

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

საინჟინრო-ტექნიკური ფაკულტეტი

დავით ძაძამია

ვარციხე ჰეს-ის ჰიდროენერგოაგრეგატების ვიბროაკუსტიკური
მონიტორინგისა და ტექნიკურ მდგომარეობათა დიაგნოსტიკის სისტემის
დამუშავება და დანერგვა

ინჟინერიის (0405) დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარმოდგენილი

დ ი ს ე რ ტ ა ც ი ა

სამეცნიერო ხელმძღვანელი

პროფესორი: ნომრევან კოპალიანი

ქუთაისი 2017

სარჩევი

შესავალი

თავი 1. ენერგეტიკული მანქანების ტექნიკურ მდგომარეობათა ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის ამოცანათა დასმა და ზოგადი მიმოხილვა

1.1. მანქანა-დანადგარების ტექნიკური დიაგნოსტიკა.....10

1.2. ენერგეტიკული დანადგარების ტექნიკურ მდგომარეობათა ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკა.....12

1.3. მანქანათა ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის განვითარების ეტაპები.....16

1.4. ენერგეტიკული მანქანების ტექნიკურ მდგომარეობათა ვიბროაკუსტიკური მონიტორინგის სხვადასხვა სისტემების განხილვა19

1.4.1. მონიტორინგისა და კონტროლის მარტივი სისტემების დანიშნულება.....19

1.4.2. მარტივი გადასატანი ვიბრომონიტორინგის სისტემების დანიშნულება.....19

1.4.3. მონიტორინგის მარტივი სტაციონალური სისტემები.....21

1.4.4. მანქანა-დანადგარების ღრმა დიაგნოსტიკის სისტემების დანიშნულება.....21

თავი 2. ჰიდროენერგატორების ელექტრომექანიკური სისტემის დინამიკის თეორიული კვლევა

2.1. ჰიდრო ენერგოაგრეგატების დინამიკის განტოლება.....23

2.2. ჰიდროენერგოაგრეგატების ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის ამოცანის დასმა და გადაწყვეტა.....25

2.3. ჰიდროენერგოაგრეგატების ტექნიკური მდგომარეობის ამოცნობის ალგორითმის აღწერა.....28

2.4. ენერგეტიკული მანქანების ტექნიკურ მდგომარეობათა ცვლილებების ტრენდისა და პროგნოზის განსაზღვრის მეთოდი ტექნიკური დიაგნოსტიკის ამოცანებში.....30

2.5. მაღალსიხშირული ვიბრაციული სიგნალის შემომვლელის სპექტრალური ანალიზის გამოყენება ჰიდროენერგოაგრეგატების სრიალის საკისრების ტექნიკურ მდგომარეობათა ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკისათვის.....36

2.6. ჰიდრო ენერგოაგრეგატების ეტალონური ვიბროაკუსტიკური მახასიათებლები ექსპლუატაციის პროცესში და მათი ანალიზი.....44

თავი 3. MathCad-ის შესაძლებლობების გამოყენება ვიბროაკუსტიკურ დიაგნოსტიკაში	
3.1. სიგნალების დამუშავება MathCad-ის სისტემაში.....	46
3.2. ჰიდროენერგოაგრეგატების ტექნიკურ მდგომარეობათა ამოცანის რეალიზაცია MathCad - ის სისტემაში.....	54
3.3. ვიბროაკუსტიკური სიგნალების ციფრული ზოლური ფილტრაციის ერთი მეთოდის შესახებ.....	58
თავი 4 ვარციხე ჰეს-ის ჰიდროენერგოაგრეგატების ვიბრაციული მახასიათებლების ექსპერიმენტული კვლევა	
4.1. გაზომვის მეთოდოლოგია და მიღებული ვიბრაციული სიგნალის ანალიზი.....	62
4.2. ვარციხე ჰეს-ის აგრეგატის ვიბროაკუსტიკური მონიტორინგის პროგრამა.....	77
4.3. ვარციხე ჰეს-ის აგრეგატის გაზომვისა და დიაგნოსტიკის შედეგები.....	86
4.4. ვარციხე ჰეს-ის ჰიდრო ენერგოაგრეგატის აკუსტიკური მახასიათებლების ექსპერიმენტული კვლევა ტექნიკურ მდგომარეობათა დიაგნოსტიკის მიზნით.....	90
4.5. რიონჰესის მესამე აგრეგატის ვიბრაციული მახასიათებლების ექსპერიმენტული კვლევა.....	96
დასკვნები	104
გამოყენებული ლიტერატურა.....	106

შესავალი

XXI საუკუნე ხასიათდება ტექნიკისა და ტექნოლოგიების განვითარების ბევრად უფრო სწრაფი ტემპებით, ვიდრე ეს იყო წინა საუკუნეში. ტექნიკური მოწყობილობები მნიშვნელოვნად გართულდნენ და მიმდინარეობს მათი ინტელექტუალიზაცია, ანუ ისინი იძენენ ხელოვნური ინტელექტის ელემენტებს, პირველ რიგში მართვის პროცესში. თანამედროვე მანქანები, გემები, ავიაშვიდები, ნავთობმომპოვებელი პლატფორმები, ელექტროსადგურები და სხვადასხვა სახის დანადგარები გადატვირთული არიან უამრავი, ურთულესი მექანიზმებითა და მოწყობილობებით. მათი წარმატებული მომსახურება კი რთული ამოცანა გახდა.

საიანო-შუმენსკაიას ჰიდროელექტროსადგურზე მომხდარმა ტრაგიკულმა ავარიამ (17.08.2009 წელი, მსხვერპლი - 75 ადამიანი, მიზეზი - ჰიდროაგრეგატის ტურბინის სახურავის რღვევა მომატებული ვიბრაციების გამო რხევების სიხშირის ცვლილებით) მნიშვნელოვნად გაამწვავა და წინა პლანზე წამოწია ჰიდროელექტროსადგურების საიმედოობისა და უსაფრთხოების საკითხები [43].

საიანო-შუმენსკაიას ჰიდროელექტროსადგურს გააჩნდა სამი უსაფრთხოების დაცვითი სისტემა, მაგრამ საწუხაროდ არც ერთმა მათგანმა არ გაამართლა და არ იმუშავა. ამას დაემატა მომსახურე პერსონალის დაუდევრობაც [36].

საქართველოში არცერთ ჰიდროელექტროსადგურში არ არის დანერგილი თანამედროვე მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის სისტემები. ვიბრაციების გაზომვები და გაზომვის შედეგად მიღებული ვიბროაკუსტიკური სიგნალის ანალიზი არ წარმოებს არცერთ ჰიდროენერგოაგრეგატზე, მაშინ როდესაც ინტერესი ჰიდროენერგეტიკის განვითარებისადმი ჩვენს ქვეყანაში და მთელ მსოფლიოში ძალიან დიდია.

უცხოეთის ფინანსურად ძლიერი კომპანიები იძენენ დიაგნოსტიკისათვის გამზადებულ სისტემებს და საშუალებებს, მაგრამ ჯერ ერთი, მათი ფასი საკმაოდ ძვირია და მეორე - ხშირად ბოლომდე გაუგებარი არის როგორ ხდება დიაგნოსტიკის პროცესი, კერძოდ, თუ რას ზომავენ, როგორ და რას ადარებენ გაზომილ სიდიდეებს. ასე ვთქვათ, მომხმარებლებისთვის უხილავი და უცნობი რჩება ვიბრომონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის პროცედურები.

გარდა სახიფათო და მავნე ზემოქმედებისა ადამიანებსა და ტექნიკურ ობიექტებზე (განსაკუთრებით მაღალი დონეების შემთხვევებში), ვიბრაციები და ვიბროაკუსტიკური სიგნალები ზოგადად არიან ინფორმაციის მატარებელი მანქანების ტექნიკურ მდგომარეობათა შესახებ [34]. შესაბამისი დამუშავებისას ეს სიგნალები შესაძლებელია წარმატებით იქნან გამოყენებული მანქანის ტექნიკურ მდგომარეობათა დიაგნოსტიკისა და პროგნოზირებისათვის. ჰიდროელექტროსადგურების ენერგოაგრეგატებში მიმდინარე ფიზიკური პროცესები რთული პროცესებია და ისინი არ არიან ბოლომდე შესწავლილი. კერძოდ, დინამიური პროცესები და საერთოდ ჰიდროენერგოაგრეგატების დინამიკა ნაკლებად შესწავლილი დარგია. ლიტერატურაში მცირეა იმ ნაშრომების რაოდენობა, რომლებიც ეძღვნება ჰიდროენერგოაგრეგატების დინამიურ ქცევას. მოცემული თემა სწორედ ამ საკითხებს ეძღვნება, კერძოდ ჰიდროენერგოაგრეგატების ვიბროაკუსტიკური მონიტორინგისა და ტექნიკურ მდგომარეობათა დიაგნოსტიკის საკითხებს .

თემის აქტუალობა. საქართველოში მრავალი საშუალო, დიდი და მცირე ზომის ჰიდროელექტროსადგურია. დღევანდელი მდგომარეობით არცერთ მათგანზე არ არსებობს საიმედო კონტროლის სისტემები, კერძოდ, ტექნიკურ მდგომარეობათა ვიბროაკუსტიკური მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის თანამედროვე სისტემები (უკეთეს შემთხვევაში წარმოებს მხოლოდ ტემპერატურის კონტროლი, რაც საკმარისი არ არის). საიმედოობის და უსაფრთხოების საკითხები კი არის მინდობილი მხოლოდ გამოცდილი ინჟინრების ინტუიციაზე. ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკისა და მონიტორინგის სისტემების დანერგვა საშუალებას მოგვცემს ვაკონტროლოთ ჰიდრო-ენერგოაგრეგატებში მიმდინარე ნებისმიერი პროცესი და ნებისმიერი გაუმართაობა გამომავლინოთ დეფექტის ჩასახვის პირველივე ეტაპიდან.

ამოცანის ფორმულირება. ვიბრაციული მონიტორინგი არის მექანიკური სისტემის ვიბრაციულ მდგომარეობათა ცვლილებების მეთვალყურეობა და ამ ცვლილებების მიზეზების ანალიზი. ვიბროაკუსტიკური კონტროლის პრობლემის აქტუალობა და მისი პრაქტიკაში დანერგვა გამოიწვია მანქანის ტექნიკური მდგომარეობის შესახებ ოპერატიული კონტროლის არსებობის აუცილებლობამ. ტექნიკის სხვადასხვა დარგში დღეს არსებული კონტროლის საშუალებებით დანადგარის ტექნიკური მდგომარეობის

შესახებ ინფორმაციის მიღება შესაძლებელია მხოლოდ მისი შინაგანი დათვალიერების გზით, ანუ აუცილებელი ხდება მისი მუშა რეჟიმიდან გამოყვანა, ან ნაწილობრივი და თუ საკმარისი არ არის, მისი სრული დაშლა, რაც დაკავშირებულია დიდ ფინანსურ დანახარჯებთან. ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის ძირითად ამოცანას წარმოადგენს სწორედ ის, რომ მისი საშუალებით შესაძლებელია მანქანის ტექნიკური მდგომარეობის კონტროლი მიმდინარეობდეს მისი დაშლის გარეშეც მუშა რეჟიმში. ისეთი გავრცელებული მეთოდები, როგორცაა ტემპერატურის კონტროლი, შეზეთვის ხარისხი და სხვა საჭირო აღარ არის - მათ ცვლის ვიბრაციის ანალიზი. ვიბრაციული დიაგნოსტიკა არის სადიაგნოსტიკო ელექტრომექანიკური სისტემის დეფექტების აღმოჩენა და იდენტიფიცირება (დეფექტის სახისა და სიდიდის განსაზღვრით).

კვლევის მიზანი. სადისერტაციო სამუშაოს მიზანი არის ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის თეორიული და პრაქტიკული საფუძვლების დამუშავება და ვიბროაკუსტიკური მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის მაღალეფექტური მეთოდების შექმნა ისეთ უნივერსალურ მათემატიკურ პროგრამაში, როგორც არის MathCad-ი, რომელიც უზრუნველყოფს საიმედოობის მაღალ დონეს ენერგეტიკული დანადგარების თანამედროვე განვითარების ტენდენციების შესაბამისად.

კვლევის ამოცანები. მოცემული მიზნის მისაღწევად აუცილებელია შემდეგი ამოცანების გადაწყვეტა:

1. მსოფლიოს წამყვანი ფირმების კვლევების საფუძველზე ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის დარგში მეთოდებისა და საშუალებების სისტემატიზაცია, აგრეთვე მათი ხარისხის ამაღლების გზების და მეთოდოლოგიური მიდგომების დამუშავება ჰიდროენერგოაგრეგატების ტექნიკური დიაგნოსტიკის სისტემების დამუშავებისას.

2. ტექნიკური დიაგნოსტიკის ავტომატიზირებული სისტემის თეორიული და მეთოდოლოგიური საფუძვლების შექმნა ჰიდროენერგოაგრეგატებისათვის ვიბრაციული პროცესების მონიტორინგის ბაზაზე.

3. თეორიული მოდელების დამუშავება, რომლებიც აკავშირებს ჰიდრო-ენერგოაგრეგატების ვიბრაციის ელემენტების სპექტრალურ მახასიათებლებს მის კონსტრუქციულ პარამეტრებთან და მათი ცვლის პარამეტრებთან და იძლევიან შესაძლებლობას განისაზღვროს ტექნიკური მდგომარეობები მოცემული უტყუარობით.

მათემატიკური მოდელირების და რეალური ექსპერიმენტების საფუძველზე შევარჩიოთ და დავასაბუთოთ დიაგნოსტიკური ნიშნები და ნიშანთა სივრცეები, რომლებიც ახასიათებენ ჰიდროენერგოაგრეგატებს.

4. ფუნქციონალური (ანალიტიკური და სტატისტიკური) დამოკიდებულებების პოვნა-განსაზღვრა ვიბროაკუსტიკურ სიგნალებსა და ჰიდროენერგოაგრეგატების ტექნიკურ მდგომარეობათა შორის.

5. ჰიდროენერგოაგრეგატების დიაგნოსტიკის მეთოდოლოგიის დამუშავება, რომელიც უზრუნველყოფს ვიბრაციული კონტროლის შედეგების უტყუარობას და იძლევა შესაძლებლობას გამოყენებული იქნან ექსპლუატაციის რეალურ პირობებში.

კვლევების მეთოდები. დასმული ამოცანების ამოხსნისას გამოყენებული იქნა დებულებები მანქანათა და მექანიზმების თეორიის, მანქანათა დინამიკის, სახეთა ამოცნობის, ალბათობის თეორიისა და მათემატიკური სტატისტიკიდან. ექსპერიმენტულ კვლევებში გამოყენებული იქნა თანამედროვე ვიწროზოლიანი, ოქტავური და ტერც-ოქტავური სპექტრალური ანალიზის მეთოდები (SpectraLab-ი, MathCad-ი) ექსპერიმენტული მონაცემების მათემატიკური დამუშავება MathCad-ში.

დიაგნოსტიკის ალგორითმების დამუშავებისას გამოიყენებოდა გადაწყვეტილებათა მიღების თეორიის და სახეთა ამოცნობის თეორიის მეთოდები.

დაცვაზე გამოტანილი დებულებები:

1. ჰიდროენერგოაგრეგატების ვიბროაკუსტიკური მონიტორინგისა და ტექნიკურ მდგომარეობათა დიაგნოსტიკის სისტემის აგების პრინციპები, რომელიც შეიცავს ინფორმაციული სიხშირეების გამოყოფას და მათი მნიშვნელობების შეფასებას, დიაგნოსტიკური ნიშნების ვექტორის ფორმირებას, ტექნიკურ მდგომარეობათა შეფასებას, რომელიც დაყრდნობილია სახეთა ამოცნობის თეორიაზე.

2. ჰიდროენერგოაგრეგატების ძირითად ვიბროაქტიური კვანძების ტექნიკურ მდგომარეობათა შეფასების მეთოდები, რომლებიც დაფუძნებულია ვიბროაჩქარების ჯამურ დონეებზე, ვიწროზოლიან, ტერც-ოქტავურ და ოქტავურ სპექტრალურ ანალიზზე და შესაბამისი მაღალსიხშირული რხევების მომვლევებზე, ჰიდრო-ენერგოაგრეგატების ვიბრაციების სპექტრში ინფორმაციული სიხშირეების გამოვლენის მეთოდები და მათი ინფორმატიულობის შეფასება.

3. დიაგნოსტიკების მოდელების აგების საფუძვლები, რომლებიც იძლევიან ჰიდროენერგოაგრეგატების ტექნიკურ მდგომარეობათა კლასიფიკაციის განხორციელების შესაძლებლობას მრავალგანზომილებიანი დიაგნოსტიკური ნიშნების მეშვეობით.

4. ჰიდროენერგოაგრეგატების ელექტრომექანიკური სისტემის ტექნიკურ მდგომარეობათა დიაგნოსტიკის მეთოდთა MathCad-ის სისტემაში, რომელიც იძლევა ტექნიკურ მდგომარეობათა განსაზღვრის შესაძლებლობას და მათი განვითარების პროგნოზს ექსპლუატაციის პირობებში.

მეცნიერული სიახლე. სამუშაოს მეცნიერული სიახლე მდგომარეობს იმაში, რომ პირველად ფორმულირებულია ჰიდროენერგოაგრეგატების ვიბროაკუსტიკური მონიტორინგისა და ტექნიკურ მდგომარეობათა დიაგნოსტიკის სისტემის აგების პრინციპები, რომლებიც მოიცავენ ინფორმაციული სიხშირეების გამოყოფას და მათი მნიშვნელობის შეფასებას, დიაგნოსტიკური ნიშნების ვექტორის ფორმირებას, დეფექტ-სიმპტომის ცხრილების აგებას, ტექნიკური მდგომარეობის შეფასებას, სახეთა ამოცნობის თეორიაზე დაყრდნობით. ამის საფუძველზე შექმნილია ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის ახალი მეთოდოლოგია, რომელიც აგებულია უნივერსალურ კომპიუტერულ პროგრამაში MathCad-ში (რაც ფაქტიურად უფასოა, წამყვანი ფირმების ძვირად ღირებული პროდუქციისაგან განსხვავებით - ეკონომიკის სახითხები აქ ძალიან მნიშვნელოვანია).

პრაქტიკული ღირებულება. ჰიდროენერგოაგრეგატების ტექნიკურ მდგომარეობათა შეფასებისათვის დიაგნოსტიკური ნიშნების და დიაგნოსტიკური მოდელების მიღებული მონაცემები არიან მეთოდოლოგიური საფუძვლები ტექნიკურ მდგომარეობათა საშუალებების დამუშავებისათვის და რემონტისა და მომსახურების სისტემის ორგანიზაციის მნიშვნელოვანი ფაქტორი. მათი პრაქტიკული ღირებულება მდგომარეობს იმაში, რომ იძლევიან შესაძლებლობას:

1. დამუშავებული დიაგნოსტიკური საშუალებები გამოყენებული იქნან ჰიდრო-ენერგოაგრეგატების დამზადების, გაწყობის და მონიტორინგის პროცესში ექსპლუატაციის დროს;

2. კომპიუტერული მოდელირების შესრულების და დიაგნოსტიკის ნიშნების ფორმირების, ინფორმაციული მონაცემების ბაზების შექმნის, რომლებიც არიან საფუძველი ჰიდროენერგოაგრეგატების ელემენტების ტექნიკურ მდგომარეობათა შეფასების და აგრეთვე ფუნქციონირების ხარისხის სტატისტიკური ანალიზისათვის;

3. ჰიდროენერგოაგრეგატების ტექნიკური მომსახურების სისტემის „ფაქტიური მდგომარეობის მიხედვით“ დანერგვის, რომელიც დაფუძნებულია ვიბრაციული პარამეტრებით დიაგნოსტიკურ კონტროლზე.

სამუშაოს შედეგების დანერგვა და რეალიზაცია. დამუშავებული მოდელები, მეთოდიკა და ტექნიკურ საშუალებათა კომპლექსი უნდა იქნან გამოყენებული ჰიდრო-ენერგოაგრეგატების ტექნიკურ მდგომარეობათა კომპიუტერული დიაგნოსტიკის სისტემების დამუშავებისას და დანერგვისას ყველა ჰიდროელექტროსადგურებში მთელ საქართველოში.

სადისერტაციო სამუშაოს შედეგები გამოყენებული უნდა იქნან აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ენერგეტიკული სპეციალობების სასწავლო პროცესში, როგორც სადიპლომო პროექტირებისას, ასევე მაგისტრებისა და დოქტორანტების სამეცნიერო-კვლევით სამუშაოებში.

სამუშაოს აპრობაცია. სამუშაოს ძირითადი დებულებები და შედეგები დისერტაციის თემაზე მოხსენებული იქნა საერთაშორისო კონფერენციებზე.

1. ენერგეტიკა: რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები
2. მდგრადი ენერგეტიკა გამოწვევები და განვითარების პერსპექტივები.

პუბლიკაციები. დისერტაციის თემაზე ავტორის მიერ გამოქვეყნებულია 3 სტატია საერთაშორისოდ აღიარებულ სამეცნიერო ჟურნალებში.

სამუშაოს მოცულობა და სტრუქტურა. სადისერტაციო ნაშრომი შედგება 108 გვერდისაგან, შესავალისაგან, 4 თავისაგან, დასკვნებისაგან და გამოყენებული ლიტერატურის 47 ჩამონათვალისაგან.

თავი 1

ენერგეტიკული მანქანების ტექნიკურ მდგომარეობათა ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის ამოცანათა დასმა და ზოგადი მიმოხილვა

1.1. მანქანათა ტექნიკური დიაგნოსტიკა

ტექნიკური დიაგნოსტიკა მეცნიერების შედარებით ახალი მიმართულებაა, რომელიც განსაკუთრებულად განვითარდა ბოლო წლების განმავლობაში, რაც დაკავშირებულია სხვადასხვა დარგის ტექნიკის მოხმარების ზრდასთან. დღესდღეობით თანდათან იზრდება როგორც მარტივი ასევე რთული ტექნიკური სისტემების მნიშვნელობა, განსაკუთრებით მანქანათმშენებლობაში, რადიოელექტრონიკასა და ენერგეტიკაში. მოთხოვნა უსაფრთხოებაზე, მტყუნების დაბალი რისკი და მუშაობის ხანგრძლივობა ეს ტექნიკური დიაგნოსტიკის წარმოშობისა და მისი განვითარების ძირითადი მიზეზებია [27]. ტექნიკური დიაგნოსტიკა - ესაა მეცნიერება, რომელიც უზრუნველყოფს ინფორმაციის მიწოდებას ექსპლუატაციის პროცესში.

ობიექტის ტექნიკური მდგომარეობა განისაზღვრება ტექნიკური პარამეტრების ერთობლიობით, რომლებიც ახასიათებენ ობიექტის ფუნქციონირების შესაძლო გადახრას ნორმალურისაგან და რომლებსაც თავის მხრივ მივყავართ შესაძლო მტყუნებამდე (ობიექტის გაჩერებამდე).

მანქანის ან მექანიზმის ტექნიკური მდგომარეობის პარამეტრებია: მისი დეტალების გეომეტრიული და ფიზიკური პარამეტრები, მათი ურთიერთგანლაგება, ღრეჩოები, საკონტაქტო ზედაპირების ხარისხი, ღერძების გადახრის კუთხეები, გეომეტრიული ზომების ცდომილებები, მასალის სტრუქტურისა და სიმტკიცის ცვლილებები, ვიბრაციისა და ხმაურის ჯამური და სპექტრალური მდგენელების დონეები, ტემპერატურები, ნარევის წარმოქმნის ხარისხი, და ასე შემდეგ. ტექნიკური დიაგნოსტიკის დროს ხდება ტექნიკური მდგომარეობის პარამეტრების ფარდობითი შეფასება (პარამეტრების შედარება, მაგალითად, დღევანდელი პარამეტრების გუშინდელთან).

ტექნიკური დიაგნოსტიკა სწავლობს ტექნიკური ინფორმაციის მიღებისა და დამუშავების მეთოდებს. მის მიზანს წარმოადგენს ტექნიკური სისტემების საიმედოობისა და რესურსის ამალღება. როგორც ცნობილია საიმედოობის არანაკლებ

მნიშვნელოვან მახასიათებლად ითვლება მტყუნებების რისკის შემცირება მანქანა-დანადგარის ფუნქციონირების დროს. საავიაციო ძრავების, წყალქვეშა ხომალდებისა და სხვადასხვა ენერგეტიკული დანადგარის ძრავებისა თუ ტექნიკური დანადგარების მტყუნებამ მათი ექსპლუატაციის პროცესში შესაძლოა მიგვიყვანოს მძიმე შედეგებამდე და გამოიწვიოს არა მხოლოდ ეკონომიკურ-ტექნიკური დანაკარგები არამედ ადამიანური მსხვერპლიც კი. დეფექტებისა და გაუმართაობების ადრეული გამოვლინების წყალობით ტექნიკური დიაგნოსტიკა საშუალებას იძლევა თავიდან ავიცილოთ მტყუნებები ექსპლუატაციის დროს, რაც ამალღებს საიმედოობისა და ეფექტურობის ხარისხს [31].

ტექნიკური დიაგნოსტიკა წყვეტს პრობლემების საკმაოდ ფართო სპექტრს, მრავალი მათგანი კი დაკავშირებულია მეცნიერების სხვადასხვა დარგთან. ტექნიკურ დიაგნოსტიკას ხშირ შემთხვევაში მოიხსენიებენ როგორც „დიაგნოსტიკა მუშაობის პროცესში“ , იმიტომ რომ მდგომარეობის ანალიზი ხდება ექსპლუატაციის პირობებში. ამასთან გასათვალისწინებელია ისიც, რომ დიაგნოსტიკის ამოცანის გადაწყვეტისას თავიდან აცილებული იქნას მცდარი განგაშის რისკი, დიაგნოსტიკის ამოცანის გადაწყვეტა ყოველთვის დაკავშირებულია საიმედოობის პროგნოზთან, დანადგარის ექსპლუატაციის უახლოეს პერიოდში .

ტექნიკური დიაგნოსტიკა დაკავშირებულია საკმაოდ დიდი ინფორმაციის მიღებასთან მის დამუშავებასთან და ამ დამუშავებულ ინფორმაციაზე დაყრდნობით გადაწყვეტილების მიღებასთან, ეს პროცესი ხორციელდება ელექტროგამომთვლელი მანქანების დახმარებით. ის წყვეტს ამოცანების ძალიან ფართო სპექტრს. ამ მიმართულების თეორიულ ფუნდამენტად შეიძლება მივიჩნიოთ ნიმუშების ამოცნობის ზოგადი თეორია. ეს თეორია არის ტექნიკური კიბერნეტიკის უმთავრესი ნაწილი [44].

დიაგნოსტიკის ამოცანის გადაჭრის დროს ყოველთვის არის მცდარი შედეგების მიღების რისკი. დიაგნოსტიკის ამოცანა ასევე დაკავშირებულია ექსპლუატაციის დროს უახლოეს პერიოდში მოსალოდნელი ცვლილებების ამოცნობასთან. დიაგნოსტიკის მეორე მთავარი მიმართულება ეს არის კონტროლის საიმედოობის თეორია. კონტროლსაიმედოობა ითვალისწინებს დროული ინფორმაციის მიწოდებას სავარაუდო დეფექტის (მტყუნების) შესახებ [30]. კონტროლის საიმედოობის ურთულეს ამოცანას

წარმოადგენს იმ მეთოდებისა და საშუალებების ძიება რომლის მიხედვითაც მივიღებთ დიაგნოსტიკისათვის საჭირო აუცილებელ ინფორმაციას (სიგნალს). ასეთი ავტომატიზირებული კონტროლის სისტემების პროექტირება წარმოადგენს კონტროლის საიმედოობის ერთ-ერთ მიმართულებას. საბოლოოდ კონტროლის საიმედოობის ძალიან მნიშვნელოვანი ამოცანა დაკავშირებულია იმ ალგორითმების დამუშავებასთან, რომლებიც საშუალებას გვაძლევენ აღმოვაჩინოთ გაუმართაობები.

1.2. ენერგეტიკული დანადგარების ტექნიკურ მდგომარეობათა ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკა

ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკა წარმოადგენს ტექნიკური დიაგნოსტიკის ერთ-ერთ სახეს, სადაც დიაგნოსტიკისათვის აუცილებელ მთავარ სიგნალს წარმოადგენს მანქანა-დანადგარის მუშაობის დროს არსებული ვიბრაციები და ხმაური. ტექნიკური ობიექტის გამართულად მუშაობისათვის საჭირო დანახარჯების რიცხვი ბევრჯერ აღემატება მისი დამზადებისათვის საჭირო ხარჯებს. ავტოტრანსპორტის შემთხვევაში ეს დანახარჯები შესაძლოა 6-7 -ჯერ მეტი იყოს დანადგარებისათვის 8 -ჯერ, თვითმფრინავებისათვის 5 -ჯერ, რადიოაპარატურისათვის 12-ჯერ [28].

ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკისა და მონიტორინგის ძირითადი დანიშნულება არის კონტროლი და პროგნოზი დანადგარის მდგომარეობის ექსპლუატაციის პირობებში. ვიბროაკუსტიკური მეთოდებით ხდება ორი ძირითადი ამოცანის გადაჭრა ესენია:

- 1) ექსპლუატაციის პირობებში მყოფი აგრეგატის მდგომარეობის გაცნობა;
- 2) იმ დარღვევებისა და მიზეზების გამოვლენა, რომლებმაც შესაძლოა თავი იჩინოს უახლოეს ხანებში.

ხშირ შემთხვევაში ექსპლუატაციის პროცესში ახლად შესული მანქანის დიაგნოსტიკას არ იწყებენ რადგან თავდაპირველად მისი დაზიანების და მასზე ავარიის რისკი დაბალია რაც ეკონომიკურად გამართლებულია. აღსანიშნავია ისიც, რომ

ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკა შესაძლოა გამოვიყინოთ ყველა იმ მოწყობილობასთან დაკავშირებით სადაც არსებობს ან შეიძლება წარმოიქმნას რხევითი პროცესები. ვიბრაცია და ხმაური ეს არის თანმდევი პროცესი ნებისმიერი დინამიური პროცესისა, რომელიც გვაქვს ყველა მანქანაში. ეს ძალები არიან პირველი წყარო არა მხოლოდ ხმაურის და ვიბრაციის არამედ დეფექტების [46]. პრაქტიკაში ვიბრაციის კონტროლი და ვიბრაციული დიაგნოსტიკა არის სხვადასხვა პრაქტიკული ამოცანები. დიაგნოსტიკაში დეფექტი განისაზღვრება რხევითი ძალით, რომელიც წარმოიშობა დეფექტის ზონაში, ხოლო ძალა სწორხაზოვნად დაკავშირებულია ვიბროაჩქარებასთან და არა სიჩქარესთან (იმიტომ, რომ სენსორები რეაგირებენ ვიბროსიჩქარებაზე), ამიტომ დიაგნოსტიკისას ხშირად სარგებლობენ ვიბროაჩქარების გაზომვით და მანქანების ვიბრაციული კონტროლისათვის დამატებით ზომავენ ვიბროგადაადგილებას, მხოლოდ განსაზღვრულ დაბალსიხშირულ დიაპაზონში (განსაკუთრებით დაბალსიხშირის ბრუნთა რიცხვის მქონე მექანიზმებში - მანქანებში). ვიბრაციის გაზომვისათვის როგორც წესი გამოიყენება ვიბროაჩქარების მოწყობილობა, რომელიც მუშაობს პიეზოეფექტზე, ხმის საზომად გამოიყენება მიკროფონი [26].

ვიბრაციული დიაგნოსტიკა თავის თავში არ გულისხმობს მანქანის ავარიისგან გარანტირებულ დაცვას ის მხოლოდ იძლევა ინფორმაციას მანქანის ტექნიკური მდგომარეობის შესახებ და მიუთითებს ადამიანებს შემდეგი მოქმედებებისათვის, თუნდაც დეფექტის ჩასახვის საწყის ეტაპზე.

არსებობს ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის სამი ძირითადი ჯგუფი:

1. დიაგნოსტიკის პროფესიონალური სისტემები, რომელშიც ოპერატორი თვითონ ირჩევს ინფორმაციულ ტექნოლოგიას და გაზომვის საშუალებას. ამ შემთხვევაში ექსპერტ-ოპერატორის ცოდნა და გამოცდილება სრულიად განსაზღვრავს დიაგნოზის საიმედოობას;

2. დიაგნოსტიკის ექსპერტული სისტემები. რომელიც ეხმარება ოპერატორს მიიღოს გადაწყვეტილება განსაზღვრულ მომენტში;

3. ავტომატიზირებული დიაგნოსტიკის სისტემები [38].

დიაგნოსტიკა ეს პირველ რიგში არის სუსტი კომპონენტების ძიება ძლიერის ფონზე. ძლიერი და სუსტი კომპონენტები განსხვავდებიან სიხშირის მიხედვით და სიმძლავრის

მიხედვით ეს კომპონენტები შესაძლოა განსხვავდებოდნენ 10⁶ -ჯერ, ამიტომ იზომება არა მათი სიმძლავრე, არამედ ამპლიტუდა. ამ მეთოდით ძლიერ და სუსტ კომპონენტებს შორის განსხვავება უფრო მკაფიოა [4].

დღესდღეობით ტერმინის ქვეშ „მონიტორინგი“ იგულისხმება ტექნიკური სისტემის მდგომარეობის პარამეტრების გაზომვის სრული კომპლექსი. მონიტორინგი ყოველთვის არ იძლევა ზუსტ პასუხს შესაძლო დეფექტების შესახებ. აუცილებელია ერთმანეთისაგან გაიმიჯნოს ტერმინი მონიტორინგი და დიაგნოსტიკა.

მონიტორინგი - ეს არის კონტროლი ძირითადი პარამეტრებისა, ხოლო ტერმინი **დიაგნოსტიკა** - ეს არის დეფექტების და მათი განვითარების პროგნოზის იდენტიფიცირება.

ენერგეტიკული მოწყობილობების მონიტორინგის თანამედროვე სისტემები აგებულია კონტროლის და დიაგნოსტიკის მყარ მეთოდებზე. მასში გამოყენებული დიაგნოსტიკის მეთოდები შესაძლოა დაიყოს ორ ჯგუფად:

1. ტესტური დიაგნოსტიკის მეთოდი, რომელიც მოითხოვს ხელოვნური დარღვევების წარმოშობას;
2. ფუნქციონალური დიაგნოსტიკის მეთოდი, რომელიც გამოიყენება ისეთი მანქანებისათვის, რომლებიც არიან ბუნებრივი დარღვევების წყარო მათი მუშაობის პროცესში [2].

ზოგადად, დიაგნოსტიკის პროცესის სქემა ასეთია:

1. დიაგნოსტიკური მოდელის შედგენა;
2. ვიბრაციების მონიტორინგით მიღებული შედეგების ანალიზი;
3. შესაძლო დეფექტებისა და შესაბამისი სიმპტომების ჩამოყალიბება და მათი დასაშვები სიდიდეების დადგენა;
4. მოგროვილი ინფორმაციის კომპიუტერში შეყვანა და კომპიუტერული დიაგნოსტიკური პროგრამის შექმნა;
5. სადიაგნოსტიკო სისტემის ძირითადი კვანძების ტექნიკურ მდგომარეობათა შეფასება და რეკომენდაციების გაცემა ოპერატორისათვის შემდგომი მოქმედებისათვის.

ტექნიკის ნებისმიერ დარგში სხვადასხვა მანქანის ექსპლუატაცია და რემონტი ხდება შემდეგი სამი პრინციპის მიხედვით:

1. მუშაობა მტყუნებამდე;
2. მანქანა დანადგარების რემონტი ექსპერტების შეფასების მიხედვით;
3. მანქანა დანადგარების რემონტი დიაგნოსტიკის შედეგების მიხედვით.

მნიშვნელოვან ეკონომიკურ ეფექტს იძლევა მხოლოდ მესამე საშუალება, მისი წარმატებით განხორციელება საშუალებას გვაძლევს:

1. მოვახდინოთ დროის ეკონომია და შევამციროთ სათადარიგო ნაწილებისათვის საჭირო ფინანსები მესამედამდე;
2. შევამციროთ მოულოდნელი მტყუნებების რიცხვი 10-ჯერ;
3. შევამციროთ გაუთვალისწინებელი ხარჯები.

ამისათვის აუცილებელია ობიექტის სრული დიაგნოსტიკა რათა აღმოჩენილ იქნას ყველა დეფექტი, რომელიც გავლენას ახდენს რესურსზე. მექანიკასა და ელექტრომექანიკაში, როგორც პრაქტიკა აჩვენებს, მანქანის ეფექტური დიაგნოსტიკა შესაძლებელია ვიბრაციების საშუალებით და მათზე დაკვირვების გზით, რადგანაც:

1. რხევითი ძალები წარმოიშობიან პირდაპირ დეფექტის გაჩენის ადგილზე;
2. ვიბრაცია არის მაქსიმალურად ინფორმაციული დიაგნოსტიკისათვის;
3. დიაგნოსტიკა შესაძლებელია ადგილზე მოწყობილობის მუშა რეჟიმიდან გამოყვანის გარეშე [1].

განსაკუთრებულად რთულია დიაგნოსტიკის ის სისტემები, რომლებიც გამოიყენება მბრუნავი მექანიზმების კონტროლისათვის. მათ დანიშნულებას წარმოადგენს დეფექტების გამოვლენა მათი ჩასახვის პირველივე ეტაპიდანვე, აგრეთვე მანქანა დანადგარის მდგომარეობის შესახებ გრძელვადიანი პროგნოზი. დიაგნოსტიკის განსაკუთრებულ მეთოდს წარმოადგენს ასევე ისიც, რომ დეფექტების ჩასახვისთანავე მათი გამოვლინებისათვის საჭიროა ვიბრაციაზე განსაკუთრებით მგრძნობიარე ხელსაწყოები [32].

1.3. მანქანათა ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის განვითარების ეტაპები

მანქანების ტექნიკური მდგომარეობის მეთოდები და შეფასების საშუალებები განვითარდა ეტაპობრივად, თავიდან ხდებოდა სხვადასხვა პარამეტრების კონტროლი, შემდეგ მონიტორინგი და ბოლო ეტაპი იყო დიაგნოსტიკის სისტემების დანერგვა და ტექნიკური მდგომარეობის კონტროლი.

შესაძლოა გამოვყოთ დიაგნოსტიკურ-ინფორმაციული საშუალებების განვითარების სამი ძირითადი ეტაპი:

1. პირველი მიეკუთვნება საწყის ეტაპს დიაგნოსტიკაში და პირველ რიგში ვიბროაკუსტიკაში, როდესაც მანქანის მდგომარეობის შეფასებისათვის გამოყენებული იყო ადამიანის სმენის ორგანოები;

2. მომდევნო ეტაპს მიეკუთვნება ვიბროაკუსტიკური დანადგარების შექმნა, რომლებიც გამოიყენება ვიბრაციების, ხმაურის და მათი სპექტრალური ანალიზის გასაზომად მაღალსიხშირულ დიაპაზონებში. სწორედ ამ მოწყობილობების გამოჩენისას 50-60-იან წლებში დაიწყო სიგნალების ანალიზის ინტენსიური კვლევები სპეციალიზირებული დიაგნოსტიკის ამოცანებისათვის. ძირითადი ნაბიჯები დიაგნოსტიკის დარგში გადადგმულ იქნა 60-70-იან წლებში, სწორედ ამ წლებში იქნა ჩატარებული უამრავი კვლევა იმის შესახებ, თუ რა გავლენას ახდენს დეფექტის სხვადასხვა სახეობები დანადგარის მუშაობაზე და როგორ გამოისახება ეს ყველაფერი დიაგნოსტიკის დროს სიგნალებში. ამ ცდების შედეგებმა აჩვენეს, რომ ვიბრაციის სიგნალი უდიდესი ინფორმაციის მატარებელია და სხვა სიგნალები უბრალოდ დუბლირებაა ამ ინფორმაციის, რასაც შეიცავს ვიბრაციის სიგნალი. გარდა ამისა, ცნობილი გახდა ისიც, რომ დეფექტები ჩნდება ავარიის მომენტის დადგომამდე და ბევრ შემთხვევაში დანადგარების ექსპლუატაციის პირველ ხანებში და ცნობილი გახდა ისიც, რომ დეფექტები გავლენას ახდენენ ვიბრაციაზე (აისახებიან მასში);

3. მესამე ეტაპი თანმდევია კომპიუტერული ტექნიკის და ტექნოლოგიების განვითარების. კონკრეტულად ამ დროს გამოჩნდა სპექტრის ციფრული ანალიზატორები და გახდა შესაძლებელი სხვადასხვა ექსპერტები ჩაენაცვლებინა ამ ხელსაწყოებს. თავდაპირველად დანადგარის სხვადასხვა ნაწილების ტექნიკური მდგომარეობის დიაგნოსტიკა და პროგნოზირება ხდებოდა ავტომატურად

სხვადასხვა ექსპერტული პროგრამებით. თანამედროვე მძლავრი კომპიუტერების გამოჩენამ ხელი შეუწყო ამ პროცესს [3].

გაზომვებისა და ანალიზის სამივე აღნიშნული საშუალება დაფუძნებულია სამი ტიპის მოწყობილობაზე, ესენია:

1. ვიბრაციის სენსორი ან მიკროფონი, რომელიც გარდაქმნის რხევას ელექტრულ სიგნალად;
2. ფილტრი, რომელიც გამოყოფს სიგნალს ჩვენთვის აუცილებელი სიხშირის დიაპაზონში;
3. დეტექტორი, რომელიც ემსახურება გამოყოფილი კომპონენტების ამპლიტუდის შეფასებას.

ვიბროდიაგნოსტიკის განვითარების მნიშვნელოვანი ეტაპი დაკავშირებულია სხვადასხვა სახის გამომთვლელი მანქანების გამოჩენასთან, რაც გამოიყენებოდა სპექტრალური ანალიზისათვის. სხვადასხვა სიხშირეებისგან შემდგარი რთული სიგნალების მიღება ადამიანის სმენის ორგანოებით შეუძლებელია, სწორედ ამიტომ აუცილებელი გახდა ისეთი სისტემების შექმნა, რომლებიც საშუალებას გვაძლევს მოვახდინოთ გაცილებით ეფექტური დიაგნოსტიკა და მონიტორინგი [5].

ამ მეთოდის პირველ წარმატებად, ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის პირველ ეტაპზე, შეიძლება ჩაითვალოს შიგაწვის ძრავების დიაგნოსტიკა. შემდეგი წარმატებული ნაბიჯია დარტყმითი იმპულსებით დიაგნოსტიკის მეთოდებისა და საშუალებების შემუშავება. შემდეგში კი დიაგნოსტიკა განვითარდა ვიბრაციის ანალიზის მიმართულებით, რომელიც წარმოიშობა ხახუნის ძალით [25].

ტექნიკის ნებისმიერ სფეროში იდეიდან მის რეალიზაციამდე და პრაქტიკაში დანერგვამდე გარკვეული დროა საჭირო. ვიბრაციის ანალიზის ძირითადი მეთოდები გამოჩნდა 60-80-იან წლებში, მაგრამ ამ ყველაფრის რეალიზაციამდე გაიარა 2-3 ათწლეულმა და მხოლოდ ამის შემდეგ დაიწყო მისი პრაქტიკული გამოყენება მრეწველობის თითქმის ყველა დარგში. რეალურად ვიბრომზომი ტექნიკის ეპოქა დაიწყო 90-იან წლებში, როდესაც დაიწყო სხვადასხვა მოწყობილობების აგება მიკროკომპიუტერების ბაზაზე. დღესდღეობით კომპიუტერების ახალი თაობა ჩნდება ყოველ 2-3 წელიწადში და ასევე ყოველ 2-3 წელიწადში ხდება მზომი და ანალიზური

ტექნიკის განახლება. შეიძლება ითქვას, რომ თანამედროვე მოწყობილობა ეს არის მოწყობილობას პლუს მიკროკომპიუტერი. დღესდღეობით ფართოდ გავრცელებულია ვირტუალური მოწყობილობები, როდესაც გვაქვს მოწყობილობა პლუს სენსორი და პერსონალური კომპიუტერი. დიდი ხნის მანძილზე მანქანების დიაგნოსტიკა მაღალსიხშირული ვიბრაციის მიხედვით ვერ ვითარდებოდა მათი ეფექტური ანალიზის არარსებობის გამო. მაგრამ 1968 წელს შვედმა სპეციალისტებმა მიაკვლიეს მაღალსიხშირული ვიბრაციის ანალიზის ახალ მეთოდს. ამ მეთოდს ეწოდება „დარტყმითი იმპულსების მეთოდი“. ასეთ ტიპის ანალიზის შესრულებისათვის შეიქმნა სპეციალური საზომი მოწყობილობები, რომლებიც თავიანთი დაბალი ღირებულების გამო არის ფართოდ გავრცელებული. ამ მეთოდმა მისცა დასაბამი დიაგნოსტიკის ბევრ ახალ სისტემას [37].

ბოლო წლების განმავლობაში შემუშავებულ იქნა რამდენიმე ეფექტური მეთოდი, რომელიც გამოავლენს ძირითად დეფექტებს მანქანაში მისი ჩასახვის პირველივე ეტაპიდან. ბუნებრივია, ეს მეთოდები დაფუძნებულია მაღალსიხშირული ვიბრაციის ანალიზზე, რომლის წარმოქმნისათვის არ არის საჭირო დიდი რხევითი ძალების არსებობა. ამის პარალელურად განვითარდა დიაგნოსტიკის ავტომატიზირებული ალგორითმების მეთოდი, რაც ეხმარება დიაგნოსტიკის სისტემის მწარმოებლებს შეცვალოს თუნდაც მაღალი კლასის ექსპერტი შესაბამისი პროგრამული უზრუნველყოფით, მაღალი დონის ანალოგური ამოცანების ამოხსნისას. ასეთი ამოცანების წილი საკმაოდ მაღალია [33].

1.4. ენერგეტიკული მანქანების ტექნიკურ მდგომარეობათა ვიბროაკუსტიკური მონიტორინგის სხვადასხვა სისტემების განხილვა

1.4.1. მონიტორინგისა და კონტროლის მარტივი სისტემების დანიშნულება

ექსპლუატაციაში მყოფი მანქანის საიმედოობა და ხარისხი განისაზღვრება მისი პროექტირების მიხედვით, ექსპლუატაციის პირობებით, მომსახურებით და ასევე მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის საშუალებების ეფექტურობით.

მარტივი მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის სისტემების მთავარი პრობლემა არის ის, რომ შეუძლებელია წინასწარ გარანტირებულად ითქვას რამდენ ხანს შეიძლება ამ სისტემებმა სტაბილურად, კარგ მდგომარეობაში იმუშაოს. თუკი ბევრი გასაკონტროლებელი პარამეტრის საზღვრები წინასწარ ცნობილია, ამ შემთხვევაში კონტროლის სისტემების ძირითადი დანიშნულება არის აღმოაჩინოს და დააფიქსიროს რომელიმე პარამეტრის წინასწარ განსაზღვრული საზღვრიდან გადაცდომა. ამისათვის იქმნება მონაცემთა ბაზები, რომელშიც შესულია პერიოდული გაზომვის შედეგები გასაკონტროლებელი პარამეტრების ტრენდის (ტენდენციის) ასაგებად [29].

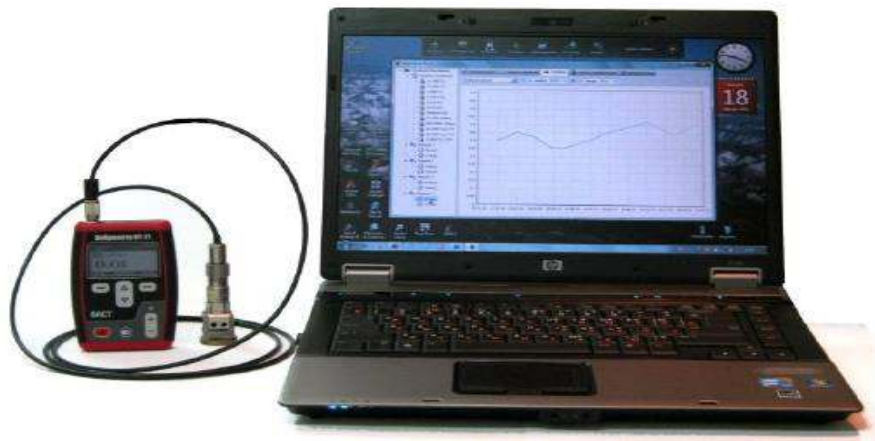
მარტივი მონიტორინგის გადასატანი სისტემების დახმარებით ძირითადად ხდება ისეთი მეორადი პროცესების გაზომვა, როგორცაა, მაგალითად ვიბრაცია და ტემპერატურა. განსხვავებით გადასატანი სისტემებისაგან სტაციონალური სისტემების შემთხვევაში, მეორადი პროცესების რაოდენობა შესაძლოა იყოს გაფართოებული [26].

1.4.2. მარტივი გადასატანი ვიბრომონიტორინგის სისტემების დანიშნულება

მიზეზი იმისა, თუ რა განაპირობებს ძირითად მოთხოვნილებას მონიტორინგის სისტემებისა, არის ის, რომ მისი საშუალებით შესაძლებელია ძირითადი პარამეტრები ვაკონტროლოთ დოკუმენტაციით გათვალისწინებულ ზღვრებში.

აღსანიშნავია, რომ მონიტორინგის სისტემების მინიმალურ დანიშნულებას შესაძლებელია წარმოადგენდეს ისიც, რომ გამოვიყენოთ სტანდარტული ვიბრომომზომი

და მისი საშუალებით გაზომილი ვიბრაციების აღრიცხვა ვაწარმოოთ, რაც საშუალებას მოგვცემს გვეკონდეს მონაცემთა ბაზა, ხოლო ამ ბაზის მიხედვით ვაკონტროლოთ რომელიმე პარამეტრის წინასწარ განსაზღვრული ზღვრებიდან გამოსვლა, ან მისი (მნიშვნელობის) მიახლოება კრიტიკულ მნიშვნელობას. ასეთი მარტივი მონიტორინგის სისტემების (სურ.1.1.) დახმარებით შეუძლებელია, როგორც პროგნოზირება შესაძლო ცვლილებებისა, ასევე შეუძლებელია ტრენდის განსაზღვრაც [35].



სურ.1.1. მარტივი მონიტორინგის სისტემა VIBRO 21

დღევანდელ რეალობაში არსებობს სხვა ტექნიკური გადაწყვეტაც, რაც ეხმარება მომსახურე პერსონალს მიიღოს უფრო ზუსტი მონაცემები ობიექტის ტექნიკური მდგომარეობის შესახებ. ეს შესაძლებელს ხდის გავაკეთოთ უფრო დამაჯერებელი პროგნოზი. ამისათვის საჭიროა გავზარდოთ მზომი ტექნიკისა და მოწყობილობების ხარისხი. თანამედროვე ციფრული მოწყობილობები იძლევა იმის საშუალებას, რომ მოვახდინოთ, როგორც გაზომვები, ასევე გავაკეთოთ ჩატარებული გაზომვების ანალიზი [47].

1.4.3. მონიტორინგის მარტივი სტაციონალური სისტემები

მონიტორინგის მარტივი სისტემების ძირითად დანიშნულება არის დანადგარის კონტროლი მისი უნივერსალური პარამეტრების მიხედვით, რომელიც დადგენილია ქარხანა-დამამზადებლის მიერ. გასაკონტროლებელი პარამეტრების რიცხვი სტაციონალური მონიტორინგის სისტემების შემთხვევაში შესაძლოა იყოს უფრო მეტი, ვიდრე სტაციონალური სისტემების შემთხვევაში.

მონიტორინგის მარტივი სტაციონალური სისტემების უმრავლესობა, რომლებიც დაფუძნებულია ძველი თაობის სისტემებზე არ გამოიყენებენ მზომ გარდამქმნელებს. ასე, რომ მონიტორინგის მარტივი სისტემა დაფუძნებულია ზღვრული ვიბრაციის კონტროლზე, მისი ფუნქცია არის მხოლოდ ავარიული სიგნალიზაცია და ამ ფუნქციას ემატება დაუშვებელი გადახრების დაფიქსირება. სწორედ ამ გადახრებს მივყავართ ვიბრაციების სახიფათო ზრდამდე. ეს გროვდება მონაცემთა ბაზებში და გვამღევეს შესაძლებლობას გამოვავლინოთ ამ გადახრების მომენტები და მათი შესაძლო მიზეზები, რათა არ დავუშვათ ისინი შემდეგომში. ნებისმიერი მწარმოებლის მონიტორინგის სტაციონალურ სისტემებს აქვთ მაღალი ღირებულება. აქედან გამომდინარე, მონიტორინგის მარტივი სტაციონალური სისტემების გამოყენება ხშირ შემთხვევაში ეკონომიკურად არ არის გამართლებული, გარდა იმ გამონაკლისი შემთხვევისა, როდესაც ის გამოყენებულია მარტივ გადასატან სისტემებთან ერთად [26].

1.4.4. მანქანა-დანადგარების ღრმა დიაგნოსტიკების სისტემების დანიშნულება

მანქანა-დანადგარების ღრმა დიაგნოსტიკების სისტემების დანიშნულება არის ჩასახული დეფექტების ადრეული აღმოჩენა, მონიტორინგი, მანქანა-დანადგარის ტექნიკური მდგომარეობის შესახებ გრძელვადიანი პროგნოზი და ავარიისა და მტყუნებების რისკის მინიმალურამდე შემცირება [39]. თითქმის არც ერთი დეფექტი თუ დაზიანება არ იწვევს მისი ჩასახვიდანვე მინიმალურ დროში ავარიას. დანადგარის

გრძელვადიანი პროგნოზის ამოცანის გადაწყვეტა მაღალ დონეზე შესაძლებელია თუკი დაცული იქნება შემდეგი პირობები:

1. ყველა იმ შესაძლო დეფექტის განსაზღვრა რომელიც შესაძლოა წარმოიქმნას;
2. ყველა დეფექტის დიაგნოსტიკური საფუძვლების განსაზღვა, როგორც ადრეულ, ასევე შუა და ბოლო სტადიებში;
3. იმ ძირითადი ზონების განსაზღვრა, საიდანაც უნდა მოხდეს დიაგნოსტიკისათვის საჭირო ინფორმაციის მიღება;
4. ექსპლუატაციის პროცესში მყოფი დანადგარის დიაგნოსტიკა უნდა მიმდინარეობდეს მისი დაშლისა და გაჩერების გარეშე.

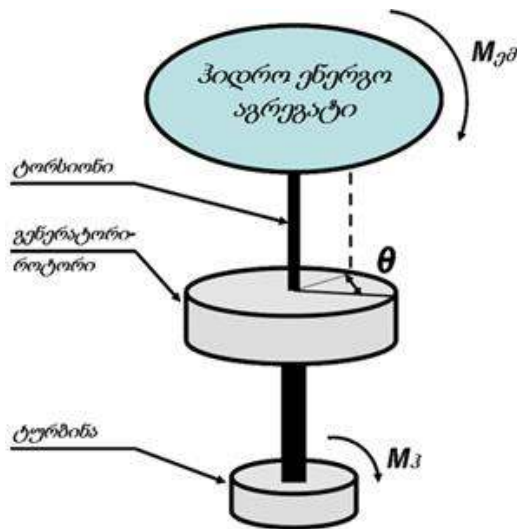
თავი 2

ჰიდროენერგეტიკის ელექტრომექანიკური სისტემის დინამიკის თეორიული კვლევა

2.1. ჰიდროენერგოაგრეგატების დინამიკის განტოლება

ჰიდროენერგოაგრეგატი, როგორც ენერგოსისტემა, შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც უზარმაზარი მქნევარა, რომელიც ბრუნავს მუდმივი სიხშირით. ჰიდროენერგეტიკის აქ მოდელირებულია მქნევართი, რომელიც შედგება გენერატორის როტორისაგან და მუშა თვალისაგან (ტურბინისაგან). ჰიდროენერგეტიკის ენერგოსისტემასთან კავშირის მექანიკურ მოდელად შეიძლება მივიჩნიოდ დრეკადი ტორსიონი, რომლის გრეხითი სიხისტე არის m_c . ტორსიონის გრეხის კუთხე θ განსაზღვრავს ჰიდროენერგეტიკის მუშაობის რეჟიმს. თუ $\theta > 0$ მაშინ ხდება ელექტროენერჯის გამომუშავება (გენერატორის რეჟიმი), თუ $\theta < 0$ მაშინ ხდება ენერჯის მოხმარება (ძრავის რეჟიმი).

ქვემოთ ნახ.2.1.-ზე წარმოდგენილია ჰიდროენერგოაგრეგატის ელექტრომექანიკური მოდელი.



ნახ.2.1. ჰიდროენერგოაგრეგატის ელექტრომექანიკური მოდელი

ზოგადად აგრეგატის როტორის მოძრაობის განტოლებას აქვს შემდეგი სახე:

$$\frac{J}{k} \frac{d^2 \theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + m\theta_b = M_3$$

ეს არის ჰარმონიული ოსცილატორის განტოლება, რომლის საკუთარი სიხშირე ω_0 და Q - ფაქტორი (ვარგისიანობა) უდრის:

$$\omega_0 \approx \sqrt{\frac{m_b k}{J}} \quad Q \approx \omega_0 \frac{J}{kD} = \frac{1}{D} \sqrt{\frac{m_b}{k}}$$

ამგზნები მომენტის მოქმედებისას სინქრონული მანქანა ასრულებს მიღევად რხევებს, რომელსაც სინქრონულ რხევებს უწოდებენ. ამ დროს ირხევა კუთხე θ . შესაბამისად იცვლება ელექტრული მომენტი და გენერატორის სიმძლავრე. აგრეგატის სინქრონული რხევის სიხშირე ჩვეულებრივად მცირეა და არის დიაპაზონში 0.5 – 3 ჰც.

$M_{g\theta}$ ელექტრომაგნიტური მომენტი, კი განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$M_{g\theta} \approx \frac{3U}{\omega} \frac{E_0}{x_{qd}} \cos \theta * \theta = m_b * \theta$$

სადაც, (კუთხე θ - არის დატვირთვის კუთხე ე.დ.ს. (E_0) – სა და ძაბვის (U) ვექტორებს შორის, x_{qd} - დაყვანილი სინქრონული წინააღმდეგობაა, m_b - ხვედრითი მასინქრონიზირებადი მომენტია და უდრის

$$m_b \approx \frac{3U}{\omega} \frac{E_0}{x_{qd}} \cos \theta$$

გენერატორში არის მადემფერებელი გრაგნილი, რომელიც ამცირებს როტორის რხევებს აგრეგატის მიმართ. ამ გრაგნილის ელექტრომაგნიტური მომენტი უდრის:

$$M_{\omega} = \frac{k3U^2}{\omega r_2} S = \frac{3U^2}{\omega^2 r_2} \frac{d\theta}{dt} = D \frac{d\theta}{dt}$$

სადაც, S - არის როტორის სრიალი, k - პოლუსების წყვილთა რიცხვი, ხოლო r_2 - სრილის დაყვანილი წინააღმდეგობაა.

ძირითადი დინამიური ძალები, რომლებიც მოქმედებენ ჰიდრო ენერგოაგრეგატში არიან:

1. მექანიკური ბუნების (ცენტრიდანული, კინემატიკური, პარამეტრული, ხახუნის ძალები, დარტყმები);

2. ელექტრომაგნიტური ბუნების (მაგნიტური, ელექტროდინამიური, მაგნიტოსტრიქციული);
3. ჰიდროდინამიური ბუნების (ამწე, ანუ გარსშემოდინების ძალები, ხახუნის ძალები, წნევის პულსაციები).

ეს დინამიური ძალები არიან დეტერმინირებული (ხშირად პერიოდული) და შემთხვევითი. მათი ერთდროული ზემოქმედების შედეგად ჰიდროენერგოაგრეგატები განიცდიან რთულ წრფივ და არაწრფივ რხევებს და გენერირდებიან რთული ვიბრაციული ველები. ადგილი აქვს თანაზომადი სიდიდის რხევებს სამივე მიმართულებით - როტორის რადიალური ტანგენციური და გრძივი მიმართულებებით.

ჰიდროენერგოაგრეგატების რხევების თეორიული ანგარიში მათი სირთულის გამო დღესდღეობით შეუძლებელი ამოცანაა, არადა ენერგოაგრეგატების მუშაობის პროცესში მათი ტექნიკურ მდგომარეობათა უწყვეტი განსაზღვრა და დიაგნოსტიკა ითხოვენ ვიბრაციული მახასიათებლების დეტალურ ცოდნას დროის ყოველ მონაკვეთში. მათი შესწავლა და ანალიზი მხოლოდ ექსპერიმენტალური გაზომვებითაა შესაძლებელი [20].

2.2. ჰიდროენერგოაგრეგატის ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის ამოცანის დასმა და გადაწყვეტა

ობიექტის ყველა ტექნიკურ მდგომარეობას შეესაბამება დიაგნოსტიკური ნიშნის n - განზომილებიანი ვექტორი $\bar{A} = (A_1, A_2, \dots, A_n)$ ან ვიბროაკუსტიკური სიმპტომები, ეს სიმპტომები დევს გაზომვის შედეგად მიღებულ ვიბროაკუსტიკურ სიგნალში \bar{X} . გვაქვს შემდეგი ამოცანა - მათი (ჩვენთვის სასარგებლო სიგნალის) გამოყოფა ვიბროაკუსტიკური სიგნალიდან.

მათემატიკური კავშირი მექანიკურ სისტემაში სიმპტომებსა და გაზომვებს შორის შეიძლება დამყარდეს შემდეგნაირად:

$$A_i = f_i(\Delta_{r_1}, \Delta_{r_2}, \dots, \Delta_{r_m}), i = 1, 2, \dots, n.$$

სადაც, f_i - არის დიფერენციალური ან ალგებრული ოპერატორი. ეს კავშირი დიფერენციალური ფორმით იძლევა შესაძლებლობას მივიღოთ ჩვენთვის სასურველი ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის შედეგი მხოლოდ დაბალსიხშირულ დიაპაზონში (200 – 300 ჰც).

დღესდღეობით სრული ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკა ხდება ამოცნობის თეორიის საშუალებით:

1. ხდება დაშვება, რომ ტექნიკური ობიექტი იმყოფება ტექნიკური მდგომარეობის სასრულ სიმრავლეში- S . ტექნიკური მდგომარეობის ამ სიმრავლეში გამოყოფილია ორი ქვესიმრავლე S_1 და S_2 . S_1 - მუშაუნარიანი ტექნიკური მდგომარეობის ქვესიმრავლე და S_2 - არამუშაუნარიანი ტექნიკური მდგომარეობის ქვესიმრავლე.

ქვესიმრავლე S_1 გულისხმობს ყველა იმ მდგომარეობას, რომლის მიხედვითაც ობიექტი მუშაობს გამართულად. ქვესიმრავლე S_2 გულისხმობს ყველა იმ მდგომარეობას, რომლის მიხედვითაც ჩნდება დეფექტები, რომლებიც გავლენას ახდენენ ობიექტის მუშაობის ხარისხზე. ერთი მდგომარეობიდან მეორეზე გადასვლა დამოკიდებულია ობიექტის შიგნით არსებულ დეფექტებზე.

2. ტექნიკური ობიექტის დიაგნოსტიკა დაიყვანება S_1 სიმრავლის ან S_1 და S_2 ქვესიმრავლეების ანალიზზე. ობიექტის მუშაუნარიანობის განსაზღვრის დროს ხდება მისი შეფასება და ამ შეფასების შემდეგ მიაკუთვნებენ S_1 და S_2 ქვესიმრავლეებიდან ერთ-ერთს. შემდეგ ხდება მისი (ობიექტის) მდგომარეობის დეტალური შეფასება და შესაძლებელია გადაინაცვლოს ერთი ქვესიმრავლიდან მეორეში.

3. დეფექტის ჩასახვა აუცილებლად არ გულისხმობს იმას, რომ ობიექტი არამუშაუნარიანია. დეფექტი შესაძლოა არსებობდეს მუშაუნარიან ობიექტზეც. დეფექტის ჩასახვის შედეგად იმ შემთხვევაში თუ დეფექტი მასშტაბურია ობიექტი მხოლოდ ინაცვლებს ერთი მდგომარეობიდან მეორეში. ასე, რომ მუშაუნარიან ობიექტს შესაძლოა ჰქონდეს დეფექტი ისე, როგორც არა მუშაუნარიან ობიექტს, მთავარია დეფექტის შეფასების შემდეგ მან არ გადაინაცვლოს პირველიდან მეორე ქვესიმრავლეში.

რეალური პროცესების დროს ყოველთვის ითვალისწინებენ ობიექტის პარამეტრების მცირე გადაცდომას დასაშვები მნიშვნელობიდან და გაზომვის ცდომილებას. აქვე

შემოგვაქვს ეტალონური მნიშვნელობის ცნება. ეტალონად მიიჩნევა ისეთი მანქანა, რომლის მუშაობის პარამეტრები ზუსტად შეესაბამება ქარხანა-დამამზადებლის მიერ მინიჭებულ პარამეტრებს [14].

ტექნიკური ობიექტის მდგომარეობის შეფასება ხდება მასზე დაკისრებული ფუნქციების წარმატებულად შესრულების მიხედვით, რასაც ფუნქციონალური დიაგნოსტიკა ეწოდება, ან ობიექტზე სპეციალური გარე ზემოქმედების და ამ ზემოქმედების შედეგად განვითარებულ მოვლენებზე დაკვირვების მიხედვით, რასაც ტესტური დიაგნოსტიკა ეწოდება.

ფუნქციონალური დიაგნოსტიკის მთავარ უპირატესობას წარმოადგენს ის, რომ მისი რეალიზაციის პროცესში არ არის საჭირო სპეციალური გენერატორები და სხვადასხვა დანადგარები. დიაგნოსტიკაში იგულისხმება, როგორც მიღებული ინფორმაციის დამუშავება, ასევე იმ წერტილების შერჩევა, საიდანაც უნდა მოხდეს ვიბროაკუსტიკური სიგნალის აღება.

გარდა მუშა პროცესში მყოფი დეტალებისა, ხდება წარმოების პროცესში მყოფი ობიექტის დიაგნოსტიკა. ობიექტის დიაგნოსტიკის ძირითადი მიზანი წარმოების პროცესში არის დეტალების დამზადების ხარისხის კონტროლი და მათი მონტაჟი. სერიული წარმოების ძირითადი დეფექტები არის, როგორც წარმოების პროცესში დაშვებული შეცდომები, ასევე აწყობა-მონტაჟის დროს დაშვებული ხარვეზები.

ნებისმიერი სახის მექანიზმისა და მანქანის დანიშნულება არის ერთი სახის ენერჯის მეორე სახის ენერჯიად გარდაქმნა, მანქანის ოპტიმალური მუშაობისათვის აუცილებელია მარგი ქმედების კოეფიციენტი აღწევდეს მაქსიმუმს. ამისათვის მანქანის თბური, ვიბრო, აკუსტიკური და სხვა დანაკარგები უნდა აღწევდეს მინიმუმს. ამიტომ ვიბროაქტივობის დონის გაუმჯობესება არის მისი ტექნიკური მდგომარეობის ერთერთი ძირითადი მაჩვენებელი.

2.3. ჰიდრო ენერგოაგრეგატების ტექნიკური მდგომარეობის ამოცნობის ალგორითმის აღწერა

როგორც ცნობილია, მანქანის აწყობისა და მონტაჟის შემდეგ მისი მართვა ხდება სპეციალური სტენდების საშუალებით, რომელზეც აისახება ძირითადი მონაცემები და ინფორმაცია მიმდინარე ექსპლუატაციის პროცესში. შემუშავებული ალგორითმის მიხედვით დიაგნოსტიკისათვის საჭირო ინფორმაცია ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელებისა და სპექტრის ანალიზატორების დახმარებით შედის კომპიუტერში, შემდეგ ხდება ამ ინფორმაციის დამუშავება და შედარება ეტალონურ ინფორმაციასთან, ხოლო ამოცნობის ალგორითმის საშუალებით ხდება ტექნიკური მდგომარეობის შესახებ ინფორმაციის მიღება.

ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის პროცედურა დაყოფილია სამ ნაწილად:

პირველ ეტაპზე წყდება ზოგადი ამოცანა ვარგისია თუ არა დანადგარი. აქედან გამომდინარე ტექნიკური მდგომარეობა მიეკუთვნება S_1 ან S_2 ქვესიმრავლეს. მათემატიკურად ეს პროცესი აისახება შემდეგნაირად:

$$\text{თუ } \bar{X} \leq \bar{X}^{\exists} + \bar{\delta} \text{ ვარგისია}$$

$$\text{თუ } \bar{X} > \bar{X}^{\exists} + \bar{\delta} \text{ უვარგისია}$$

სადაც \bar{X} არის გამომავალი გასაზომი პარამეტრის ვექტორი, \bar{X}^{\exists} არის ეტალონური პარამეტრების შესაბამისი ვექტორი, $\bar{\delta}$ არის დასაშვები გადახრა ეტალონური მნიშვნელობიდან. თუ ერთი პარამეტრიც კი გამოდის დასაშვები მნიშვნელობიდან ობიექტი ითვლება არამუშაუნარიანად „უვარგისია“ და ობიექტის ტექნიკური მდგომარეობა გადაინაცვლებს S_2 ქვესიმრავლეში.

მეორე ეტაპზე ხდება ტექნიკური მდგომარეობის ანალიზი. ამ ეტაპზე ხდება ახალი მუშაუნარიანობის კოეფიციენტის შემოღება. ამისათვის $\bar{\delta}$ -თი განისაზღვრება თუ რომელ ზონაში იმყოფება დროის მოცემულ მომენტში არსებული მანქანის ტექნიკური მდგომარეობა. მუშაუნარიანობის კოეფიციენტი $\bar{C} = 0 \div 1$. რაც უფრო მაღალია მუშაუნარიანობა C უფრო ახლოსაა 1 თან. მათემატიკურად ეს შემდეგნაირად გამოისახება:

$$\bar{C} = 1 - \left| \frac{\bar{x} - \bar{x}^{\exists}}{\bar{\delta}} \right|$$

სადაც \bar{C} არის მუშაუნარიანობის კოეფიციენტი. თუ $\bar{C} = 0$ ობიექტი არ არის ვარგისი თუ $\bar{C} = 1$, მაშინ მისი მდგომარეობა ეტალონურია. თუ $0 \leq \bar{C} \leq 0,25$ ობიექტს გააჩნია ძალიან მაღალი მუშაუნარიანობის კოეფიციენტი, თუ $0,25 < \bar{C} \leq 0,5$ გვაქვს დაბალი მუშაუნარიანობის მაჩვენებელი თუ $0,5 < \bar{C} \leq 0,75$ -მაღალი მუშაუნარიანობის მაჩვენებელი, თუ $0,75 < \bar{C} \leq 1$ - ძალიან მაღალი მუშაუნარიანობის მაჩვენებელი.

მესამე ეტაპზე განისაზღვრება არსებული დეფექტების მიხედვით ტექნიკური მდგომარეობის რომელ კლასს მიეკუთვნება ობიექტი იმის მიხედვით, თუ რამდენად შორსაა მისი პარამეტრები ეტალონურთან. ეს ფორმულით შემდეგნაირად გამოისახება:

$$D_{ik} = \sum_{k=1}^n [\bar{A}_{ik} - A_k^{\exists}]$$

სადაც \bar{A}_{ik} არის სიმპტომები, რომელიც მიღებულია გაზომვის შედეგად მიღებული სიგნალის დამუშავების შედეგად, A_k^{\exists} -ეტალონური მნიშვნელობა, რომელიც ჩადებულია დიაგნოსტიკის ალგორითმში.

მათემატიკურად ამოცნობის ალგორითმს აქვს შემდეგი სახე:

თუ $D_{ik} \leq \Delta_{ik}^n$ - დეფექტი არ არის

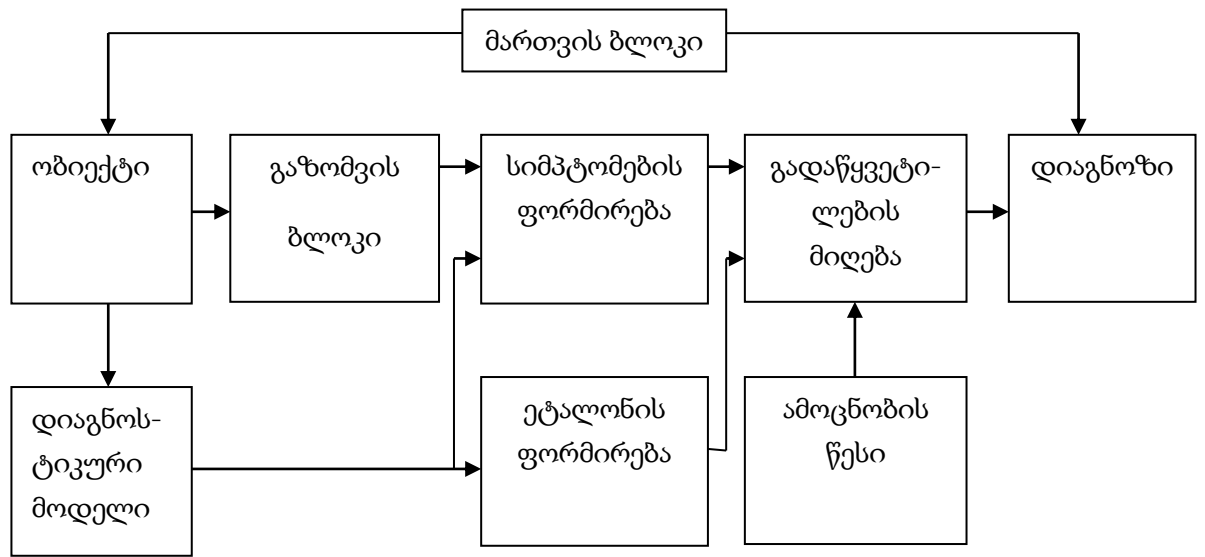
თუ $D_{ik} > \Delta_{ik}^n$ - დეფექტი არის

აქ Δ_{ik}^n არის ზღვრული მნიშვნელობა, ეს სიდიდეები მიღებულია სტატისტიკურად და ექსპერიმენტულად. თუკი ვიზრაციის დონე გაიზრდება მაგალითად ორჯერ უკვე ეს მიუთითებს დეფექტის არსებობაზე [14].

ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკისათვის როგორც დამზადების პროცესში ასევე ექსპლუატაციის დროს აუცილებელია:

1. დეტალურად და სიღრმისეულად უნდა იყოს გამოკვლეული ეტალონი - სისტემა რომელიც ახლოსაა იდეალურთან;
2. უნდა შეიქმნას იმ პარამეტრების ბაზა, რომელთა მნიშვნელობებიც ნორმიდანაა გადახრილი და ჩატარდეს შესაბამისი ექსპერიმენტები;
3. უნდა მოხდეს არსებული ინფრომაციის კომპიუტერში შეტანა და დამუშავება.

ობიექტის ტექნიკური მდგომარეობის შეფასების ბლოკემას აქვს შემდეგი სახე (ნახ.2.2).

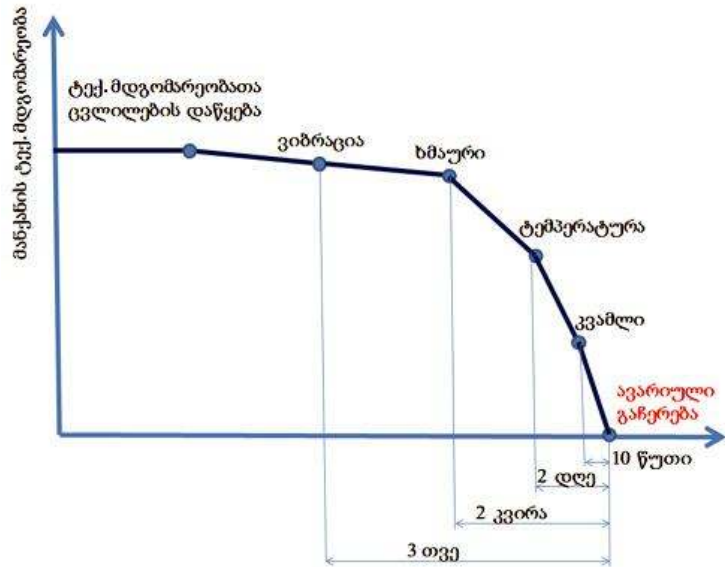


ნახ. 2.2. ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის საშუალებით ობიექტის ტექნიკური მდგომარეობის შეფასების ბლოკსქემა

2.4. ენერგეტიკული მანქანების ტექნიკურ მდგომარეობათა ცვლილებების ტრენდისა და პროგნოზის განსაზღვრის მეთოდი ტექნიკური დიაგნოსტიკის ამოცანებში

მანქანის ტექნიკური მდგომარეობა - არის მანქანის ტექნიკური პარამეტრების ერთობლიობა, რომლებიც ახასიათებენ ობიექტის ფუნქციონირების შესაძლო გადახრას ნორმისაგან და რომლებსაც თავის მხრივ მივყავართ შესაძლო გაუმართაობამდე. (ობიექტის გაჩერებამდე).

როგორც კვლევები უჩვენებენ, ზოგადად, მანქანათა ტექნიკურ მდგომარეობათა ცვლილებების დაწყებას და შემდგომში დეგრადაციული პროცესების მიმდინარეობას დროში აქვს ქვემოთ ნახ.2.3-ზე წარმოდგენილი სახე. ყველაზე ადრე ცვლილებებზე რეაგირებს ვიბრაცია, შემდეგ ხმაური, შემდეგ ტემპერატურა და ბოლოს იგრძნობა ნამწვავის სუნი და კვამლი.



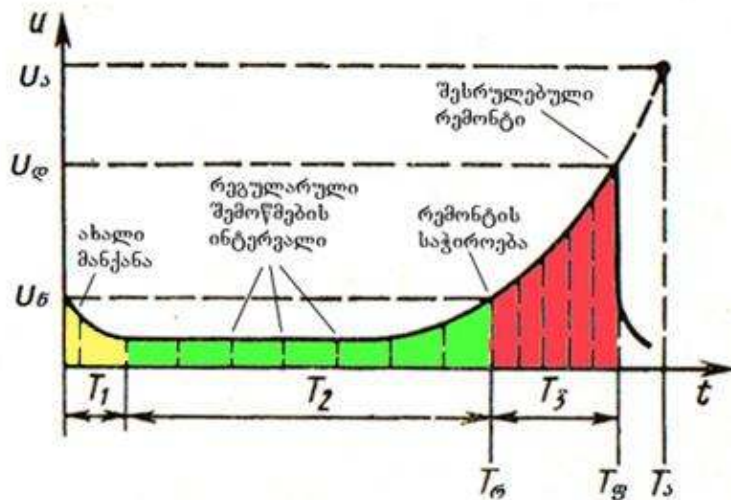
ნახ.2.3. მანქანათა ტექნიკურ მდგომარეობათა ცვლილებების დაწყება და შემდგომი დეგრადაციული პროცესების განვითარება დროში

ტექნიკურ მდგომარეობათა მონიტორინგი მოიცავს დანადგარების ან მექანიზმების სტრუქტურული კომპონენტების მდგომარეობათა უწყვეტ ან პერიოდულ შეფასებებს ექსპლუატაციის პროცესში. ეს იძლევა ნებისმიერი მტყუნებისა და დეფექტების გამოვლენისა და მათი წინასწარმეტყველების (პროგნოზის) შესაძლებლობებს, რასაც მოაქვს არსებითი სარგებლობა, კერძოდ, ამცირებს მომსახურების დანახარჯებს, ზრდის მანქანათა მზადყოფნას, ამცირებს სათადარიგო ნაწილების გამოყენებისა და შენახვის საჭიროებას და აუმჯობესებს უსაფრთხოებას [16].

ტექნიკური მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის ამოცანებში მანქანათა ტექნიკურ მდგომარეობათა კონტროლის დროს შესაძლებელია ორი მიდგომა.

პირველი მიდგომა მდგომარეობს მანქანის წარმომადგენლობითი პარამეტრების ცვლილებათა მუდმივი კონტროლის ორგანიზაციაში (ცვლილებათა ტრენდის, ტენდეციის). ამ პარამეტრების ცვლილებები ახასიათებენ მანქანის ტექნიკურ მდგომარეობათა ცვლილებებს მუშაობის პროცესში, იმისათვის რომ მივუთითოთ დრო, როდესაც ტექნიკური მდგომარეობის გაუარესების სიჩქარე გახდება კრიტიკული. წარმომადგენლობით პარამეტრში იგულისხმება, მაგალითად: ვიბრაციის ან ხმაურის ჯამური დონეები, ან მათი სპექტრალური მდგენელების დონეები, სრული ვიბრაციული ენერჯია, ტემპერატურა, წნევა, დენი, ძაბვა და ა.შ..

მანქანის მუშაობის ტექნიკურ მდგომარეობათა წარმომადგენლობითი პარამეტრის (მაგალითად, ვიბროსიგნალის) ტიპურ დამოკიდებულებას დროზე აქვს ქვემოთ ნახ.2.4-ზე წარმოდგენილი სახე.



ნახ.2.4. მექანიზმის კვანძის წარმომადგენლობითი პარამეტრის ტექნიკური

მდგომარეობის ტიპური ქცევა მუშაობის პროცესში

T_1 - მიმუშავების პერიოდი, T_2 - ნორმალური ფუნქციონირების პერიოდი, T_3 - დეფექტის ჩასახვისა და განვითარების პერიოდი, T_r - დანიშნული რესურსის დრო, T_g - ფაქტიური რემონტის ვადის დრო, T_s - ავარიის დადგომის დრო, U_n - ნორმალური ფუნქციონირების დონე, U_d - დასაშვები დონე, U_a - ავარიული დონე.

მკვეთრად გამოირჩევა სამი პერიოდი: მანქანის ნაწილების მიმუშავების (მიხახუნების, მორგების) პერიოდი (T_1 - ყვითელი ფერი გრაფიკზე), ნორმალური მუშაობის პერიოდი (T_2 - მწვანე ფერი) და დეგრადაციის პერიოდი (T_3 - წითელი ფერი), როდესაც ტექნიკური მდგომარეობის გაუარესების სიჩქარე იზრდება დროის მიხედვით. ამ დამოკიდებულებიდან გამოდის, რომ სარემონტო სამუშაოების ჩატარების დრო T_r (დანიშნული რესურსი) ბევრად უფრო ნაკლებია ვიდრე ფაქტიური ვადა T_g , როდესაც ეს რემონტი ხდება აუცილებელი.

ტრენდური მახასიათებელი (მახასიათებლის განვითარების ტენდენცია) იძლევა შესაძლებლობას მოვახდინოთ ტექნიკურ მდგომარეობათა კატასტროფული ცვლილებების დადგომის მომენტის პროგნოზირება. აქედან გამომდინარე,

შესაძლებელია დარჩენილი რესურსის პროგნოზირება და ფიზიკურად დასაბუთებული რემონტის დაგეგმვის ვადის განსაზღვრა.

ეს მეთოდი რეკომენდირებულია ძვირადღირებული უნიკალური ან საპასუხისმგებლო ტექნიკური ობიექტებისათვის, რომელთა მუშაუნარიანობის დარღვევას შეუძლია მიგვიყვანოს კატასტროფულ შედეგებამდე, მათ შორის ადამიანების ჯამრთელობასთან და სიცოცხლესთან დაკავშირებულს.

რაც უფრო ადრე გამოვლინდება დეფექტი, მით უფრო მეტია ალბათობა ავარიული სიტუაციის დროულად თავიდან აცილებისა. ამიტომაც, რომ მანქანებისა და მექანიზმების ექსპლუატაციის ეტაპზე ასეთი დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ჩასახული დეფექტების ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის მეთოდებს, რომლებიც იძლევიან კარგ შედეგებს.

მეორე მიდგომა (საკონტროლო შემოწმება) დაფუძნებულია ტექნიკურ მდგომარეობათა წარმომადგენლობითი პარამეტრების ეპიზოდურ კონტროლზე და მათ შედარებაზე ზღვრულ მნიშვნელობებთან, რომლებიც თავის მხრივ არიან დადგენილი საკმაოდ ბევრი წინასწარ ჩატარებული დიაგნოსტიკური ექსპერიმენტების საფუძველზე. საკონტროლო შემოწმების მეთოდი მიზანშეწონილია გამოყენებული იქნას იმ მანქანების და ნაწილების გამოვლენისათვის რომლებიც იმყოფებიან კრიტიკულ მდგომარეობაში [15].

თუ შევაჯამებთ ზემოთქმულს და გავითვალისწინებთ ყოველდღიური პრაქტიკის შედეგებს, შეიძლება დავასკვნათ, რომ მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის მეთოდების გამოყენება მანქანათა ექსპლუატაციის ეტაპზე იძლევა შესაძლებლობას დაუსაბუთებელი გადასინჯვის ლიკვიდაციის ხარჯზე, რომელიც ამცირებს რესურსს, გაგრძელებული იქნას დანადგარის მუშაობის ვადა, შემცირებული იქნას ექსპლუატაციის ღირებულება მუშაობის დროს, სათადარიგო ნაწილებისა და საწვავ-საპოხი მასალების ეკონომიის ხარჯზე, ხოლო წარმოების პირობებში ავამაღლოთ დანადგარის ეფექტურობა დაუსაბუთებელი გაჩერებების ხარჯზე.

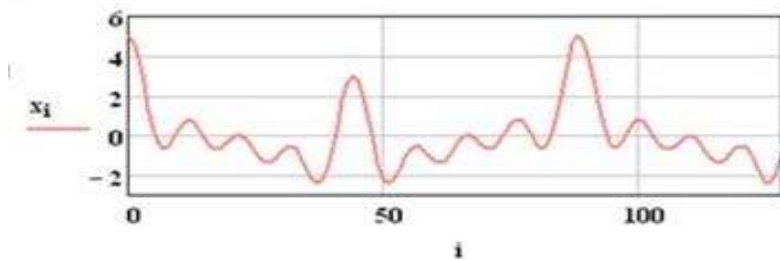
ავტომატიზირებულ წარმოებებში დიაგნოსტიკის მეთოდების გამოყენება იძლევა შესაძლებლობას ვაწარმოოთ ტექნოლოგიური პროცესების სიზუსტის პარამეტრების უწყვეტი კონტროლი, რაც არის გარანტია მაღალი ხარისხის პროდუქციის გამოშვებისა,

დანადგარების მოცდენების, პროფილაქტიკური დათვალეობებისა და წინასწარ დაგეგმილი მიმდინარე რემონტისათვის დროის შემცირებით.

ზოგადად, მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის მეთოდების (განსაკუთრებით ვიბროაკუსტიკური მეთოდების) დანერგვა პრაქტიკაში იძლევა ტექნოლოგიური პროცესების მაღალი დონის ოპტიმიზაციის დიდ შესაძლებლობებს.

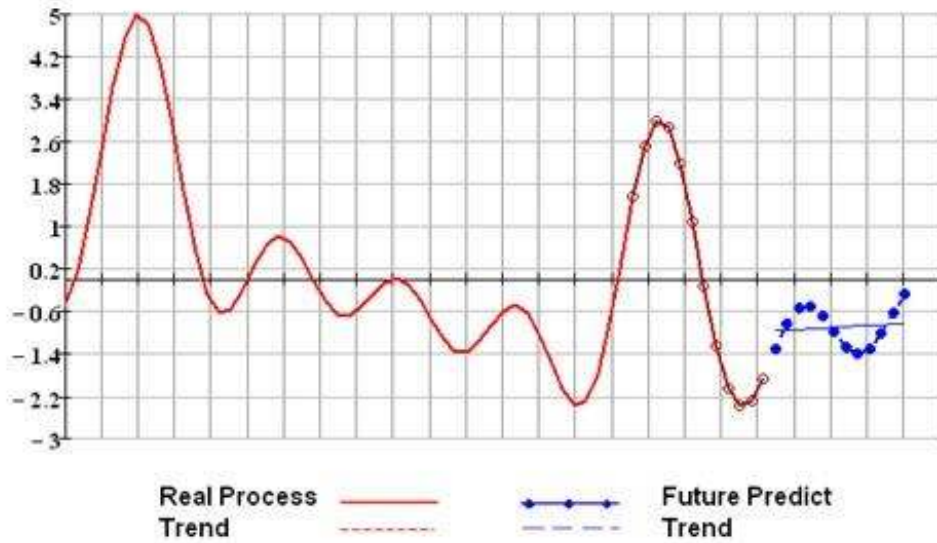
Mathcad-ში არის ფუნქციები: `detrend` და `predict` ცვლილებათა ტრენდის განსაზღვრისათვის და ცვლილებათა პროგნოზისათვის (ბურგის ფუნქცია, დაფუძნებული ავტორეგრესიულ მეთოდზე), რომლებიც კარგ პრაქტიკულ შედეგებს იძლევიან [42]. საილუსტრაციოდ გამოვიყენოთ ეს ფუნქციები, მაგალითად ქვემოთ მოყვანილ მოდელირებულ სიგნალზე (ნახ.2.5.) შევწყვიტოთ პროცესი ნებისმიერ დროის მონაკვეთში და გავაკეთოთ მოსალოდნელი წერტილების პროგნოზი და ვიპოვოთ ტრენდი (ნახ.2.6).

$$x_i := A1 \cdot \cos(2 \cdot \pi f1 \cdot t_i) + \sum_{k=1}^4 (Ak \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_k \cdot t_1))$$



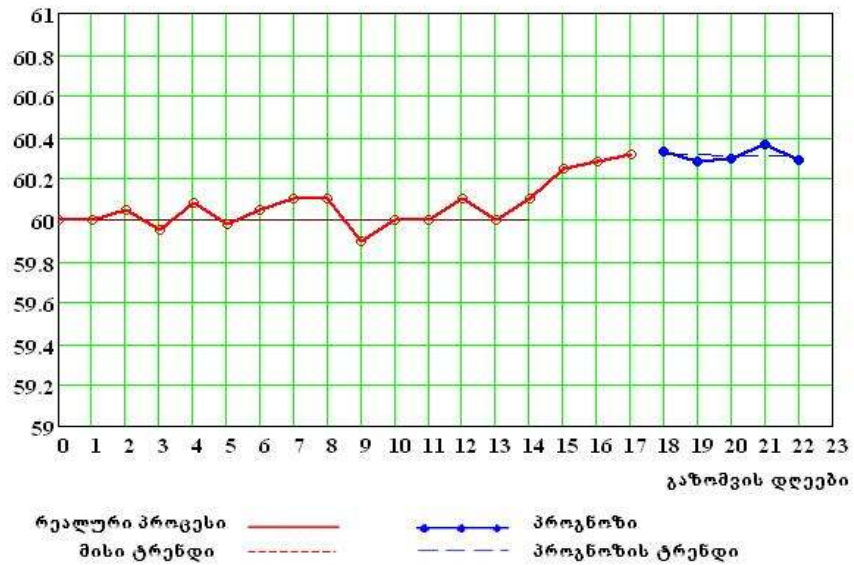
ნახ.2.5. მოდელირებული სიგნალი

Last 12 points results and future 12 points forecasts



ნახ. 2.6. შეწყვეტილი სიგნალის მოსალოდნელი წერტილების პროგნოზი და ტრენდი როგორც ვხედავთ ეს მეთოდი მაღალი სიზუსტით აკეთებს წერტილების პროგნოზს თვით პროცესიდან გამომდინარე. რეალურ სისტემებში, თუ პროცესში არის რაიმე კანონზომიერება, მეთოდი ავლენს ამ კანონზომიერებას და იყენებს მას პროცესის მოსალოდნელი წერტილების მაღალი სიზუსტით პროგნოზისათვის. გამოვიყენოთ ეს მეთოდი ჰიდროენერგოაგრეგატის ტურბინის საკისრის ვიბრაციის ჯამური დონის (დბ) ტრენდისა და ცვლილებათა მოსალოდნელი პროგნოზისათვის.

დბ, ვიბრაჩქარება



ნახ.2.7. ტექნიკურ მდგომარეობათა ტრენდისა და პროგნოზის განსაზღვრის მაგალითი

როგორც კი დაიწყება საკისარში დეგრადაციული პროცესები, სენსორიდან წამოსულ სიგნალს მეთოდი უკეთებს პროგნოზს და საზღვრავს ტრენდს, რაც მიანიშნებს ოპერატორს საჭირო მოქმედებებისათვის. იდეალურია ეს მიდგომა პროცესების ავტომატიზაციისათვის, მითუმეტეს, რომ დღესდღეობით მიმდინარეობს ინტენსიური მუშაობა ვიბრაციული სიგნალების გამოყენებით ავტომატიზირებული მართვის სისტემების შესაქმნელად.

2.5. მაღალსიხშირული ვიბრაციული სიგნალის შემომვლელის სპექტრალური ანალიზის გამოყენება ჰიდროენერგოაგრეგატების სრიალის საკისრების ტექნიკურ მდგომარეობათა ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკისათვის

ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის სისტემის მაღალი უტყუარობისათვის საჭიროა, რომ სტანდარტულ სიტუაციებში გაზომვები ჩატარდეს სისტემატურად (ან გარკვეული პერიოდულობით, მაგალითად, კვირაში ერთჯერ); მანქანის ერთიდაიგივე წერტილებში; მანქანის სტაბილურ ბრუნვის სიხშირეებზე და მუშაობის სტანდარტულ რეჟიმებში.

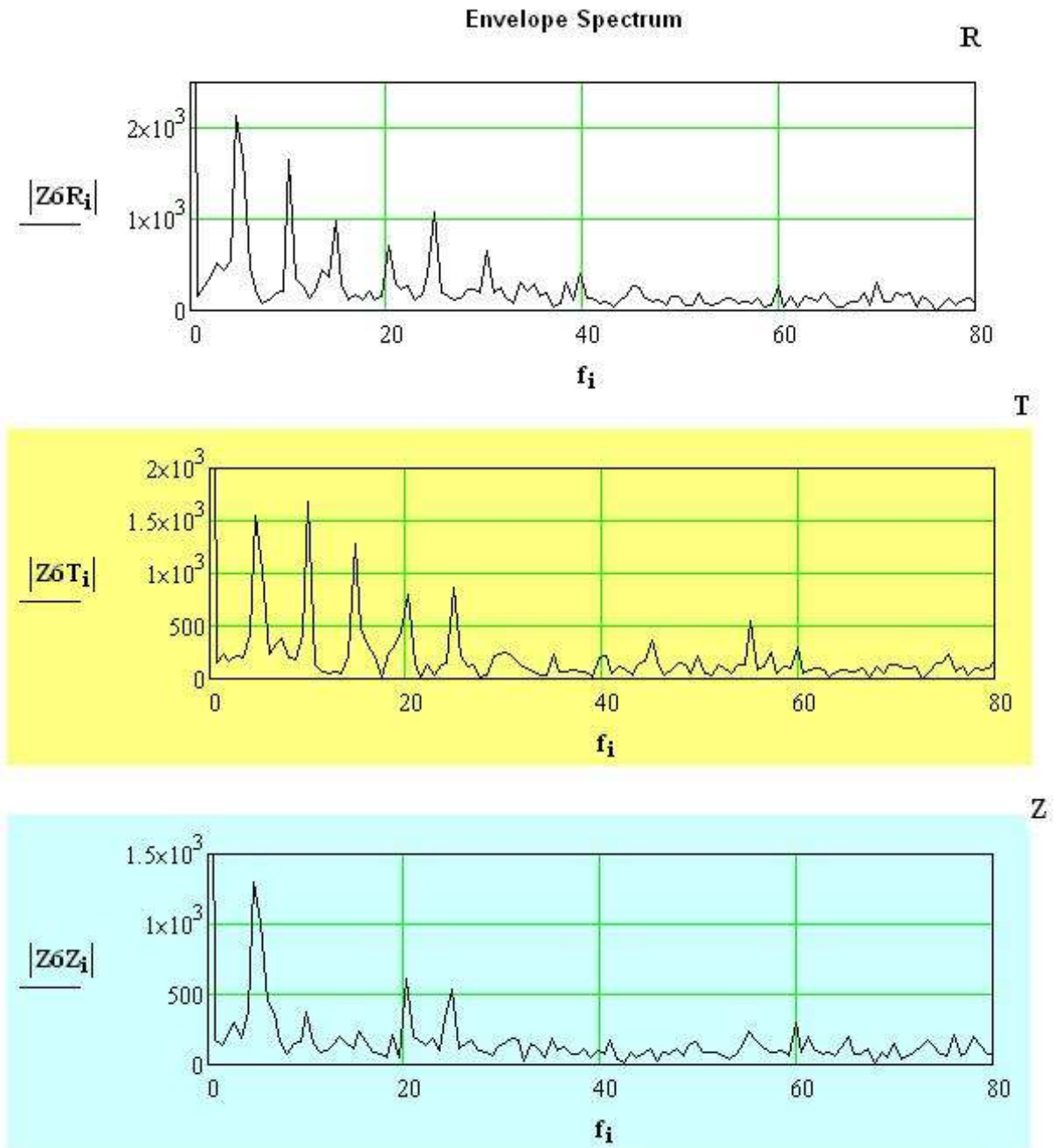
სრიალის საკისრებში მოქმედებენ ხახუნის ძალები და აგრეთვე ძალები, რომლებიც თან ახლავთ როტორის ავტორხვევებს საკისარში. ეს ძალები არიან სტატიკური დატვირთვის და ხახუნის ძალების არაწრფივი ურთიერთქმედების შედეგი, რადგან როტორი გამოყავს წონასწორობის მდგომარეობიდან ხახუნის ძალებს და უკან აბრუნებს სიმძიმის ძალა – ადგილი აქვს როტორის ავტორხვევებს. ასეთი არამდგრადი წონასწორობის მიზეზი არის ხახუნის ძალების არაწრფივი დამოკიდებულება შეზეთვის ფენის სისქეზე, რომელიც იზრდება როტორის წონასწორობის მდგომარეობიდან გადახრასთან ერთად. ავტორხვევების სიხშირე მით უფრო ნაკლებია, რაც მეტია ღრეჩო საკისარში, ანუ რაც მეტია მისი ცვეთა [40].

როგორც წესი, ავტორხევეების სიხშირე იცვლება ნახტომებით $f_{\text{სიხშირიდან}} \quad \frac{1}{2} f_{\text{სიხშირემდე}}$, ზოგჯერ, $\frac{1}{3} f_{\text{სიხშირემდე}}$, ცვეთის მიხედვით. ავტორხევეების მიზეზი შეიძლება იყოს არამართო სრიალის საკისრის ცვეთა, არამედ შეზეთვის ხარისხის შემცირება ან ზეთის საკისარში მიწოდების დარღვევა.

დარტყმითი ძალები, რომლებიც მოქმედებენ სრიალის საკისრებში, არიან ორი სახის. “მშრალი” დარტყმა ზეთის ფენის გარღვევით ძალიან საშიშია, მაგრამ ხდება იშვიათად და თან ახლავს მაღალსიხშირული ვიბრაციის მნიშვნელოვანი ზრდა [6].

“ჰიდრავლიკური” დარტყმა, რომელიც არ აზიანებს ზეთისფენას, არამედ საკისრის არაერთგვაროვანი ცვეთის გამო დატვირთვის ზონაში, სადაც შეზეთვის სისქეს და მოძრაობის სიჩქარეს აქვთ ნახტომები, წარმოიშობა ნაკადის ტურბულენტური “მოწყვეტა”. შეზეთვის ნაკადის “მოწყვეტის” მომენტი აღიქმება ვიბრაციების მზომი სისტემებით როგორც დარტყმა, რომელსაც თან ახლავს მაღალსიხშირული ვიბრაციების იმპულსური ზრდა. ასეთი “დარტყმა” არ იწვევს საკისრის სწრაფ რღვევას, მაგრამ იწვევს მის არაერთგვაროვან ცვეთას.

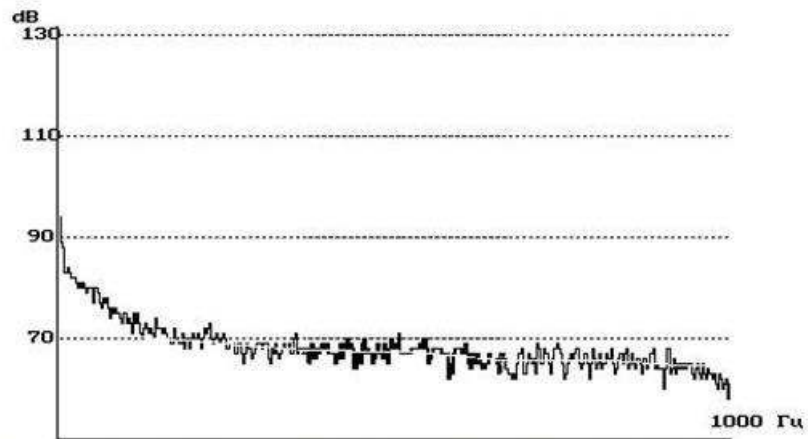
ხახუნის ძალებით გამოწვეული სრიალის საკისრების სწორი დიაგნოსტიკა ხდება პრაქტიკულად ყოველთვის საკისრის დაბალსიხშირული ვიბრაციების სპექტრის და მაღალსიხშირული (> 5 კჰც-ზევით) ვიბრაციები სშემომვლების სპექტრის ერთობლივი გაზომვებით.



ნახ.2.8. ადებული ვიბრაციული სიგნალის სპექტრის შემომვლელი რადიალური, ტანგენციური და ვერტიკალური მიმართულებებით

სრიალის საკისრის დეფექტებს აქვთ სამი ძირითადი სიმპტომი:

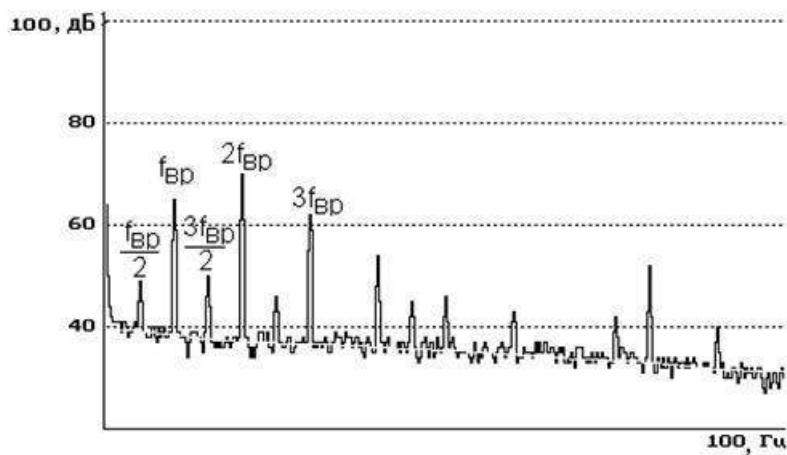
1. შემომვლელის სპექტრში ჩნდება ამაღლება, აწევა დაბალ სიხშირეებზე. მიზეზი: ადგილი აქვს ზეთის სისქის და ადგილმდებარეობის ფლუქტუაციას, რომელიც შემთხვევით ვიბრაციას მოდულაციას უკეთებს დაბალსიხშირული შემთხვევითი პროცესით (ნახ.2.8).



ნახ.2.9.სრიალის საკისრის ცვეთისას მაღალსიხშირული ვიბრაციების შემომვლელის სპექტრი

(აღმოჩენილი ზეთის სოლის არასტაბილურობით)

2. ჩნდება მდგენელი – ბრუნვის სიხშირის სუბჰარმონიკა $1/2$ ან $1/3$. მიზეზი: საკისარში იწყება როტორის ავტორხევები, რაც არის ვიბრაციების წყარო ბრუნვის სიხშირის სუბჰარმონიკებზე. (ნახ.2.9.)



ნახ.2.10.სრიალის საკისრის ვიბრაციების შემომვლელის სპექტრი როტორის ავტორხევებით

3. საკისრის მაღალსიხშირული ვიბრაციების შემომვლელის სპექტრში ჩნდება სუსტად მიღევადი მდგენელების მწკრივი, რომლებიც როტორის ბრუნვის სიხშირის ჯერადია. მიზეზია: დარტყმების (მშრალი და ჰიდრავლიკური) წარმოშობა. (ნახ.2.10.)



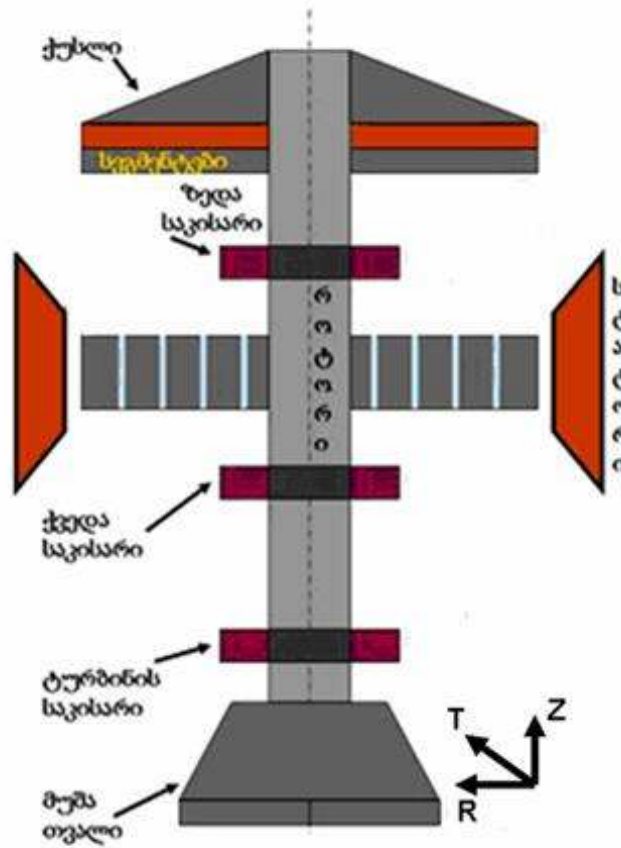
ნახ.2.11.სრიალის საკისრის ვიბრაციების შემომვლელის სპექტრი. ა) დეფექტის გარეშე; ბ) საკისარში დარტყმების შემთხვევაში

საბოლოოდ – მანქანის (რომელსაც ერთი ბრუნვის ღერძი აქვს) საკისრის ტექნიკური მდგომარეობის უტყუარი დიაგნოსტიკისა და პროგნოზისათვის (ვიბრაციების ერთჯერადი გაზომვებით) საკმარისია ჩატარდეს სამი გაზომვა:

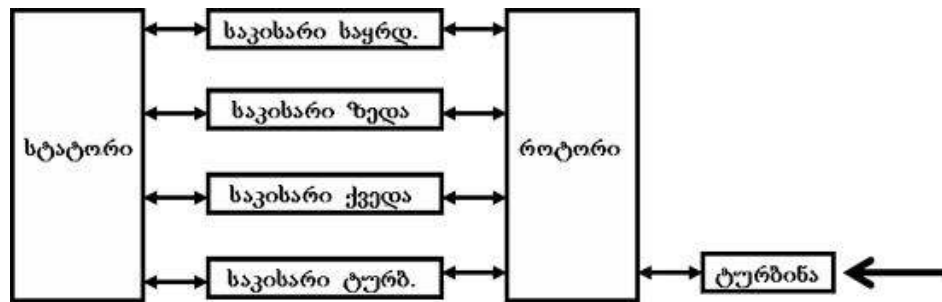
1. ვიბრაციის დაბალსიხშირული სპექტრის;
2. მაღალსიხშირული შემთხვევითი ვიბრაციების შემომვლელის სპექტრის;
3. მაღალსიხშირული ვიბრაციების ფორმის (მხოლოდ ორი პარამეტრი - საშუალო კვადრატული მნიშვნელობა და კრესტ-ფაქტორი).

საჭიროა აგეთვე ვიბრაციების ჯამური (ინტეგრალური) დონის გაზომვა და ზღვრული მნიშვნელობების ცოდნა.

ჰიდროენერგოაგრეგატისათვის (ნახ.2.11.) ტურბინა (მუშა თვალი) არის ძირითადი ვიბროაქტიური კვანძი და იგი მოითხოვს დეტალურ ვიბრაციულ მონიტორინგს, ანალიზს და დიაგნოსტიკას. ვიბრაციების ამგზნები ძირითადი ფაქტორი წყალია, მისი წნევა და პულსაცია გადაეცემა როტორზე დამაგრებულ ტურბინის ფრთებს, შემდეგ საკისრებს და აგრეგატის კორპუსს. ეს პროცესი სტრუქტურულად მოცემულია ნახ.2.12-ზე.



ნახ.2.12. ჰიდროენერგოაგრეგატის პრინციპული სქემა



ნახ.2.13.ჰიდროენერგოაგრეგატში ვიბრაციების გავრცელების სტრუქტურული სქემა

წყლის წნევის პულსაციას შემთხვევითი ხასიათი აქვს და მისი ზემოქმედების შედეგად გენერირდება შემთხვევითი მაღალსიხშირული ვიბრაციები და მხაური.

ვიბრაციების შედეგად შესაძლებელია ადგილი ჰქონდეს:

1. ტურბინის (მუშათვალის)ცემას;
2. მისი ცალკეული ფრთების დეფექტებს;

3. წყლის ნაკადის ტურბულენტობის ზრდას;

4. წყლის კავიტაციას.

რომელთა დიაგნოსტიკებისათვის გამოიყენება მაღალსიხშირული ვიბრაციების შემომვლელის სპექტრალური ანალიზი.

ტურბინის დიაგნოზის უტყუარობა იზრდება, თუ აგრეგატის ტურბინის საკისრის კვანძის მაღალსიხშირული ვიბრაციების შემომვლელის სპექტრის გარდა გაიზომება და გაანალიზდება დაბალსიხშირული ვიბრაციების სპექტრი. ვიბრაციების ფრთების მდგენელებზე ($n f_0$, მაგალითად, თუ ფრთების რიცხვი $n=20$, და $f_0=5$ ჰც მაშინ 100, 200, 300 ჰც და ასე შემდეგ) და ბრუნვის ჰარმონიკებზე ($f_0=5$ ჰც, 10, 15 ჰც და ასე შემდეგ) მონაცემთა ანალიზის საფუძველზე შესაძლებელია ბევრად უფრო ზუსტად განისაზღვროს დეფექტების სიდიდეები.

ყველა მოქმედი ძირითადი რხევითი ძალები განისაზღვრებიან წყლის ნაკადის, ტურბინის ფრთებისა და კორპუსის შიგა ზედაპირის ურთიერთქმედებით.

ძირითადი ძალა, რომელიც მოქმედებს ტურბინის ყოველ ფრთაზე – არის ნაკადისა და ფრთის ურთიერთქმედების “ამწე” ძალა. ფრთები განლაგებულია კუთხით ნაკადის მიმართ სპეციალურად, ისე რომ ამწე ძალების ჯამი, რომლებიც მოქმედებენ ერთგვაროვან ნაკადში უდეფექტო ტურბინაზე, მიმართულია მისი ბრუნვის ღერძის გასწვრივ და არ გააჩნია ცვლადი მდგენელები.

ტურბინის რომელიმე ფრთის ამწე ძალის მიმართულების ან სამუალო მნიშვნელობიდან გადახრის შემთხვევაში წარმოიშობა რადიალური ძალა (ბრუნვის სიხშირის) და იმავე სიხშირის ძალთა მომენტი, რომლის ვექტორი მიმართულია ბრუნვის ღერძის პერპენდიკულარულად.

წყლის ნაკადის არაერთგვაროვნების შემთხვევაში ტურბინის ზონაში მოქმედებს რადიალური ძალა და იგივე ბუნების ძალთა მომენტი, რომელთა სიხშირე განისაზღვრება ტურბინის ფრთების რიცხვით. ამ სიხშირეს ფრთების სიხშირე ეწოდება $f_g = f_0 * n$, თუ ფრთების რიცხვი $n=20$, და $f_0=5$ ჰც მაშინ 100, 200, 300 ჰც და ასე შემდეგ – ფრთების ჰარმონიკებია. ბრუნვის სიხშირის ჰარმონიკებია ამ შემთხვევაში (თუ $f_0=5$ ჰც 5, 10, 15 ჰც ...და ასე შემდეგ).

ეს ძალები და მომენტები სიხშირეებით kf_0 და kf_1 გადაეცემა ბრუნვის საყრდენების მეშვეობით აგრეგატის კორპუსს. მეორეს მხრივ, კორპუსს გადაეცემა აგრეთვე წყლის ნაკადის წნევის პულსაცია არა მარტო ამ სიხშირეებზე. ჯერ ერთი, აქ არის წნევის პულსაცია გარემოთა საზღვარზე (აერო და ჰიდროდინამიური ხახუნი). მეორე, არის წნევის პულსაცია, რომელიც გამოწვეულია ნაკადის ტურბულენტობით და ნაკადის მოწყვეტით ფრთების უკანა ნაპირებზე. მესამე, სითხის კავიტაციის ძალები თუ ადგილი აქვს კავიტაციას.

აგრეგატის კორპუსის რხევებს, ვიბრაციებს, რომლებიც გამოწვეულია წნევის ცვლადი პულსაციებით ნაკადში, აქვთ შემთხვევითი ხასიათი, და მკაცრად ფიქსირებული სიხშირე არ გააჩნიათ.

რადგან მაღალსიხშირული შემთხვევითი ხმაურისა და ვიბრაციების ანალიზის ძირითადი მეთოდი არის შემომვლელის სპექტრალური ანალიზი ამიტომ ტურბინის დიაგნოსტიკის დროს მასზე კეთდება ძირითადი კონცენტრაცია. ასეთი ანალიზის საფუძველზე შესაძლებელია გამოვლინდეს:

1. ტურბინის ცემა;
2. ცალკეული ფრთების დეფექტები;
3. ნაკადის გაზრდილი ტურბულენტობა;
4. კავიტაცია.

ამისათვის საჭიროა ვირაციების შემომვლელის სპექტრი გაიზომოს ტურბინის ფრთებთან, რაც შეიძლება ახლოს. სენსორის დაყენების წერტილები წინასწარ უნდა იქნას მომზადებული.

დიაგნოზის უტყუარობა მნიშვნელონად იზრდება, თუ აგრეთვე იზომება კორპუსის თუ საკისრის კვანძის დაბალსიხშირული სპექტრი.

სიმპტომები:

1. ტურბინის ცემა – სიმპტომი - არის დაბალსიხშირული ვიბრაციების ზრდა ჰარმონიკებზე kf_0 - ერთერთი სიმპტომი.
2. ცალკეული ფრთების დეფექტები – სიმპტომი – არის ფრთების დეფექტების სიმპტომი არის დაბალსიხშირული ვიბრაციების ზრდა ჰარმონიკებზე kf_0 დამატებული ჰარმონიკების ზრდით იგივე სიხშირეებზე შემომვლელის სპექტრში, თანაც

ჰარმონიკების დონეები შესაძლოა მეტი იყოს ფრთების ჰარმონიკების დონეებზე. შესაძლოა გამოჩნდნენ გვერდითი მდგენელები ფრთების ჰარმონიკებზე ვიბრაციის სპექტრში და მის შემომვლელში. ძირითადი განსხვავება სიმპტომების ფრთების დეფექტებისა და ტურბინის ცემის ითვლება ძირითადად ჰარმონიკების ზრდა k_f შემომვლელის სპექტრში. ფრთების ჰარმონიკები მოჩანს ტანგენციური და ვერტიკალური მიმართულებით[13].

2.6. ჰიდროენერგოაგრეგატების ეტალონური ვიბროაკუსტიკური მახასიათებლები ექსპლუატაციის პროცესში და მათი ანალიზი

ჰიდროელექტროსადგურების მრავალწლიანი ექსპლუატაციის პრაქტიკა მომსახურე პერსონალს ხმაურისა და ვიბრაციების ცვლილებით ნათლად უჩვენებს რაღაც ცვლილებებზე მომუშავე დანადგარში. მაგრამ მომსახურე პერსონალს არ აქვს ინფორმაცია აგრეგატში მომხდარი რეალური ცვლილებების შესახებ. მხოლოდ ვიბრაციებისა და ხმაურის გაზომვებითაა შესაძლებელი ტექნიკური მდგომარეობის ნორმისაგან გადახრის დადგენა, ეტალონისაგან. ეტალონი არის სისტემა, რომელიც ახლოს არის იდეალთან. ქარხანას ჰიდროაგრეგატების მწარმოებელს გააჩნია სტატისტიკურად დადგენილი ვიბრაციების დასაშვები სიდიდეების მნიშვნელობები. აგრეთვე ГОСТ 5616-89-ით განსაზღვრულია ჰიდრო გენერატორებისათვის ვიბრაციების (ორმაგი ამპლიტუდა ან რხევათა მანძილი) ყველა მიმართულებით მუშაობის ყველა დამყარებულ რეჟიმებზე არ უნდა აღემატებოდეს ამ სტანდარტით განსაზღვრულ დასაშვებ სიდიდეებს.

მაგალითად, ჰიდრო გენერატორებისათვის, რომელთა ნომინალური ბრუნთა რიცხვი უდრის 100-დან 187,5 ბრ/წუთში დასაშვები ვიბრაციების ამპლიტუდა უდრის 0.15 მმ. ეს მნიშვნელობა უნდა ჩაითვალოს ეტალონად. ზოგადად, რაც უფრო ნაკლებია ეტალონური დასაშვები სიდიდეები, მით უფრო მგრძობიარეა დიაგნოსტიკური სისტემა დეფექტების მიმართ. ჩვენ კვლევებში ვთლიდით დასაშვებ სიდიდედ

ფარდობითი სკალით 6 დბ-ს, ანუ თუ ვიბრაციები იზრდებოდა ორჯერ, მაშინ მოსალოდნელი იყო დეფექტის გამოვლენა [11].

სამუშაოებში რეკომენდირებულია ჩავთვალოთ, რომ მიმდინარე პერიოდული რხევითი პროცესი მხოლოდ იშვიათად წყდება დამახასიათებელი ცვლილებებით - ნახტომის, ტრენდის ან ამოვარდნების სახით, მდგომარეობას „ნორმა“ ენიჭება მაღალი ალბათობა. ამიტომ ექსპერიმენტებით მიღებული სპექტროგრამები და ცხრილები, როგორც ეტალონური, რეალურად შესაძლებელია გამოყენებული იქნან ჰიდრო-ენერგოაგრეგატების ვიბროაკუსტიკური კონტროლისათვის ექსპლუატაციის პროცესში. გარდა ამისა, რადგან ჩვენი გაზომვები ფარდობითია, ვიბროაკუსტიკური მონიტორინგის დროს, ანუ გუშინდელი (ან წინა) გაზომვების შედეგების შედარება ხდება დღევანდელთან და მათ შორის განსხვავებების შედარების მნიშვნელობას აქვს უფრო მეტი მნიშვნელობა, ვიდრე აბსოლუტურ განსხვავებას ეტალონთან. ამიტომ დასაშვებია რხევების სიდიდეების განსაზღვრა პრობლემას არ წარმოადგენს.

ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის ამოცანა იხსნება დეტერმინირებული სახით, არაკორელირებული სიგნალებით წყაროებიდან და მათი გაყოფის შესაძლებლობით სიხშირულ სივრცეში. ტექნიკურ მდგომარეობათა სივრცის ანასახი სიგნალების სივრცეში და პირიქით, მიჩნეულია ურთიერთ-ცალსახად. გარდა ამისა, როგორც უჩვენა გაზომვებმა, რხევითი პროცესები ჰიდროგენერატორებში, როგორც წესი, წარმოადგენენ პოლიჰარმონიული და შემთხვევითი პროცესების ჯამს. მათ გააჩნიათ სტაციონარულობის თვისებები, ანუ არ არიან დამოკიდებული დროის ათვლის საწყისზე [9].

თავი 3

MathCad-ის შესაძლებლობების გამოყენება ვიბროაკუსტიკურ დიაგნოსტიკაში

3.1. სიგნალების დამუშავება MathCad ის სისტემაში

MathCad-ი არის კომპიუტერული მათემატიკის პოპულარული სისტემა და განკუთვნილია მათემატიკური ამოცანების ამოხსნათა ავტომატიზაციისათვის მეცნიერების, ტექნიკისა და განათლების სხვადასხვა დარგებში. სახელწოდება წარმოქმნილია და შედგება ორი სიტყვისაგან - Mathematika და CAD (Computer Aided Design - ავტომატური პროექტირების სისტემა).

MathCad-ი შესაძლებელია წარმატებულად იქნას გამოყენებული არა მარტო ფიზიკური დანადგარების ექსპერიმენტების მონაცემთა დამუშავებისას, არამედ მუშაობის ეფექტური მართვის, ფაქტიური მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის, მათი სრული ავტომატიზაციის ამოცანებში.

ქვემოთ მაგალითების სახით წარმოდგენილია კომპიუტერული მათემატიკის პროგრამა MathCad -ის გარემოში მანქანების ტექნიკურ მდგომარეობათა დიაგნოსტიკის ამოცანათა რეალიზაციის ძირითადი ეტაპები. ამ ამოცანების ამოხსნის საფუძველს წარმოადგენს MathCad-ისგარემოში ავტორების მიერ შემუშავებული ციფრული ანალიზატორი. ქვემოთ მოყვანილია ანალიზატორში რეალური ვიბრაციული სიგნალების შეტანისა და მისი დამუშავების (დროითი რეალიზაცია, სპექტრული წარმოდგენა, კეპსტრი, სპექტრის მომვლები) მაგალითები. ასევე განხორციელებულია მოცემული სიგნალების მოდელირება და დიაგნოზის დასმა „თუ - მაშინ“ ლოგიკის ბლოკის გამოყენებით [7].

უკანასკნელ პერიოდში კომპიუტერული ტექნიკისა და პროგრამირების განვითარების დონე მნიშვნელოვნად ცვლის ბევრ დარგში ტექნიკური ამოცანების ამოხსნის გზებს და მეთოდებს, კერძოდ მნიშვნელოვნად ამარტივებს მათ. პირველ რიგში ეს ეხება რთული ფიზიკური პროცესების მართვის ავტომატიზაციას და მათ შორის სხვადასხვა სახის მექანიკური მოწყობილობების ტექნიკურ მდგომარეობათა ვიბროაკუსტიკური მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის სისტემების ავტომატიზაციას, თუ წინათ ასეთი ამოცანების რეალიზაციისათვის საჭირო იყო დიდი საინჟინრო

განყოფილებები უზარმაზარი და უამრავი დანადგარებით, დღეს ამის გაკეთება შეუძლია ერთ კვალიფიცირებულ ინჟინერს „Notebook“-ით ხელში, შესაბამისად, ჩატვირთული მოქნილი პროგრამებით და ინტერნეტით.

მსოფლიო ბაზარზე არსებული და შემოთავაზებული ციფრული ანალიზატორებისა და დიაგნოსტიკის პროგრამების სიძვირე გვაიძულებს, რომ შევქმნათ და დავამუშავოთ ალტერნატიული პროგრამები. ამ მიზნით კომპიუტერული მათემატიკის სისტემა MathCad-ში შემუშავებულ იქნა ციფრული ანალიზატორი მანქანათა ტექნიკურ მდგომარეობათა ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკისათვის [18]. საპროგრამო გარემოდ MathCad - ის გამოყენებამ განაპირობა ციფრული ანალიზატორის მაღალი სიზუსტე და უნივერსალურობა .

ცნობილია, რომ MathCad-ი სხვა მათემატიკური პროგრამებისაგან განსხვავდება „სასაუბრო ენის“ სიმარტივით და მას გააჩნია უნიკალური თვისება აღწეროს მათემატიკური ალგორითმები ბუნებრივი მათემატიკური ფორმით ზოგადად მიღებული სიმბოლოების გამოყენებით, რაც მნიშვნელოვნად აადვილებს ამოსახსნელი ამოცანების მათემატიკური არსის აღქმას. ციფრული ანალიზატორის მათემატიკური გარემო მნიშვნელოვნად აფართოვებს მის შესაძლებლობებს, საშუალებას იძლევა ვაწარმოოთ მაღალი სიზუსტის გაანგარიშებები და ქენს ანალიზატორს პრაქტიკულ უნივერსალურობას. ანალიზატორი შეუცვლელია საკვლევი და სასწავლო ამოცანების გადაწყვეტისას, ვიბროაკუსტიკური სიგნალების მოდელირებისას, აგრეთვე დიაგნოსტიკის ექსპერტული და ავტომატიზირებული სისტემების შექმნისა და დამუშავების პროცესში[21].

უპირველესი ამოცანა ამ გზაზე არის კავშირის დამყარება ფიზიკურ დანადგარებსა (უფრო ზუსტად მათ პროგრამულ უზრუნველყოფისა) და MathCad-ის სისტემებს შორის. მსგავსი კავშირების განსახორციელებლად MathCad-ს გააჩნია მონაცემთა სპეციალური ტიპი - ფაილური მონაცემები. არსებითად ეს იგივე ვექტორები და მატრიცებია, მხოლოდ ელემენტებით, რომლებიც შესაძლებელია ჩაწერილი იქნან ტექსტური ფორმატის ფაილების სახით. მონაცემთა ფაილები არიან ფაქტიურად მატრიცები თავისი ბუნებრივი ფორმით. MathCad-ში არსებობს ასეთი ფაილების ათვლის ფაილური ოპერაციები. მათ მიერ შექმნილი ფაილები შესაძლებელია

მარტივად დათვალიერებული იქნან ნებისმიერ ტექსტურ რედაქტორში, რომლებიც აღიქვამენ ტექსტებს ASII-კოდების სახით. ფაილების ათვლის დროს ხდება სიმბოლური წარმოდგენების ელემენტების უკუგარდაქმნა რიცხვით მნიშვნელობებში. ასეთი ფორმა ამარტივებს MathCad-ის კავშირებს სხვა პროგრამებთან და უზრუნველყოფს ტექსტური ფორმატის ფაილების ურთიერთგაცვლას მაღალ დონეზე.

ბგერითი სიგნალების დასამუშავებლად MathCad-ის დამატებით SP -პაკეტი (SP-Signal Processing - სიგნალების დამუშავება) არის რამოდენიმე ფუნქცია [17].

- READ (“F”) სიგნალის ათლა ბგერითი ფაილიდან რომლის სახელი არის F;
- WRITEWAV – ბგერითი სიგნალის ჩაწერა ფაილში სახელით F სიხშირით s და ბიტური გარჩევის უნარიანობით b;
- GETWAVEINFO (“F”) - ინფორმაციის მიღება სიგნალის შესახებ (არხების რაოდენობა, სიჩქარე s, ბიტური გარჩევის უნარიანობა b და საშუალო სიჩქარე ბიტები წამში).

საკითხის დასმა. მანქანის (ან მისი ცალკეული კვანძის) ტექნიკური მდგომარეობის დიაგნოსტიკის დროს ციფრული ანალიზატორი ამუშავებს მომუშავე მანქანის საკვლევ წერტილებში დამაგრებულ გადამწოდებებიდან მოხსნილ ვიბროაკუსტიკურ სიგნალებს, გამოყოფს მისგან სასარგებლო ინფორმაციას მანქანის კვანძის ტექნიკური მდგომარეობის შესახებ, ანალიზებს და ადარებს სიგნალის პარამეტრებს წინა გაზომვისა და დასაშვები პარამეტრების მნიშვნელობებს. შესაძლო დეფექტების სიმპტომები და პარამეტრების დასაშვები მნიშვნელობები წინასწარ არის ცნობილი და ჩადებულია დიაგნოსტიკის ალგორითმებში.

საწყისი ინფორმაციის მომზადება. ციფრულ ანალიზატორში შემავალი სიგნალი ჩაწერილი უნდა იქნეს ბგერითი ფაილის WAV ფორმატში და ის უნდა მოთავსდეს „ციფრული ანალიზატორის“ ფოლდერში. შემდგომში ამ ფოლდერის და მასში არსებული MathCad-ის ფაილების გახსნა უშუალოდ იძლევა სიგნალების სრული დამუშავების შედეგებს, რაც აუცილებელია მანქანის ტექნიკურ მდგომარეობათა დიაგნოსტიკისათვის [23].

კომპიუტერში რეალური სიგნალის შესაყვანად აგრეთვე შეიძლება გამოყენებული იქნას კომპიუტერის მიკროფონის შესასვლელი და პატარა კომპიუტერული პროგრამა

SpectraLab(Sound Sechnology Inc.) სიგნალი ჩაიწერება WAV ფორმატში, რომელიც შემდგომ შეიძლება დამუშავდეს ციფრულ ანალიზატორში ან პროგრამა SpectraLab - ში [10].

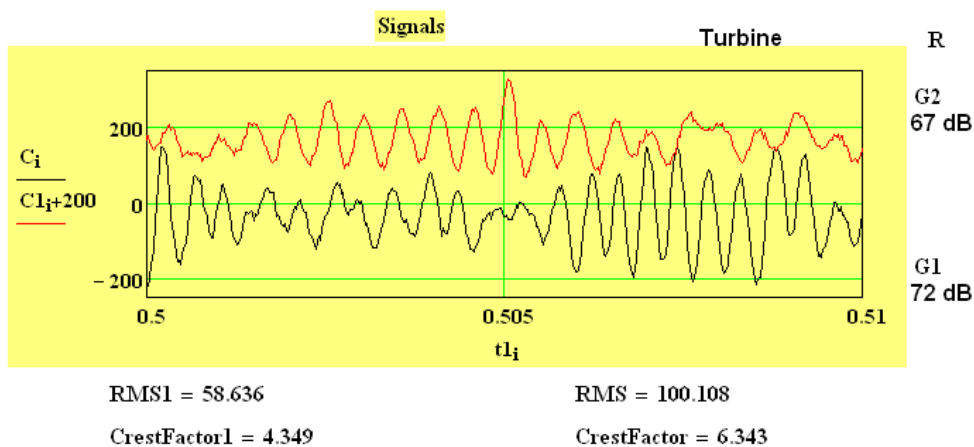
თითოეული დროითი რეალიზაცია იქვანტება 16 ბიტის თანრიგით და განსხვავებული ანათვლების დონეები შეადგენს $2^{16} = 65\,536$ სხვადასხვა მნიშვნელობას. WAV ფაილიდან სიგნალის მახასიათებელი ინფორმაციის ამოსაკითხავად MathCad-ში გამოიყენება ფუნქცია GETWAVINFO, რომელიც აბრუნებს 4 განზომილებიან ვექტორს

$$\begin{pmatrix} \text{NumCannels} \\ \text{SampleRate} \\ \text{Resolution} \\ \text{AvgBytesPerSecond} \end{pmatrix} := \text{GETWAVINFO}("1.wav")$$

$$\text{GETWAVINFO}("1.wav") = \begin{pmatrix} 1 \\ 44100 \\ 16 \\ 88200 \end{pmatrix}$$

აქ NumCannels=1 არის არხების რიცხვი, SampleRate=44100 – დისკრეტიზაციის სიხშირე, Resolution=16 ანათვალში ბიტების რაოდენობა (ანუ 2 ბაიტი), AvgBytesPerSecond=88200 – გარდაქმნის საშუალო სიჩქარე (ბაიტი/წმ) [22].

ქვემოთ ნახ.3.1-ზე მოცემულია რადიალური ვიბრაციის რეალური სიგნალის MathCad -ში შეტანის და ვიზუალიზაციის მაგალითი.



ნახ. 3.1. რადიალური ვიბრაციის სიგნალის MathCad -ში შეტანის და ვიზუალიზაციის მაგალითი

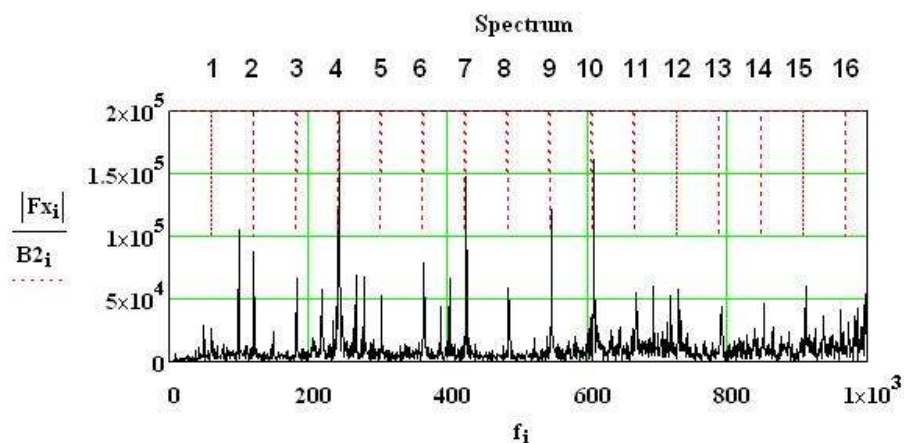
$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} (C_i)^2}$$

$$CrestFactor = \frac{\max(C)}{RMS}$$

ანალიზატორის მათემატიკური გარემო საშუალებას იძლევა ადვილად გამოვთვალოთ დიაგნოსტიკისათვის აუცილებელი სიდიდეები, მაგალითად, სიგნალის საშუალო კვადრატული მნიშვნელობა RMS რომელიც ვიბრაციული სიმძლავრის პროპორციულია, აგრეთვე CrestFactor-ი რომელიც წარმოადგენს სიგნალის მაქსიმუმის RMS-თან ფარდობას.

შევნიშნოთ, რომ RMS-ი და CrestFactor-ი წარმოადგენენ მნიშვნელოვან პარამეტრებს ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის პროცესში ტექნიკურ მდგომარეობათა ცვლილებების შეფასების დროს [8].

სიგნალის სპექტრალური წარმოდგენა FFT (ფურიეს სწრაფი გარდაქმნა) MathCad გარემოში ხორციელდება სპეციალური ოპერატორებით. ქვემოთ ნახ.3.2-ზე წარმოდგენილია ზემოთ მოყვანილი სიგნალის ვიწროზოლიანი სპექტრალური ანალიზის შედეგი.



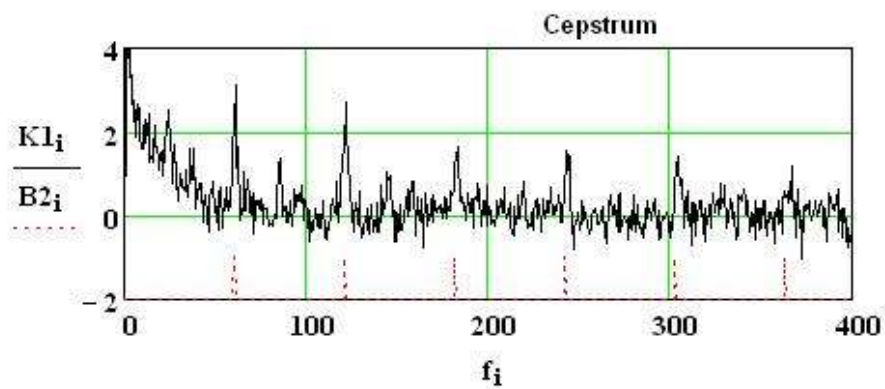
ნახ. 3.2. სიგნალის ვიწროზოლიანი სპექტრალური ანალიზი

გრაფიკის ზედა ნაწილში დატანილია ჰარმონიკების ნომრები (ბრუნვის სიხშირე შეადგენს $f_1 = 61.235$ ჰც-ს). 1000 ჰც დიაპაზონში ნათლად ჩანს 16 ჰარმონიკა, რომელთა შორის მაქსიმალურია მე-4 ჰარმონიკა.

სიგნალში დაფარული პერიოდულობის გამოვლენა მანქანათა ვიბრო-დიაგნოსტიკაში ხორციელდება კეპსტრის გამოყენებით, რომელიც წარმოადგენს სიგნალის ლოგარითმზე განხორციელებულ ფურიეს შებრუნებულ გარდაქმნას:

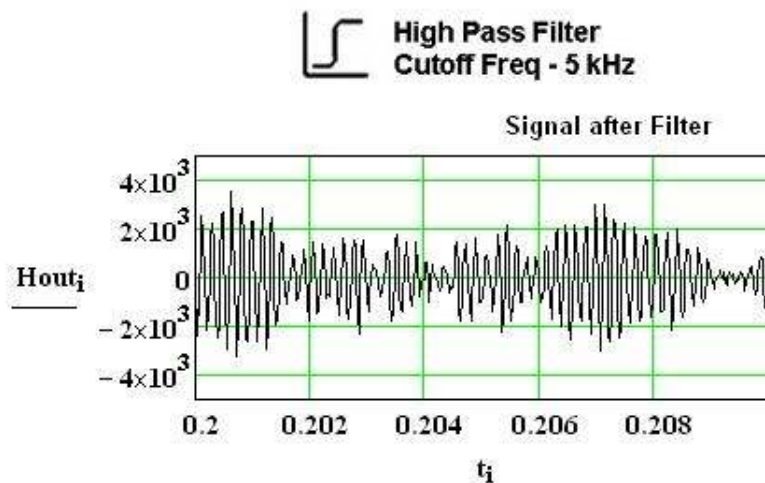
$$k_x(n) = 1/2\pi \left[\int_{-\pi}^{\pi} (\ln(|X(\omega)|) e^{j\omega n}) d\omega \right].$$

პრაქტიკაში კეპსტრი ხშირად განისაზღვრება, როგორც ვიწროზოლიანი სპექტრის გარდაქმნა. ქვემოთ ნახ. 3.3-ზე მოცემულია ზემოთმოყვანილი სიგნალის კეპსტრი, რომელზედაც ნათლად ჩანს ჰარმონიული მდგენელები 61,235 ჰც ძირითადი სიხშირით.

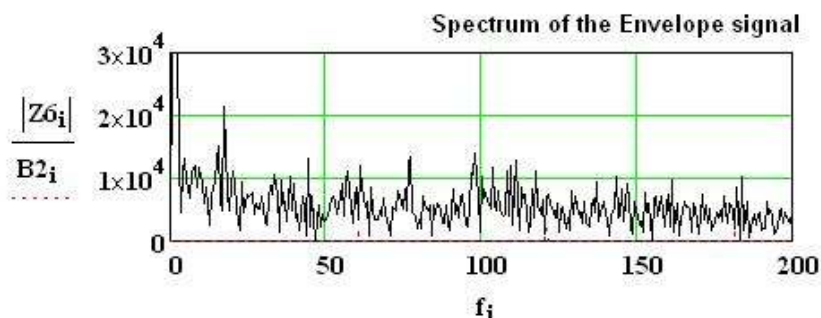


ნახ. 3.3. ვიბროსიგნალი კეპსტრი MathCad-ში

იმპულსური, არაწრფივი, შემთხვევითი რხევები და ავტორხევები მანქანებში ახდენენ მოდულირებული სიგნალების გენერირებას, რომელთა ანალიზისათვის აუცილებელია საწყისი სიგნალის მაღალსიხშირული ფილტრაცია (ნახ. 3.4.) მისი მომვლების პოვნა და ამ მომვლების დაბალსიხშირული სპექტრული ანალიზის ჩატარება.



ნახ. 3.4. საწყისი ვიბროსიგნალის მაღალსიხშირული ფილტრაცია

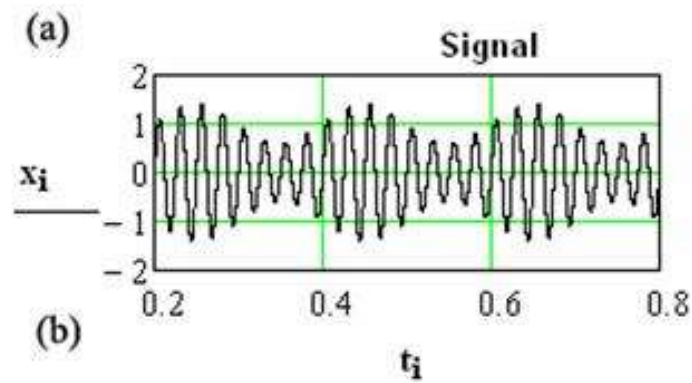


ნახ.3.5. მაღალსიხშირული ვიბრაციის მომვლების დაბალსიხშირული სპექტრი MathCad-ში

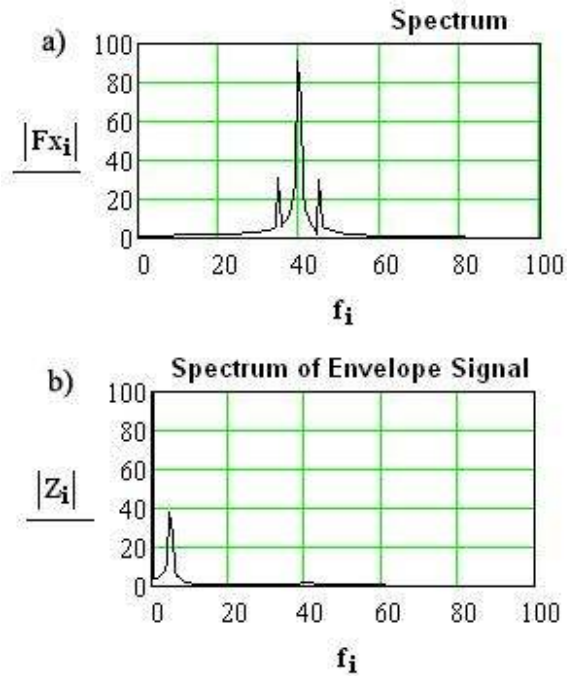
ნახ. 3.5-ზე მოცემულია საწყისი ვიბროსიგნალის მაღალსიხშირული ფილტრი, მისი მომვლების პოვნა ჰილბერტის გარდაქმნის გამოყენებით და შემდეგ ნახ. 3.6-ზე მოცემულია მომვლების დაბალსიხშირული სპექტრი, რაც ფრიად მნიშვნელოვანია მანქანათა ტექნიკური მდგომარეობის ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკისათვის.

განვიხილოთ MathCad-ში ვიბრაციული სიგნალის მოდელირების მაგალითი. როგორც ცნობილია, თუ ვიბრაციული სიგნალის სპექტრში მოჩანს მდგენელები ე.წ. „გვერდით“ სიხშირეებზე, ეს შეიძლება გამოწვეული იყოს მანქანაში წარმოქმნილი მოდულირებული რხევებისაგან. ნახ.3.6-ზე ზედა ნაწილში მოცემულია მოდულირებული რხევის ანალიზური გამოსახულება, სადაც f_2 არის გადამტანი სიხშირე, f_1 – მოდულაციის სიხშირე, n -მოდულაციის სიღრმე. ზედა ნაწილში მოჩანს სპექტრის სამი მდგენელი, გვერდით სიხშირეებზე (f_1-f_2) და (f_1+f_2) და გადამტანი სიხშირეზე – f_2 . ქვედა ნახაზზე კი წარმოდგენილია მომვლების დაბალსიხშირული სპექტრი, სადაც მოჩანს მხოლოდ ერთი მდგენელი მოდულაციის f_1 სიხშირეზე. გრაფიკებიდან ნათლად ჩანს, თუ როგორ აისახება მოდულირებული რხევები სისტემის მახასიათებლებში, და სად და როგორ უნდა ვეძიოთ მოდულირებული ელემენტები რთულ რეალურ სისტემებში [12].

$$x_i := [A1 \cdot (1 + n \cdot \sin(2\pi f1 \cdot t_i)) \cdot \sin(2\pi \cdot f2 \cdot t_i)]$$



ნახ. 3.6. მულტიპლიკაციური სიგნალი, ანალიზური გამოსახულება (a), სიგნალის ფორმა (b)



ნახ. 3.7. სიგნალის სპექტრი (a), მომვლების სპექტრი (ბ)

ანალიზატორი აგრეთვე საშუალებას იძლევა საჭიროების შემთხვევაში გამოყენებული იქნას სიგნალების დამუშავების თანამედროვე მძლავრი აპარატი (პაკეტი Signal Processing) და არა მხოლოდ ეს. MathCad სისტემის მათემატიკური გარემო და დაპროგრამების თანამედროვე საშუალებები შეიძლება წარმატებით იქნას გამოყენებული დიაგნოსტიკის სრულფასოვანი ექსპერტული სისტემების აგებისათვის.

MathCad-ი აგრეთვე მოსახერხებელია დიაგნოსტიკის ავტომატიზებული სისტემების დამუშავებისა და შექმნის პროცესში, რამდენადაც ის ადვილად გამოჰყოფს სიგნალიდან ჰარმონიკებს, ჯამებს, მაქსიმუმებს, სხვა ინტეგრალურ მახასიათებლებს. MathCad -ში შეიძლება აიგოს თვითსწავლებადი საექსპერტო სისტემები და სისტემები ხელოვნური ინტელექტით. MathCad-ი თავსებადია ისეთ პროგრამებთან, როგორცაა MatLAB აგრეთვე Word, Excel და ა.შ.

ჩატარებული კვლევების საფუძველზე შეიძლება დავასკვნათ, რომ MathCad-ი ციფრული ანალიზატორის სახით წარმატებით შეიძლება გამოყენებული იქნას არა მხოლოდ როგორც დამხმარე საშუალება, არამედ როგორც მექანიკური სისტემების ტექნიკურ მდგომარეობათა სრულფასოვანი დიაგნოსტიკური სისტემების აგების საპროგრამო გარემო.

3.2. ჰიდროენერგოაგრეგატების ტექნიკურ მდგომარეობათა ამოცანის რეალიზაცია MathCad - ის სისტემაში

დიაგნოსტიკის ამოცანის დასმა: ზოგადად ნებისმიერი მექანიკური სისტემის რხევები აღიწერებიან დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემით:

$$L_i(x, \dot{x}, \ddot{x}, \dots, x', x'', \dots, r) = F_i \quad (3.1)$$

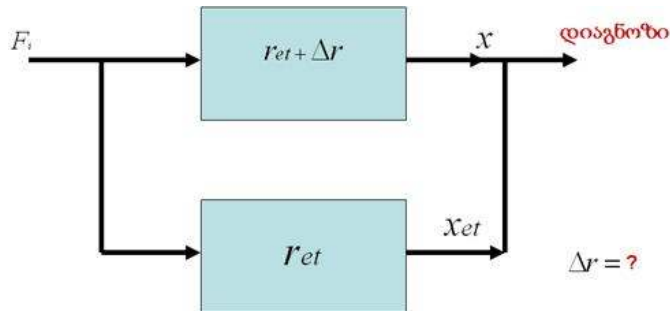
სადაც:

$x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ - განზოგადებულ გადაადგილებათა ვექტორია რომელიც დროისა და სივრცითი კოორდინატების ფუნქციაა.

$r = (r_1, r_2, r_3, \dots, r_n)$ - სისტემის კონსტრუქციული პარამეტრების ვექტორია და რიცხობრივად ახასიათებს გეომეტრიულ ზომებს, მასებს, სიხისტეებს დანაკარგებს და ასე შემდეგ.

L_i - ოპერატორები მოიცავენ დიფერენციალურ განტოლებებს საწყისი და სასაზღვრო პირობებით. თუ მოცემულია კონსტრუქციული პარამეტრები r_i და გარე ძალები F_i მაშინ სასაზღვრო ამოცანის ამონახსნი ცალსახად აღწერს მექანიკური სისტემის რხევებს.

დიაგნოსტიკის ამოცანა მდგომარეობს: ცნობილ x_i და F_i მეშვეობით განისაზღვროს ცვლილებები სისტემაში Δr_i სახეთა ამოცნობის თეორიით ანუ გაზომილი გამომავალი სიგნალის მიხედვით საჭიროა გაკეთდეს დასკვნა მექანიკური სისტემის ფაქტიურ ტექნიკურ მდგომარეობის შესახებ.

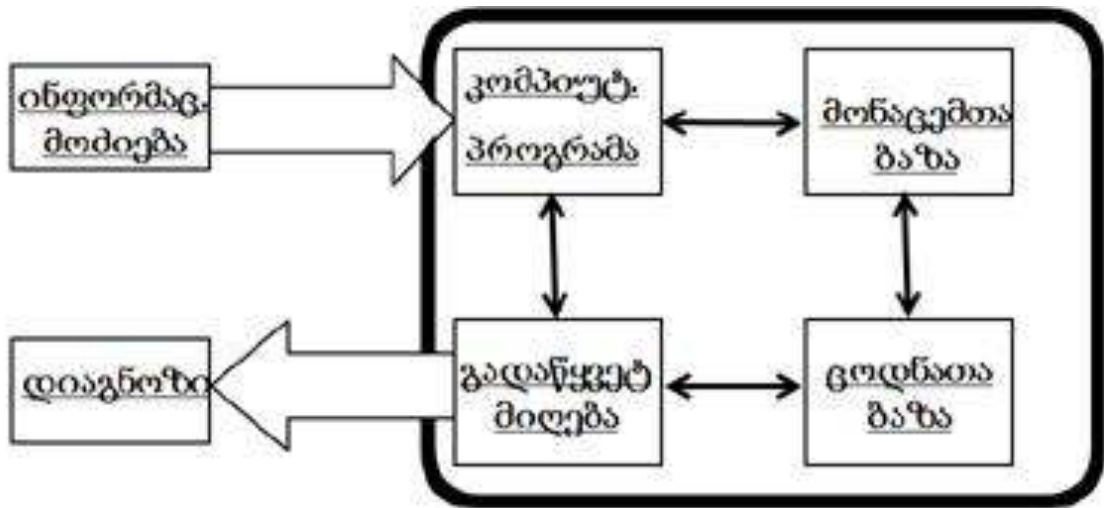


ნახ.3.8. დიაგნოსტიკის ამოცანის სტრუქტურული სქემა

აქ r_{et} და x_{et} მექანიკური სისტემის პარამეტრებისა და განზოგადებულ გადაადგილებათა ეტალონური მნიშვნელობების ვექტორია.

ეს არის დიაგნოსტიკის ამოცანის დასმა, ზუსტი მათემატიკური მიდგომით, მაგრამ როგორც პრაქტიკა უჩვენებს საჭიროა პარამეტრების განსაზღვრა მაღალი და აუცილებელი სიზუსტით. ამოცანის ამოხსნა ასეთი მიდგომით ძალიან რთულია და სასურველ შედეგებს არ იძლევა.

ამიტომ, როგორც წესი დიაგნოსტიკის ამოცანის ამოხსნა ხდება სტრუქტურულ - შედეგობრივი მოდელირების გამოყენებით. ფაქტიურად ეს არის „შავი ყუთის“ ამოცანა ცნობილია შემავალი სიგნალი და სისტემის პარამეტრები. ვიზრაციების მონიტორინგით მიღებულია და ცნობილია აგრეთვე გამომავალი სიგნალები სხვადასხვა წერტილებში და დროის სხვადასხვა მონაკვეთებში. აგრეთვე ცნობილია სტატისტიკურად ეტალონური პარამეტრები და შესაბამისი სიგნალები. დღეისთვის დიაგნოსტიკის ამოცანა ეყრდნობა ამ მონაცემებს.



ნახ.3.9. ჰიდრო ენერგოაგრეგატებისათვის დიაგნოსტიკის პროცესის ძირითადი ბლოკების დიაგრამა

აქ ძირითადი პარამეტრებია :

1. მონაცემთა ბაზა - დიაგნოსტიკური მოდელის შედგენა და ვიზუალური მონიტორინგით მიღებული შედეგების ანალიზი;

2. ცოდნათა ბაზა - შესაძლო დეფექტებისა და შესაბამისი სიმპტომების ჩამოყალიბება და მათი დასაშვები სიდიდეების დადგენა;

3. გადაწყვეტილებათა მიღება - მოგროვილი ინფორმაციის კომპიუტერში შეყვანა და კომპიუტერული დიაგნოსტიკური პროგრამით გადაწყვეტილების მიღება;

4. დიაგნოსტიკა - სადიაგნოსტიკო სისტემის ძირითადი კვანძების ტექნიკურ მდგომარეობათა შეფასება და რეკომენდაციების გაცემა ოპერატორებისათვის შემდგომი მოქმედებებისათვის.

სტრუქტურულ-შედეგობრივი მოდელი იქმნება სადიაგნოსტიკო ტექნიკური ობიექტის ლოგიკური, ფუნქციონალური და სტრუქტურული შესწავლის საფუძველზე, რაც იძლევა ნათელ წარმოდგენას სუსტი და საპასუხისმგებლო ელემენტებისა და მათი სტრუქტურული და დიაგნოსტიკური კავშირების შესახებ. ამ მოდელის გამოყენებით ხდება უმნიშვნელოვანესი დიაგნოსტიკური ნიშნების გამოყოფა, რადგან ტექნიკური დიაგნოსტიკის ძირითადი ამოცანა არის კავშირების დამყარება მანქანის გაუმართაობებს, ანუ დეფექტებს, მათ სიმპტომებსა და გაზომვის შედეგებს შორის, ამიტომ ვადგენთ ამ კავშირებს.

შესაძლო დეფექტებისა და სიმპტომების ცხრილი

დეფექტები	ს ი მ პ ტ ო მ ე ბ ი										
	მიმართული საკითხების ვიზუალიზაცია (დატ. გარეშე)	საქონლის საკითხების სივრცითი განმარტება	მიმართული საკითხების ტექნიკური აღწერა	საქონლის საკითხების ტექნიკური აღწერა	საქონლის რეგისტრაციის ინფორმაცია	საქონლის ტექნიკური აღწერის ვიზუალიზაცია	საქონლის ტექნიკური აღწერის ვიზუალიზაცია	საქონლის ტექნიკური აღწერის ვიზუალიზაცია	საქონლის ტექნიკური აღწერის ვიზუალიზაცია	საქონლის ტექნიკური აღწერის ვიზუალიზაცია	საქონლის ტექნიკური აღწერის ვიზუალიზაცია
1. მექანიკური დეზაინსი	•				•						
2. ელექტრული დეზაინსი	•				•						
3. ჰიდრავლიკური დეზაინსი	•				•						
4. უხეში დატვირთვის ზონა	•				•				•		
5. გადამჭრელი წვირის გაუმართაობა	•	•			•				•		
6. თანაღრმობის დაკარგვა	•				•						
7. კავიტაცია						•			•		
8. რგოლური სამჭიდროებელი- /განტვირთვის რგოლის დაზიანება					•						•
9. ტურბინის გადამტეხული ვიბრაცია					•						•
10. საკისრის გადატვირთვა	•	•	•	•							
11. საკისრის დაღლილობა	•	•	•	•							
12. საკისრის არასაკმარისი შეზეთვა	•	•	•	•							
13. სტატორის იზოლაციის გაუარესება									•		
14. სტატორის გრაგნილის ვიბრაცია									•		
15. როტორის ბუდის მოძრაობა					•		•				
16. სტატორის გულარის ცვლილებები					•		•	•			
17. არათანაბარი ჰაერის ღრეზო					•		•	•			
18. სტატორი/როტორის არაწრიულობა					•		•	•			
19. სტატორი/როტორის კონცენტრულობის დარღვევა					•		•	•			
20. სტატორის გაღუნვა					•		•	•			
21. სტატორის თავისუფალ ფენებზე დაშლა								•			
22. ღრეზის ჰაერის გაუწონასწორებელი ძალები					•		•	•			
23. სტატორის ჩართული გამციებლები									•		
24. სტატორის ვენტლიაციის ბლოკირებული მილები									•		
25. სტატორის გადხურებული სპირალები									•		

ჰიდროენერგოაგრეგატების ტექნიკურ მდგომარეობათა ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის ამოცანის რეალიზაციის დროს Mathcad- ის სისტემაში ფართოდ გამოყენებული იქნა ჩვენს მიერ შექმნილი რიცხვითი სპექტროანალიზატორი და ბოლოს ქვემოთ წარმოდგენილია Mathcad-ის დოკუმენტის ნაწილი, რომელიც ასახავს დიაგნოსტიკის ერთ ერთ პროცედურას - გადაწყვეტილების მიღებას, კერძოდ როტორის მექანიკური დეზალანსის დადგენას [24].

დეფექტი - მექანიკური დეზალანსი

სიმპტომი - ზედა და ქვედა მიმართველი საკისრების ვიბრაციების ჯამური დონის ზრდა, აგრეთვე პირველი ჰარმონიკის ზრდა.

დასაშვები სიდიდეები დეციბელებში: $\Delta 111 < 6$ და $\Delta 112 < 6$

$$\bar{A}_1 = [A_1(f_{\delta r})]f_1 := 53\delta V_1 := 54.5V_2 := 56$$

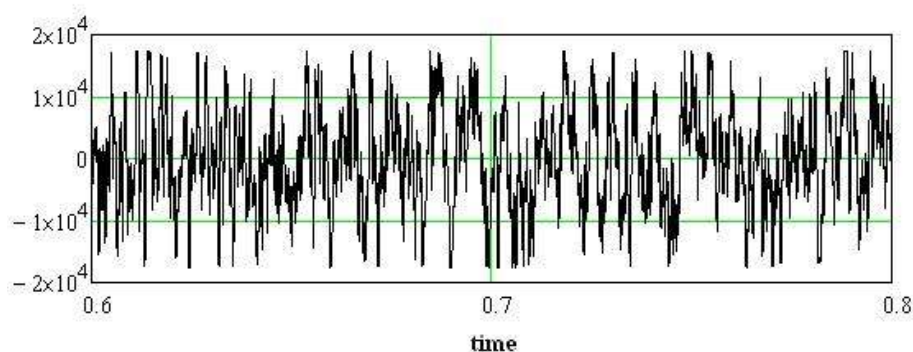
$$\Delta 111 := V_2 - V_1 \Delta 112 := 032_{0,1} - 031_{3,1} \Delta 111 = 1.5 \Delta 112 = 9.158$$

$$D11 := \begin{cases} \text{There is defect if } \Delta 111 > 6 \\ \text{There is defect if } \Delta 112 > 6 \\ \text{There is no defect otherwise} \\ D11 := \text{There is a defect} \end{cases}$$

3.3. ვიბროაკუსტიკური სიგნალების ციფრული ზოლური ფილტრაციის ერთი მეთოდის შესახებ

ვიბრაციების და ხმაურის სიგნალებიდან მაღალსიხშირული მდგენელების გამოყოფისას ენერგეტიკული მოწყობილობების ტექნიკურ მდგომარეობათა ვიბროაკუსტიკური მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის ამოცანებში საჭირო არის სიგნალების ციფრული ზოლური ფილტრაცია. ქვემოთ ნახ.3.10-ზე ნაჩვენებია ჰიდრო ენერგოაგრეგატის ხმაურის სიგნალის ფილტრაცია არასასურველ სიხშირეთა

”განულებით”. ვთქვათ გვაქვს სიგნალი. MathCad-ში მისი ფორმა წარმოდგენილია ნახ. 3.10-ზე



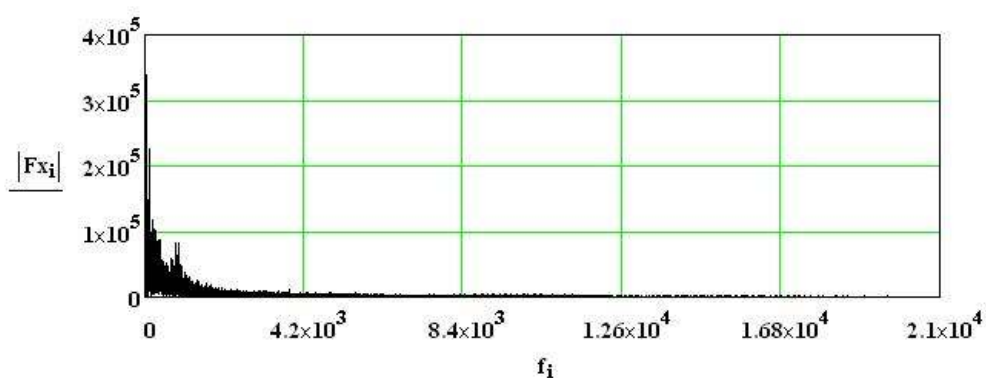
ნახ.3.10. ჰიდროენერგოაგრეგატის ვიბროაკუსტიკური სიგნალი

მოცემულია ფართე სიხშირულზოლიანი შემთხვევითი ხმაურის სიგნალი. მოვახდინოთ მისი ვიწროზოლიანი სპექტრალური ანალიზი შემდეგი პარამეტრებით:

$$m := 16 \quad N := 2^m \quad N := 6,554 \times 10^4 \quad \text{SampleRate} := 44100$$

$$\Delta := \frac{\text{SampleRate}}{N} \quad \Delta := 0,673\text{Hz} \quad f_i := i \cdot \Delta F_x := \text{fft}(c)$$

ანალიზის ბიჯი არის 0.673 ჰც და იგი მოიცავს ადამიანისათვის მთელ სმენად ბგერით დიაპაზონს. სპექტრალურ დიაგრამას ექნება შემდეგი სახე (ნახ. 3.11.)



ნახ. 3.11. საწყისი სიგნალის ვიწროზოლიანი სპექტრი

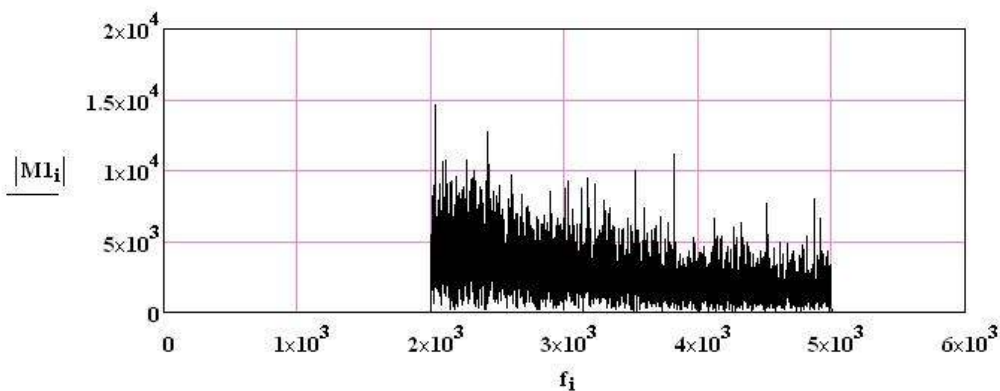
გამოვყოთ ამ სპექტრში, მაგალითად, სიხშირეთა დიაპაზონი 2000 – 5000 ჰც და დანარჩენი სიხშირეთა უბნები გავანულოთ (= 0). მივიღებთ ნახ.3.13 - ზე წარმოდგენილ სურათს.

ფილტრაცია განულებით

$i := 0..32768$

$$F1_i := \begin{cases} 1 & \text{if } 2000 \leq f_i \leq 5000 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$M1 := \overrightarrow{(F_x \cdot F1)}$$

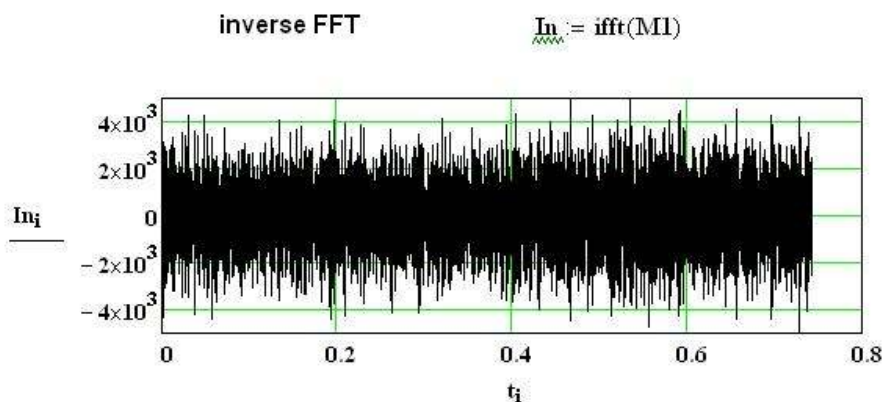


ნახ. 3.12. სასურველი (2000 – 5000 ჰც) დიაპაზონის გამოყოფა სპექტრში

აქ დაბალი (2000 ჰც-მდე) და მაღალი (5000 ჰც ზევით) მდგენელები აღარ არის - ისინი უდრის ნოლს.

$$M1 := \overrightarrow{(F_x \cdot F1)}$$

ისარი ნიშნავს ვექტორიზაციის პროცედურას - ანუ მოცემული ოპერაციის შესრულებას ვექტორის ყველა ელემენტებისათვის. ახლა მოვახდინოთ ამ სპექტრის მიხედვით ფურიეს სწრაფი გარდაქმნის უკუპროცესი - ინვერსირების პროცედურა (ნახ.3.13.)



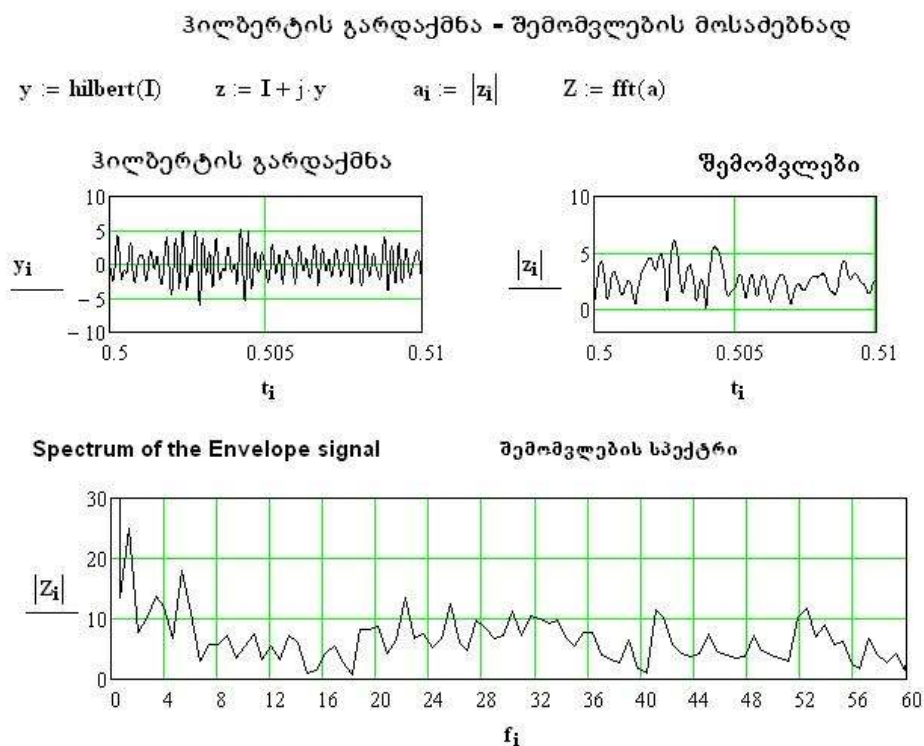
ნახ.3.13. ინვერსირების შედეგად მიღებული სიგნალი

საბოლოოდ მივიღებთ ციფრულად გაფილტრულ სიგნალს, რომელშიც იქნება მხოლოდ ზოლის სიხშირეები 2000 – 5000 ჰც. შეგვიძლია ჩავწეროთ ეს სიგნალი *.wav ფორმატში და მოვისმინოთ თუ როგორი ხმა ექნება ასეთ ხმაურს. აგრეთვე შეგვიძლია გავაგრძელოთ მისი შემდგომი დამუშავება დიაგნოსტიკის თუ სხვა მიზნებისათვის.

ამ მეთოდს აქვს თავისებურება, კერძოდ, თუ ფილტრებს ჩვეულებრივ (ანალოგურს თუ ციფრულს) აქვთ ტრაპეციის მახასიათებელი, აქ მახასიათებელი არის მართკუთხედი. ეს ნიშნავს, რომ გარდა ამ დიაპაზონისა სხვა სიხშირეები სიგნალში აღარ არის, ისინი მოჭრილია.

ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის ამოცანებში ხშირად საჭიროა ამ გაფილტრული სიგნალის შემდგომი დამუშავება, კერძოდ, ჰილბერტის გარდაქმნა შემომვლების მოსაძებნად, შემდეგ ფურიეს სპექტრალური გარდაქმნა და მიღებულ სპექტრში დაბალსიხშირული მდგენელების მოძებნა.

ქვემოთ ნახ.3.14 -ზე წარმოდგენილია ასეთი პროცედურები MathCad-ის გარემოში.



ნახ.3.14. მაღალსიხშირული ვიბრაციული სიგნალის შემომვლების დაბალსიხშირული სპექტრალური მდგენელები

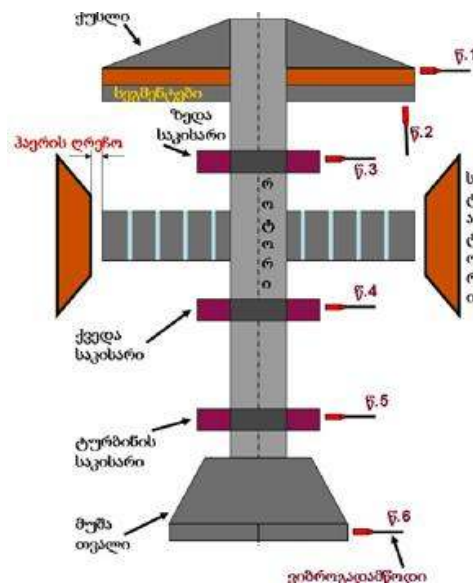
თავი 4

ვარციხე ჰეს-ის ჰიდროენერგოაგრეგატების ვიბრაციული მახასიათებლების ექსპერიმენტული კვლევა

4.1. გაზომვის მეთოდოლოგია და მიღებული ვიბრაციული სიგნალის ანალიზი

ჰიდროენერგოაგრეგატების ტექნიკურ მდგომარეობათა ვიბრაციული მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის საშუალებების დანერგვა პრაქტიკაში ითხოვს მათი ვიბრაციული ველების ღრმა დეტალურ ცოდნას. ამისათვის საჭიროა ჩატარდეს ვიბრაციული მახასიათებლების ექსპერიმენტული კვლევები, რათა შესწავლილ იქნას ვიბრაციების ამპლიტუდური და სიხშირული მახასიათებლები ვიბრაციების გენერირების სრულ დიაპაზონში. ქვემოთ მოცემულია ასეთი კვლევების შედეგები ვარციხე ჰეს-ის ჰიდროენერგოაგრეგატების მაგალითზე.

გაზომვები ჩატარდა სამივე (ვერტიკალური, ტანგენციური, რადიალური) მიმართულებებით აგრეგატების ოთხ ვიბროაქტიურ წერტილში (ვარციხე ჰეს-ზე). ეს წერტილებია - ტურბინა, ქვედა საკისარი, ზედა საკისარი და "კომბინატორი", როგორც ეს ნახ.4.1-ზე არის ნაჩვენები.



ნახ. 4.1. ჰიდროენერგოაგრეგატების გაზომვების წერტილების სქემა

გამოყენებული იქნა ვიბრომზომი აპარატურა ВШВ-003 (სიზუსტის კლასი 1. ГОСТ17187-81) და ვიბროაჩქარების პიეზოსენსორები ДН -3 (სიხშირის დიაპაზონი 10 - 4000 ჰც) (სურ.4.)1. სამწუხაროდ აღნიშნული სიხშირული დიაპაზონი ნიშნავს იმას, რომ 4000 ჰც ზემოთ და 10 ჰც ქვემოთ (ინფრაბგერითი რხევები) ამ სენსორებით შეუძლებელია ზუსტად გაანალიზდეს ვიბრაციები, რაც ცუდად გამოისახება შედეგებში. არ მოჩანს პირველი ძირითადი და ფრთის ჰარმონიკები და სუბჰარმონიკები, რაც არ იძლევა შესაძლებლობას დიაგნოსტიკება გავუკეთოთ მნიშვნელოვან ცვთის დეფექტებს და აგრეთვე შეუძლებელია სრულიად გავანალიზოთ მაღალსიხშირული ვიბრაციების შემომვლელის სპექტრი მოდულირებული რხევების ავტორხევების და კავიტაციის წარმოშობის შემთხვევაში. ასევე გასათვალისწინებელია ისიც, რომ ვარციხე ჰესის ჰიდროენერგოაგრეგატები დაბალი ბრუნთა რიცხვის აგრეგატებია და ვიბროაქტიური კვანძების ტექნიკურ მდგომარეობათა სურათის მისაღებად საჭიროა სპეციალური ვიბრომზომი აპარატურა, ფართე სიხშირული დიაპაზონით - 0 – 20 კჰც და ზევით. საჭიროა, რომ გაზომვის სიხშირულ დიაპაზონში მოხვდეს, როგორც აგრეგატის ძირითადი ბრუნვითი სიხშირეები, ასევე სენსორების საკუთარი სიხშირეები და ცალკეული კვანძების საკუთარი სიხშირეები.



სურ. 4.1. ვიბრომზომი და ვიბროაჩქარების სენსორი

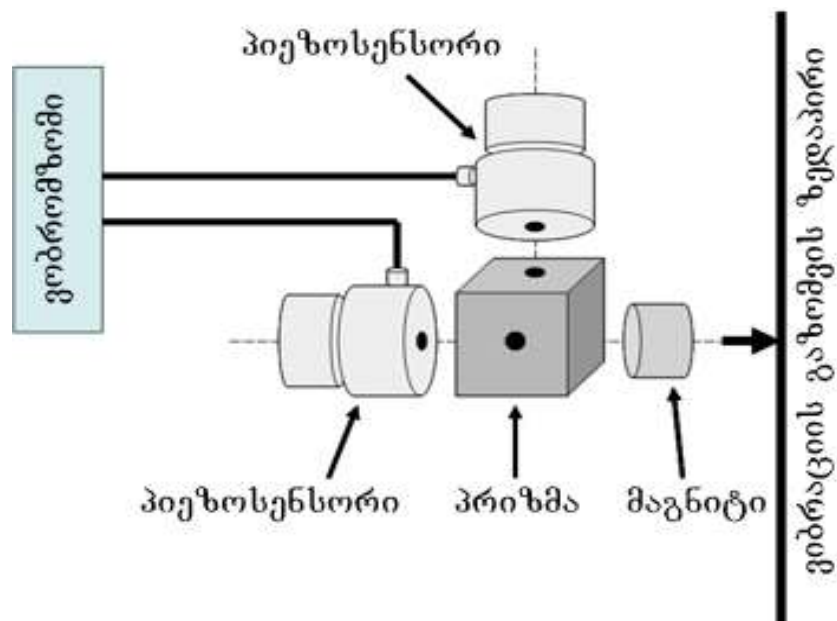
აგრეთვე გამოყენებული იქნა თანამედროვე, სპეციალურად შექმნილი პორტატული ვიბრომზომი VM 6360 (სურ. 4.2).



სურ. 4.2. პორტატული ვიბრომზომი მოწყობილობა

ვიბრომეტრი (სურ. 4.2) VM-6360 არის მცირე გაზომვების მქონე პორტატული ვიბრომზომი, რომელიც გაზომვისთანავე გვაძლევს მონაცემებს მის მცირე ზომის დისპლეიზე.

სენსორები მაგრდებოდა გასაზომ ზედაპირზე მაგნიტისა და პრიზმის მეშვეობით, როგორც ეს ნახ. 4.2 -ზე არის ნაჩვენები.



ნახ.4.2. მზომი კვანძი

ვერტიკალური მიმართულებით გაზომვისას მზომი კვანძი ბრუნდებოდა 90 გრადუსით საკუთარი ღერძის მიმართ და შემდგომ ზომავდა ტანგენციური მიმართულებით. გაზომვების სიზუსტე იყო ± 1 ძნ. ხელსაწყო სრულიად გამოსადეგია ფარდობითი ვიბრაციების და შეფასებითი გაზომვებისას, მით უმეტეს, რომ ხდება ორი და რამოდენიმე გაზომვის შედეგების შედარება ერთმანეთთან. გაზომვებისას 20-30 წამიანი ვიბროსიგნალების მონაკვეთები იწერებოდა კომპიუტერში სპეციალური კომპიუტერული პროგრამით და შემდეგ ხდებოდა მათი დამუშავება და ანალიზი ლაბორატორიულ პირობებში. ვიბროსიგნალები ციფრულად მუშავდებოდა, როგორც სპეციალური კომპიუტერული პროგრამით, ასევე MathCad-ის გარემოში.

განსაზღვრული და გაანალიზებული იქნა მოხსნილი სიგნალების შემდეგი ვიბრაციული მახასიათებლები:

- ვიბროაჩქარების სიგნალების ფორმები;
- სიგნალების საშუალოკვადრატული მნიშვნელობები - RMS, რომლებიც სიგნალების ვიბრაციული ენერჯის პროპორციულია).

სადაც RTS – არის Real Time Series - ვიბრაციული ციფრული სიგნალების ამპლიტუდების გაზომილი მნიშვნელობები, $i = 0, 1, 2, \dots, N$ - ვიბრაციების განხილული რეალიზაციის წერტილების ნუმერაცია. RMS-ის (საშუალოკვადრატული მნიშვნელობა) ზრდა მიანიშნებს ვიბრაციების დონის ზრდას:

$$RMS := \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} [(RTS^{<1>})_i]^2}$$

$$\text{კრესტ-ფაქტორები : } CrestFactor := \frac{\max(RTS^{<1>})}{RMS}$$

CrestFactor - ის დიდი მნიშვნელობების შემთხვევაში (≥ 6) რხევით სისტემაში ჩნდება დარტყმები;

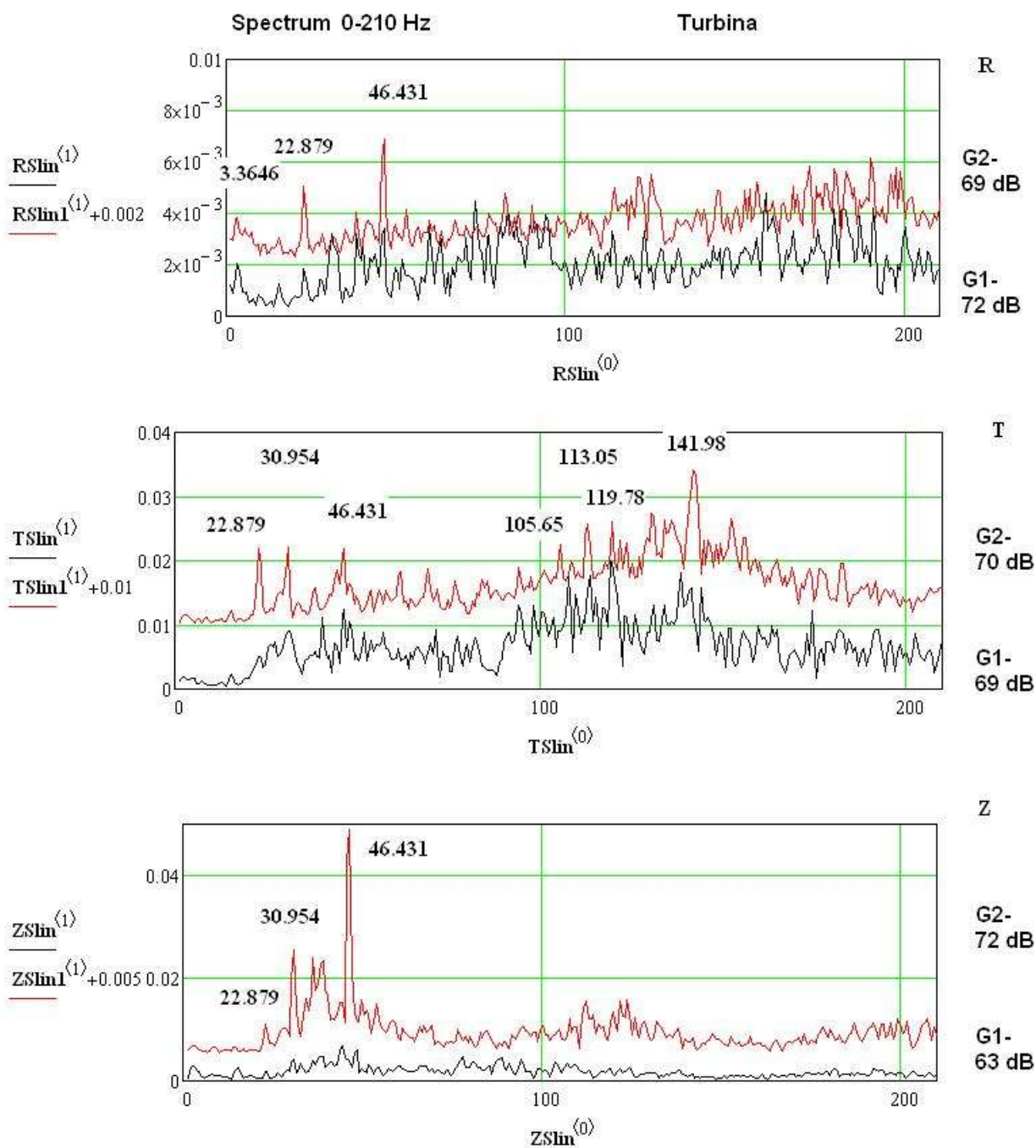
- სიგნალების ჯამური დონეები, დბ;
- გადაადგილებები ჯამური დონეებით ძირითად მბრუნავ სიხშირეზე, მმ;
- სიგნალების სპექტრალური შემადგენლობა სიხშირეთა ოქტავურ ზოლებში;
- სიგნალების სპექტრალური შემადგენლობა სიხშირეთა ტერც - ოქტავურ ზოლებში;

- სიგნალების ვიწროზოლიანი სპექტრალური შემადგენლობა (გატარების ზოლი 0,673 ჰც) მთელ სიხშირულ დიაპაზონში და მდგენელების დეტალური ანალიზი, როგორც წრფივი, ასევე ლოგარითმული გაზომვების სკალით;
- ლოკალური და გლობალური მაქსიმუმების პოვნა თავისი სიხშირეებით;
- კეპსტრები (რომლებიც მიუთითებენ პრიოდულობაზე სიგნალებში);
- ვიბროაჩქარების სიგნალების შემომვლელის სპექტრალური შემადგენლობა; ისინი მიიღება ჯერ სიგნალის შემომვლელის პოვნით, ჰილბერტის გარდაქმნით და შემდეგ FFT - ფურიეს სწრაფი გარდაქმნით იძებნება მათი სპექტრალური შემადგენლობა;
- გაფილტრული მაღალსიხშირული სიგნალების შემომვლელის სპექტრალური შემადგენლობა;

ყველა ეს სიგნალების მახასიათებლები არიან MathCad-ის (და მისი გაფართოების Extension Pack “Signal Processing“-ის) სტანდარტული ფუნქციები და მათი პოვნა MathCad-ის გარემოში წარმოებს მარტივად და მყისიერად.

Mathcad-ის გარემოში სპეციალურად შეიქმნა და დამუშავდა კომპიუტერული პროგრამა, რომელიც რამოდენიმე წუთის განმავლობაში პოულობს ყველა იმ ვიბრაციულ პარამეტრებს და ადარებს ერთმანეთს, როგორც რამოდენიმე გაზომვების შედეგებს, ასევე თუ საჭიროა სხვადასხვა აგრეგატების გაზომვების შედეგებს.

ჩვენს შემთხვევაში, ვარციხე ჰეს-ის აგრეგატებისათვის დამუშავდა და შედარდა 400-მდე გრაფიკი. ერთ-ერთი ტიპური გრაფიკი მოყვანილია ქვემოთ (ნახ.4.3).



ნახ.4.3. ვარციხე ჰეს-ის აგრეგატის G2 გენერატორის სპექტრალური მდგენელების შედარება 0 – 210 ჰც სიხშირულ დიაპაზონში ვერტიკალური, ტანგენციური, რადიალური მიმართულებით

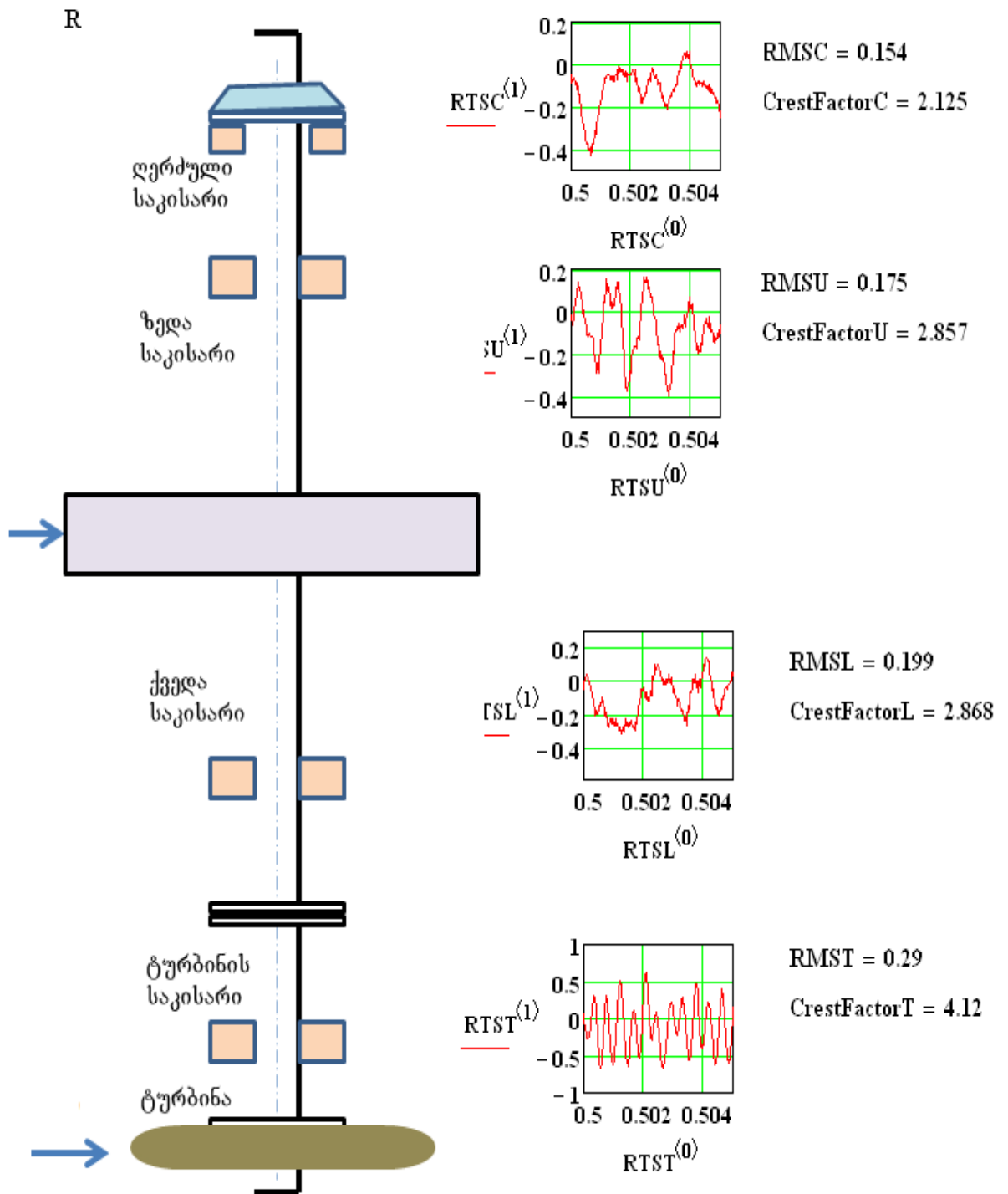
მომავალში საჭიროა ყველა ჰიდროენერგოაგრეგატებისათვის ვიბრაციული სიგნალების და მათი ვიბრაციული მახასიათებლების მონაცემთა ბაზის შექმნა. შემდეგ, ამ ბაზის გამოყენებით უნდა მოხდეს ანალიზი და ყველა შესაძლო წინააღმდეგობრივი და დეფექტური ტექნიკურ მდგომარეობათა განსაზღვრა.

როტორის ნომინალური ბრუნვის სიხშირე ვარციხე ჰეს-ზე (ფრენსისის ტიპის დაბალი ბრუნვის ვერტიკალური აგრეგატი) შეადგენს 115.5 ბრ/წუთში, ანუ 1.923 ჰც. ყველა დინამიური პროცესები სისტემაში მეორდება $f_0 = 1.923$ ჰც პერიოდულობით. ეს არის როტორის ბრუნვის ძირითადი სიხშირე და ჰარმონიკები ჩნდება სიხშირეებზე $k \cdot f_0$, სადაც $k = 1, 2, 3, \dots$.

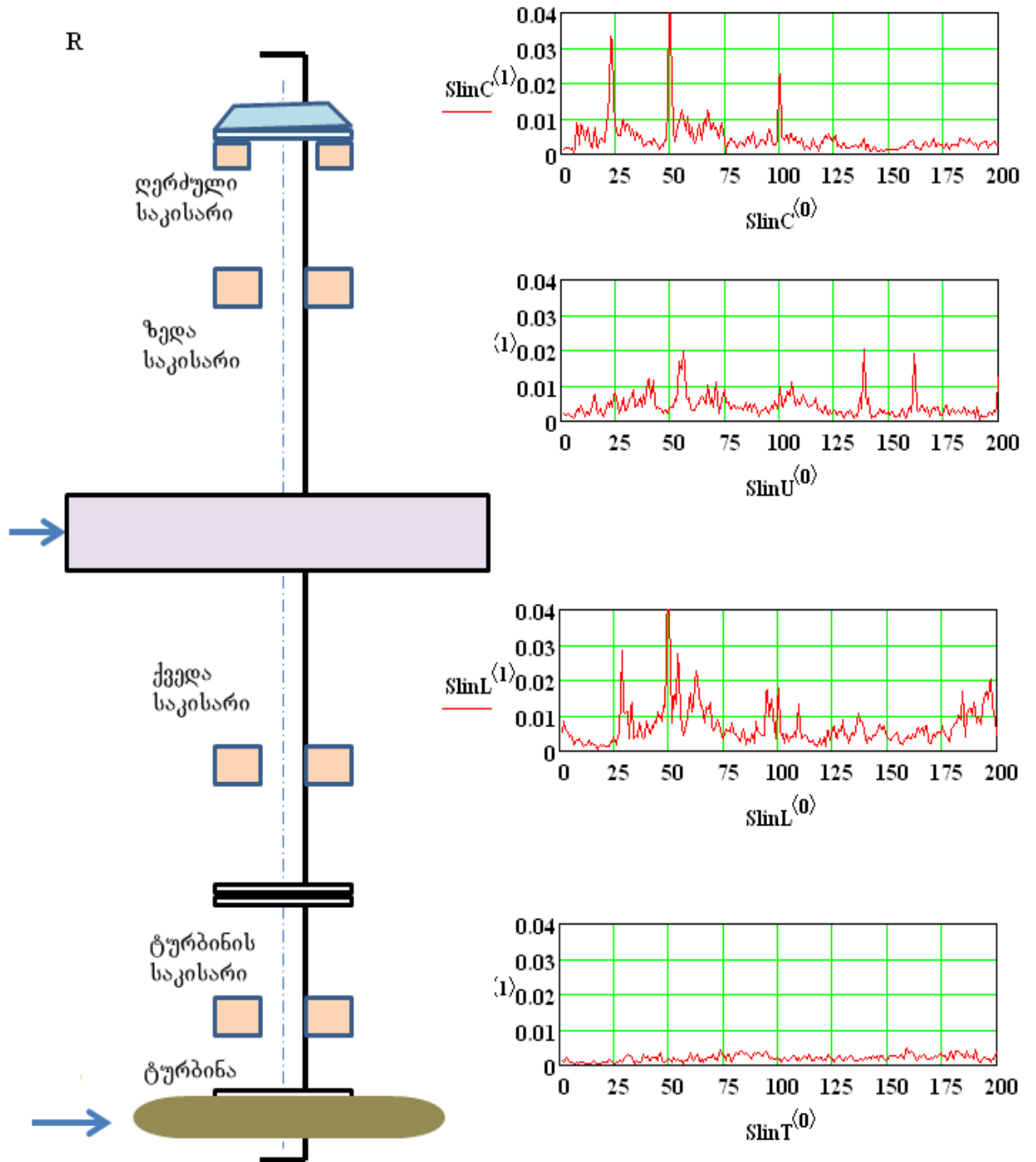


სურ. 4.3. ვარციხე ჰეს-ის ჰიდროენერგოაგრეგატი

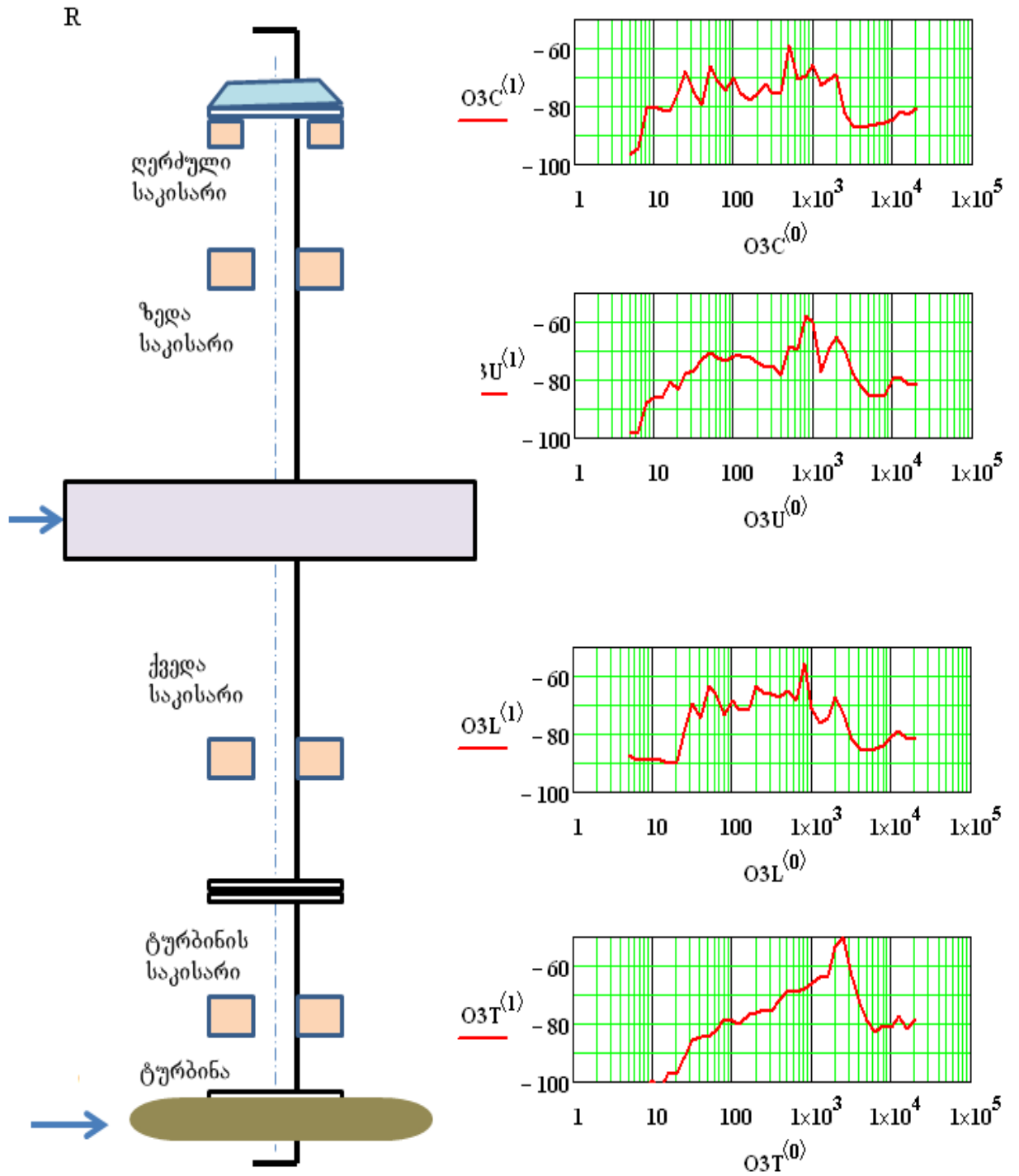
ტურბინას აქვს ოთხი ფრთა და ამიტომ ძირითადი ფრთის სიხშირე არის $f_1 = 1.923 \times 4 = 7.68$ ჰც, ესეგი ფრთის ჰარმონიკები განლაგდებიან $k \cdot f_1$ სიხშირეებზე. ყველა ეს ჰარმონიკა მოჩანს სპექტრალურ შემადგენლობაში.



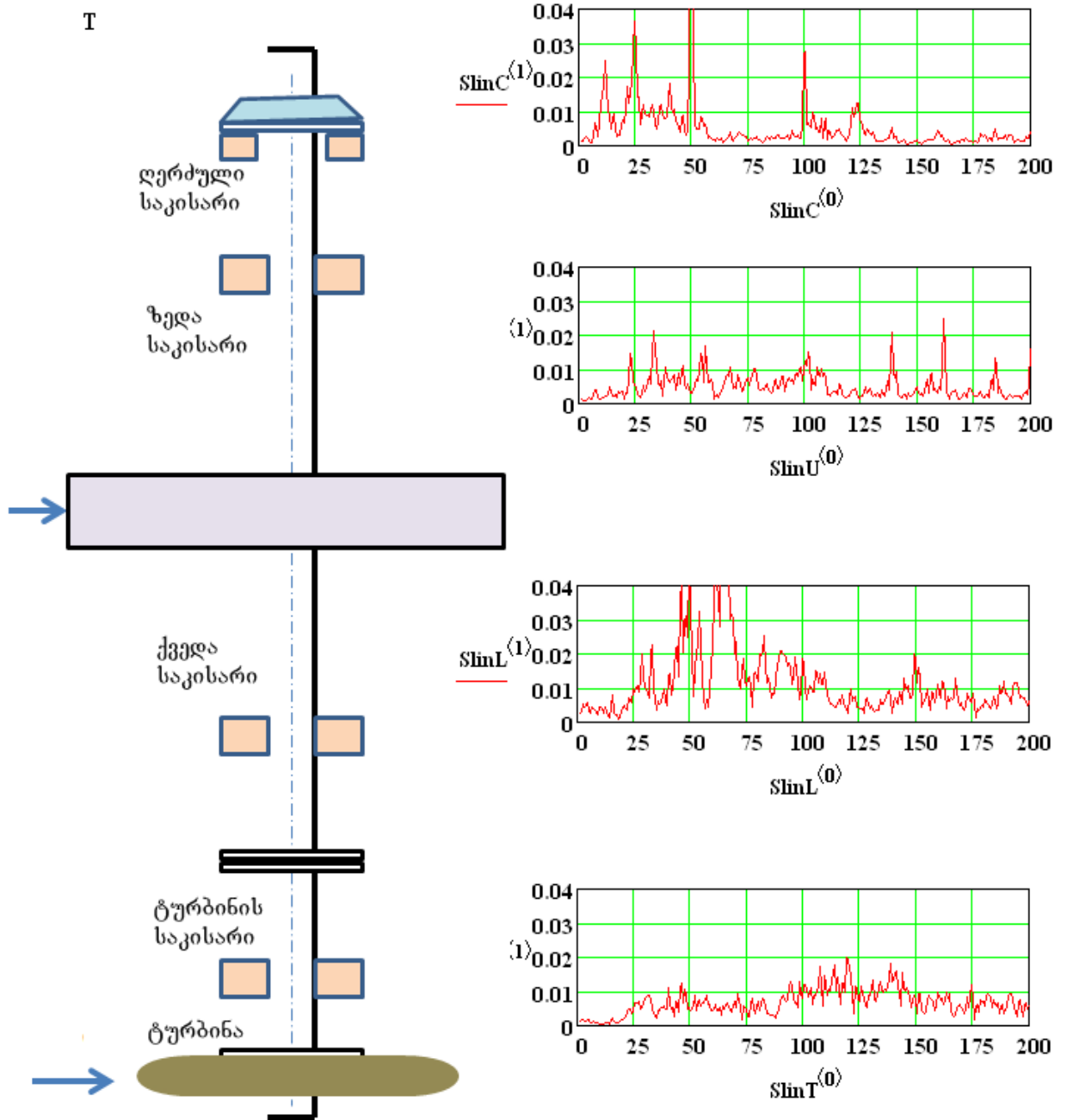
ნახ. 4.4. სიგნალის ფორმა - გაზომილი რადიალური მიმართულებით



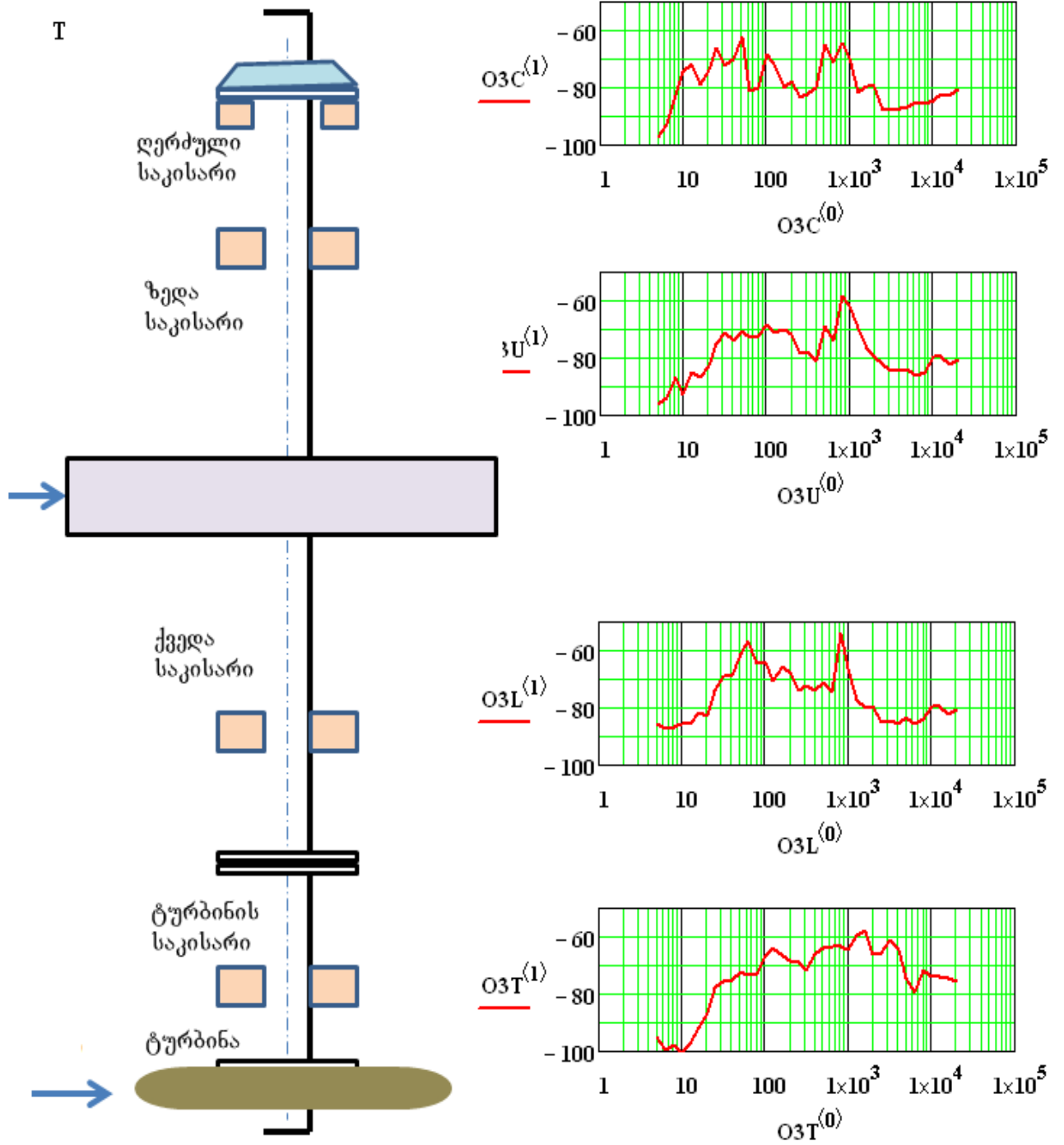
ნახ.4.5. სიგნალის ფორმა რადიალური მიმართულებით. სპექტრები 0-200 ჰც მდე



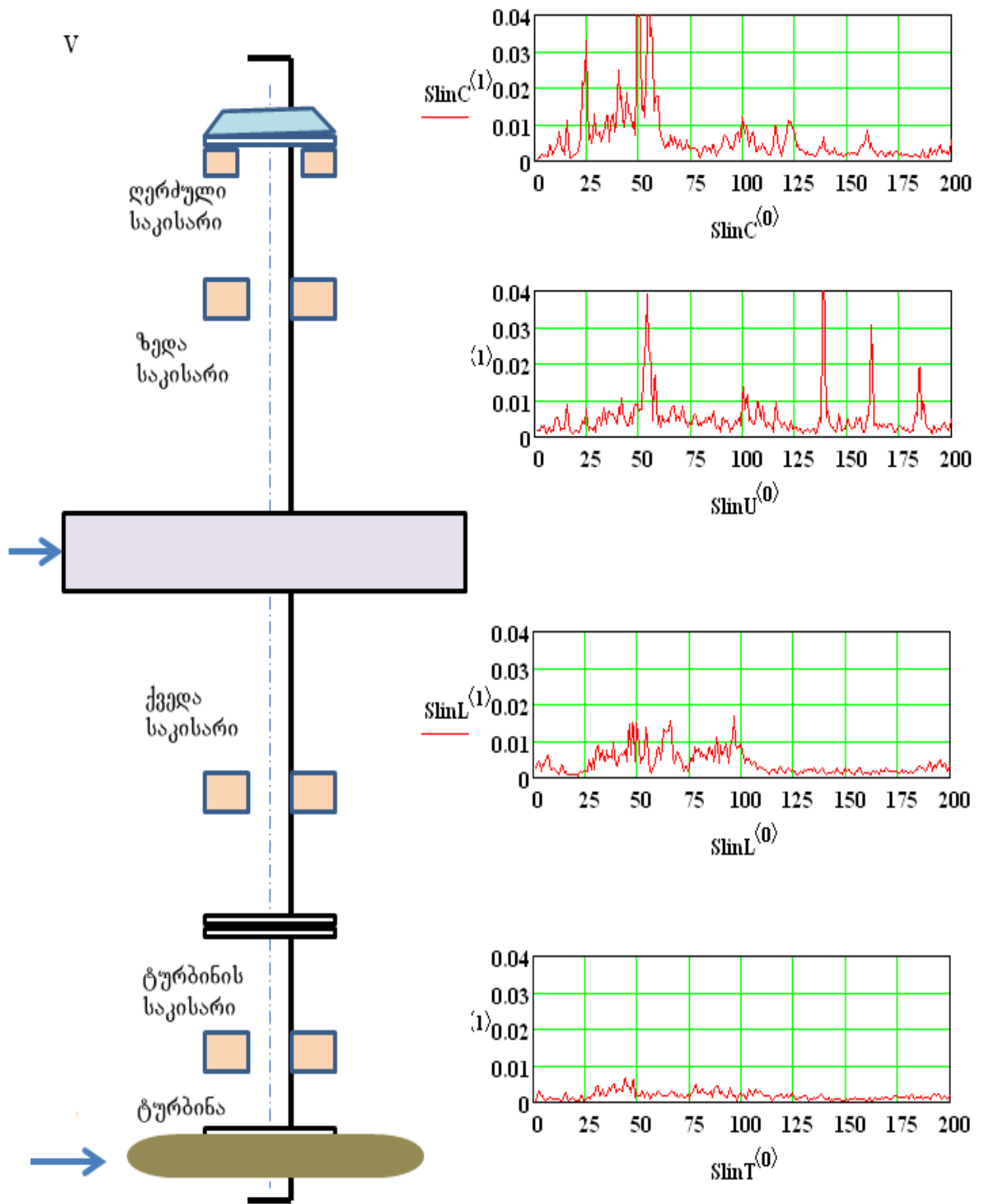
ნახ.4.6. სიგნალის ფორმა რადიალური მიმართულებით. ოქტავურ დიაპაზონებში
(მთლიანი სიგნალი)



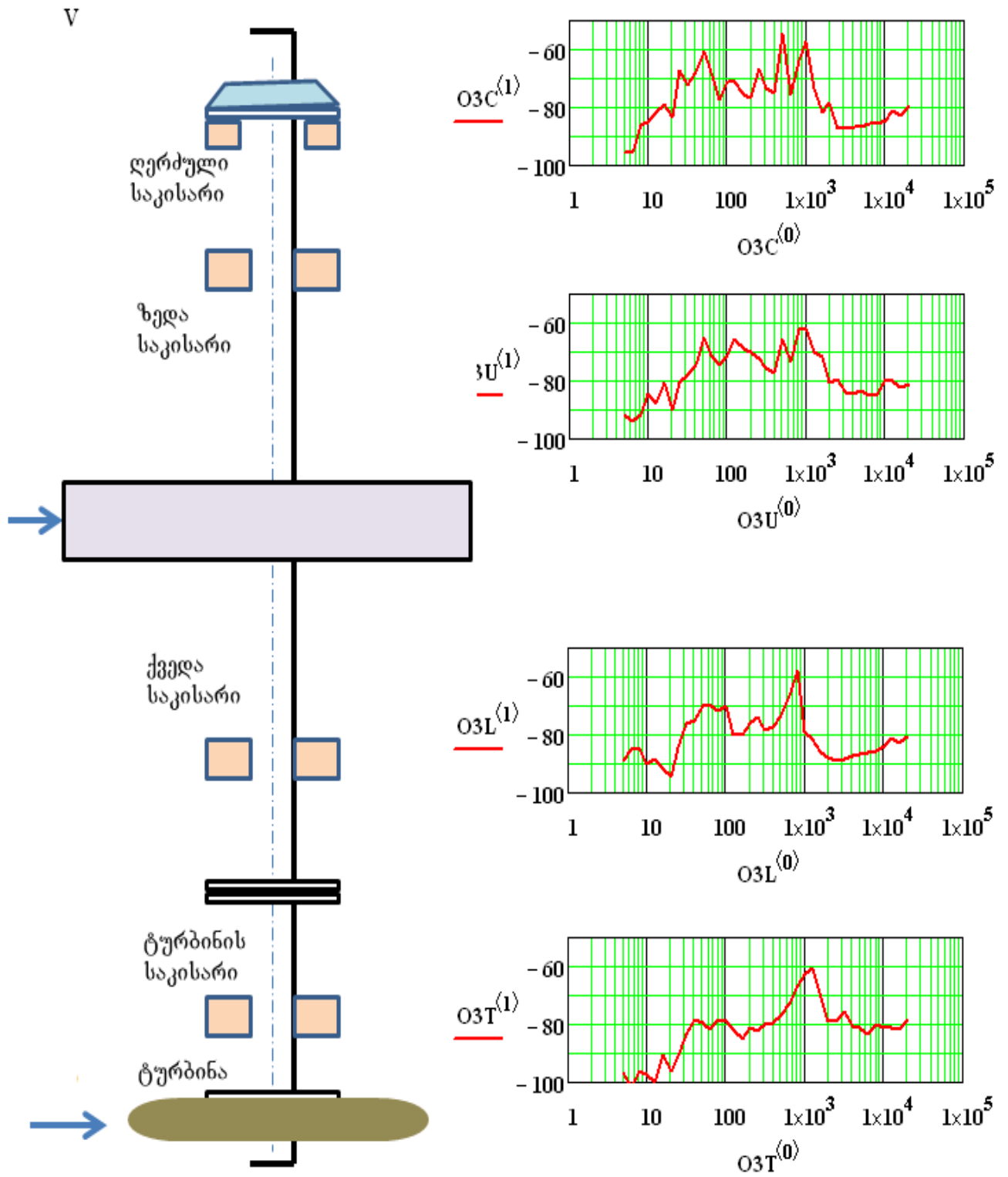
ნახ.4.7. სიგნალის ფორმა ტანგენციური მიმართულება 0-200 ჰერცამდე (სპექტრი)



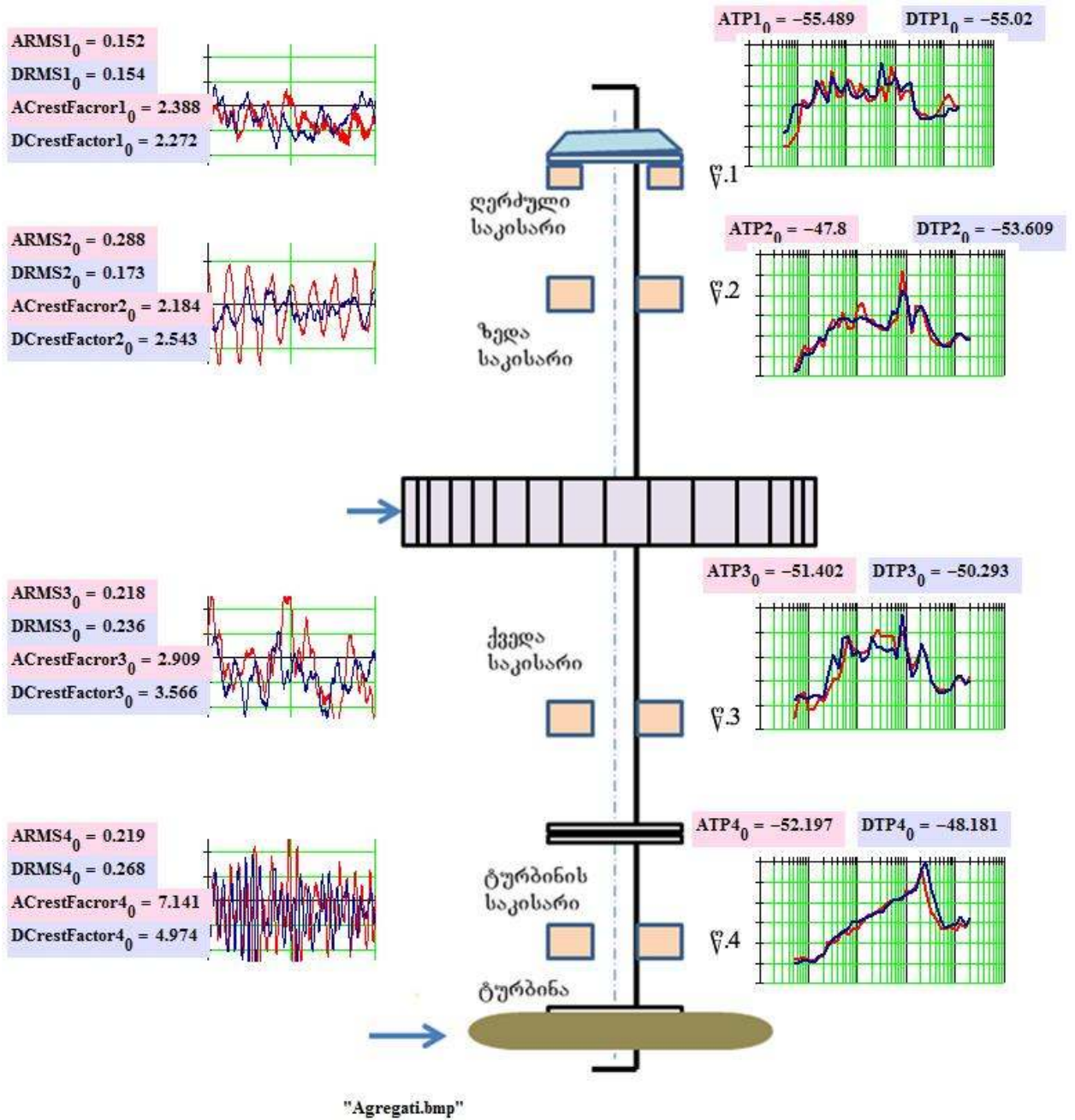
ნახ.4.8. სიგნალის ფორმა ტანგენციური მიმართულებით ოქტავურ დიაპაზონში



ნახ.4.9. სიგნალის სპექტრი - გაზომილი ვერტიკალური მიმართულებით 0 - 200 ჰც



ნახ.4.10. სიგნალის ფორმა ვერტიკალური მიმართულებით ოქტავურ დიაპაზონში



ნახ.4.11. ძველი და ახალი გაზომილი ვიბრაციული ველების სიგნალების შედარება გაზომილი რადიალური მიმართულებით (წითლად აღნიშნულია პირველი გაზომვის შედეგები, ლურჯად მეორე)

4.2. ვარციხე ჰესის აგრეგატის ვიბროაკუსტიკური მონიტორინგის პროგრამა

ქვემოთ მოცემული პროგრამის საშუალებით ხდება გაზომვის შედეგების მიხედვით ვიბრაციული ველების აგება.

კვანძი 1 როტორი

$$\Delta 111 := ATP_{I_0} - DTP_{I_0}$$

$$\Delta 112 := A031_{0,1} - D031_{0,1}$$

$$\Delta 121 := \left(\sum_{m=1}^9 A031_{m,1} \right) - \left(\sum_{m=1}^9 D031_{m,1} \right)$$

$$\Delta 131 := (ATP2_0 - DTP2_0) + (ATP4_0 - DTP4_0)$$

$$\Delta 132 := (A032_{0,1} - D032_{0,1}) + (A034_{0,1} - D034_{0,1})$$

$\Delta 112 := 1$ ლილვის კლირენსის(ღრეჩოს) ზრდა – უნდა გაიზომოს ინდიკატორით.

$\Delta 113 := 1$ საყრდენი საკისრის ზეთის ფენის ზრდა.

$\Delta 124 := 1$ პროცესის ცვლილება.

$\Delta 113 := 1$ ლილვის კლირენსის (ღრეჩოს) ზრდა.

$\Delta 141 := 1$ გენერატორის ჰაერის ღრეჩოს ზრდა.

დასაშვები სიდიდეები (სტატისტიკურად დამუშავებული)

$$M\Delta 111 := 6$$

$$M\Delta 121 := 25$$

$$M\Delta 131 := 6$$

$$M\Delta 141 := 0.2$$

$$M\Delta 112 := 6$$

$$M\Delta 122 := 0.5$$

$$M\Delta 132 := 6$$

$$M\Delta 123 := 0.1$$

$$M\Delta 133 := 0.5$$

$$M\Delta 124 := 6$$

გაზომვის შედეგებისა და დასაშვები სიდიდეების მატრიცა.

$$D1 := \begin{pmatrix} \Delta 111 & M\Delta 111 \\ \Delta 112 & M\Delta 112 \\ \Delta 121 & M\Delta 121 \\ \Delta 122 & M\Delta 122 \\ \Delta 123 & M\Delta 123 \\ \Delta 124 & M\Delta 124 \\ \Delta 131 & M\Delta 131 \\ \Delta 132 & M\Delta 132 \\ \Delta 133 & M\Delta 133 \\ \Delta 141 & M\Delta 141 \end{pmatrix} = \begin{array}{c|cc} & 0 & 1 \\ \hline 0 & -0.469 & 6 \\ 1 & -5.783 & 6 \\ 2 & -34.651 & 25 \\ 3 & 1 & 0.5 \\ 4 & 1 & 0.1 \\ 5 & 1 & 6 \\ 6 & 1.793 & 6 \\ 7 & 1.808 & 6 \\ 8 & 1 & 0.5 \\ 9 & 1 & 0.2 \end{array}$$

კვანძი 2 -სტატორი

მონიტორინგის გაზომვის შედეგები.

$$\Delta 211 := (ATP3_0 - DTP3_0) + (ATP4_0 - DTP4_0)$$

$$\Delta 212 := (AO33_{0,1} - DO33_{0,1}) + (AO34_{0,1} - DO34_{0,1})$$

$\Delta 221 := 1$ გენერატორის ნაწილობრივი განტვირთვა.

$\Delta 231 := 1$ გენერატორის ნაწილობრივი განტვირთვა.

$$\Delta 232 := (ATP3_0 - DTP3_0) + (ATP4_0 - DTP4_0)$$

$\Delta 241 := 1$ გენერატორის ჰაერის ღრეჩოს ზრდა.

$$\Delta 242 := (ATP3_0 - DTP3_0) + (ATP4_0 - DTP4_0)$$

$\Delta 241 := 1$ გენერატორის ჰაერის ღრეჩოს ზრდა.

$$\Delta 252 := (\text{ATP3}_0 - \text{DTP3}_0) + (\text{ATP4}_0 - \text{DTP4}_0)$$

$\Delta 261 := 1$ გენერატორის ჰაერის ღრეჩოს ზრდა.

$$\Delta 262 := (\text{ATP3}_0 - \text{DTP3}_0) + (\text{ATP4}_0 - \text{DTP4}_0)$$

$\Delta 271 := 1$ გენერატორის ჰაერის ღრეჩოს ზრდა.

$$\Delta 272 := (\text{ATP3}_0 - \text{DTP3}_0) + (\text{ATP4}_0 - \text{DTP4}_0)$$

$\Delta 281 := 1$ გენერატორის ჰაერის ღრეჩოს ზრდა.

$$\Delta 282 := (\text{ATP3}_0 - \text{DTP3}_0) + (\text{ATP4}_0 - \text{DTP4}_0)$$

$$\Delta 291 := (\text{ATP3}_0 - \text{DTP3}_0) + (\text{ATP4}_0 - \text{DTP4}_0)$$

$\Delta 2101 := 1$ გენერატორის ჰაერის ღრეჩოს ზრდა.

$$\Delta 2102 := (\text{ATP3}_0 - \text{DTP3}_0) + (\text{ATP4}_0 - \text{DTP4}_0)$$

ტემპერატურის ზრდა ანუ ვიბრაციები

$$\Delta 2111 := (\text{ATP3}_0 - \text{DTP3}_0) + (\text{ATP4}_0 - \text{DTP4}_0)$$

$$\Delta 2121 := (\text{ATP3}_0 - \text{DTP3}_0) + (\text{ATP4}_0 - \text{DTP4}_0)$$

$$\Delta 2131 := (\text{ATP3}_0 - \text{DTP3}_0) + (\text{ATP4}_0 - \text{DTP4}_0)$$

დასაშვები სიდიდეები სტატისტიკურად დამუშავებული

$$M\Delta 211 := 6 \quad M\Delta 221 := 20 \quad M\Delta 231 := 20 \quad M\Delta 241 := 0.5$$

$$M\Delta 212 := 6 \quad M\Delta 232 := 6 \quad M\Delta 2426 := 6$$

$$M\Delta 251 := 0.5 \quad M\Delta 261 := 0.5 \quad M\Delta 271 := 0.5 \quad M\Delta 281 := 0.5$$

$$M\Delta 252 := 6 \quad M\Delta 262 := 6 \quad M\Delta 272 := 6 \quad M\Delta 282 := 6$$

$$M\Delta 291 := 0.5$$

$$M\Delta 2101 := 0.5$$

$$M\Delta 2111 := 10$$

$$M\Delta 2211 := 10$$

$$M\Delta 2102 := 6$$

$$M\Delta 2131 := 10$$

გაზომვის შედეგებისა და დასაშვები სიდიდეების მატრიცა

		0	1
D2 :=	$\Delta 211$ $M\Delta 211$	0	-5.125
	$\Delta 212$ $M\Delta 212$	1	-5.577
	$\Delta 221$ $M\Delta 221$	2	1
	$\Delta 231$ $M\Delta 231$	3	1
	$\Delta 232$ $M\Delta 232$	4	-5.125
	$\Delta 241$ $M\Delta 241$	5	1
	$\Delta 242$ $M\Delta 242$	6	-5.125
	$\Delta 251$ $M\Delta 251$	7	1
	$\Delta 252$ $M\Delta 252$	8	-5.125
	$\Delta 261$ $M\Delta 261$	9	1
	$\Delta 262$ $M\Delta 262$	10	-5.125
	$\Delta 271$ $M\Delta 271$	11	1
	$\Delta 272$ $M\Delta 272$	12	-5.125
	$\Delta 281$ $M\Delta 281$	13	1
$\Delta 282$ $M\Delta 282$		0.5	
$\Delta 291$ $M\Delta 291$		6	
$\Delta 2101$ $M\Delta 2101$		0.5	
$\Delta 2102$ $M\Delta 2102$		6	
$\Delta 2111$ $M\Delta 2111$		6	
$\Delta 2121$ $M\Delta 2121$		6	
$\Delta 2131$ $M\Delta 2131$...	

კვანძი 3 - ტურბინა

მონიტორინგის - გაზომვის შედეგები

$$\Delta 311 := (ATP3_0 - DTP3_0) + (ATP4_0 - DTP4_0)$$

$$\Delta 312 := (AO33_{0,1} - DO33_{0,1}) + (AO34_{0,1} - DO34_{0,1})$$

$$\Delta 321 := \left(\sum_{m=1}^9 \text{AO33}_{m,1} \right) - \left(\sum_{m=1}^9 \text{DO33}_{m,1} \right) + \left[\left(\sum_{m=1}^9 \text{AO34}_{m,1} \right) - \left(\sum_{m=1}^9 \text{DO34}_{m,1} \right) \right]$$

$\Delta 322 := 1$ პროცესის ცვლადები

$\Delta 323 := 1$ წყლის საფარის კარის მდებარეობა

$$\Delta 331 := \text{ATP4}_0 - \text{DTP4}_0$$

$\Delta 341 := 1$ რგოლური სამჭიდროვებელი/ფრთების პერიფერიების ღრეჩო.

$\Delta 351 := 1$ რგოლური სამჭიდროვებელი/ფრთების პერიფერიების ღრეჩო.

$$\Delta 352 := \text{ATP4}_0 - \text{DTP4}_0 \quad \Delta 353 := \text{ATP4}_0 - \text{DTP4}_0$$

დასაშვები სიდიდეები (სტატისტიკურად დამუშავებული)

$M\Delta 311 := 6$	$M\Delta 321 := 25$	$M\Delta 331 := 6$	$M\Delta 341 := 2$
$M\Delta 311 := 6$	$M\Delta 322 := 6$	$M\Delta 332 := 0.5$	
	$M\Delta 323 := 0.5$	$M\Delta 333 := 6$	
$M\Delta 351 := 0.5$	$M\Delta 352 := 6$	$M\Delta 353 := 6$	

გაზოვების შედეგებისა და დასაშვები სიდიდეების მატრიცა

		0	1
D3 :=	($\Delta 311$ M $\Delta 311$)	-5.125	6
	($\Delta 312$ M $\Delta 312$)	-5.577	6
	($\Delta 321$ M $\Delta 321$)	-29.977	25
	($\Delta 322$ M $\Delta 322$)	1	6
	($\Delta 323$ M $\Delta 323$)	1	0.5
	($\Delta 331$ M $\Delta 331$)	-4.016	6
	($\Delta 332$ M $\Delta 332$)	1	0.5
	($\Delta 333$ M $\Delta 333$)	1	6
	($\Delta 341$ M $\Delta 341$)	1	6
	($\Delta 351$ M $\Delta 351$)	1	2
	($\Delta 352$ M $\Delta 352$)	1	0.5
	($\Delta 353$ M $\Delta 353$)	-4.016	6
		-4.016	6

კვანძი 4 - საყრდენი საკისარი

$$\Delta 411 := ATP1_0 - DTP1_0$$

ტემპერატურის ზრდა - ანუ ვიბრაციების ზრდა.

$$\Delta 412 := ATP1_0 - DTP1_0$$

საყრდენი საკისრის ზეთის ფენის სისქე.

$$\Delta 421 := ATP1_0 - DTP1_0$$

ტემპერატურის ზრდა - ანუ ვიბრაციების ზრდა.

$$\Delta 422 := ATP1_0 - DTP1_0$$

საყრდენი საკისრის ზეთის ფენის სისქე.

$$\Delta 431 := ATP1_0 - DTP1_0$$

ტემპერატურის ზრდა - ანუ ვიბრაციების ზრდა.

$$\Delta 432 := ATP1_0 - DTP1_0$$

საყრდენი საკისრის ზეთის ფენის სისქე.

დასაშვები სიდიდეები სტატისტიკურად დამუშავებული

$$M\Delta 411 := 6 \quad M\Delta 421 := 6 \quad M\Delta 431 := 6$$

$$M\Delta 412 := 10 \quad M\Delta 422 := 10 \quad M\Delta 432 := 10$$

$$M\Delta 413 := 0.6 \quad M\Delta 423 := 0.6 \quad M\Delta 433 := 0.6$$

გაზომვის შედეგებისა და დასაშვები სიდიდეების მატრიცა

$$D4 := \begin{pmatrix} \Delta 411 & M\Delta 411 \\ \Delta 412 & M\Delta 412 \\ \Delta 413 & M\Delta 413 \\ \Delta 421 & M\Delta 421 \\ \Delta 422 & M\Delta 422 \\ \Delta 423 & M\Delta 423 \\ \Delta 431 & M\Delta 431 \\ \Delta 432 & M\Delta 432 \\ \Delta 433 & M\Delta 433 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.469 & 6 \\ -0.469 & 10 \\ 1 & 0.6 \\ -0.469 & 6 \\ -0.469 & 10 \\ 1 & 0.6 \\ -0.469 & 6 \\ -0.469 & 10 \\ 1 & 0.6 \end{pmatrix}$$

კვანძი 5-მიმართული საკისარი

მონიტორინგის-გაზომვის შედეგები.

$$\Delta 511 := ATP2_0 - DTP2_0 \quad \Delta 512 := ATP2_0 - DTP2_0$$

$$M\Delta 513 := 1 \text{ ზედა საკისრის ზეთის ფენის სისქე.}$$

$$\Delta 521 := ATP2_0 - DTP2_0 \quad \Delta 522 := ATP2_0 - DTP2_0$$

$$M\Delta 523 := 1 \text{ ზედა საკისრის ზეთის ფენის სისქე.}$$

$$\Delta 531 := ATP2_0 - DTP2_0 \quad \Delta 532 := ATP2_0 - DTP2_0$$

$$M\Delta 533 := 1 \text{ ზედა საკისრის ზეთის ფენის სისქე.}$$

დასაშვები სიდიდეები(სტატისტიკურად დამუშავებული)

$$M\Delta 511 := 6 \quad M\Delta 521 := 6 \quad M\Delta 531 := 6$$

$$M\Delta 512 := 10 \quad M\Delta 522 := 10 \quad M\Delta 532 := 10$$

$$M\Delta 513 := 0.6 \quad M\Delta 523 := 0.6 \quad M\Delta 533 := 0.6$$

გაზომვის შედეგებისა და დასაშვები სიდიდეების მატრიცა

$$D5 := \begin{pmatrix} \Delta 511 & M\Delta 511 \\ \Delta 512 & M\Delta 512 \\ \Delta 513 & M\Delta 513 \\ \Delta 521 & M\Delta 521 \\ \Delta 522 & M\Delta 522 \\ \Delta 523 & M\Delta 523 \\ \Delta 531 & M\Delta 531 \\ \Delta 532 & M\Delta 532 \\ \Delta 533 & M\Delta 533 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5.809 & 6 \\ 5.809 & 10 \\ 1 & 0.6 \\ 5.809 & 6 \\ 5.809 & 10 \\ 1 & 0.6 \\ 5.809 & 6 \\ 5.809 & 10 \\ 1 & 0.6 \end{pmatrix}$$

კვანძი 6 - მიმართველი ქვედა საკისარი

მონიტორინგის - გაზომვის შედეგები.

$$\Delta 611 := ATP2_0 - DTP2_0 \quad \Delta 612 := ATP2_0 - DTP2_0$$

$$\Delta 613 := 1 \quad \text{ქვედა საკისრის ზეთის ფენის სისქე.}$$

$$\Delta 621 := ATP3_0 - DTP3_0 \quad \Delta 612 := ATP3_0 - DTP3_0$$

$$\Delta 623 := 1 \quad \text{ქვედა საკისრის ზეთის ფენის სისქე.}$$

$$\Delta 631 := ATP3_0 - DTP3_0 \quad \Delta 632 := ATP3_0 - DTP3_0$$

$$\Delta 633 := 1 \quad \text{ქვედა საკისრის ზეთის ფენის სისქე.}$$

დასაშვები სიდიდეები (სტატისტიკურად დამუშავებული)

$$M\Delta 611 := 6M \quad \Delta 621 := 6 \quad M\Delta 631 := 6$$

$$M\Delta 612 := 10 \quad M\Delta 622 := 10 \quad M\Delta 632 := 10$$

$$M\Delta 613 := 0.6 \quad M\Delta 623 := 0.6 \quad M\Delta 633 := 0.6$$

გაზომვის შედეგებისა და დასაშვები სიდიდეების მატრიცა

$$D_6 := \begin{pmatrix} \Delta 611 & M\Delta 611 \\ \Delta 612 & M\Delta 612 \\ \Delta 613 & M\Delta 613 \\ \Delta 621 & M\Delta 621 \\ \Delta 622 & M\Delta 622 \\ \Delta 623 & M\Delta 623 \\ \Delta 631 & M\Delta 631 \\ \Delta 632 & M\Delta 632 \\ \Delta 633 & M\Delta 633 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5.809 & 6 \\ 5.809 & 10 \\ 1 & 0.6 \\ -1.109 & 6 \\ -1.109 & 10 \\ 1 & 0.6 \\ -1.109 & 6 \\ -1.109 & 10 \\ 1 & 0.6 \end{pmatrix}$$

კვანძი 7-მიმართული ტურბინის საკისარი

მონტორინგის-გაზომვის შედეგები

$$\Delta 711 := ATP_4 - DTP_4 \quad \Delta 612 := ATP_4 - DTP_4$$

$$\Delta 713 := 1 \quad \text{ქვედა საკისრის ზეთის ფენის სისქე.}$$

$$\Delta 721 := ATP_4 - DTP_4 \quad \Delta 712 := ATP_4 - DTP_4$$

$$\Delta 723 := 1 \quad \text{ქვედა საკისრის ზეთის ფენის სისქე.}$$

$$\Delta 731 := ATP_4 - DTP_4 \quad \Delta 732 := ATP_4 - DTP_4$$

$$\Delta 733 := 1 \quad \text{ქვედა საკისრის ზეთის ფენის სისქე.}$$

დასაშვები სიდიდეები (სტატისტიკურად დამუშავებული)

$$M\Delta 711 := 6 \quad M\Delta 721 := 6 \quad M\Delta 731 := 6$$

$$M\Delta 712 := 10 \quad M\Delta 722 := 10 \quad M\Delta 732 := 10$$

$$M\Delta 713 := 0.6 \quad M\Delta 723 := 0.6 \quad M\Delta 733 := 0.6$$

გაზომვების შედეგებისა და დასაშვები სიდიდეების მატრიცა

$$D7 := \begin{pmatrix} \Delta 711 & M\Delta 711 \\ \Delta 712 & M\Delta 712 \\ \Delta 713 & M\Delta 713 \\ \Delta 721 & M\Delta 721 \\ \Delta 722 & M\Delta 722 \\ \Delta 723 & M\Delta 723 \\ \Delta 731 & M\Delta 731 \\ \Delta 732 & M\Delta 732 \\ \Delta 733 & M\Delta 733 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4.016 & 6 \\ -4.016 & 10 \\ 1 & 0.6 \\ -4.016 & 6 \\ -4.016 & 10 \\ 1 & 0.6 \\ -4.016 & 6 \\ -4.016 & 10 \\ 1 & 0.6 \end{pmatrix}$$

4.3. ვარციხე ჰეს-ის აგრეგატის გაზომვისა და დიაგნოსტიკის შედეგები

კვანძი 1 როტორი

$$D11 := \begin{cases} \text{There is defect if } |D1_{0,0}| \geq D1_{0,1} \\ \text{There is defect if } |D1_{0,0}| \geq D1_{1,1} \\ \text{There is no defect} & \text{otherwise} \\ D11 := \text{There is no defect} \end{cases} \quad D12 := \begin{cases} \text{There is defect if } |D1_{2,0}| \geq D1_{2,1} \\ \text{There is defect if } |D1_{3,0}| \geq D1_{3,1} \\ \text{There is defect if } |D1_{4,0}| \geq D1_{4,1} \\ \text{There is defect if } |D1_{5,0}| \geq D1_{5,1} \\ \text{There is no defect} & \text{otherwise} \\ D12 := \text{There is defect} \end{cases}$$

$$D13 := \begin{cases} \text{There is defect if } |D1_{6,0}| \geq D1_{6,1} \\ \text{There is defect if } |D1_{7,0}| \geq D1_{7,1} \\ \text{There is defect if } |D1_{8,0}| \geq D1_{8,1} \\ \text{There is no defect} & \text{otherwise} \\ D13 := \text{There is defect} \end{cases} \quad D14 := \begin{cases} \text{There is defect if } |D1_{9,0}| \geq D1_{9,1} \\ \text{There is no defect} & \text{otherwise} \\ D14 := \text{There is defect} \end{cases}$$

კვანძი 2 -სტატორი

$$D21 := \begin{cases} \text{There is no defect if } D2_{0,0} \leq D2_{0,1} \\ \text{There is no defect if } D2_{1,0} \leq D2_{1,1} \\ \text{There is defect otherwise} \\ D21 := \text{There is no defect} \end{cases} \quad D22 := \begin{cases} \text{There is no defect if } D2_{0,0} \leq D2_{0,1} \\ \text{There is defect otherwise} \\ D21 := \text{There is no defect} \end{cases}$$

$$D23 := \begin{cases} \text{There is no defect if } D2_{3,0} \leq D2_{3,1} \\ \text{There is no defect if } D2_{4,0} \leq D2_{4,1} \\ \text{There is defect otherwise} \\ D23 := \text{There is no defect} \end{cases} \quad D24 := \begin{cases} \text{There is no defect if } D2_{5,0} \leq D2_{5,1} \\ \text{There is no defect if } D2_{6,0} \leq D2_{6,1} \\ \text{There is defect otherwise} \\ D24 := \text{There is no defect} \end{cases}$$

$$D25 := \begin{cases} \text{There is no defect if } D2_{7,0} \leq D2_{7,1} \\ \text{There is no defect if } D2_{8,0} \leq D2_{8,1} \\ \text{There is defect otherwise} \\ D25 := \text{There is no defect} \end{cases} \quad D26 := \begin{cases} \text{There is no defect if } D2_{9,0} \leq D2_{9,1} \\ \text{There is no defect if } D2_{10,0} \leq D2_{10,1} \\ \text{There is defect otherwise} \\ D26 := \text{There is no defect} \end{cases}$$

$$D27 := \begin{cases} \text{There is no defect if } D2_{11,0} \leq D2_{11,1} \\ \text{There is no defect if } D2_{12,0} \leq D2_{12,1} \\ \text{There is defect otherwise} \\ D27 := \text{There is no defect} \end{cases} \quad D28 := \begin{cases} \text{There is no defect if } D2_{13,0} \leq D2_{13,1} \\ \text{There is no defect if } D2_{14,0} \leq D2_{14,1} \\ \text{There is defect otherwise} \\ D28 := \text{There is no defect} \end{cases}$$

$$D29 := \begin{cases} \text{There is no defect if } D2_{13,0} \leq D2_{13,1} \\ \text{There is defect otherwise} \\ D29 := \text{There is no defect} \end{cases} \quad D210 := \begin{cases} \text{There is no defect if } D2_{16,0} \leq D2_{16,1} \\ \text{There is no defect if } D2_{17,0} \leq D2_{14,1} \\ \text{There is defect otherwise} \\ D210 := \text{There is no defect} \end{cases}$$

$$D211 := \begin{cases} \text{There is no defect if } D2_{18,0} \leq D2_{18,1} \\ \text{There is defect otherwise} \\ D211 := \text{There is no defect} \end{cases} \quad D212 := \begin{cases} \text{There is no defect if } D2_{19,0} \leq D2_{19,1} \\ \text{There is defect otherwise} \\ D212 := \text{There is no defect} \end{cases}$$

$$D213 := \begin{cases} \text{There is no defect if } D2_{20,0} \leq D2_{20,1} \\ \text{There is defect} & \text{otherwise} \\ D213 := \text{There is no defect} \end{cases}$$

კვანძი 3 - ტურბინა

$$D31 := \begin{cases} \text{There is a defect if } |D3_{0,0}| \geq D3_{0,1} \\ \text{There is a defect if } |D3_{1,0}| \geq D3_{1,1} \\ \text{There is no defect} & \text{otherwise} \\ D31 := \text{There is no defect} \end{cases} \quad D32 := \begin{cases} \text{There is a defect if } |D3_{2,0}| \geq D3_{2,1} \\ \text{There is a defect if } |D3_{3,0}| \geq D3_{3,1} \\ \text{There is a defect if } |D3_{4,0}| \geq D3_{4,1} \\ \text{There is no defect} & \text{otherwise} \\ D32 := \text{There is a defect} \end{cases}$$

$$D33 := \begin{cases} \text{There is a defect if } |D3_{5,0}| \geq D3_{5,1} \\ \text{There is a defect if } |D3_{6,0}| \geq D3_{6,1} \\ \text{There is a defect if } |D3_{7,0}| \geq D3_{7,1} \\ \text{There is no defect} & \text{otherwise} \\ D33 := \text{There is a defect} \end{cases} \quad D34 := \begin{cases} \text{There is a defect if } |D3_{8,0}| \geq D3_{8,1} \\ \text{There is no defect} & \text{otherwise} \\ D34 := \text{There is no defect} \end{cases}$$

$$D35 := \begin{cases} \text{There is a defect if } |D3_{9,0}| \geq D3_{9,1} \\ \text{There is a defect if } |D3_{10,0}| \geq D3_{10,1} \\ \text{There is a defect if } |D3_{11,0}| \geq D3_{11,1} \\ \text{There is no defect} & \text{otherwise} \\ D35 := \text{There is a defect} \end{cases}$$

კვანძი 4 - საყრდენი საკისარი

$$D41 := \begin{cases} \text{There is a defect if } |D4_{0,0}| \geq D4_{0,1} \\ \text{There is a defect if } |D4_{1,0}| \geq D4_{1,1} \\ \text{There is a defect if } |D4_{2,0}| \geq D4_{2,1} \\ \text{There is no defect} & \text{otherwise} \\ D41 := \text{There is a defect} \end{cases} \quad D42 := \begin{cases} \text{There is a defect if } |D4_{3,0}| \geq D4_{3,1} \\ \text{There is a defect if } |D4_{4,0}| \geq D4_{4,1} \\ \text{There is a defect if } |D4_{5,0}| \geq D4_{5,1} \\ \text{There is no defect} & \text{otherwise} \\ D41 := \text{There is a defect} \end{cases}$$

$$D43 := \begin{cases} \text{There is a defect if } |D4_{0,0}| \geq D4_{0,1} \\ \text{There is a defect if } |D4_{0,0}| \geq D4_{0,1} \\ \text{There is a defect if } |D4_{0,0}| \geq D4_{0,1} \\ \text{There is no defect otherwise} \\ D43 := \text{There is no defect} \end{cases}$$

კვანძი 5-მიმმართველი საკისარი

$$D51 := \begin{cases} \text{There is a defect if } |D5_{0,0}| \geq D5_{0,1} \\ \text{There is a defect if } |D5_{1,0}| \geq D5_{1,1} \\ \text{There is a defect if } |D5_{2,0}| \geq D5_{2,1} \\ \text{There is no defect otherwise} \\ D51 := \text{There is a defect} \end{cases} \quad D52 := \begin{cases} \text{There is a defect if } |D5_{3,0}| \geq D5_{3,1} \\ \text{There is a defect if } |D5_{4,0}| \geq D5_{4,1} \\ \text{There is a defect if } |D5_{5,0}| \geq D5_{5,1} \\ \text{There is no defect otherwise} \\ D51 := \text{There is a defect} \end{cases}$$

$$D53 := \begin{cases} \text{There is a defect if } |D5_{6,0}| \geq D5_{6,1} \\ \text{There is a defect if } |D5_{7,0}| \geq D5_{7,1} \\ \text{There is a defect if } |D5_{8,0}| \geq D5_{8,1} \\ \text{There is no defect otherwise} \\ D53 := \text{There is a defect} \end{cases}$$

კვანძი 6 - მიმმართველი ქვედა საკისარი

$$D61 := \begin{cases} \text{There is a defect if } |D6_{0,0}| \geq D6_{0,1} \\ \text{There is a defect if } |D6_{1,0}| \geq D6_{1,1} \\ \text{There is a defect if } |D6_{2,0}| \geq D6_{2,1} \\ \text{There is no defect otherwise} \\ D61 := \text{There is a defect} \end{cases} \quad D62 := \begin{cases} \text{There is a defect if } |D6_{3,0}| \geq D6_{3,1} \\ \text{There is a defect if } |D6_{4,0}| \geq D6_{4,1} \\ \text{There is a defect if } |D6_{5,0}| \geq D6_{5,1} \\ \text{There is no defect otherwise} \\ D62 := \text{There is a defect} \end{cases}$$

$$D63 := \begin{cases} \text{There is a defect if } |D6_{6,0}| \geq D6_{6,1} \\ \text{There is a defect if } |D6_{7,0}| \geq D6_{7,1} \\ \text{There is a defect if } |D6_{8,0}| \geq D6_{8,1} \\ \text{There is no defect otherwise} \\ D61 := \text{There is a defect} \end{cases}$$

კვანძი 7-მიმართველი ტურბინის საკისარი

$$D71 := \begin{cases} \text{There is a defect if } |D7_{0,0}| \geq D7_{0,1} \\ \text{There is a defect if } |D7_{1,0}| \geq D7_{1,1} \\ \text{There is a defect if } |D7_{2,0}| \geq D7_{2,1} \\ \text{There is no defect otherwise} \\ D71 := \text{There is a defect} \end{cases} \quad D72 := \begin{cases} \text{There is a defect if } |D7_{3,0}| \geq D7_{3,1} \\ \text{There is a defect if } |D7_{4,0}| \geq D7_{4,1} \\ \text{There is a defect if } |D7_{5,0}| \geq D7_{5,1} \\ \text{There is no defect otherwise} \\ D72 := \text{There is a defect} \end{cases}$$

$$D73 := \begin{cases} \text{There is a defect if } |D7_{6,0}| \geq D7_{6,1} \\ \text{There is a defect if } |D7_{7,0}| \geq D7_{7,1} \\ \text{There is a defect if } |D7_{8,0}| \geq D7_{8,1} \\ \text{There is no defect otherwise} \\ D73 := \text{There is a defect} \end{cases}$$

სამწუხაროდ სენსორების ДН-3 სიხშირული დიაპაზონი შეადგენს 10 - 4000 ჰც. ეს იმას ნიშნავს, რომ 10 ჰც ქვემოთ (ინფრაბგერითი რხევები) და 4000 ჰც ზემოთ ამ სენსორებით გაზომვები არის ნაკლებად საიმედო, რაც ცუდად გამოისახა შედეგებში. არ მოჩანს პირველი ძირითადი და ფრთის ჰარმონიკები და სუბჰარმონიკები, რაც არ იძლევა შესაძლებლობას დიაგნოსტიკება გაუკეთოთ მნიშვნელოვან ცვთის დეფექტებს და აგრეთვე შეუძლებელია სრულად გავანალიზოთ მაღალსიხშირული ვიბრაციების შემომვლელის სპექტრი მოდულირებული რხევების, ავტორხევების და კავიტაციის წარმოშობის შემთხვევებში.

4.4. ვარციხე ჰეს-ის ჰიდრო ენერგოაგრეგატის აკუსტიკური მახასიათებლების ექსპერიმენტული კვლევა ტექნიკურ მდგომარეობათა დიაგნოსტიკის მიზნით

ენერგეტიკული მოწყობილობების ტექნიკურ მდგომარეობათა ვიბროაკუსტიკური მონიტორინგისა და დიაგნოსტიკის ამოცანებში ხმაურის გაზომვები ნაკლებად გამოიყენება. დეტალურად და დანაკარგების გარეშე, გაანალიზებული იქნას კონკრეტული ხმაურის წყარო ბევრად რთულია სხვა ხმაურის წყაროების არსებობისას.

გარდა ამისა, ხმაურის კონკრეტული მდგენელის გამოყოფის ამოცანა, რომელიც განპირობებულია დეფექტის გამოჩენით რთულდება ხმაურის ტალღების შესაძლო მრავალჯერადი ანარეკლისა და გარდატეხვის შედეგად. მოვიზირე ზედაპირის მახლობლობაში იქმნება ხმაურის ახლო დიფუზური ველი რთული ფორმის ფსევდომდგენელებით, რომლებიც წყაროდან მოცილებისას ტრანსფორმირდებიან უბრალო (ტალღურ) ფორმაში. ამიტომაც რომ ხმაურის გაზომვები თითქმის ყოველთვის წარმოებს არა ნაკლებ 1 მ მანძელზე მაინც შესასწავლი მოწყობილობის ზედაპირიდან. ვიბრაციებისათვის კი გაზომვისას წყაროების ლოკალიზაცია ბევრად მარტივდება[19].

ჰიდროელექტროსადგურებში ხმაურის ძირითადი წყაროებია (გამოსხივებული ხმაურის სიმძლავრის მიმდევრობით) :

1. გენერატორები;
2. ელექტროძრავები და სხვა ელექტრული მანქანები მბრუნავი ნაწილებით;
3. ძალოვანი ტრანსფორმატორები სიმძლავრით 100 მვა და ზევით;
4. სხვადასხვა დანიშნულების ტუმბოები;
5. ცენტრიდანული ვენტილიატორები;
6. კომპრესორები;
7. ტურბინები;
8. ნაგებობათა გამდინარე ნაწილები (წყალსაგდებები, მილწყალსადენები);
9. ლითონმჭრელი ჩარხები მტკიცე ფოლადების დამუშავებისას, ზუმფარის ჩარხები;
10. საჰაერო ამომრთველები.

ხმაურის წყაროები შეიძლება იყვნენ აგრეთვე მექანიზირებული ინსტრუმენტები (პნევმოინსტრუმენტები, ელექტრული ბურღები, შედულების აგრეგატები, სახეხი ინსტრუმენტები და ა.შ.) [45].

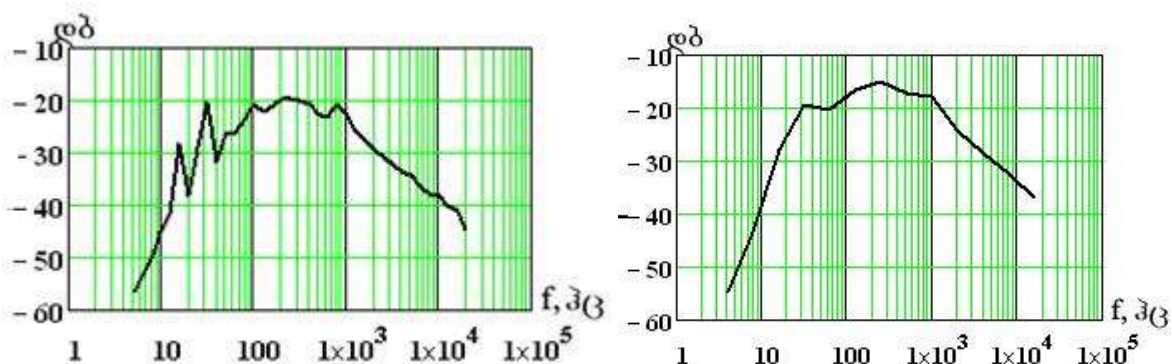
ჩატარებული იქნა ჰიდროენერგოაგრეგატის აკუსტიკური მახასიათებლების ექსპერიმენტული კვლევა ტექნიკურ მდგომარეობათა დიაგნოსტიკის მიზნით. არჩეული იქნა გაზომვის წერტილი სამონტაჟო მოედანზე 1 მ მანძილზე როტორის ლილვიდან ტურბინის მახლობლობაში, როგორც ქვემოთ სურ.4.4-ზე არის ნაჩვენები.



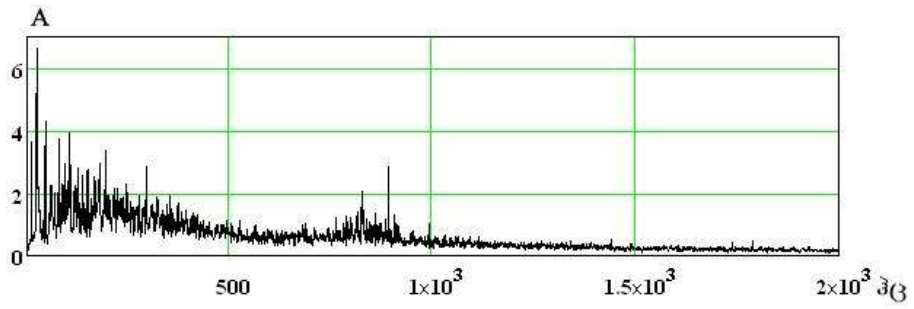
სურ.4.4. ხმაურის გაზომვის წერტილი 1 მ მანძილზე როტორის ლილვიდან ტურბინის მახლობლობაში

ჰიდროაგრეგატის მუშაობის რეჟიმი იყო სტანდარტული და მუშაობდა მხოლოდ ერთი აგრეგატი. გაზომილი იქნა ბგერითი წნევის დონეები დბ C და ბგერის დონე დბ A , სიხშირეთა სტანდარტულ ოქტავურ და ტერც-ოქტავურ დიაპაზონებში. ჩატარებული იქნა ვიწროზოლიანი სპექტრალური ანალიზი ბიჯით 0.637 ჰც მთელ სმენად სიხშირულ დიაპაზონში.

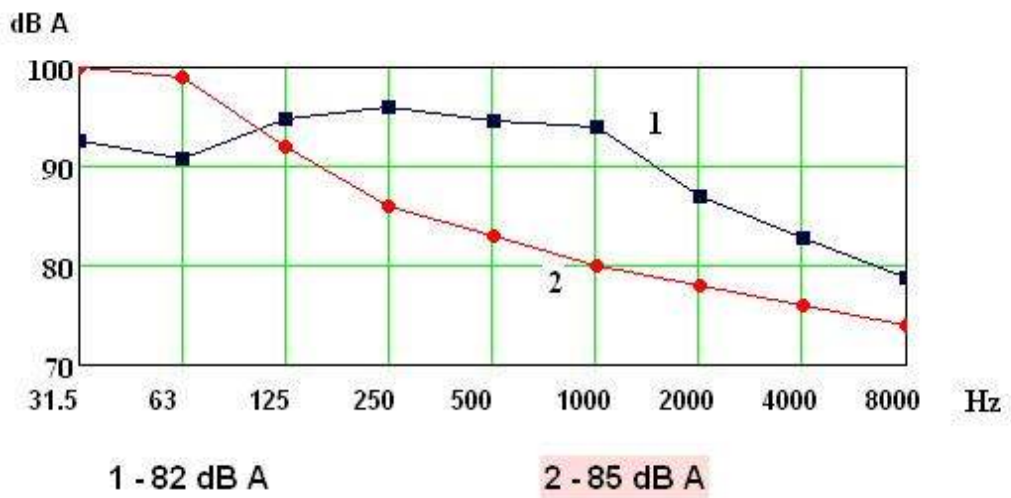
ნახ.4.12-ზე წარმოდგენილია სპექტრალური ანალიზის შედეგები სიხშირეთა სტანდარტულ ოქტავურ და ტერც-ოქტავურ დიაპაზონებში. ნახ.4.13-ზე კი მოცემულია ვიწროზოლიანი სპექტრალური ანალიზის შედეგები (სიხშირეთა 0 – 2000 ჰც დიაპაზონში).



ნახ.4.12. სპექტრალური ანალიზი სიხშირეთა სტანდარტულ ოქტავურ (მარცხნივ) და ტერც-ოქტავურ დიაპაზონებში

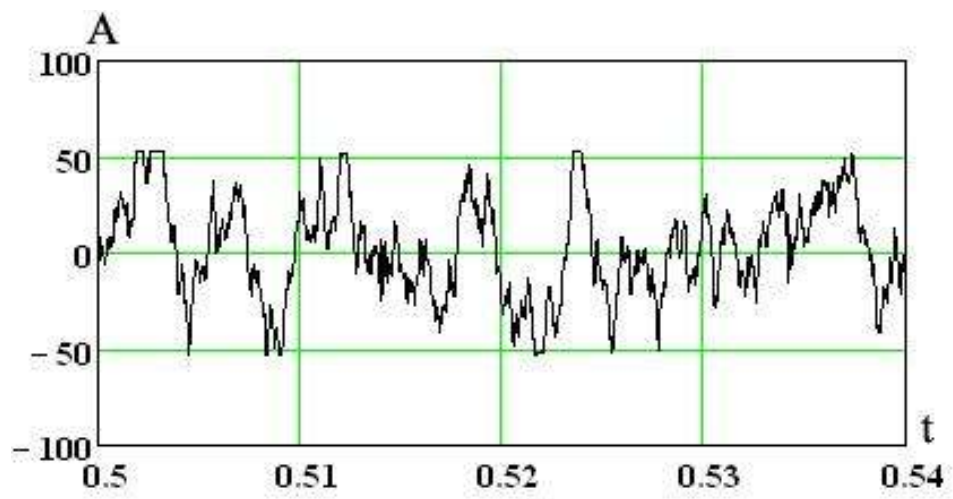


ნახ.4.13. ვიწროზოლიანი სპექტრალური ანალიზი ბიჯით 0.637 ჰც, 0 – 2000 ჰც სიხშირულ დიაპაზონში



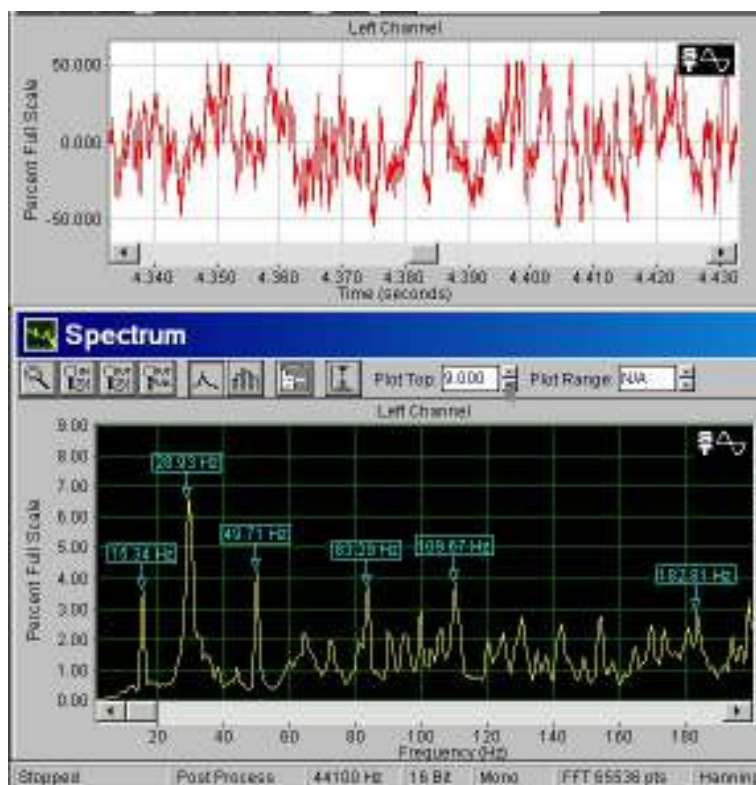
ნახ. 4.14. ხმაურის დონეების შედარება სტანდარტულ დასაშვებ სიდიდეებთან

ნახ. 4.15 -ზე ნაჩვენებია გაზომილი ხმაურის სიგნალის ფორმა.



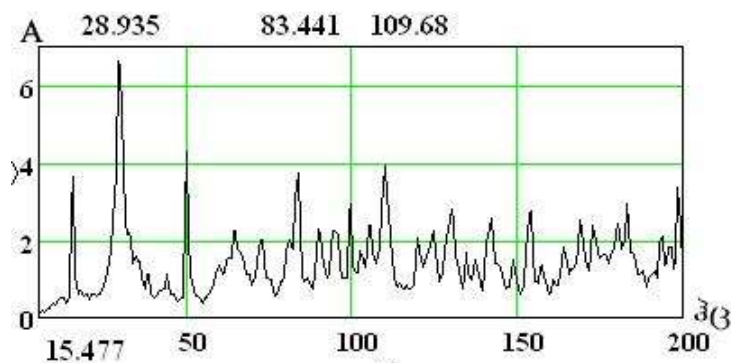
ნახ. 4.15. გაზომილი ხმაურის სიგნალის ფორმა

ზემოთ წარმოდგენილი სპექტრალური ანალიზი და გრაფიკები შესრულებულია MathCad-ში. ანალოგიური ანალიზი და გრაფიკები შესრულებული იქნა სპეციალური, ციფრული სპექტრალური ანალიზატორით SpectraLab-ით, რომლის შედეგები წარმოდგენილია ნახ.4.16-ზე.



ნახ.4.16. გაზომვის შედეგები შესრულებული სპეციალური, ციფრული სპექტრალური ანალიზატორით SpectraLab-ით

სიგნალი არის ფართესიხშირულ-ზოლიანი შემთხვევითი ხმაურის სიგნალი. რადგან ჰიდროაგრეგატი არის დაბალი ბრუნვის - 115.5 ბრ./წუთში ანუ 1,923 ჰც. ეს ძალიან დაბალი სიხშირეა ადამიანის სმენადობისთვის. ისმის მხოლოდ ამ ბრუნვების მაღალი ჰარმონიკები, რომელთა დონეები დაბალია. ტურბინის ფრთების (4 ფრთა) ძირითადი ჰარმონიკაა 7.68 ჰც. ვიწროზოლიან სპექტრში არის ამ წყაროს მე-2 ჰარმონიკა 15.477 ჰც - იგი შედარებით მაღალია (ნახ.4.17).



ნახ.4.17. ვიწროზოლიანი სპექტრალური ანალიზი ბიჯით 0.637 ჰც,
0 – 200 ჰც სიხშირულ დიაპაზონში

ვიწროზოლიან FFT-ანალიზმა გამოყო სიგნალში შემდეგი მაქსიმუმები ქვემოთ მოცემულ სიხშირეებზე.

Hz	dB
28.9	15.1
49.8	23.3
109.7	25.6
83.4	26.7
15.5	27.4
198.5	30

ეს ჰარმონიკები არიან ის ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკური ნიშნები, რომლებზეც უნდა იქნას მიქცეული ყურადღება, პირველ რიგში, მონიტორინგის ეტაპზე და რომლებიც განსაზღვრავენ ჰიდროენერგოაგრეგატის ტექნიკურ მდგომარეობას მთლიანობაში. დიდი მნიშვნელობა აქვს აგრეთვე ვიბროაკუსტიკური სიგნალის მაღალსიხშირული რხევების სწორი ინფორმაციული დიაპაზონის ფილტრაციას, მისი მომვლების პოვნას ჰილბერტის გარდაქმნით და ამ მომვლების სპექტრალური ანალიზის ჩატარებას დაბალსიხშირული მდგენელების გამოსაყოფად. აკუსტიკურ მახასიათებლებში შედიან აგრეთვე მნიშვნელოვანი პარამეტრები ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკისათვის - აკუსტიკური სიგნალის საშუალო კვადრატული მნიშვნელობა RMS, რომელიც აკუსტიკური სიმძლავრის პროპორციულია და ახასიათებს ხმაურის წყაროს მთლიანობაში, და CrestFactor-ი, რომელიც

წარმოადგენს სიგნალის მაქსიმუმის RMS-თან ფარდობას და მიაწინებს შესაძლო დარტყმებზე რხევით სისტემაში.

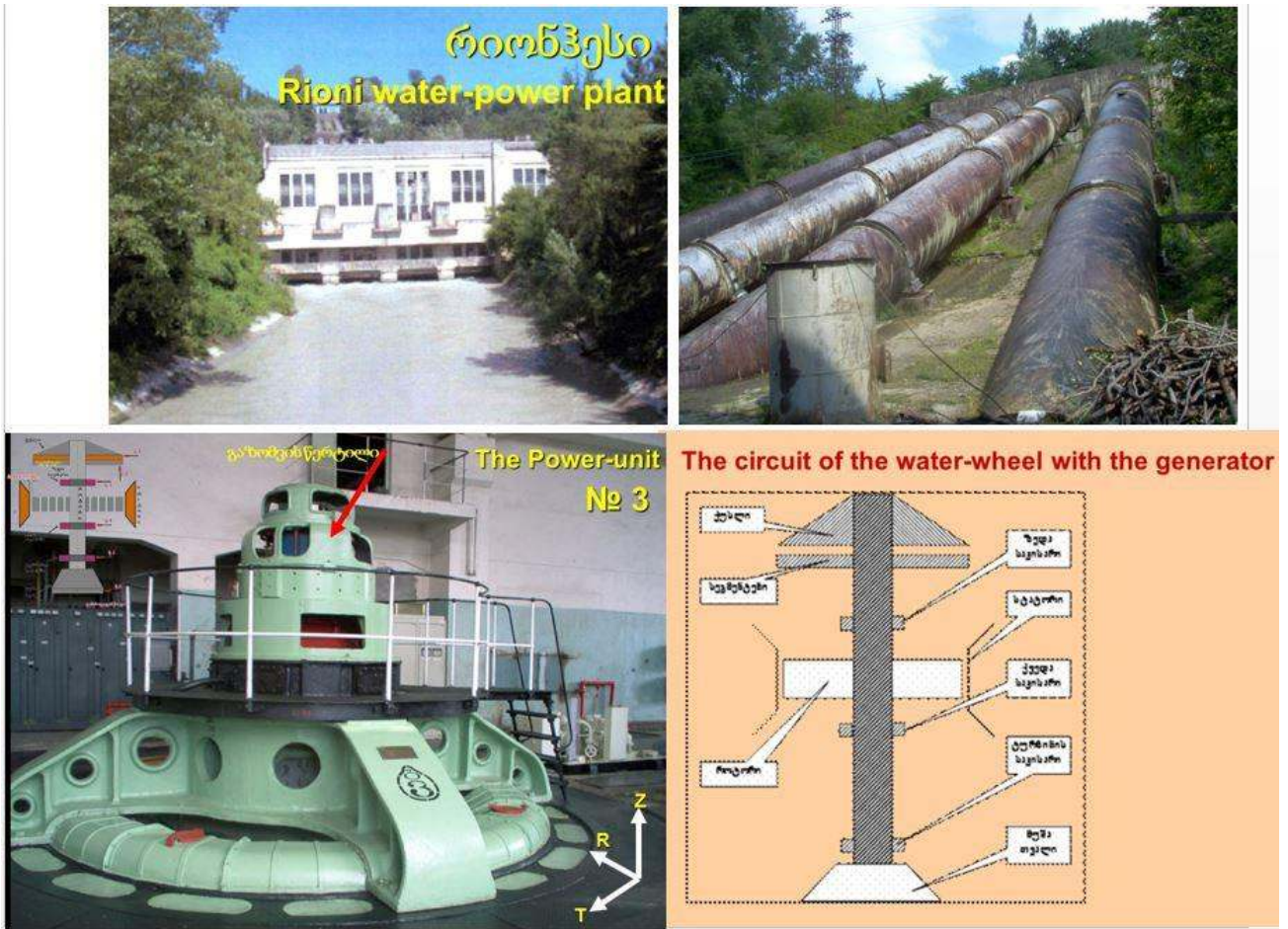
$$\text{RMS} := \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} [(\text{RTS}^{<1>})_i]^2} \quad \text{RMS} = 23.807$$

$$\text{CrestFactor} := \frac{\max(\text{RTS}^{<1>})}{\text{RMS}} \quad \text{CrestFactor} = 2.257$$

ზემოთ მოყვანილი ვიბროაკუსტიკური სიგნალის მახასიათებლები წარმოადგენენ დიაგნოსტიკურ ნიშნებს და მათი უწყვეტი მონიტორინგი იძლევა ჰიდროენერგოაგრეგატის ტექნიკურ მდგომარეობათა მონიტორინგისა და სრულფასოვან დიაგნოსტიკის შესაძლებლობას.

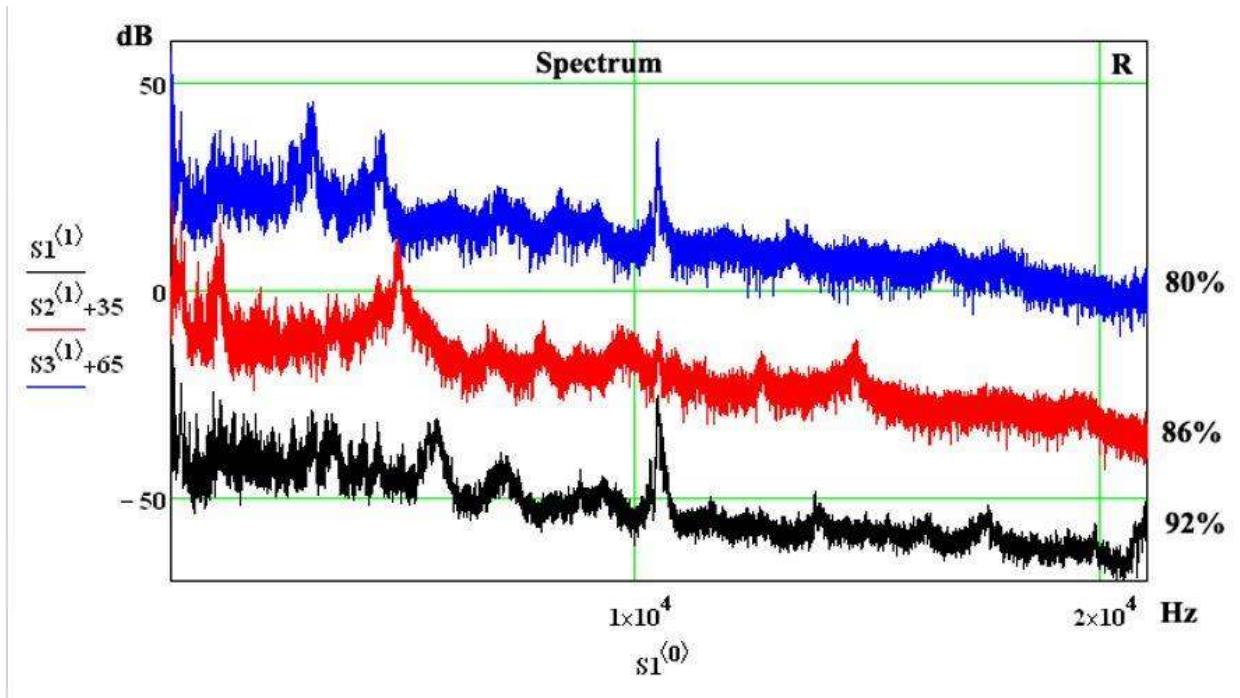
4.5.რიონჰესის მესამე აგრეგატის ვიბრაციული მახასიათებლების ექსპერიმენტული კვლევა

ქვემოთ წარმოდგენილია რიონჰეს-ის მე-3 აგრეგატის ვიბრაციული მახასიათებლები მე-4 წერტილში („კომბინატორი“) აგრეგატის მუშაობის სტანდარტულ რეჟიმში.



სურ. 4.5. რიონჰესის ჰიდროენერგოაგრეგატი

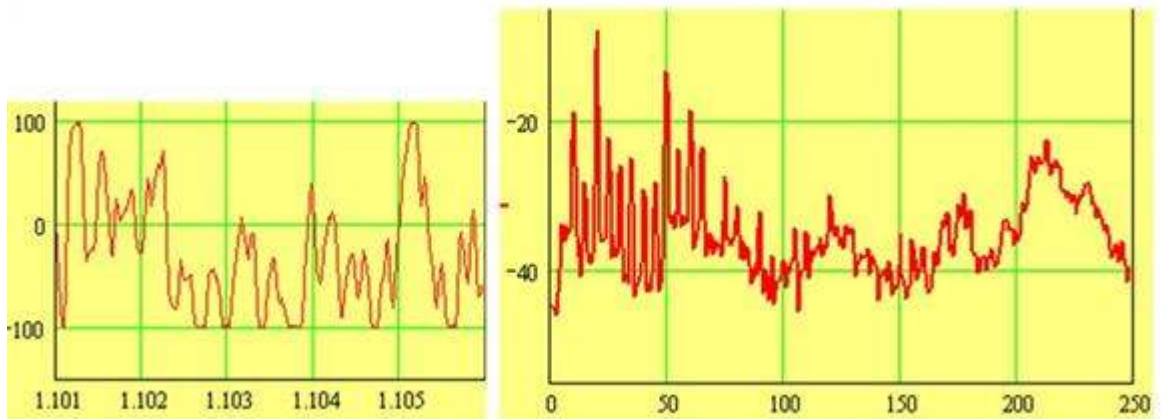
ქვემოთ წარმოდგენილია (ნახ.4.18) სპექტრალური შემადგენლობა ბგერით დიაპაზონში 0 – 21 კჰც სხვადასხვა დატვირთების დროს რიონჰეს-ის მე-3 აგრეგატზე მე-4 წერტილში გაზომილი ვიბროაჩქარების სრული დიალური მიმართულებით.



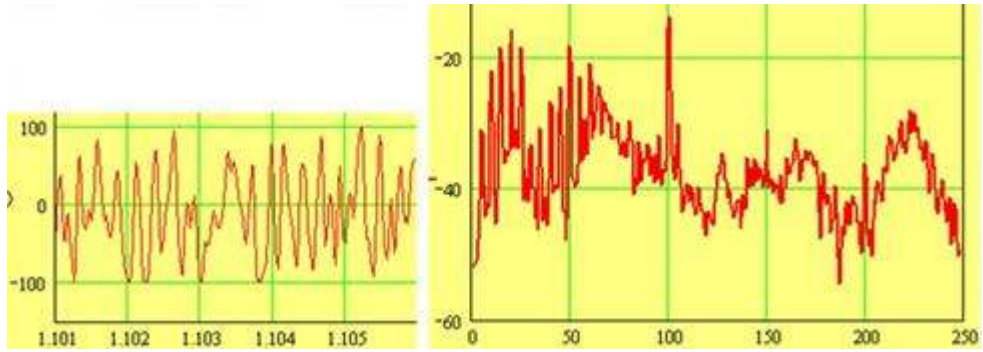
ნახ.4.18. სიგნალის სპექტრალური შემადგენლობა ბგერით დიაპაზონში

წყლის დაწნევა 92 % არის $P = 12$ მგვტ. წყლის დაწნევის შემცირება 6 %-ით იწვევს სიმძლავრის შემცირებას 1 მგვტ-ით, ანუ 86 % წყლის დაწნევა არის $P=11$ მგვტ.

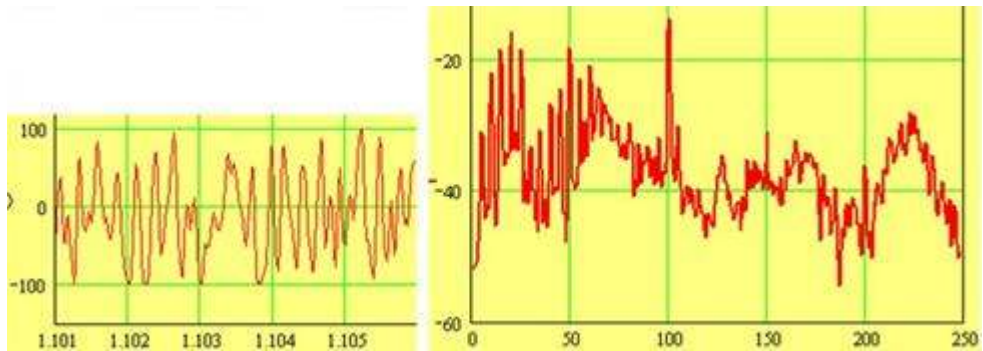
ქვემოთ წარმოდგენილია გაზომვების შედეგები სხვადასხვა სიხშირულ დიაპაზონებში ვერტიკალური, ტანგენციური და რადიალური მიმართულებით.



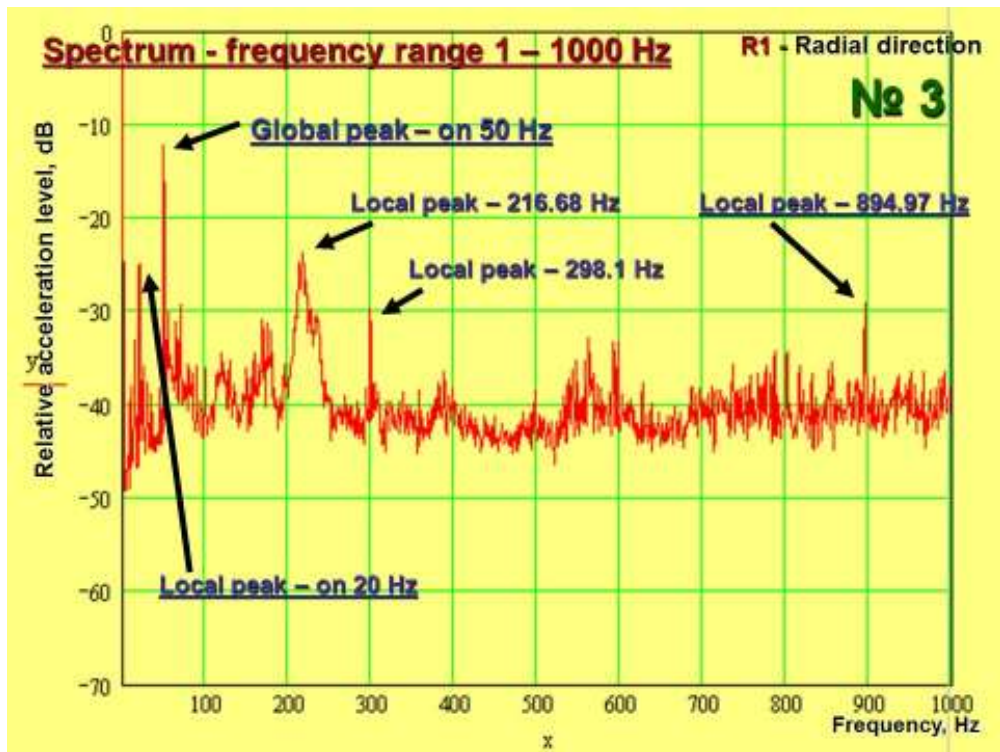
ნახ. 4.19. რადიალური მიმართულებით გაზომილი ვიბრაციის სიხშირული დიაპაზონები



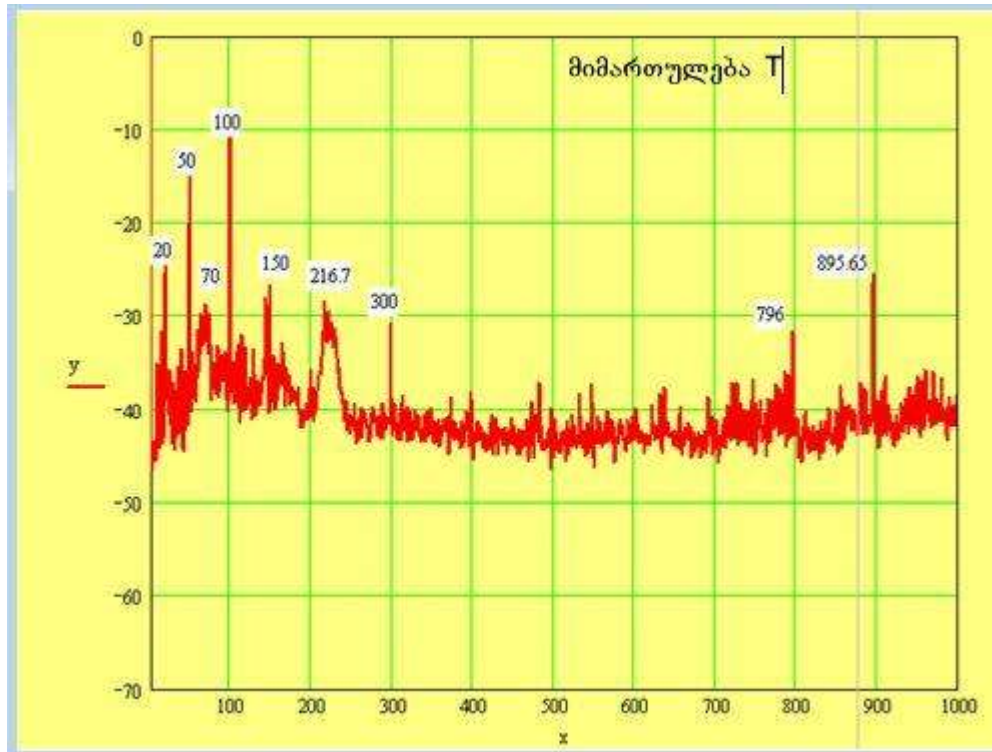
ნახ.4.20. ტანგენციური მიმართულებით გაზომილი ვიბრაციის სიხშირული დიაპაზონები



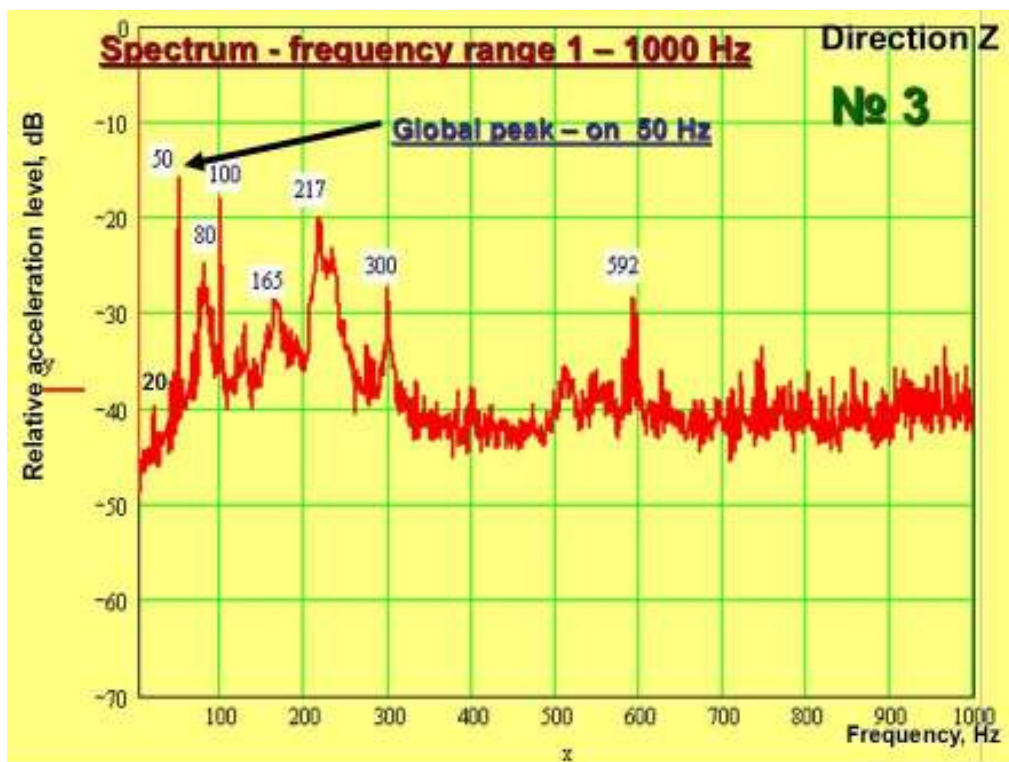
ნახ.4.21. ვერტიკალური მიმართულებით გაზომილი ვიბრაციის სიხშირული დიაპაზონები



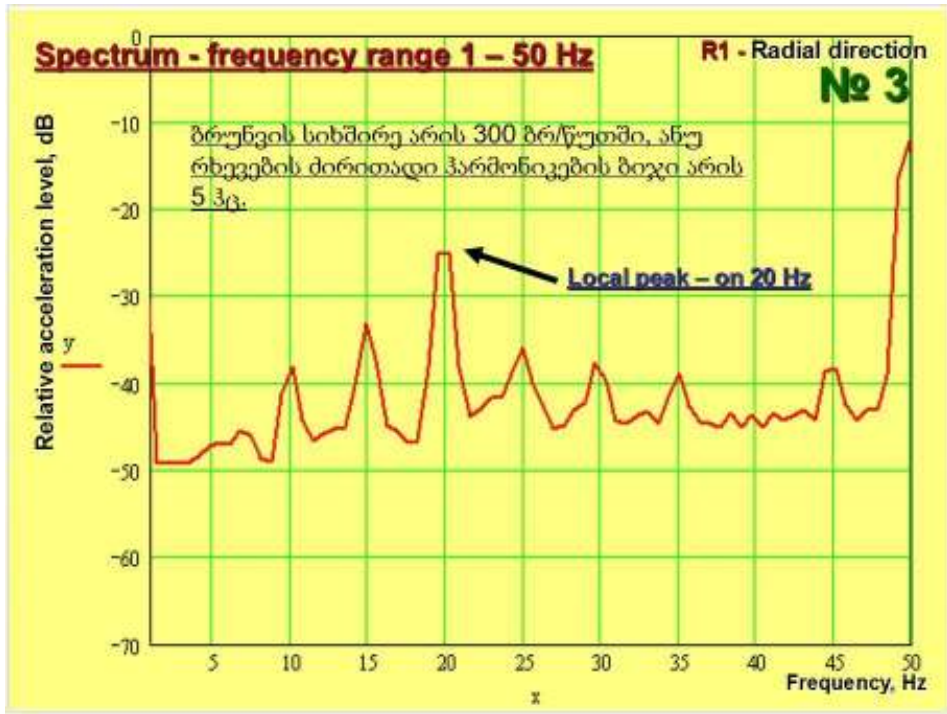
ნახ.4.22. რადიალური მიმართულებით გაზომილი ვიბრაციის სიხშირის სპექტრი 1-1000ჰც
სიხშირულ დიაპაზონში



ნახ.4.23. ტანგენციური მიმართულებით გაზომილი ვიბრაციის სიხშირის სპექტრი 1-1000ჰც სიხშირულ დიაპაზონში



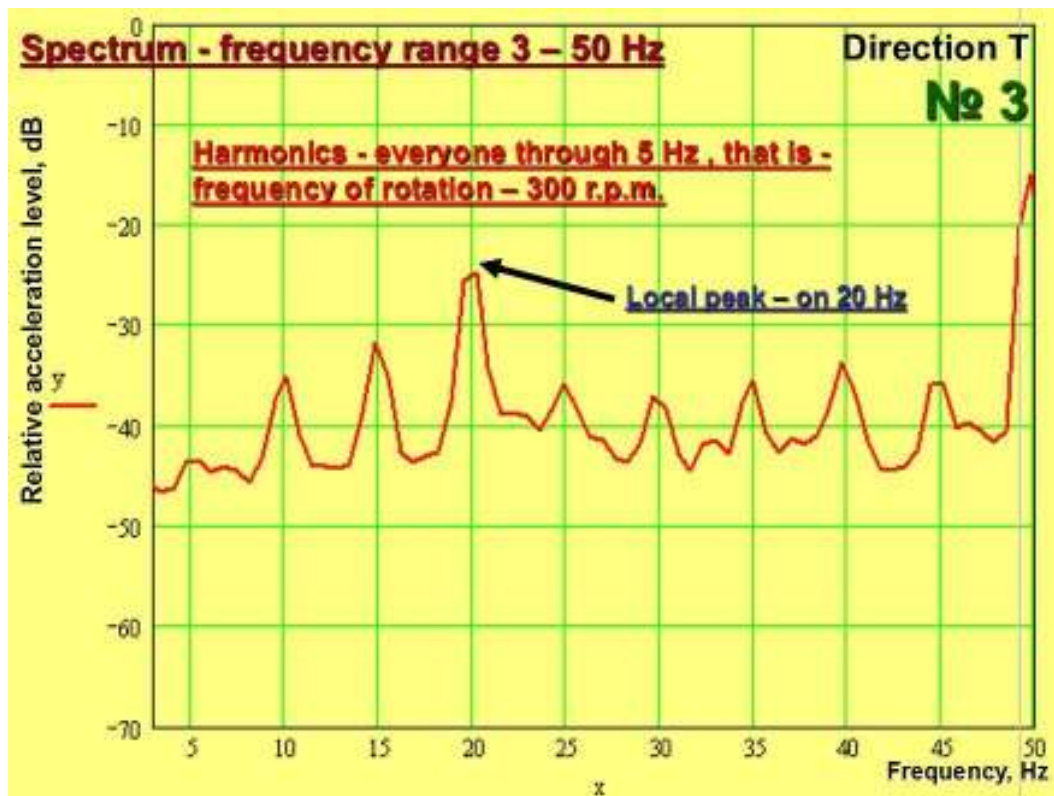
ნახ.4.24. ვერტიკალური მიმართულებით გაზომილი ვიბრაციის სიხშირის სპექტრი 1-1000ჰც სიხშირულ დიაპაზონში



ნახ. 4.25. რადიალური მიმართულებით გაზომილი ვიბრაციის სპექტრის სიხშირული დიაპაზონი 5-50 ჰც



ნახ. 4.26. ტანგენციური მიმართულებით გაზომილი ვიბრაციის სპექტრის სიხშირული დიაპაზონი 5-50 ჰც



ნახ. 4.27. ვერტიკალური მიმართულებით გაზომილი ვიბრაციის სპექტრის სიხშირული დიაპაზონი 5-50 ჰც

ნახაზებზე დატანილია გაზომვების მიმართულება, სიხშირეების დიაპაზონები და მათი ცალკეული მნიშვნელობები. ეს გრაფიკები აგებულია MathCad-ის მეშვეობით. ნათლად სჩანს ვიბრაციული სიგნალების პერიოდულობა ბრუნვის სიხშირის გამეორებით.

როიონჰეს-ის წინასწარი პირველადი ვიბრაციების სიგნალების ანალიზის საფუძველზე შესაძლებელია დავასკვნათ რომ:

- რხევები სამივე მიმართულებით დაბალსიხშირულ დიაპაზონში არის ჰარმონიული, ბიჯით 5ჰც.
- ძირითადი ჰარმონიკა არის 50 ჰერცი რადიალური და ვერტიკალური მიმართულებით და 100 ჰერცი ტანგენციური მიმართულებით, რადგან გაზომვები წარმოებდა გენერატორის მახლობლობაში ჭარბობს ელექტრომაგნიტური ძალებით გამოწვეული ვიბრაციები.
- სპექტრში არის ცალკეული მდგენელები რომელთა წარმოშობის მიზეზები უნდა დადგინდეს კონსტრუქციის ანალიზით.

- საჭიროა შესაძლო დეფექტების და მათი სიმპტომების დადგენა შემდგომი ექსპერიმენტებისა და შესაბამისი სტატისტიკის დაგროვების გზით.
- სპექტრალური ტერცოქტავური ან ოქტავური ანალიზის შედეგები შესაბამისი გრაფიკების სახით სრულიად საკმარისი იქნება აგრეგატის ტექნიკური მდგომარეობის შესაფასებლად, რაც ოპერატიულად და ნათლად გამოავლენს ჩასახული დეფექტის შესაძლო მომენტს.
- საჭიროა ექსპერიმენტებისა და შედეგების ანალიზის ინტენსიური გაგრძელება.

დასკვნები

1. MathCad-ში შემუშავდა ჰიდროენერგოაგრეგატების ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკისა და მონიტორინგის უნივერსალური პროგრამა, რომელიც იძლევა ადებული ვიბრაციული სიგნალების ანალიზის, მათი ერთმანეთთან შედარებისა და დასკვნების გაკეთების საშუალებას.

2. გაზომვების მომენტისათვის აგრეგატების ვიბრაციულ მახასიათებლებში მცირე უმნიშვნელო გადახრების გარდა, რამდენადაც შესაძლებელია ვიმსჯელოთ ერთჯერადი გაზომვების მიხედვით, სისტემაში არ იყო მნიშვნელოვანი ჩასახული დეფექტები, მუშაუნარიანობის დარღვევა და აგრეგატები იმყოფებოდნენ დამაკმაყოფილებელ ტექნიკურ მდგომარეობაში. ეს ტექნიკური მდგომარეობები გარკვეული უტყუარობით შესაძლებელია მიჩნეული იქნან როგორც საწყისი (ეტალონური) და მომავალში შესაძლო გადახრები და დეფექტები შედარებულ იქნას ამ საწყის მდგომარეობასთან.

3. არასაკმარისი შეზეთვის შემთხვევაში ჩასახული დეფექტების გამოსამჟღავნებლად საჭიროა ვაკონტროლოთ დარტყმითი იმპულსების გამოჩენა კრესტ-ფაქტორის სიდიდის მიხედვით. შემდეგ საჭიროა ამ სიდიდის გაზომვის შედეგების შედარება მაღალსიხშირული ვიბრაციების შემომვლელის სპექტრის მონაცემებთან, რათა განისაზღვროს არაპერიოდული დარტყმითი იმპულსების გამოჩენა შეზეთვის დეფექტების გამო.

4. საჭიროა საკისრის და მთლიანი მანქანის დაბალსიხშირული ვიბრაციული ენერჯის კონტროლი, რადგან საკისრის წინაავარიულმა ტექნიკურმა მდგომარეობამ შესაძლოა შემთხვევითი სახით იმოქმედოს სხვა კვანძების ვიბრაციის დონეებზე ვიბრაციის ჰარმონიული მდგენელების მნიშვნელოვანი ზრდის გარეშე. უნდა გაიზომოს უფრო მეტად ვიბროაჩქარება.

5. საჭიროა მანქანის ვიბრაციების ცალკეული ჰარმონიული მდგენელების დონეების კონტროლი დაბალ და საშუალო სიხშირეებზე. რამოდენიმე ძლიერი დეფექტის ერთდროულად საკისარში დაგროვებისას შეიძლება მკვეთრად გაიზარდოს ვიბრაცია წინასწარ უცნობ კომბინაციურ სიხშირეებზე იმის და მხედვით, თუ როგორია დეფექტების კონკრეტული თანაფარდობა და სივრცითი განლაგება.

6. ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის აღნიშნული მეთოდის გამოყენება შესაძლებელია არა მხოლოდ ჰიდროენერგოაგრეგატების შემთხვევაში, არამედ ტექნიკის ნებისმიერ დარგში შესაბამისი ცვლილებებით.

7. დამუშავებული კომპიუტერული პროგრამა მზადაა დანერგილი იქნას როგორც ვარციხე ჰეს-ზე, ასევე საქართველოს ნებისმიერ ჰიდროელექტროსადგურში.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Балицкий Ф.Я., Иванова М.А., Соколова А.Г., Хомяков. Е.И. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов.–Москов,1984 стр -119.
2. Барков А.В., Баркова Н.А., ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ МАШИН ПО ВИБРАЦИИ-Петербург, 2002 стр 30-35.
3. Барков А.В., Якобсон П.П. КОРПОРАТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ.- Санкт-Петербург,2010 стр 20-42
4. Барков А.В. НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ МАШИН. Петербург, 2002 .
5. Баркова Н.А. современные состояние виброакустической диагностики машин. - Петербург, 2002.
6. Digital Sound Level Meter – RadioShack, Owner’s Manual. Tandy Corporation.
7. Дьяконов В.П., Энциклопедия MathCad 2001i и MathCad 11. СОЛОН-Пресс, 2004. стр832.
8. Дьяконов В.П. Энциклопедия MMathcad 2001 иMMathcad2011. – М. СОЛОН-Пресс, 2004. – 832.
9. Исаков В.М. Федорович М.А. Виброшумозащита в электромашиностроении . Л.: Энергоатомиздат. - Ленинградское отделение 1986, стр 208 .
10. კოპალიანი ნ., კოპალიანი დ. სიგნალების მიღება ბგერითი ფაილებისაგან Mathcad-ის სისტემაში საერთაშორისო კონფერენცია მექანიკის არაკლასიკური ამოცანები ქუთაისი, 2007 გვ 109-113.
11. კოპალიანი ნ., კოპალიანი დ. ხელოვნური ინტელექტის სისტემების დამუშავება ვიბროაკუსტიკური სისტემების მიზნებისათვის - პერიოდული სამეცნიერო ჟურნალინოვაცია. - ქუთაისი №1, 2007, 22-31 გვ.
12. კოპალიანი ნ., გიორხელიძე ნ. - მანქანათა ტექნიკურ მდგომარეობათა ვიბროაკუსტიკური მდგომარეობის ამოცანათა რეალიზაცია Mathcad - ის სისტემაში. - პერიოდული სამეცნიერო ჟურნალი ნოვაცია. - ქუთაისი, 2011 გვ 86-92.
13. კოპალიანი მ., შაუთიძე ო., გორგოძე გ. – მაღალსიხშირული ვიბრაციული სიგნალების შემომვლელის სპექტრალური ანალიზის გამოყენება ჰიდრო ენერგოაგრეგატების ტექნიკურ მდგომარეობათა ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის მიზნებისათვის - საერთაშორისო სამეცნიერო მეთოდური კონფერენცია ენერგეტიკა რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები, - ქუთაისი, 2010 გვ.20-24.

14. კოპალიანი ნ., გიორხელიძე ნ., შაუთიშე ო., ყაველაშვილი ა. - ვარციხე ჰეს-ის ჰიდრო ენერგოაგრეგატების ვიბრაციული მახასიათებლების ექსპერიმენტული კვლევა. მეორე საერთაშორისო სამეცნიერო მეთოდური კონფერენცია „ენერგეტიკა რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები. - ქუთაისი 2013 გვ.25-26.

15. კოპალიანი ნ., ზივზივაძე ო., ძაძამია დ. - ძალოვანი ტრანსფორმატორის აკუსტიკური მახასიათებლების ექსპერიმენტული კვლევა მაღალი ძაბვის ქვესადგურში. მესამე საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, ენერგეტიკა: რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები. - ქუთაისი 2015, გვ. 75-78.

16. კოპალიანი ნ., ძაძამია დ., გოგისვანიძე ვ. - ენერგეტიკული მანქანების ტექნიკურ მდგომარეობათა ა ცვლილებების ტრენდისა და პროგნოზის განსაზღვრა ტექნიკური დიაგნოსტიკის ამოცანებში. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. მდგრადი ენერგეტიკა გამოწვევები და განვითარების პერსპექტივები. - ქუთაისი 2015, გვ. 32-36.

17. კოპალიანი ნ., ფილია რ., ძაძამია დ., გოგისვანიძე ვ. - მათემატიკური მოდელირებით ხატვისა და ბგერების შექმნის შესაძლებლობები Mathcad-ის გარემოში. პერიოდული სამეცნიერო ჟურნალი ნოვაცია, №15, - ქუთაისი 2015. გვ. 56-61.

18. კოპალიანი ნ., ზივზივაძე ო., ძაძამია დ. - ჰიდროენერგოაგრეგატების ტექნიკურ მდგომარეობათა ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის ამოცანის რეალიზაცია Mathcad-ის სისტემაში. პერიოდული სამეცნიერო ჟურნალი ნოვაცია №15, - ქუთაისი 2015, გვ. 232-238.

19. კოპალიანი ნ., ძაძამია დ., ფურცელაძე ი. - ჰიდრო ენერგოაგრეგატის აკუსტიკური მახასიათებლების ექსპერიმენტული კვლევა ტექნიკურ მდგომარეობათა დიაგნოსტიკის მიზნით. აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მოამბე №1(7)- ქუთაისი 2016, გვ.76-86.

20. კოპალიანი ნ., შაუთიძე ო. - ჰიდროენერგოაგრეგატების დინამიკის ზოგიერთი საკითხები საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, ენერგეტიკა რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები. - ქუთაისი 2013, გვ.53-56.

21. Kopaliani N., Kopaliani D. - The digital analyzer for vibro acoustical diagnostics of technical conditions of machines in MathCad. International Scientific Journal Georgian Scientific News №3 (7). - Kutaisi, 2010, p. 26-31.

22. Кирьянов Д.В. MathCad 12.-Петербург, 2005 с -576.

23. Mathcad, version 14.0.0.163. Help. - Parametric Technology Corporation, 2007.

24. Макаров Е. Инженерные расчеты в MathCad 14.- Питер, 2007 стр 592.

25. Norton N.P. - Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers. Melbourne Australia: Cambridge University Press, 1999.

26. www.vibrotek.com

27. www.bksv.com
28. www.gemeasurement.com/condition-monitoring-and-protection
29. www.vibro-meter.com
30. www.vibro-expert.ru/
31. www.bkvibro.com/en.html
32. www.machinediagnostics.com
33. www.vibration.ru/osn_vibracii.shtml
34. www.vibroac.ru/firstreduction.htm
35. www.vibro-expert.ru/predlojeniya-vast-dlya-diagnosticheskogo-obslujvaniya-oborudovaniya.html
36. www.sshges.rushydro.ru/
37. www.pruftechnik.com/
38. www.oneprod.acoemgroup.com/
39. www.diem1.ing.unibo.it/mechmach/rivola/pub08.pdf
40. www.hindawi.com/journals/sv/si/520707/cfp/
41. www.tofd-pa.ru/obuchenie-specialistov/vibrodiagnosticheskij-metod-nerazrushayushhego-kon
42. www.mathcadhelp.com/
43. www.forum-msk.org/material/region/10588803.html
44. www.bibliofond.ru/
45. www.noiseexpert.com/
46. www.acoustical-consultants.com/
47. www.vibrocenter.ru/cm4.htm