

თეა ხუციშვილი

ზოგიერთი მაღალბანზომილებიანი ღინამიკური
სისტემის მასშტაბური ინვარიანტობისა და
არაწრფივი სტრუქტურის კვლევა

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის
მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
თბილისი, 0175, საქართველო
მაისი, 2009 წელი

© საავტორო უფლება “თეა ხუციშვილი, 2009”

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით თქვა ხუციშვილის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: “ზოგიერთი მაღალგანზომილებიანი დინამიკური სისტემის მასშტაბური ინვარიანტობისა და არაწრფივი სტრუქტურის კვლევა” და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი

ხელმძღვანელი: ფიზ. მათ. მ. დ.

პროფესორი თ. მაჭარაშვილი

რეცენზენტი:

რეცენზენტი:

რეცენზენტი:

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
წელი

ავტორი: თეა ხუციშვილი
დასახელება: ზოგიერთი მაღალგანზომილებიანი დინამიკური
სისტემის მასშტაბური ინვარიანტობისა და
არაწრფივი სტრუქტურის კვლევა
ფაკულტეტი : ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების
აკადემიური ხარისხი: დოქტორი
სხდომა ჩატარდა:

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

ავტორის ხელმოწერა

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

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

სადისერტაციო ნაშრომს ვუძღვნი ჩემს მეუღლესა და შვილს, რომელიც მაღუ მოეპვლინება ამ ქვეყანას. აგრეთვე ჩემს დიდ ოჯახს, რომელთა მხარდაჭერასაც ვბრძნობ მთელი ცხოვრება. მათ დიდი წვლილი შეიტანეს ამ სადისერტაციო ნაშრომის შესრულებაში.

რეზიუმე

ბუნებრივ და ტექნიკურ სისტემებში მიმდინარე დინამიკურ პროცესებს ბოლო ათწლეულში დამკვიდრებული ტერმინოლოგიის მიხედვით მაღალგანზომილებიან ან ე.წ. რთულ პროცესებად მოიხსენიებენ. ასეთებია ატმოსფერული, გეოფიზიკური, ბიოლოგიური, სოციალური და სხვა ბუნებრივი პროცესები. თავისი დინამიკური შინაარსით რთულია, აგრეთვე, ტექნიკურ სისტემებში მიმდინარე პროცესების უმეტესობაც.

პროცესის სირთულე გულისხმობს, როგორც სისტემის შემადგენელი ნაწილების სიმრავლეს, ასევე მათ შორის ურთიერთკავშირების არაწრფივ ხასიათს.

ამ ტიპის პროცესების მიმდინარეობის მიზეზ-შედეგობრივი თვალსაზრისით ცალსახა პროგნოზი სადღეისოდ პრაქტიკულად დაუძლეველ ამოცანად რჩება. შეუძლებელია ისეთი სარწმუნო დინამიკური ცვლილებების აღმოჩენა, რომლებიც ცალსახად მიუთითებენ ბუნებრივ თუ ტექნიკურ სისტემებში მოახლოებული ექსტრემალური (კატასტროფული) მოვლენის სიდიდისა და მისი მოხდენის დროის შესახებ.

დისკუსია რთული სისტემებისა და მაღალგანზომილებიანი პროცესების შესახებ დღემდე გრძელდება. ამავე დროს ბოლო წლებში ცნობილი გახდა, რომ გარკვეულ პირობებში შესაძლებელია რთული სისტემის დინამიკური რეჟიმის, მისი ქცევის მართვა. ეს ქმნის იმის პერსპექტივას, რომ ერთეული არაპროგნოზირებადი ექსტრემალური მოვლენების ნაცვლად, სისტემაზე სათანადო ზემოქმედების პირობებში, შესაძლებელია ადგილი ჰქონდეს იმავე ტიპის, მაგრამ უფრო სუსტი მოვლენების სერიას, რაც საბოლოოდ შეამცირებდა შესაბამის რისკს. ამ მოსაზრებას საფუძვლად უდევს რთული სისტემების ორი უმნიშვნელოვანესი თვისება: საწყის პირობებზე მგრძნობიარე დამოკიდებულება და არასტაბილური პერიოდული ორბიტების გარე ზემოქმედებით სტაბილიზაციის შესაძლებლობა.

სადღეისოდ რთულ სისტემებში მიმდინარე პროცესების დინამიკური მახასიათებლების რაოდენობრივ და/ან თვისობრივ (შენაცვლება, ბიფურკაცია) ცვლილებასთან დაკავშირებული ბევრი საკითხი გარკვეულია. ცნობილია, მაგალითად, რომ სისტემაზე გარე ზემოქმედებით გამოწვეული დინამიკური მახასიათებლების ცვლილებას (მისი ქცევის მართვას) შეიძლება საფუძვლად ედოს სტოქასტური ან კოჰერენტული რეზონანსი, ფაზური ან შეყოვნებული სინქრონიზაცია და ა.შ. ამავე დროს, საკითხი იმის შესახებ, თუ როგორ იცვლება სისტემის რაოდენობრივი მახასიათებლები მისი ქცევის დინამიკური რეჟიმის ცვლილების პირობებში, შემდგომ შესწავლას საჭიროებს. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, გასარკვევია, იწვევს თუ არა, ან რა პირობებში იწვევს, სისტემის ქცევის დინამიკური რეჟიმის მოდიფიკაცია სისტემის მახასიათებელი სიდიდეების საშუალო მნიშვნელობისაგან მკვეთრად განსხვავებული (პირობითად ექსტრემალური) მნიშვნელობების განაწილების კანონზომიერების შეცვლას. ადრინდელი გამოკვლევები და სამეცნიერო პრესის მონაცემები საფუძველს გვაძლევს ვივარაუდოთ, რომ დინამიკური სისტემისათვის შესაძლებელია არსებობდეს გარკვეული ტიპის გარე, მცირე ზემოქმედების სერია (ან ზემოქმედების რეჟიმი), რომელიც მნიშვნელოვნად შეცვლის სისტემის დინამიკურ მახასიათებლებს. ასეთი ზემოქმედების შედეგად ექსტრემალური მოვლე-

ნების სიდიდე და რაოდენობა, შესაძლოა, შემცირდეს, ან გარკვეულ ფარგლებს არ აჭარბებდეს.

როგორც დინამიკური სისტემების თვისებრივი და რაოდენობრივი ანალიზის პრაქტიკულმა აუცილებლობამ და ამ საკითხზე სადღეისოდ ჩვენთვის სამეცნიერო ლიტერატურული მონაცემების განხილვამ ცხადყო, ჩვენ მიერ მიზნად დასახული გამოკვლევის აქტუალობა.

ზემოთ თქმულიდან გამომდინარე, წარმოდგენილი სადისერტაციო თემის ფარგლებში შესწავლილი იქნა მაღალგანზომილებიან როგორც სისტემებში დინამიკური რეჟიმის მართვის საკითხი მცირე გარე ზემოქმედების მეშვეობით.

ცნობილია, რომ ამ საკითხის შესწავლას დიდი სამეცნიერო და პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს.

დასახული მიზნის მისაღწევად პირველ ყოვლისა გაგარკვევით როგორც დინამიკური სისტემების დინამიკური თვისებებების შესწავლის მეთოდური მხარე. ეს იმით იყო განპირობებული, რომ ანალიზის ტრადიციული წრფივი მეთოდები არაწრფივი პროცესების არასტაციონარულ მონაცემთა მასივებისათვის ხშირად არაეფექტურია.

საკითხის დისციპლინათშორისი ბუნებიდან გამომდინარე მიზნად დავისახე სხვადასხვა ტიპის როგორც დინამიკური პროცესების შესწავლა; როგორც ბუნებრივი პროცესის, ასევე ლაბორატორიული მოდელის მაგალითზე. კერძოდ განვიხილე ჩუას წრედში კონდენსატორზე მოდებული ძაბვის ცვლილება, ბუნებაში როგორც პროცესის დინამიკური რეჟიმის ცვლილება შევისწავლე ენგურის კაშხლის ირგვლივ სეისმური პროცესის მაგალითზე. ამას გარდა ლაბორატორიულ დანადგარზე შევისწავლე არათანაბარი ხახუნის დინამიკური რეჟიმი და მასზე გარე სუსტი ზემოქმედების გავლენა.

დისერტაციაში გამოყენებული მონაცემების დასამუშავებლად მუშაობის პროცესში შეიქმნა პროგრამული პაკეტი, ამისათვის გამოყენებული იქნა პროგრამირების ენა C++. აგრეთვე გამოვიყენე შემდეგი კომპიუტერული პროგრამები: MATLAB, AutoSignal, CDA Pro და Visual Recurrence Analysis.

აღნიშნულ პროცესებში, მცირე გავლენით გამოწვეული დინამიკური ცვლილებების აღმოჩენის აუცილებლობის გამო, დამატებით გამოვიყენე ფაზური სინქრონიზაციისა და პროცესის რეკურენტული რაოდენობრივი ცვლილებების შეფასების მეთოდები.

ჩვენი კვლევის შედეგად შესწავლილი იქნა სხვადასხვა ტიპის როგორც დინამიკური სისტემის თვისებრივი და დინამიკური მახასიათებლები. ნაჩვენები იქნა, რომ როგორც დინამიკური სისტემა ძალზე მგრძნობიარეა მცირე გავლენების მიმართ და რომ მისი ქცევის რეჟიმი შესაძლებელია მნიშვნელოვნად შეიცვალოს მცირე გარე ზეგავლენის მეშვეობით.

ეს ფაქტობრივად მიუთითებს ბუნებრივ და ტექნიკურ სისტემებში როგორც პროცესების მართვის პრინციპულ შესაძლებლობაზე.

Abstract

The dynamical processes in natural and technical systems, according to the terminology established in the last decade, are regarded as high dimensional or so-called complex processes. Such are atmospheric, geo-physical, biological, social and other natural processes. By their dynamical content the majority of processes in technical systems are also complex.

The complexity of the process means both the multitude of compiling parts of the system and the non-linear character of interrelation between them.

Single valued prediction of such processes remains as practically unresolved task.

It is impossible to discover such reliable dynamic changes that unambiguously point out in natural or technical systems about the quantitative value of approaching extreme (disastrous) event and time of its occurrence.

The discussion about complex systems and high dimensional processes has been going up to now. At the same time recently it has become well-known that in certain conditions it is possible to control the dynamic mode, behavior of the complex system. This makes us to hope that instead of single unpredictable extreme events in condition of certain external influences on the system it is possible the series of events of the same type or weaker to take place that finally would reduce a corresponding risk. The basis of this notion is the most significant two properties of complex highdimensional systems: sensitive dependence on initial conditions and possibility of stabilization by external influence of unstable periodic orbits.

Lots of problems connected with the quantitative and/or qualitative changes (intermittence, bifurcation) in characteristics of processes in complex systems are still unclear nowadays. For example, it is known that the change (control of its behavior) of dynamic features caused by the external influence on the system can have the basis of stochastic or coherent resonance, phase or slowed-down synchronization etc. At the same time the problem changes in quantitative features of dynamic mode of its behavior requires further study. In other words it must be determined whether it causes or in what conditions it causes a change of the distribution regulation of the strongly different (conventionally extreme) meanings from the medium meanings of the system features value of the modification of dynamic mode of the system behavior. The earlier investigations and scientific press data give us the basis to presume that for the dynamic system the existence of a definite type of a series of external influence (or the influence mode) is possible that will considerably change the system dynamic features. As a result of such influences the value and quantity of extreme events can probably be reduced or not exceed the definite limits.

The practical needs of the qualitative and quantitative analysis of the complex dynamic systems and overview of the scientific literary data known nowadays by us concerning this problem proved the topicality of the research objective set by us.

According to above-mentioned the subject of presented dissertation was study of the problem of control processes in high dimensional complex systems by means of a small external influence.

It is known that the study of this problem has a big scientific and practical importance.

In order to achieve the set objective first of all I determined a method side of the study of dynamic features of the complex dynamic systems. It was conditioned by the fact that traditional linear methods of the analysis are frequently ineffective for non-stationary data files of non-linear processes.

Coming from the nature of inter-disciplinary problem I had the aim of studies of complex dynamic processes of various types on the example of both the natural process and also laboratory model. Particularly I considered the change of tension existing on condenser in Chua circuit; I studied the change of dynamic mode of the complex process in nature on the example of the seismic process around Engury dam. Besides that I have studied the dynamic mode of not equal friction on the laboratory device and the external weak influence on it.

For processing the data used in the thesis during the work program packets were created and for this purpose was used the program language C++. I also used the following computer programs: MATLAB, Auto Signal, CDA Pro and Visual Recurrence Analysis.

In the mentioned processes because of discovering dynamic changes caused by a small influence I additionally used the methods for estimation of the phase synchronization and the process recurrent quantitative change.

As a result of our investigation were studied the peculiar and dynamic features of the complex dynamic systems of various type. It was shown that the complex dynamic system was rather sensitive towards the small influences and that the mode of its behavior can considerably change by means of a small external influence.

As a matter of fact it points out the principal possibilities of control of complex processes in the natural and technical systems.

შინაარსი

შესავალი	xvii
თავი I	24
დინამიკური სირთულის ანალიზის მეთოდები	24
ანალიზის თანამედროვე წრფივი მეთოდები.....	24
1.1 სიმძლავრის სპექტრი	24
1.2 ავტოკორელაციის ფუნქცია.....	28
1.3 ვივლეთური ბარდაქმნა	29
1.4 სიმძლავრის სპექტრის რეგრესია	31
1.5 მასშტაბირებული რანგების ანალიზი: კარსტის ექსპონენტის გამოთვლა.....	32
1.6 ტრენდმოცილებული ფლუქტუაციების ანალიზი	34
თავი II.....	36
დროითი სერიების ანალიზის არაწრფივი მეთოდები.....	36
2.1 ფაზურ სივრცის რეკონსტრუქცია შეფოვნების მეთოდით.....	36
2.2 ჩაშენების სივრცის შერჩევა	37
2.3 მცდარი უახლოესი მეზობლების ანალიზი	38
2.4 ფაზური პორტრეტის რეკონსტრუქციის მრავალცვლადიანი მეთოდი	41
2.5 ლიაპუნოვის ექსპონენტის გამოთვლა	43
2.6 შენონის ენტროპია და ინფორმაციული განხილვა.....	45
2.7 კორელაციური განხილვა	46
2.8 განმასხვავებელი არაწრფივი სტატისტიკა და არაწრფივი სტრუქტურის ტესტირების მეთოდები.....	49
2.9 ნულ-ჰიპოთეზების იერარქია და განმასხვავებელი მეტრიკა ...	49
2.10 სუროგატული დროითი სერიები	51
2.11 რეკურენტული რაოდენობრივი ანალიზის მეთოდი (RQA)	54
თავი III.....	56
შედეგების აღწერა და განხილვა	56
3.1 მაღალგანხილვადი დინამიკური პროცესის მაგალითი ტექნიკურ სისტემებში	56
3.1.1 ჩუას წრედის აღწერა	56

3.1.2 ჩუას წრედის რეალიზაციის შედეგად მიღებული მონაცემების დამუშავება.....	58
3.2 ბუნებრივ პროცესებში მაღალგანზომილებიანი რთული დინამიკის შესწავლა სემსური პროცესის მაგალითზე.....	63
3.2.1 ანთროპოგენული ზემოქმედების გავლენა სემსური პროცესის დინამიკურ მახასიათებლებზე.....	65
3.2.2 განხილული მონაცემთა მასივები და ანალიზის მეთოდები.....	67
3.2.3 შედეგების განხილვა.....	69
3.3 მაღალგანზომილებიანი რთული დინამიკის პროცესის შესწავლა ლაბორატორიული ექსპერიმენტის მაგალითზე.....	76
3.3.1 ზამბარა-მცოდნის აკუსტიკური ემისიის ლაბორატორიული მოწყობილობა.....	76
3.3.2 არათანაბარი ხახუნის პროცესის აკუსტიკური ემისიის მონაცემთა მასივების ანალიზის მეთოდების დამუშავება და შედეგები	79
დასკვნა	96
დანართი.....	97
ბამოყენებული ლიტერატურა.....	134

ცხრილების ნუსხა

- ცხრილი 1. ჩუას წრედში კონდენსატორზე მოდებული ძაბვის ცვლილების
მონაცემთა მასივის დინამიკური მახასიათებლები 62
- ცხრილი 2. 80000 მონაცემის სიგრძის დროით სერიაში 10000 მონაცემიანი
მცოცავი ფანჯრის 5000 მონაცემიანი ბიჯით შენონის ენტროპიის
გამოთვლის შედეგები სხვადასხვა სიხშირისათვის..... 85
- ცხრილი 3. აკუსტიკური ემისიის მონაცემების რეკურენტული
მახასიათებლები 86

ნახაზების ნუსხა

ნახ. 1.1 ტიპური სიმძლავრის სპექტრი და ავტოკორელაციის ფუნქცია.....	27
ნახ. 1.2 კეივლეტის ზოგიერთი ტიპი.....	30
ნახ. 1.3 ლოკალიზებული კეივლეტების დროით-სიხშირული წარმოდგენა	30
ნახ. 2.1 მცდარი უახლოესი მეზობლების პროცენტული რაოდენობის დამოკიდებულება ჩაშენების განზომილებაზე ლორენცის ატრაქტორისათვის	40
ნახ. 3.1 ჩუას ელექტრონული წრედის სქემა	57
ნახ. 3. 2 ჩუას დიოდის ვოლტამპერული მახასიათებელი	57
ნახ. 3.3 ჩუას წრედში კონდენსატორზე მოდებული ძაბვის ცვლილების დროითი სერია.....	59
ნახ. 3.4 ჩუას წრედში კონდენსატორზე მოდებული ძაბვის ცვლილების დროითი სერიის სიმძლავრის სპექტრი.....	59
ნახ. 3.5 ძაბვის ცვლილების დროითი სერიის ორგანზომილებიანი ფაზური პორტრეტი.....	60
ნახ. 3.6 ლორენცის ატრაქტორის ორგანზომილებიანი ფაზური პორტრეტი.....	60
ნახ. 3.7 დროითი სერიის რეკურენტული დიაგრამა	61
ნახ. 3.8 ძაბვის ცვლილების დროითი სერიის R/S ანალიზის შედეგი	61
ნახ. 3.9 ჩუას წრედში კონდენსატორზე მოდებული ძაბვის ცვლილების მონაცემთა მასივის FNN რაოდენობის ცვლილება ჩაშენების განზომილების მიხედვით	62
ნახ. 3.10 ძაბვის ცვლილების მონაცემთა მასივის კორელაციური განზომილების ცვლილება ჩაშენების სივრცის განზომილების მიხედვით	62
ნახ. 3.11 ა) ენგურის წყალსაცავში წყლის დონის ყოველდღიური ჩანაწერები 1975-1993 წლებში	67
ნახ. 3.11 ბ) მიწისძვრების ყოველდღიური რაოდენობა	68
ნახ. 3.11 გ) ნორმალიზებული ყოველდღიური გამონთავისუფლებული სეისმური ენერგია.....	68
ნახ. 3.12 ყოველდღიური გამონთავისუფლებულ სეისმურ ენერგიასა და ყოველდღიური წყლის დონის ცვლილების ფაზათა სხვაობის დიფუზიის კოეფიციენტის ცვლილება	71
ნახ. 3.13 ა) მიწისძვრების ყოველდღიური რაოდენობის დროითი სერიის RQA და %DET გამოთვლილი არაგადამფარავი ერთი წლის მცოცავი ფანჯრებისათვის	73

ნახ. 3.13 ბ) მაგნიტულების (შავი სვეტები) და მიწისძვრებს შორის დროს ინტერვალების სერიების (ნაცრისფერი სვეტები) RQA და %DET	73
ნახ. 3.14 მიწისძვრების ყოველთვიური სიხშირის ცვლილება ენგურის კაშხლის ირგვლივ	74
ნახ. 3. 15 არათანაბარი ხახუნის ექსპერიმენტული მოწყობილობა	77
ნახ. 3.16 (ა) აკუსტიკური ემისია არათანაბარი სრიალის დროს	78
ნახ. 3.16 (ბ) ცვალებადი ინტენსივობის ზედღებული პერიოდული ელექტრომაგნიტური (EM) ველი	78
ნახ. 3.17 წარმოადგენს ნახ. 3.16-ის გაშლილ შუა ნაწილს, რომელიც შეესაბამება პერიოდული ზემოქმედების მაქსიმალურ ინტენსივობას	78
ნახ. 3.18. ა) მითითებული სიგრძის ნაწილობრივ ურთიერთგადამფარავი მცოცავი ფანჯრებისათვის გამოთვლილი შენონის ენტროპიის ვარიაცია დროითი სერიისათვის	80
ნახ. 3.18. ბ) სურათზე ნაჩვენებია 10 ანათვლით დაგრძელებადი ფანჯრებისათვის გამოთვლილი შენონის ენტროპიის ვარიაცია დროითი სერიისათვის	80
ნახ. 3.19 ა) ნაჩვენებია მომდევნო მცოცავი ფანჯრებისათვის გამოთვლილი შეუღლებული ინფორმაციის რაოდენობის ვარიაცია დროითი სერიებისათვის	81
ნახ. 3.19 ბ) ფუნქციონალური კავშირის უფრო მაღალი ხარისხი მეორე და მესამე ქვესერიებს შორის	81
ნახ. 3. 20 (ა)—აკუსტიკური ემისიის ტიპური ჩანაწერი	83
ნახ. 3. 20 (ბ)—აკუსტიკური ემისიის სიგნალისაგან მიღებული გარსი	83
ნახ. 3. 20 (გ) ხმაურისგან გაფილტრული სიგნალი	83
ნახ. 3. 20 (დ) გაფილტრული სიგნალი	83
ნახ. 3. 21 დრეკადი აკუსტიკური ტალღის შემოსვლის მომენტი	84
ნახ. 3. 22 აკუსტიკური ემისიის ტიპური ჩანაწერების ფრაგმენტები გარე ზემოქმედების სხვადასხვა პირობებში	84
ნახ. 3. 23 აკუსტიკური ემისიის არაწრფივი დინამიკური მახასიათებლების მრუდები სხვადასხვა ექსპერიმენტებისათვის	87
ნახ. 3.24 აკუსტიკური ემისიის დროითი სერიიდან გამოთვლილი მომდევნო მაქსიმუმებსა და მომდევნო შემოსვლებს შორის დროის ინტერვალების სერიების ტიპური კატალოგები	88
ნახ. 3. 25 განაწილების ფუნქციის სიგანის ცვლილება ფარდობითი ძალის მიხედვით	88
ნახ. 3. 26 ა) აკუსტიკური ემისიის შემოსვლებისა და მაქსიმუმების ფაზების სვლის დათვლის მაგალითი	89

ნახ. 3. 26 ბ) აკუსტიკური ემისიის შემოსვლებისა და მაქსიმუმების ფაზების გარე სიგნალთან სინქრონიზაციის მაჩვენებლის გამოთვლის შედეგი	90
ნახ. 3. 27 რეკურენტული დიაგრამები სხვადასხვა ფარდობითი ზემოქმედების დროს.....	90
ნახ. 3. 28. %DET და გარე ზემოქმედების ფარდობით ძალას შორის დამოკიდებულების გრაფიკი	91
ნახ. 3. 29 გარსის კონცეპციაზე დაფუძნებული აკუსტიკური ემისიის მასივის ფილტრაციის შემდეგ აკუსტიკური ემისიის შემოსვლების გარე სიგნალის ციკლში განაწილების გამოთვლის მაგალითი.....	91
ნახ. 3. 30 გარსის კონცეპციაზე დაფუძნებული აკუსტიკური ემისიის მასივის ფილტრაციის შემდეგ აკუსტიკური ემისიის მაქსიმუმების გარე სიგნალის ციკლში განაწილების გამოთვლის მაგალითი.....	92
ნახ. 3. 31 შეყვანებების დროსა და ფარდობით ძალას შორის დამოკიდებულება.....	92
ნახ. 3. 32. ა) აკუსტიკური ემისიის სიმძლავრის ტიპური მონაცემთა მასივი	93
ნახ. 3. 32. ბ) ფაზების სხვაობა აკუსტიკური ემისიის სიმძლავრესა და გარე სინუსოიდალურ სიგნალს შორის.....	93
ნახ. 3.33 თანმიმდევრული არაგადამფარავი 400 მონაცემიანი ფანჯრებისათვის გამოთვლილია RQA და %DET	94

დისერტაციაში გამოყენებული აბრევიატურები

FNN	False Nearest Neighbors- მცდარი უახლოესი მეზობლები
RQA	Recurrence Quantitative Analysis - რეკურენტული რაოდენობრივი ანალიზი
%REC	%RECURRENCE - რეკურენტობის პროცენტი
%DET	%DETERMINISM - დეტერმინიზმის პროცენტი
%ENTR	%ENTROPY - ენტროპიის პროცენტი
RIS	Reservoir Induced Seismicity - რეზერვუარის მიერ ინდუცირებული სეისმურობა
RISS	Reservoir Induced Synchronization of Seismicity - წყალსაცავით გამოწვეული სეისმურობის სინქრონიზაცია
MFEO	Monthly frequency of earthquake occurrence- მიწისძვრების ყოველთვიური სიხშირის ცვლილება
spring-slider	ზამბარა-მცოცი
stick-slip	არათანაბარი ხახუნი
AE	Acoustic Emission - აკუსტიკური ემისია
FWHM	Full Width of Half Maximum -განაწილების ფუნქციის ნახევარ მაქსიმუმის სიგანე
Relative force	ფარდობითი ძალა (ზემოქმედება)

მადლიერება

სურვილი მაქვს მადლიერება გამოვთქვა ყველა იმ ადამიანის მიმართ, ვინც მეხმარებოდა სადისერტაციო ნაშრომის შესრულების პროცესში.

უპირველეს ყოვლისა უღრმეს მადლობას მოვახსენებ ჩემს სამეცნიერო ხელმძღვანელს, პროფ. თემურ მაჭარაშვილს, რომლის რჩევებითა და დახმარებით შესაძლებელი გახდა დისერტაციაში დასმული ამოცანების გადაწყვეტა. მისი რეკომენდაციითა და ხელშეწყობით მივიღე მონაწილეობა საზღვარგარეთ ჩატარებულ საერთაშორისო კონფერენციებში.

წლების განმავლობაში, ჩემი სპეციალისტად ჩამოყალიბებაში გაწეული ღვაწლისთვის მინდა მადლიერებით გავიხსენო ჩემი მასწავლებელი, აწ განსვენებული ბატონი აღმასხან გუგუშვილი.

მართვის სისტემებისა და რობოტოტექნიკის მიმართულების უკლებრივ ყველა წევრს თანადგომისა და მხარდაჭერისათვის – უღრმესი მადლობა!

დიდი მადლობა მინდა გადავუხადო მ. ნოდის სახელობის გეოფიზიკის ინსტიტუტის თანამშრომლებს: მეცნიერებათა აკადემიის წევრ-კორესპონდენტს, პროფ. თ. ჭელიძეს, პროფ. ვ. აბაშიძეს, პროფ. ო. ლურსმანაშვილს საინტერესო და მნიშვნელოვანი კონსულტაციებისათვის, ასევე ნ. ჟუკოვას და ე. მეფარიძეს პროგრამული უზრუნველყოფისათვის. აგრეთვე, საერთაშორისო პროექტს, INTAS (Ref. Nr 05-1000008-7889), რომლის ფარგლებშიც იყო ჩატარებული ჩემს დისერტაციაში მოხსენებული გამოკვლევის გარკვეული ნაწილი.

უღრმესი მადლობა ჩემი ოჯახის ყველა წევრს, მათი ამაგი, მხარდაჭერა და ხელშეწყობა ფასდაუდებელია. განსაკუთრებული მადლობა ჩემს უფროს დას, ოლიგო ხუციშვილს, რომელიც დედობრივი სიყვარულით დღემდე ზრუნავს ჩემზე.

ბოლოს მინდა უდიდესი მადლობა გადავუხადო ჩემს მეუღლეს, პაატა ბალხამიშვილს, სულიერი და მატერიალური მხარდაჭერისათვის.

შესავალი

ბუნებრივი პროცესების დინამიკის აღწერის საკითხები ყოველთვის იყო მკვლევარების ყურადღების ცენტრში. ამავე დროს ცნობილია, რომ ბუნების ატმოსფერულ, სეისმურ, ბიოლოგიურ, სოციალურ, ტექნიკურ და ა. შ.. სისტემებში მიმდინარე პროცესების სწორი აღწერა, მათი თვისობრივი და განსაკუთრებით რაოდენობრივი ანალიზი ძნელი და ზოგჯერ შეუძლებელიცაა. ეს სიძნელე განპირობებულია ბუნებრივი სისტემების სტრუქტურული და მათში მიმდინარე პროცესების დინამიკური თავისებურებებით რასაც სადღეისოდ სპეციალური ტერმინით - სირთულე (Complexity) აღნიშნავენ.

თავისთავად, სირთულის (Complexity), როგორც სამეცნიერო ტერმინის ამომწურავი, საყოველთაოდ მიღებული განმარტება სადღეისოდ არ არსებობს. ვებსტერის 1995 წელს გამოცემული განმარტებითი ლექსიკონისა და 1996 წელს გამოცემული ცნობარის, Lexicon of Complexity – ში მოყვანილი ინფორმაციის საფუძველზე შეიძლება ვთქვათ, რომ სირთულე (სირთულის ხარისხი) უკავშირდება სისტემის შემადგენელი ნაწილების სიმრავლეს და მათ შორის ურთიერთკავშირების ხასიათს. რთულ სისტემაში მიმდინარე პროცესებს დინამიკური თვალსაზრისითაც რთულ ან მაღალგანზომილებიან პროცესებად მოიხსენებენ. ისინი მიმდინარეობენ მრავალკომპონენტიან იერარქიულ ბუნებრივ თუ ტექნიკურ სისტემებში: ატმოსფეროდან დაწყებული ენერგოსისტემებიდან და დიდი ქალაქების ინფრასტრუქტურით დაწყებული თუ ინტერნეტით დამთავრებული. ამ პროცესების მიმდინარეობის მიზეზ-შედეგობრივად ცალსახა პროგნოზი პრაქტიკულად დაუძლეველ ამოცანად რჩება. შეუძლებელია სარწმუნო დინამიკური ცვლილებების აღმოჩენა, რომლებიც ცალსახად მიუთითებენ ბუნებრივ თუ ტექნიკურ სისტემებში მოახლოებული ექსტრემალური (კატასტროფული) მოვლენის სიდიდისა და მოხდენის დროის შესახებ [1].

დისკუსია რთული სისტემებისა და მაღალგანზომილებიანი პროცესების შესახებ დღემდე გრძელდება. ბოლო დროს ცნობილი გახდა, რომ გარკვეულ პირობებში შესაძლებელია რთული სისტემის დინამიკური რეჟიმის, მისი ქცევის მართვა. ეს ქმნის პერსპექტივას, რომ ერთეული არაპროგნოზირებადი ექსტრემალური მოვლენების ნაცვლად, სისტემაზე სათანადო ზემოქმედების პირობებში, შესაძლებელია ადგილი ჰქონდეს იმავე ტიპის უფრო სუსტი მოვლენების სერიას, რაც საბოლოოდ

ნაკლებ ზარალს გამოიწვევს. ამ მოსაზრებას საფუძვლად უდევს რთული სისტემების ორი უმნიშვნელოვანესი თვისება: საწყის პირობებზე მგრძნობიარე დამოკიდებულება და არასტაბილური პერიოდული ორბიტების გარე ზემოქმედებით სტაბილიზაციის შესაძლებლობა.

სადღეისოდ რთულ სისტემებში მიმდინარე პროცესების დინამიკური მახასიათებლების რაოდენობრივ და/ან თვისობრივ (შენაცვლება, ბიფურკაცია) ცვლილებასთან დაკავშირებული ბევრი საკითხი გარკვეულია. ცნობილია, მაგალითად, რომ სისტემაზე გარე ზემოქმედებით გამოწვეული დინამიკური მახასიათებლების ცვლილებას (მისი ქცევის მართვას) შეიძლება საფუძვლად ედოს სტოქასტური ან კოჰერენტული რეზონანსი, ფაზური ან შეყოვნებული სინქრონიზაცია და ა.შ. ამავე დროს, საკითხი იმის შესახებ, თუ როგორ იცვლება სისტემის რაოდენობრივი მახასიათებლები მისი ქცევის დინამიკური რეჟიმის ცვლილების პირობებში, შემდგომ შესწავლას საჭიროებს. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, გასარკვევია იწვევს თუ არა, ან რა პირობებში იწვევს სისტემის ქცევის დინამიკური რეჟიმის მოდიფიკაცია სისტემის მახასიათებელი სიდიდეების საშუალო მნიშვნელობისაგან მკვეთრად განსხვავებული (პირობითად ექსტრემალური) მნიშვნელობების განაწილების კანონზომიერების შეცვლას. აღრინდელი გამოკვლევები და სამეცნიერო პრესის მონაცემები საფუძველს გვაძლევს ვივარაუდოთ, რომ დინამიკური სისტემისათვის შესაძლებელია ადეკვატური ზემოქმედების ტიპის (რეჟიმის) ისე შერჩევა, რომ ექსტრემალური მოვლენების სიდიდე და რაოდენობა გარკვეულ ფარგლებს არ აჭარბებდეს.

საზოგადოდ, ნებისმიერი სამეცნიერო კვლევის საბოლოო მიზანს ბუნებრივი პროცესების განვითარების შესაძლო გზების წინასწარმეტყველება, პროგნოზირება წარმოადგენს. პროგნოზი გულისხმობს პროცესების მიმდინარეობის კანონზომიერებების სრულ ცოდნას და მათ ანალიზურ ასახვას მათემატიკური მოდელის სახით (აქ იგულისხმება დეტერმინისტული პროგნოზი). აღნიშნულ საკითხზე სხვადასხვა დარგში გამოქვეყნებული უამრავი ნაშრომის მიხედვით თუ ვიმსჯელებთ, ზოგადად ბუნებრივი პროცესების პროგნოზის თვალსაზრისით სადღეისოდ მეცნიერების მიღწევები საკმაოდ მოკრძალებულია და მხოლოდ ცალკეული დროით-სივრცული მაშტაბისათვის ალბათურადაა შესაძლებელი. ამ „წარუმატებლობის“ ძირითადი მიზეზი ბუნების სტრუქტურულ და დინამიკურ სირთულეში (ბუნების არაწრფივობაში ან

მასში არაშემთხვევითი - არაწრფივი სტრუქტურის არსებობაში) მდგომარეობს [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

არსებული შეხედულებების საფუძველზე ზემოთქმულის დამატებით შეიძლება აღინიშნოს, რომ სირთულე წარმოადგენს სისტემის შინაგანი კანონზომიერებებით და მასზე გარე ზემოქმედებით განპირობებულ თვისებას, რომელიც განსაზღვრავს მისი სივრცული სტრუქტურისა და ამ სტრუქტურაში (სტრუქტურაზე) პროცესების მიმდინარეობის თავისებურებებს. ასეთნაირად განმარტებული სირთულე (არაწრფივობა) გაიგება, როგორც ბუნების სრულიად გარკვეული ფიზიკური მახასიათებელი და სპეციალური ლიტერატურული მონაცემების მიხედვით მკვლევართა უმეტესობას მისი შინაარსი ძირითადად სწორედ ასე ესმის. [1, 14, 15, 16, 17, 18, 19].

სირთულის უნივერსალურობიდან გამომდინარე ეს მიმართულება მეცნიერების ყველა დარგს უკავშირდება და თავისი დისციპლინათშორისი ბუნებიდან გამომდინარე იგი ქმნის საერთო ენას სხვადასხვა დარგის მკვლევარებისათვის.

არაწრფივი დინამიკის თეორიას ზოგჯერ სირთულის თეორიას უწოდებენ. პროცესების ევოლუციის, სირთულის დინამიკური ასპექტის, შესწავლის თვალსაზრისით იგი მოიცავს დინამიკური სისტემებისა და ქაოსის თეორიებს.

მიუხედავად იმისა, რომ არაწრფივი დინამიკის თეორიის ძირითადი კონცეპციები და მიდგომები ფაქტიურად მხოლოდ ბოლო წლებში ჩამოყალიბდა, მან უკვე მნიშვნელოვნად შეცვალა ჩვენი შეხედულებები პროცესების მიმდინარეობასა და ბუნებრივი სტრუქტურების აგებულების კანონზომიერებების შესახებ. მეცნიერების სხვადასხვა დარგში, კლიმატის ცვლილებით დაწყებული, მედიცინითა და ეკონომიკით დამთავრებული, რიგი პროცესებისა, რომლებიც ადრე ითვლებოდნენ შემთხვევითად ან უწესრიგოდ, დღეს განიხილებიან შინაგანად რთულ, მაგრამ სავსებით კანონზომიერ პროცესებად. უფრო მეტიც, ზოგჯერ შესაძლებელია მათი ევოლუციის კანონზომიერებათა რაოდენობრივი შეფასება და გარკვეული აზრით დეტერმინისტული პროგნოზიც კი. მეორე მხრივ სხვა პროცესები, რომლებიც ადრე ეჭვს გარეშე მოწესრიგებულად და რეგულარულად იყო მიჩნეული, დღეს შემთხვევითი პროცესების რიგში განიხილება. ასევე მკვეთრად შეიცვალა ჩვენი წარმოდგენები ბუნებრივი ობიექტის გეომეტრიისა და სივრცის განზომილების შესახებაც. აღმოჩნდა, რომ ობიექტის სივრცული განზომილება შეიძლება ყოველთვის არ მოიცემოდეს მთელი რიცხვით.

მისი ყოვლისმომცველი შინაარსიდან გამომდინარე ბუნების სირთულეს მრავალი ასპექტი შეიძლება გააჩნდეს, რომელთაგან უმნიშვნელოვანესია გეომეტრიული (სტრუქტურული) და დინამიკური სირთულე. ისინი ერთმანეთთან ღრმა შინაგან კავშირში იმყოფებიან (მაგ. ფაზურ სივრცეში დინამიკური სირთულე გეომეტრიულ ობიექტად აისახება) [16, 20, 21, 22, 23, 24, 25].

ჩვენი გამოკვლევის მთავარ მიზანს მაღალგანზომილებიანი რთული პროცესების დინამიკური სირთულის თვისებრივი და რაოდენობრივი ანალიზი შეადგენს.

ჩვეულებრივ, როცა საუბრობენ დინამიკაზე, როგორც წესი გულისხმობენ ფიზიკური სიდიდის ცვლილებას დროში, თუმცა ზოგადად შეიძლება დინამიკაში ვიგულისხმოთ რაიმე სიდიდის (სიდიდეების) თანმიმდევრული ცვლილება (ეკოლოცია) რომელიმე სხვა სიდიდის (სიდიდეების) მიმართ.

უნდა აღინიშნოს, რომ დინამიკა ფიზიკის ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი და უძველესი დარგია. დინამიკის შესწავლაში მიღწეული წარმატებები ყოველთვის ძლიერ სტიმულს აძლევდა მოსაზღვრე დარგების განვითარებასაც. კერძოდ, მეჩვიდმეტე საუკუნის კლასიკურმა დინამიკამ წარმოშვა დიფერენციალური აღრიცხვა, ხოლო ჩვენს დროში არაწრფივი დინამიკური პროცესების შესწავლამ მიგვიყვანა ფრაქტალების თეორიისა და სირთულის რაოდენობრივი შესწავლის მეთოდების განვითარებამდე.

დინამიკური თვალსაზრისით ყველაზე მარტივია სრულიად დეტერმინირებულ სისტემაში მიმდინარე პროცესები, რომელთა მახასიათებლები თანაბრად იზრდებიან დროის ან რაიმე სხვა მახასიათებლის მიმართ (ზრდა აქ ზოგადი ტერმინია და გულისხმობს როგორც დადებით ასევე უარყოფით და ნულოვან ნაზრდს). რადგანაც ამ მახასიათებლების მნიშვნელობათა ცვლილებას, სისტემის ქცევას, შინაგანი ან/და გარე ფაქტორები (მიზეზები) განსაზღვრავენ, უფრო გასაგები იქნება თუ ვიტყვით, რომ დეტერმინირებული სისტემისათვის ზემოქმედების (მიზეზის) თანაბარი ზრდა ან შემცირება შედეგის (ზემოქმედებაზე სისტემის რეაქციის) თანაბარ ცვლილებას იწვევს.

ზოგადად დინამიკის წარმოდგენის ორგვარი შესაძლებლობა არსებობს მათემატიკური მოდელის ან ფაზური სივრცის სტრუქტურის სახით.

ბუნებრივი პროცესების დინამიკის მოდელირება მეტად ძნელი საქმეა, რადგანაც ერთობლივად მოქმედ მრავალ გარე ფაქტორსა და თავისუფლების ხარისხე-

ბის სიმრავლესთან ერთად აქ თავს იჩენენ სისტემის ქცევის შინაგანი არაწრფივობით გამოწვეული პრობლემებიც. ამას გარდა მოდელური არაწრფივი განტოლებების ანალიზური ამოხსნაც საკმაოდ ძნელია და ხშირად შეუძლებელიც. გაწრფივება, რასაც ხშირად მიმართავენ ამ დროს, ამახინჯებს რეალურ დინამიკას, რადგან სწორად ვერ ასახავს პროცესისათვის დამახასიათებელ მიზეზ-შედეგობრივი კავშირების სირთულის ჭეშმარიტ ხარისხს. ეს ყველაფერი აძნელებს ბუნებრივი პროცესების დინამიკაზე ჩვენი სწორი წარმოდგენების ჩამოყალიბებას.

ზემოთ თქმულიდან გამომდინარე, დინამიკური სისტემების თვისებრივი და რაოდენობრივი აღწერის ლოგიკურ გზად მიიჩნევა პროცესის დინამიკის ფაზურ სივრცეში გადატანა. ფაზური ეწოდება ხელოვნურ სივრცეს, რომლის ღერძებზეც სისტემის მახასიათებელი ცვლადებია გადაზომილი. ფაზური სივრცის ყოველი წერტილი სისტემის გარკვეულ მდგომარეობას შეესაბამება. ამ წერტილების ერთობლიობა, აღწერს სისტემის ევოლუციას და ქმნის ე.წ. ფაზურ ტრაექტორიებს. ეს უკანასკნელნი კი ქმნიან დინამიკური პროცესის ე.წ. ფაზურ პორტრეტს.

დინამიკის რაოდენობრივი შეფასების საკითხში მნიშვნელოვანი პროგრესი შესაძლებელი გახდა ბენუა მანდელბროტის ფრაქტალური გეომეტრიის განვითარების შემდეგ, რომელმაც ფაზური სივრცის რთული სტრუქტურების გეომეტრიის რაოდენობრივი შეფასების შესაძლებლობა მოგვცა. ახალი მიდგომის ძირითადი იდეა იმაში მდგომარეობს, რომ ფაზური სტრუქტურების გეომეტრიული თვისებების რაოდენობრივი აღწერა ფაქტიურად იმ დინამიკის რაოდენობრივ აღწერას შეესაბამება, რომელმაც მოცემული სტრუქტურა წარმოქმნა ფაზურ სივრცეში [26].

როგორც ბოლო ათწლეულებში ჩატარებულმა გამოკვლევებმა ცხადყო, ბუნებრივი პროცესები დინამიკური თვალსაზრისით სირთულის სხვადასხვა ხარისხით ხასიათდებიან. ეს საკვებით ლოგიკურია იმის გათვალისწინებით, რომ დინამიკურ სირთულეს, პროცესების დროსა და სივრცეში ევოლუციის სპეციფიკას, ხარისხის მიხედვით განსხვავებული მიზეზ-შედეგობრივი კანონზომიერებები უდევთ საფუძვლად. ჩვეულებრივ ბუნებრივი პროცესების დინამიკა მიზეზ-შედეგობრივი თვალსაზრისით არც მთლიანად ცალსახაა (დეტერმინირებული) და არც მთლიანად შემთხვევითი (როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ მაღალგანზომილებიანი). შესაბამისად ბუნებრივი პროცესები დროსა და სივრცეში ევოლუციის წინასწარმეტყველების, პროგნოზის, შესაძლებლობის თვალსაზრისითაც განსხვავდებიან.

როგორც ეს ზემოთ იყო აღნიშნული, თანამედროვე შეხედულებით პროცესების მიმდინარეობის დინამიკურ სირთულეს იერარქიული ბუნება გააჩნია. კერძოდ, სრული დეტერმინიზმიდან სრულ სტოქასტურობამდე არსებობს (არსებობენ) გარკვეული შუალედური მდგომარეობა (მდგომარეობები), ე.წ. დინამიკური სტრუქტურა (სტრუქტურები). დინამიკური თვალსაზრისით არაპროგნოზირებადი მაღალგანზომილებიანი პროცესების სტრუქტურა შემთხვევით პროცესებთან ახლოს დგას, თუმცა მათ არ ემთხვევა [12].

მაღალგანზომილებიანი დინამიკური სისტემების არაშემთხვევითი ბუნება მახასიათებლების თვითმსგავსებაში ანუ მასშტაბურ ინვარიანტობაში, ალბათური განაწილების ხარისხობრივ, ხასიათში, დინამიკური მახასიათებლების ფრტაქტალურ განზომილებებში და ა. შ. ვლინდება. თვითმსგავსება ან მასშტაბური ინვარიანტობა არის წესრიგის გარკვეული ფორმა, რომელიც სხვადასხვა თვალსაზრისით რთულ სისტემებში ვლინდება. ასეთ სისტემებს არ გააჩნიათ მახასიათებელი სიგრძე ანუ მათი თვისებები განსხვავებულ (დროით და/ან სივრცულ) მასშტაბებზე ერთნაირია [13, 27].

მაღალგანზომილებიანი პროცესების დინამიკის დაწვრილებითი ანალიზის მნიშვნელობაზე მიუთითებს ისიც, რომ მათთვის დამახასიათებელი მასშტაბური ინვარიანტობა, რაოდენობრივი შეფასებისა და ურთიერთშედარებისას სერიოზულ სიძნელეებს აწყდება, ახასიათებს რა დინამიკური თვალსაზრისით ძალზე განსხვავებულ პროცესებს.

როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ, სადღეისოდ რთული ბუნებრივი თუ ტექნიკური სისტემების სრულყოფილი მათემატიკური მოდელირების პრობლემა საბოლოოდ არ არის გადაწყვეტილი, ამდენად მაღალგანზომილებიანი პროცესის დინამიკური თავისებურებების შესწავლის ერთ-ერთ გზას რეალურ მონაცემთა მასივის ანალიზი წარმოადგენს. კერძოდ, ბოლო წლებში განვითარებული დროითი სერიების ანალიზის არაწრფივი მეთოდები საშუალებას იძლევიან მოვახდინოთ შესასწავლი რთული პროცესის დინამიკის რეკონსტრუქცია ფაზურ სივრცეში ერთცვლადიანი სკალარული მონაცემების მასივების საშუალებით. ეს მეთოდები, თვითმსგავსების ზოგადი მახასიათებლების შეფასების უკვე ტრადიციული ხერხებისაგან განსხვავებით, საშუალებას იძლევიან თვისებრივად და რაოდენობრივად გავაანალიზოთ შესასწავლი პროცესის ფაზურ სივრცეში ასახული დინამიკა.

ბუნებრივ და ტექნიკურ სისტემებში მიმდინარე დინამიკური პროცესების თვისებრივი და რაოდენობრივი ანალიზის პრაქტიკული აუცილებლობა და ამ საკითხზე სადღეისოდ ჩვენთვის ხელმისაწვდომმა ლიტერატურული მონაცემების განხილვამ ცხადყო ჩვენი გამოკვლევის აქტუალობა, რომელიც მიზნად ისახავდა ზოგიერთი მაღალგანზომილებიანი პროცესის დინამიკური სირთულის თვისობრივ და რაოდენობრივ ანალიზს.

სადისერტაციო ნაშრომის ინტერდისციპლინარული ბუნებიდან გამომდინარე მაღალგანზომილებიანი დინამიკური სისტემის მასშტაბური ინვარიანტობის საკითხი შესწავლილ იქნა რამოდენიმე ბუნებრივი და ტექნიკური სისტემის მაგალითზე. კერძოდ, ჩუას წრედში კონდენსატორზე მოდებული ძაბვის ცვლილების დინამიკა, არათანაბარი ხახუნის და სეისმური პროცესის დინამიკური მახასიათებლები. რაც მთავარია დისერტაციაში შესწავლილ იქნა გარე მცირე ზემოქმედებით რთული პროცესის დინამიკური რეჟიმის მართვის საკითხები. ჩატარებულმა კვლევამ გამოავლინა შესწავლილი რთული სისტემების ქცევის მნიშვნელოვანი დინამიკური თავისებურებები. რაოდენობრივად იქნა ნაჩვენები ჩუას წრედში ძაბვის ცვლილების დაბალგანზომილებიანი ხასიათი, არათანაბარი ხახუნის მასშტაბური ინვარიანტობა, სეისმური პროცესის არაშემთხვევითი დინამიკური სტრუქტურა. რაც მთავარია, ლაბორატორიულ ექსპერიმენტში და ბუნებრივ საველე პირობებში დადასტურებული იქნა რთული დინამიკური სისტემის ქცევის მცირე ზემოქმედებებით მართვის შესაძლებლობა ადრე გამოთქმული მოსაზრება.

ამ საკითხების გამოკვლევასა და ყოველმხრივ შესწავლას აქვს დიდი სამეცნიერო და პრაქტიკული მნიშვნელობა.

თავი I

დინამიკური სირთულის ანალიზის მეთოდები

ანალიზის თანამედროვე წრფივი მეთოდები

დროითი სერიების ანალიზის თანამედროვე მეთოდთაგან მაღალგანზომილებიანი რთული პროცესების დინამიკის წრფივი მახასიათებლების შესაფასებლად გამოვიყენეთ სიმძლავრის სპექტრი, ავტოკორელაციის ფუნქცია, კვივლესური გარდაქმნა, სიმძლავრის სპექტრის რეგრესია, ჰარსტისა და ტრენდმოცილებული ფლუქტუაციების ანალიზი [28, 29, 30, 31, 48].

1.1 სიმძლავრის სპექტრი

საზოგადოდ, პროცესის ევოლუცია შეიძლება აღწერილი იქნას დროითი ან სიხშირული თვალსაზრისით. პირველ შემთხვევაში განიხილება რომელიმე h სიდიდის მყისიერი მნიშვნელობის (მყისიერი ამპლიტუდის) დროზე დამოკიდებულება $h(t)$. მეორე შემთხვევაში განიხილავენ იგივე სიდიდის გასაშუალოებული A ამპლიტუდის f სიხშირეზე დამოკიდებულებას $A(f)$. $h(t)$ და $A(f)$ ფაქტიურად ერთი და იგივე პროცესის დინამიკის ორი განსხვავებული წარმოდგენაა. ისინი ადვილად უკავშირდებიან ერთმანეთს ფურიეს გარდაქმნის მეშვეობით:

$$\begin{aligned} A(f) &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) e^{2\pi i f t} dt, \\ h(t) &= \int_{-\infty}^{+\infty} A(f) e^{-2\pi i f t} df, \end{aligned} \tag{1.1}$$

ზოგადად, ფურიეს გარდაქმნა არის პროცედურა, რომელიც რაიმე $h_i(t)$ სიდიდის უწყვეტი ან დისკრეტული მასივის ახალ $A_i(f)$ მასივში გადაყვანას აწარმოებს. აქ f – ფიზიკურად აუცილებლად სიხშირე არ არის, თუმცა მას, როგორც წესი, სწორედ სიხშირის სახით წარმოადგენენ. ასე რომ თუ t – წამებშია გაზომილი, მაშინ f -ის განზომილება იქნება ციკლი წამში ანუ ჰერცი. აუცილებელი არ არის მხოლოდ ამ ერთეულების გამოყენება. როგორც უკვე ითქვა, (1. 1) განტოლებები სხვა ერთეულებისათვისაც სამართლიანია. მაგ., თუ h მანძილის ფუნქციაა (გაზომილი მეტრებში), A ტალღის სიგრძის შებრუნებული

სიდიდის ფუნქცია იქნება (გაიზომება ერთ მეტრში ციკლების რაოდენობით) და ა. შ. (1. 1) განტოლებიდან ჩანს, რომ ფურიეს გარდაქმნა წრფივი ოპერაციაა, რაც ნიშნავს იმას, რომ სრულდება სუპერპოზიციის პრინციპი: ჯამის ფურიეს გარდაქმნა უდრის შესაკრებთა ფურიე გარდაქმნათა ჯამს.

ფურიეს ანალიზი, როგორც წრფივი ანალიზის ყველა სხვა მეთოდი, ეყრდნობა იმ დაშვებას, რომ განსახილავი სტაციონარული მონაცემთა მასივი შეიძლება დაიშალოს პერიოდული სიგნალების მიმდევრობად. ეს კარგად ჩანს (1.1) გამოსახულებიდან იმის გათვალისწინებით, რომ $\omega = 2\pi f$ და $e^{i\omega t} = \cos \omega t + i \sin \omega t$.

ფურიეს ანალიზის შედეგებს ხშირად, ე.წ. სიმძლავრის $P = \int_{-\infty}^{\infty} |A(f)|^2 df$

სიხშირეზე დამოკიდებულების სპექტრის სახით წარმოადგენენ. პარსევალის თეორემის თანახმად სიგნალის საერთო სიმძლავრე დროის და სიხშირის მიხედვით ერთნაირია და ასე გამოისახება:

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} |h(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |A(f)|^2 df. \quad (1. 2)$$

ცხადია, რომ P სიდიდე პირდაპირი აზრით სიმძლავრეს არ წარმოადგენს. მას ასე უწოდებენ (1. 2) გამოსახულების, ტალღის სიმძლავრესა და მისი ამპლიტუდის კვადრატს შორის არსებულ დამოკიდებულებასთან მსგავსების გამო. სპექტრული სიმძლავრე (ან სიმკვრივე) მოსახერხებელი სიდიდეა იმდენად, რამდენადაც A ხშირად კომპლექსურია. როგორც წესი, იკვლევენ, როგორია სპექტრის სიმძლავრე რაიმე სიხშირულ დიაპაზონში და პრაქტიკული საჭიროებებისათვის გამოთვლიან სიდიდეს:

$$P_n(f) = 2|A(f)|^2, \quad (1. 3)$$

რომელიც მოსახერხებელია სპექტრის ჰარმონიული კომპონენტების განაწილების გრაფიკული წარმოდგენისათვის.

პრაქტიკული თვალსაზრისით $h(t)$ ფუნქცია ჩვეულებრივ დისკრეტულია, რადგანაც მოცემულია დროის ტოლ ინტერვალებში აღებული ანათვლების ერთობლიობის სახით. ამიტომ, როგორც წესი, იყენებენ (1. 1) გარდაქმნის დისკრეტულ ანალოგს.

ვთქვათ მოცემულია დროის თანაბარ Δ ინტერვალების შემდეგ აღებული $h_k = h(t_k)$ ანათვლები, სადაც $t_k = k\Delta$ ($k = 0, 1, 2, \dots, N-1$). მაშინ (1. 1)

ინტეგრალის დისკრეტული ჯამის სახით აპროქსიმაციით მიიღება გამოსახულება:

$$A(f_n) = \sum_{k=0}^{N-1} h_k e^{2\pi i k n / N}, \text{ რომელსაც ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნა ეწოდება. ხო-}$$

ლო სიმძლავრის სპექტრი განისაზღვრება როგორც $P(f) = 2|A_n|^2$. შესაბამისი ფუ-

$$\text{რიეს შებრუნებული სწრაფი გარდაქმნით შეიძლება მივიღოთ } h_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{-2\pi i k n / N}$$

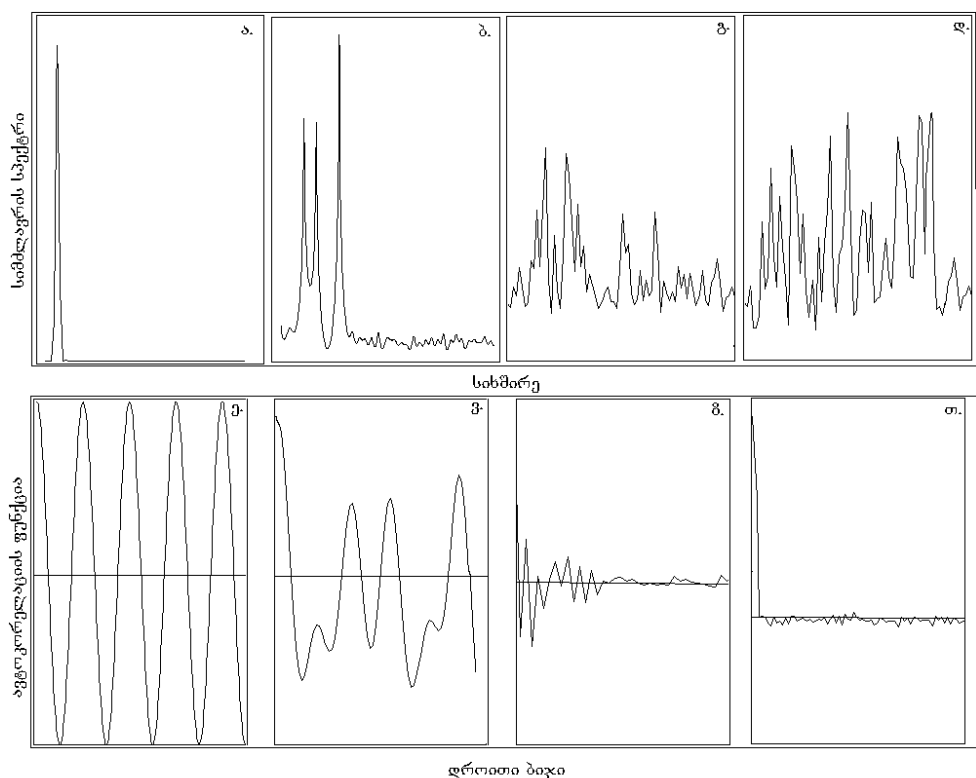
მნიშვნელობები.

ფურიეს გარდაქმნის შინაარსიდან გამომდინარე სასურველია ანათვლების რაოდენობა N საკმარისად დიდი იყოს, ხოლო Δ ბიჯი - რაც შეიძლება მცირე. გამოთვლების რეალური რაოდენობა ელემენტარული არითმეტიკული ოპერაციების უზარმაზარ რაოდენობას N^2 , საჭიროებს. ამდენად ფურიეს გარდაქმნა მნიშვნელოვან სიძნელეებთანაა დაკავშირებული. პრაქტიკაში ჩვეულებრივ სარგებლობენ ფურიეს სწრაფი გარდაქმნით, რომელიც იმ შემთხვევაში, თუ $N \sim 2^n$, სიმძლავრის სპექტრს გაცილებით უფრო მცირე, $N \log_2 N$, ოდენობის ოპერაციებით გამოითვლის.

ფურიეს სწრაფი გარდაქმნა გამოთვლების დროს მნიშვნელოვნად ამცირებს, თუმცა მას აქვს ზოგიერთი სპეციფიკური თავისებურება, რომელთა გათვალისწინება აუცილებელია განსაკუთრებით მაშინ, როცა საქმე ეხება რთულ დინამიკურ პროცესებს. კერძოდ, იმის გამო, რომ ანათვლები აიღება არა უწყვეტად, არამედ დისკრეტულად დროის რაიმე Δ შუალედში, იკარგება ინფორმაცია იმ სიხშირეების შესახებ, რომლებიც აღემატებიან ე.წ. ნაიკვისტის სიხშირეს

$$f_c = \frac{1}{2\Delta}. \text{ გარდა ამისა, როგორც ითქვა, გამოთვლებში მონაწილეობს დროითი}$$

სერიის მხოლოდ $N \sim 2^n$ (როგორც წესი, $N=1024$) წევრი. ამის გამო იკარგება დაბალი სიხშირეების ის ნაწილი, რომელიც $1/N\Delta$ -ზე მცირეა. ადგილი აქვს აგრეთვე განსახილავი მასივის სასრულობასთან დაკავშირებულ ე.წ. ჩამოჭრის ცდომილებას.



ნახ. 1.1 ტიპური სიმძლავრის სპექტრი და ავტოკორელაციის ფუნქცია (ა, ე) პერიოდული; (ბ, ვ) კვაზიპერიოდული; (გ, ზ) ქაოსური და (დ, თ) შემთხვევითი პროცესებისათვის.

ნახ. 1. 1 -ზე, ნაჩვენებია ტიპური სიმძლავრის სპექტრები პერიოდული, კვაზიპერიოდული, და აპერიოდული სიგნალებისათვის. კერძოდ, პერიოდული პროცესისათვის სპექტრის მთელი სიმძლავრე კონცენტრირებულია ვიწრო განცალკევებულ პიკში. სუბპარმონიული კვაზიპერიოდული პროცესისათვის სპექტრში გამოიყოფა პიკი ძირითად სიხშირეებზე და შედარებით მცირე პიკები სხვა სიხშირეებზე. უფრო რთული, ქაოსური და შემთხვევითი პროცესისათვის სიმძლავრის სპექტრს გამოყოფილი პიკები არ გააჩნია, იგი, როგორც ამბობენ, ფართოა.

1.2 ავტოკორელაციის ფუნქცია

ზოგადად, u და h ფუნქციებს შორის წრფივი კორელაცია ასე გამოისახება:

$$C(u, h) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t + \tau)h(t)dt. \quad \text{შესაბამისად, ფუნქციის თავის თავთან კორელაცია, ე.ი.}$$

ავტოკორელაცია, განისაზღვრება როგორც $C = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t + \tau)u(t)dt$. დისკრეტული

სახით ავტოკორელაციის ფუნქცია შემდეგი სახით მოიცემა:

$$C(t, \tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i(t)u_i(t + \tau), \quad (1.4)$$

შესწავლილი მონაცემთა მასივის მეზობელ წევრებს შორის წრფივი ურთიერთდამოკიდებულების გასაშუალოებული სურათის წარმოსადგენად გამოვითვლიდით ავტოკორელაციის ფუნქციას დისკრეტული სახით:

$$C(t, \tau) = \frac{\sum_{i=1}^N [u_i(t + \tau) - \bar{u}(t)][u_i(t) - \bar{u}(t)]}{\sum_{i=1}^N [u(t)_i - \bar{u}(t)]^2}, \quad (1.5)$$

სადაც u -თი აღნიშნულია ექსპერიმენტული ანათვლები, ხოლო τ დროითი ბიჯია.

სიმძლავრის სპექტრთან ერთად ავტოკორელაციის ფუნქციის გამოთვლა მონაცემთა მასივების ანალიზის ძალზე გავრცელებული და ინფორმატიული ხერხია. ფიზიკურად ავტოკორელაციის ფუნქცია წარმოადგენს დროითი სერიის წევრებს შორის წრფივი დამოკიდებულების ზომას. სხვაგვარად, იგი ავლენს პროცესის დროში ევოლუციის წრფივ თავისებურებებს.

თუ მონაცემთა მასივი დროის მიხედვით არ არის აღებული, შეიძლება ითქვას, რომ ავტოკორელაცია წარმოგვიდგენს გასაშუალოებულ სურათს იმისა, თუ როგორ იცვლება წრფივი ურთიერთდამოკიდებულება მონაცემთა მასივის ერთმანეთისაგან სულ უფრო დაშორებულ მეზობელ წევრებს შორის.

ავტოკორელაციის ფუნქცია ისევე, როგორც ფურიეს სპექტრი, არ არის საკმარისი დინამიკურად რთული არაწრფივი პროცესების ერთმანეთისაგან განსხვავებისა და რაოდენობრივი შეფასებისათვის. ეს იმითაა განპირობებული, რომ რთული პროცესების დროით სერიებში ცალკეულ მონაცემთა შორის წრფივი დამოკიდებულება, როგორც წესი, უმნიშვნელოა. ამის გამო სიმძლავრის სპექტრი

ფართოა, ხოლო $C(t, \tau)$ -ს მნიშვნელობა სწრაფად მცირდება, რის გამოც მათი საშუალებით დინამიკურად არსებითად განსხვავებული შინაგანად არაწრფივი პროცესების ერთმანეთისაგან გამორჩევა პრაქტიკულად შეუძლებელია [13, 24, 32].

1.3 ვეივლეტური გარდაქმნა

პროცესების წრფივი თავისებურებების შესასწავლად უფრო მოსახერხებელია დინამიკის დროით-სიხშირული წარმოდგენა, რისთვისაც გამოვიყენეთ ვეივლეტური გარდაქმნა ჰაარის ვეივლეტური ფუნქციებისათვის [33, 34, 35, 36].

მონაცემთა მასივის დროით-სიხშირული ანალიზი შეიძლება განხორციელდეს ფურიეს გარდაქმნით სიხშირის შემოსაზღვრული დიაპაზონებისათვის, ანუ ფანჯრებისათვის, (windowed Fourier transform) ან ე.წ. ვეივლეტების (Wavelet transformation) გარდაქმნის საშუალებით. სიხშირული ფანჯრებისათვის განხორციელებულ ფურიე გარდაქმნას ამ თვალსაზრისით უფრო იშვიათად მიმართავენ, რადგანაც დროში გარჩევის უნარის გაზრდის მიზნით სიხშირული დიაპაზონის შემცირება მეთოდის სიზუსტეს მკვეთრად ამცირებს.

ფურიეს სპექტრისაგან განსხვავებით ვეივლეტური გარდაქმნისას ფუნქციას მარტივი პერიოდული მდგენელების სუპერპოზიციით კი არ წარმოადგენენ, არამედ გარკვეული სიხშირული a -მასშტაბისა და t დროისათვის განსაზღვრული $\varphi_{ab}(t)$ -მოკლე ბაზისური ტალღების (ვეივლეტების) სახით. ვეივლეტური გარდაქმნა განისაზღვრება როგორც შესასწავლი $s(t)$ მასივისა და შერჩეული ვეივლეტის სკალარული ნამრავლი:

$$WT(a, b) = \langle s(t), \varphi_{ab}(t) \rangle. \quad (1.6)$$

ფურიეს გარდაქმნის ბაზისური ფუნქციებისაგან (სინუსებისა და კოსინუსებისაგან) განსხვავებით, რომლებიც სიხშირულად არიან ლოკალიზებული, ხოლო დროში არა, ვეივლეტური ფუნქციები ლოკალიზებულნი არიან როგორც

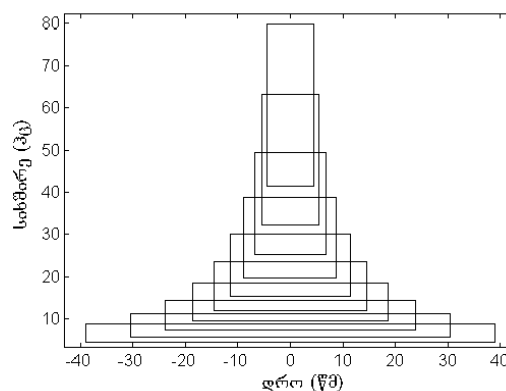
სიხშირულ, ასევე დროით დომენში. ამასთან ერთად ვეივლეტები უნდა იყვნენ ინტეგრირებადი ფუნქციები და მათი საშუალო მნიშვნელობები უდრიდნენ ნულს.

ვეივლეტური ფუნქციების მრავალი სახეობაა ცნობილი: ჰაარის, მორლის, მალატის, მაიერის, გაუსის წარმოებულები, დობეშის და ა. შ. (მაგალითისათვის იხ. ნახ. 1. 2).



ნახ 1.2 ვეივლეტის ზოგიერთი ტიპი

უნდა ითქვას, რომ ვეივლეტების შერჩევის რაიმე მკაცრი წესი არ არსებობს. ეს საკმაოდ დიდ სიძნელეს ქმნის მეთოდის გამოყენებისას და გარკვეული სუბიექტური ელემენტი შეაქვს მიღებულ შედეგებში. დროით-სიხშირულ სიბრტყეში ლოკალიზებული ვეივლეტი შეიძლება მართკუთხა ფანჯრების სახით წარმოვადგინოთ (ნახ. 1. 3). ამ ნახაზზე მართკუთხედის სიგრძე შეესაბამება დროში ვეივლეტის მიმდინარეობას (დროით მასშტაბს), ხოლო სიმაღლე სიხშირულ დიაპაზონს (სიხშირულ მასშტაბს). უნდა აღინიშნოს, რომ ვეივლეტის დროითი და სიხშირული ლოკალიზების გამო, აღნიშნული მართკუთხედების ფართობები ყველა დროითი და სიხშირული დიაპაზონისათვის ერთი და იგივეა. ასე რომ, ვეივლეტის დროითი მასშტაბის მოცემით მისი სიხშირული მასშტაბიც განსაზღვრულია. ანალიზს იწყებენ უდიდესი დროითი მასშტაბის მქონე, ე.წ. “დედა” ვეივლეტით. შემდეგ გადადიან “შვილობილ” ვეივლეტებზე, რომლებიც მიიღება დედა ვეივლეტის დროის მასშტაბის შემცირებითა და წანაცვლებით.



ნახ. 1.3 ლოკალიზებული ვეივლეტების დროით-სიხშირული წარმოდგენა

ვეივლეტური გარდაქმნის უპირატესობა იმაში მდგომარეობს, რომ, წარმოადგენს რა თავისებურ მათემატიკურ მიკროსკოპს, მისი საშუალებით იმ პროცესების განსხვავებაც კი შეიძლება, რომლებსაც ერთნაირი ფურიეს სპექტრი აქვთ. ეს მეთოდი მეტად სასარგებლოა დინამიკურად რთული პროცესების წრფივი თავისებურებების თვისებრივი შეფასების თვალსაზრისით.

1.4 სიმძლავრის სპექტრის რეგრესია

სიმძლავრის ფართო სპექტრის მქონე დინამიკურად რთული პროცესების წრფივი და არაწრფივი თვისებრივი მახასიათებლების, მათი პატერნების იდენტიფიცირების საკითხი აქტიური კვლევის საგანია. კერძოდ, არსებობენ გარკვეული პატერნების მქონე შემთხვევითი პროცესები, რომელთაც სრული შემთხვევითობისაგან, ე.წ. თეთრი ხმაურისაგან, გამოყოფენ „ფერი“: ვარდისფერი, რუხი და შავი. დინამიკური პროცესების აღნიშნული პატერნების არსებობა ბუნებრივ პროცესების ზოგად კანონზომიერებას წარმოადგენს და მისი შეფასება დროითი სერიების ანალიზის თანამედროვე მეთოდებითაა შესაძლებელი. ერთ-ერთი ამგვარ მეთოდთაგანია ფურიეს სიმძლავრის სპექტრის რეგრესიის გამოთვლა [37, 38, 39].

როგორც ცნობილია, თუ პროცესის მახასიათებლები ერთმანეთს ხარისხობრივი დამოკიდებულებით, $y = \beta(x)^\alpha$ უკავშირდება, მაშინ მას სხვადასხვა მასშტაბზე თვითმსგავსება ახასიათებს, ანუ პროცესი არის უმასშტაბო – ფრაქტალი. სიმძლავრის სპექტრში სპექტრალური სიხშირე (f), და ამ სიხშირის შესაბამისი სიმძლავრე $S(f)$ სწორედ ასეთი დამოკიდებულებით უკავშირდებიან $S(f) \propto \frac{1}{f^\alpha}$. ლოგარითმულ სკალაზე წრფივი რეგრესიით $\log S(f) - \log f$ დამოკიდებულების გრაფიკის დახრილობით გამოითვლება α ექსპონენტი.

ასეთ პროცესებს დინამიკურ ფრაქტალებს, $1/f^\alpha$ ტიპის სისტემებს (ან მოკლედ $1/f$ ხმაურს) უწოდებენ (ზოგჯერ მათ ფლიკერხმაურს უწოდებენ).

$\frac{1}{f^\alpha}$ გამოსახულებაში, სიმძლავრის სპექტრის რეგრესიის კოეფიციენტის, α - ს მნიშვნელობა განსაზღვრავს ხმაურის ტიპს (ანუ როგორც ზემოთ აღინიშნა, ფერს) [39].

როგორც აღინიშნა, ავტოკორელაციის ფუნქცია წარმოდგენას იძლევა დროითი სერიის მეზობელ წევრებს შორის წრფივი კორელაციების შესახებ. ამას სხვაგვარად მახლობელ კორელაციებს უწოდებენ. ამავე დროს მონაცემთა მასივში შეიძლება ადგილი ჰქონდეს ე.წ. შორეულ ანუ გრძელვადიან კორელაციებსაც. ეს იმას ნიშნავს, რომ კორელაციას ადგილი აქვს ერთმანეთისაგან ძალზე დაშორებულ წევრებს შორის მაშინაც კი, როდესაც ახლო მეზობლებს შორის წრფივი უთიერთკავშირი სუსტია.

გრძელვადიანი კორელაციების შესასწავლად სიმძლავრის სპექტრის რეგრესიასთან ერთად ჩვენ გამოვიყენეთ უფრო თანამედროვე წრფივი ტესტებიც, კერძოდ, მასშტაბირებული რანგებისა და ტრენდმოცილებული ფლუქტუაციების ანალიზი.

1.5 მასშტაბირებული რანგების ანალიზი: ჰარსტის ექსპონენტის გამოთვლა

მასშტაბირებული რანგების ანალიზის, ანუ ჰარსტის ექსპონენტის გამოთვლის მეთოდის ძირითადი პრინციპები შემუშავებული იქნა 50–60-იან წლებში, თუმცა ფართო გამოყენება მან უფრო მას შემდეგ მოიპოვა, როცა ცხადი გახდა რთული პროცესების შესაბამისი დროითი სერიების ფრაქტალური ბუნება, რაც მონაცემთა მასივების თვითმსგავსებაში და მასშტაბურ ინვარიანტობაში ვლინდება [40, 41].

ძირითადი იდეა მდგომარეობს იმის გარკვევაში, თუ როგორაა დამოკიდებული N რაოდენობის ანათვლების შემცველი მონაცემთა მასივის კუმულატიური ფლუქტუაციები ამავე მასივის შერჩეული ქვესიმრავლეების სიგრძეზე.

გამოთვლების თანმიმდევრობა ასეთია: თავდაპირველად გამოითვლება Δt დროის შუალედებში აღებული $x(t_i)$ მონაცემების მასივის საშუალო სიდიდე:

$$\bar{x}(\tau_{\max}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(t_i), \quad (1.7)$$

სადაც $\tau_{\max} = N_{\max} \Delta t$ დაკვირვების მთელი დროა. ამის შემდეგ გამოითვლიან კუმულატიურ გადახრებს საშუალო სიდიდიდან, მასივის დასაწყისიდან რაიმე $k \Delta t$ ინტერვალში (დროის განმავლობაში):

$$V(N, k) = \sum_{i=1}^k [x(t_i) - \bar{x}(\tau_{\max})], \quad (1.8)$$

სადაც, $0 < k \leq N$. შემდეგ ეტაპზე ვპოულობთ კუმულატიური გადახრის მინიმუმსა და მაქსიმუმს დროის τ ინტერვალის შიგნით და გამოვითვლით მათ სხვაობას:

$$R(\tau) = V_{\max} - V_{\min}. \quad (1.9)$$

გადახრების ნორმირება ხდება ყოველი τ პერიოდის შიგნით მოხვედრილი მონაცემებისათვის გამოთვლილი სტანდარტული დევიაციის $S(\tau)$ მნიშვნელობით:

$$S(\tau) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(t_i) - \bar{x}(\tau)]^2 \right\}^{1/2}. \quad (1.10)$$

ამის შემდეგ მასივის მთელი N სიგრძის ნაცვლად ვიღებთ მის ნაწილს, ვთქვათ $N = \frac{N_{\max}}{2}$, და ახალი $\tau = N \Delta t$ -სათვის გავიმეორებთ იგივეს და ა.შ. გამოთვლები

ჩატარდება τ -ს სულ უფრო მცირე მნიშვნელობებისათვის. ყოველი τ -სათვის გამოითვლება მასშტაბირებული რანგები $R/S = R(\tau)/S(\tau)$. შედეგები ერთნაირი τ -ებისათვის გასაშუალოვდება და აიგება მასშტაბირებული რანგების დროის შუალედზე (მასივის სიგრძეზე) დამოკიდებულების გრაფიკი.

ჰარსტმა აღმოაჩინა, რომ ხშირად სამართლიანია შემდეგი ემპირიული თანაფარდობა:

$$R/S = (\tau/2)^H, \quad (1.11)$$

სადაც H არის ჰარსტის მაჩვენებელი ან ექსპონენტა. მისი მნიშვნელობა იცვლება $[0, 1]$ შუალედში.

ჰარსტის ექსპონენტა გარკვეულ წარმოდგენას გვიქმნის შესასწავლი პროცესის ევოლუციის თავისებურებების შესახებ. ასე მაგალითად, $H = 0.5$, მნიშვნელობა შეესაბამება შემთხვევით პროცესს, $H > 0.5$ შეესაბამება ე.წ.

პერსისტენტულ პროცესს, ხოლო $H < 0.5$ შეესაბამება ანტიპერსისტენტულ პროცესს.

1.6 ტრენდმოცილებული ფლუქტუაციების ანალიზი

ტრენდმოცილებული ფლუქტუაციების ანალიზი ეყრდნობა ბ. მანდელბროტის მოსაზრებას იმის შესახებ, რომ თუ ობიექტი (აქ - დროითი სერია) თავის თავის მსგავსია, მაშინ განხილვის მასშტაბის შეცვლით, ანუ გადამასშტაბირებით უნდა მივიღოთ სტატისტიკურად მისივე მსგავსი ობიექტი. ეს მნიშვნელოვანია იმდენად, რამდენადაც აღნიშნული გადამასშტაბირებით შეიძლება გამოთვლილი იქნას ობიექტის მახასიათებელი მნიშვნელოვანი ინვარიანტი - მასშტაბირების ექსპონენტი [26, 42, 43].

ამ მოსაზრების თანახმად თვითმსგავსი, სტაციონარული დროითი სერია, რომელიც ხასიათდება გრძელვადიანი კორელაციებით, შეიძლება გადამასშტაბირდეს, აიჯამოს (ე.ი. გამსხვილდეს დროითი მასშტაბი), რაც ასევე მასშტაბურად ინვარიანტულ თვითმსგავს მიმდევრობას მოგვცემს. ამგვარი გადამასშტაბირების რამდენჯერმე განმეორება საშუალებას მოგვცემს განვსაზღვროთ მასშტაბური ინვარიანტობის ზომა, რაც რაოდენობრივ წარმოდგენას შეგვიქმნის ორიგინალური დროით სერიაში გრძელვადიანი კორელაციების შესახებ.

ანალიზის პროცესში პირველ რიგში ხდება მოცემული N სიგრძის $x_i(t)$ დროითი სერიის ინტეგრირება:

$$y(k) = \sum_{i=1}^k [x_i(t) - \bar{x}(t)]. \quad (1.12)$$

ამის შემდეგ აჯამებული დროითი სერია დაიყოფა თანაბარი n -სიგრძის უბნებად ანუ ბოქსებად. ყოველი ბოქსისთვის უმცირეს კვადრატთა მეთოდით გამოითვლება ლოკალური ტრენდი. ცალკეული ბოქსისათვის ტრენდის y კოორდინატა აღინიშნება $y_n(k)$ -თი. ამის შემდეგ ხდება ტრენდის მოცილება აჯამებული დროითი სერიიდან $y(k)$, ლოკალური ტრენდის $y_n(k)$ გამოკლებით. მიღებული

ინტეგრირებული და ტრენდმოცილებული დროითი სერიის ყოველი n სიგრძის ბოქსისათვის გამოითვლება ფლუქტუაციის მახასიათებელი სიდიდე:

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - y_n(k)]^2} \quad (1.13)$$

ამის შემდეგ აგებენ (1. 13) სიდიდის ბოქსის სიგრძეზე დამოკიდებულების გრაფიკს. ორმაგ ლოგარიტმულ სკალაზე წრფივი დამოკიდებულების არსებობა მიუთითებს განსახილავ მასივში თვითმსგავსების, მასშტაბური ინვარიანტობის არსებობაზე. სხვანაირად, ფლუქტუაციები მცირე ზომის ბოქსებში დაკავშირებული არიან ფლუქტუაციებთან დიდი ზომის ბოქსებში ხარისხობრივი ფუნქციით. $\log F(n) - \log n$ დამოკიდებულების დახრის კუთხე განსაზღვრავს მასშტაბური ინვარიანტობის ექსპონენტას - α .

დროითი სერიისათვის, სადაც ცალკეული მონაცემები ერთმანეთთან სრულიად არაკორელირებულია, მაგ., თეთრი ხმაურის შემთხვევაში $\alpha = 0.5$.

პერსისტენტულ გრძელვადიან კორელაციებს შეესაბამება $0.5 < \alpha < 1$, ხოლო ანტიპერსისტენტულს $0 < \alpha < 0.5$. $\alpha = 1$ შეესაბამება $1/f$ ტიპის ხმაურს. როცა $\alpha > 1$ მონაცემთა მასივში კორელაციები კვლავ არსებობენ, მაგრამ აღარ აღიწერებიან ხარისხობრივი დამოკიდებულებით. $\alpha \geq 1.5$ მიუთითებს მონაცემთა მასივში რუხი ხმაურის არსებობაზე, რომელიც წარმოადგენს თეთრი ხმაურის ინტეგრირების შედეგს. აქვე დავამატებთ, რომ ისევე, როგორც ეს უკვე ითქვა ჰარსტის მაჩვენებლისათვის, α ექსპონენტაც შეიძლება განვიხილოთ, როგორც მონაცემთა მასივის ხაოიანობის მაჩვენებელი, დროითი სერიის სიგლუვე კი დეტერმინიზმის ნიშანია.

თავი II

დროითი სერიების ანალიზის არაწრფივი მეთოდები

სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი მიზნებიდან გამომდინარე მაღალგანზომილებიანი სისტემების მასშტაბური ინვარიანტობისა და დინამიკური სტრუქტურის კვლევის მიზნით გამოვიყენეთ მონაცემთა ანალიზის ზოგიერთი თანამედროვე არაწრფივი მეთოდები: მაგ. მცდარი უახლოესი მეზობლების ანალიზის, ლიაპუნოვის ექსპონენტის გამოთვლის, შენონის ენტროპიის, კორელაციური, განმასხვავებელი არაწრფივი სტატისტიკის და რეკურენტული რაოდენობრივი ანალიზის მეთოდები.

ზოგადად ჩვენს მიერ განხილული დროითი სერიები მონაცემთა სკალარულ მასივებს წარმოადგენენ. ამიტომ საუბარს დავიწყებთ შესასწავლი პროცესის დინამიკის რეკონსტრუქციის ე.წ. ჩაშენებისა და დროითი შეყვანების მეთოდებით [24, 44, 45, 48].

2.1 ფაზურ სივრცის რეკონსტრუქცია შეყვანების მეთოდით

შეყვანების მეთოდი იმაში მდგომარეობს, რომ ანათვლების დროში სიახლოვით განპირობებული დამახინჯების თავიდან აცილების მიზნით ფაზური პორტრეტის აგებისათვის გამოიყენებენ არა ყოველ მომდევნო ან ერთმანეთთან სიშორის გამო დაუკავშირებელ, არამედ ე.წ. შეყვანების T დროით დაშორებულ მონაცემებს. T ისე უნდა შეირჩეს, რომ საკმარისად დიდი იყოს, რათა გამოირიცხოს ანათვლების დროში სიახლოვით გამოწვეული ურთიერთდამოკიდებულების ილუზია. ამავე დროს იგი არც იმდენად დიდი უნდა იყოს, რომ ცალკეული ანათვლები ერთმანეთისაგან სტატისტიკურად სრულიად დამოუკიდებელნი გახდნენ. თუ ეს პირობა დაკმაყოფილდა, დროითი სერიის მონაცემების საფუძველზე რაიმე d -განზომილებიან სივრცეში აიგება d განზომილების მქონე ვექტორები:

$$\vec{X}(i) = [x(i), x(i+T), x(i+2T), \dots, x(n+(d-1)T)], \quad (2.1)$$

რომლებიც შემოწერენ ტოპოლოგიურად ორიგინალური პროცესის ატრაქტორის ეკვივალენტურ ფაზურ პორტრეტს.

ფაზური პორტრეტის რეკონსტრუირების ხარისხი ბევრადაა დამოკიდებული T -ს შერჩევაზე. არსებობს შეყვანების T დროის შერჩევის რამდენიმე გზა. ჩვენ გამოვიყენეთ ავტოკორელაციის ფუნქციის პირველი ნულოვანი გადაკვეთის ან პირველი მინიმუმის მოძებნის ხერხი. ამისათვის გამოითვლებოდა დროითი ბიჯის τ მნიშვნელობა, რომლისთვისაც განსახილავი დროითი სერიის ავტოკორელაციის ფუნქცია პირველად გახდება ნულის ტოლი ან ნულზე ნაკლები. დროის ეს შუალედი, რომელსაც კორელირების დროსაც უწოდებენ, არის დრო (ან მანძილი მონაცემებს შორის), რომლისთვისაც მასივის განზოგადოებული საშუალო მონაცემი კორელაციაშია მომდევნო მონაცემთან [12, 24, 29, 46].

2.2 ჩაშენების სივრცის შერჩევა

Whitney-ს თეორემის თანახმად ჩაშენების, ანუ დინამიკური სტრუქტურის ფაზურ სივრცეში დაუმახინჯებლად განთავსების პირობაა $d_e \geq 2d_a + 1$, სადაც, d_e ჩაშენების სივრცის განზომილებაა, ხოლო d_a - ატრაქტორისა. ცხადია, რომ d_a ყოველთვის წინასწარ არ იქნება ცნობილი. d_e -ს ანუ ჩაშენების სივრცის განზომილების დადგენის მეთოდები სისტემის ინვარიანტების გაჯერების იდეას ეფუძნებიან. ისინი დინამიკური სისტემის ატრაქტორის ისეთ ევკლიდურ სივრცეში ჩაშენებას, გაშლას გულისხმობენ, რომ რეკონსტრუირებული ტრაექტორიებისათვის გამოთვლილი ინვარიანტები (მაგ., ლიაპუნოვის ექსპონენტები ან ფრაქტალური განზომილებები), არ იცვლებოდნენ d_e -ს გაზრდასთან ერთად. სხვანაირად რომ ვთქვათ, ჩაშენების სივრციდან დაწყებული საძიებელი ატრაქტორის ინვარიანტული მახასიათებლები გაჯერებული უნდა იყვნენ უფრო მეტი განზომილების მქონე სივრცეებში. ამიტომ შეარჩევნ როდელიმე d_e -ს და მისთვის გამოითვლიან ატრაქტორის როდელიმე ინვარიანტს. შემდეგ d_e -ს ერთით გაზრდიან და თავიდან

გამოთვლიან ინვარიანტის მნიშვნელობას. ამ პროცესს გააგრძელებენ მანამდე, სანამ ჩაშენების სივრცის განზომილების ზრდით ინვარიანტის მნიშვნელობის ცვლილება არ შეწყდება. რაც შეეხება ჩაშენების სივრცის განზომილებას, მისი გამოთვლისას გამოიყენებენ ატრაქტორის რომელიმე ინვარიანტს ან ატრაქტორის წერტილებს შორის მანძილებზე დამოკიდებულ რომელიმე ფუნქციებს [12, 47].

ჩაშენების სივრცის განზომილების შინაარსიდან გამომდინარე მისი სწორად შერჩევისას ატრაქტორის წერტილებს შორის მანძილებზე დამოკიდებული ფუნქციები (მაგ., კორელაციური ინტეგრალის, $\log[C_q(r)]$, მანძილზე $\log(r)$,

დამოკიდებულების გრაფიკის დახრილობა: $d_a = \frac{\log[C_q(r)]}{\log(r)}$) არ უნდა იცვლებოდეს

d_e -ს ზრდის კვალობაზე. როგორც ითქვა, შესასწავლი სისტემის სწორად შერჩეულ ჩაშენების განზომილებად იღებენ d_e -ს იმ მნიშვნელობას, რომლის გაზრდის შემდეგ დახრილობა აღარ შეიცვლება.

შემთხვევითი პროცესისათვის ამგვარ გაჯერებას ადგილი არ აქვს და კორელაციური ინტეგრალის მნიშვნელობა განუწყვეტლივ იზრდება ჩაშენების განზომილების ზრდასთან ერთად. ამდენად, შემთხვევითი პროცესისათვის ჩაშენების სივრცის განზომილება უსასრულოდ დიდია.

2.3 მცდარი უახლოესი მეზობლების ანალიზი

მცდარი უახლოესი მეზობლების (false nearest neighbors – FNN) ანალიზის მეთოდის არსი იმაში მდგომარეობს, რომ ვიპოვოთ d -განზომილების მქონე ისეთი სივრცე, რომელშიც გამორიცხული იქნება ატრაქტორის ტრაექტორიების ურთიერთგადაკვეთა დაბალი განზომილების სივრცეში ჩაშენების გამო. თუ d საკმაოდ დიდი არ იქნება, წერტილები, რომლებიც სინამდვილეში ერთმანეთისაგან

დაშორებული არიან, რეკონსტრუირებულ სივრცეში ერთმანეთთან ახლო აღმოჩნდებიან; ერთმანეთისათვის ისინი იქნებიან მცდარი უახლოესი მეზობლები.

ასეთი მეზობლობის გამოსარიცხავად უნდა დავადგინოთ, რამ განაპირობა მათი სიახლოვე, პროცესის დინამიკურმა თავისებურებამ, თუ ატრაქტორის არასაკმარისი განზომილების სივრცეში რეკონსტრუირებამ. ამისათვის უნდა გავზარდოთ ჩაშენების სივრცის განზომილება. ვთქვათ d - განზომილების რეკონსტრუირებულ სივრცეში რაიმე $\vec{y} = [s_n s_{n+T} s_{n+2T} \dots s_{n+(d-1)T}]$ ვექტორის უახლოესი მეზობელია $\vec{y}^{NN} = [s_n^{NN} s_{n+T}^{NN} \dots s_{n+(d-1)T}^{NN}]$ ვექტორი. აქ $\vec{y}^{NN}$ -ით, $\vec{y}$ ვექტორის უახლოესი მეზობელია აღნიშნული (nearest neighbour – NN). ამ ვექტორებს შორის ევკლიდური მანძილი ასე გამოითვლება:

$$R_n^2(d) = \sum_{j=1}^d (s_{n+(j-1)T}^{NN} - s_{n+(j-1)T})^2.$$
 იგულისხმება, რომ ეს საკმარისად მცირე მანძილია. $d+1$ განზომილების სივრცეში ხსენებულ ვექტორებს შორის მანძილი შემდეგი გამოსახულებით მოიცემა

$$R_n^2(d+1) = \sum_{i=1}^{d+1} (s_{n+(i-1)T}^{NN} - s_{n+(i-1)T})^2; \quad (2.2)$$

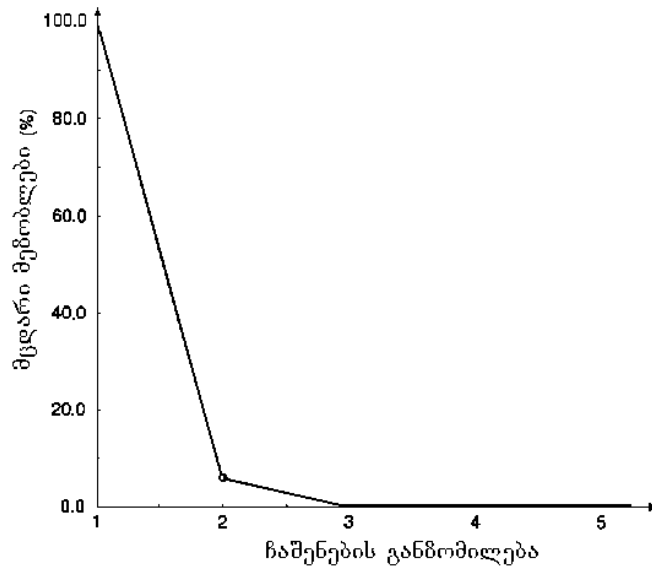
სხვაგვარად, იგი ასეც შეიძლება ჩავწეროთ:

$$R_n^2(d+1) = R_n^2(d) + (s_{n+Td}^{NN} - s_{n+Td})^2. \quad (2.3)$$

თუ $R_n(d+1)$ მეტია $R_n(d)$ -ზე, შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ $\vec{y}$ და $\vec{y}^{NN}$ ვექტორები d -განზომილებიან სივრცეში მცდარი მეზობლები არიან. პრაქტიკული გამოთვლებისათვის შეარჩევნ რაიმე ზღურბლს R_T , და $\vec{y}$, $\vec{y}^{NN}$ ვექტორების მცდარ მეზობლობაზე მსჯელობენ იმ შემთხვევაში, თუ სრულდება უტოლობა:

$$\frac{|s_{n+Td}^{NN} - s_{n+Td}|}{R_n(d)} > R_T. \quad (2.4)$$

ზღურბლის მნიშვნელობას აიღებენ $10 \leq R_T \leq 50$ ფარგლებში. როგორც წესი, ითვლიან მცდარი მეზობლების პროცენტულ რაოდენობას ჩაშენების სივრცის განზომილების ცვლილების მიხედვით (ნახ. 2. 1).



ნახ. 2. 1 მცდარი უახლოესი მეზობლების პროცენტული რაოდენობის დამოკიდებულება ჩაშენების განზომილებაზე ლორენცის ატრაქტორისათვის

სკალარული დროითი სერიის საფუძველზე რთული დინამიკური პროცესის ფაზურ სივრცეში სრულყოფილად ჩასაშენებლად შეარჩევნ იმ სივრცის განზომილებას, რომლისთვისაც მცდარი მეზობლების რაოდენობა ნულამდე მცირდება. ნახ. 2. 1 –ზე ლორენცის ატრაქტორისათვის მცდარი მეზობლების რაოდენობა ნული ხდება სამგანზომილებიანი სივრცისათვის. ეს ნიშნავს იმას, რომ ლორენცის ატრაქტორისათვის ჩაშენების სივრცის განზომილება $d_e = 3$. თუ გავიხსენებთ, რომ ჩაშენების თეორემის $d_e \geq 2d_a + 1$ პირობის მიხედვით ლორენცის ატრაქტორისათვის $d_e = 5$, ცხადი გახდება, თუ რამდენად დაზოგავს გამოთვლების დროს ამ მეთოდის გამოყენება.

ზემოთთქმული შეეხება ხმაურისაგან თავისუფალ დროით სერიებს. ხმაურის არსებობის პირობებში მიღებულია შემდეგი კრიტერიუმის გამოყენება:

$$\frac{R_n(d+1)}{R_A} \geq 2, \quad (2.5)$$

სადაც $R_A^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (s_n - s_{av})^2$, აქ $s_{av} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s_n$, დროითი სერიების ანათვლების

(ფაქტიურად ვექტორის კოორდინატების) საშუალოა, ხოლო R_A ატრაქტორის ზომაა (იგულისხმება ხაზოვანი ზომა და არა განზომილება), რომელიც არ შეიცვლება ჩაშენების სივრცის გაზრდით.

უნდა აღინიშნოს, რომ არსებობენ ჩაშენების სივრცის განზომილების დადგენის სხვა მეთოდებიც მაგ., შევსების ფაქტორის მეთოდი, მაგრამ გამოყენებითი თვალსაზრისით ისინი საკმაოდ მოუხერხებელნი არიან და ძირითადად ხმაურისაგან თავისუფალი მოდელური დროითი სერიებისათვის არიან გათვალისწინებული. ასე რომ, ყველაზე ფართოდ სწორედ ზემოთ განხილული მეთოდები გამოიყენებიან [48].

2.4 ფაზური პროტრეიტის რეკონსტრუირების მრავალცვლადიანი მეთოდი

ზემოთ თქმული შეეხებოდა ერთცვლადიან სკალარულ დროით სერიებს. შესასწავლი რთული პროცესების ფაზური პროტრეიტის რეკონსტრუირებისათვის ჩვენ აგრეთვე გამოვიყენეთ დინამიკის შესაბამისი გეომეტრიული სტრუქტურის წარმოდგენის მრავალცვლადიანი (მულტივარიატული) მეთოდი. ეს იმითაც იყო განპირობებული, რომ ფაზური პროტრეიტის ასაგებად საჭიროა უზრუნველყოფილი იქნეს ფაზურ სივრცეში ფაზური წერტილების აუცილებელი სიმკვრივე, რაც მონაცემთა პირველადი მასივის საკმაოდ (ზოგჯერ კი არარეალურად) დიდ სიგრძეს მოითხოვს [13, 49].

ზემოთ აღწერილი ერთგანზომილებიანი, სკალარული დროითი სერიიდან შეყვანების მეთოდით ფაზური სივრცის რეკონსტრუირება, ძირითადად მარტივი დაბალგანზომილებიანი პროცესებისთვისაა გათვალისწინებული. დაბალგანზომილებიანი ეწოდება დინამიკას, რომლის ფრაქტალური განზომილება 5-ს არ აღემატება, რაც, მცირე გამონაკლისის გარდა, ძირითადად მათემატიკურ მოდელებს ახასიათებს. მათემატიკური მოდელებისაგან განსხვავებით რეალური გაზომვების მასივის სიგრძე გასაგები მიზეზების გამო საკმაოდ შეზღუდულია. მეორე მხრივ, როგორც ირკვევა, რეალური ბუნებრივი პროცესების განზომილება ხშირად დაბალი განზომილების ზღვარზე ბევრად მაღალია და ზოგჯერ 10-ს აღემატება. ასეთი რთული პროცესების დინამიკის დახასიათებისათვის აუცილებელი სიგრძის რეალური დროითი სერიები, როგორც წესი, არ არსებობენ. ეს ზოგჯერ შეუძლებელს ხდის

დინამიკური პროცესების შესასწავლად ერთგანზომილებიანი დროითი სერიების გამოყენებას. აღნიშნული პრობლემა შეიძლება გადაწყდეს დინამიკური პროცესის ფაზური პორტრეტის რეკონსტრუირების მრავალცვლადიანი მეთოდის გამოყენებით.

ტაკენსის ერთი ცვლადის მონაცემთა სკალარული სერიით რეკონსტრუირების მეთოდისაგან განსხვავებით, მრავალცვლადიანი მეთოდის გამოყენებისას ჩაშენების განზომილება, m , წინასწარაა განსაზღვრული; იგი შეესაბამება არსებული შედარებით მოკლე მასივების რაოდენობას. ე.ი. იმდენ განზომილებიან სივრცეში შეიძლება მოხდეს რეკონსტრუირება, რამდენიც ცალკე აღებული მოკლე სერია გვაქვს.

ჩვენ გამოვიყენეთ მრავალცვლადიანი რეკონსტრუირების ორი ცნობილი ვარიანტი [49]:

1. მოკლე დროითი სერიების „გადაკერების“ გზით ერთი საკმარისი სიგრძის დროითი სერიის მიღება. ასეთ სერიას განიხილავენ ჩვეულებრივ ერთგანზომილებიან მონაცემთა მიმდევრობად და ფაზურ სივრცეს აგებენ ტაკენსის უკვე აღწერილი მიდგომის შესაბამისად. ფაქტიურად ამ გზით ხდება მრავალცვლადიანი მიდგომის ერთცვლადიანზე ხელოვნური დაყვანა. ეს მარტივი ხერხი საკმაოდ საიმედო შედეგებს იძლევა, რომლებიც მცირედ განსხვავდებიან სხვა მეთოდებით მიღებული შედეგებისაგან.

2. ყოველი მოკლე სერიის თითოეული მონაცემი განიხილება როგორც m - განზომილებიანი ფაზური სივრცის i -ური კოორდინატი. ან უფრო მარტივად, m - განზომილებიანი სივრცის ყოველ ღერძზე აიღება რომელიმე ერთი მოკლე სერიის მონაცემები, რაც საშუალებას იძლევა მივაღწიოთ მაღალი განზომილების ფაზურ სივრცეებში ფაზური წერტილების საკმარის სიმკვრივეს.

უნდა აღინიშნოს რომ მრავალცვლადიანი რეკონსტრუირების მეთოდით აგებული ფაზური პორტრეტი უფრო სრულად ასახავს შესასწავლი პროცესის დინამიკურ სტრუქტურას და ერთცვლადიან რეკონსტრუირებასთან ერთად ფართოდ გამოიყენება.

2.5 ლიაპუნოვის ექსპონენტის გამოთვლა

მაღალგანზომილებიანი რთული პროცესების რეკონსტრუირებულ ფაზურ სივრცეში ფაზური წერტილების ევოლუციის შესასწავლად გამოვიყენოთ ლიაპუნოვის მაქსიმალური ექსპონენტის, λ , გამოთვლის მეთოდი. მეთოდის ძირითადი იდეა მდგომარეობს რთული პროცესებისათვის დამაასიათებელი, საწყის პირობებზე ძლიერი დამოკიდებულებით გამოწვეული, ფაზური ტრაექტორიების სწრაფი დაშორიშორების რაოდენობრივ შეფასებაში [50, 51]. ზოგადად:

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} \log |f'(x_i)|. \quad (2.6)$$

ამ გამოსახულებიდან კარგად ჩანს, რომ ლიაპუნოვის ექსპონენტა იძლევა მთელ ფაზურ სივრცეზე გასაშუალოებული ტრაექტორიების დაშორიშორების საშუალო სისწრაფეს იტერაციის (დროის) ერთეულში. მისი ერთეულია ბიტი/წმ ან ბიტი იტერაციის ერთეულზე.

უფრო ზოგადად, d -განზომილებიან ფაზურ სივრცეში რომელიმე დინამიკური სისტემის უახლოეს ტრაექტორიებს შორის $\vec{\xi}_{n+1} = F(\vec{\xi}_n)$ ტანგენციური ვექტორით მოცემული მანძილის ევოლუცია გაწვრივებული სახით ასე გამოისახება $\dot{\xi} = T(x(t))\xi$, სადაც $T = DF = \partial F / \partial x$ არის F -ის იაკობიანი. მისი ამოხსნები მოიცემა $\xi(t) = A' \xi(0)$ სახით. აქ A' არის წრფივი ოპერატორი, რომელიც ტანგენციურ ვექტორს $\vec{\xi}(0)$ -ს გარდაქმნის $\vec{\xi}(t)$ -ში. ტანგენციური ვექტორის დივერგენციის საშუალო ექსპონენციალური სიჩქარე განისაზღვრება, როგორც [23, 53]:

$$\lambda(x(0), \xi(0)) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \frac{\|\xi(t)\|}{\|\xi(0)\|}. \quad (2.7)$$

ამის შემდეგ $\vec{\xi}(0)$ -ის d -განზომილებიანი ბაზისური ვექტორების მნიშვნელობების მიხედვით გამოითვლება ლიაპუნოვის ექსპონენტების შესაბამისი მნიშვნელობები $\lambda_i(\vec{x}(0)) \equiv \lambda(\vec{x}(0), \vec{e}_i)$, რომლებიც ქმნიან განსახილავი დინამიკური პროცესის ლიაპუნოვის ექსპონენტების სპექტრს $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_d$ [52].

რეალური პროცესების განხილვისას, როგორც წესი, უცნობია სისტემის აღმწერი არაწრფივ განტოლებათა სისტემები, ამდენად ლიაპუნოვის ექსპონენტების გამოთვლა აღწერილი გზით ვერ ხერხდება. ბოლო ათწლეულის განმავლობაში არაერთი მეთოდი იქნა შემუშავებული, რომელიც λ ექსპონენტების ექსპერიმენტული მონაცემების დროითი სერიიდან გამოთვლის საშუალებას იძლევა. ჩვენი ანალიზისათვის გამოვიყენეთ Wolf-ის მიერ შემუშავებული ალგორითმი [17, 53, 54].

თუ $\lambda < 0$ დროის განმავლობაში ხდება მეზობელი ტრაექტორიების ექსპონენციური დაახლოება ეს ნიშნავს, რომ სისტემას გააჩნია ატრაქტორი ფიქსირებული წერტილის სახით. თუ $\lambda = 0$, სისტემა ფაზურ სივრცეში სტაბილური ზღვრული ციკლისაქნ მისწრაფვის. დადებითი ლიაპუნოვის კოეფიციენტი ($0 < \lambda < \infty$) მიუთითებს იმაზე, რომ მეზობელი ფაზური ტრაექტორიები ექსპონენციურად შორდებიან ერთმანეთს. თუ $\lambda \rightarrow \infty$, საქმე გვაქვს ხმაურთან [12, 55].

ლიაპუნოვის ექსპონენტების საშუალებითაც შეიძლება გამოვვალოთ დროის ის T_p შუალედი, რომლისთვისაც დინამიკურად შედარებით მარტივი სისტემებისათვის პროგნოზირება შესაძლებელია,

$$T_p = \frac{1}{\lambda} \log\left(\frac{1}{l}\right), \quad (2.8)$$

სადაც l , საწყისი მდგომარეობის განსაზღვრის სიზუსტეა.

ფაზურ სივრცეში სისტემის ევოლუციის შესწავლა პროცესის დინამიკის შესახებ აუცილებელ, მაგრამ არასაკმარის ინფორმაციას გვაწვდის. ეს იმითაა განპირობებული, რომ ატრაქტორი გეომეტრიული სტრუქტურის სახით მოცემული პროცესის დინამიკაა და ამდენად მისი (დინამიკის) სრული დახასიათებისათვის აუცილებელია ფაზურ სივრცეში ფაზური წერტილების განაწილების სტატისტიკური თვისებების (გეომეტრიული განზომილების) შესწავლა.

ზოგადად, ატრაქტორის განზომილება წარმოდგენას გვიქმნის სისტემის აქტიური თავისუფლების ხარისხების შესახებ. ატრაქტორის განზომილების გამოთვლის მრავალი მეთოდი არსებობს, რომელთაგან ჩვენ ამ სადისერტაციო ნაშრომში ინფორმაციული და კორელაციური განზომილების გამოთვლის მეთოდები გამოვიყენეთ.

2.6 შენონის ენტროპია და ინფორმაციული განზომილება

თილერის მიერ მოდიფიცირებული ბალატონისა და რენის ინფორმაციული განზომილების კონცეფცია იმაში მდგომარეობს, რომ უნდა გაირკვეს, თუ რამდენი ნამდვილი რიცხვი, ან ინფორმაციის რამდენი ბი-ტია საჭირო, რათა ფაზური სივრცის წერტილის მდებარეობა საჭირო სიზუსტით აღიწეროს. მაგ., წრფის წერტილის მდებარეობა ერთი რიცხვით აღიწერება, სიბრტყისა - ორით, სამგანზომილებიანი სივრცის - სამით და ა. შ. ისევე როგორც ბოქსების დათვლის ალგორითმში ტევადობით განზომილების გამოთვლისას, აქაც გამოსაკვლევი ფაზური სივრცის წერტილების სიმრავლეს წიბოს r სიგრძის მქონე N კუბებით დაფარავენ. ზოგადად, d -განზომილებიან სივრცეში ერთეულოვანი d -განზომილებიანი ჰიპერკუბების მდებარეობის r -სიზუსტით დასახასიათებლად აუცილებელია ინფორმაციის $S(r) = -d \log_2(r)$ ბიტი. ამის გათვალისწინებით სიმრავლის ინფორმაციული განზომილება მოიცემა როგორც $\frac{S(r)}{\log_2 r}$, სადაც $S(r)$ ინფორმაციის ბიტების ის რაოდენობაა, რომელიც აუცილებელია, რათა d -განზომილების მქონე ფაზური სივრცის წერტილების მდებარეობა r სიზუსტით აღიწეროს. ზღვარში ეს სიდიდე ასეთ სახეს მიიღებს [56, 57]:

$$D_I = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{S(r)}{\log_2 r}. \quad (2.9)$$

ვთქვათ, N_0 არის ფაზურ სივრცეში ატრაქტორის წერტილების სიმრავლე, N_i არის ბოქსების საერთო, N , რაოდენობიდან თითოეულში მოხვედრილი წერტილების რაოდენობა (ცხადია, რომ $N_0 \neq N$), მაშინ $P_i = \frac{N_i}{N_0}$ არის ფაზური

წერტილის i ბოქსში აღმოჩენის ალბათობა და $\sum_{i=1}^N P_i = 1$. იმის გათვალისწინებით,

რომ შენონის ფორმულის თანახმად ინფორმაციული ენტროპია:

$$S(r) = -\sum_{i=1}^N P_i \log_2 P_i, \quad (2.10)$$

ფორმულის საბოლოო სახე ასეთია:

$$D_I = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sum_i P_i \log_2 P_i}{\log_2 r}. \quad (2.11)$$

ატრაქტორზე ერთგვაროვნად განაწილებული წერტილების სიმრავლისათვის $D_I = D_B$. მართლაც, თუ წერტილები ფაზურ სივრცეში ერთგვაროვნადაა განლაგებული, $P_i = \frac{1}{N}$ და $S(r) = -\sum_{i=1}^N \frac{1}{N_i} \log_2 \frac{1}{N_i} = \log N_i$, აქედან გამომდინარე,

$$D_I = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N_i}{\ln \frac{1}{r}} = D_B.$$

სხვა შემთხვევაში $D_I < D_B$. ზემოთხსენებული ინფორმაციული ენტროპია სისტემის პროგნოზირებადობას ახასიათებს. როცა წერტილის რომელიმე ბოქსში მოხვედრა თანაბარ ალბათურია, ე.ი. თუ $N_i = \frac{1}{N}$, ინფორმაციული ენტროპია მაქსიმალურია და სისტემა არაპროგნოზირებადია. თუკი ატრაქტორის ყველა წერტილი ერთ ბოქსშია თავმოყრილი, $I = 0$, და სისტემა მაქსიმალურად პროგნოზირებადია.

2.7 კორელაციური განზომილება

კორელაციური ინტეგრალის გამოთვლის ალგორითმი ემყარება ატრაქტორის ფიქსირებული ზომის სფეროებით დაფარვის იდეას. ალგორითმის არსი იმაში მდგომარეობს, რომ გამოითვლება ატრაქტორის თითოეული წერტილის ირგვლივ შემოხაზული r რადიუსის n -განზომილებიანი სფეროს შიგნით მოხვედრილი წერტილების $C(r)$ რაოდენობის დამოკიდებულება სფეროს რადიუსზე. ამ დამოკიდებულების პრაქტიკული გამოთვლებისათვის მოსახერხებელი სახე ასეთია:

$$C(r) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \Theta(r - \|x_i - x_j\|), \quad (2.12)$$

სადაც $\Theta(x)$ ჰევისაიდის ფუნქციაა, რომელიც ნულის ტოლია, როცა $x < 0$, და უდრის ერთს, როცა $x \geq 0$; $\|x_i - x_j\|$ არის $\vec{x}_i$ და $\vec{x}_j$ ვექტორებს შორის

მანძილის ევკლიდური ნორმა. საკმაოდ მცირე r რადიუსებისათვის და საკმარისად გრძელი დროითი სერიებისათვის სამართლიანია ხარისხობრივი დამოკიდებულება $C(r) \propto r^\nu$; r -ის მნიშვნელობის ზრდის კვალობაზე სფეროს შიგნით მოხვედრილი წერტილების რაოდენობა ზღვარს მიაღწევს და $C(r) \rightarrow 1$. მეორე მხრივ, სფეროს რადიუსის მეტისმეტად მცირე მნიშვნელობისათვის იმ წერტილების წყვილების რაოდენობა, რომელთა შორის მანძილები r -ზე ნაკლებია, ძალზე მცირეა, ამასთან თავს იჩენენ გაზომვის ცდომილებები. ასე რომ $C(r) \propto r^\nu$ დამოკიდებულება r -ის მხოლოდ შეზღუდულ დიაპაზონში სრულდება. ამ დიაპაზონს მასშტაბირების უბანს ან რეგიონს უწოდებენ. მისი შერჩევა საკმაოდ ძნელი საქმეა, რადგანაც რეალურად გაზომვის სიზუსტე უსასრულოდ მაღალი არ არის და $r \rightarrow 0$ პირობა ვერ შესრულდება.

კორელაციური განზომილება ν ან, როგორც მას ხშირად აღნიშნავენ, d_2 , ასე გამოითვლება:

$$\nu = d_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log C(r)}{\log(r)}. \quad (2.13)$$

პრაქტიკული მიზნებით გამოთვლებისას $i = j$ შემთხვევებს გამორიცხავენ.

ჩვენ ზემოთ უკვე შევეხეთ მონაცემების დროითი კორელაციების (დროში სიახლოვის) საკითხს პროცესის ფაზური პორტრეტის რეკონსტრუირებისა და დინამიკის თვისობრივი დახასიათების თვალსაზრისით. კორელაციური ინტეგრალის გამოთვლისას დროითი კორელაციების საკითხი კიდევ უფრო მწვავედ დგას, რადგანაც ისინი დინამიკური პროცესის განზომილების არასწორი რაოდენობრივი შეფასების მიზეზი შეიძლება გახდნენ.

პრაქტიკულად კორელაციური ინტეგრალის გამოთვლისათვის შემდეგ ფორმულას იყენებენ:

$$C(r) = \frac{2}{(N - n_{\min})(N - n_{\min} - 1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+n_{\min}}^N \Theta(r - \|x_i - x_j\|). \quad (2.14)$$

რეალურად d_2 გამოითვლება, როგორც $\log C(r) - \log r$ მრუდების დახრილობა, სხვადასხვა p განზომილების ფაზური სივრცეებისათვის; პროცესის კორელაციურ განზომილებად მიიჩნევენ d_2 - ის იმ მნიშვნელობას, რომელიც ფაზური სივრცის განზომილების შემდგომი ზრდის შედეგად აღარ იცვლება, ანუ ხდება მისი გაჯერება. შესაძლოა, ასეთ გაჯერებას ადგილი არც ჰქონდეს, მაშინ

პროცესის კორელაციური განზომილება უსასრულოდ დიდია, რაც დამახასიათებელია შემთხვევითი პროცესისათვის. ფაზური სივრცის იმ განზომილებას, რომლის შემდეგაც d_2 აღარ იცვლება, არის ატრაქტორის ჩაშენების სივრცის განზომილება.

ცხადია, რომ ატრაქტორის განზომილება ყოველთვის ნაკლები იქნება მისი სწორად შერჩეული ჩაშენების სივრცის განზომილებაზე. მიღებულია, რომ ჩაშენების სივრცის განზომილება შემდეგ პირობას უნდა აკმაყოფილებდეს: $d \geq 2d_2 + 1$, სადაც, d_2 ატრაქტორის განზომილებაა. კორელაციური განზომილება გამოითვლება $\log C(r) - \log r$ მრუდის მასშტაბირების წრფივი უბნისათვის [22, 56].

ბოლოს აღვნიშნოთ, რომ კორელაციური ინტეგრალი შეიძლება გამოვიყენოთ ფაზური სივრცის როგორც ერთ, ისე მრავალცვლადიანი რეკონსტრუირების პირობებში.

კორექტული არაწრფივი ანალიზი მონაცემთა მასივის მხოლოდ გარკვეულ სიგრძის პირობებშია შესაძლებელი. სადღეისოდ ცნობილი ყველაზე მკაცრი მოთხოვნის თანახმად დროითი სერიის სიგრძე, N და იმ ატრაქტორის განზომილება, d , რომელიც შეიძლება საიმედოდ განისაზღვროს მოცემული სიგრძის დროითი სერიის საფუძველზე, შემდეგ თანაფარდობაში იმყოფებიან: $N \geq 42^d$ [12, 23].

ამ გამოსახულებაში ხარისხის მაჩვენებელი, d , ატრაქტორის ფრაქტალური განზომილება კი არ არის, არამედ მასზე მცირე პირველი მთელი რიცხვი. ეს მოთხოვნა იმდენად მძიმეა, რომ უმეტეს შემთხვევაში მისი შესრულება თითქმის შეუძლებელია. ამიტომ ჩვენ ესარგებლობდით უფრო მსუბუქი სამუშაო კრიტერიუმით, რომლის თანახმადაც $N \geq 10^{d/2}$ [23, 66].

2.8 განმასხვავებელი არაწრფივი სტატისტიკა და არაწრფივი სტრუქტურის ტესტირების მეთოდები

მაღალგანზომილებიანი რთული პროცესების არაწრფივი ანალიზის პროცესში ჩვენ გამოვიყენეთ არაწრფივი სტრუქტურის ტესტირების მეთოდები შემდეგი ორი ძირითადი მიზნის მისაღწევად:

ა) დინამიკურად რთული პროცესის დაბალი ფრაქტალური განზომილების შესახებ მცდარი დასკვნის თავიდან აცილება.

ეს იმით იყო განპირობებული, რომ ჩვენს მიერ შესწავლილი დროითი სერიები შეიცავენ ხმაურს და სასრული სიგრძე ჰქონდათ. ამდენად მაშინაც კი, როცა $\log C(r) - \log r$ მრუდებზე მასშტაბირების უბანი ცხადად იყო გამოკვეთილი, არ არსებობდა გარანტია, რომ განზომილების უცვლელობა (გაჯერება) ნამდვილად ატრაქტორის თვისებებმა განაპირობეს და არა სხვა ფაქტორებმა (მაგ., ხმაურმა).

ბ) სისტემების მდგომარეობების ერთმანეთისაგან გამორჩევა დინამიკური სირთულის მიხედვით.

როდესაც არ ხერხდება დინამიკური განზომილების რაოდენობრივი გამოთვლა (ადგილი არ აქვს პროცესის ფრაქტალური განზომილების გაჯერებას ჩაშენების განზომილების ზრდის კვალობაზე), შესწავლილი მაღალგანზომილებიანი პროცესების იდენტიფიკაციისათვის შესაძლებელია ცალკეული განზომილების ფაზური სივრცეებისათვის განსაზღვრული არაწრფივი მახასიათებლები გამოვიყენოთ განმასხვავებელი სტატისტიკის როლში [12, 58].

2.9 ნულ-ჰიპოთეზების იერარქია და განმასხვავებელი მეტრიკა

რთული დროითი სერიების ანალიზისას მათში აღმოჩენილი ყოველი სტრუქტურა არ არის აუცილებლად განპირობებული სისტემის დინამიკის არაწრფივობით. სწორედ ამიტომ აუცილებელია გაირკვეს დროითი სერიის დაკვირვებული

სტრუქტურა ნამდვილად სისტემის არაწრფივობის შედეგია თუ არა. ამისათვის ახდენენ ნულ-ჰიპოთეზების ტესტირებას იმის თაობაზე, შესაძლებელია თუ არა შესასწავლი დროითი სერიის მოდელირება ჩვენთვის ცნობილი რომელიმე ტიპის წრფივი პროცესით. ჩვეულებრივ ხდება იმის დადგენა შენარჩუნდება თუ არა ორიგინალური დროითი სერიის დადგენილი თვისებები (არაწრფივი მახასიათებლების გამოთვლილი მნიშვნელობები) მისი არაწრფივი სტრუქტურის ისეთნაირი დარღვევისას, რომ ძირითადი წრფივი მახასიათებლები უცვლელი დარჩენ. ეს მახასიათებლები შეიძლება იყვნენ: საშუალო, საშუალო კვადრატული გადახრა, განაწილების ფუნქცია, ფურიეს სპექტრი, ავტოკორელაციის ფუნქცია და ა.შ. აქედან გამომდინარე წარმოებს ე.წ. სუროგატული დროითი სერიების გენერირება, რომლებიც აღნიშნული მახასიათებლების მიხედვით ორიგინალური დროითი სერიისაგან არ განსხვავდებიან, სხვა მხრივ კი შემთხვევითი არიან [12, 13].

შენარჩუნებული მახასიათებლები სხვადასხვა შემთხვევაში სხვადასხვაა და, ცხადია, ერთი ნულ-ჰიპოთეზის ფარგლებში ყველაფრის გათვალისწინება არ ხერხდება. ამიტომ განიხილავენ ნულ-ჰიპოთეზების იერარქიას მათი თანდათანობითი გართულების გათვალისწინებით [47].

უმარტივესი ნულ-ჰიპოთეზა მდგომარეობს იმაში, რომ განსახილავი დროითი სერია წარმოადგენს შემთხვევითად განაწილებული, ერთგვაროვანი, დამოუკიდებელი ცვლადების ერთობლიობას. ამ შემთხვევაში სუროგატული დროითი სერია გენერირდება სტანდარტული ფსევდოშემთხვევითი რიცხვების გენერატორით, რომელიც ნორმალიზებულია ორიგინალური სერიის საშუალო მნიშვნელობაზე და საშუალო კვადრატულ ცდომილებაზე. ამისათვის, როგორც წესი, ხდება ორიგინალური მასივის მონაცემების დროითი მიმდევრობის შემთხვევითი არევა. ამ შემთხვევაში შენარჩუნდება ორიგინალური მასივის ალბათობების განაწილების ფუნქცია [13].

წრფივი კორელირებული ხმაურის შემთხვევაში ნულ-ჰიპოთეზა იმაში მდგომარეობს, რომ დროითი სერიის სტრუქტურა განისაზღვრება მისი ავტოკორელაციის ფუნქციით ან, რაც იგივეა, ფურიეს სიმძლავრის სპექტრით.

ზემოთ განხილული წრფივი პროცესების დროით სერიებს შეიძლება ჰქონდეთ სასრული არაწრფივი მახასიათებლები, მაგ., ლიაპუნოვის ექსპონენტები და კორელაციური განზომილება, თუმცა ეს სრულებით არ ნიშნავს დეტერმინირებული ქაოსის არსებობას. ასე რომ, უცნობი დინამიკის შესახებ რაიმე დასკვნების

გაკეთებამდე უნდა შემოწმდეს, შესაძლებელია თუ არა მოცემული დროითი სერიის მოდელირება წრფივი პროცესით. სხვაგვარად, ზემოთ აღწერილი ნულ-ჰიპოთეზების საფუძველზე უნდა გაირკვეს, შესაძლებელია თუ არა დროითი სერიის არაწრფივი ანალიზის შედეგების ახსნა წრფივი მოდელის ფარგლებში.

შესაბამისი ტესტის ძირითადი იდეა იმაში მდგომარეობს, რომ განმასხვავებელი სტატისტიკის როლში შერჩეული რაიმე M დამზერილი სიდიდის მიხედვით უნდა გაირკვეს, მართლაც წრფივია დროითი სერია თუ არა. ამისათვის თავდაპირველად უნდა შემოწმდეს M -ის რა მნიშვნელობას მივიღებდით წრფივი მოდელიდან. შეესაბამება თუ არა ორიგინალური დროითი სერიისა და წრფივი მოდელისათვის გამოთვლილი ეს სიდიდეები ერთმანეთს? თუ ასეთ შესაბამისობას ადგილი არა აქვს, დროითი სერია შესაძლოა არაწრფივი იყოს.

ცხადია, აღნიშნულ M სიდიდეს სტატისტიკურად განმასხვავებელი მეტრიკის შინაარსი ექნება. ხშირად ამ მიზნით კორელაციურ განზომილებას, d_2 , იყენებენ.

2.10 სუროგატული დროითი სერიები

ორიგინალური დროითი სერიის შესაბამისი (უფრო ზუსტად ზოგიერთი წრფივი, სტატისტიკური პარამეტრით მსგავსი) მოდელირებისათვის, როგორც წესი, იყენებენ სუროგატული მონაცემების სერიის გენერირების მეთოდს. მეთოდის არსი იმაში მდგომარეობს, რომ ორიგინალური და სუროგატული სერიების შედარების გზით, გამოირიცხოს ნულ-ჰიპოთეზა იმის შესახებ, რომ ორიგინალური დროითი სერია გენერირებულია წრფივი სტოქასტური (შემთხვევითი) პროცესებით.

ამისათვის ხდება ხელოვნური შემთხვევითი დროითი სერიის გენერირება, რომელიც თავისი წრფივი თვისებებით ორიგინალურის მსგავსია. სუროგატული დროითი სერიების გენერირების რამდენიმე ხერხი არსებობს. მათგან ყველაზე გავრცელებულია ფაზით გაშემთხვევითებული (ფგ) და მასშტაბირებული ფაზით გაშემთხვევითებული (მფგ) სუროგატების გამოყენება.

ფგ-სუროგატულ სერიებს უნდა ჰქონდეთ იგივე წრფივი მახასიათებლები: ფურიეს სპექტრი და ავტოკორელაციის ფუნქცია, რაც ორიგინალურ (გამოსაკვლევ) სერიას. ეს მოთხოვნა მაშინ შესრულდება, თუ ორიგინალური და სუროგატული სერიის ფურიეს გარდაქმნას ერთნაირი ამპლიტუდები ექნებათ და მხოლოდ ფაზით იქნებიან განსხვავებული. ამისათვის ორიგინალური s_n დროითი სერიის სწრაფი ფურიეს გარდაქმნის, $s_k^f = \sum_{n=1}^N s_n e^{2\pi i n k / N}$, კომპლექსურ s_k^f წევრებს გაამრავლებენ შემთხვევით ფაზებზე: $s_k^{f'} = s_k^f e^{i\Phi_k}$, სადაც Φ_k იღებს შემთხვევით მნიშვნელობებს $[0, 2\pi]$ არეში. ამის შემდეგ გამოთვლიან ფურიეს შებრუნებულ გარდაქმნას: $s_n' = \sum_{k=1}^N s_k^{f'} e^{-i 2\pi n k / N}$. ამგვარად მიღებულ s_n' დროითი სერია წარმოადგენს შემთხვევითი რიცხვების სიმრავლეს ორიგინალური სერიის ანალოგიური სიმძლავრის სპექტრით. Φ_k -ფაზის რაიმე სხვა მნიშვნელობა ახალ სუროგატულ სერიას მოგვცემს.

მფგ, ანუ მასშტაბირებული შემთხვევითი ფაზების ტესტი, გულისხმობს სუროგატული სერიის სამ ეტაპად ფორმირებას. პირველ ეტაპზე წარმოებს შემთხვევითი რიცხვების მასივის რანგების მასშტაბირება (გადაწყობა) ორიგინალური მასივის რანგების შესაბამისად. მეორეზე, ხდება ამ შუალედური მასივის ფაზით გაშემთხვევითება უკვე აღწერილი ხერხით. მესამე ეტაპზე წარმოებს ორიგინალური მასივის რანგების მასშტაბირება ფაზით გაშემთხვევითებული მასივის რანგების მიხედვით.

მასშტაბირებული შემთხვევითი ფაზების სუროგატების მეშვეობით შესაძლებელია შემოწმდეს ნულ-ჰიპოთეზა იმის შესახებ, რომ ორიგინალური დროითი სერია გენერირებულია წრფივი სტოქასტური პროცესით, რომელიც შეიცავს მონოტონურ სტატიკურ (განსახილავი პროცესის დინამიკასთან კავშირის არქონე) არაწრფივობას [12].

როგორც ვხედავთ, ორივე მეთოდი ორიგინალური დროითი სერიის გაშემთხვევითების პრინციპს ეყრდნობა, მაგრამ მასშტაბირებული ფაზით გაშემთხვევითებული სუროგატების ტესტით ნულ-ჰიპოთეზის უარყოფის შემთხვევაში მეტი საფუძველი არსებობს იმისათვის, რომ დავრწმუნდეთ ორიგინალურ მასივში არაწრფივი სტრუქტურის არსებობაში.

როგორც წესი, სუროგატების რაოდენობა რამოდენიმე ათეულიდან რამოდენიმე ასეულამდე აღწევს. იმის შესაფასებლად, თუ რამდენად არსებითია ორიგინალური და სუროგატული დროითი სერიების მახასიათებელი მეტრიკების (მაგ., კორელაციური განზომილებების, d_2) განსხვავება სხვადასხვა ხერხი გამოიყენება. მათ შორის ყველაზე გავრცელებულია კრიტერიუმი [59, 60]:

$$S = \left| \langle M_{\text{სუროგ}} \rangle - M_{\text{ორიგ}} \right| / \sigma_{\text{სუროგ}}, \quad (2.15)$$

სადაც $\sigma_{\text{სუროგ}}$ აღნიშნავს სუროგატული სერიის განმასხვავებელი მეტრიკის $M_{\text{სუროგ}}$ სტანდარტულ დევიაციას. S -სიდიდის სტანდარტული ცდომილება, ΔS , ასე გამოითვლება:

$$\Delta S = \sqrt{\frac{(1 + 0.5S^2)}{N}}, \quad (2.16)$$

სადაც N ანათვლების რიცხვია.

განსხვავების სარწმუნოების შესახებ სხვადასხვა მოსაზრება არსებობს: ყველაზე მსუბუქი მოთხოვნა $S > 2$ უზრუნველყოფს სარწმუნო განსხვავებას $p = 0.05$ დონეზე. ყველაზე მკაცრი მოთხოვნაა $S \geq 10$. როგორც წესი პრაქტიკული გამოთვლებისათვის განსხვავება სარწმუნოდ ითვლება თუ $S > 5$ [59, 61, 62, 63, 64].

განმასხვავებელი სტატისტიკის არსებობის საკითხის გასარკვევად აგრეთვე ხშირად გამოიყენებენ ვილკოქსონის ნიშნადი რანგების, არაპარამეტრულ ტესტს. ამისათვის ჩაშენების შესაბამისი განზომილებისათვის გამოითვლიან სხვაობებს ორიგინალური და სუროგატების მთელი სიმრავლისათვის გასაშუალოებულ მახასიათებელ სიდიდეებს წყვილებს შორის. შემდეგ მოახდენენ ამ სხვაობების მნიშვნელობების რანჟირებას ნიშნის მიუხედავად (ე.ი. დანომრავენ ზრდადობის მიხედვით მათი აბსოლუტური სიდიდის შესაბამისად). ამის შემდეგ დაითვლიან დადებითი (ან უარყოფითი) რანგების ჯამს. ვილკოქსონის ტესტის თანახმად, თუ ეს ჯამი მეტია რანგების საერთო ჯამისა და სპეციალურ ცხრილში მოყვანილი სტანდარტული მნიშვნელობის სხვაობაზე, ნულ-ჰიპოთეზა ორიგინალური და სუროგატული მასივების განაწილების ფუნქციების იგივეურობის შესახებ უარყოფილია არსებობის შესაბამის დონეზე [65].

ზოგჯერ გამოითვლიან ე.წ. მონტე-კარლოს ალბათობას, რომელიც ასე განისაზღვრება: $P_M = (M \leq M_{\text{ორიგ}} \text{ შემთხვევების რაოდენობა}) / (\text{შემთხვევების საერთო რაოდენობა})$. ეს მიდგომა განსაკუთრებით მაშინაა მოსახერხებელი, როცა სუროგატებისათვის გამოთვლილი M -ის მნიშვნელობა ნორმალურად არ არის განაწილებული. შედარებით იშვიათად გამოიყენებენ ბარნარდისა და ჰოპეს არაპარამეტრულ ტესტს, რომლის თანახმადაც შემოთხსენებული ნულ-ჰიპოთეზა, სარწმუნოების $p = 1/(N_{\text{სურ}} + 1)$ დონეზეა უარყოფილი, თუ ყველა სუროგატისთვის $M_{\text{ორიგ}} < M_{\text{სურ}} [59, 60]$.

2.11 რეკურენტული რაოდენობრივი ანალიზის მეთოდი (RQA)

შესასწავლ პროცესებში დინამიკური ცვლილებების გამოვსაკვლევად გამოვიყენოთ რეკურენტული რაოდენობრივი ანალიზის (RQA- Recurrence Quantitative Analysis) მეთოდი. RQA განსაკუთრებით სასარგებლოა იმისათვის, რომ გადაილახოს სიძნელებები, რომელსაც ხშირად ადგილი აქვთ, როდესაც საქმე გვაქვს არასტაციონარული და საკმაოდ მოკლე მონაცემების მასივთან. თავდაპირველად იგება ე. წ. რეკურენტული დიაგრამა (RP) განსაზღვრულია როგორც [68, 71]:

$$R_{i,j} = \Theta(\varepsilon_i - \|\bar{x}_i - \bar{x}_j\|). \quad (2.17)$$

აქ ε_i არის ე.წ. “მოჭრილი” დისტანცია, ხოლო $\Theta(x)$ არის ჰევისაიდის ფუნქცია. ε -ის სწორი შერჩევა არის ერთ-ერთი მთავარი პრობლემა რეკურენტული ანალიზისა. სასურველია ε იყოს რაც შეიძლება პატარა, მაგრამ ხმაურის არსებობა განაპირობებს მისი სასრული სიდიდის შერჩევას. ε შერჩევის რამოდენიმე გზა არსებობს. ჩვენ გამოკვლევაში ε -ის ზომად ავიღეთ ფაზური სივრცის მაქსიმალური ზომის 10% ან 20%. RQA როგორც რთული დინამიკური პროცესის ანალიზის მეთოდი საშუალებას იძლევა განისაზღვრავს რამოდენიმე მახასიათებელი სიდიდე. მათ შორის უმეტესობა ახასიათებს ფაზური სივრცის დიაგონალურ

სტრუქტურას, მაგ: რეკურენტობის პროცენტი $RR(t)$ და დეტერმინიზმის პროცენტი $DET(t)$. ისინი დაფუძნებულია ფაზური სივრცის დიაგნალური სტრუქტურის ხაზების ანალიზზე. რეკურენტობა – $RR(t)$ არის თანაფარდობა რეკურენტული წერტილების რაოდენობისა ყველა ფაზური წერტილის რაოდენობასთან. რეკურენტული წერტილების რაოდენობის თანაფარდობა, წერტილების იმ რაოდენობასთან რომლების ქმნიან დიაგნალურ სტრუქტურებს ეწოდება დეტერმინიზმი $DET(t)$. ამ მახასიათებლების მაღალი მნიშვნელობები მიუთითებენ რეგულარობის მაღალ ხარისხზე [67, 68, 69, 70, 71].

ამ თავში ჩამოთვლილი მეთოდების გარდა სადისერტაციო ნაშრომში გამოყენებული იქნა ზოგიერთი დამატებით მეთოდი, რომელებიც მოკლედ იქნებიან განხილულნი მესამე თავში.

თავი III

შედეგების აღწერა და განსჯა

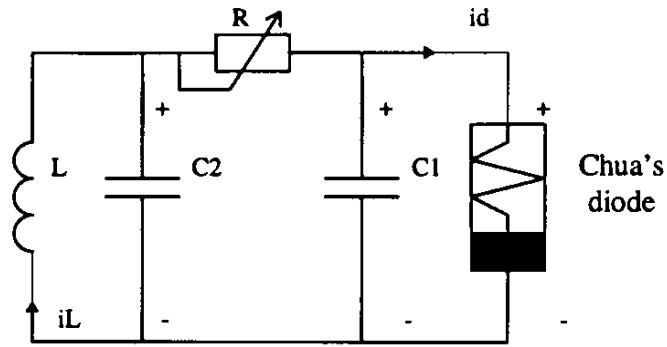
როული მაღალგანზომილებიანი დინამიკური სისტემების მაგალითები, როგორც აღვნიშნეთ, მრავალია: ატმოსფერული, სეისმური, ბიოლოგიური, სოციალური და ა. შ. ჩვენ ნაშრომში შევისწავლეთ ასეთ დინამიკურ სისტემებში მიმდინარე პროცესების რამდენიმე მაგალითი, მათ შორის, ზოგიერთი ტექნიკური და სეისმური პროცესი, აგრეთვე ლაბორატორიულ ექსპერიმენტში მიმდინარე პროცესები. ქვემოთ განვიხილავთ მათ ცალ-ცალკე.

3.1 მაღალგანზომილებიანი დინამიკური პროცესის მაგალითი ტექნიკურ სისტემებში

3.1.1 ჩუას წრედის აღწერა

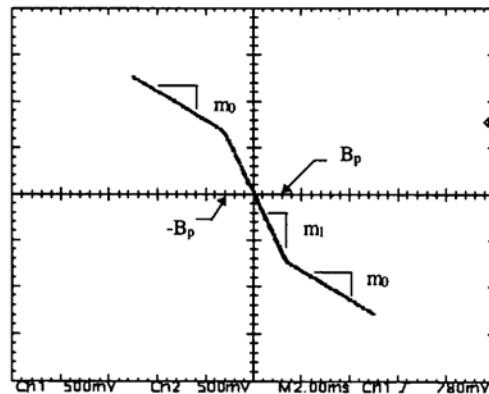
დისერტაციაში განვიხილეთ ელექტრული წრედი (კერძოდ ჩუას წრედი), როგორც მაგალითი ტექნიკური სისტემისა, რომელშიც ადგილი აქვს მაღალგანზომილებიან დინამიკურ პროცესს.

ჩუას წრედი, როგორც როული დინამიკური სისტემის მოდელი, დაახლოებით 20 წლის წინათ შემოგვთავაზა ელექტრონული წრედების სპეციალისტმა ლ. ჩუამ. იგი წარმოადგენს მარტივ ელექტრონულ წრედს ერთი არაწრფივი ელემენტით. ამ წრედს აქვს სხვადასხვა ტიპის დინამიური ქცევის, მათ შორის, დაბალგანზომილებიანი ქაოსური პროცესის (რხევების) გენერირების უნარი. ჩუას ელექტრონული წრედის სქემა მოცემულია ნახაზზე 3.1. სწორედ ამ სქემის რეალიზაციის შედეგად მიღებულ მონაცემთა მასივის გამყენებას განვიხილავთ ქვემოთ [72, 73, 74].



ნახ. 3.1 ჩუას ელექტრონული წრედის სქემა

ეს წრედი შეიცავს არაწრფივ რეზისტორს – ჩუას დიოდს, რომლის ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი გამოსახულია ნახ. 3.2



ნახ. 3. 2 ჩუას დიოდის ვოლტამპერული მახასიათებელი

ფორმულები, რომლებიც მართავენ წრედის დინამიკას შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი სახით:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dv_1}{dt} &= \frac{(v_2 - v_1)}{R} - i_d(v_1) \\ C_2 \frac{dv_2}{dt} &= \frac{(v_1 - v_2)}{R} + i_L \\ L \frac{di_L}{dt} &= -v_2 \end{aligned} \quad (3.1)$$

აქ v_i არის ძაბვა C_i კონდენსატორზე მოდებული, i_L არის ინდუქტორში გამავალი დენი. ჩუას დიოდში გამავალი დენი მოცემულია ფორმულით:

$$i_d(v_1) = \begin{cases} m_0 v_1 + B_p(m_0 - m_1) & v_1 < -B_p \\ m_1 v_1 & |v_1| \leq B_p \\ m_0 v_1 + B_p(m_1 - m_0) & v_1 > B_p \end{cases} \quad (3.2)$$

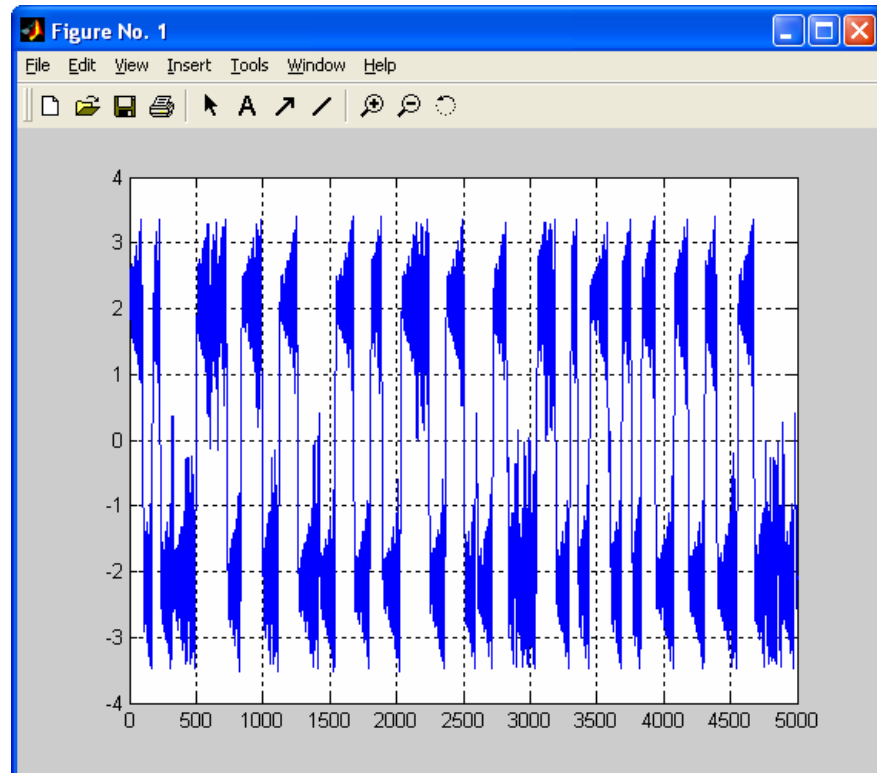
სადაც B_p , m_0 და m_1 არიან შესაბამისად წვევების წერტილები და წრფივი დახრები, რომლებიც ნაჩვენებია ნახ. 3. 2.

3.1.2 ჩუას წრედის რეალიზაციის შედეგად მიღებული მონაცემების დამუშავება

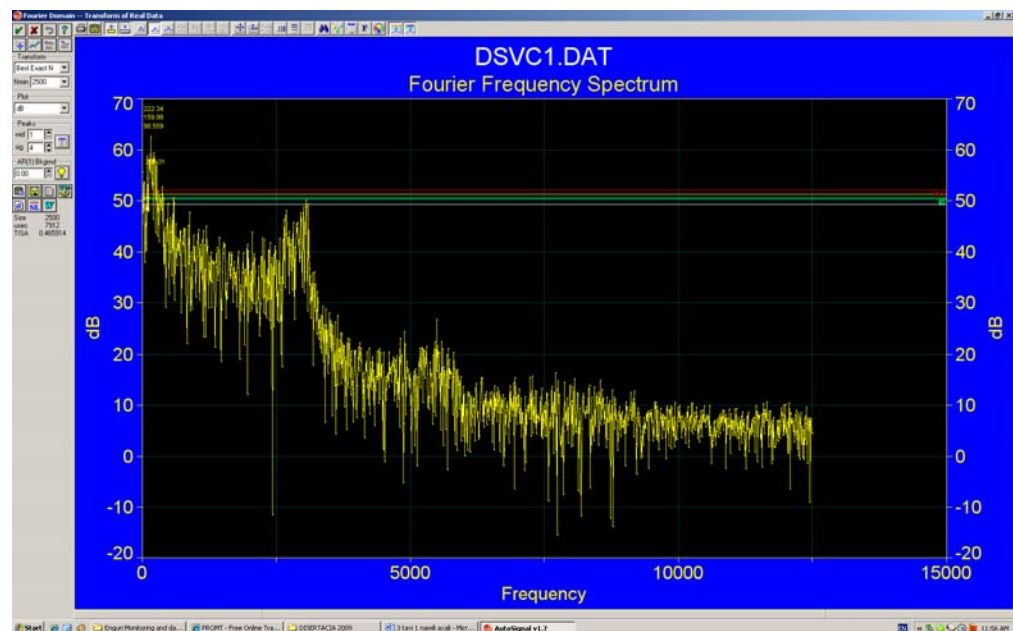
ჩუას წრედის რეალიზაცია პრაქტიკული თვალსაზრისით არცთუ ისე რთულია, თუმცა შესაბამისი ხარისხის მონაცემთა მასივის უზრუნველყოფა გარკვეულ სიძნელებებთან არის დაკავშირებული. საკითხს ართულებს ის, რომ პარამეტრების ყველა მნიშვნელობისათვის ამ პროცესის დინამიკური თვისებები ჯერ სრულად არ არის შესწავლილი. მაღალგანზომილებიანობის საკითხის გარკვევა მონაცემების ხარისხის მიმართ მოთხოვნას მკვეთრად ზრდის, ამიტომ ჩვენ გადავწყვიტეთ არსებული მაღალხარისხიანი მასივების გამოყენება.

ამდენად ჩვენ გამოვიყენეთ ჩუას წრედის სტანდარტული რეალიზაციის მონაცემთა მასივები, რომელიც მისაწვდომია ინტერნეტში შემდეგ მისამართზე: www.cpdee.ufmg.br/~MACSIN/services/data/data.htm (ბოლოს გადამოწმებულია 10.03.09). ეს იმითაც იყო გამართლებული, რომ ავტორებს არ განუხორციელებიათ აღნიშნულ დროით სერიებზე სრულფასოვანი დინამიკური კვლევა. ამდენად, ჩვენ დისერტაციაში ჩავატარეთ ჩუას სქემით გენერირებული დროითი სერიების კვლევა არაწრფივი დინამიკის თანამედროვე მეთოდების გამოყენებით. ჩვენ ჩვენი მიზნებიდან გამომდინარე მონაცემთა მასივებიდან შევარჩიეთ და გამოვიყენეთ დროითი სერია, რომელიც ყველაზე ნაკლებად ხმაურიანი იყო. ავტორების მიერ ჩუას წრედის აპარატურული უზრუნველყოფის შედეგად მიღებულია რამდენიმე სერია. ჩვენ გამოვიყენეთ DSVC1.DAT სერია, რომელიც მიიღება წრედში კონდენსატორზე მოდებული ძაბვის ცვლილების გაზომვის შედეგად. იგი შეიცავს 5000 მონაცემს (იხ. ნახ. 3.3) და ჩუას წრედის აპარატურული რეალიზაციის შედეგად არის ათვლილი [75, 76].

ეს დროითი სერია DSVC1.DAT ღიაა და შეგიძლიათ იხილოთ შემდეგ ინტერნეტ მისამართზე: www.cpdee.ufmg.br/~MACSIN/services/data/data.htm.



ნახ. 3.3 ჩუას წრედში კონდენსატორზე მოდებული ძაბვის ცვლილების დროითი სერია



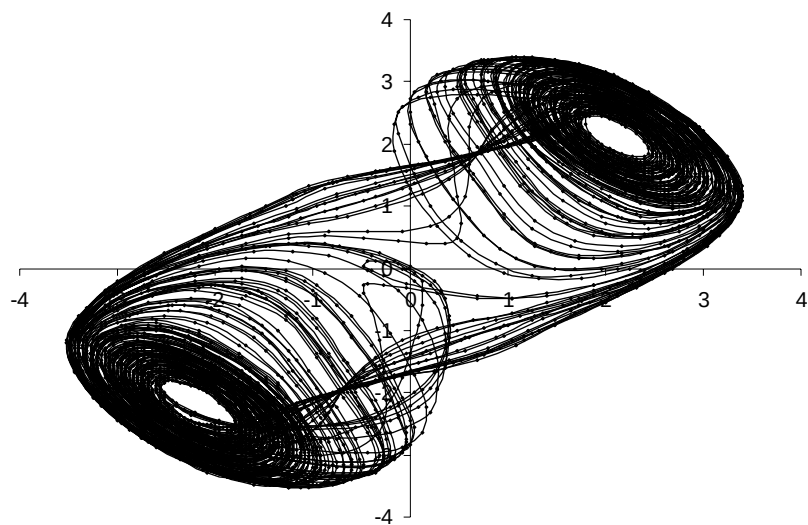
ნახ. 3.4 ჩუას წრედში კონდენსატორზე მოდებული ძაბვის ცვლილების დროითი სერიის სიმძლავრის სპექტრი

ჩვენ ამ რეალური მასივისათვის გამოეთვალეთ სხვადასხვა წრფივი და არა-წრფივი მახასიათებლები, მაგალითად სიმძლავრის სპექტრი, ჰარსტის ექსპონენტა,

ლიაპუნოვის ექსპონენტა, მცდარი უახლოესი მეზობლების ანალიზი, კორელაციური განზომილება, ავადგენ რეკურენტული დიაგრამები და ჩავატარეთ რეკურენტული რაოდენობრივი ანალიზი (RQA). ყველა ეს მეთოდი დაწვრილებით აღწერილია დისერტაციის II თავში.

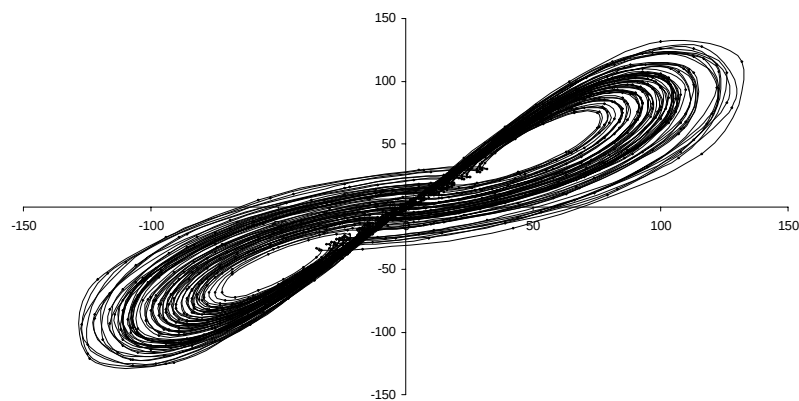
მცდარი უახლოესი მეზობლების ანალიზის, კორელაციური განზომილებისა და რეკურენტულ-რაოდენობრივი ანალიზისათვის ჩვენ გამოვიყენეთ პროგრამული პაკეტები: CDA Pro, AutoSignal და Visual Recurrence Analysis.

ჩუას წრედში კონდენსატორზე მოდებული ძაბვის ცვლილების დროითი სერიის ფაზური პორტრეტი წარმოდგენილია ნახ. 3.5



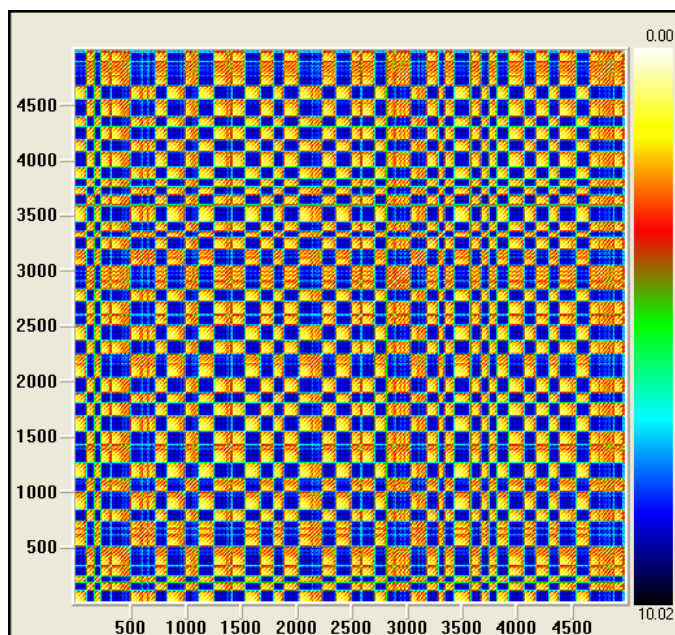
ნახ. 3.5 ძაბვის ცვლილების დროითი სერიის ორგანზომილებიანი ფაზური პორტრეტი

ჩუას წრედში ძაბვის ცვლილება თვისებრივი თვალსაზრისით დაბალგანზომილებიან პროცესს მოგვაგონებს, რაზედაც მიუთითებს მისი მსგავსება ლორენცის ატრაქტორთან.



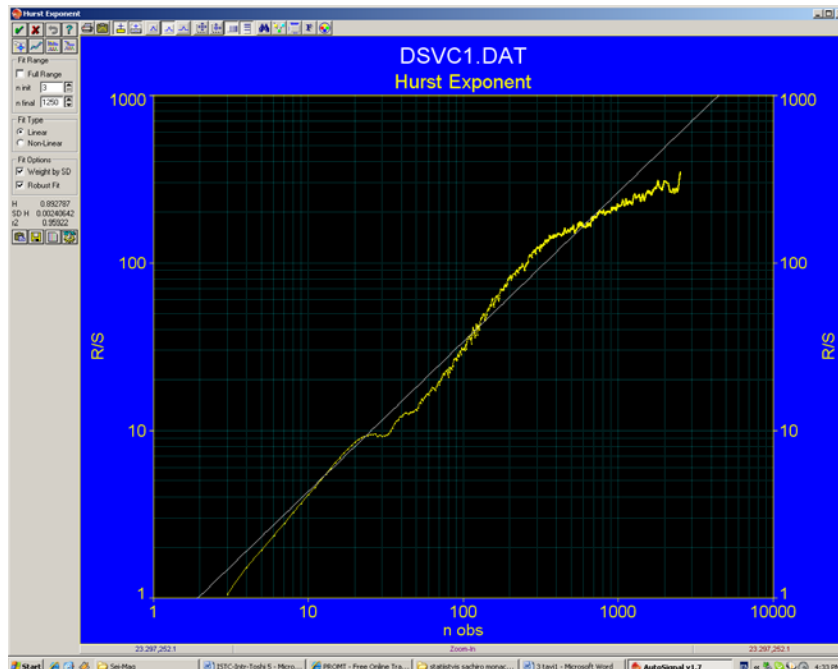
ნახ. 3.6 ლორენცის ატრაქტორის ორგანზომილებიანი ფაზური პორტრეტი

ჩუას წრედში კონდენსატორზე მოდებული ძაბვის ცვლილების დროითი სერიის რეკურენტული დიაგრამა წარმოდგენილია ნახ. 3.7.



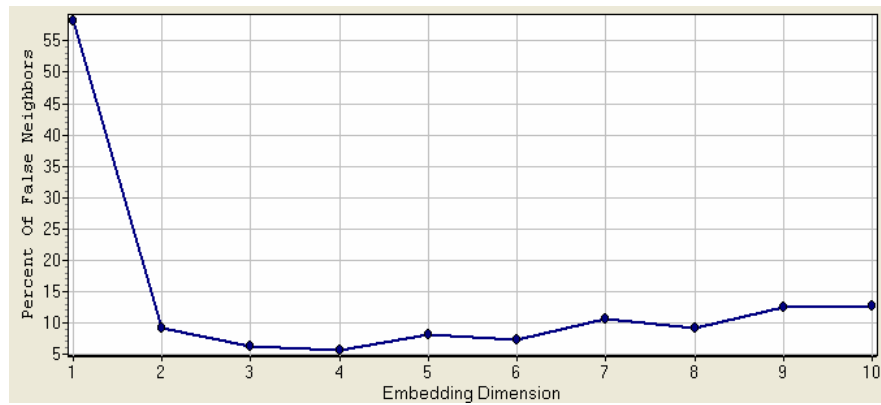
ნახ. 3.7 დროითი სერიის რეკურენტული დიაგრამა

იგივე DSV1.DAT დროით სერიაზე ჩავატარეთ აგრეთვე რეკურენტულ-რაოდენობრივი ანალიზი. შედეგი ნაჩვენებია ნახ. 3.8

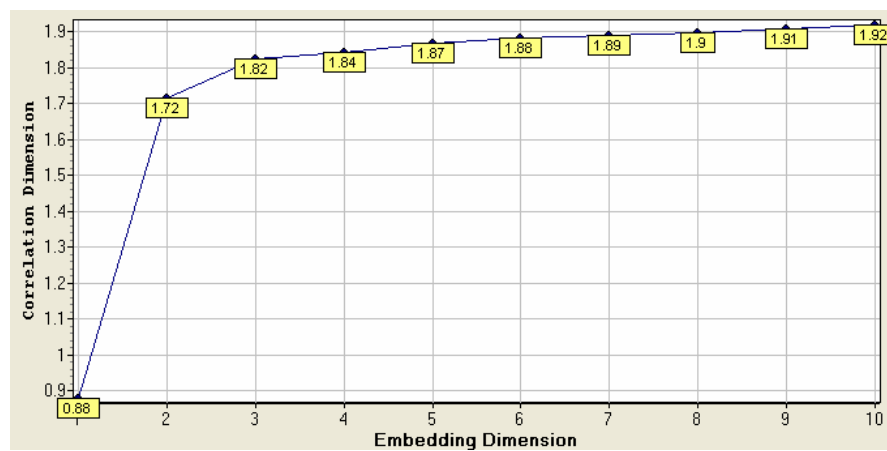


ნახ. 3.8 ძაბვის ცვლილების დროითი სერიის R/S ანალიზის შედეგი

მცდარი უახლოესი მეზობლების ანალიზის და კორელაციური განზომილების შესაბამისი მრუდები მოცემულია ნახ. 3.9 და 3.10.



ნახ. 3.9 ჩუას წრედში კონდენსატორზე მოდებული ძაბვის ცვლილების მონაცემთა მასივის FNN რაოდენობის ცვლილება ჩაშენების განზომილების მიხედვით



ნახ. 3.10 ძაბვის ცვლილების მონაცემთა მასივის კორელაციური განზომილების ცვლილება ჩაშენების სივრცის განზომილების მიხედვით

ჩვენ მიერ ჩატარებული დინამიკური ანალიზის შედეგები წარმოდგენილია ქვემოთ ცხრილ 1-ში.

ცხრილი 1. ჩუას წრედში კონდენსატორზე მოდებული ძაბვის ცვლილების მონაცემთა მასივის დინამიკური მახასიათებლები

ჰარსტის ექსპონენტი	0.72 ± 0.003
ლიაპუნოვის ექსპონენტი $\lambda_{\max}$	0.406 ± 0.031
კორელაციური განზომილება d_2	1.92 ± 0.733
ინფორმაციული განზომილება	5
რეკურენტობის პროცენტი (%REC)	0.037
დეტერმინიზმის პროცენტი (%DET)	48.028
ლამინარობის პროცენტი (%LAM)	0.05

დასკვნა

როგორც ზემოთ მოყვანილი შედეგები მოწმობს, განხილულ პირობებში ჩუას წრედში ძაბვის ცვლილების დინამიკა მაღალგანზომილებიანი არ არის. იგი კვაზიპერიოდულთან ახლოა და ხასიათდება პერსისტენტობის საკმაოდ მაღალი ხარისხით - არსებული ტრენდის მდგრადობით. ეს პროცესი გამოვლენილი რაოდენობრივი დინამიკური თავისებურებებით დაბალგანზომილებიანი დეტერმინირებული ქაოსის ტიპის პროცესებთანაა ახლო ($d_2=1.9<5$, $\lambda_{\max}>0$). ამავსე ადასტურებს მისი ტიპურ დაბალგანზომილებიან დეტერმინირებული სისტემასთან (ლორენცის სისტემასთან) თვისებრივი მსგავსებაც.

3.2 ბუნებრივ პროცესებში მაღალგანზომილებიანი რთული დინამიკის შესწავლა სეისმური პროცესის მაგალითზე

ცნობილია, რომ დედამიწას გარს აკრავს სხვადასხვა წარმოშობის, დიდი სიხშირული დიაპაზონის ცვალებადი ველები, რომელთა პერიოდი ვარირებს წამებიდან თვეებამდე და წლებამდე. რადგანაც ცვალებადი ველის წყარო არ არის სრულად იზოლირებული დედამიწისაგან, ის იწვევს დაძაბულობის/დეფორმაციის ველის ვარიაციას დედამიწის ქერქში, რაც გამოიხატება სუსტი გარეშე ძალის მიერ სეისმური მოვლენების სინქრონიზაციის ფენომენში. სუსტი ზეგავლენისადმი ამგვარი გრძნობიარობა გულისხმობს, რომ სისტემა ახლოსაა ე.წ. კრიტიკულ (თვითორგანიზებული კრიტიკულ- selforganized criticality) მდგომარეობასთან, სადაც სისტემის მდგრადობა შეიძლება ადვილად დაირღვეს. თანამედროვე წარმოდგენებით სეისმოაქტიურ რეგიონებში დედამიწის ქერქი მართლაც ახლოს არის კრიტიკულ მდგომარეობასთან, რაც შესაძლებელს ხდის სეისმურობის სინქრონიზაციას. ამგვარი ეფექ-

ტების ბუნება დღემდე არ არის დადგენილი. თანამედროვე არაწრფივი დინამიკის განვითარების დონე ამ უჩვეულო ეფექტების რაოდენობრივი ინტერპრეტაციის საშუალებას იძლევა [77].

სუსტი გარე ზეგავლენით პროცესების სინქრონიზაციის მოვლენებს ჩვენ ვხვდებით მრავალ დარგში, დაწყებული მექანიკიდან დამთავრებული ბიოლოგიური და სოციალური პროცესებით [78].

ვინაიდან დედამიწა განიცდის ძალზე ფართო დიაპაზონის (სეკუნდებიდან თვეებამდე და წლებამდე) პერიოდის მქონე გარეშე ცვალებადი ველების გავლენას, სავსებით ბუნებრივია, რომ სინქრონიზაციის ფენომენზე დაკვირვება მოხდება სხვადასხვა წარმოშობის მრავალ გეოფიზიკურ ველშიც. მაგალითად, არის მრავალი მონაცემი იმის შესახებ, რომ სეისმური აქტივობა გარკვეულად კორელირებულია ისეთ სუსტ ცვალებად გარეშე ველებთან, როგორიცაა დედამიწის მიმოქცევები, მზის აქტივობა, ატმოსფერული წნევა, ელექტრომაგნიტური შემფოთებები, სეზონური ცვლა და რეზერვუარების ექსპლუატაცია.

ზოგადად, სისტემა მგრძნობიარეა მცირე ზეგავლენისადმი, როდესაც იგი კრიტიკულ მდგომარეობასთანაა ახლოს. თეორიულად, თუ ხმაური უმნიშვნელოა, უსასრულოდ მცირე პერიოდულ ძალასაც კი შეუძლია აღძრას სინქრონიზაცია (სინქრონიზაციის მაჩვენებელი ე.წ. არნოლდის ენა – Arnold's tongue – იწვება გარეშე ზედდებული ძალის ნულოვან მნიშვნელობაზე) [78].

ამავე დროს, რეალურად, ბუნებრივ დინამიკურ სისტემებში ხმაური გარდაუვალია, რაც ნიშნავს, რომ პრაქტიკულად სინქრონიზაციის ეფექტის მიღება შესაძლოა მხოლოდ ზედდებული ძალის რაღაც ზღვრული მნიშვნელობის მიღწევის შემდეგ.

ბოლო წლებში მრავალი ნაშრომი მიეძღვნა სეისმურ აქტივობაზე სუსტი ცვალებადი ველების (დედამიწის მიმოქცევების, მზის აქტივობის და ა.შ.) გავლენის საკითხს. ეს კვლევები მოწმობენ, რომ, შესაძლოა, სუსტი კვაზიპერიოდული შემფოთებები აკონტროლებდნენ (სინქრონიზაციას ახდენდნენ) უზარმაზარი ტექტონიკური ძალებით მართულ ისეთ არარეგულარულ რელაქსაციურ პროცესს, როგორიცაა სეისმურობა. მართლაც, როგორც გამოკვლევები მოწმობენ, ზედდებული კვაზიპერიოდული რხევებით გამოწვეული დაძაბულობები (0.01-1 ბარი), როგორც წესი, გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე მთავარი მამოძრავებელი ტექტონიკური დაძაბულობე-

ბი. მიუხედავად ამისა, საბოლოოდ, ამ მცირე ზემოქმედებას შეუძლია გამოიწვიოს სინქრონიზაციის ფენომენი (შეცვალოს ძლიერი და სუსტი მოვლენების რაოდენობის თანაფარდობა), ან სულ მცირე, მოახდინოს სისტემის დროითი ქცევის მოწესრიგება [78, 79, 80, 81, 82, 83].

ამავე დროს სადღეისოდ ამგვარი დაკვირვებები ყოველთვის არ არის საკმარისად გამყარებული მკაცრი შეფასებების პროცედურებით, რაც ხშირად განაპირობებს დასკვნების ხარისხობრივ, ზოგჯერ კი არასარწმუნო ხასიათს. ამრიგად, სეისმურობის სინქრონიზაციის საკითხი ერთ-ერთ მთავარ, ჯერ-ჯერობით გადაუჭრელ სამეცნიერო პრობლემად რჩება. ეს მნიშვნელოვანწილად იმითაცაა განპირობებული, რომ ზემოთ ხსენებული, სუსტი გარე ზემოქმედების გავლენით მძლავრი ენერგეტიკული პროცესების სინქრონიზაციის ეფექტი ტრადიციული წრფივი თეორიების ფარგლებში ვერ აიხსნება. მიზეზ-შედეგობრივი კავშირის არაცალსახობა აქ აშკარაა, რადგანაც მცირე ზეგავლენას ძალუძს პერიოდულ რეჟიმს მიუახლოვოს (გაზარდოს წესრიგის ხარისხი) ისეთი სისტემის დინამიკა, რომელსაც ამოძრავებს გაცილებით უფრო დიდი ძალა. მცირე ზემოქმედების მიმართ ამგვარი მაღალი გრძნობიარობა გულისხმობს, რომ საქმე გვაქვს ე.წ. მაღალგანზომილებიან არაწრფივ ურთიერთქმედებებთან.

3.2.1 ანთროპოგენული ზემოქმედების გავლენა სეისმური პროცესის დინამიკურ მახასიათებლებზე

სეისმური პროცესის შესწავლას დიდი მნიშვნელობა აქვს მასთან დაკავშირებული დიდი რისკის გათვალისწინებით. ეს რისკი განსაკუთრებით დიდია სეისმურად აქტიურ იმ რეგიონებში, სადაც განლაგებულია დიდი კაშხლები და წყალსაცავები.

ზოგადად, კაშხლები წარმოადგენენ ადამიანის მიერ მთავორიან გარემოსა და ხეობებში ხელოვნურად შექმნილ ბარიერებს. მათი აგების მიზანია ხელოვნურ წყალსაცავებში წყლის დიდი რაოდენობის დაგროვება და კონტროლი. კაშხლები მნიშვნელოვანი ნაგებობებია, რომელთა დანიშნულებაა ელექტრობის გენერაცია, წყალდიდობების თავიდან აცილება, ირიგაცია, სასმელი წყლის მარაგის შექმნა და ა. შ. ამავე დროს პოტენციურად კაშხლები წარმოადგენენ დიდი ეკოლოგიური საშიშროების წყაროს: წყალსაცავებში აკუმულირებული წყლის უზარმაზარი მასები პოტენციური საშიშროებაა მოსახლეობის სიცოცხლისათვის, ეკონომიკისათვის, ინფრასტრუქტურისათვის და ა.შ. ამიტომ კაშხლების უსაფრთხო კონტროლი ძალზე მნიშვნელოვანი პრაქტიკული ამოცანაა [84, 85, 86, 87].

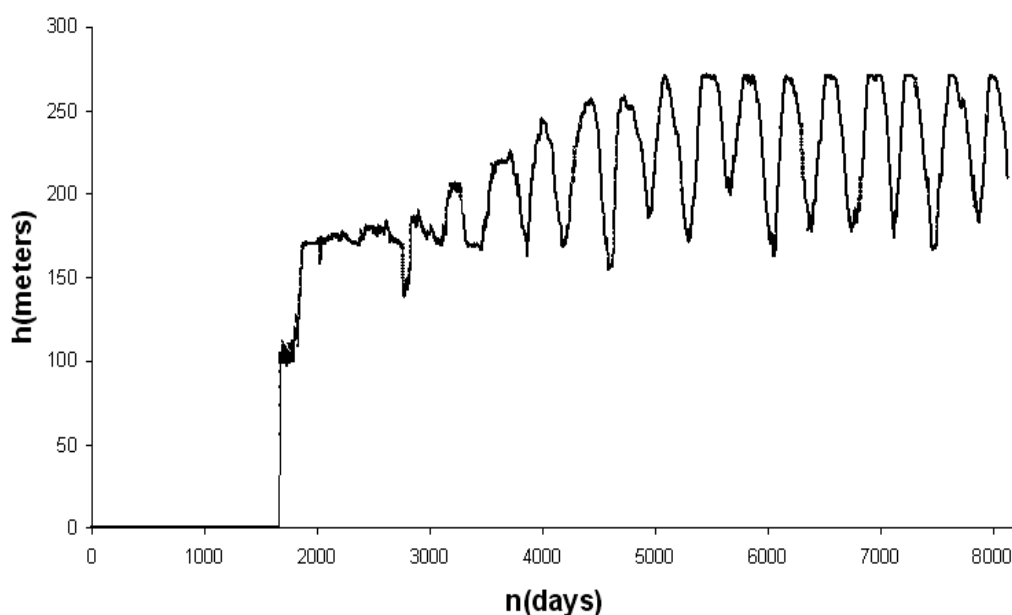
ბუნებრივ პროცესებში მაღალგანზომილებიანი რთული დინამიკის შესწავლის თვალსაზრისით, ჩვენი მიზანი იყო სუსტი (პერიოდული/იმპულსური) გარეშე ძალის ზედდების პირობებში, სეისმური/აკუსტიკური აქტიურობის სინქრონიზაციის ხარისხის კვლევა და რაოდენობრივი შეფასება (არათანაბარი ხახუნის აკუსტიკური ემისია განიხილება როგორც სეისმური პროცესის მოდელი იხ. 3.3-ში). როგორც აღინიშნა ამ ტიპის გამოკვლევები ხელს უწყობს ჩვენი ცოდნის გაფართოებას რთული ბუნებრივი პროცესის დინამიკის, მათ შორის, სეისმურობის შესახებ.

სადისერტაციო ნაშრომის ამ თავში განხილულია წყალსაცავის გავლენით განპირობებული ლოკალური სეისმური აქტივობის კონტროლის შესაძლებლობის საკითხი ენგურჰესის წყალსაცავში წყლის დონის პერიოდული ცვლილების ზეგავლენის მაგალითზე [88, 89, 99].

შესწავლილი იქნა ენგურის მაღლივი კაშხლის წყალსაცავში წყლის დონის ყოველდღიური ცვლილებისა და ლოკალური სეისმური ქსელის მეშვეობით ჩაწერილი მონაცემები. გამოთვლილ იქნა კაშხლის ირგვლივ დაახლოებით 90 კმ რადიუსში მიწისძვრათა ყოველთვიური სიხშირე.

3.2.2 განხილული მონაცემთა მასივები და ანალიზის მეთოდები

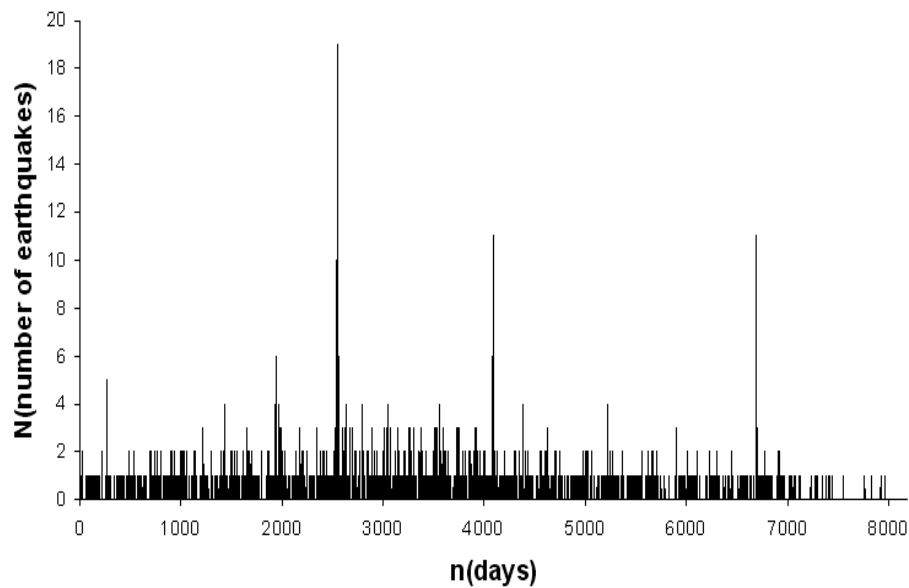
გამოკვლევისათვის გამოვიყენეთ ევროპაში ერთ-ერთ ყველაზე მაღალი – 272მ ენგურის მაღლივი კაშხლის ირგვლივ დაახლოებით 90 კმ რადიუსში მიწის-ძვრების ყოველდღიური რაოდენობის მონაცემები 1973-1995 წლებში. წყალსაცავში წყლის დონის ცვლილების მონაცემები შეგროვილი იყო ენგურის კაშხლის ტერიტორიის დატბორვიდან 1977 წ., 1987 წლიდან წყლის დონე პრაქტიკულად პერიოდულად იცვლებოდა (ნახ. 3.11 ა).



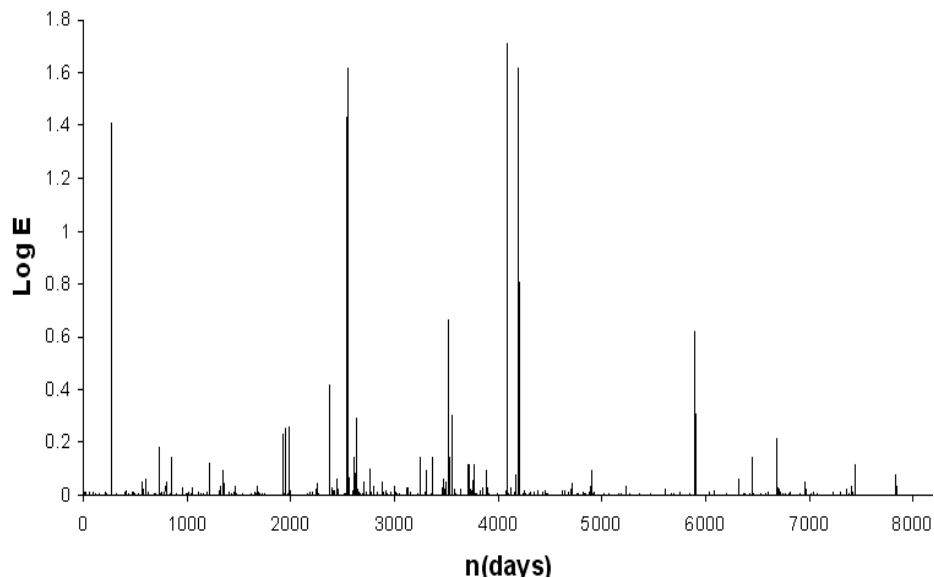
ნახ. 3.11 ა) ენგურის წყალსაცავში წყლის დონის ყოველდღიური ჩანაწერები 1975-1993 წლებში

ენგურის მაღალი კაშხლის გარშემო არეს ზომა, რომელიც შეიძლება ჩაითვალოს მგრძნობიარედ, იყო დაფუძნებული ენერგიის გამოთავისუფლების დაჩქარების კონცეფციაზე, სეისმურად კრიტიკულ რეგიონში. სახელდობრ, მინიმალური დახრილობის პარამეტრი C , ბენიოფის დაძაბულობა $E(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} E_i(t)^{1/2}$ იყო გამოანგარიშებული. აქ E_i არის ენერგია i -ში. ენგურის მაღალი კაშხლის მდებარეობა იყო განხილული, როგორც დაშვებული ვერტიკალური ეპიცენტრი ძლიერი მიწისძვრისა. (დეტალურად ნახეთ [89], სადაც ნაჩვენებია, რომ ენგურის მაღალი კაშხლის ირგვლივ ფართობის რადიუსი, რომელიც მგრძნობიარეა კაშხლის გავლე-

ნაზე, არის დაახლოებით 90 კმ). ყოველდღიური მონაცემების პაკეტი, რომელიც ხდება მიწისძვრებისა და სეისმური მოვლენებით გამოყოფილი ენერგია ზემოთ მოცემული მაგნიტუდის ზღვარზე $m \geq 1,6$ ამ 90 კმ ფართობში 1973-1995 წლები-სათვის ნაჩვენებია ნახ. 3.11 ბ და გ-ზე. გარდა ამ ყოველდღიური მონაცემებისა შესწავლილი იქნა მაგნიტუდების თანმიმდევრობის დროითი სერიები და მიწისძვრებს შორის დროის ინტერვალების მიმდევრობები. ეს მონაცემებიც დროის იგივე პერიოდისათვის და ფართობისათვის იქნა აღებული [71, 89, 90].



ნახ. 3.11 ბ) მიწისძვრების ყოველდღიური რაოდენობა



ნახ. 3.11 გ) ნორმალიზებული ყოველდღიური გამონთავისუფლებული სეისმური ენერგია

სეისმური პროცესის მსგავსი ძლიერად არაწრფივი პროცესების შესწავლისას ტრადიციული მეთოდები საკმარისი აღარ არის და როგორც ზემოთ აღინიშნა, შესაბამისი მონაცემთა მასივების დამუშავებისას სპეციალური, ახლახანს შემუშავებული მიდგომების კორექტული გამოყენებაა აუცილებელი. მონაცემთა დროითი სერიების ბოლო წლებში შემუშავებული ეს ახალი მეთოდები საშუალებას გვაძლევს რაოდენობრივად შევაფასოთ სინქრონიზაციის ხარისხი ძირითად პროცესსა და ზედღებული ველის ფაზებს შორის. დისერტაციის II თავში აღწერილ მეთოდებთან ერთად გამოყენებული იქნება სინქრონიზაციის ხარისხის დახასიათების რაოდენობრივი ზომები, მაგ: ინფორმაციული, შენონის ენტროპია, ფაზების დიფუზიის გამოთვლა. გარდა ამისა დროით მწკრივებში სინქრონიზაციისა და მოწესრიგებულობის აღმოსაჩენად გამოვიყენებთ ფრაქტალური განზომილებისა და რეკურენტულ-რაოდენობრივი ანალიზის მეთოდებს [91, 92, 93].

3.2.3 შედეგების განხილვა

როგორც ითქვა, მცირე პერიოდული ზეგავლენის მნიშვნელობა რთული სისტემების ქცევაზე კარგად არის ცნობილი. წარმოდგენილ დისერტაციაში ასეთი მცირე გარე ზეგავლენის მაგალითად განხილულია დიდ წყალსაცავში წყლის დონის ცვლილების გავლენა ლოკალური სეისმური აქტივობის დინამიკაზე. ზოგადად დიდი წყალსაცავები განლაგებული სეისმურად აქტიურ ზონაში ხშირად განიხილება როგორც ფაქტორი, რომელიც რაოდენობრივ და თვისობრივ ზეგავლენას ახდენს სეისმურობაზე. არის სარწმუნო ცნობები, რომ საკმაოდ ხშირად დიდი წყალსაცავის გავლენით ხდება სეისმური აქტივობის როგორც რიცხობრივი, ასევე თვისებრივი ზრდაც (იზრდება მიწისძვრების მაგნიტუდა წყალსაცავის გარშემო). ეს მოვლენა ცნობილია რეზერვუარის მიერ ინდუცირებული სეისმურობის (Reservoir induced seismicity – RIS) სახელით. ამის შემდეგ სეისმურობა არსებითად კლებულობს დონემდე, როდესაც უფრო პატარა მიწისძვრები ხდება უფრო დაბალი მაგნიტუდე-

ბით. იმისათვის, რომ ავხსნათ ეს დაკლება, ჩვენს მიერ შემოთავაზებულ იქნა ფაზური სინქრონიზაციის მოდელი, როდესაც ლოკალური სეისმური აქტივობის რეგულარობის ხარისხი იზრდება წყლის დონის პერიოდული ცვლილებისას (წყალსაცავით გამოწვეული სეისმურობის სინქრონიზაცია (Reservoir Induced Synchronization of Seismicity - RISS) [89, 94, 98, 103].

ზოგადად RISS გვთავაზობს სეისმოლოგიური აქტივობის კონტროლის სახეობას, მცირე გარე პერიოდულ ზეგავლენას სინქრონიზაციით და აქედან გამომდინარეობს მოწესრიგებულობის ზრდა რეგიონალური სეისმური აქტიურობისა დინამიკაში. ამგვარი ფაზური ცვლილებების გამოსავლენად რეზერვუარის ირგვლივ კრიტიკულ ზონაში შევისწავლეთ სეისმური აქტიურობისა და წყლის დონის ცვლილებების ყოველდღიური მონაცემები [101, 102].

$$\text{საშუალო ეფექტური ფაზის დიფუზიის კოეფიციენტი } D = \frac{d}{dt} [\langle \Delta \phi^2 \rangle - \langle \Delta \phi \rangle^2]$$

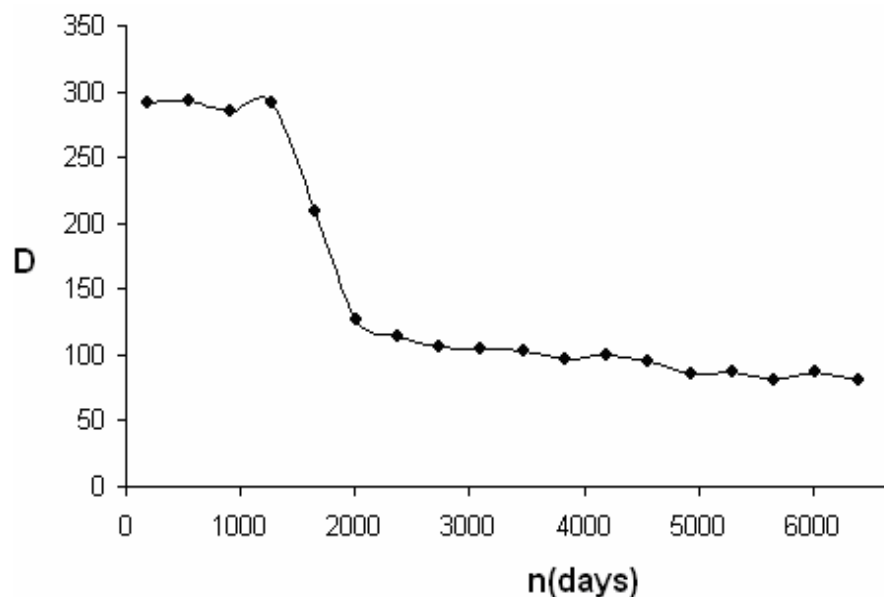
იყო გამოთვლილი, როგორც დამატებითი სტატისტიკური ზომა სინქრონიზაციის ხარისხის წყლის დონის ვარიაციასა და სეისმურობას შორის [89].

იმისათვის, რომ გამოგვეკვლია დინამიკური ცვლილებები ანალიზურ პროცესებში რეკურენტულ რაოდენობრივი ანალიზი (RQA) იყო გამოყენებული. RQA განსაკუთრებით სასარგებლოა იმისათვის, რომ გადაილახოს სიძნელებები, რომელსაც ხშირად ადგილი აქვთ, როდესაც საქმე გვაქვს არასტაციონარული და საკმაოდ მოკლე მონაცემების მასივთან [71].

როგორც დამატებითი რაოდენობრივი ნიშანი ფაზათა სინქრონიზაციის წყლის დონის პერიოდულ ვარიაციასა და დიდ კაშხლის გარშემო სეისმურ აქტივობას შორის, ჩვენ გამოვთვალეთ ფაზათა დიფუზიის კოეფიციენტი – D . როგორც ვხედავთ 3.12 ნახაზზე კაშხლის მშენებლობისა და ექსპლოატაციის მთელი ისტორიის განმავლობაში, ტერიტორიის წყლით დაფარვით დაწყებული ($n=1668$ ნახ. 3.11 ა) და რეგულარული რეჟიმით დამთავრებული ($n \approx 5000$), D ნამდვილად მინიმალურია წყლის დონის პერიოდული ცვლილებისას დროის ინტერვალებში.

ყოველდღიურად გამოთავისუფლებული სეისმური ენერგიის კლებას, რომელიც ნაჩვენებია ნახ. 3.11 გ-ზე, (რომელიც მიყვება RIS-ის პერიოდს), ჩვენ ვხსნით ფაზათა სინქრონიზაციით წყლის დონის ვარიაციასთან (RISS). როგორც ჩანს ეს ძალიან მნიშვნელოვანი მაგალითია მიზანდასახული ხელოვნური ცვლილებისა სეისმური პროცესების რთულ დინამიკაზე. აქ ხაზი უნდა გაესვას,

რომ დედამიწის ქერქში მიმდინარე მიწისძვრის გენერაციასთან დაკავშირებული პროცესები აღიარებულია როგორც არაშემთხვევითი, რომელსაც აქვს როგორც დაბალი და/ან ისევე მაღალი ზომის არაწრფივი სტრუქტურები. ერთ-ერთი დამახასიათებელი თვისება არაშემთხვევითი პროცესისა სისტემაში, რომლებიც ახლოს არიან კრიტიკულ მნიშვნელობასთან, არის მათი მაღალი მგრძნობიარობა საწყისი მდგომარეობის მიმართ, ისევე როგორც შედარებით სუსტი გარე ზეგავლენების მიმართ. რთული სისტემების ეს საერთო თვისება მოითხოვს განსაკუთრებულ ყურადღებას. რამდენადაც ლითოსფეროში მიმდინარე პროცესების პროგნოზირება, მოსაზრება მათი შესაძლო მართვის შესახებ, ძალზე მნიშვნელოვანია. ეს გასაგებია იმ უზარმაზარი სამეცნიერო და პრაქტიკული მნიშვნელობიდან გამომდინარე, რაც შეიძლება ჰქონდეს სეისმური პროცესის მართვას. შესაძლოა, გარკვეულ პირობებში, რთული სეისმური პროცესის მართვა განხორციელდეს სუსტი გარე ზეგავლენების მეშვეობით ფაზური სინქრონიზაციის მექანიზმით, ისე როგორც ამას ადგილი უნდა ჰქონდეს სირთულის თეორიის მიხედვით [13, 80, 88, 95].



ნახ. 3.12 ყოველდღიური გამონთავისუფლებულ სეისმურ ენერგიასა და ყოველდღიური წყლის დონის ცვლილების ფაზათა სხვაობის დიფუზიის კოეფიციენტის ცვლილება (გამოთვლა განხორციელდა 365 ანათვის შემცველი თანმიმდევრული მცოცავი ფანჯრებისათვის, პერიოდული ზემოქმედება დაიწყო $n \approx 5000$ -დან)

მართლაც, ცნობილია, რომ არაწრფივი დინამიკური სისტემები ხშირად პასუხობენ რთული მეთოდით ასეთ შინაგან ზემოქმედებებზე. ერთი ასეთი შესაძლო პასუხი არის სინქრონიზაცია. ასეთი ეფექტები ზოგადად დიდი ხანია ცნობილია,

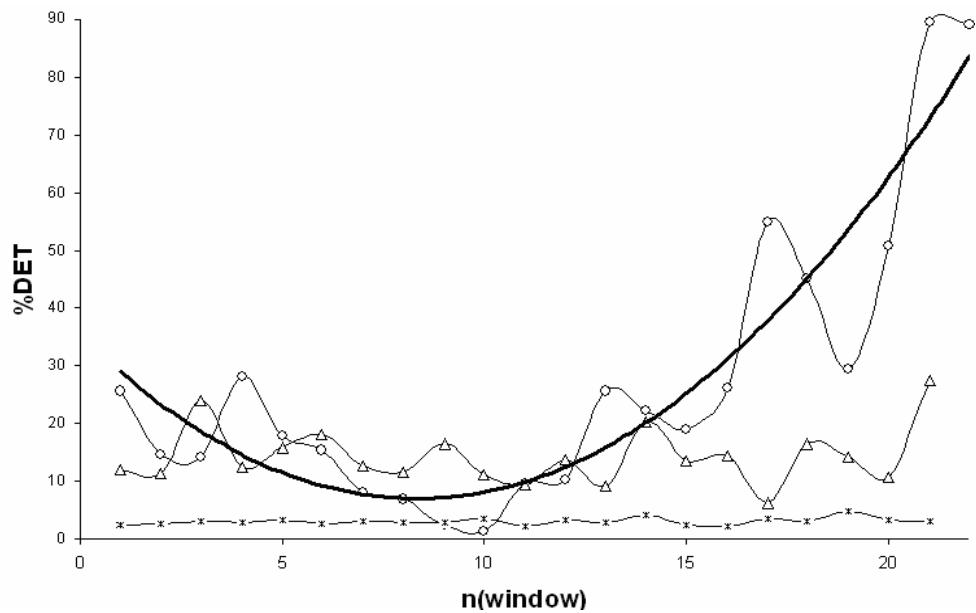
მას შემდეგ რაც ჰიუგენსმა აღმოაჩინა სინქრონიზაციის მოვლენა, როდესაც ადგილი აქვს არაწრფივი სისტემების თავისებურ ურთიერთრეგულირებას. ცნობილია სინქრონიზაციის რამდენიმე ტიპი, მაგალითად: ისეთი როგორიც არის იდენტური, განზოგადებული, ფაზათა სინქრონიზაცია და სხვა. ფაზათა სინქრონიზაცია წყლის ღონის პერიოდულ ცვლილებასა და სეისმურ აქტივობას შორის, რომელიც განვიხილეთ ჩვენს წინა გამოკვლევებში, აღიარებულია როგორც ყველაზე სუსტი ფორმა სინქრონიზაციის, როდესაც ურთიერთქმედება არაწრფივ ოსცილატორის რჩება უმეტესად არაკორელირებული. ზოგადად ურთიერთქმედ სისტემებს შეიძლება ჰქონდეთ განსხვავებული თვისებები [79, 81, 96].

ეს არის ის თუ რისთვისაც მივისწრაფოდით, რომ გამოგვეკვლია სეისმურ პროცესებში დინამიკური ცვლილებების ხასიათი, როდესაც ადგილი აქვს ფაზათა სინქრონიზაციას წყლის ღონის პერიოდული ვარიაციისას.

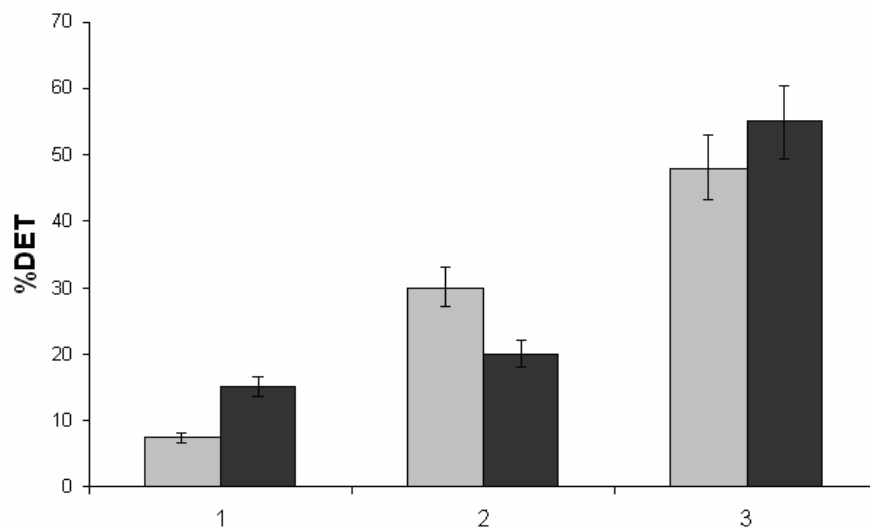
რადგანაც ჩვენ სუსტ ურთიერთქმედებებს განვიხილავდით, გამოვიყენეთ RQA მეთოდი. იგი ხშირად გამოიყენება, რათა გამოავლინოს პირდაპირი ცვლილებები რთული სისტემების დინამიკაში. ამ მხრივ მონაცემთა ანალიზისას ეს ყველაზე მოხერხებული ხერხია. ჩვენი RQA შედეგებიდან ჩანს, რომ, როდესაც კაშხლით გამოწვეული გარე ზეგავლენა დედამიწის ქერქზე პერიოდულია, მიწისძვრის განაწილების ხარისხიც უფრო რეგულირებული ხდება (ამას შეესაბამება %REC და %DET მაჩვენებლების ზრდა) (იხილეთ ნახ. 3.13 ა, შავი ხაზი) [97].

ძალიან მნიშვნელოვანია გავიხსენოთ, რომ წყლის რაოდენობის გაზრდის ზეგავლენა და მისი შემდგომი პერიოდული ცვლილებები არსებითად ეხება აგრეთვე მიწისძვრის მაგნიტუდების და მიწისძვრების დროში განაწილების ხასიათს (იხილეთ ნახ. 3.13 ბ).

როგორც 3.13 ბ) ნახაზიდან ჩანს მიწისძვრის მაგნიტუდების (ნაცრისფერი სვეტები) და დროში განაწილების (შავი სვეტები) %DET-ის, აშკარად იზრდება, როცა კაშხლის ზემოქმედება პერიოდულია.



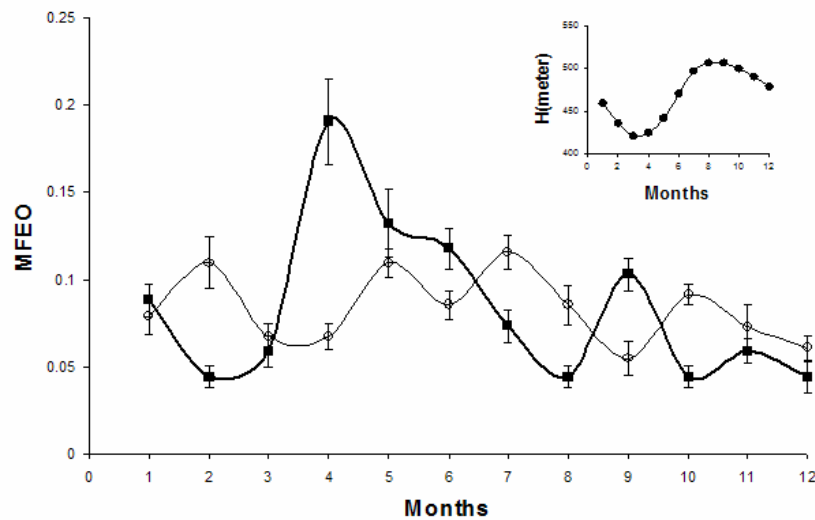
ნახ. 3.13 ა) მიწისძვრების ყოველდღიური რაოდენობის დროითი სერიის RQA და %DET გამოთვლილი არაგადამფარავი ერთი წლის მცოცავი ფანჯრებისათვის (წრეები). ერთ წლიან ფანჯრებში გამოთვლილი მიწისძვრების ყოველდღიური რაოდენობის გაშემთხვევითებული (ვარსკვლავები) და ფაზით გაშემთხვევითებული (სამკუთხედები) სუროგატები.



ნახ. 3.13 ბ) მაგნიტუდების (შავი სვეტები) და მიწისძვრებს შორის დროს ინტერვალების სერიების (ნაცრისფერი სვეტები) RQA და %DET (1) დატბორვის წინ, (2) დატბორვისა და რეზერვუარის შევსების პერიოდში, (3) რეზერვუარში წყლის დონის პერიოდული ცვლილების დროს.

ასეთივე დასკვნები გამოძღინარეობს რეკურენტულ რაოდენობრივი ანალიზის სხვა მახასიათებლების გამოთვლებითაც (ისეთები როგორიცაა: რეკურენტობა - %REC, ენტროპია, ლამინარია).

ჩვენს ვარაუდს ადასტურებს სეისმური კატალოგების ანალიზის შედეგები. ეს ანალიზი ავლენს გრძელპერიოდიან მდგენელებს მიწისძვრების ყოველდღიური რაოდენობის დროით სერიებში იმ დროს, როცა ენგურის წყალსაცავში წყლის დონე პერიოდულად იცვლებოდა. ეს კარგად ჩანს მიწისძვრების ყოველთვიური სიხშირის ცვლილების მაგალითზე იხ ნახ. 3. 14. აქ ყოველთვიური მიწისძვრების სიხშირე ითვლება მიწისძვრების რიცხვიდან, რომლებსაც ადგილი აქვს ყოველთვიურად უკანასკნელი 8 წლის დაკვირვების დროს წყლის დონის პერიოდული ცვლილებისას.



ნახ. 3.14 მიწისძვრების ყოველთვიური სიხშირის ცვლილება ენგურის კაშხლის ირგვლივ (თეთრი წრეები-წყლის დონის პერიოდულ ცვლილებამდე, შავი წრეები-წყლის დონის პერიოდული ცვლილებისას. ჩარჩოში წყლის დონის ცვლილება)

ეს შედეგები გარკვეულ საფუძველს გვაძლევს ვივარაუდოთ, რომ მიწისძვრების ყოველთვიურ სიხშირესა და ენგურის კაშხლის წყლის დონეს შორის ადგილი უნდა ჰქონდეს ე.წ. მაღალი რიგის სინქრონიზაციას [78].

დასკვნა

სეისმური პროცესის დინამიკა გამოკვლეული იქნა RISS-ის განმავლობაში. შესწავლილი იქნა წყლის დონის ყოველდღიური ცვლილებისა და ყოველდღიურად გამოთავისუფლებული სეისმური ენერგიის მონაცემთა მასივები, ისევე როგორც

მომდევნო მიწისძვრებს შორის დროის ინტერვალებისა და მაგნიტუდების დროითი სერიები.

ჩვენი შედეგები საფუძველს გვაძლევენ ვივარაუდოთ, რომ სეისმური პროცესის დინამიკა იცვლება წყლის დონის პერიოდული ცვლილების გავლენით, კერძოდ, იზრდება მიწისძვრების ყოველდღიური რაოდენობების განაწილებაში წესრიგის ხარისხი. ამით პროცესი განსხვავდება იმისგან, რაც ხდებოდა წყლის დონის ცვლილების გარეშე, ან წყლის დონის არარეგულარული ცვლილებისას.

მიღებულ შედეგებზე დაყრდნობით ვასკვნით, რომ მაღლივ კაშხალში წყლის დონის პერიოდული ცვლილებისას, კაშხლის ირგვლივ კრიტიკულ ზონაში სეისმური ენერგიის ყოველდღიური გამოთავისუფლების დინამიკა წესრიგის უფრო მაღალი ხარისხით ხასიათდება, ვიდრე წყლის დონის არარეგულარული ცვლილების დროს. ეს შეიძლება განხილულ იქნეს როგორც ლოკალური სეისმური აქტივობის შესაძლო კონტროლის მაგალითი ფაზური სინქრონიზაციის 1:1 ან მაღალი რიგის ფაზური სინქრონიზაციის მექანიზმით.

3.3 მაღალბანზომილებიანი რთული დინამიკის პროცესის შესწავლა ლაბორატორიული ექსპერიმენტის მანერით

როგორც წესი ბუნებრივი პროცესების მონაცემთა მასივები რაოდენობრივი და ზოგჯერ ხარისხობრივი თვალსაზრისით შეზღუდულია (მაგ. სეისმური, გეომაგნიტური, ჰიდროლოგიური და ა. შ. მონაცემები). ამის გამო მათი დინამიკური თვისებების კვლევა, მათ შორის, სინქრონიზაციული კვლევები, ხშირად ტარდება მოდელურ სისტემებზე. ამასთან ბუნებრივი პროცესების მათემატიკურ მოდელირებასთან დაკავშირებული პრობლემების გამო, ჩვენ მსგავსი ანალიზი შევასრულეთ აკუსტიკური ემისიის ლაბორატორიულ მონაცემებზე. ეს მონაცემები მიღებული იყო ლაბორატორიული ზამბარა-მცოცი (spring-slider) მოწყობილობის გამოყენებით. რთული დინამიკური პროცესების მართვის თვალსაზრისით, აგრეთვე შევისწავლეთ ამ პროცესზე გარე პერიოდული ელექტრომაგნიტური ზემოქმედების გავლენა.

3.3.1 ზამბარა-მცოცის აკუსტიკური ემისიის ლაბორატორიული მოწყობილობა

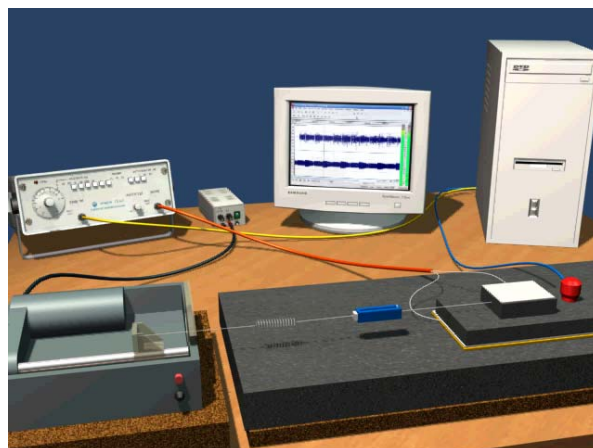
ცნობილია, რომ სეისმური პროცესი უკავშირდება ტექტონიკური რღვევის ბაგეების ციკლურ წანაცვლებებს (ე.წ. სეისმური ციკლი). სეისმურობის ფიზიკური მოდელის სახით განიხილავენ ე.წ. არათანაბარი ხახუნის (stick-slip) პროცესს. ხშირად შეისწავლიან ამ დროს გამოსხივებული აკუსტიკური ემისიის ინტენსივობას. როგორც ლაბორატორიული ექსპერიმენტები გვიჩვენებენ, გარე სუსტი კვაზი პერიოდული გავლენის შედეგად ადგილი აქვს არა მხოლოდ გეოფიზიკური ველების, არამედ აგრეთვე stick-slip-ის აკუსტიკური ემისიის სინქრონიზაციას: სიხშირულ-მაგნიტუდური დამოკიდებულების დახრის კუთხე იზრდება (ანუ მნიშვნელოვნად მცირდება მაქსიმალური ამპლიტუდების მქონე იმპულსების რაოდენობა).

ჩვენი კვლევის საგანი იყო არათანაბარი ხახუნის აკუსტიკური ემისიის დინამიკის შესწავლა მცირე პერიოდული ელექტრომაგნიტური ზემოქმედებისას. საკითხი მნიშვნელოვანია, რამდენადაც არცთუ ისე დიდი ხნის წინ აღმოჩენილ იქ-

ნა, რომ მცირე გარეშე ზემოქმედებისას რთული სისტემების დინამიკაში შეიძლება აღვილი ჰქონდეს მნიშვნელოვან რაოდენობრივ და თვისობრივ ცვლილებებს. ამასთან დაკავშირებით განსაკუთრებული მნიშვნელობა შეიძინა ამ გზით რთული სისტემების კონტროლის ე.ი. მათი თვისებების მიზანმიმართული ცვლილების საკითხმა. ვარაუდობენ, რომ პროცესში ჩართულ ძალებთან შედარებით მცირე მიზანმიმართული ზემოქმედებების მეშვეობით შესაძლებელი იქნება ვმართოთ რთული დინამიკური პროცესების მახასიათებლები მაშინაც კი, როცა თვითონ ეს პროცესები პრინციპულად არაპროგნოზირებადი შეიძლება იყოს. გარე მცირე ზემოქმედება შეიძლება იყოს როგორც ბუნებრივი, ასევე ადამიანის აქტივობით გამოწვეული. მაგ. მაგნეტოჰიდროდინამიკური განმუხტვები, წყლის დონის პერიოდული ცვლილებები დიდ წყალსაცავებში და ა.შ. ამ ტიპის ზემოქმედებას როგორც ცნობილია შეუძლია გარკვეულად შეცვალოს ლოკალური სეისმური პროცესების დინამიკური თვისებები [78, 104, 108].

კვლევის მიზანს წარმოადგენდა ლაბორატორიული მოწყობილობის შექმნა, რომლის საშუალებითაც შევისწავლით “არათანაბარი-ცოცვის” პროცესის თანმხლებ აკუსტიკურ ემისიას. ეს მნიშვნელოვანი იყო რამდენადაც “არათანაბარი-ცოცვის” პროცესი წარმოადგენს რთული სეისმური პროცესის ლაბორატორიულ მოდელს [106, 107, 112].

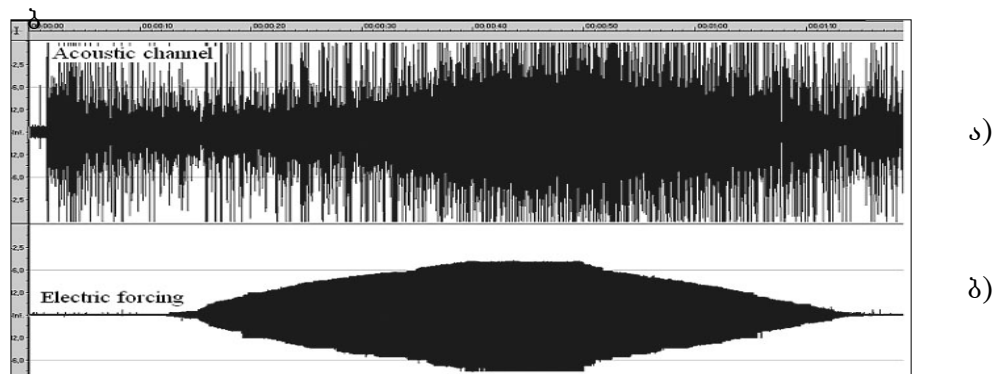
ამას გარდა მიზანი იყო არათანაბარი ხახუნის პროცესზე გარე სუსტი ელექტრომაგნიტური და მექანიკური ზემოქმედების გავლენის შესწავლა. აგრეთვე ამ გარე ზემოქმედებით ფაზური სინქრონიზაციის პროცესის გამოკვლევა. ექსპერიმენტული მოწყობილობის სურათი ნაჩვენებია ნახ. 3. 15.



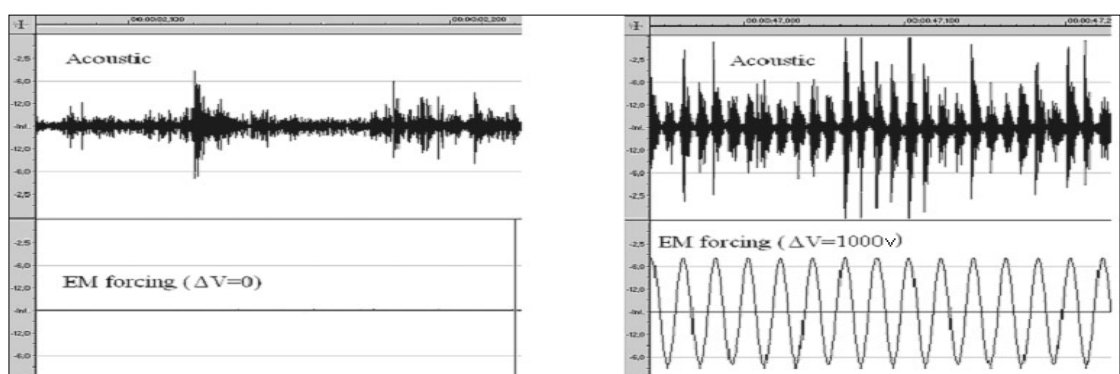
ნახ. 3. 15 არათანაბარი ხახუნის ექსპერიმენტული მოწყობილობა

ლაბორატორიული მოწყობილობა შედგებოდა ორი უხეშად დამუშავებული ბაზალტის ფილისაგან. ქვედა დამაგრებული იყო ჰორიზონტალურად, ზედა გადაადგილდებოდა მუდმივი სიჩქარით სპეციალური ძრავის საშუალებით, რომელიც დამაგრებული იყო მცოცავ ნიმუშზე. აკუსტიკური და ელექტრომაგნიტური ემისია, რომელიც თან ახლდა გაცურების შემთხვევებს იქნა რეგისტრირებული. გარე ზემოქმედების ხასიათისაგან დამოკიდებულებით არათანაბარი ცოცვის რეჟიმი იცვლებოდა და გარკვეულ პირობებში ადგილი ჰქონდა სრულ ფაზურ სინქრონიზაციას.

სტიკ-სლიპის ლაბორატორიული ექსპერიმენტის დროს გენერირებული აკუსტიკური ემისიის ანალიზი ჩატარდა არაწრფივი დინამიკისა და სინქრონიზაციის თეორიის თანამედროვე მეთოდების გამოყენებით. stick-slip აკუსტიკური ემისიის ტიპური ჩანაწერები წარმოდგენილია შემდეგ ნახაზზე.



ნახ. 3.16 - (ა) აკუსტიკური ემისია (AE) არათანაბარი სრიალის დროს; (ბ) ცვალებადი ინტენსივობის ზედღებული პერიოდული ელექტრომაგნიტური (EM) კელი.



ნახ. 3.17 წარმოადგენს ნახ. 3.16-ის გაშლილ შუა ნაწილს, რომელიც შეესაბამება პერიოდული ზემოქმედების მაქსიმალურ ინტენსივობას (დაახლოებით 1000 ვოლტს)

3.3.2 არათანაბარი ხახუნის პროცესის აკუსტიკური ემისიის მონაცემთა მასივების ანალიზის მეთოდების დამუშავება და შედეგები

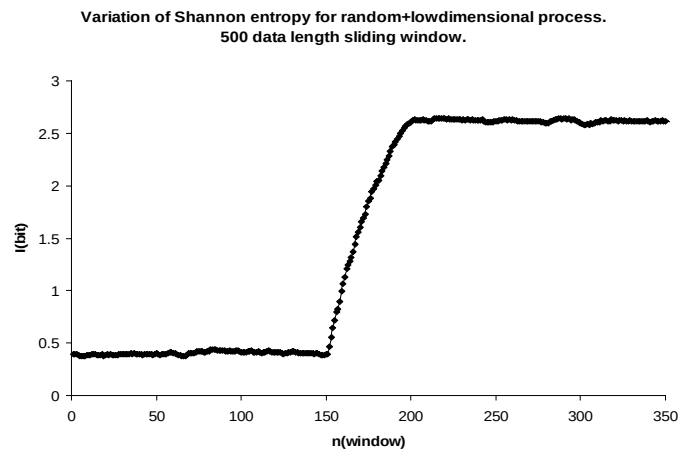
ლაბორატორიული მონაცემთა მასივების ანალიზისას საჭირო იყო სპეციალური მეთოდების შერჩევა. ამიტომ ამ თავში ჩვენ ცალკე აღვწერთ მათ. შემდეგ ეს მეთოდები საჭიროებდნენ ტესტირებას ხმაურის მაღალი დონის შემცველი არასტაციონარული დროითი სერიებისათვის. ეს ყველაფერი უშუალოდ უკავშირდებოდა აკუსტიკური ემისიის მონაცემების ანალიზის ჩვენ კონკრეტულ ამოცანას და მეთოდურ ნაწილში შეტანილი არ არის. კერძოდ ჩვენ გამოვიკვლიეთ: აკუსტიკური ემისიის მონაცემები და მათი კატალოგირებით მიღებული დროითი სერიები (აკუსტიკური ემისიის მაქსიმალური ამპლიტუდები, მომდევნო მაქსიმუმებს შორის დროის ინტერვალები, აკუსტიკური ემისიის სიმძლავრე).

პირველ რიგში მოვიძიეთ და დავამუშავეთ სათანადო ლიტერატურული წყაროები მონაცემთა მასივების დამუშავების თანამედროვე წრფივი და არაწრფივი მიდგომების შესახებ [12, 23, 78, 95].

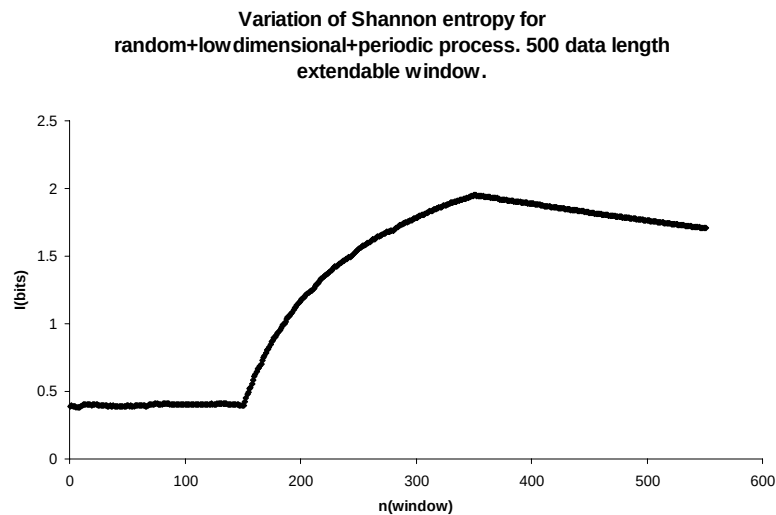
ამის შემდეგ, იმის გათვალისწინებით, რომ გარეშე სუსტი ზემოქმედებით აკუსტიკური მოვლენების ტრიგერირებისა და სინქრონიზაციის პრობლემა არ გულისხმობს პროცესებს შორის ძლიერი ფუნქციონალური კავშირების არსებობას, ჩვენ მიზნად დავისახეთ სუსტი და შორეული კორელაციების შეფასების მეთოდების გამოყენება. საამისოდ გამოსაკვლევ მასივებში აუცილებელია მახასიათებელი მნიშვნელობების განაწილების კანონზომიერების დადგენა [12, 23, 78, 95].

შერჩეული იქნა შენონის ენტროპიისა და შეუღლებული ინფორმაციის (Mutual Information) გამოთვლის მეთოდები. შეიქმნა შესაბამისი პროგრამული პაკეტები [23, 12].

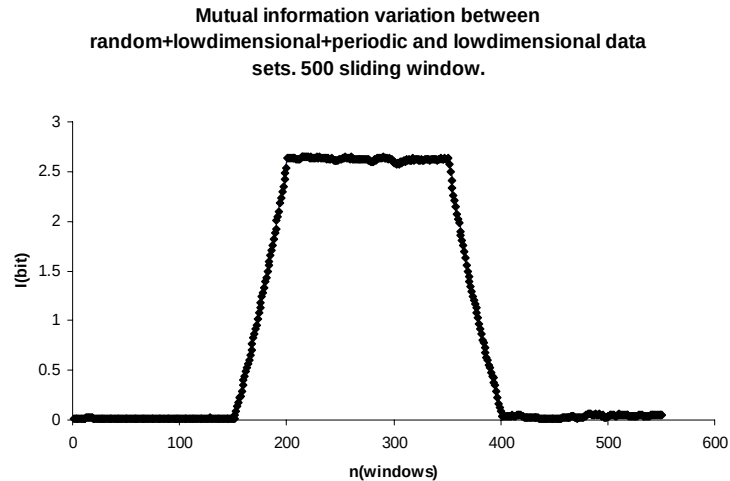
აღნიშნული მეთოდების შესასწავლი ამოცანისადმი ადეკვატურობას ადასტურებენ ნახ. 3. 18, ნახ. 3. 19, ა და ბ-ზე წარმოდგენილი მოდელური დროითი სერიებისათვის მიღებული შედეგები.



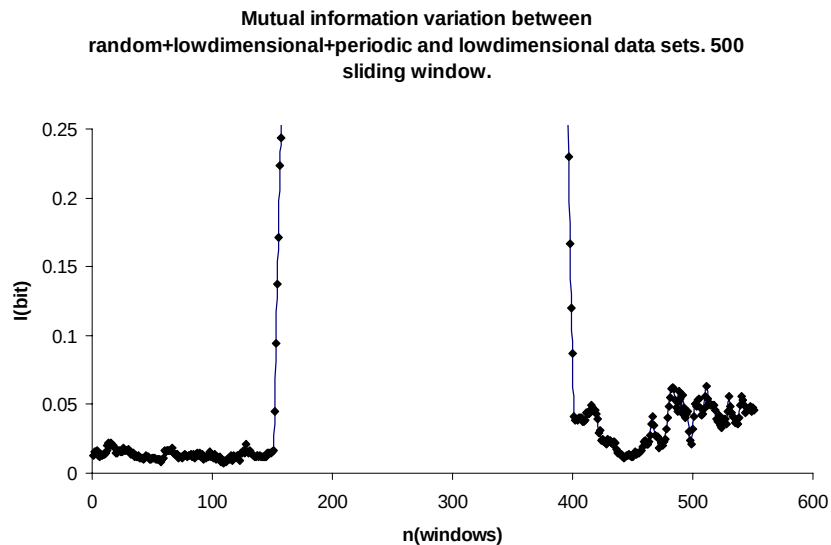
ნახ. 3.18. ა) მითითებული სიგრძის ნაწილობრივ ურთიერთგადამფარავი მცოცავი ფანჯრებისათვის გამოთვლილი შენონის ენტროპიის ვარიაცია დროითი სერიისათვის რომლის პირველი 2000 წვერი შემთხვევითია, ხოლო მომდევნო 2000 ლორენცის ატრაქტორის Z მდგენლს წარმოადგენს. აშკარაა, რომ მეთოდი განასხვავებს ორ ქვე მასივში წესრიგის ხარისხის ცვლილებას



ნახ. 3.18. ბ) სურათზე ნაჩვენებია 10 ანათვლით დაგრძელებადი ფანჯრებისათვის გამოთვლილი შენონის ენტროპიის ვარიაცია დროითი სერიისათვის, რომლის პირველი 2000 წვერი შემთხვევითია, მომდევნო 2000 ლორენცის ატრაქტორის Z მდგენლს, ხოლო ბოლო 2000 პერიოდულ პროცესს წარმოადგენს. აშკარად დაიკვირვება ქვე მასივებში წესრიგის ხარისხის ცვლილება. მნიშვნელოვანია, რომ წესრიგის ხარისხი ბოლო ორ ქვესერიში ერთმანეთისაგან მცირედ განსხვავდება



ნახ. 3.19 ა) ნაჩვენებია მომდევნო მცოცავი ფანჯრებისათვის გამოთვლილი შეუღლებული ინფორმაციის რაოდენობის ვარიაცია დროითი სერიებისათვის, რომელთაგან პირველი შედგენილია სამი ქვესერიისაგან (2000 წვერი შემთხვევითია, მომდევნო 2000 ლორენცის ატრაქტორის Z მდგენლს, ხოლო ბოლო 2000 პერიოდულ პროცესს წარმოადგენს, ხოლო მეორე მთლიანად ლორენცის ატრაქტორის Z მდგენლს წარმოადგენს. ამკარად დაიკვირება შუალედურ ქვემასივში არაწრფივი კორელაციების ზრდა



ნახ. 3.19 ბ) ჩანს ფუნქციონალური კავშირის უფრო მაღალი ხარისხი მეორე (დაბალგანზომილებიანი პროცესი) და მესამე ქვესერიებს (პერიოდული პროცესი) შორის, პირველი ქვე სერიისაგან (შემთხვევითი პროცესი) განსხვავებით

აკუსტიკური ემისიის მონაცემთა მასივების და მათი კატალოგირებით მიღებულ დროით სერიებში ფაზური სინქრონიზაციის მახასიათებლების შესწავლა დისერტაციის ერთ-ერთ მთავარ მიზანს წარმოადგენდა. შესაბამისად აუცილებელი იყო რთულ დინამიკურ პროცესებში სინქრონიზაციის რაოდენობრივი შესწავლის მეთოდების შერჩევა. ფაზური სინქრონიზაციის შეფასებისთვის, გამოვიყენეთ რეგისტრირებული აკუსტიკური ემისიის მონაცემთა მასივიდან ჰილბერტის გარდაქმნის მეშვეობით ჭეშმარიტი ფაზის მნიშვნელობისა და გარსის (envelope) გამოთვლის მეთოდები. აკუსტიკური ემისიის შემოსვლის მომენტის დადგენისათვის გამოვიყენეთ როგორც აკაიკეს, ასევე ჩვენ მიერ შემუშავებული ერთობლივი ინფორმაციის გამოთვლის მეთოდები. ფაზების სხვაობის სვლის რაოდენობრივი შეფასებისათვის დამუშავდა ფაზების ალბათური განაწილებისა და ფაზური დიფუზიის მეთოდები, აგრეთვე სინქრონიზაციის რაოდენობრივი შეფასების მეთოდი. ეს მეთოდები უნივერსალურია და გამოიყენება აგრეთვე სეისმური მონაცემების დამუშავებისათვის [95, 105, 109, 110, 111].

აღნიშნული მეთოდების შესასწავლად შეიქმნა შესაბამისი პროგრამული პაკეტები: shan.exe, MI.exe, MI1.exe, MiAmax.exe, MIAmax1.exe, MINmax.exe, shan1.exe, shann.exe, hilb.exe, envelope.exe, ANBW.exe, ANBW2.exe, filt.exe, nAIC.exe, nsfm.exe; nSA.exe, nSi.exe, ena.exe, enb.exe, nfilter.exe, npha.exe, nsinc.exe და ა.შ. ეს პროგრამები შექმნილია პროგრამირების ენა C++-ის გამოყენებით. ამ პროგრამების ნაწილი წარმოდგენილია დანართის სახით (იხ. დანართი).

აკუსტიკური ემისიის რთული ბუნებიდან გამომდინარე საჭირო იყო ცალკეული ტალღური პაკეტების ერთმანეთისგან გამოყოფა, რათა დაგვეკვირვებოდით შესაძლო სინქრონიზაციის პროცესს. ამისათვის ჩვენ გამოვიყენეთ შემდეგი მეთოდები: ჰილბერტის გარდაქმნისა და შემდეგ მისი საშუალებით ტალღური გარსის აგების მეთოდი [95, 105].

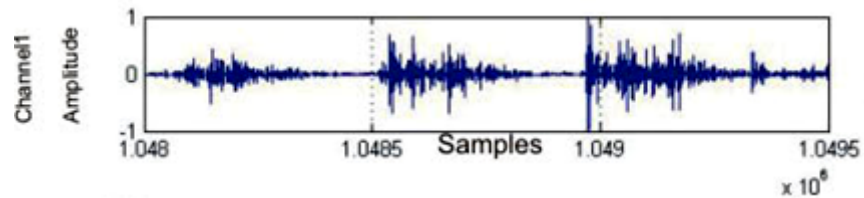
$$\bar{R}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{R(u)}{\omega - u} du = H\{R(t)\} \quad (3. 3)$$

$$E(t) = \sqrt{R(t)^2 + \bar{R}(t)^2} \quad (3.4)$$

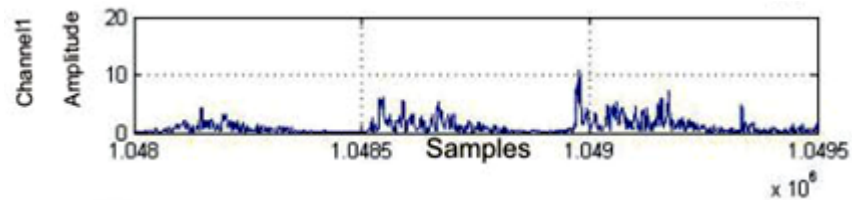
ასევე ჩვენ გამოვიყენეთ აკაიკეს ინფორმაციული კრიტერიუმის გამოსათვლელი ფორმულა [109]:

$$AIC(t) = t \cdot \log\{\text{var}(x, [1, t])\} + (N - t - 1) \cdot \log\{\text{var}(x[t + 1, N])\} \quad (3. 5)$$

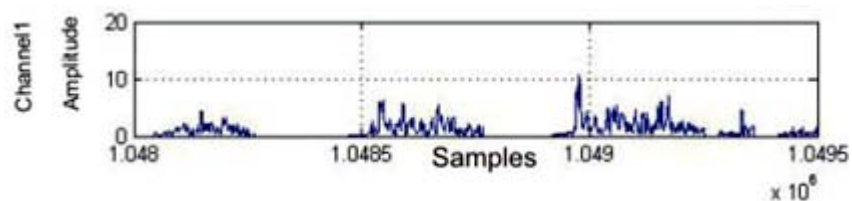
ქვემოთ მოცემულ ნახ. 3. 20 ნაჩვენებია: (ა)—აკუსტიკური ემისიის ტიპური ჩანაწერი, (ბ)—აკუსტიკური ემისიის სიგნალისაგან მიღებული გარსი. ამასთან ჩვენ საშუალება მოგვეცა სიგნალისა და ხმაურების გარჩევის ხარისხი გაგვეზარდა და ხმაურიანი ნაწილი ამის შემდეგ მოვაჭერით (გ). მოვაჭერით ისე, რომ გამოვთვალეთ სტანდარტული დევიაცია და მასზე ნაკლები მნიშვნელობები გავუტოლეთ ნულს (გ). ხოლო (დ) არის გაფილტრული სიგნალი.



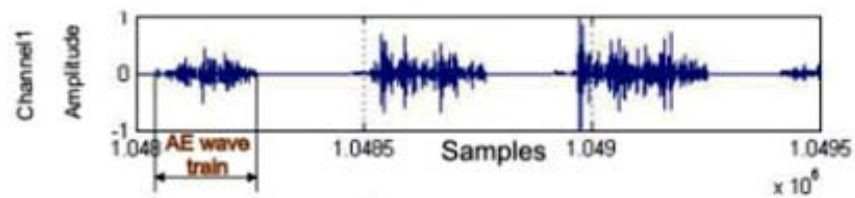
ნახ. 3. 20 (ა)—აკუსტიკური ემისიის ტიპური ჩანაწერი



ნახ. 3. 20 (ბ)—აკუსტიკური ემისიის სიგნალისაგან მიღებული გარსი

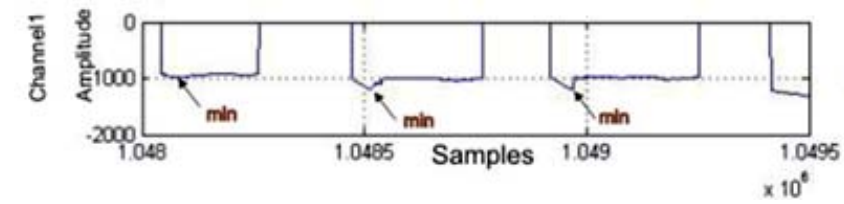


ნახ. 3. 20 (გ) ხმაურისგან გაფილტრული სიგნალი

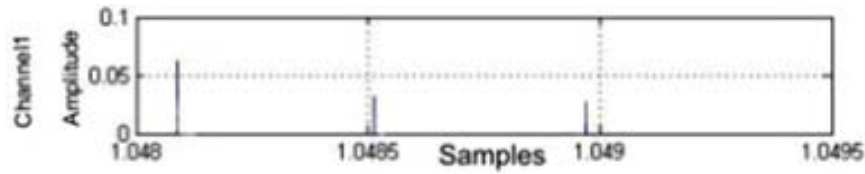


ნახ. 3. 20 (დ) გაფილტრული სიგნალი

ხმაურის განულების და ტალღური ცუგების გამოყოფის შემდეგ, ჩვენ გამოვიყენეთ აკაიკეს ინფორმაციული მინიმუმის გამოყოფის მეთოდი, რითაც დავადგინეთ დრეკადი აკუსტიკური ტალღის შემოსვლის მომენტი.



ა)

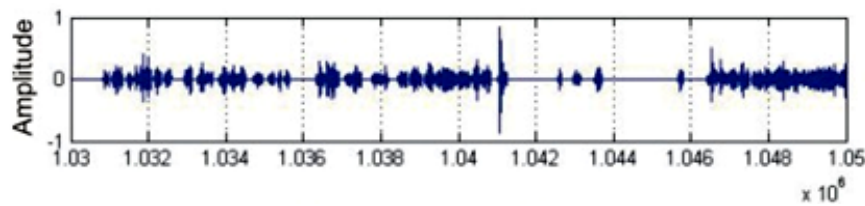


ბ)

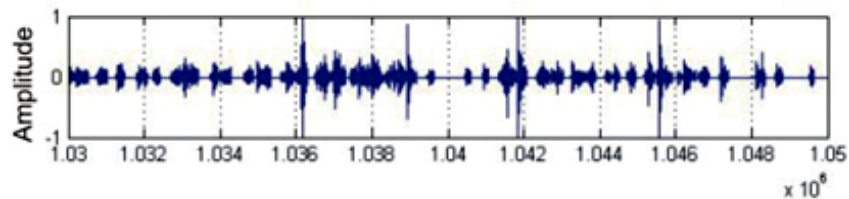
ნახ. 3. 21 დრეკადი აკუსტიკური ტალღის შემოსვლის მომენტი

ნახ. 3. 21 (ბ)–სურათზე დატოვებულია მხოლოდ აკუსტიკური ამპლიტუდების ის მნიშვნელობები, რომელიც შეესაბამება აკაიკეს მინიმუმს.

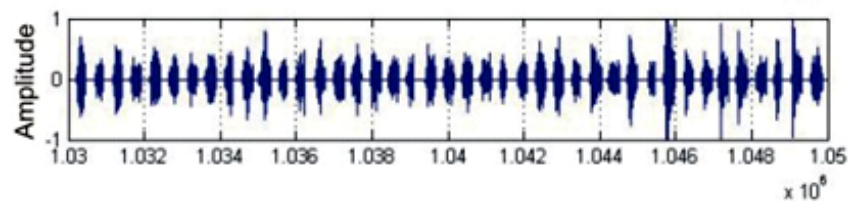
შემდეგ ნახაზზე ნაჩვენებია აკუსტიკური ემისიის ტიპური ჩანაწერების ფრაგმენტები გარე ზემოქმედების სხვადასხვა პირობებში.



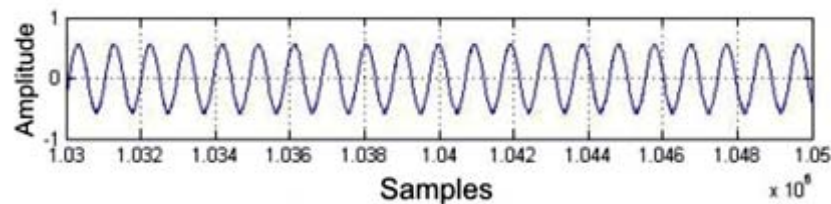
ა) გარე ზემოქმედება შეადგენს გამწვევი ძალის 5%



ბ) გარე ზემოქმედება შეადგენს გამწვევი ძალის 12%



გ) გარე ზემოქმედება შეადგენს გამწვევი ძალის 25%



დ) გარე სინუსოიდალური სიგნალი

ნახ. 3. 22 აკუსტიკური ემისიის ტიპური ჩანაწერების ფრაგმენტები გარე ზემოქმედების სხვადასხვა პირობებში

როგორც ვხედავთ 25%-თვის გვაქვს კარგი სინქრონიზაცია. ეს არის თვისობრივი შეფასება, საჭიროა რაოდენობრივი ანალიზი.

აკუსტიკური ემისიის პროცესის მახასიათებელი კატალოგები (მომდევნო მაქსიმუმების, მომდევნო შემოსვლების) შედგენილია არათანაბარი ხაზუნისა და გარე ზემოქმედების სხვადასხვა პირობებისათვის.

ექსპერიმენტში შერჩეული პირობებისათვის გამოვთვალეთ აკუსტიკური ემისიის მაქსიმალურ ამპლიტუდების კატალოგების შენონის ენტროპია (ცხრილი 2). კერძოდ, ვაკვირდებით აკუსტიკურ ემისიას გარე ზემოქმედი სიგნალის სხვადასხვა სიხშირისათვის.

ცხრილი 2.

80000 მონაცემის სიგრძის დროით სერიაში 10000 მონაცემიანი მცოცავი ფანჯრის 5000 მონაცემიანი ბიჯით შენონის ენტროპიის გამოთვლის შედეგები სხვადასხვა სიხშირისათვის					
$f=58.8\text{Hz}$	$f=21.55\text{Hz}$	$f=111\text{Hz}$	$f=1000\text{ Hz}$	$f=1219\text{ Hz}$	$f=10\ 000\text{ Hz}$
2,1654796	1,4519979	2,3883422	1,831781	1,8733681	1,2037529
2,1636603	1,3854798	2,4108907	1,8391645	1,8499277	1,0810484
2,1639847	1,55E+00	2,4214989	1,8454882	1,8457509	0,95534504
2,1636655	1,74E+00	2,4056674	1,8429302	1,8466505	0,98603001
2,1639292	1,73E+00	2,380887	1,8361912	1,852464	0,96589749
2,1654113	1,74E+00	2,3783791	1,8343014	1,8492126	1,0496065
2,165003	1,7344831	2,391639	1,9134481	1,8473933	0,68533932
2,1648329	1,6897257	2,4044928	1,9748398	1,8476757	0,00
2,1725338	1,590022	2,4206929	1,9550784	1,9202351	0,00
2,182221	1,5249216	2,4153926	1,9331621	1,9800787	0,00
2,1815344	1,4354287	2,4095815	1,9041143	1,9646043	0,00
2,1780786	1,4145989	2,4037107	1,8825781	1,9425587	0,00
2,1778218	1,5940131	2,3993609	1,8614245	1,9137885	0,00
2,1773362	1,74	2,398457	1,8326777	1,8952101	0,00
2,1754476	1,74	2,3988912	1,8392655	1,8770551	0,00
საშუალო მნიშვნელობა					
2,170729327	1,60E+00	2,401858927	1,875096333	1,887064887	0,461801311

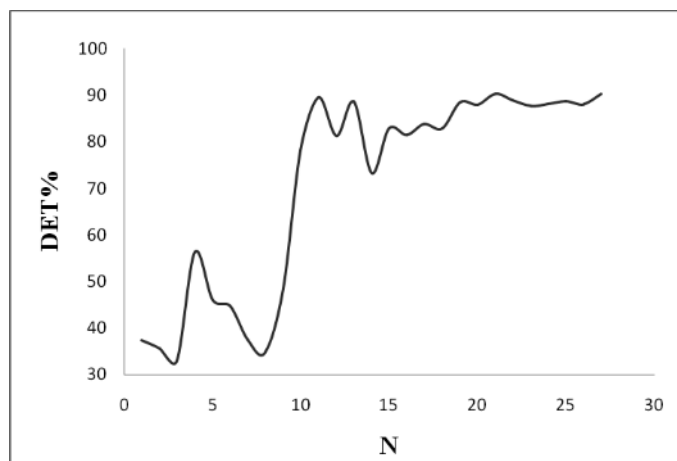
იმისათვის რომ გამოგვეკვლია დინამიკური ცვლილებები შესასწავლ პროცესებში, გამოვიყენეთ რეკურენტულ-რაოდენობრივი ანალიზის მეთოდი. ეს თანამედროვე მეთოდი მეტად მოხერხებულია მოკლე და ხმაურიანი დროითი სერიებისათვის.

გამოვიკვლიეთ აკუსტიკური ემისიის სერიებიდან თანმიმდევრულ დასაწყისებს და მაქსიმუმებს შორის გამოთვლილი დროის ინტერვალები. ჩვენ ამ სადისერტაციო ნაშრომში გამოვთვალეთ ერთ-ერთი RQA მახასიათებელი, დეტერმინიზმის პროცენტი (%DET).

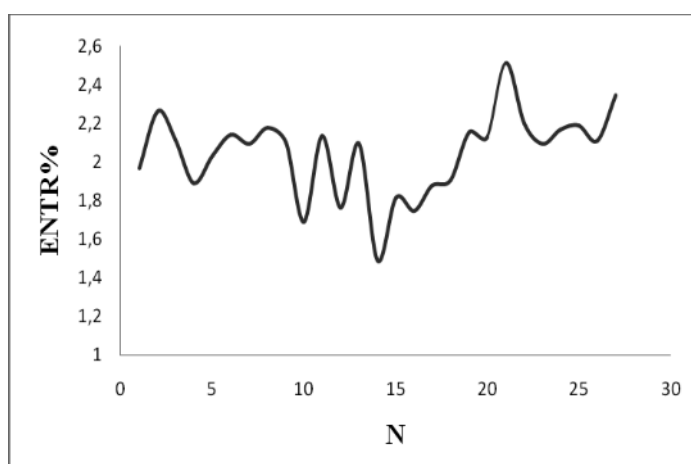
არათანაბარი ხაზუნის პროცესზე სიხშირის გავლენის დინამიკური ასპექტების შესასწავლად პროცესის რეკურენტული ბუნება გამოვიკვლიეთ. გამოთვლების შედეგები მოცემულია ცხრილში 3, ხოლო ნახ. 3. 23-ზე წარმოდგენილია რეკურენტული არაწრფივი დინამიკური მახასიათებლების მრუდები.

ცხრილი 3. აკუსტიკური ემისიის მონაცემების რეკურენტული მახასიათებლები.

Nonlinear Parametrs (10 Volt, 20 Hertz)	RR%	DET%	mean diagonal line length	maximal diagonal line length	ENTR%	LAM	TT	maximal vertical line length	recurrence time of 1 st time	recurrence plot of 2 nd time
	10	29.291	4.025	46	1.909	0.467	2.925	52	9.614	13.896
	10	32.116	4.682	60	2.142	0.52	3.17	58	9.636	14.968
	10	37.399	5.022	57	2.244	0.58	3.417	82	9.594	16.278
	10	34.55	4.944	65	2.223	0.541	3.341	64	9.431	15.199
	10	30.857	4.513	62	2.091	0.508	3.052	51	9.67	14.694
	10	59.897	2.924	115	0.948	0.714	3.538	137	9.132	18.738
	10	37.528	4.908	56	2.214	0.58	3.336	57	9.676	16.311
	avg	37.376857			avg	1.96728571				
Nonlinear Parametrs (50 Volt, 60 Hertz)	RR%	DET%	mean diagonal line length	maximal diagonal line length	ENTR%	LAM	TT	maximal vertical line length	recurrence time of 1 st time	recurrence plot of 2 nd time
	10	46.173	2.49	59	0.636	0.554	2.838	77	9.29	14.504
	10	47.561	2.535	70	0.669	0.565	2.891	100	9.245	14.682
	10	86.053	4.056	55	1.931	0.636	3.464	47	9.63	17.6
	10	58.348	2.747	84	0.799	0.674	3.296	113	8.408	15.869
	10	96.358	25.604	2391	2.547	0.977	36.673	2426	6.272	128.764
	10	87.063	4.204	51	1.987	0.654	3.584	79	9.42	17.845
	10	91.18	7.783	777	1.863	0.934	10.74	637	2.24	14.665
	avg	73.248			avg	1.49028571				
Nonlinear Parametrs (100 Volt, 100 Hertz)	RR%	DET%	mean diagonal line length	maximal diagonal line length	ENTR%	LAM	TT	maximal vertical line length	recurrence time of 1 st time	recurrence plot of 2 nd time
	10	88.43	5.1	83	2.27	0.62	4.065	103	9.589	18.018
	10	92.445	5.698	118	2.42	0.65	4.356	121	9.649	19.356
	10	95.083	8.681	1250	2.752	0.939	10.767	743	6.141	41.589
	10	89.525	5.248	81	2.312	0.66	4.207	92	9.509	19.153
	10	88.598	4.846	79	2.2	0.639	3.896	70	9.5	18.124
	10	88.16	4.777	83	2.178	0.621	3.886	95	9.481	17.605
	10	89.366	5.093	70	2.27	0.669	4.236	108	9.555	19.556
	avg	90.229571			avg	2.34314286				



ა)



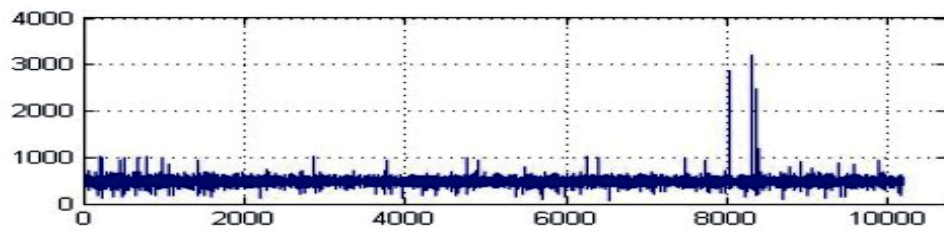
ბ)

ნახ. 3. 23 აკუსტიკური ემისიის არაწრფივი დინამიკური მახასიათებლების მრუდები სხვადასხვა ექსპერიმენტებისათვის: ა) DET% და ბ) ENTR%

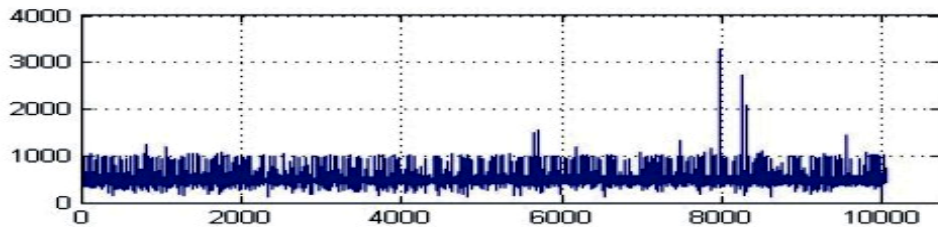
ეს შედეგები სინქრონიზაციის მახასიათებლების ზრდის კვალობაზე მიუთითებს გარე ზემოქმედების მატრიგერირებელი მნიშვნელობის მზარდ როლზე არათანაბარი ხახუნის შესაბამისი პირობებისათვის.

ჩვენ გვაქვს 2 დროითი სერია: 1. აკუსტიკური ემისიის დასაწყისების (შემოსვლების) დროის ინტერვალები, 2. მაქსიმუმებს შორის დროის ინტერვალები.

ვითვლით დროის ინტერვალებს დასაწყისებს შორის და მაქსიმუმებს შორის. ვითვლით მათ შორის ფაზების სხვაობის ნახევარ მაქსიმუმებს, როგორც ერთისთვის, ისე მეორისათვის.



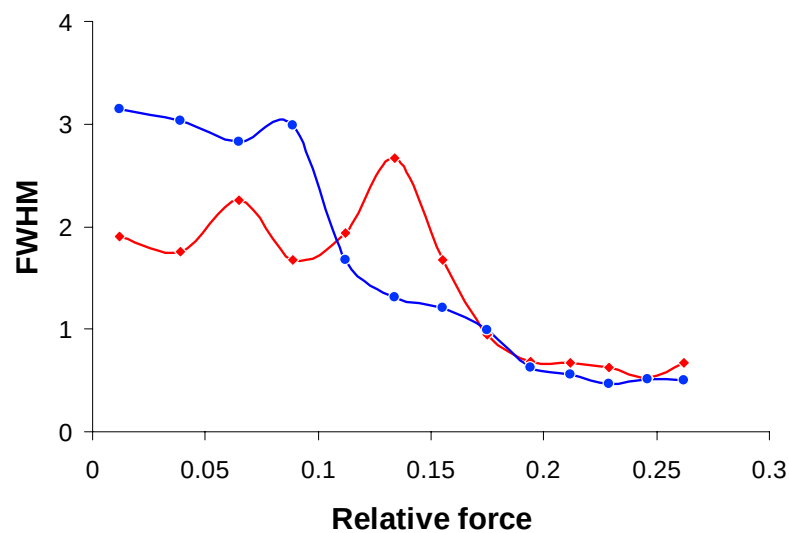
ა)



ბ)

ნახ. 3.24 აკუსტიკური ემისიის დროითი სერიიდან გამოთვლილი მომდევნო მაქსიმუმებსა (ა) და მომდევნო შემოსვლებს (onsets) (ბ) შორის დროის ინტერვალების სერიების ტიპიური კატალოგები

აკუსტიკური ემისიის პროცესის მახასიათებელი კატალოგები (მომდევნო მაქსიმუმების, მომდევნო შემოსვლების) შედგენილია არათანაბარი ხაზუნისა და გარე ზემოქმედების სხვადასხვა პირობებისათვის.



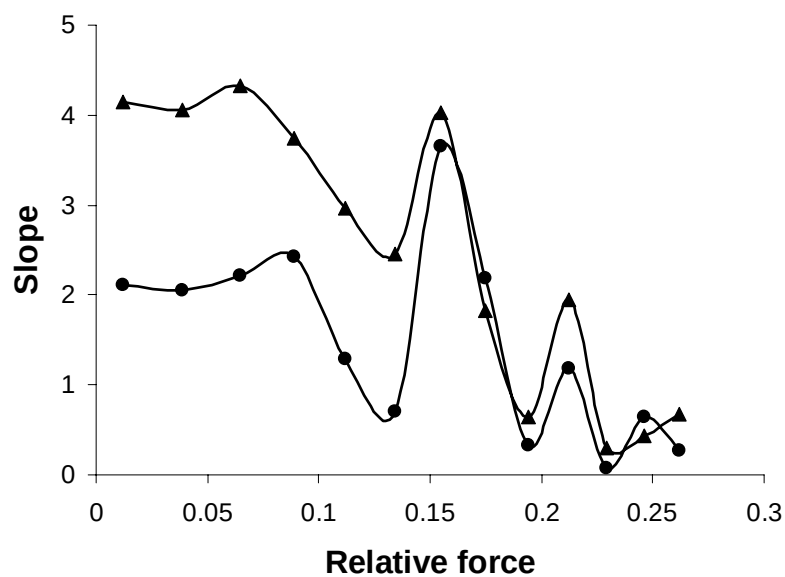
ნახ. 3. 25 განაწილების ფუნქციის სიგანის ცვლილება ფარდობითი ძალის მიხედვით (წითელი ხაზი – შემოსვლები, ლურჯი ხაზი – მაქსიმუმები)

როგორც ნახ. 3. 25 ვხედავთ ზემოქმედი ფარდობით ძალა იზრდება, განაწილების ფუნქციის სიგანე ვიწროვდება, ადგილი აქვს სინქრონიზაციას. გამოთვლილია სინქრონიზაციის ზომა.

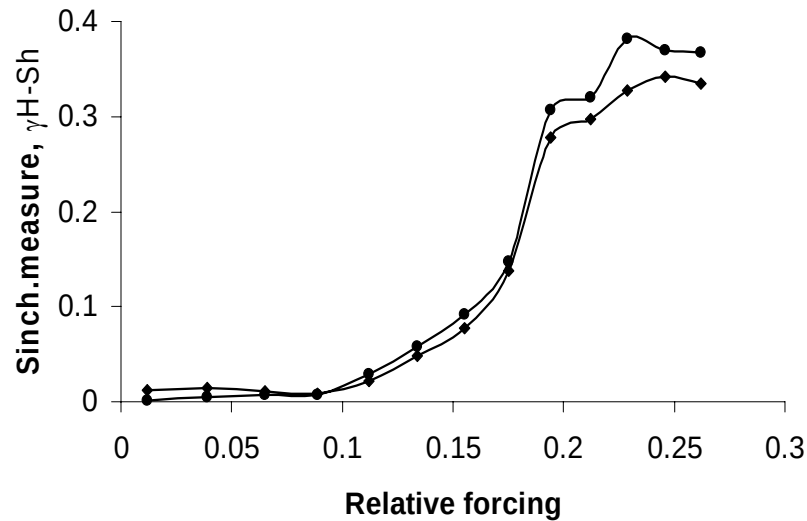
ფაზის სხვაობის ზრდაზე დაკვირვებით წარმოდგენას შევიქმნით პროცესის შესახებ. მაგ. თუ დამოკიდებულება მეტადაა დახრილი სინქრონიზაცია ნაკლებია, თუ ნაკლებად დახრილია მეტად სინქრონიზებულია.

როგორც ნახ. 3. 26 ა)-დან ჩანს გარეთა ზემოქმედება იზრდება ფაზების სვლის დახრილობა მცირდება. მინიმუმს აღწევს არა მაქსიმალურ ზემოქმედებაზე, არამედ უფრო ადრე. რაც იმას ნიშნავს, რომ ადგილი აქვს სწორედ სინქრონიზაციას და არა მოდულაციას.

ნახ. 3. 26 ბ)-ზე წარმოდგენილია სინქრონიზაციის რაოდენობრივი მახასიათებლის γ_{H-sh} ცვლილება გარე ზემოქმედების ზრდის პროცესში. ის მაქსიმუმს უფრო ადრე აღწევს, ვიდრე გარე ძალა მიაღწევს, მერე ის მცირდება [110].



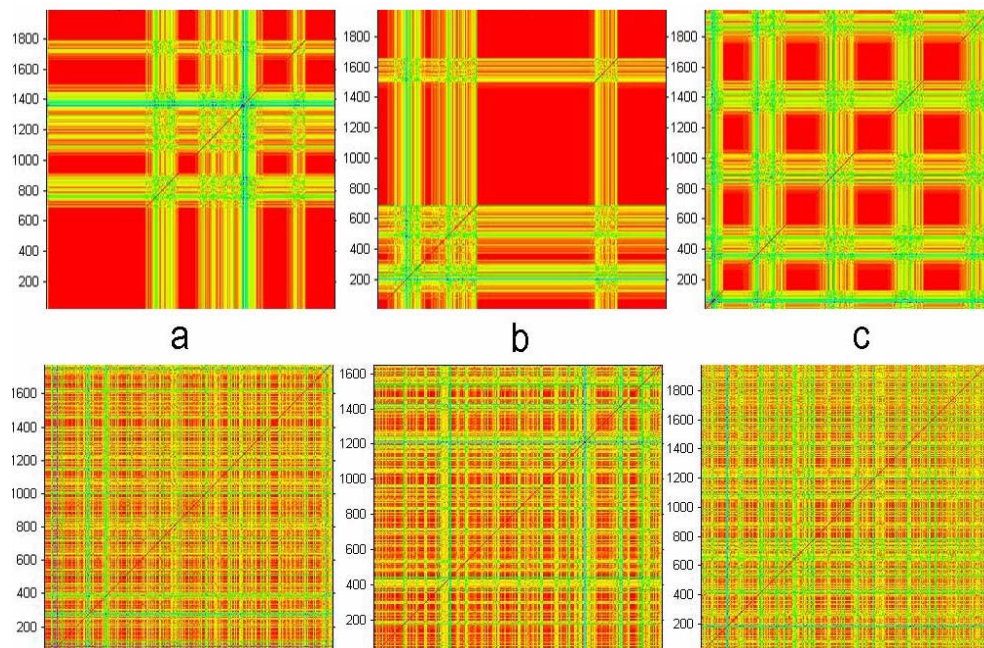
ნახ. 3. 26 ა) აკუსტიკური ემისიის შემოსვლების (სამკუთხედები) და აკუსტიკური ემისიის მაქსიმუმების (წრეები) ფაზების სვლის დათვლის მაგალითი



ნახ. 3. 26 ბ) აკუსტიკური ემისიის შემოსვლების (წრეები) და აკუსტიკური ემისიის მაქსიმუმების (რომბები) ფაზების გარე სიგნალთან სინქრონიზაციის მაჩვენებლის გამოთვლის ერთ-ერთი ტიპური შედეგი

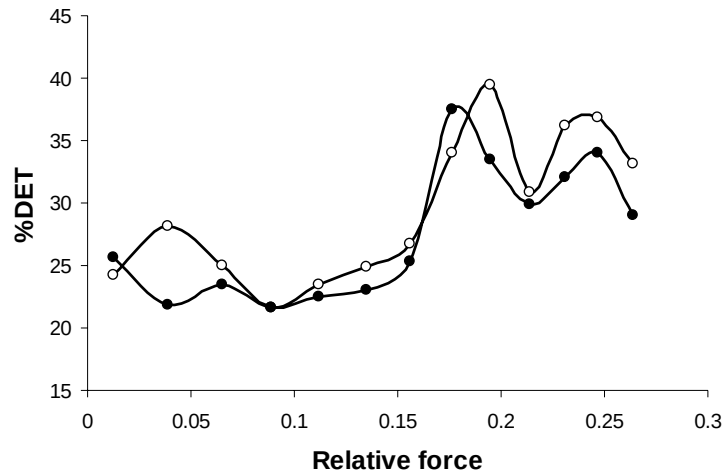
როგორც ვხედავთ ნახ. 3. 26 ა)-დან კარგად ჩანს რაოდენობრივი სხვაობების არსებობა, ხოლო ნახ. 3. 26 (ბ)-დან ჩანს რომ სინქრონიზაციის ხარისხის ზრდა შემუშავებული მეთოდით შესაძლებელია რაოდენობრივად შეფასდეს. ეს მეთოდები საშუალებას იძლევა გამოიყოს აკუსტიკური ემისიის პროცესის ჩვენთვის მნიშვნელოვანი ასპექტები და მათი სინქრონიზაციის ხარისხის რაოდენობრივი შეფასება განხორციელდეს.

რეკურენტული დიაგრამები მოცემულია შემდეგ სურთებზე. (a)– 5%, (b)– 12%, (c)– 25 % ფარდობითი ზემოქმედების დროს.



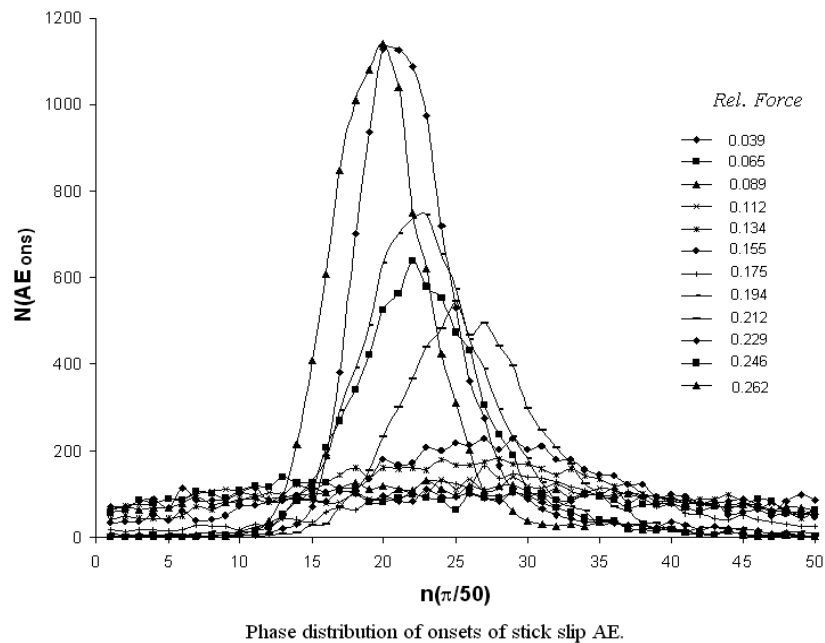
ნახ. 3. 27 რეკურენტული დიაგრამები: (a)– 5%, (b)– 12%, (c)– 25 % ფარდობითი ზემოქმედების დროს

ეს თვისობრივი შედეგია. ვიზუალურად წარმოვადგინეთ დინამიკური ცვლილებები შესასწავლ პროცესში. გარე ზემოქმედების ზრდის კვალობაზე მეტი წესრიგია. იგივე ამ სურათებიდან გამოთვლილია დეტერმინიზმი. დეტერმინიზმის ხარისხი იზრდება, როცა გარე ზემოქმედების წილი იზრდებოდა.

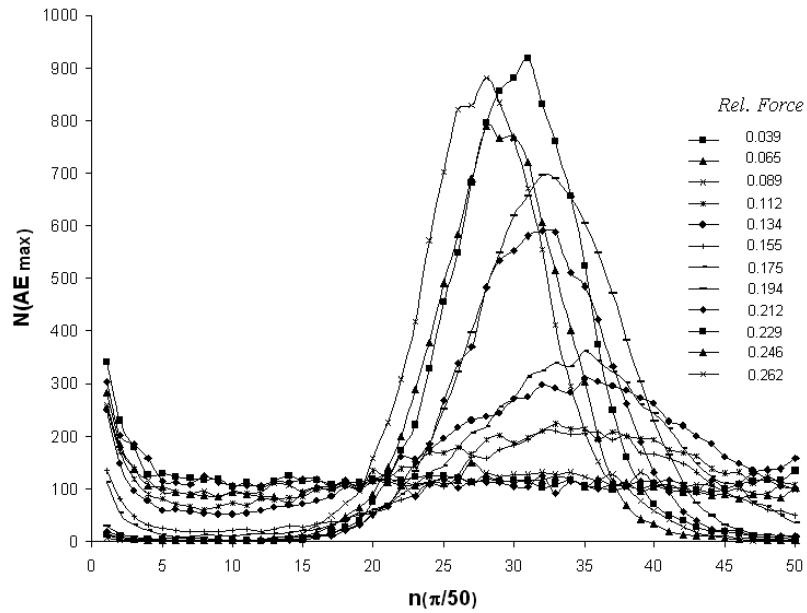


ნახ. 3. 28. %DET და გარე ზემოქმედების ფარდობით ძალას შორის დამოკიდებულების გრაფიკი, არათანაბარი ხაზუნის აკუსტიკური ემისიის დროითი სერიების როგორც დასაწყისებისათვის (ღია წრეები), ისე მაქსიმუმებისათვის (შავი წრეები)

აგებულია გარსის კონცეფციაზე დაფუძნებული stick-slip აკუსტიკური ემისიის გარე სიგნალის ციკლში ფაზათა განაწილება, როგორც შემოსვლებისთვის, ისე მაქსიმუმებისათვის. ეს ნაჩვენებია ნახ. 3. 29 და ნახ. 3. 30-ზე.



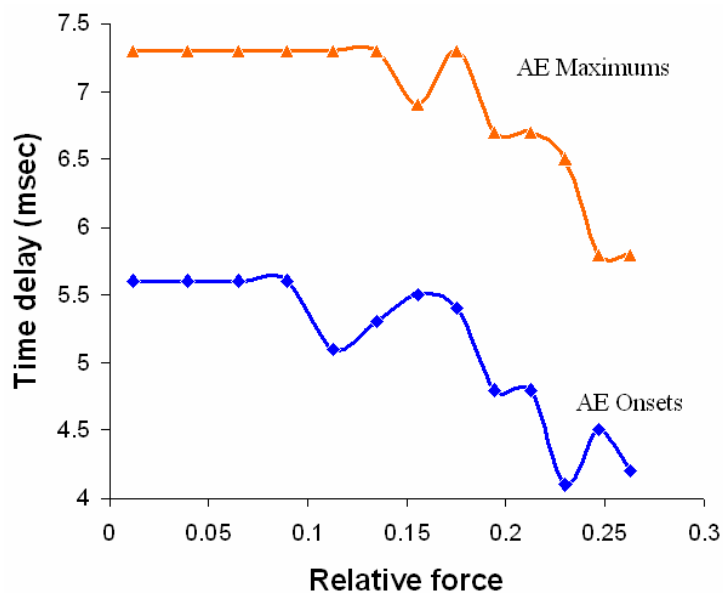
ნახ. 3. 29 გარსის კონცეფციაზე დაფუძნებული აკუსტიკური ემისიის მასივის ფილტრაციის შემდეგ აკუსტიკური ემისიის შემოსვლების გარე სიგნალის ციკლში განაწილების გამოთვლის მაგალითი



Phase distribution of maximums of stick slip AE.

ნახ. 3. 30 გარსის კონცეპტიაზე დაფუძნებული აკუსტიკური ემისიის მასივის ფილტრაციის შემდეგ აკუსტიკური ემისიის მაქსიმუმების გარე სიგნალის ციკლში განაწილების გამოთვლის მაგალითი

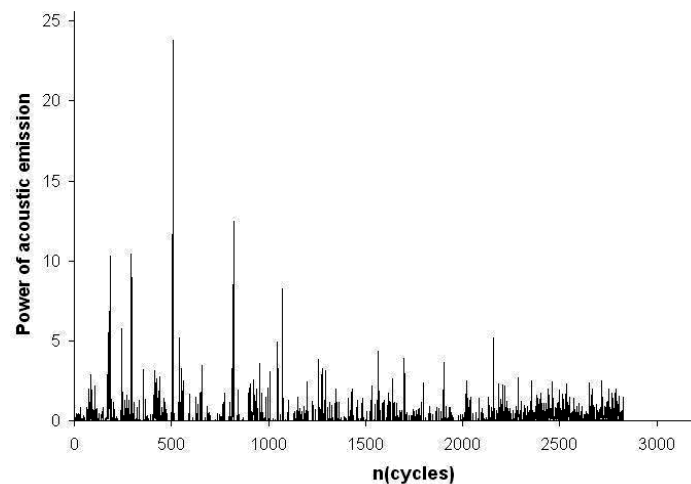
დათვლილია აგრეთვე აკუსტიკურ ემისიასა და გარე ზემოქმედებას შორის შეყოვნებები (ნახ. 3. 31).



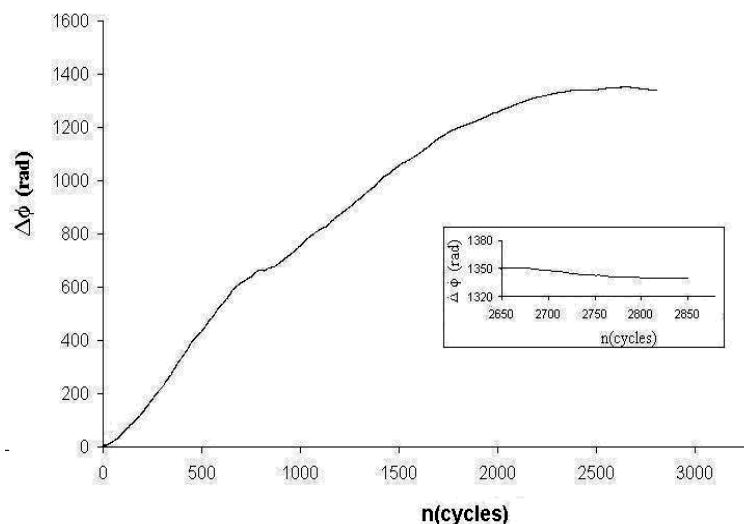
ნახ. 3. 31 შეყოვნებების დროსა და ფარდობით ძალას შორის დამოკიდებულება. აკუსტიკური ემისიის როგორც შემოსვლებისთვის, ისე მაქსიმუმებისთვის

შემდეგ ნახაზზე (3. 32) აკუსტიკური ემისიის სიმძლავრეა დათვლილი. რაც უფრო იზრდება ფარდობითი გარე ზემოქმედება, ფაზა აკუსტიკურ სიგნალსა და გარედან მოდებულ სიგნალს შორის უფრო მცირდება.

როცა გარე ზემოქმედება მცირეა ემისიის სიმძლავრე დიდია, მას შემდეგ რაც გარე ზემოქმედება გაიზარდა აკუსტიკური ემისიის სიმძლავრე შემცირდა. ამ დროს ადგილი ჰქონდა სინქრონიზაციის ხარისხის გაზრდას. ეს მიუთითებს იმაზე, რომ მოხდა ემისიის პროცესის მართვა ენერგეტიკული თვალსაზრისით.



ნახ. 3. 32 ა)

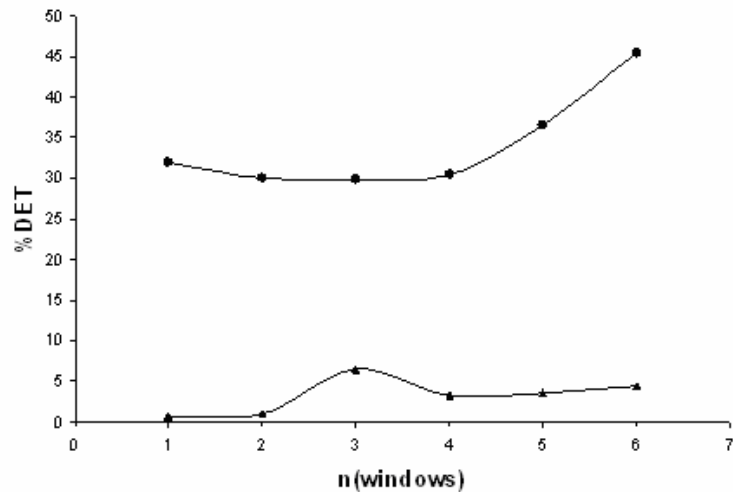


ნახ. 3. 32 ბ)

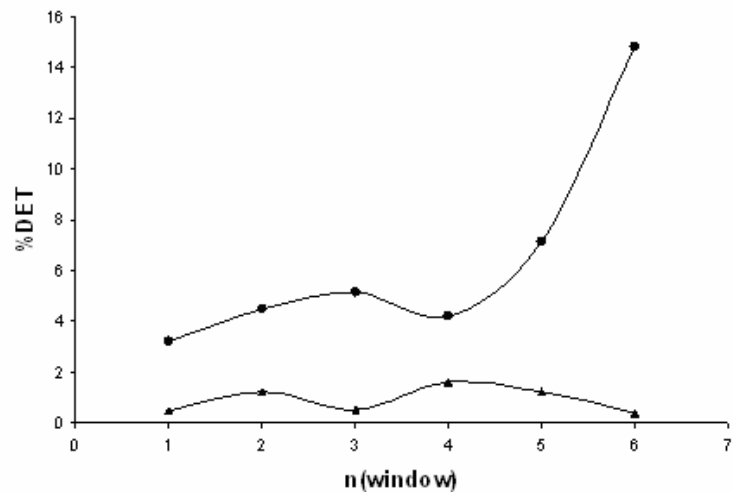
3. 32. ა) აკუსტიკური ემისიის სიმძლავრის ტიპური მანაცემთა მასივი. აბსცისატა ღერძზე აღებულია გარე პერიოდული ზემოქმედების ციკლის რიგითი ნომერი (მონაცემები ნორმალიზებულია). გარე ზემოქმედება იზრდება დაახლოებით 2400-ე ციკლამდე. ბ) ფაზების სხვაობა აკუსტიკური ემისიის სიმძლავრესა და გარე სინუსოიდალურ სიგნალს შორის.

აკუსტიკური ემისიის პროცესში გამოყოფილი ენერგიის მართვა შევძელით გარე სუსტი ზემოქმედებით. ეს გარე ზემოქმედება მოდებული ძალის 20%-ს არ აღემატება. ეს მნიშვნელოვნად ამცირებს გამოყოფილი ენერგიის სიმძლავრეს.

პროცესის დინამიკის ნაზი თავისებურებების გასარკვევად გამოვიყენეთ არაგადამფარავი მცოცავი ფანჯრების მიდგომა, რაც ნაჩვენებია ნახ. 3. 33 ა და ბ-ზე.



ა)



ბ)

ნახ. 3.33 თანმიმდევრული არაგადამფარავი 400 მონაცემიანი ფანჯრებისათვის გამოთვლილია RQA და %DET. ა) აკუსტიკურ ემისიის სიმძლავრე; ბ) აკუსტიკური სიგნალის მომდევნო მაქსიმუმებს შორის დროის ინტერვალები

დასკვნა

დასკვნის სახით შეიძლება ითქვას, რომ როდესაც ზამბარა – მცოცის სისტემაზე გარე ფარდობითი ზემოქმედება იზრდება 25%-მდე, ადგილი აქვს აკუსტიკური ემისიის შემოსვლების (საწყისების) და მაქსიმუმების ფაზების მიახლოებას გარე ზემოქმედების ფაზასთან. ამაზე მიუთითებს ფაზების ევოლუციის დახრის შემცირება. ვიწროვდება ფაზათა სხვაობის განაწილება, აგრეთვე იზრდება ფაზური სინქრონიზაციის მაჩვენებელი. ამავე დროს აღნიშნული ფაზური სინქრონიზაციის პროცესს თან ახლავს აკუსტიკური ემისიის განაწილების რეგულირების ხარისხის ზრდა.

არათანაბარი ხახუნის არაწრფივი პროცესი შეიძლება იყოს მართული გარე სუსტი ელექტრული ან მექანიკური ზემოქმედებით. გარე მაკონტროლებელი სუსტი ზემოქმედება იწვევს გამონთავისუფლებული აკუსტიკური ენერგიის დაკავანტვას, ამცირებს ძლიერი მოვლენების რაოდენობას და ზრდის სუსტი მოვლენების რაოდენობას.

ჩვენს მიზანს წარმოადგენდა ექსპერიმენტალურად დაგვემტკიცებინა რომ შეიძლება არათანაბარი ხახუნის დინამიკური რეჟიმის კონტროლი სუსტი მექანიკური ან ელექტრომაგნიტური ზემოქმედებით.

ჩვენ ვვარაუდობთ, რომ მიღებული ექსპერიმენტული შედეგები ადასტურებენ რთული დინამიკური სისტემების ქცევაზე გარე მცირე პერიოდული ზემოქმედების შესაძლო კონტროლის შესახებ გამოთქმულ მოსაზრებებს. ბუნებრივ პროცესში ამგვარი კონტროლის მაგალითად ჩვენ მივიჩნევთ სეისმურ მონაცემებზე ადრე მიღებულ შედეგებს.

დასკვნა

ჩატარებული გამოკვლევების საფუძველზე შეიძლება გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნა:

1. ჩუას წრედში ძაბვის ცვლილების პროცესის დინამიკა ახლოა კვაზიპერიოდულთან, იგი ხასიათდება პერსისტენტობის საკმაოდ მაღალი ხარისხით. ნაჩვენებია, რომ მასშტაბური ინვარიანტობისა და არაწრფივი სტრუქტურის (დინამიკური თავისებურებების) რაოდენობრივი და თვისებრივი თვალსაზრისით ჩუას წრედში ძაბვის ცვლილების დინამიკა არ წარმოადგენს მაღალგანზომილებიან პროცესს და განეკუთვნება დაბალგანზომილებიანი დეტერმინირებული ქაოსის ტიპის პროცესებს.
2. ლაბორატორიული მონაცემების ანალიზით ვაჩვენეთ, რომ არათანაბარი ხახუნის პროცესის მაგალითზე შესაძლებელია რთული დინამიკური პროცესის მასშტაბური ინვარიანტობისა და არაწრფივი სტრუქტურის სრულფასოვანი კვლევა. დავადგინეთ, რომ არათანაბარი ხახუნის აკუსტიკური ემისიის მოწესრიგების ხარისხი დამოკიდებულია ფარდობით გარე ზემოქმედებაზე. გარე ზემოქმედების გარკვეულ ფარგლებში (25%-მდე) პროცესი უფრო მოწესრიგებული ხდება. გარე მაკონტროლებელი სუსტი ზემოქმედება იწვევს გამოთავისუფლებული აკუსტიკური ენერგიის დაკავანტვას, ამცირებს ძლიერი მოვლენების რაოდენობას და ზრდის სუსტი მოვლენების რაოდენობას. უფრო მაღალი ზემოქმედება იწვევს საპირისპირო პროცესებს.
3. ჩვენ მიერ მიღებული შედეგები გვარწმუნებენ, რომ ამგვარი კონტროლი შეიძლება განხორციელდეს არა მხოლოდ ტექნიკურ-მოდელურ სისტემებში, არამედ ბუნებრივ პროცესშიც. ამაზე მეტყველებს ენგურის მაღლივ კაშხალში წყლის დონის პერიოდული ცვლილებისას, კაშხლის ირგვლივ კრიტიკულ ზონაში სეისმური ენერგიის ყოველდღიური გამოთავისუფლების დინამიკაში წესრიგის ხარისხის ზრდა წყლის დონის არარეგულარული ცვლილების პერიოდთან შედარებით. ეს შეიძლება განხილულ იქნეს როგორც ლოკალური სეისმური აქტივობის შესაძლო კონტროლის მაგალითი.
4. საბოლოოდ შეიძლება ითქვას, რომ ჩვენი გამოკვლევა მნიშვნელოვან არგუმენტებს იძლევა რთული ბუნებრივი და ტექნიკური სისტემების გარე მცირე ზემოქმედებით მართვის სასარგებლოდ.

დენარითი უილტრაცვიის პროგრამა

The algorithm is based on 3SIGMA principle. In specified window program calculates SD. If it's value is larger than specified limit value (3 SIGMA) first point's value in the window is replaced by null and window is moved 1 step forward.

```
//-----
#include <vcl.h>
#pragma hdrstop
#include <fstream.h>
#include <iostream.h>
#include <iomanip.h>
#include <Math.hpp>

//-----
void scan_param(int argc, char *argv[],bool *p);//scans input command prompt
arguments
char name[40],oname[40];
int size=100,colnum=1;
double limit,stdd;
bool P[5];
#pragma argsused
int main(int argc, char* argv[]) //entry point
{
    scan_param(argc,argv,P);
    if(!P[0]){
        cout<<"Enter input file name:"<<endl;
        cin>>name;
    }
    ifstream in(name,ios::in);
    if(!in){
        cout<<"File not found"<<endl;
        exit(1);
    }
    int count=0;
    char st='a';
    bool d=true;
    while(st!='\n'&&(!in.eof())){
        in.get(st);
        if(d){
            if(!isspace(st)){
                count++;
                d=false;
            }
        }
        else{
            if(isspace(st))
                d=true;
        }
    }
}
```

```

}
in.close();
cout<<"Number of column in file "<<name<<" equal to "<<count<<endl<<endl;
if(!P[3]){
int colnum=1;
if(count>1){
cout<<"Enter column :"<<endl;
cin>>colnum;
}
}
if(count==0){
cout<<"Incorrect file"<<endl;
exit(1);
}
}
//-----
if(!P[2]){
cout<<"Enter size of window:"<<endl;
cin>>size;
}
if(!P[4]){
cout<<"Enter limit value:"<<endl;
cin>>limit;
}
if(!P[1]){
cout<<"Enter output file name:"<<endl;
cin>>oname;
}

ofstream on(oname,ios::out);
double *val=new double[count];
double *s=new double[size];
in.open(name,ios::in);
int N=0;
for(int n=0;n<size;n++){
for(int i=0;i<count;i++){
in>>val[i];
s[n]=val[colnum-1];
N++;
}
stdd=StdDev(s,size);
if(stdd<limit)
on<<0<<endl;
else
on<<s[0]<<endl;
cout<<"Please wait....."<<endl;
while(in>>val[0]){
for(int n=0;n<size-1;n++){
s[n]=s[n+1];
for(int i=1;i<count;i++){
in>>val[i];
s[size-1]=val[colnum-1];

```

```

        stdd=StdDev(s,size);
        if(stdd<limit)
            on<<0<<endl;
        else
            on<<s[0]<<endl;
        N++;
    }
    for(int i=0;i<size-1;i++)
        on<<0<<endl;
    cout<<"Length of series equal to "<<N<<" Program terminated. Click any
button for exit"<<endl;
    return 0;
}
//-----
void scan_param(int argc, char *argv[],bool *P)
{
    for(int i=0;i<5;i++)
        P[i]=false;
    for(int i=1;i<argc;i++){
        switch(argv[i][1]){
            case 'i':
                strcpy(name,(argv[i]+2));
                P[0]=true;
                break;
            case 'o':
                strcpy(oname,(argv[i]+2));
                P[1]=true;
                break;
            case 's':
                size=atoi(argv[i]+2);
                P[2]=true;
                break;
            case 'c':
                colnum=atoi((2+argv[i]));
                P[3]=true;
                break;
            case 'l':
                limit=atof(argv[i]+2);
                P[4]=true;
                break;
        }
    }
}
}

```

სპიკის ინფორმაციული კრიტერიუმის გამოსათვლელი პროგრამა

This package uses AKAIKE criterium for determinig onsets – point of in signal's entry . For reliebale calculation the signal must represent distibuted over time separated wave trains with no signal between them (some numbers of nulls).

```
//-----  
#include <vcl.h>  
#include<iostream.h>  
#include<fstream.h>  
#include<iomanip.h>  
#include<math.h>  
//-----  
#pragma argsused  
int getColCount(char *name);//get column count in input file  
void scan_param(int argc, char *argv[],bool *P);//get input parameters  
double Rw_Range(double *s,double avg,int tw,int Tw,int len);//AIC function  
int colcountf,colnumf=1,N=0;  
char filename[40],sname[40],aname[40];  
double *val;  
int start,end;  
bool P[7];  
int main(int argc, char* argv[])  
{  
for(int y=0;y<7;y++)  
P[y]=0;  
scan_param(argc,argv,P);  
cout<<"-----AIC CRITERIUM-----"<<endl<<endl;  
if(!P[0]){  
cout<<"Enter file name with windows:"<<endl;  
cin>>filename;  
}  
ifstream f(filename,ios::in);  
if(!f){  
cout<<"File not found"<<endl;  
exit(1);  
}  
char cycn[50];  
strcpy(cycn,filename);  
strcat(cycn,"secycle");  
ofstream oF(cycn,ios::out);  
SetFileAttributes(cycn,FILE_ATTRIBUTE_HIDDEN);  
colcountf=getColCount(filename);  
if(!P[1]){  
if(colcountf>1){  
cout<<"Column number in file = "<<colcountf<<"Enter column number:"<<endl;  
cin>>colnumf;  
}  
}  
if(!P[2]){
```

```

cout<<"Enter output file for recording AIC values:"<<endl;
cin>>sname;
}
ofstream of(sname,ios::out);
// cout<<endl<<"Enter number of nulls: ";
int nullnum=3;
//cin>>>nullnum;
// cout<<endl<<"Enter min length of acoustic flash:";
//int LT;
// cin>>LT;
    bool s=true,e=false,beg=true; //
// temp variable for defining in what cycle is found onset and max
int LEN,nulls=0;
val=new double[colcountf];
    while(f>>val[0]){
        for(int i=1;i<colcountf;i++)
            f>>val[i];
        N++;
        if(s){
            if(val[0]==0)
                nulls++;
            else{
                if(nulls>=nullnum||beg){
                    start=N;
                    s=false;
                    e=true;
                    beg=false;
                    nulls=0;
                }
            }
        }
        else if(e){
            if(val[0]==0)
                nulls++;
            else{
                nulls=0;
            }
            if(nulls>=nullnum||f.eof()){
                end=N-nulls;
                s=true;
                e=false;
            }
        }
    }
    }
    }
    cout<<"Length of signal ="<<N<<endl;
    of.close();
    f.close();

```

```

        if(!P[3]){
            cout<<"Enter output file for saving:\n\ncolumn 1 - AE train start\ncolumn 2 -
            AE train end column 3 - nAIC onset position\ncolumn 4 - distance from onset position
            to train end column 5 - distance between positions\n"<<endl;
            cin>>aname;
        }
        ofstream oc(aname,ios::out);

//-----
        ifstream IC(cycn,ios::in);
        ifstream ii(filename,ios::in);
        int N1=N;
        N=0;
        int minpos,minval,w=0,tempos=-1,dist=0;
        double *R,avg,v1,v2,aicval;
        while(IC>>start>>end){
            LEN=end-start+1;
            w++;
            R=new double[LEN];
            while(N<start-1){
                for(int i=0;i<colcountf;i++){
                    ii>>val[i];
                    N++;
                }
                of<<0<<endl;
            }
            avg=0;
            for(int i=0;i<LEN;i++){
                for(int j=0;j<colcountf;j++){
                    ii>>val[j];
                    R[i]=val[colnumf-1];
                    avg+=R[i];
                }
            }
            avg=avg/LEN;
            int tt=1;
            for(int i=0;i<LEN;i++){
                if(i==LEN-1){
                    tt=0;
                }
                v1=Rw_Range(R,avg,0,i,LEN);
                v2=Rw_Range(R,avg,i+tt,LEN-1,LEN);
                if(v1==0)
                    v1=1;
                if(v2==0)
                    v2=1;
                aicval=(i+1)*log(v1)+(LEN-i-tt-1)*log(v2);
                N++;
                of<<aicval<<endl;
                if(i==0){
                    minval=aicval;
                    minpos=N;
                }
            }
        }
    }
}

```

```

    }
    else{
        if(minval>aicval){
            minval=aicval;
            minpos=N;
        }
    }
    }
    if(tempos!=-1){
        dist=minpos-tempos;
    }
    oc<<setw(20)<<setiosflags(ios::right)<<start<<setw(20)<<setiosflags(ios::left
)<<setw(20)<<setiosflags(ios::right)<<end<<setw(20)<<setiosflags(ios::right)<<minp
os<<setw(20)<<setiosflags(ios::right)<<(end-
minpos+1)<<setw(20)<<setiosflags(ios::right)<<dist<<endl;
    tempos=minpos;
    }
    for(int i=N;i<N1;i++)
        of<<0<<endl;
    IC.close();
    remove(cycn);
    cout<<"Program terminated. Number of AE wave trains ="<<w<<"\nClick
any button for exit"<<endl;
    //cin>>N;
    return 0;
}
//-----
int getColCount(char *name) //
{
    ifstream in(name,ios::in); //
    if(!in){
        cout<<"File not found"<<endl;
        exit(1);
    }
    int count=0;
    char st='a';
    bool d=true;
    while(st!='\n'&&(!in.eof())){
        in.get(st);
        if(d){
            if(!isspace(st)){
                count++;
                d=false;
            }
        }
        else{
            if(isspace(st))
                d=true;
        }
    }
}

```

```

    }
    in.close();
    return count; //
}
//-----
double Rw_Range(double *s,double avg,int tw,int Tw,int len)
{ // variance function
    float sum=0;
    for(int i=tw;i<=Tw;i++)
        sum+=pow(s[i]-avg,2);
    if(Tw-tw>0)
        sum=sum/(Tw-tw);
    return sum;
}
//-----
void scan_param(int argc, char *argv[],bool *P)
{
    for(int i=0;i<5;i++)
        P[i]=false;
    for(int i=1;i<argc;i++){
        switch(argv[i][1]){
            case 'i':
                strcpy(filename,(argv[i]+2));//filter signal
                P[0]=true;
                break;
            case 'c':
                colnumf=atoi((2+argv[i]));//colnum in filtered signal
                P[1]=true;
                break;
            case 'o':
                strcpy(sname,(argv[i]+2));//output
                P[2]=true;
                break;
            case 'O':
                strcpy(aname,(argv[i]+2)); //output file
                P[3]=true;
                break;
        }
    }
}
}

```

შენიშვნის ენციკლოპედიის ინტერფეისი

Programs calculates Shannon entropy using standard formula in two windows and then compares values.

```

//-----

#include <vcl.h>
#pragma hdrstop
#include<fstream.h>

```



```

#include "Unit.h"
//-----
#pragma package(smart_init)
#pragma link "cgauges"
#pragma resource "*.dfm"
TForm1 *Form1;
AnsiString fname,savename;
AnsiString cname=Application->ExeName+".nat"; //for savinf column
int colcount; //number of columns in file
int colnum;
int N; //length of series
int WN;
int M>window,step; //M-number of bins;
int getColCount(AnsiString filename); //count number of columns in file
Set <char, '0','9'>Dig;
bool cancel=false;
//-----
__fastcall TForm1::TForm1(TComponent* Owner)
    : TForm(Owner)
{
}
//-----
void __fastcall TForm1::sbOpenClick(TObject *Sender)
{
    if(OpenDialog1->Execute()){
        Memo->Clear();
        fname=OpenDialog1->FileName;
        colcount=getColCount(fname);
        if(colcount==1){
            leCol->Text="1";
            leCol->Enabled=false;
        }
        else
            leCol->Enabled=true;
        gb->Caption="Number of columns = "+IntToStr(colcount);
        Memo->Lines->Add("Filename: "+fname);
        sbCalc->Enabled=true;
    }
}
//-----
int getColCount(AnsiString filename)
{
    ifstream f(filename.c_str(),ios::in);
    if(!f){
        Application->MessageBoxA("File not
found","Warning",MB_OK|MB_ICONEXCLAMATION);
        exit(1);
    }
    char st='a';
    int count=0;

```

```

bool d=true;
while(st!='\n'&&(!f.eof())){
f.get(st);
if(d){
if(!isspace(st)){
count++;
d=false;
}
}
else{
if(isspace(st))
d=true;
}
}
f.close();
return count;
}
//-----
int TForm1::getMinMax(AnsiString filename, int colcount,int colnum)
{
int n=0;
ifstream f(filename.c_str(),ios::in);
ofstream fc(cname.c_str(),ios::out);
double *val=new double[colcount];
for(int i=0;i<colcount;i++)
f>>val[i];
fc<<val[colnum-1]<<endl;
n++;
minv=val[colnum-1];
maxv=val[colnum-1];
while(!f.eof()){
for(int i=0;i<colcount;i++)
f>>val[i];
fc<<val[colnum-1]<<endl;
if(rbAll->Checked){
if(val[colnum-1]>maxv)
maxv=val[colnum-1];
if(val[colnum-1]<minv)
minv=val[colnum-1];
}
n++;
if(n%30000==0){
cG->Progress=cG->Progress+1;
if(cG->Progress==100)
cG->Progress=0;
}
}
f.close();
fc.close();
delete val;
}

```

```

return n;
}
//-----

void __fastcall TForm1::sbCalcClick(TObject *Sender)
{
    cG->Progress=0;
    if(leCol->Text.IsEmpty()||leBin->Text.IsEmpty()||leWindow-
>Text.IsEmpty()||leStep->Text.IsEmpty()){
        Application->MessageBoxA("Incorrect or missed parameters ", "Fill all
fields", MB_OK|MB_ICONEXCLAMATION);
        return;
    }
    colnum=StrToInt(leCol->Text);
    M=StrToInt(leBin->Text);
    if(M==0){
        M=1;
        leBin->Text="1";
    }
    window=StrToInt(leWindow->Text);
    step=StrToInt(leStep->Text);
    Bins=new double[M+1];
    N=getMinMax(fname,colcount,colnum);
    Memo->Lines->Add("Length of series = "+IntToStr(N));
    if(rbAll->Checked){
        getBins(M);
        Memo->Lines->Add("Max value in series = "+FloatToStr(maxv));
        Memo->Lines->Add("Min value in series = "+FloatToStr(minv));
    }
    if(N<2*window){
        Application->MessageBoxA("Window can't be greater than length of series", "Fill
all fields", MB_OK|MB_ICONEXCLAMATION);
        return;
    }
    if(step>window){
        Application->MessageBoxA("Step can't be greater than Window", "Fill all
fields", MB_OK|MB_ICONEXCLAMATION);
        return;
    }
    if(SaveDialog1->Execute()){
        savename=SaveDialog1->FileName;
        Memo->Lines->Add("Please wait...");
        WN=Shannon(fname,savename,M,window,step,colcount,colnum);
        Memo->Lines->Add("Number of window = "+IntToStr(WN));
        Memo->Lines->Add("Calculating finished. Results are saved in file: "+savename);
    }
    cG->Progress=0;
    DeleteFile(cname);
}

```

```

//-----
void TForm1::getBins(int M)
{
    //Bins=new double[M+1];
    float g=(maxv-minv)/M;
    for(int i=0;i<=M;i++){
        Bins[i]=minv+i*g;
    }
}
//-----

int TForm1::Shannon(AnsiString filename,AnsiString savename, int M, int window,
int step,int colcount,int colnum)
{
    double *S=new double[2*window];
    ifstream f(cname.c_str(),ios::in);
    ofstream of(savename.c_str(),ios::out);
    //ofstream op("ProverkaSh1.txt",ios::out);
    double val;
    for(int q=0;q<2*window;q++){
        f>>val;
        S[q]=val;
    }
    if(rbW->Checked){
        getMinMaxWindow(S,window);
        getBins(M);
    }
    double Sh1=getSh(S,Bins,window,M);

    if(rbW->Checked){
        getMinMaxWindow(S+window-1,window+1);
        getBins(M);
    }
    double Sh2=getSh((S+window-1),Bins,window+1,M);
    //op<<Sh1<<endl;
    if(Sh1==0)
        Sh1=0.000000000000000001;
    double SH=Sh2/Sh1;
    of<<SH<<endl;
    int wx=(N-2*window)/step;
    for(int j=0;j<wx;j++){
        for(int z=0;z<2*window-step;z++){
            S[z]=S[z+step];
            for(int y=0;y<step;y++){
                f>>val;
                S[2*window-step+y]=val;
            }
        }
        if(rbW->Checked){
            getMinMaxWindow(S,window);
            getBins(M);
        }
    }
}

```

```

Sh1=getSh(S,Bins>window,M);
if(rbW->Checked){
    getMinMaxWindow(S+window-1>window+1);
    getBins(M);
}
Sh2=getSh(S+window-1,Bins>window+1,M);
//op<<Sh1<<endl;
if(Sh1==0)
    Sh1=0.000000000000000001;
SH=Sh2/Sh1;
of<<Sh2<<endl;
if(j%10000==0){
    cG->Progress=cG->Progress+1;
    if(cG->Progress==100)
        cG->Progress=0;
}
}
delete S;
return wx+1;
}
//-----function find probability for every bin-----
double TForm1::getSh(double *S, double *Bins, int window,int M)
{
    int *nb=new int[M];
    for(int i=0;i<M;i++)
        nb[i]=0;
    double *pb=new double[M];
    for(int i=0;i<window;i++){
        for(int l=0;l<M;l++){
            if(l==0){
                if((S[i]>=Bins[l]&&S[i]<=Bins[l+1])||(S[i]==minv))
                    nb[l]+=1;
            }
            else{
                if((S[i]>=Bins[l]&&S[i]<=Bins[l+1])||(l==M-1&&S[i]==maxv))
                    nb[l]+=1;
            }
        }
    }
    double Sb=0;
    for(int y=0;y<M;y++){
        pb[y]=(double)nb[y]/window;
        if(pb[y]==0)
            pb[y]=0.000000000000000001;
        Sb+=pb[y]*log(pb[y]);
    }
    delete pb;
    delete nb;
    return -1*Sb;
}

```

```

//-----
void __fastcall TForm1::FormCreate(TObject *Sender)
{
    Dig<<'0'<<'1'<<'2'<<'3'<<'4'<<'5'<<'6'<<'7'<<'8'<<'9';
    sbCalc->Enabled=false;
}
//-----

void __fastcall TForm1::leColKeyPress(TObject *Sender, char &Key)
{
    if(!Dig.Contains(Key)&&Key!=VK_BACK)
        Key=0;
}
//-----

void __fastcall TForm1::leColKeyDown(TObject *Sender, WORD &Key,
    TShiftState Shift)
{
    if(Key==VK_SPACE||Key==13)
        leBin->SetFocus();
}
//-----

void __fastcall TForm1::leBinKeyDown(TObject *Sender, WORD &Key,
    TShiftState Shift)
{
    if(Key==VK_SPACE||Key==13)
        leWindow->SetFocus();
}
//-----

void __fastcall TForm1::leWindowKeyDown(TObject *Sender, WORD &Key,
    TShiftState Shift)
{
    if(Key==VK_SPACE||Key==13)
        leStep->SetFocus();
}
//-----

void TForm1::getMinMaxWindow(double *S,int window)
{
    maxv=minv=S[0];
    for(int i=1;i<window;i++){
        if(S[i]>maxv)
            maxv=S[i];
        if(S[i]<minv)
            minv=S[i];
    }
}

```

სპეციალური ეპიზოდის დანაწილების რეგისტრირების პროგრამა

Programs finds wave train's entry and exit point as well as onsets in acoustic on running signal and relative to wave train's entry point.

```
//-----  
  
#include <vcl.h>  
#pragma hdrstop  
#include<iostream.h>  
#include<fstream.h>  
#include<iomanip.h>  
#include<math.h>  
  
//-----  
int getColCount(char *name);  
char iname[50],icyc[50],oname[50], ocyc[50];  
ifstream inData,inC,intemp1,intemp2,inNC,inn;  
ofstream outdata,outtemp1,outtemp2;  
int colcount,start,end,startAE,N=0,len,len2,*limstart,*limend;  
double val[2],maxSin,maxAE,phaseSin,phaseAE,ps,pa;  
int maxSinpos=1,maxAEpos=1,temSinpos=-1,temOpos=-1,temMpos=-  
1,cc=0,cs=0,aenum=0,aen=0,N1;  
int tt[5];  
int numc=-1,numc2=1,frac=1,ll,cm; // recharge with numerator , denominator and  
number of cycle part  
void writeCol(char *);  
void wrfval(ofstream &o,double vl,int prec=5,int wid=22);  
void wrival(ofstream &o,int vl,int wid=22);  
void wrtext(ofstream &o,char *t,int wid=22,int num=1);  
#pragma argsused  
int main(int argc, char* argv[])  
{  
    cout<<endl<<"Enter input file name:"<<endl;  
    cin>>iname;  
    inData.open(iname,ios::in);  
    colcount=getColCount(iname);  
    cout<<"Column count = "<<colcount<<endl;  
    cout<<endl<<"Enter file name with cycles:"<<endl;  
    cin>>icyc;  
    inNC.open(icyc,ios::in);  
    strcpy(ocyc,icyc);  
    strcat(ocyc,"tem27");  
    cout<<"Enter output file name:"<<endl;  
    cin>>oname;  
    char temname1[80],temname2[80];  
    outdata.open(oname,ios::out);  
    strcpy(temname1,oname);  
    strcat(temname1,"temp1.tem27");  
    strcpy(temname2,oname);
```

```

    strcat(temname2,"temp2.tem27");
    outtemp1.open(temname1,ios::out);
    outtemp2.open(temname2,ios::out);
    cout<<endl<<"Enter number of cycles for searched spikes.\n(If number is
fractional 'a/b' it means that search will be made in 'a' cycles and '1/b' part of next
cycle.\n You must not enter float number,you can use symbol'/')."<<endl<<endl;
    int y1=0,y2=0,y3=0;
    char st1='0',tname[40]={""},tname1[40]={""},numname[40]={""};
    int nb=0;
    cin>>numname;
    do{
        st1=numname[y3];
        if(nb==0&&isdigit(st1)){
            tname[y1]=st1;
            y1++;
        }
        if(nb==1&&isdigit(st1)){
            tname1[y2]=st1;
            y2++;
        }
        if(st1=='/')
            nb=1;
        y3++;
    }while(st1!='\n'&&st1!='0');
    if(y1>0){
        numc=atoi(tname);
    }
    if(y2>0) {
        numc2=atoi(tname1);
    }
    if(y1==0)
        numc=1;
    //-----
    cout<<endl<<"a="<<numc<<"/t"<<"b="<<numc2<<endl<<endl;
    ofstream onNC;
    if(numc2==1&&numc==1)
        strcpy(ocyc,icyc);
    else{
        onNC.open(ocyc,ios::out);
        int pcn=numc/numc2;
        int f;
        int start1=-1,end1=-1;
        if(numc>numc2){
            inNC>>start>>end;
            start1=start;
        }
        while(!inNC.eof()){
            for(int i=0;i<pcn-1&&!inNC.eof();i++)
                inNC>>start>>end;
            if(numc2>1){

```



```

inNC>>start>>end;
if(numc<numc2){
    start1=start;
    f=numc;
}
else
    f=1;
if(!inNC.eof()){
    end1=start+f*(end-start+1)/numc2;
    onNC<<start1<<setw(36)<<end1<<endl;
}
else{
    if(numc>numc2)
        onNC<<start1<<setw(36)<<end<<endl;

}
}
else {
    end1=end;
    onNC<<start1<<setw(36)<<end1<<endl;
}
if(numc>numc2)
    start1=start;
}
}
onNC.close();
inNC.close();

inC.open(icyc,ios::in);
while(inC>>start>>end){
    while(N<start){
        inData>>val[0]>>val[1];
        N++;
    }
    maxSin=fabs(val[1]);
    maxSinpos=start;

    while(N>=start&&N<end){
        inData>>val[0]>>val[1];
        N++;
        if(fabs(val[1])>=maxSin){
            maxSin=fabs(val[1]);
            maxSinpos=N;
        }
    }
    cs++;
    len=end-start+1;
    ps=(maxSinpos-start+1)*M_PI/len;
    phaseSin=ps+(cs-1)*M_PI;
    int l=(maxSinpos-start+1);

```

```

        outtemp1<<start<<setw(33)<<end<<setw(33)<<maxSinpos<<setw(33)<<phas
eSin<<setw(33)<<1<<setw(23)<<ps;
        if(temSinpos!=-1)
            outtemp1<<setw(33)<<(maxSinpos-temSinpos)<<endl;
        else
            outtemp1<<endl;
        temSinpos=maxSinpos;
    }
    inData.close();
    N1=N;
    ifstream inData2(iname,ios::in);
    outtemp1.close();
//-----1st channel-----
    N=0;
    inn.open(ocyc,ios::in);
    cout<<endl<<"Enter number of nulls: ";
    int nullnum;
    cin>>nullnum;
    cout<<endl<<"Enter min pulse train length:";
    int LT;
    cin>>LT;
    bool s=true,e=false,beg=true; //
    int startt,startm,endt,endm; // temp variable for defining in what cycle is
found onset and max
    int sstart=0,eend=0,LEN,nulls=0;
    cs=1; // as this variable is compared with cc, responding for spike num
    while(inn>>start>>end){
        while(N<start-1){
            inData2>>val[0]>>val[1];
            N++;
        }
        cc++;
        if(!e)
            aen=0;
        while(N>=start-1&&N<=end-1){
            inData2>>val[0]>>val[1];
            N++;
            if(s){
                if(val[0]==0)
                    nulls++;
            }
            else{
                if(nulls>=nullnum||beg){
                    sstart=N;
                    if(cs<cc)
aen=0;
                    cs=cc;
                    startt=start;
                    endt=end;
                    s=false;

```

```

        e=true;
        beg=false;
        nulls=0;
        maxAE=fabs(val[0]);
        maxAEpos=N;
        cm=cc;
    }
}
}
else if(e){
    if(val[0]==0)
        nulls++;
    else{
        nulls=0;
        if(fabs(val[0])>maxAE){
            maxAE=fabs(val[0]);
            maxAEpos=N;
            cm=cc;
            startm=start;
            endm=end;
        }
    }
    if(nulls>=nullnum||N==N1){
        eend=N-nulls;
        s=true;
        e=false;
        LEN=eend-sstart+1;
        if(LEN>=LT){
            aen++;
            aenum++;
            len=endt-startt+1;
            pa=(sstart-startt+1)*M_PI/len;
            phaseAE=pa+(cs-1)*M_PI;
            wrival(outtemp2,cs); // cycle number in which is situated onset
            wrival(outtemp2,aen); //spike number
            wrival(outtemp2,sstart); //onset position
            wrival(outtemp2,LEN); // length of pulse group
            wrfval(outtemp2,phaseAE,8); //phase of onset on run
            ll=sstart-startt+1;
            wrival(outtemp2,ll); //position onset vs start
            wrfval(outtemp2,pa,5); //phase of onset in cycle
            if(temOpos==-1)
                wrival(outtemp2,-1);
            else{
                ll=sstart-temOpos;
                wrival(outtemp2,ll);
            }
            temOpos=sstart;
            len=endm-startm+1;
            pa=(maxAEpos-startm+1)*M_PI/len;

```

```

        phaseAE=pa+(cm-1)*M_PI;
        wrival(outtemp2,cm); // cycle number in which is situated max
        wrival(outtemp2,maxAEpos); //max position
        wrfval(outtemp2,phaseAE,8); //phase of max on run
        ll=maxAEpos-startm+1;
        wrival(outtemp2,ll); // max position vs start
        wrfval(outtemp2,pa,5); //phase of max in cycle
        if(temMpos==-1)
            wrival(outtemp2,-1);
        else{
            ll=maxAEpos-temMpos;
            wrival(outtemp2,ll);
        }
        temMpos=maxAEpos;
        outtemp2<<endl;
    }
}

}

outtemp2.close();
intemp1.open(temname1);
intemp2.open(temname2);
cout<<endl<<"Enter audio sample rate in Hz:"<<endl;
int sample;
cin>>sample;
wrttext(outdata,"row");
wrttext(outdata,"start");
wrttext(outdata,"end");
wrttext(outdata,"Fpos");
wrttext(outdata,"<-t(sec)");
wrttext(outdata,"phF_on_run");
wrttext(outdata,"Fpos_vs_start");
wrttext(outdata,"<-t(sec)");
wrttext(outdata,"phF_vs_start");
wrttext(outdata,"Fdist");
wrttext(outdata,"<-t(sec)");
wrttext(outdata,"Onset_cycle");
wrttext(outdata,"spike_num");
wrttext(outdata,"Opos");
wrttext(outdata,"<-t(sec)");
wrttext(outdata,"Train_len");
wrttext(outdata,"<-t(sec)");
wrttext(outdata,"Ph_O_on_run");
wrttext(outdata,"Opos_vs_start");
wrttext(outdata,"<-t(sec)");
wrttext(outdata,"Ph_O_vs_start");
wrttext(outdata,"Odist");

```

```

wrttext(outdata,"<-t(sec)");
wrttext(outdata,"Max_cycle");
wrttext(outdata,"Spos");
wrttext(outdata,"<-t(sec)");
wrttext(outdata,"Ph_S_on_run");
wrttext(outdata,"Spos_vs_start");
wrttext(outdata,"<-t(sec)");
wrttext(outdata,"Ph_S_vs_start");
wrttext(outdata,"Sdist");
wrttext(outdata,"<-t(sec)");
outdata<<endl;
for(int i=0;i<cs||i<aenum;i++){
    if(i<cs){
        intemp1>>start>>end>>maxSinpos>>phaseSin>>temSinpos>>ps; //here maxAE
pos2 ver start
        wrival(outdata,i+1);
        wrival(outdata,start);
        wrival(outdata,end);
        wrival(outdata,maxSinpos);
        wrfval(outdata,(double)maxSinpos/sample);
        wrfval(outdata,phaseSin,8);
        wrival(outdata,temSinpos);
        wrfval(outdata,(double)temSinpos/sample);
        wrfval(outdata,ps);
        if(i>0){
            intemp1>>len; //here len variable uses as distance between max in sinusoid
            wrival(outdata,len);
            wrfval(outdata,(double)len/sample);
        }
        else
            wrttext(outdata," ",22,2);
    }
    else{
        wrival(outdata,i+1);
        wrttext(outdata," ",22,10);
    }
    if(i<aenum){
        intemp2>>tt[0]>>tt[1]>>tt[2]>>tt[3]>>phaseAE>>tt[4]>>pa>>len2; //here hs
is used as subsidiary variables
        wrival(outdata,tt[0]);// cycle_num
        wrival(outdata,tt[1]);// spike_num
        wrival(outdata,tt[2]);// Onset position
        wrfval(outdata,(double)tt[2]/sample);// Onset time
        wrival(outdata,tt[3]);// Train length
        wrfval(outdata,(double)tt[3]/sample);// Train length in sec
        wrfval(outdata,phaseAE,8); //Onset phase on run of signal
        wrival(outdata,tt[4]); //Onset position vs start of cycle
        wrfval(outdata,(double)tt[4]/sample);// Onset time vs start of cycle
        wrfval(outdata,pa); //Onset phase vs start of cycle of signal
        if(len2!=-1){

```

```

        wrival(outdata,len2); //Distance between Onset
        wrfval(outdata,(double)len2/sample); // Time between Onset
    }
    else
        wrtext(outdata," ",22,2);

    intemp2>>cm>>tt[2]>>phaseAE>>tt[4]>>pa>>len2;
    wrival(outdata,cm); // cycle in which is situated max
    wrival(outdata,tt[2]); // Max position
    wrfval(outdata,(double)tt[2]/sample); // Max time
    wrfval(outdata,phaseAE); //Max phase on run of signal
    wrival(outdata,tt[4]); //Max position vs start of cycle
    wrfval(outdata,(double)tt[4]/sample); // Max time vs start of cycle
    wrfval(outdata,pa); //Max phase vs start of cycle of signal
    if(len2!=1){
        wrival(outdata,len2); //Distance between Max
        wrfval(outdata,(double)len2/sample); // Time between Max
    }
    }
    outdata<<endl;
}

intemp1.close();
intemp2.close();
inn.close();
remove(temname1);
remove(temname2);
if(numc2!=1&&numc!=1)
    remove(ocyc);
cout<<"****Length of series = "<<N1<<". Cycle's number = "<<cc<<
"****"<<endl;
cout<<"-----"<<endl<<"Click any button for exit:"<<endl;
cin>>N;
return 0;
}
//-----

int getColCount(char *name) //

{
    ifstream in(name,ios::in); //
    if(!in){
        cout<<"File not found"<<endl;
        exit(1);
    }
    int count=0;
    char st='a';
    bool d=true;
    while(st!='\n'&&(!in.eof())){
        in.get(st);
        if(d){

```

```

        if(!isspace(st)){
            count++;
            d=false;
        }
    }
    else{
        if(isspace(st))
            d=true;
    }
}
in.close();
return count;    //
}
//-----
void wrival(ofstream &o,int vl,int wid)
{
    o<<setw(wid)<<setiosflags(ios::left)<<vl;
}
void wrfval(ofstream &o,double vl,int prec,int wid)
{
    o<<setw(wid)<<setiosflags(ios::left)<<setprecision(prec)<<vl;
}
void wrtext(ofstream &o,char *t,int wid,int num)
{
    for(int i=0;i<num;i++)
        o<<setw(wid)<<setiosflags(ios::left)<<t;
}

```

ტენდომოცილებული ფლუქტუაციების ანალიზის პროგრამა

The method of detrended fluctuation analysis (DFA) has proven useful in revealing the extent of long-range correlations in seemingly irregular time series.

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

```

```

#define SWAP(a,b) {temp = (a); (a) = (b); (b) = temp;}

```

```

/* Function prototypes. */
long input(void);
int rscale(long minbox, long maxbox, double boxratio);
void dfa(double *seq, long npts, int nfit, long *rs, int nr, int sw);
void setup(void);

```

```

void cleanup(void);
void help(void);
double polyfit(double **x, double *y, long ndat, int nfit);
void error(char error_text[]);
double *vector(long nl, long nh);
int *ivector(long nl, long nh);
long *lvector(long nl, long nh);
double **matrix(long nrl, long nrh, long ncl, long nch);
void free_vector(double *v, long nl, long nh);
void free_ivector(int *v, long nl, long nh);
void free_lvector(long *v, long nl, long nh);
void free_matrix(double **m, long nrl, long nrh, long ncl, long nch);

/* Global variables. */
char *pname; /* this program's name (for use in error messages) */
double *seq; /* input data buffer; allocated and filled by input() */
long *rs; /* box size array; allocated and filled by rscale() */
double *mse; /* fluctuation array; allocated by setup(), filled by dfa() */
int iflag = 1; /* integrate the input data if non-zero */
int nfit = 2; /* order of the regression fit, plus 1 */
int nr; /* number of box sizes */
FILE *F1,*F2;
char infile[200],outfile[200];
main(int argc, char **argv)
{
    int i, sw = 0;
    long minbox = 0L, maxbox = 0L, npts, temp;

    /* Read and interpret the command line. */
    pname = argv[0];
    for (i = 1; i < argc && *argv[i] == '-'; i++) {
        switch(argv[i][1]) {
            case 'd': /* set nfit (the order of the regression fit) */
                if ((nfit = atoi(argv[++i])+1) < 2)
                    error("order must be greater than 0");
                break;
            case 'i': /* input data are already integrated */
                iflag = 0; break;
            case 'l': /* set minbox (the minimum box size) */
                minbox = atol(argv[++i]); break;
            case 'u': /* set maxbox (the maximum box size) */
                maxbox = atol(argv[++i]); break;
            case 's': /* enable sliding window mode */
                sw = 1; break;
            case 'h': /* print usage information and quit */
                break;
            case 'f':
                strcpy(infile,argv[++i]);break;
            case 'o':
                strcpy(outfile,argv[++i]);break;
            default:

```



```

        help();
        exit(1);
    }
}

/* Allocate and fill the input data array seq[]. */
npts = input();

/* Set minimum and maximum box sizes. */
if (minbox < 2*nfit) minbox = 2*nfit;
if (maxbox == 0 || maxbox > npts/4) maxbox = npts/4;
if (minbox > maxbox) {
    SWAP(minbox, maxbox);
    if (minbox < 2*nfit) minbox = 2*nfit;
}

/* Allocate and fill the box size array rs[]. rscale's third argument
   specifies that the ratio between successive box sizes is 2^(1/8). */
nr = rscale(minbox, maxbox, pow(2.0, 1.0/8.0));

/* Allocate memory for dfa() and the functions it calls. */
setup();

/* Measure the fluctuations of the detrended input data at each box size
   using the DFA algorithm; fill mse[] with these results. */
dfa(seq, npts, nfit, rs, nr, sw);

/* Output the results. */
F2=fopen(outfile,"wt");
for (i = 1; i <= nr; i++)
    fprintf(F2,"%g %g\n", log10((double)rs[i]), log10(mse[i])/2.0);
fclose(F2);
/* Release allocated memory. */
cleanup();
exit(0);
}

/* Read input data, allocating and filling seq[], integrating if iflag != 0.
   Following the convention used for other arrays in this program, seq[0] is
   unused, and the first point is stored in seq[1]. The return value is the
   number of points read.

```

This function allows the input buffer to grow as large as necessary, up to the available memory (assuming that a long int is large enough to address any memory location). Note that the integration is done using double precision arithmetic to avoid complete loss of precision when the integrated data reach large amplitudes. */

```

long input()
{
    long maxdat = 0L, npts = 0L;

```

```

double y, yp = 0.0;
    F1=fopen(infile,"rt");
// while (scanf("%lf", &y) == 1) {
while(fscanf(F1,"%lf",&y)==1){
    if (++npts >= maxdat) {
        double *s;

        maxdat += 50000; /* allow the input buffer to grow (the
                           increment is arbitrary) */
        if ((s = realloc(seq, maxdat * sizeof(double))) == NULL) {
            fprintf(stderr,
                "%s: insufficient memory, truncating input at row %d\n",
                pname, npts);
            break;
        }
        seq = s;
    }
    seq[npts] = iflag ? (yp += y) : y;
}

    if (npts < 1) error("no data read");
    fclose(F1);
    return (npts);
}

int rslen;      /* length of rs[] */

/* rscale() allocates and fills rs[], the array of box sizes used by dfa()
below. The box sizes range from (exactly) minbox to (approximately) maxbox,
and are arranged in a geometric series such that the ratio between
consecutive box sizes is (approximately) boxratio. The return value is
the number of box sizes in rs[].
*/
int rscale(long minbox, long maxbox, double boxratio)
{
    int ir, n;
    long rw;

    /* Determine how many scales are needed. */
    rslen = log10(maxbox / (double)minbox) / log10(boxratio) + 1.5;
    /* Thanks to Peter Domitrovich for pointing out that a previous version
of the above calculation undercounted the number of scales in some
situations. */
    rs = lvector(1, rslen);
    for (ir = 1, n = 2, rs[1] = minbox; n <= rslen && rs[n-1] < maxbox; ir++)
        if ((rw = minbox * pow(boxratio, ir) + 0.5) > rs[n-1])
            rs[n++] = rw;
    if (rs[--n] > maxbox) --n;
    return (n);
}

```

```

double **x;    /* matrix of abscissas and their powers, for polyfit(). */

/* Detrended fluctuation analysis
   seq: input data array
   npts: number of input points
   nfit: order of detrending (2: linear, 3: quadratic, etc.)
   rs:      array of box sizes (uniformly distributed on log scale)
   nr:      number of entries in rs[] and mse[]
   sw:      mode (0: non-overlapping windows, 1: sliding window)
   This function returns the mean squared fluctuations in mse[].
*/
void dfa(double *seq, long npts, int nfit, long *rs, int nr, int sw)
{
    long i, boxsize, inc, j;
    double stat;

    for (i = 1; i <= nr; i++) {
        boxsize = rs[i];
        if (sw) { inc = 1; stat = (int)(npts - boxsize + 1) * boxsize; }
        else { inc = boxsize; stat = (int)(npts / boxsize) * boxsize; }
        for (mse[i] = 0.0, j = 0; j <= npts - boxsize; j += inc)
            mse[i] += polyfit(x, seq + j, boxsize, nfit);
        mse[i] /= stat;
    }
}

/* workspace for polyfit() */
double *beta, **covar, **covar0;
int *indxc, *indxr, *ipiv;

/* This function allocates workspace for dfa() and polyfit(), and sets
   x[i][j] = i**(j-1), in preparation for polyfit(). */
void setup()
{
    long i;
    int j, k;

    beta = vector(1, nfit);
    covar = matrix(1, nfit, 1, nfit);
    covar0 = matrix(1, nfit, 1, nfit);
    indxc = ivector(1, nfit);
    indxr = ivector(1, nfit);
    ipiv = ivector(1, nfit);
    mse = vector(1, nr);
    x = matrix(1, rs[nr], 1, nfit);
    for (i = 1; i <= rs[nr]; i++) {
        x[i][1] = 1.0;
        x[i][2] = i;
        for (j = 3; j <= nfit; j++)

```

```

        x[i][j] = x[i][j-1] * i;
    }
}

/* This function frees all memory previously allocated by this program. */
void cleanup()
{
    free_matrix(x, 1, rs[nr], 1, nfit);
    free_vector(mse, 1, nr);
    free_ivecator(ipiv, 1, nfit);
    free_ivecator(indxr, 1, nfit);
    free_ivecator(indxc, 1, nfit);
    free_matrix(covar0, 1, nfit, 1, nfit);
    free_matrix(covar, 1, nfit, 1, nfit);
    free_vector(beta, 1, nfit);
    free_lvector(rs, 1, rslen); /* allocated by rscale() */
    free(seq); /* allocated by input() */
}

static char *help_strings[] = {
    "usage: %s [OPTIONS ...]\n",
    "where OPTIONS may include:",
    "-d K          detrend using a polynomial of degree K",
    "              (default: K=1 -- linear detrending)",
    "-h          print this usage summary",
    "-i          input series is already integrated",
    "-l MINBOX    smallest box width (default: 2K+2)",
    "-s          sliding window DFA",
    "-u MAXBOX    largest box width (default: NPTS/4)",
    "The standard input should contain one column of data in text format.",
    "The standard output is two columns: log(n) and log(F) [base 10 logarithms],",
    "where n is the box size and F is the root mean square fluctuation.",
    NULL
};

void help(void)
{
    int i;

    (void)fprintf(stderr, help_strings[0], pname);
    for (i = 1; help_strings[i] != NULL; i++)
        (void)fprintf(stderr, "%s\n", help_strings[i]);
}

/* polyfit() is based on lfit() and gaussj() from Numerical Recipes in C
(Press, Teukolsky, Vetterling, and Flannery; Cambridge U. Press, 1992). It
fits a polynomial of degree (nfit-1) to a set of boxsize points given by
x[1...boxsize][2] and y[1...boxsize]. The return value is the sum of the
squared errors (chisq) between the (x,y) pairs and the fitted polynomial.
*/

```

```

double polyfit(double **x, double *y, long boxsize, int nfit)
{
    int icol, irow, j, k;
    double big, chisq, pivinv, temp;
    long i;
    static long pboxsize = 0L;

    /* This block sets up the covariance matrix. Provided that boxsize
       never decreases (which is true in this case), covar0 can be calculated
       incrementally from the previous value. */
    if (pboxsize != boxsize) { /* this will be false most of the time */
        if (pboxsize > boxsize) /* this should never happen */
            pboxsize = 0L;
        if (pboxsize == 0L) /* this should be true the first time only */
            for (j = 1; j <= nfit; j++)
                for (k = 1; k <= nfit; k++)
                    covar0[j][k] = 0.0;
        for (i = pboxsize+1; i <= boxsize; i++)
            for (j = 1; j <= nfit; j++)
                for (k = 1, temp = x[i][j]; k <= j; k++)
                    covar0[j][k] += temp * x[i][k];
            for (j = 2; j <= nfit; j++)
                for (k = 1; k < j; k++)
                    covar0[k][j] = covar0[j][k];
        pboxsize = boxsize;
    }
    for (j = 1; j <= nfit; j++) {
        beta[j] = ipiv[j] = 0;
        for (k = 1; k <= nfit; k++)
            covar[j][k] = covar0[j][k];
    }
    for (i = 1; i <= boxsize; i++) {
        beta[1] += (temp = y[i]);
        beta[2] += temp * i;
    }
    if (nfit > 2)
        for (i = 1; i <= boxsize; i++)
            for (j = 3, temp = y[i]; j <= nfit; j++)
                beta[j] += temp * x[i][j];
    for (i = 1; i <= nfit; i++) {
        big = 0.0;
        for (j = 1; j <= nfit; j++)
            if (ipiv[j] != 1)
                for (k = 1; k <= nfit; k++) {
                    if (ipiv[k] == 0) {
                        if ((temp = covar[j][k]) >= big ||
                            (temp = -temp) >= big) {
                            big = temp;
                            irow = j;
                            icol = k;
                        }
                    }
                }
    }
}

```

```

        }
    }
    else if (ipiv[k] > 1)
        error("singular matrix");
    }
    ++(ipiv[icol]);
    if (irow != icol) {
        for (j = 1; j <= nfit; j++) SWAP(covar[irow][j], covar[icol][j]);
        SWAP(beta[irow], beta[icol]);
    }
    indxr[i] = irow;
    indxc[i] = icol;
    if (covar[icol][icol] == 0.0) error("singular matrix");
    pivinv = 1.0 / covar[icol][icol];
    covar[icol][icol] = 1.0;
    for (j = 1; j <= nfit; j++) covar[icol][j] *= pivinv;
    beta[icol] *= pivinv;
    for (j = 1; j <= nfit; j++)
        if (j != icol) {
            temp = covar[j][icol];
            covar[j][icol] = 0.0;
            for (k = 1; k <= nfit; k++) covar[j][k] -= covar[icol][k]*temp;
            beta[j] -= beta[icol] * temp;
        }
    }
    chisq = 0.0;
    if (nfit <= 2)
        for (i = 1; i <= boxsize; i++) {
            temp = beta[1] + beta[2] * i - y[i];
            chisq += temp * temp;
        }
    else
        for (i = 1; i <= boxsize; i++) {
            temp = beta[1] + beta[2] * i - y[i];
            for (j = 3; j <= nfit; j++) temp += beta[j] * x[i][j];
            chisq += temp * temp;
        }
    return (chisq);
}

/* The functions below are based on those of the same names in Numerical
   Recipes (see above). */
void error(char error_text[])
{
    fprintf(stderr, "%s: %s\n", pname, error_text);
    exit(1);
}

double *vector(long nl, long nh)
/* allocate a double vector with subscript range v[nl..nh] */

```

```

{
    double *v = (double *)malloc((size_t)((nh-nl+2) * sizeof(double)));
    if (v == NULL) error("allocation failure in vector()");
    return (v-nl+1);
}

int *ivector(long nl, long nh)
/* allocate an int vector with subscript range v[nl..nh] */
{
    int *v = (int *)malloc((size_t)((nh-nl+2) * sizeof(int)));
    if (v == NULL) error("allocation failure in ivector()");
    return (v-nl+1);
}

long *lvector(long nl, long nh)
/* allocate a long int vector with subscript range v[nl..nh] */
{
    long *v = (long *)malloc((size_t)((nh-nl+2) * sizeof(long)));
    if (v == NULL) error("allocation failure in lvector()");
    return (v-nl+1);
}

double **matrix(long nrl, long nrh, long ncl, long nch)
/* allocate a double matrix with subscript range m[nrl..nrh][ncl..nch] */
{
    long i, nrow = nrh-nrl+1, ncol = nch-ncl+1;
    double **m;

    /* allocate pointers to rows */
    m = (double **) malloc((size_t)((nrow+1) * sizeof(double*)));
    if (!m) error("allocation failure 1 in matrix()");
    m += 1;
    m -= nrl;

    /* allocate rows and set pointers to them */
    m[nrl] = (double *) malloc((size_t)((nrow*ncol+1) * sizeof(double)));
    if (!m[nrl]) error("allocation failure 2 in matrix()");
    m[nrl] += 1;
    m[nrl] -= ncl;

    for (i = nrl+1; i <= nrh; i++) m[i] = m[i-1]+ncol;

    /* return pointer to array of pointers to rows */
    return (m);
}

void free_vector(double *v, long nl, long nh)
/* free a double vector allocated with vector() */
{
    free(v+nl-1);
}

```

```

}

void free_ivector(int *v, long nl, long nh)
/* free an int vector allocated with ivector() */
{
    free(v+nl-1);
}

void free_lvector(long *v, long nl, long nh)
/* free a long int vector allocated with lvector() */
{
    free(v+nl-1);
}

void free_matrix(double **m, long nrl, long nrh, long ncl, long nch)
/* free a double matrix allocated by matrix() */
{
    free(m[nrl]+ncl-1);
    free(m+nrl-1);
}

```

ტალღურ ცუბებში მინიმუმების ძებნის და მინიმუმებს შორის მანძილის გამოთვლის პროგრამა

Program finds absolute minimums in the wave trains and distance between these minimums. Creates new time series where all points except minimums are nulling.

```

//-----
#include <vcl.h>
#pragma hdrstop
#include<fstream.h>
#include<iostream.h>
#include<iomanip.h>

//-----

#pragma argsused
int main(int argc, char* argv[])
{
    char filename[40],sname[40],signame[40],nulname[40];
    int e; // e is given value of window's end
    cout<<"Enter file name with filtered signal:"<<endl;
    cin>>filename;
    ifstream fss1(filename,ios::in);
    if(!fss1){
        cout<<"File not found"<<endl;
        exit(1);
    }
}

```



```

    }
    int counts=0;
    char st='a';
    bool d=true;
    while(st!='\n'&&(!fss1.eof())){
    fss1.get(st);
    if(d){
        if(!isspace(st)){
            counts++;
            d=false;
        }
    }
    else{
        if(isspace(st))
            d=true;
    }
    }
    fss1.close();
    cout<<"Number of column in file "<<filename<<" equal to
"<<counts<<endl<<endl;
    int colnums=1;
    if(counts>1){
        cout<<"Enter column : "<<endl;
        cin>>colnums;
    }
    //-----column from filtered signal-----
    if(counts==0){
        cout<<"Incorrect file"<<endl;
        exit(1);
    }
    cout<<"Enter file name with signal:"<<endl;
    cin>>signame;
    ifstream fss(signame,ios::in);
    if(!fss){
        cout<<"File not found"<<endl;
        exit(1);
    }
    //-----
    int count=0;
    d=true;
    st='a';
    while(st!='\n'&&(!fss.eof())){
    fss.get(st);
    if(d){
        if(!isspace(st)){
            count++;
            d=false;
        }
    }
    }
    else{

```

```

    if(isspace(st))
        d=true;
    }
}
fss.close();
//ifstream fss1(filename,ios::in);
if(count==0){
    cout<<"Incorrect file"<<endl;
    exit(1);
}
cout<<"Number of column in file "<<signame<<" equal to "<<count<<endl<<endl;
int colnum=1;
if(count>1){
    cout<<"Enter column :"<<endl;
    cin>>colnum;
}
//-----find windows in filtered signal -----
ifstream f(filename,ios::in);
ofstream om("min.nat",ios::out);
ofstream oF("MINPOSITION",ios::out);
oF.setf(ios_base::fixed);
oF.precision(0);
cout<<endl<<"Enter length of shift window to left:"<<endl;
double shift;
cin>>shift;
double *val=new double[counts];
cout<<"Enter min number of nulls between windows in filtered signal: "<<endl;
int nullnum;
cin>>nullnum;
    bool sign,b=true,bb=true;
    int start=0,end=0,j=0,nulls=0;
    double val1;
    cout<<"Enter min length of window in filtered signal: "<<endl;
    int LEN;
    cin>>LEN;
    cout<<"Please wait for getting windows...."<<endl;
        while(f>>val[0]){
            for(int i=1;i<counts;i++){
                f>>val[i];
            }
            if(b){
                if(val[colnums-1]!=0){
                    if(nulls>=nullnum||bb){
                        b=false;
                        bb=false;
                    }
                    nulls=0;
                }
            }
            if(val[colnums-1]==0){
                start=j+1;
                nulls++;
            }
        }

```

```

    if(nulls>=nullnum)
        b=true;
    }
    }
    else{
        if(val[colnums-1]==0){
            if(nulls==0)
                e=j;
            nulls++;
            if(nulls>=nullnum){
                end=e;
                if((end-start-1)>=LEN)
                    oF<<start+1-shift<<setw(22)<<end-shift<<endl;
            }
            else
                nulls=0;
            start=j+1;
            b=true;
        }
        }
        else{
            nulls=0;
            e=j+1;
        }
    }
    j++;
}
if(!b&&e<=j&&((e-start-1)>=LEN))
    oF<<start+1-shift<<setw(22)<<e-shift<<endl;
oF.close();
f.close();
//-----
double min;
int minpos;
ifstream iF("MINPOSITION",ios::in);
ifstream fs(signame,ios::in);
cout<<"Wait for getting min position in signal..."<<endl;
int n=1,len;
delete val;
val=new double[count];
while(iF>>start>>end){
    if(start<0)
        start=1;
    len=end-start+1;
    while(n<start){
        for(int i=0;i<count;i++)
            fs>>val[i];
        n++;
    }
    for(int j=0;j<len;j++){
        for(int i=0;i<count;i++)

```

```

        fs>>val[i];
    if(j==0){
        min=val[colnum-1];
        minpos=start;
    }
    if(val[colnum-1]<min){
        min=val[colnum-1];
        minpos=start+j;
    }
    n++;
}
om<<minpos<<endl;
}
om.close();
//-----add nulls in signal-----
cout<<"Enter output file for saving distance between min values :"<<endl;
cin>>sname;
ofstream of(sname,ios::out);
cout<<"Enter output file for saving column with signal after adding nulls :"<<endl;
cin>>nulname;
ofstream nulf(nulname,ios::out);
nulf.setf(ios_base::scientific);
int nn=1;
ifstream im("min.nat",ios::in);
ifstream sf(sname,ios::in);
    cout<<"Please wait while program adds nulls in signal file..."<<endl;
    int temppos=-1;
    while(im>>minpos){
        while(nn<minpos){
            for(int i=0;i<count;i++)
                sf>>val[i];
            nulf<<0<<endl;
            nn++;
        }
        for(int i=0;i<count;i++)
            sf>>val[i];
        nulf<<val[colnum-1]<<endl;
        if(temppos!=-1)
            of<<(minpos-temppos)<<endl;
        nn++;
        temppos=minpos;
    }
    while(sf>>val[0]){
        for(int i=1;i<count;i++)
            sf>>val[i];
        nulf<<0<<endl;
        nn++;
    }
}

```

```

        cout<<"Length of series equal to "<<--nn<<endl<<"Program
terminated.\nClick any button for exit:"<<endl;
        cin>>minpos;
        oF.close();
        im.close();
        iF.close();
        remove("MINPOSITION");
        remove("min.nat");
        return 0;
}

```

ბამოყენებული ლიტერატურა

1. Arecchi F.T., Farini A., Lexicon of Complexity, *A., ABS. Sest. F.* 1996, Firenze.
2. Kravtsov Yu., (ed.) Predictability of complex dynamical systems, 1996, Springer, NY.
3. Marzochi W., Detecting low-dimensional chaos in time series of finite length generated from discrete parameter processes, *Physica D*, 1996, 90, 31 - 39.
4. Marzochi W., Detecting low-dimensional chaos in geophysical time series, *J. Geoph. Res.* 1997, 102. B2, 319-329.
5. Weigend A.S., Gershenfeld N. A., The future of time series : learning and understanding, 1993, Ad. Wesley.
6. Keilis-Borok V.I., The Lithosphere of the Earth as a nonlinear system with implications for earthquake prediction, *Rev. Geophys.*, 1990, 28, 1, 9 – 34.
7. Nicolis G., Daems D., Probabilistic and thermodynamic aspects of dynamical systems. *Chaos*, 1998, 8, 2, 311 – 320.
8. Serra R., Zanarini G., Complex system and cognitive processes, 1990, Springer, Berlin.
9. Korvin G., Fractal models in the earth sciences, 1992, Elsevier, NY.
10. Strogatz S. H., Nonlinear dynamics and chaos with applications to physics, biology, chemistry and engineering, Addison-Wesley, 1995.
11. Hallgass R., Loreto V., Mazzella O., Paladin G., Pietronero L., Earthquake statistics and fractal faults. *Phys. Rev. E.* 1997, 56, 2, 1346-1356.
12. Kantz H., Schreiber, T., Nonlinear time series analysis, *Cambridge University Press*, 1997, Cambridge 304 pp.
13. Goltz C., Fractal and chaotic properties of earthquakes, 1998, Springer, Berlin.
14. Stein D. L., (ed.), Lectures in the sciences of complexity, Addison-Wesley, MA, 1989.
15. Cowan G., (ed.), Complexity, Cambridge University Press, Cambridge, 1994.
16. Mainzer, K., Thinking in complexity, 1997, Springer, Berlin.
17. Zak M., Zbilut J., Mayers R., From instability to intelligence, complexity and predictability in nonlinear dynamics, 1997, Springer, NY.
18. Badii R., Polity A., Complexity, Cambridge University Press, 1997, Cambridge.

19. Rundle J. B., Turcotte D.L., Klein W., (Eds) GeoComplexity and the Physics of earthquakes. AGU, Washington, 2000.
20. Auerbach D., Proccaccia I., Grammatical Complexity of Strange Sets, *Phys. Rev.* 1990, A, 41, 6602 – 6605.
21. Traub J. F., Wershulz A. G., Complexity and information, 1998, Cambridge University Press.
22. Takens F., On the numerical determination of the dimension of an attractor, in dynamical systems and bifurcations, Groningen , 1984, eds. B.L. Braaksma, H. V. Broer, and F. Takens, vol. 1125 of Lecture Notes in Mathematics, Springer, 1985.
23. Abarbanel H. D. I., Brown R., Sidorowich., Tsimring L. S., The Analysis of Observed Chaotic data in Physical Systems, *Rev. Mod. Phys.*, 1993, 65, 4, 1331 - 1392.
24. Devaney L., An introduction to chaotic dynamical systems, Addison-Wesley, MA, 1989.
25. Drazin P. G., Nonlinear systems, Cambridge Univ. Press, 1994, Cambridge.
26. Mandelbrot B. B., The fractal geometry of nature, W.H. Freeman, San Francisco, 1982.
27. Mandelbrot B. B., Multifractals and 1/f noise, 1998, Springer.
28. Press W. H., Teukolsky S.A., Vetterling W. T., Flannery B. P. Numerical recipes, Cambridge University Press, 1992, Cambridge.
29. Sprott J. C., Rowlands G., Chaos data analyzer; the professional version. AIP, NY, 1995.
30. Bassingthwaight J. B., Raymond G.M., Evaluating rescaled range analysis for time series fractional Brownian signals, *Ann. Biomed. Eng.* 1994, 22, 432 – 444.
31. Peng C.K., Havlin S., Hausdorf J.M., Mietus J. E., Stanley H. E., Goldberger A., Fractal mechanisms and heart rate dynamics, *J. of Electrocardiol.* 1995, 28, 59 - 65.
32. Berge P., Pomeau. Y., Vidal, C., Order within chaos. J. Wiley, NY, 1984
33. De Vore A. R., Lucier B. J., Wavelets, *Acta numerica*, ed. Iserles A., Cambridge University Press, Cambridge, 1992, 1, 1 - 56.
34. Holschneider M., Wavelets. An Analysis Tool. 1995, Oxford.
35. Mallat S., A Wavelet tour of signal processing. *Academic Press*, NY, 1998.

36. Nason G., Van Sachs., Wavelets in time series analysis, Phil. Trans. Royal Society of London, 1999, A, 26, 35 - 45.
37. Voss R.F., Clarke J., 1/f noise in music and speech, Nature 1975, 258, 317 - 318.
38. Peitgen H.O., Richter P. H. The Beauty of fractals. 1986, Springer, NY.
39. Peitgen H.O., Jurgens H., Saupe D., Chaos and fractals: New Frontiers of Science, Springer, NY, 1992.
40. Hurst H. E., Long-term storage capacity of reservoirs, Trans. Amer. Soc. Civ. Engrs. 1956, 116, 770 - 808.
41. Feder J., Fractals. Plenum Press, NY. 1988.
42. Peng C.K., Havlin S., Stanley H.E., Goldberger A.L., Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series, Chaos, 1995, 5, 1, 82 - 87.
43. Mandelbrot B. B. Fractals and multifractals: noise, turbulence and galaxies, Springer, Berlin, 1988.
44. Packard N.H., Crutchfield J.P., Farmer J.D., Shaw R.S., Geometry from a time series, *Phys. Rev. Lett.* 1980, 45, 712 - 716.
45. Takens F., Detecting strange attractors in turbulence. in: dynamical systems and turbulence, Warwick 1980, D.A . Rand and L.S. Young, eds Vol. 898 of Springer Lecture Notes in Mathematics, Springer, Berlin, 1981, 366 - 381.
46. Sailhac P., Introduction to nonlinear geophysics, chaos and fractals, Proceedings of the workshop: Short term thermal and hydrological signatures related to tectonic activities. 1997, 14, 121 - 161, ed.: Van Ruimbeke, M., Luxemburg.
47. Theiler J., Eubank S., Longtin A., Galdrikian B., Farmer J.D., Testing for nonlinearity in time series: the method of surrogate data, *Physica* 1992, D58 ,77 - 94.
48. მაჭარაშვილი თ., ჭელიძე თ., სირთულე ბუნების სტრუქტურასა და დინამიკაში. ფრაქტალები, ქაოსი და დროითი სერიების არაწრფივი ანალიზი, 2000, თბილისი, გამომცემლობა „გეოპრინტი“, -248 გვ.
49. Essex C., Lookman T., Nerenberg M.A., The climate attractor over short time scales, *Nature*, 1987, 326, 64 - 67.
50. Eckman, J.P., Ruelle, D., Ergodic theory of chaos and strange attractors, *Rev. Mod. Phys*, 1985, 57, 3, 617 - 656.
51. Shuster H. G., Deterministic chaos, Viley-VCH Verlag, Berlin, 1995.
52. Bask M., Testing chaotic dynamics via Lyapunov exponents, *Physica D*, 1998, 114, 1 - 2.

53. Wolf A., Swift J., Swinney H., Vastano J., Determining Lyapunov exponents from a time series, *Physica D*, 1985, 16, 285 - 317.
54. Stoop S., Calculation of Lyapunov exponents avoiding spurious elements, *Physica D*, 1991, 50, 89 - 94.
55. Rossler O. E., An equation for continuous chaos, *Phys. Lett.* 1976, A 57, 397 - 401.
56. Theiler J., Estimating fractal dimension, *J. Opt. Soc. Am. A*. 1990, 7, 6, 1055 - 1073.
57. Balatoni J., Renyi, A., Selected papers of A. Renyi, 1956, Akademiai Budapest, Budapest, 1976.
58. Schreiber T., Extremely simple nonlinear noise-reduction method, *Phys. Rev. E*, 1993, 47, 4, 2401 - 2404.
59. Rapp P.E., Albano A.M., Schmah T.I, Farwell L. A., Filtered noise can mimic low-dimensional chaotic attractors. *Phys. Rev. E*, 1993, 47, 4, 2289 - 2297.
60. Rapp P.E., Albano A.M., Zimmerman I. D., Jumenez-Montero M.A., Phase-randomized surrogates can produce spurious identification of non-random structure, *Phys. Lett. A*, 1994, 192, 1, 27 - 33.
61. Rombouts, S.A., Keunen, R.W., Stam, C.J., Investigation of nonlinear structure in multichannel EEG. *Phys.Lett. A*, 1995, 202,5/6, 352 - 358.
62. Theiler, J., Quantifying chaos: practical estimation of the correlation dimension, Ph. D. dissertation. California Institute of Technology, Pasadena, Calif., 1998
63. Govindan, R.B., Narayanan, K., Gopinathan, M.S., On the evidence of deterministic chaos in ECG: surrogate and predictability analysis. *Chaos*, 1998, 8, 2, 495 - 502.
64. Schreiber, T., Schmitz, A., Discrimination power of measures for nonlinearity in a time series, *Phys. Rev. E*, 1997, 55, 5, 5443 - 5447.
65. Likesh, J., Laga, J., Basis tables of mathematical statistics (in Russian), Moscow, 1985.
66. Essex C., Nerenberg M.A., On attractors dimension. *Proc. R. Soc. London, Series A*. 1991, 435. 287
67. Belaire-Franch, J., Contreras, J. D., Tordera-Lledo, L., 'Assessing nonlinear structures in real exchange rates using recurrence plot strategies', *Physica D*, 2002, 171, 249-264.
68. Eckmann, J.P., Kamphorst S., Ruelle, D., Recurrence plots of dynamical systems. *Europhysics Letters*, 1987, 4 (9), 973-977.

69. Marwan N, Wessel N., Meyerfeldt U., Schirdewan A., Kurths J., Recurrence-plot-based measures of complexity and their application to heart rate variability data. *Physical Review E*, 2002, 66, 026702.1-026702.8.
70. Marwan M., Encounters with neighborhood, PhD Thesis, 2003.
71. Zbilut J.P., Webber C.L. Jr., Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots. *Physics Letters A*, 1992, 171, 199-203.
72. Chua L.O, Chua circuit: An overview 10 years later, *J. Circuits Syst. Comput.*, 1994, 4, (2), pp. 117-159
73. Tôrres L.A.B., Aguirre L.A., Inductorless Chua's circuit, *Electron. Lett.* 2000, 36, 1915-1916.
74. Kennedy M.P., Robust OP Amp realization of Chua's circuit , 1992, *Frequenz* 46 (3-4), 66-80.
75. Aguirre L.A., Rodrigues G.G., Mendes E.M, Nonlinear identification and cluster analysis of chaotic attractors from a real implementation of Chua's circuit, *Int. J. of Bifurcation and Chaos*, 1997, 6, Vol.7, 1411—1423.
76. Chua L.O., Komuro M., Matsumoto T., “The double scroll”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1985, 32(8), 797-818.
77. Bak P., Tang S., Wiesenfeld K. Earthquakes as self-organized critical phenomenon. *J. Geophys. Res.* 1989, V. 94, P.15635-15637
78. Pikovsky A., Rosenblum M.G., Kurth J., *Synchronization: Universal Concept in Nonlinear Science*, Cambridge University Press, Cambridge, 2003, 411.
79. Calvo O., Chialvo D., Eguíluz V., Mirasso C., Toral R., Anticipated synchronization: A metaphorical linear view, *Chaos*, 2004, 14, 7-13.
80. Smirnov, V.B., ‘Fractal properties of seismicity of Caucasus’, *J. of Earthq. Prediction Res.*, 1995, 4, 31-45.
81. Rosenblum M., Pikovsky A., Kurth J., ‘Phase synchronization of chaotic oscillators, *Physics Review Letters*’, 1996, 76, 1804-1807
82. Postnov D.E., Sosnovtseva O.V., Mosekilde E., Holstein-Rathlou N.-H., ‘Synchronization of Tubular Pressure Oscillations in Interacting Nephrons’ *Chaos, Solitons and Fractals*, 2003, 15, 2, 343-369.
83. McAllister R., Uchida A., Meucci., Roy R., ‘Generalized synchronization of chaos: experiments on a two-mode microchip laser with optoelectronic feedback’, *Physica D*, 2004, 195, 244-262.
84. Bonatz M., Safety monitoring of large dams: objectives and problems, in *Proc. Of Workshop: Geodynamical Hazard Associated With Large Dams*, Ed. M. Bonatz, Luxembourg, 1998, 3-12.

85. Szostak – Chrzanowski A., Massiéra M., Relation Between Monitoring and Design of Large Dams, in proc. 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, May 2006 a , 22-24.
86. Donnelly C. R., Eng P., Safe and Secure, Research & Development, Dam Safety, 2007, 1, 34-41.
87. Abashidze V. G., Geophysical Monitoring of Geodynamical Processes in Region of High Dam. Monigraphy. Publish. house “Metsniereba”, 2001, Tbilisi.
88. Matcharashvili T., Chelidze T., Javakhishvili Z., ‘Nonlinear analysis of magnitude and interevent time interval sequences for earthquakes of Caucasian region’, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2000, 7, 9-19.
89. Peinke J., Matcharashvili T., Chelidze T., Gogiashvili J., Nawroth A., Lursmanashvili O., Javakhishvili Z., ‘Influence of Periodic Variations in Water Level on Regional Seismic Activity Around a Large Reservoir: Field and Laboratory Model’, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2006, 156/1-2, 130-142.
90. Bowman D.D., Ouillon G., Sammis C. G., Sornette A., Sornette D., ‘An observational test of the critical earthquake concept’, *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103, 24359-24372.
91. Rosenblum M.G., Pikovsky A.S., Kurth J., Shafer C., Tass P., Phase synchronization: From theory to data analysis. In F. Moss and S. Gielen, Eds, Handbook of biological physicsv. 4. Neuro-informatics, 2001, 279-321.
92. Anishchenko V., Dynamical Chaos. World Scientific. Singapore, 1995.
93. Tozi P., De Rubeis V., Loreto V. and Pietronero L., Space-time correlation integral and earthquake, 2004.
94. Assumpção M., Marza V.I., Barros L.V., Chimpliganond C.N., Soares J.E.P., Carvalho J.M., Caixeta D., Amorim A., Cabral E., ‘Reservoir induced seismicity in Brazil’, *Pure Applied Geophysics*, 2002, 159, 597–617.
95. Rundle J., Turcotte D., Klein W., (eds), *GeoComplexity and the Physics of Earthquakes*, American Geophysical Union, 2000, Washington.
96. Pazo D., Zaks M.A., Kurths J., Role of unstable periodic orbits in phase and lag synchronization between coupled chaotic oscillators, *Chaos*, 2003, 13, 309-318.
97. Iwanski J., Bradley E., ‘Recurrence plots of experimental data: To embed or not to embed?’, *Chaos*, 1998, 8, 4, 861-871.
98. Simpson D., Leith W., Scholz C., ‘Two types of reservoir-induced seismicity’, *Bulletin of Seismological Society America*, 1988, 78, 2025-2040.
99. Chelidze T., Matcharashvili T., Lursmanashvili O., Devidze M., Khutsishvili T., Phase synchronization and recurrence quantitative analysis of stick slip acoustic

data sets, *European Geosciences Union (EGU), Geophysical Research Abstracts*, 2006, Vol. 8, 03919.

100. Abashidze V., Khutsishvili T., Javakhishvili Z., Zhukova N., Mepharidze E., Chelidze T., Matcharashvili T., Controlling Influence of Reservoir Water Level on Local Seismic Energy Release, *Bull. of Georgian Natl. Acad. Sci.* 2007, vol. 175, 2, pp. 77-80.
101. Chelidze T., Matcharashvili T., Javakhishvili Z., Khutsishvili T., Mepharidze E., Zhukova N., Influence of periodic variations of Enguri reservoir water level on regional seismic activity, *Journal of Georgian Geophysical Society, Issue (A), Physics of Solid Earth*, 2006-2007, v.11, pp. 74-93.
102. Abashidze V., Javakhishvili Z., Khutsishvili T., Mepharidze E., Zhukova N., Chelidze T., Matcharashvili T., Increase of order of Local seismic energy release caused by water level variation in the Enguri high dam reservoir, *Bull. of Georgian Natl. Acad. Sci.* 2007, vol. I(vol. 175), 3, pp. 49-51.
103. Челидзе Т. Л., Мачарашвили Т. Н., Джавахишвили З. Ш., Абашидзе В. Г., Хуцишвили Т. Г., Мепаридзе Е. В., Жукова Н. Н. Воздействие периодического изменения уровня воды в водохранилище Ингури на региональную сейсмическую активность, *Геофизический журнал, Институт геофизики НАН Украины*, 2008, №3, Т. 30, ст. 87-94.
104. Peinke J., Matcharashvili T., Chelidze T., Gogiashvili J., Nawroth A., Lursmanashvili O., Javakhishvili Z., Influence of Periodic Variations in Water Level on Regional Seismic Activity Around a Large Reservoir: Field and Laboratory Model, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2006, 156/1-2, 130-142.
105. Buttkus B., *Spektralanalyse und Filtertheorie in der Angewandten Geophysik*, 1991, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
106. Khutsishvili T., Matcharashvili T., Chelidze T., Zhukova N., Mepharidze E., Control of the dynamics of stick slip acoustic emission by small periodic electromagnetic forcing, *Proceedings of International Scientific conference ITC'07("Information Technologies in control")*, Tbilisi, Georgia, 2007, Vol. 1, p. 291.
107. Matcharashvili T., Chelidze T., Khutsishvili T., Zhukova N., Mepharidze E., Control of temporal distribution of stick-slip acoustic emission by periodic electromagnetic forcing, *European Geosciences Union (EGU) General Assembly Vienna, Austria, 15 – 20 April*, *Geophysical Research Abstracts*, 2007, Vol. 9, 00324.
108. Chelidze T., Matcharashvili T., Khutsishvili T., Mepharidze E., Zhukova N., Reservoir-induced synchronization in local seismicity, *European Geosciences Union (EGU) General Assembly Vienna, Austria, 13 – 18 April*, *Geophysical Research Abstracts*, 2008, Vol. 10, EGU2008-A-02364.

109. Kurz Jochen, et al. Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete, *Ultrasonics* 43 (2005) 2004, 538–546.
110. Quiroga R., et al. Performance of different synchronization measures in real data, *PHYSICAL REVIEW E*, 2002, VOLUME 65, 041903.
111. Tass P., Rosenblum M, Weule J., Kurths J., Pikovsky A., Volkmann J., Schitzler A., and Freund H., Detection of phase locking., *Phys. Rev. Lett.* 1998, 81, 3291,.
112. Chelidze T., Lursmanashvili O., Matcharashvili T., Devidze M., Triggering and synchronization of stick slip: Waiting times and frequency-energy distribution, *Tectonophysics*, 2006, 424, 3-4, 139-155.