

საქართველოს განათლებისა და მეცნიერების სამინისტრო
აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
საინჟინრო-ტექნიკური ფაკულტეტი

ხელნაწერის უფლებით

დავით ძაძამია

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

ელექტროენერგეტიკაში ინჟინერიის (0405) დოქტორის აკადემიური ხარისხის
მოსაპოვებლად წარმოდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

ქუთაისი 2017 წელი

ნაშრომი შესრულდა აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტში

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი პროფესორი ნოშრევან
კოპალიანი

რეცენზენტები : პროფესორი ომარ კიკვიძე

ასოცირებული პროფესორი ბადრი ზივზივაძე

დისერტაციის დაცვა შედგება _____

საინჟინრო-ტექნიკური ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს მიერ შექმნილ
სადისერტაციო კომისიის სხდომაზე. მისამართი: 4600. ქუთაისი. ახალგაზრდობის
გამზირი 98, VII კორპუსი აუდ. №101.

დისერტაციის გაცნობა შესაძლებელია აკაკი წერეთლის სახელმწიფო
უნივერსიტეტის ბიბლიოთეკაში მისამართზე: 4600. ქუთაისი. თამარ მეფის ქ. 59.

ავტორეფერატი დაიგზავნა “_____” _____

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი _____ /ნ. სახანბერიძე/

სამუშაოს ზოგადი დახასიათება

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 ჰიდროენერგოაგრეგატებში 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 ჰიდროენერგოაგრეგატების ვიბრაციის ელემენტების სპექტრალურ მახასიათებლებს მის კონსტრუქციულ პარამეტრებთან და მათი ცვეთის 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, ჰიდროენერგოაგრეგატების ვიბრაციების სპექტრში ინფორმაციული სიხშირეების გამოვლენის მეთოდები და მათი ინფორმატიულობის შეფასება.

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

4. ჰიდროენერგოაგრეგატების ელექტრომექანიკური სისტემის ტექნიკურ მდგომარეობათა დიაგნოსტიკის მეთოდიკა 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 მვირად 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, შესავლისაგან, 4 თავისაგან, დასკვნებისაგან და გამოყენებული ლიტერატურის 47 ჩამონათვალისაგან.

სადისერტაციო ნაშრომის შინაარსი

შესავალში დასაბუთებულია თემის აქტუალობა, კვლევის მიზნები, ამოცანები და მეთოდები. ნაჩვენებია სამუშაოს მეცნიერული სიახლე და პრაქტიკული ღირებულება.

პირველი თავი ეძღვნება ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის ზოგად მიმოხილვას. წარმოდგენილია ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის წარმოშობისა და განვითარების ეტაპები, განხილულია ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის სხვადასხვა სისტემები.

მეორე თავი მოიცავს თეორიულ კვლევას, რომლის მიხედვითაც შესწავლილია თუ როგორ ხდება: ვიბროაკუსტიკური დიაგნოსტიკის ამოცანის დასმა და გადაწყვეტა.

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.

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.

ასევე შესწავლილია ჰიდრო ენერგოაგრეგატების ტექნიკური მდგომარეობის ამოცნობის ალგორითმის აღწერა.

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:

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

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

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

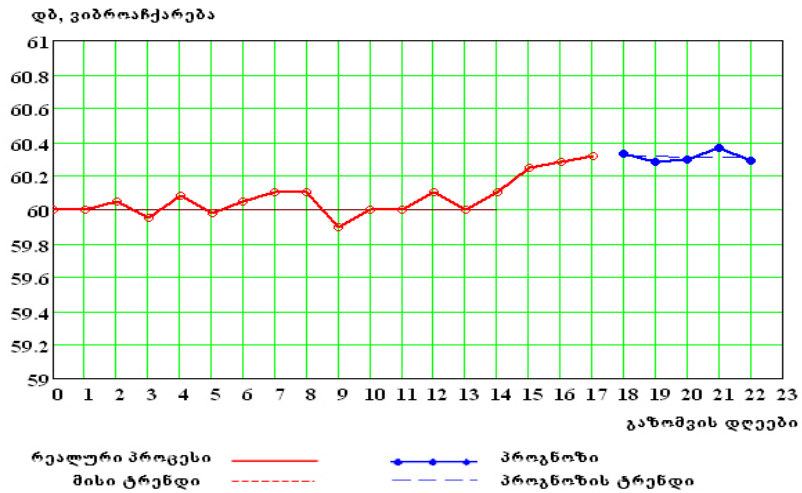
ენერგეტიკული მანქანების ტექნიკურ მდგომარეობათა ცვლილებების ტრენდისა და პროგნოზის განსაზღვრის მეთოდი ტექნიკური დიაგნოსტიკის ამოცანებში.

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.

Mathcad-ში არის ფუნქციები: `detrend` და `predict` ცვლილებათა ტრენდის განსაზღვრისათვის და ცვლილებათა პროგნოზისათვის (ბურგის ფუნქცია, დაფუძნებული ავტორეგრესიულ მეთოდზე), რომლებიც კარგ პრაქტიკულ შედეგებს იძლევიან.

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 პროგნოზისათვის მაღალი სიზუსტით.

გამოვიყენოთ ეს მეთოდი ჰიდროენერგოაგრეგატის ტურბინის საკისრის ვიბრაციის ჯამური დონის (დბ) ტრენდისა და ცვლილებათა მოსალოდნელი პროგნოზისათვის, როგორც ეს ნახ.1-დან ჩანს.



ნახ.1. ტექნიკურ მდგომარეობათა ტრენდისა და პროგნოზის განსაზღვრის მაგალითი

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

ასევე განხილულია ჰიდროენერგოაგრეგატების ეტალონური ვიბროაკუსტიკური მახასიათებლები ექსპლუატაციის პროცესში და მათი ანალიზი. ჰიდროელექტროსადგურების მრავალწლიანი ექსპლუატაციის პრაქტიკა მომსახურე პერსონალს ხმაურისა და ვიბრაციების ცვლილებით ნათლად უჩვენებს რაღაც ცვლილებზე 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. აგრეთვეГОСТ 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, ჩვენს კვლევებში ვთლიდით დასაშვებ სიდიდედ ფარდობითი სკალით 6 დბ, ანუ თუ ვიბრაციები იზრდებოდა ორჯერ, მაშინ მოსალოდნელი იყო დეფექტის გამოვლენა.

მესამე თავი მთლიანად ეძღვნება კომპიუტერულ პროგრამა MathCad-ში შემუშავებულ სპეციალურ დიაგნოსტიკის უნივერსალურ პროგრამას, რომელიც იძლევა აღებული ვიბრაციული სიგნალების ანალიზის, მათი ერთმანეთთან შედარებისა და დასკვნების გაკეთების საშუალებას.

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

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

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

დეფექტი - მექანიკური დეზალანსი

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

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

$$\bar{A}_1 = [A_1(f_{\partial\theta})] \quad f_1 := 53\text{გ} \quad V_1 := 54.5 \quad V_2 := 56$$

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

$$D11 := \begin{cases} \text{There is defect if } \Delta111 > 6 \\ \text{There is defect if } \Delta112 > 6 \\ \text{There is no defect} & \text{otherwise} \\ D11 := \text{There is a defect} \end{cases}$$

მეოთხე თავში მოცემულია ექსპერიმენტების ჩატარების მეთოდის, აღებული ვიბრაციული სიგნალების ფორმები, როგორც რადიალური, ასევე ვერტიკალური და ტანგენციური მიმართულებით ოქტავურ დიაპაზონში და აგრეთვე სიგნალების სპექტრები. ასევე ამ თავში წარმოდგენილია სპეციალური დიაგნოსტიკის პროგრამა და ამ პროგრამის დახმარებით მიღებული შედეგები და ძირითადი დასკვნები.

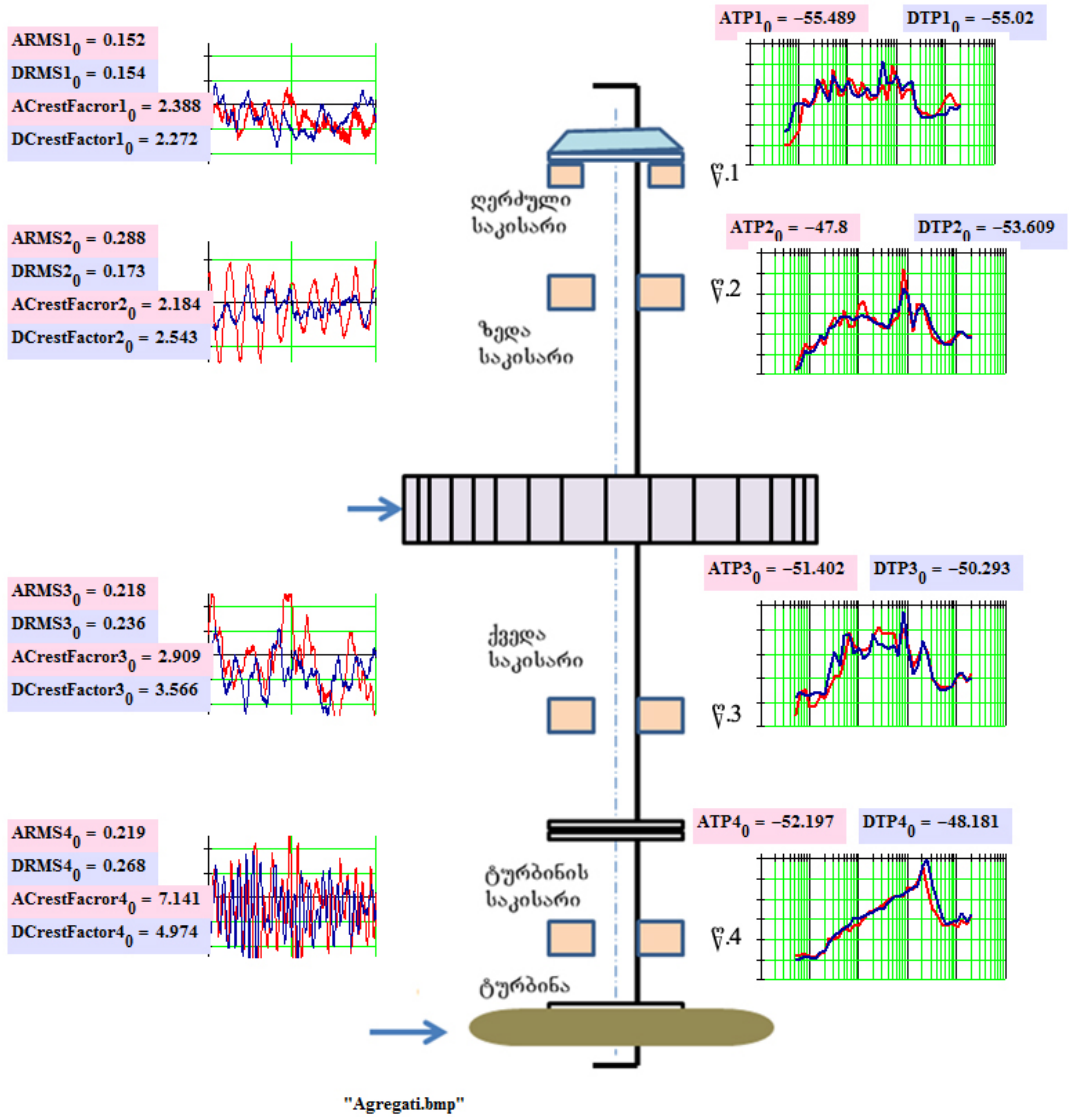
Mathcad-ის გარემოში სპეციალურად შეიქმნა და დამუშავდა კომპიუტერული პროგრამა, რომელიც რამოდენიმე წუთის განმავლობაში პოულობს ყველა ვიბრაციულ პარამეტრს და ადარებს ერთმანეთს, როგორც რამოდენიმე გაზომვების შედეგებს, ასევე თუ საჭიროა ხვადასხვა აგრეგატების გაზომვების შედეგებს.

გაზომვები ჩატარდა სამივე მიმართულებებით აგრეგატების ოთხ ვიბროაქტიურ წერტილში (ვარციხე ჰეს-ზე). ეს წერტილებია - ტურბინა, ქვედა საკისარი, ზედა საკისარი და "კომბინატორი".

განსაზღვრული და გაანალიზებული იქნა მოხსნილი სიგნალების შემდეგი ვიბრაციული მახასიათებლები:

- ვიბროაქტივების სიგნალების ფორმები;
- სიგნალების საშუალოკვადრატული მნიშვნელობები - RMS.

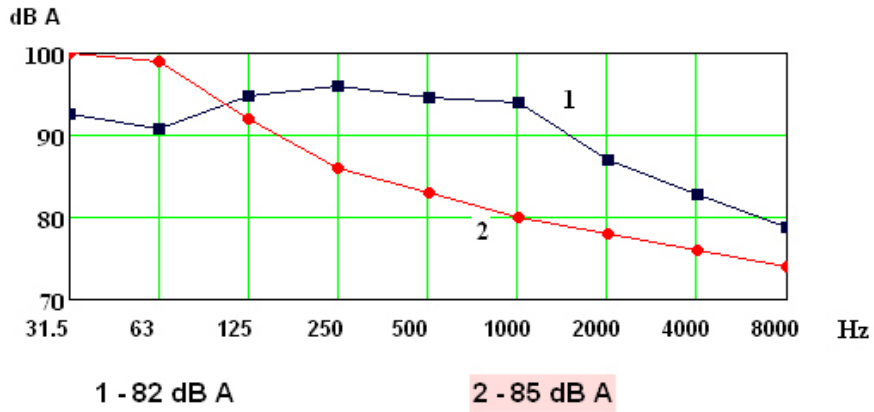
ჩვენს შემთხვევაში, ვარციხე ჰეს-ის აგრეგატებისათვის დამუშავდა და შედარდა 400-მდე გრაფიკი. ვიბრაციული ველების ერთ-ერთი ტიპური გრაფიკი მოყვანილია ქვემოთ ნახ.2-ზე.



ნახ.2. ძველი და ახალი გაზომილი ვიბრაციული ველების სიგნალების შედარება გაზომილი რადიალური მიმართულებით (წითლად აღნიშნულია პირველი გაზომვის შედეგები, ლურჯად მეორე)

ასევე განხილულია - ვარციხე ჰეს-ის ჰიდროენერგოაგრეგატის აკუსტიკური მახასიათებლების ექსპერიმენტული კვლევა ტექნიკურ მდგომარეობათა დიაგნოსტიკის მიზნით.

ჩატარებული იქნა ჰიდროენერგოაგრეგატის აკუსტიკური მახასიათებლების ექსპერიმენტული კვლევა ტექნიკურ მდგომარეობათა დიაგნოსტიკის მიზნით. არჩეული იქნა გაზომვის წერტილი სამონტაჟო მოედანზე 1 მ მანძილზე როტორის ლილვიდან ტურბინის მახლობლობაში.



ნახ.3. ხმაურის დონეების შედარება სტანდარტულ დასაშვებ სიდიდეებთან

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 მიანიშნებს შესაძლო დარტყმებზე რხევით სისტემაში.

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

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

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

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.

ავტორის მიერ დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია 5 სტატია:

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

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

3. 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.

4. 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.

5. 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.

Ministry of Science and Education of Georgia

Akaki Tsereteli State University

Faculty of Technical Engineering

Manuscript copyrights protected

David Dzadzamia

**Development and Introduction of Diagnostic System for Vibroacoustic
Monitoring and Technical Condition of Hydropower-Generating Units of
Vartsikhe HPP**

The Author's Abstract

of the Doctoral Thesis Nominated for Ph Doctor Degree

in Engineering (0405)

Kutaisi 2017

The given work has been executed at the Department of Energy and Telecommunication of Akaki Tsereteli State University

Academic Advisor: Noshrevan Kopaliani, Doctor of Technical Sciences, Professor

Reviewers: Omar Kikvidze, Professor

Badri ZivZivadze, Associate Professor

Defense of a thesis will be held _____

at the session of the Dissertation Commission created by Dissertation Council of the Faculty of Technical Engineering. Address: 98 Akhlagazrdoba Avenue, Auditorium №101, Building VII, 4600. Kutaisi.

Dissertation is available in the library of the Akaki Tsereteli State University at the address: 59 Tamar Mepe Street, 4600, Kutaisi

The Author's Abstract had been sent out, „____“ _____

Dissertation Council

Secretary _____/N. Sakanberidze, Associate Professor

General Description of Work

Topicality of research. There is a lot of medium, large and small hydropower plants in Georgia. So far, none of them has the reliable control systems, particularly the modern systems of vibroacoustic monitoring and diagnostics (there is carried out only the temperature control, at best. The reliability and security aspects are reliant only on the intuition of experienced engineers. The introduction of the vibroacoustic and diagnostic systems will enable us to control any process occurring in hydropower plants and to disclose the defect since the moment of its inception.

Problem statement. Vibration monitoring consists in monitoring of changes in the vibration state of the system, as well as in the analysis of the reasons for these changes. The relevance of vibroacoustic problem and its practical application were caused by the need for the existence of operating control on the technical condition of the machine. Obtaining information about the technical condition of the equipment by means of the control facilities currently existing in various engineering fields, is only possible through its internal monitoring, i.e. it becomes necessary to take it out of operational mode, or to take it down partially, and if this is not sufficient, completely, that would give rise to financial implications. The major objective of vibroacoustic diagnostics is precisely to provide the control of the technical condition of the machine without taking it down as well in its operational mode. Such common methods as temperature control, the quality of lubrication and other ones are no longer needed – they are replaced by the vibration analysis. Vibration diagnostics consists in detecting and identifying defects of the diagnostic mechanical system (by identifying the type and the extent of the defects).

Goal of research. Goal of the dissertation is to develop theoretical and practical bases of vibroacoustic diagnostics and create highly effective methods of diagnostics within such universal mathematical program, as a package MathCad, which provides high level of reliability in response to modern development trends of power equipment.

Objectives of research. To achieve this goal, it is necessary to attain the following objectives:

1. Systematizing methods and means in the field of vibroacoustic diagnostics based on surveys of the world's leading firms, as well as identifying the ways and methodological approaches for improving their quality in developing the technical diagnostics systems.
2. Creating theoretical and methodological framework for the automated system of technical diagnostics on the basis of monitoring vibration processes occurring in the hydropower-generating units.
3. Developing theoretical models, which link spectral characteristics of the vibration elements of hydropower-generating units to their design parameters and allow for determining the technical

conditions. Selecting and justifying diagnostic signs and spaces of signs, which characterize hydropower-generating units, based on mathematical modeling and real experiments.

4. Finding and defining functional relationships (analytical and statistical) between vibroacoustic signals and the technical conditions of the hydropower-generating units.

5. Developing the methodology of diagnosis of the hydropower-generating units, which provide the reliability of the vibration control results and allow for using the actual operating conditions.

Methods of research. When solving the set problems, there have been used the provisions from the theories of machines and mechanisms, dynamics of machines, image discrimination, probability and mathematical statistics. In the experimental studies, there have been used the modern methods of narrowband, octave and tierce-octave analysis (SpectraLab, MathCad). Mathematical processing of experimental data has been performed in Mathcad package.

When developing the diagnostics algorithms, there have been used the methods of the theory of decision-making and image discrimination theory.

The Provisions Brought to Defense:

1. The principles of building the system of vibroacoustic monitoring and technical diagnostics of the hydropower-generating units, which envisage division of information frequencies and assessment of their results, formation of diagnostic signs of vector, assessment of the technical conditions, which is based on the image discrimination theory.

2. The methods for technical assessment of the main vibroacoustic components of the hydropower-generating units, which are based on the total levels of vibroacoustic acceleration, narrowband, octave and tierce-octave analysis, as well as on envelope of high-frequency oscillations, methods for detecting the information frequencies in the vibration spectrum of the hydropower-generating units and assessment of their informational contents.

3. The bases for building the models of diagnostics, which allow for classifying the technical conditions of the hydropower-generating units by means of multi-dimensional diagnostic signs.

4. Methodology for diagnosis, in a Mathcad package, of the technical conditions of the hydropower-generating units' electromechanical system, which allows for establishing the technical conditions and forecasting their development trends during operation.

Novelty of Research. The novelty of this research consists in fact that for the first time ever, there were first formulated the principles of constructing the system of vibroacoustic monitoring and technical conditions of the hydropower-generating units, which include assignment of information frequencies and assessment of their values, formation of diagnostic signs of the vector, construction of tables of defects and symptoms, assessment of the technical conditions, based on the

image discrimination theory. On the basis of this, a new methodology of vibroacoustic diagnosis has been created, which is constructed within such universal mathematical program, as a package MathCad (that is practically free, in contrast to the expensive products of the world's leading firms – economic issues are very important here).

Practical bearing. Data of diagnostic signs and diagnostic models for assessing the technical conditions of the hydropower-generating units, are the methodological bases for the development of instruments of the technical conditions, as well as an important factor of the organization of the repair and maintenance system. Their practical bearing consists in fact that they allow for:

1. Using the developed diagnostic instruments in the processes of their manufacturing, adjusting and monitoring during operation.
2. Performing computer-based modeling and forming diagnostic signs, creating databases, which are the basis for assessing the technical conditions of the elements of the hydropower-generating units, as well as for a statistical analysis of the quality of the running.
3. Introducing the hydropower-generating units' technical maintenance system "by the actual state", which is based on diagnostic control by the vibration characteristics.

Application and implementation of the results of research. The developed models, methodology and technical means complex should be used in the development and introduction of the computer-based diagnosis system of the hydropower-generating units in all hydropower plants throughout Georgia.

The results of the dissertation work will be used in training process at the energy specialties of Akaki Tsereteli State University, in preparing the graduation papers as well as in research works performed by Master and PhD students.

Approbation work. The provisions and results of work of the Thesis topic, have been presented at the international scientific conferences:

1. Energy: Regional Problems and Development Opportunities;
2. Sustainable Energy: Challenges and Development Prospects.

Publications. On the Thesis topic, the author has published 3 articles in the internationally recognized scientific journals.

Volume and Structure of Dissertation. Dissertation comprises 107 printing pages. It includes Introduction part, 4 chapters, conclusions and list of 47 References.

Brief Content of Dissertation.

Introduction dwells on substantiation of the relevance of the topic, goals, objectives and methods of research. Also, novelty of research and its practical bearing are shown.

The first Chapter deals with a general overview of the origins of vibroacoustic diagnostics and stages of its development, as well as describes the different systems of vibroacoustic diagnostics.

The second Chapter describes theoretical research, according to which there have been studied how to: formulate and attain the objective of vibroacoustic diagnostics.

Mathematical link in the mechanical system between the symptoms and measurements can be established in the following way:

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

where f_i is a differential or an algebraic operator. This relationship in the differential form allows us for obtaining the desirable result of vibroacoustic diagnostics only in low-frequency range.

Currently, vibroacoustic diagnostics is carried out by means of the image discrimination theory:

1. It is assumed that the technical object exists in finite set of technical conditions S . From this set of technical conditions, there are extracted two subsets S_1 and S_2 . S_1 is a subset of workable technical conditions and S_2 - a subset of unworkable technical conditions.
2. A subset S_1 implies all those conditions, according to which the object functions correctly, but a subset S_2 implies all those conditions, according to which some defects come out, which impact on the quality of object operation. The transition from one state to another depends on the defects existing inside the object.
3. The technical object diagnostics is brought to the analysis of S_1 and S_2 subsets. When determining working ability of the object, it is subject to assessment and after this assessment, it is addressed to S_1 and S_2 subsets. This followed by detail assessment of the object and it can be moved from one subset to another.
4. The inception of the defect does not necessarily imply that the object is not functional at all. The workable object may also have the defect. If the defect is a large-scale, the object just moves from one state to another, so both the workable and unworkable objects may have the defects, as long as after assessment of the object, it must not move from one subset to another.

Description of the algorithm of identification of technical condition of the of the energy unit is also possible.

The vibroacoustic diagnostics procedure is divided into three parts:

The first stage is to address the general problem of acceptability of the equipment, and with that in mind, the technical condition pertains to subset S_1 or S_2 . Mathematically, this process has the following form:

$$\begin{aligned} \text{if } \bar{X} \leq \bar{X}^\exists + \bar{\delta} \text{ is acceptable} \\ \text{if } \bar{X} > \bar{X}^\exists + \bar{\delta} \text{ is unacceptable,} \end{aligned}$$

where \bar{X} is a vector of the output measuring parameter, \bar{X}^\exists is a vector corresponding with the reference parameter, and $\bar{\delta}$ is permissible deviation from a reference value. If even only one parameter is obtained from a permissible value, the object is considered unworkable and unacceptable, and the objective technical condition moves into the S_2 subset.

The second stage is to address the analysis of technical condition. At this stage, a new coefficient of performance is introduced. To do so, by means of $\bar{\delta}$ there is determined the zone, where the existing technical condition is at this moment in time. Coefficient of performance is $\bar{C} = 0 \div 1$. The higher is performance C , the closer it is to 1. Mathematically, this can be expressed in the following form:

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

where \bar{C} is a coefficient of performance. If $\bar{C} = 0$, the object is unacceptable, if $\bar{C} = 1$, its state is considered reference. If $0 \leq \bar{C} \leq 0,25$, the object has a very high coefficient of performance, if $0,25 < \bar{C} \leq 0,5$, we have a very low performance value, and if $0,5 < \bar{C} \leq 0,75$ – a high performance value, and if $0,75 < \bar{C} \leq 1$ – a very high performance value.

The third stage is to address to which class of technical condition pertains the object in accordance with the existing defects, as to how far its parameters are from a reference one. This is expressed in the following formula:

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

where, \bar{A}_{ik} are the symptoms, which are obtained as a result of developing signal obtained from measuring. A_k^\exists is a reference value, which is placed in the algorithm of diagnostics.

Mathematically, the algorithm of identification has the following form:

$$\begin{aligned} \text{if } D_{ik} \leq \Delta_{ik}^n \text{ - there is a no defect} \\ \text{if } D_{ik} > \Delta_{ik}^n \text{ - there is a defect.} \end{aligned}$$

Here Δ_{ik}^n is a limiting value, and these values have been obtained statistically and experimentally. If the vibration level is doubled, this already points to the existence of the defect.

The method for determining and predicting linear trends of changes in the technical conditions of the energy-converting machinery in the objectives of diagnostics.

The trend characteristic (the development trend of characteristic) allows for forecasting the moment of catastrophic changes in the technical conditions. Based on this, it is possible to forecast the remaining resource, as well as to determine the time for repair scheduling.

Mathcad has the functions „detrrend“ and „predict“ for determining trend of changes and for predicting changes (Burge’s function is based on the autoregressive method), which produce good practical results.

This method with high accuracy makes forecast of the expected points based on the process itself. In the real systems, if it contains any pattern, the method displays this pattern and uses it for forecasting the expected points with high accuracy.

We shall use this method for predicting the total vibration level (dB) of turbine bearing and for forecasting the expected changes (Fig. 1).

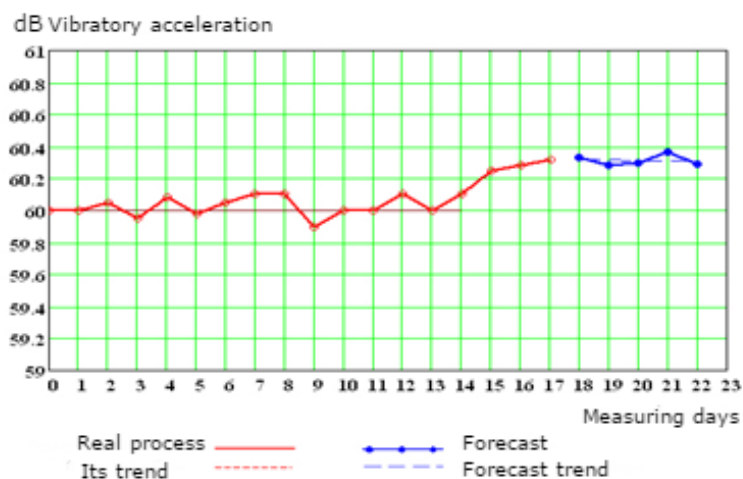


Fig. 1. The example of determining and predicting linear trend of the technical states

Once the degradation processes start in a bearing, the method makes prediction of signal coming from a sensor and establishes the trend that calls the operator to required action. This approach is ideal for the automation of processes, especially as work is currently under way on creating the automated control systems by using the vibration signals.

Also there are considered the reference vibroacoustic characteristics of the hydropower-generating unit during operation and their analysis. Many years experience of operating hydropower plants, by changing noises and vibrations, clearly demonstrates to personnel some changes in operating equipment, but deviation from the reference– the norm of the technical state can be

determined only by measuring noise and vibrations. The reference is a system, which is close to perfect. The factory-manufacturer of the hydropower-generating units has the statistically established permissible limiting values of vibrations. Also, the State Standard GOST5616-89 envisages that for hydro-generators, the values of vibrations in all directions (double amplitude and distance of oscillations) in all operating modes should not exceed the permissible limiting values specified in this standard.

For example, for the hydro-generators, whose rated number of revolutions is equal from 100 to 187,5 revolutions per minute, the permissible vibration amplitude is 0,15 mm. This value must be considered the reference. In general, the lower are the reference permissible values, the more sensitive is a diagnostic system towards the defects. In our research, we considered a permissible value relating to the scale – 6 dB, that is, if vibrations were doubled, then the defects were expected.

The third Chapter completely refers to the universal program of special diagnostics developed within a MathCad computer software, which allows for analyzing and comparing the taken vibrating signals, and making conclusions on them.

Mathematical environment of the analyzer allows for computing easily values required for diagnostics. For example, the root-mean-square (RMS) value of signal, which is proportional to vibration capacity, as well as CrestFactor, which represents the ratio of RMS to maximum value of signal

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

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

Defect – mechanical balance weight.

Symptom- an increase in total level of the vibrations of the upper and lower guide bearings, as well as an increase in the first harmonic.

Permissible values in decibels are $\Delta 111 < 6$ and $\Delta 112 < 6$

$$\bar{A}_1 = [A_1(f_{rev})]f_1 := 5\mathfrak{A}V_1 := 54.5V_2 := 56$$

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

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

The fourth Chapter describes the methodology for conducting the experiment, the forms of the considered vibration signals with radial, vertical and tangential directions within an octave band, and also spectra of signals. Also, this Chapter describes the program of special diagnostics and the results and main conclusions obtained through this program.

Within a Mathcad environment, the special computer program has been created and developed, which, in a few minutes, determines all vibration characteristics and compares them to each other as the results of several measurements, and also, if required, the results of measurements of the different energy-generating units.

Measurements were carried out in all three directions at fourvibro-active points of the units (at Vartsikhe HPP). These points are as follows: turbine, bottom bearing, top bearing and the “combinator”.

There have been determined and analyzed the following vibration characteristics of the removed signals:

- Shapes of vibro-acceleration signals;
- The root-mean-squared values of signals (RMS).

In our example, about 400 diagrams have been designed and compared for the units of Vartsikhe HPP. One of the typical diagrams of the vibration fields is given below in Fig. 2.

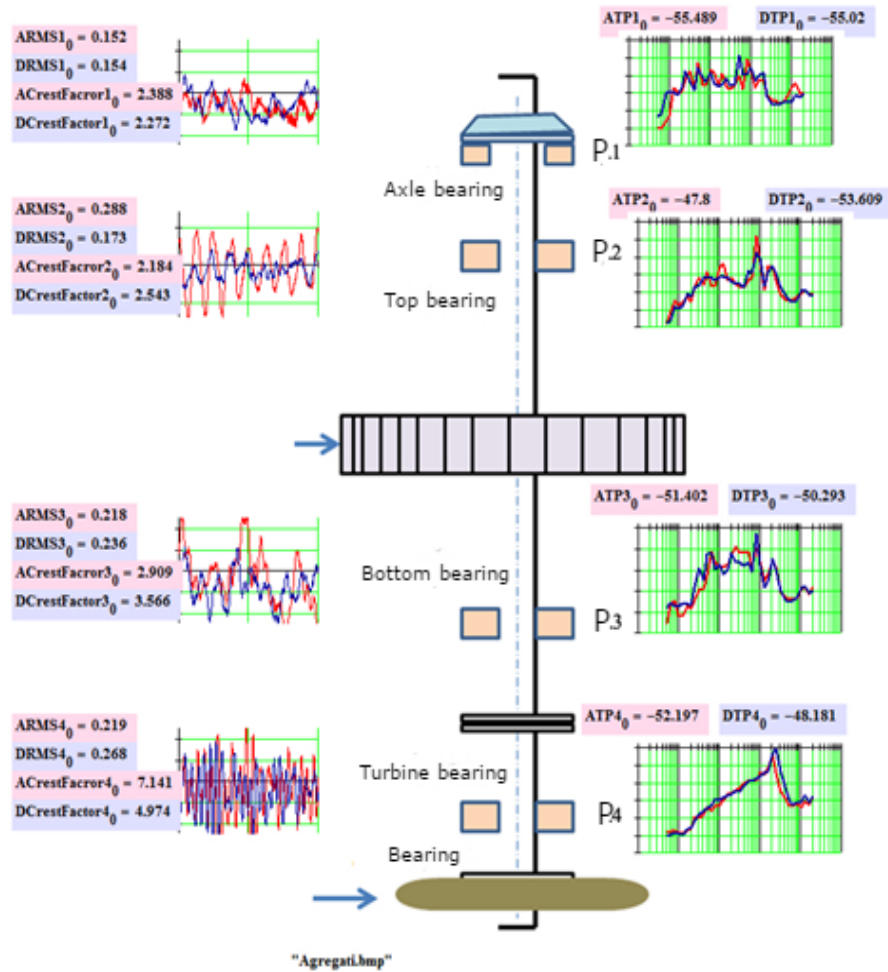


Fig. 2. Comparison of the signals of the old and new vibration fields measured in the radial direction (the first measurement results are marked in red color, and the second measurement results – in blue color)

Also, there is described the experimental study of vibroacoustic characteristics of the hydropower-generating units of Vartsikhe HPP for the purpose of diagnosis of the technical conditions.

An experimental study has been carried out on vibroacoustic characteristics of the hydropower-generating units for the purpose of diagnosis of the technical conditions. The measurement point has been selected on the mounting pad at the distance of 1m near the turbine rotor shaft.

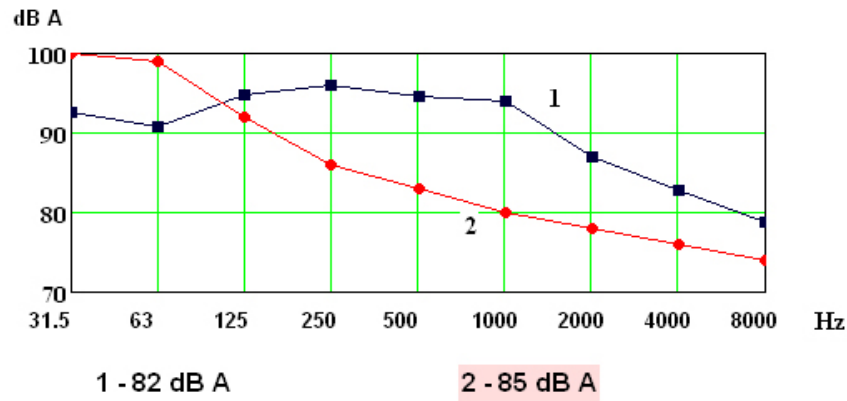


Fig.3. Comparison of the noise levels with the standard permissible values

The root-mean-squared value (RMS) of the acoustic signal, which is proportional to acoustic power and characterizes the source of noise as a whole, and CrestFactor, which is a ratio of a maximum to RMS and points to the possible impacts in an oscillatory system.

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

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

The above mentioned characteristics of vibroacoustic signal are the diagnostic signs, and their continuous monitoring allows for monitoring and full-fledged diagnosis of the technical conditions of the hydropower-generating units.

Conclusions

1. The universal computer software has been designed in a Mathcad package for vibroacoustic diagnostics of the hydropower-generating units, which allows for analyzing the taken vibration signals, comparing them with each other and making relevant conclusions.
2. Besides insignificant deviations in the vibration characteristics of the aggregates by the moment of measuring, to judge, as far as possible, by one-time measurements that there are no significant defects in the system, and malfunction and aggregates are in satisfactory technical condition. These technical states, with a certain degree of accuracy, can be considered as the initial (reference) ones, and in the future, we should purposefully search for the possible deviations and defects caused by these states.
3. In order to detect the incepted defects in case of insufficient lubrication, it is necessary to control the appearance of impact pulses in accordance with the value of CrestFactor. Then, the results of measuring this value must be compared with data of the high-frequency envelope spectrum, in order to determine the appearance of non-periodic impact pulses caused by the defects of lubrication.
4. It is necessary to control the low-frequency vibration energy of the bearing and of the whole machine, since the pre-accident technical condition of the bearing may randomly impact on the vibration levels of the other components without significant increase in the vibration harmonic constituents. More needed to be measured the vibration acceleration.
5. It is necessary to provide control of the levels of constituents of the separate harmonics at low and high frequencies. During the accumulation of several significant defects simultaneously in the bearing, the vibration may be sharply increased at the previously unknown combination frequencies as what are the particular ratio and the spatial arrangement of defects.
6. The mentioned method of diagnosis can be used not only for the cases with the hydropower-generating units, but in the any field of engineering, with appropriate modifications.
7. The mentioned computer software is ready to be introduced in Vartsikhe HPP, as well as in any other hydropower plant.

On the Thesis topic, the author has published 5 articles:

1. Kopaliani N., Zivzivadze O., Dzadzamia D. Experimental study of the acoustic characteristics of power transformer at high-frequency sub-stations. Third International Scientific Conference “Energy: Regional Problems and development Opportunities” - Kutaisi. 2015, pp.75-78
2. Kopaliani N., Dzadzamia D., Gogisvanidze V. Determining changes trend in technical state of energy-converting machines and forecasting in technical diagnostics problems. International Scientific Conference “Sustainable Energy: Challenges and Development Prospects”. Kutaisi. 2015, pp. 32-36
3. Kopaliani N., Pilia R., Dzadzamia D., Gogisvanidze V. The possibilities of drawing and sound creation through mathematical modeling in a Mathcad package. Periodical scientific journal “Novation”, No 15, - Kutaisi. 2015, pp. 56-61
4. Kopaliani N., Zivzivadze O., Dzadzamia D. Implementation of vibroacoustic diagnosing problem of the technical conditions of the hydropower-generating units in a Mathcad package. Periodical scientific journal “Novation”, No 15, - Kutaisi. 2015, pp. 232-238.
5. Kopaliani N., Dzadzamia D., Purtseladze I. Experimental study of the acoustic characteristics of the hydropower-generating units for the purpose of diagnosis of technical conditions. Messenger of Akaki Tsereteli State University. No 1(7). 2016, pp. 76-86.

