აძლევს უზრუნველყოს ციმციმის შესანიშნავი შემცირება.

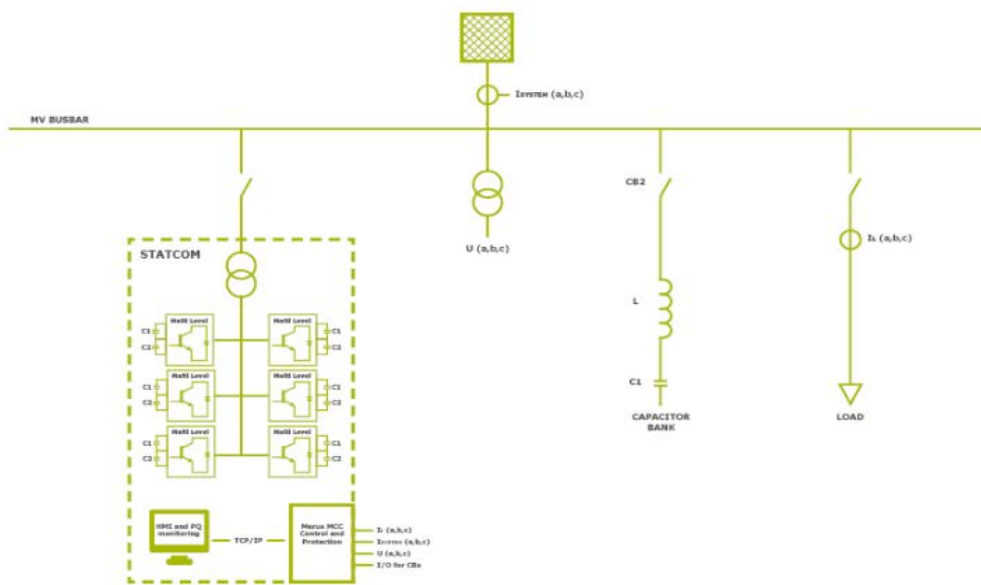
ელექტრული რკალის ღუმელები - ძაბვის სტაბილიზაცია ამცირებს შეხების დროს და ელექტროდის მოხმარებას, ზრდის ქარხნის პროდუქტიულობას.

ძაბვისა და ჰარმონიკული დამახინჯების აღმოფხვრა ამცირებს რეაქტიული სიმძლავრის მოთხოვნას და ზრდის ელექტრული სისტემის სიმძლავრეს.

სამთო და მძიმე მრეწველობა - დინამიური რეაქტიული სიმძლავრის კომპენსაცია ასტაბილურებს ენერგოსისტემას, განსაკუთრებით დიდი ძრავის გაშვებისას, რაც უზრუნველყოფს ენერგოსისტემის საიმედოობას.

განახლებადი ენერჯის შესაბამისობაში მოყვანა ქსელთან კავშირის მკაცრ კრიტერიუმებთან, რომლებიც მიიღწევა დინამიური ძაბვის კონტროლისა და ძაბვის სტაბილურობის უზრუნველყოფით საერთო შეერთების წერტილში. მოიცავს მზის პანელებს, ქარის ელექტროსადგურებს და მზის პანელების დამონტაჟებას [19].

ნახაზ 50-ზე წარმოდგენილია სტატიკური სინქრონული კომპენსატორის მარტივი სქემა:



ნახ. 50. სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის ჩანაცვლების სქემა

სტატიკური ვარ კომპენსატორი (SVC) არის ელექტრული მოწყობილობების ნაკრები მაღალი ძაბვის ელექტროგადამცემი ქსელების სწრაფი მოქმედების რეაქტიული სიმძლავრის უზრუნველსაყოფად. სტატიკური ვარ კომპენსატორი არის მოქნილი ცვლადი დენის გადამცემი სისტემის ნაწილი, რომელიც არეგულირებს ძაბვას, სიმძლავრის კოეფიციენტს, ჰარმონიკებს და ასტაბილურებს სისტემას. სტატიკურ ვარ კომპენსატორს არ აქვს მნიშვნელოვანი მოძრავი ნაწილები (გარდა შიდა გადართვის მოწყობილობებისა). სტატიკური ვარ კომპენსატორის გამოგონებამდე სიმძლავრის ფაქტორის კომპენსაცია წარმოადგენდა დიდი მზრუნავი მანქანების ფუნქციას, როგორცაა სინქრონული კონდენსატორები ან კონდენსატორების ბანკები.

სტატიკური ვარ კომპენსატორი არის წინააღმდეგობის შესატყვისი ავტომატური მოწყობილობა, რომელიც შექმნილია სისტემის მიახლოების მიზნით ერთიანობის სიმძლავრის ფაქტორთან. სტატიკური ვარ კომპენსატორი გამოიყენება ორ ძირითად სიტუაციაში:

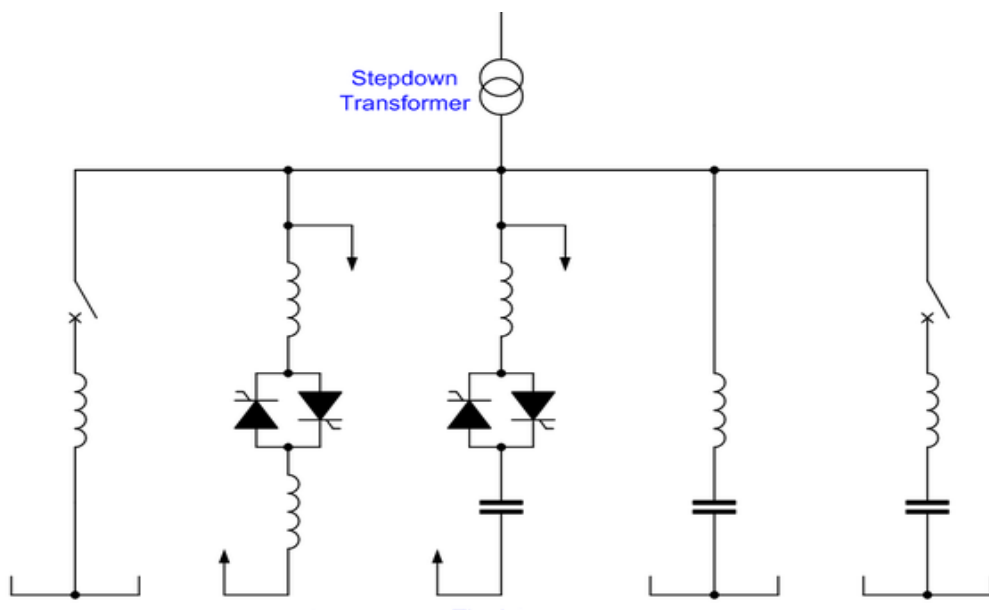
- ენერგოსისტემის გადამცემი ძაბვის რეგულირებისთვის
- დიდ სამრეწველო დატვირთვებთან ახლოს, ენერჯის ხარისხის გასაუმჯობესებლად

გადამცემ სისტემებში, სტატიკური ვარ კომპენსატორი გამოიყენება ქსელის ძაბვის რეგულირებისთვის. თუ ენერგოსისტემის რეაქტიული დატვირთვა არის ტევადი (წამყვანი), სტატიკური ვარ კომპენსატორი გამოიყენებს ტირისტორით კონტროლირებად რეაქტორებს სისტემიდან რეაქტიული ენერჯის მოსახმარად, რაც ამცირებს სისტემის ძაბვას. ინდუქციურ (ჩამორჩენილ) პირობებში, კონდენსატორის ბანკები ავტომატურად ჩართულია, რაც უზრუნველყოფს სისტემის უფრო მაღალ ძაბვას. ტირისტორით კონტროლირებადი რეაქტორის შეერთებით, რომელიც მუდმივად ცვალებადია, კონდენსატორის საფეხურთან ერთად, წმინდა შედეგი არის მუდმივად ცვლადი წამყვანი ან ჩამორჩენილი სიმძლავრე.

ეს არის პარალელურად დაკავშირებული სტატიკური ტიპის ვარ შთამნთქმელი ან გენერატორი, სადაც გამომავალი მოდიფიცირებულია ისე, რომ შეიცვალოს ინდუქციური ან ტევადი დენი, სადაც ეს არეგულირებს ან მართავს დენის შესაბამის ფაქტორებს, ძირითადად ავტობუსის ძაბვის ფაქტორს.

სტატიკური ვარ კომპენსატორი დამოკიდებულია ტირისტორებზე, რომლებსაც არ აქვთ კარიბჭის გამორთვის უნარი. ტირისტორების ფუნქციონალურობასა და მახასიათებლებს წარმოადგენენ სტატიკური ვარ კომპენსატორის ადაპტირებადი რეაქტიული წინაღობა. გადამწყვეტი მოწყობილობა, რომელიც შედის ამ მოწყობილობაში, არის TCR და TSR, რომლებიც არის ტირისტორით კონტროლირებადი კონდენსატორი და ტირისტორით კონტროლირებადი რეაქტორი [18].

ნახაზ 51-ზე ნაჩვენებია სტატიკური ვარ კომპენსატორის უმარტივესი სქემა:



ნახ. 51. სინქრონული ვარ კომპენსატორი

## თავი 4. მკვეთრად ცვალებადი და არასიამეტრიული დატვირთვის მქონე მეტალურგიული ქარხნის ელექტრული ენერჯის ხარისხის გამოკვლევა

მოცემული ქარხანა აღჭურვილია ელექტრორკალური ღუმელებით. შესაბამისად მისი მუშაობის პრინციპიდან გამომდინარე ქვაბებში ლითონის ლღო მიმდინარეობს ელექტრული რაკალის საშიულებით. აღნიშნული ლითონის გადამამუშავებელი საამქროს მუშაობის პრინციპი კი შემდეგია ელექტრორკალური ღუმელებში სითბოს წყაროდ გამოიყენება ელექტროენერჯია, განსხვავებით თხევად, მყარ და აირად სათბობიან ღუმელებისაგან. ელექტროღუმელები შეიცავს სამუშაო არეს ელექტროდებით და დენმიმცვანებით, ელექტროდების დამჭერ და გადასაადგილებელ მექანიზმს, ღუმლის საბრუნავ მექანიზმსა და კაზმის ჩასატვირთ მოწყობილობას.

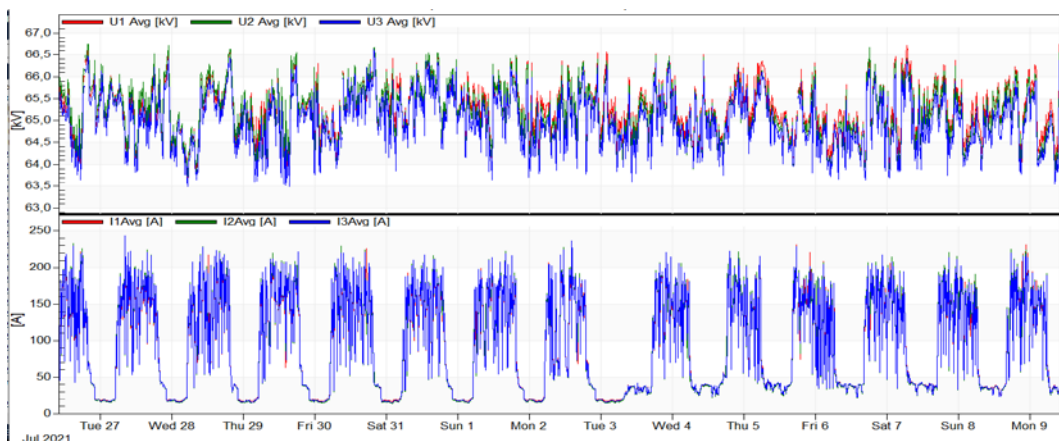
ელექტროღუმლის სამუშაო სივრცე შემოფარგლულია: ზემოდან კამერით, გვერდებიდან კედლებით და ქვემოდან - ძირით. ელექტრორკალური ღუმელებში მეტალურგიული აგრეგატები მარტივია და ავტომატიზირებული. საწყისი მასალები სწრაფად ხურდება ნებისმიერ ტემპერატურამდე. ტემპერატურა ზუსტად რეგულირდება. მაქსიმალური სითბო გამოიყოფა იქ, სადაც ეს აუცილებელია., გამოყოფილი ნამწვი და პროდუქტები მინიმალურია, რაც იძლევა ვაკუუმში ან მაღალი წნევის ქვეშ პროცესის წარმართვის საშუალებას.

ელექტრორკალურ ღუმელებში ხარისხობრივად შესაძლოა დადნეს ისეთი ლეგირებული და მაღალლეგირებული ფოლადები, რომელთა დადნობაც შეუძლებელია მარტენის ღუმელში ან კონვერტერებში. შესაძლოა ლითონების ლეგირება ისეთი ელემენტებით, რომლებიც ჟანგბადისკენ მაღალი სწრაფვით ხასიათდებიან (ალუმინი, ტიტანი და სხვა). სხვა ღუმელებისგან განსხვავებით ელექტრორკალურღუმელებში შესაძლებელია ფოლადის უფრო ღრმა განჟანგვა, რის შედეგადაც მიღებული ფოლადი ხასიათდება არლითონური ჩანართებისა და გოგირდის დაბალი შემცველობით.

აღნიშნული მოქმედების პრინციპიდან გამომდინარე ელექტრო რკალურ ღუმელზე მომუშავე ლითონგადამამუშავებელი ქარხნები წარმოადგენენ

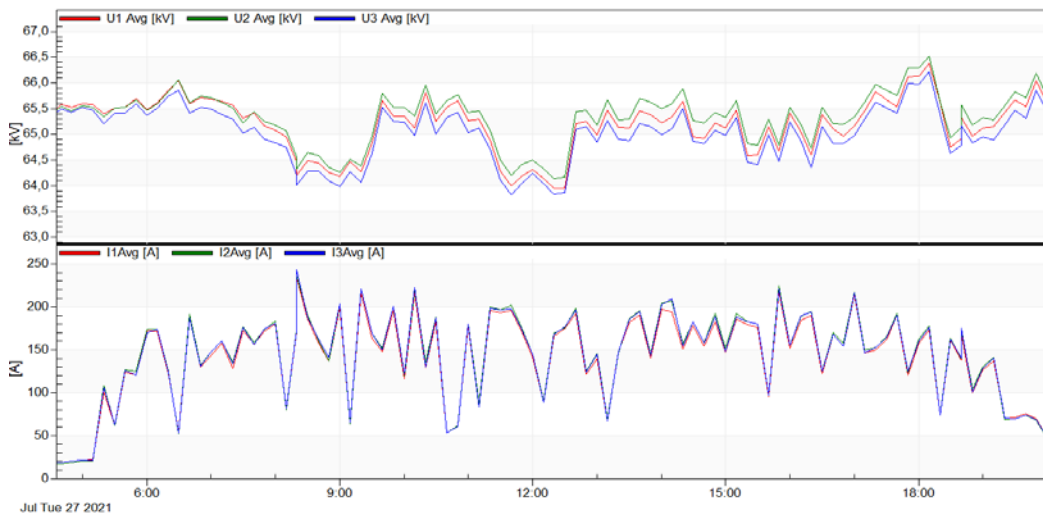
მკვეთრად ცვალებად და არასიმეტრიულ დატვირთვის. ეს კი ყველაზე მძიმე წინაპირობა ელექტრული ენერჯის ხარისხის დაბინძურების დონის ზრდაში. ასეთი მომხმარებლების კონტროლი წინაპირობა ელექტროსისტემაში ხარისხიანი ელექტროენერჯის არსებობის. ამიტომ თანამედროვე ელექტროსისტემებში მუდმივად ხორციელდება მსგავსი მომხმარებლების მუდმივი მონიტორინგი. მათგან ელექტრო ქსელზე გავლენის შესამცირებლად. ასეთი მომხმარებლები როგორც წესი წარმოადგენენ საკმაოდ მძლავრი მოხმარების დანადგართა ერთობლიობას და ეკონომიკური პირობებიდან გამომდინარე რეკომენდირებულია მათი მუშაობა 24 საათიანი ციკლით.

ქვემოთ წარმოდგენილია საქართველოში მდებარე ელექტრო რკალურ ღუმელზე მომუშავე ერთ-ერთი ქარხნის 2 კვირიანი (26.07.2021-09.08.2021 წწ) მონიტორინგის შედეგები ზაფხულის პიკური დატვირთვის პერიოდში. ეს ქარხანა აღჭურვლია სინქრონული სტატკური კომპენსატორი, რომლსაც აქვს ჩაშენებული ჰარმონიკული ფილტრებიც. მონიტორინგის პირველ კვირაში ელექტრორკალურ ქარხანა მუშაობდა დილის 06:00 საათიდან საღამოს 18:00 საათამდე. ხოლო მეორე კვირის განმავლობაში საღამოს 18:00 საათიდან დილის 06:00 საათამდე. აღსანიშნავია, რომ ამ ორი კვირის პერიოდში ქარხანა მუშაობდა სრული დატვირთვით. ეს საშუალებას მოგვცემს ნათლად დავინახოთ თუ რა გავლენას ახდენს ელექტრორკალური ქარხანა ელექტროსისტემაზე სინქრონული სტატკური კომპენსატორის მუშაობის პირობებში და მისი გამორთულ მდგომარეობაში ყოფნის დროს [1, 2, 3].



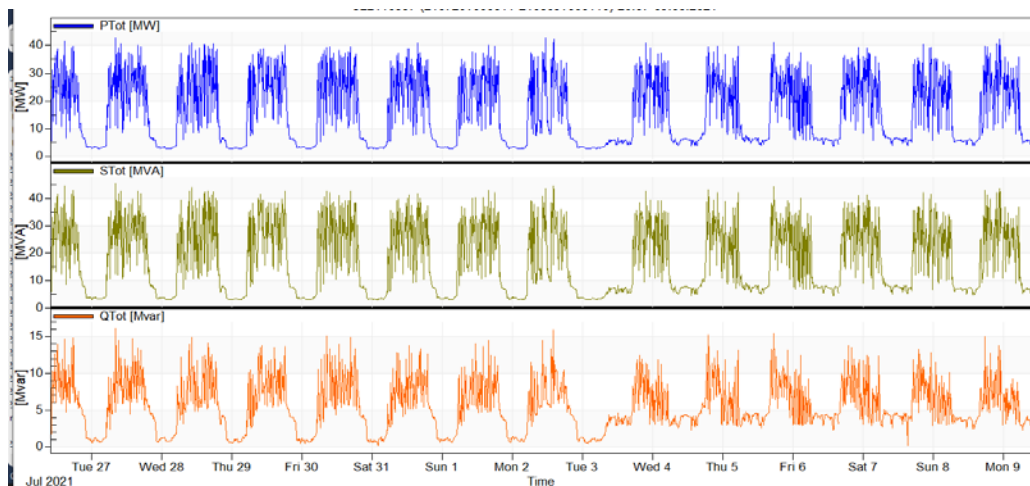
ნახ. 52. ძაბვისა და დენის საშუალო მნიშვნელობები

ნახაზ 52-ის დიაგრამაზე წარმოდგენილია მონიტორინგის ჩატარების პერიოდში დენისა და ძაბვის საშუალო მნიშვნელობების დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი სამივე ფაზაში. ნახაზი 53-ის დიაგრამაზე კარგად არის ასახული თუ რა სახის მოხმარება აქვს ქარხანას და რამდენად არასიმეტრიული.



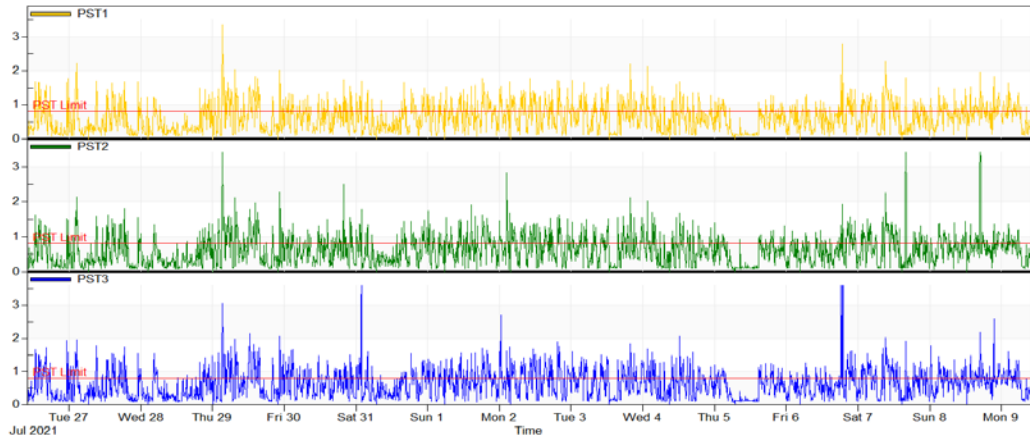
ნახ. 53. ძაბვისა და დენის საშუალო მნიშვნელობების დამოკიდებულება

მეტი თვალსაჩინოებისათვის ნახაზ 54-ზე წარმოდგენილია ელექტრორკალური ღუმლის მქონე ქარხნის ერთი დღის მოხმარების ციკლის დენისა და ძაბვების დიაგრამა. ანათვლები აღებულია 110 კვ ძაბვის სალტეებზე. აღნიშნულ დიაგრამაზე ნათლად ჩანს თუ რამდენა ცვალებადი დათვილთვა გააჩნია ქარხანას, რომელიც თავისთავად ახდენს გავლენას ელექტროსისტემაზე.



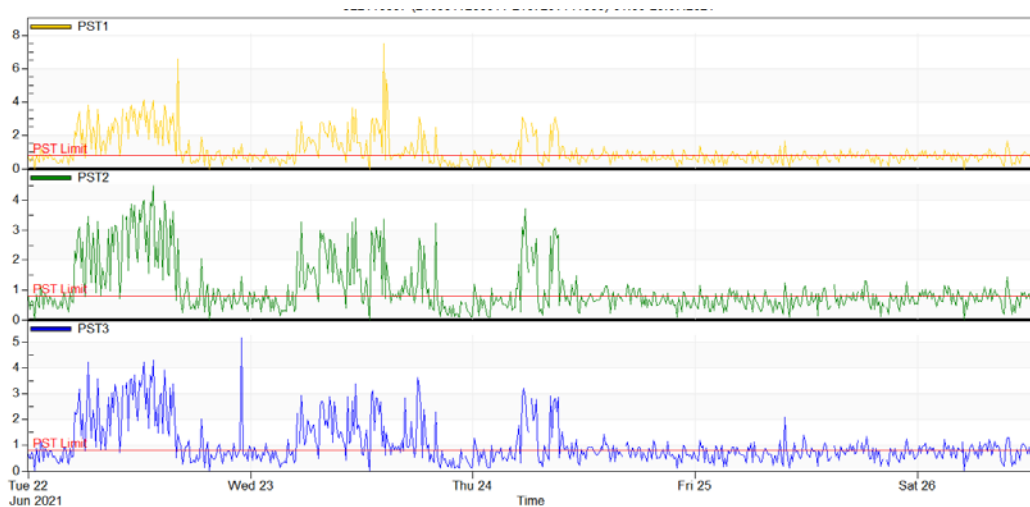
ნახ. 54. აქტიური რეაქტიული და სრული სიმძლავრეები

ნახაზ 54-ზე წარმოდგენილია გაზომვების ჩატარების პერიოდში ქარნის მიერ საქართველოს ელექტროსისტემიდან მიწოდებული აქტიური, რეაქტიული და სრული სიმძლავრეები.



ნახ. 55. მოკლევარიოდიანი სინათლის ციმციმი

ნახაზ 55-ზე წარმოდგენილია მოკლევარიოდიანი ციმციმი. 110 კვ-ის სალტეზე დიაგრამის მიხედვით სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის მოქმედების მიუხედავად მაინც არის ციმციმის ნომინალური ზღვრის დარღვევა. აღნიშნული გამოწვეულია იგივე სალტეზე სხვა მძლავრი მომხმარებლების არსებობით. ნახაზი 56-ის დიაგრამა გვაჩვენებს რომ სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის გაშვების მომენტის დროს იგივე სალტეზე ციმციმის დონეს.



ნახ. 56. სინათლის ციმციმის შემცირება

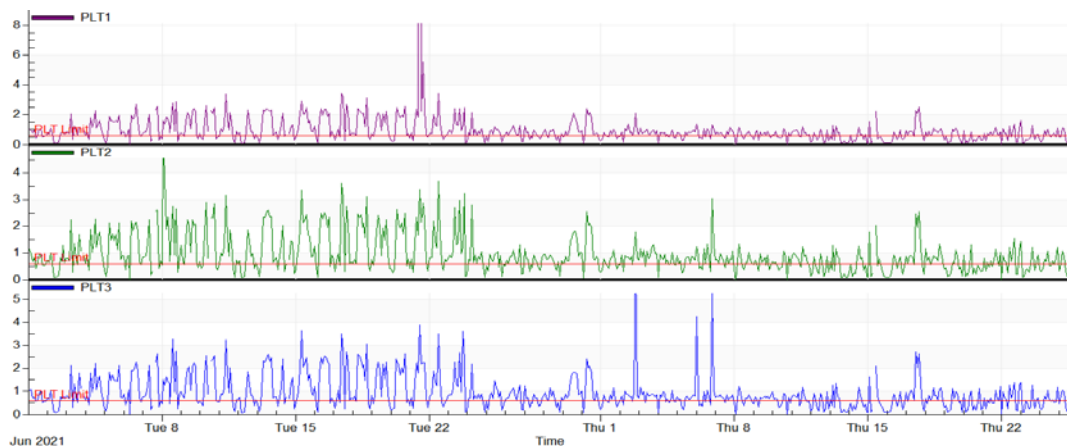


დიაგრამა ნათლად ასახავს რამხელა ზეგავლენას ახდენს და ამციებს სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის გაშვება სალტეზე ციმციმის დონზე. მკვეთრად ეცემა მისი მნიშვნელობა მაგრამ საქართველოს ქსელის წესებით განსაზღვრულ ნორმაში მაინც ვერ ჯდება სხვა ასიმეტრიული მომხმარებლების გავლენის გამო.



ნახ. 57. გრძელპერიოდული სინათლის ციმციმი

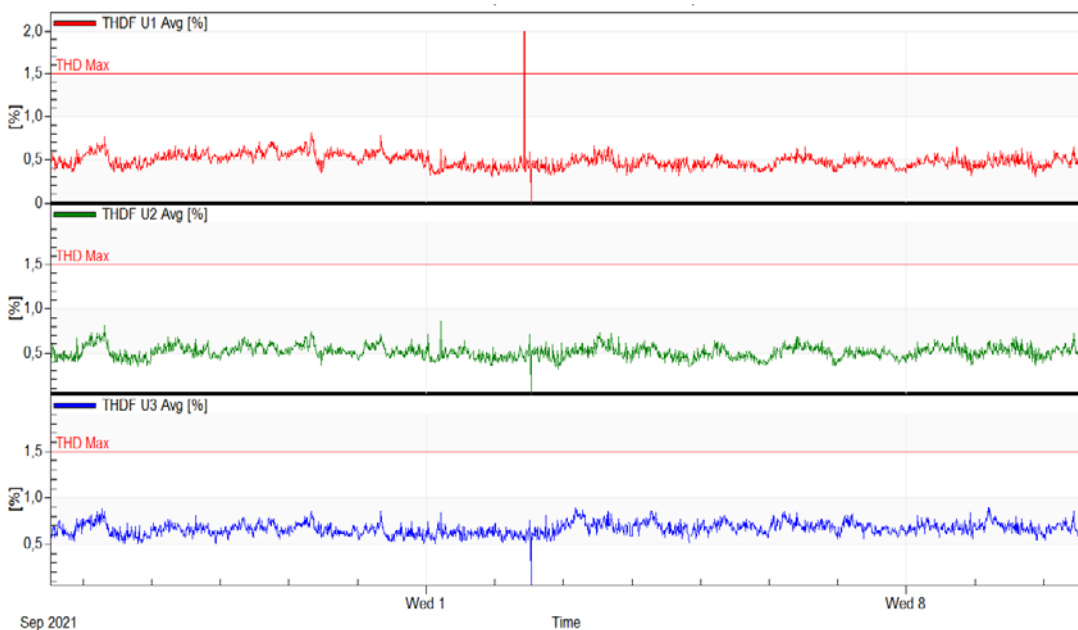
გრძელპერიოდული ციმციმის შემთხვევაში ანალოგიურად ჩანს რომ 110 კვ ძაბვის სალტეზე ციმციმის დონე მკვეთრად მაღალია და არ ჯდება ნორმის ფარგლებში.



ნახ. 58. გრძელპერიოდული სინათლის ციმციმის შემცირება

სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის ჩართვის მომენტის დროს ძაბვის გრძელპერიოდული ციმციმის დონე ქვესადგურის სალტეზე. ციმციმის დონის კლების მომენტი შესამჩნევად დიდია.

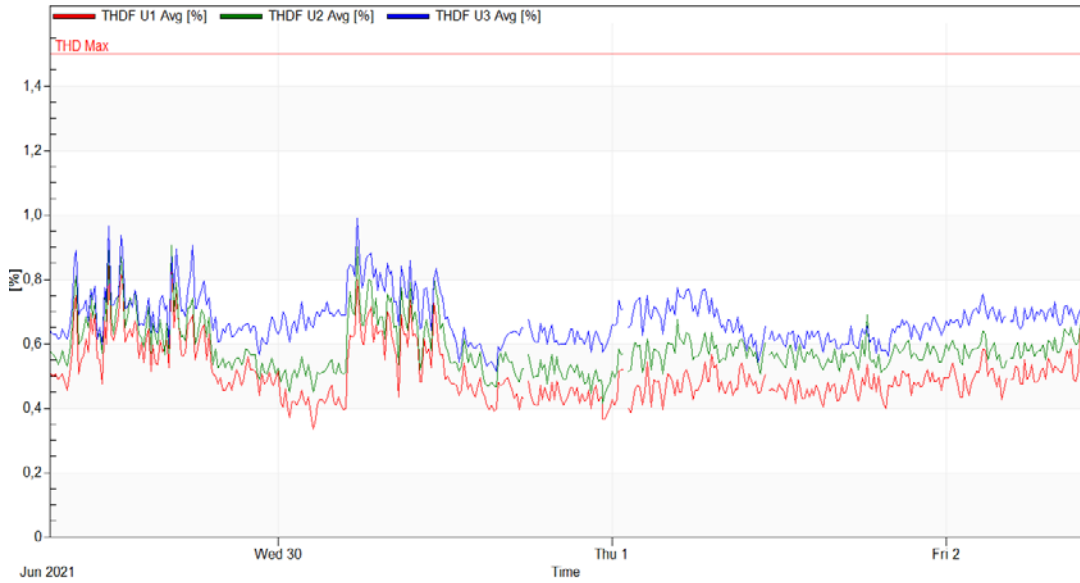
რკალის ღუმელის მიერ წარმოქმნილი ძაბვის რყევების სპექტრული სიმკვრივე დაახლოებით უკუპროპორციულია სიხშირის კვადრატული ფესვის მიმართ. ადამიანები განიცდიან სუბიექტურ პასუხს ნათურის ციმციმზე; ზოგადად, ადამიანის მგრძობელობა პიკს აღწევს 10 ჰც-ზე ქვემოთ 230 ვ ძაბვის ნათურებისთვის. ამ მახასიათებლების შეწონილი კომბინაცია გვიჩვენებს, რომ სიხშირეები, რომლებიც ყველაზე მეტად იწვევს ვიზუალური გაღიზიანებას, მდებარეობს დიაპაზონში დაახლოებით 2-დან 25 ჰც-მდე. თუ ძაბვის რყევები 10 ჰც-ზე მეტია დაახლოებით 0,2%-ზე, მაშინ ისინი სავარაუდოდ გამოიწვევენ შესამჩნევ ციმციმს 230 ვ ძაბვის ნათურის მანათობელ გამომავალზე. იგივე სიმძლავრის 110 ვ ნათურას აქვს უფრო მძიმე ძაბვი უფრო დიდი თერმული ტევადობით, რაც იწვევს ძაბვის რყევებზე უფრო მცირე პასუხს და ყველაზე შემამფოთებელი სიხშირე მცირდება დაახლოებით 5-დან 6 ჰც-მდე.



ნახ. 59. ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯება

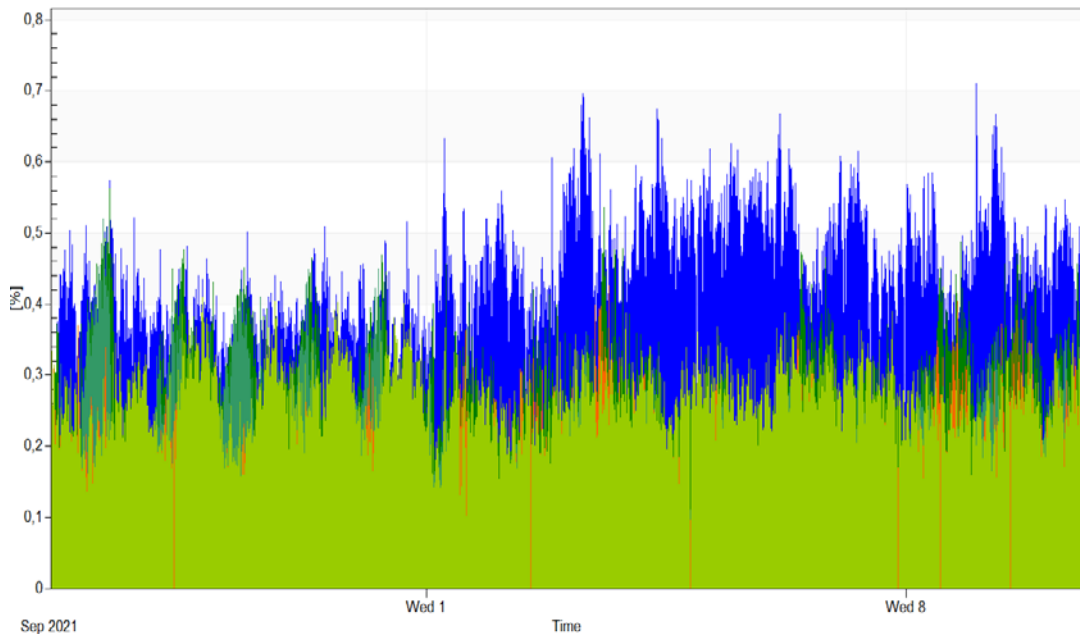
ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯების დონე სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის ოპერირების პირობებში სრულად არის გასწორებულია და არ

გვხვდება რაიმე სახის დარღვევა გვაქვს მხოლოდ ა ფაზაზე ერთ მომენტში მაგრამ ეს გამოწვეულია ამ ფაზაზე ავარიული სიტუაციის წარმოქმნით.



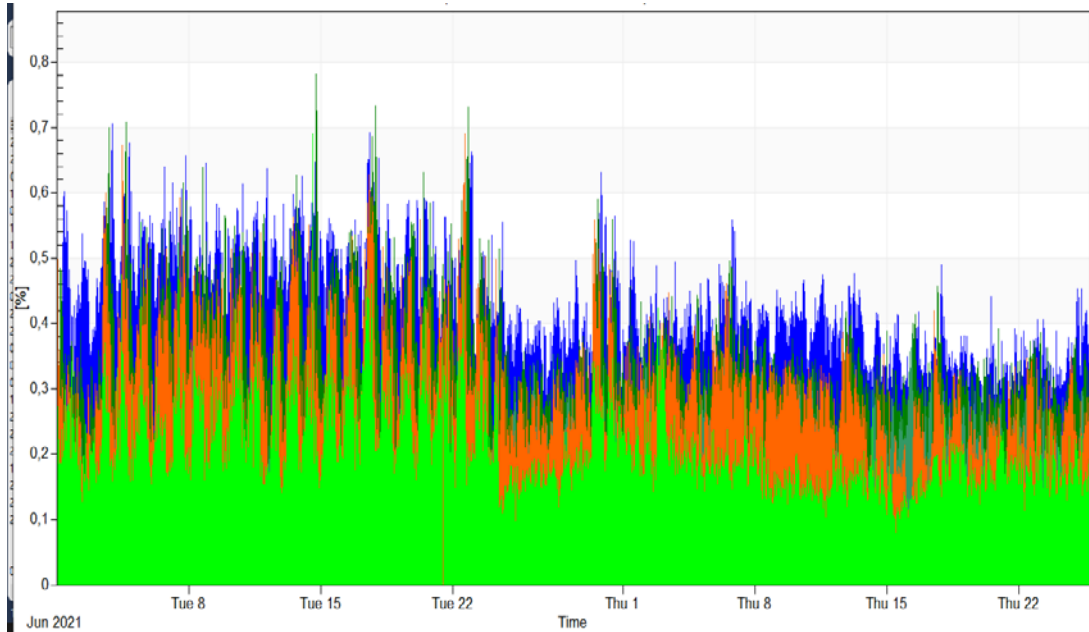
ნახ. 60. ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯების შემცირება

ნახაზ 60-ზე მოცემულ დიაგრამაზე ასახულია სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის გაშვებისას ჯამური ჰარმონიკული დამახინჯების დონის ცვლილება (ამ შემთხვევაში შემცირება).



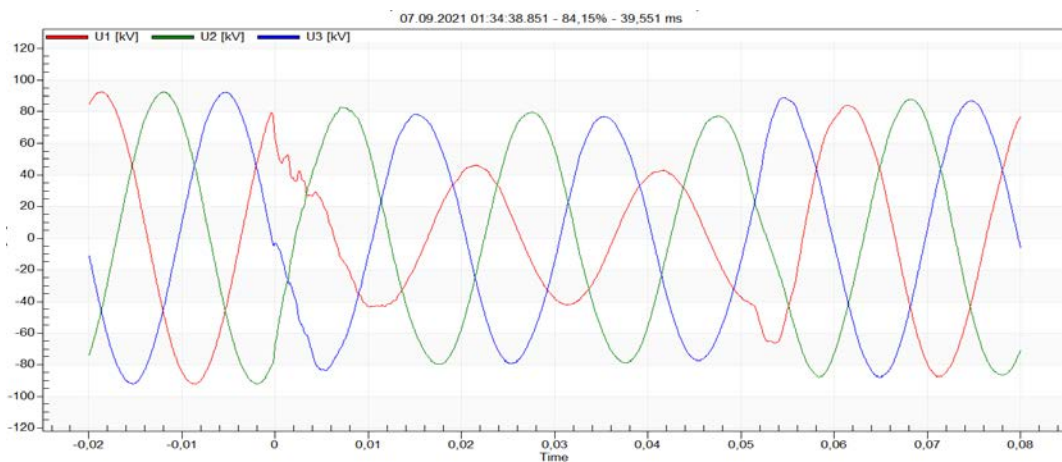
ნახ. 61. რიგობრივი ჰარმონიკული სპექტრი

რიგობრივი ჰარმონიკული დამახინჯების სრულის სპექტრი ელექტრო რკალურ ღუმელზე მომუშავე ქარხნის მიერთების წერტილში. როგარც ნახაზი 61-ის დიაგრამიდან ჩან არ გვხვდება ჰარმონიკული სპექტრის დონის გადაჭარბება.



ნახ. 62. რიგობრივი ჰარმონიკული სპექტრის შემცირება

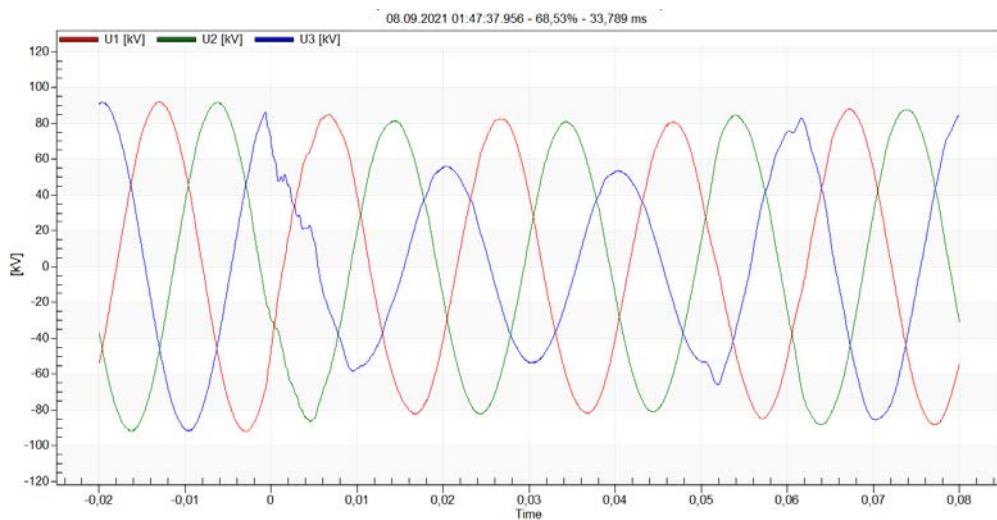
რიგობრივი ჰარმონიკული დამახინჯების სპექტრის დონის შემცირება ასახულია ნახაზი 62-ის დიაგრამაზე. რომელიც გამოწვეულია სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის მოქმედებით. აღნიშნულ შემთხვევაშიც ელექტრული ენერჯის ხარისხის პარამეტრის დონე ზის ნორმის ფარგლებში.



ნახ. 63. ძაბვის სინუსოიდი ღრიძოები

სინქრონული სტატიკური კომპენსატრის მოქმედებამ მვეთრად შეამცირა ძაბვის სინუსოიდების ანომალიები (sug, swell, speak, notch) გაზომვების შედეგები აჩვენებს, რომ აღნიშნული ორი კვირის განმავლობაში დაფიქსირდა მხოლოდ ორი ანომალია.

ნახაზ 64-ზე მოცემულ დიაგრამაზე შემთხვევაში გვაქვს ა ფაზაზე ძაბვის უეცარინ ჩავარდნის ჩავარდნა მცირე პერიოდით. ეს ჩავარდნა გრძელდება 0,06 წამის განმავლობაში ან სამი პერიოდი.



ნახ. 64. ძაბვის სინუსოიდი ანომალიები

აღნიშნულ შემთხვევაში გვაქვს ც ფაზის სინუსოიდის ჩავარდნა 4 პერიოდის განმავლობაში.

აღსანიშნავია რომ ძაბვის სინუსოიდების ანომალიები გაზომვების მიხედვით სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის ჩართვამდე ორ კვირიან ინტერვალში დაფიქსირდა 29 შემთხვევა. ხოლო შემდეგ ეტაპზე ორ კვირიან ინტერვალში დაფიქსირდა მხოლოდ 2 შემთხვევა.

## დასკვნა

სადოქტორო ნაშრომის ძირითად ნაწილს წარმოადგენს ექსპერიმენტალურ კვლევას, რომლის მიზანია ელექტრული ენერჯის ხარისხის პარამეტრების გაზომვა, გაზომვის შედეგების დამუშავება/ ანალიზი და დასკვნების წარმოდგენა. აგრეთვე ნაშრომში განმარტებულია საკვლევი თემის ლიტერატურის მუშოხილვა. განმარტებული ელექტრო ენერჯის ხარისხის მნიშვნელობა, აქტუალობა და დარგის განვითარების აუცილებლობა. დეტალურად არის განმარტებული ელექტრო ენერჯის ხარისხის თითოეული პარამეტრის მნიშვნელობა. ახსნილია ხარისხის გაუარესების წარმოშობის მიზეზები. ნაჩვენებია პრობლემის შეზღუდვისა და აღმოფხვრის ტექნიკური და ადმინისტრაციული ღონისძიებები. ასევე წარმოდგენილია საქართველოში და მსოფლიოში არსებული სტანდარტები და ნორმები, რომლებიც გამოიყენება ელექტრო ენერჯის ხარისხის დაბინძურების ღონის განსასაზღვრად და გასაკონტროლებლად.

ნაშრომის ლიტერატურის მიმოხილვაში განხილულია ელექტრული ენერჯის ხარისხის პარამეტრები. აგრეთვე წარმოდგენილია მათი ზღვრები საქართველოში მოქმედი „ქსელის წესები“-დან. მასში განხილულია შემდეგი პარამეტრები: ჰარმონიკები, ციმციმი, K ფაქტორი, ძაბვისა და დენის უბალანსობა, დენისა და ძაბვის სინუსოიდების ანომალიებ და სიხშირე და მისი ფარდობითი გადახრა.

ნაშრომის ძირითად ნაწილს და მის ღირსებას წარმოადგენს ექსპერიმენტალური კვლევა რომელიც განხორციელდა თბილისის რეგიონთან ახლოს ყველაზე ფართოდ ინდუსტრიურულ ნაწილში. ექსპერიმენტი წარმოადგენს ელექტრული ენერჯის ხარისხის მონიტორინგს 2021 წლის ზაფხულის პიკური დატვირთვის დროს ივლისის თვეში და 2022 წლის წამთრის პიკური დატვირთვის დროს იანვრის თვეში. გაზომილი პარამეტრების მნიშვნელობები დამუშავებულია ელექტრული ენერჯის ხარისხის სამონიტორინგო სისტემის ანალიზატორ პროგრამულ უზრუნველყოფაში. ნაშრომში წარმოდგენილი დიაგრამები შედგენილია ექსპლუატაციაში მყოფი სისტემიდან აღებული მნიშვნელობებით. ნაშრომში აგრეთვე წარმოდგენილია

დამატებითი კვლევა რომელიც წარმოდგენს ელექტრორკალური ღუმლის მქონე მეტალურგიული ქარხნის ელექტრული ენერჯის ხარისხის დაბინძურების დონის გამოკვლევას. აღსანიშნავია, რომ აღნიშნულ ქარხანაში დამონტაჟებულია სინქრონული სტატიკური კომპენსატორი. შესაბამისად კვლევაში განხილულია ქარხნის მუშაობა სინქრონული სტატიკური კომპენსატორის ოპერირებით და მის გარეშე.

სადისერტაციო ნაშრომში ჩატარებული კვლევებისა და ანალიზების საფუძველზე საბოლოო ჯამში დადგინდა:

1. საქართველოში აუცილებელია დაინერგოს საერთაშორისოდ აღიარებული ელექტრული ენერჯის ხარისხის ნორმების სტანდარტები. რომელიც პირველ რიგში აუცილებელი ქვეყნის ელექტროსისტემაში ენერჯის ხარისხის საკონტროლებლად. აგრეთვე ევროპის ელექტროსისტემასთან ინტეგრაციის პირობების ერთ-ერთი აუცილებელი მოთხოვნაა მუდმივი მონიტორინგი ანალიზის წარმოება.
2. მონიტორინგის შედეგებმა აჩვენა, რომ საკვლევ ტერიტორიაზე გვხვდება სინათლის ციმციმის ნორმების დარღვევა, რომელსაც სგრძნობლად მაღალია. B ზაფხულის პიკის დროს ციმციმის მნიშვნელობა გაზომვების ჩატარების პერიოდის 70 პროცენტის განმავლობაში ირღვევა რაც სავალალო შედეგია. აგრეთვე სინათლის ციმციმთან მიმართებაში ცუდი მდგომარეობა გვაქვს A ქვესადგურშიც.
3. ჰარმონიკული დამახინჯების სპექტრის მნიშვნელოვანი დარღვევები არ გვხვდება, მაგრამ მისი მნიშვნელობა ნომინალურ საზღვართან ახლოსა ამიტომ აუცილებელია მისი მაკონტროლებელი ხომების მიღება.
4. ელექტრორკალური ღუმლის მქონე მეტალურგიული ქარხანაში მისი მაქსიმალური დატვირთვის დროს სინქრონული სტატიკური კომპენსატორი ოპერირება უზრუნველყოფს ელექტრული ენერჯის ხარისხის პარამეტრების ნორმის ფარგლებში შენარჩუნებას. ხოლო მაკომპენსირებელი დანდაგარის არ მუშაობის პირობებში ქარხანა ახდენს ზეგავლენას ელექტროსისტემის ელექტრო ენერჯის ხარისხის პარამეტრებზე.

5. ელექტრული ენერჯის ხარისხი პარამეტრების მნიშვნელობების საკონტროლოდ რეკომენდირებულია შემდეგი ხერხების გამოყენება: გადამეტაბვისგან დამცავი მოწყობილობები, ძაბვის რეგულატორები, გარდამავალი პროცესისგან დაცვა, სიმძლავრის კოეფიციენტის გასწორება, სინქრონული კომპენსატორების გამოყენება, არაფაზირებული დატვირთვების დასტაბილურება, ჰარმონიკული ფილტრები, უწყვეტი ელექტრომომარაგება (UPS), კონდენსატორთა ბანკის გამოყენება, სინქრონული სტატიკური კომპენსატორი.
6. საქარელოს ელექტროსისტემაში აუცილებელია დაინეგოს ელექტრო ენერჯის ხარისხის ცენტრალური სამონიტორინგო სისტემა. გაზომვება აჩვენა რომ ხარისხის პარამეტრები მერეონს ნორმირებულ წერტილთან ახლოს. აგრეთვე აღნიშნული პირობა მნიშვნელოვანია ევროპის ელექტროსისტემასთან ინტეგრაციისათვის.



## გამოყენებული ლიტერატურა

1. ასპანიძე ნ. ელექტრული ენერჯის ხარისხის კონტროლი საქართველოში და მისი გავლენა ელექტროსისტემის ტექნიკურ-ეკონომიკურ პროცესზე. „ბიზნეს-ინჟინერინგი“, 2020, №3, გვ. 191-193.
2. ასპანიძე ნ. ელექტრო ენერჯის ხარისხის პარამეტრები. „ენერჯია“, 2022, №1(101), გვ. 25-30.
3. ასპანიძე ნ. ელექტროენერჯის ხარისხი, მისი მონიტორინგი და სტანდარტიზაცია. „ენერჯია“, 2022, №1(101), გვ. 20-25.
4. საქართველოს ენერჯეტიკისა და წყალმომარაგების მარეგულირებელი ეროვნული კომისიის 2014 წლის 17 აპრილს №10 დადგენილებით მიღებული „ქსელის წესები“; მუხლები: 14, 15, 16 და 18.  
<https://matsne.gov.ge/ka/document/view/2322689?publication=0> უკანასკნელად გადამოწმებული იქნა 14.02.2022.
5. Arrilaga J., Watson N. R. Power Systems Harmoniks. Second additions, Copyright © 2003 John Wiley & Sons, Ltd, 400 p.
6. Power Quality and EMC issues with future electricity networks. JWG C4.24/CIREDE. CIREDE, cigre, 2018, 215 p.  
<http://cired.net/uploads/default/files/final-report-C4.24-CIREDE.pdf>  
უკანასკნელად გადამოწმებული იქნა 16.03.2022.
7. Dugan R. C., McGranaghan M. F., Santoso S., Beaty H. W. Electrical Power Systems Quality. Second Edition. Downloaded from Digital Engineering Library @ McGraw-Hill, 2004, 525 p.  
[https://gcebargur.ac.in/sites/gcebargur.ac.in/files/lectures\\_desk/electrical\\_power\\_systems\\_quality.pdf](https://gcebargur.ac.in/sites/gcebargur.ac.in/files/lectures_desk/electrical_power_systems_quality.pdf) უკანასკნელად გადამოწმებული იქნა 16.03.2022.
8. Power quality in electrical systems. <http://www.powerqualityworld.com/>  
უკანასკნელად გადამოწმებული იქნა 14.02.2022.
9. Engineering forums.  
<https://www.eng-tips.com/>  
უკანასკნელად გადამოწმებული იქნა 16.03.2022.
10. Measure electrical quality.  
<https://www.researchgate.net/>  
უკანასკნელად გადამოწმებული იქნა 10.05.2022.
11. Electrical power quality. [https://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_power\\_quality](https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_power_quality)  
უკანასკნელად გადამოწმებული იქნა 10.04.2022.

12. Voltage fluctuation and flicker.  
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/voltage-fluctuation>  
უკანასკნელად გადამოწმებულ იქნა 10.05.2022.
13. Voltage Fluctuations.  
<http://www.powerqualityworld.com/2011/09/voltage-fluctuations-flicker.html>  
უკანასკნელად გადამოწმებულ იქნა 20.04.2022.
14. Basic theory and applications explained.  
<https://testguy.net/content/361-Power-Quality-Analysis-Basic-Theory-and-Applications-Explained>  
უკანასკნელად გადამოწმებულ იქნა 20.11.2021.
15. Importance of power quality in power systems.  
<https://www.allumiax.com/blog/importance-of-power-quality-in-power-systems>  
უკანასკნელად გადამოწმებულ იქნა 05.05.2022.
16. Capacitive voltage transformer.  
<https://circuitglobe.com/capacitive-voltage-transformer-cvt.html>  
უკანასკნელად გადამოწმებული იქნა 05.05.2022.
17. Power quality and voltage flicker explained.  
<https://www.electricityforum.com/iep/power-quality/power-quality-voltage-flicker>  
უკანასკნელად გადამოწმებული იქნა 01.05.2022.
18. Power quality solutions for any application and industrial environment.  
<https://www.enerdoor.com/power-quality-analysis>  
უკანასკნელად გადამოწმებულ იქნა 23.08.2022.
19. Power quality analysis.  
<https://carelabz.com/power-quality-study-analysis/>  
უკანასკნელად გადამოწმებულ იქნა 20.07.2022.
20. Interpretation and analysis of power quality measurements.  
<https://www.dranetz.com/wp-content/uploads/2014/02/powerquality-measurements-interpretation-analysis-1.pdf>  
უკანასკნელად გადამოწმებულ იქნა 01.06.2022.
21. Why is power quality monitoring important?  
<https://lippoliselectric.com/maintenance/power-quality-analysis/>  
უკანასკნელად გადამოწმებულ იქნა 17.06.2022.