

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

შორენა დავითელაშვილი

ქაოსური პროცესების ანალიზი დინამიკურ სისტემებში
სინერგეტიკული მეთოდების გამოყენებით

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა „მართვის სისტემები, ავტომატიზაცია და ტესტ-
ინჟინერინგი“
შიფრი 0403

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, D-8671, საქართველო

2019 წელი

საავტორო უფლება © 2019 წელი

შორენა დავითელაშვილი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით შორენა დავითელაშვილის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: “ქაოსური პროცესების ანალიზი დინამიკურ სისტემებში სინერგეტიკული მეთოდების გამოყენებით” და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი:

ხელმძღვანელი: პროფ. ვალიდა სესაძე

რეცენზენტი:

რეცენზენტი:

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ავტორი: შორენა დავითელაშვილი

დასახელება: ქაოსური პროცესების ანალიზი დინამიკურ
სისტემებში სინერგეტიკული მეთოდების გამოყენებით

ფაკულტეტი: ინფორმატიკისა და მართვის სისტემები;

ხარისხი: დოქტორი;

სხდომა ჩატარდა:

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

ავტორის ხელმოწერა

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

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

რეზიუმე

დღესდღეობით, მეტად მნიშვნელოვანია ქაოსური დინამიკის მქონე არაწრფივი სისტემების მართვის პრობლემა. კერძოდ, ქაოსის წინააღმდეგ ბრძოლა, რომელიც ხშირად არღვევს დინამიკური სისტემების ფუნქციონირების ხარისხს.

სამეცნიერო კვლევებში ტერმინი "ქაოსი" გამოყენებულია ისეთი სისტემების აღსაწერად, რომლებიც ერთი შეხედვით არიან სრულიად შემთხვევითი დინამიკის, მაგრამ ამავე დროს მათ გააჩნიათ დაფარული წესრიგი.

ქაოსური დინამიკის მართვის აქტუალური სამეცნიერო პრობლემა ჯერ არ არის მოგვარებული. მისი გადაჭრის არსებული ასპექტების უამრავი რაოდენობიდან შესაძლოა გამოვყოთ ზოგიერთი მეთოდი და კანონი, რომლებიც ამცირებენ არარეგულარულ რხევებს არაწრფივ სისტემებში და უზრუნველყოფენ თავდაპირველი ქაოსური მოდელის სტაბილიზაციას, ანუ მის გადაყვანას მდგრად მდგომარეობაში.

თანამედროვე ტექნიკურ მეცნიერებაში განიხილება ისეთ რთული სისტემები, რომლებიც თვისებებით და საქციელით ძლიერ გვანან ბუნებრივებს. აქედან გამომდინარე წარმოიქმნება მოთხოვნილება, გამოვლინდეს ბუნებრივ სისტემებში მიმდინარე მექანიზმები, მოხდეს მათი ფუნქციონირების განსაზღვრა და განვითარების პროგნოზირება; კვლევის მიღებული შედეგები კი გამოყენებულ იქნას ტექნიკურ სისტემებში.

ტელე-კომუნიკაციის სფეროში ერთ-ერთ მნიშვნელოვან პრობლემას წარმოადგენს ინფორმაციის გადაცემისა და ზუსტად აღდგენის სისტემების საიმედო, მდგრადი მუშაობა.

კავშირის არხით სიგნალის გადაცემისას შესაძლოა ის დამახინჯდეს და შემდეგ მიმღებ მხარეზე მოხდეს მისი შეცდომით აღდგენა. რაც საკმაოდ არასასურველი მოვლენაა. გამოსახულების სიგნალების დამახინჯება ხშირად გამოწვეულია საკომუნიკაციო ხაზის ცნობილი მახსიათებლებით და შესაძლოა მათი გამოსწორება შესაბამისი კორექტირებით. დაბრკოლებები, რომლებიც ჩაერევინ, წინასწარ არ არის ცნობილი, ამიტომ არ შეიძლება მათი სრულიად აღმოფხვრა. დაბრკოლებები მრავალფეროვანია, როგორც მათი წარმოშობის, ასევე ფიზიკური თვისებებით.

იმისათვის, რომ ხელოვნური სისტემები იყვნენ ჰარმონიულ მდგომარეობაში ბუნებრივ სამყაროსთან მიმართებაში, ვსარგებლობთ თანამედროვე მეცნიერების გაერთიანებული მიმართულებით სინერგეტიკით. სინერგეტიკა - ესაა მეცნიერება თვითორგანიზაციის შესახებ არაწრფივ დისიპაციურ სისტემებში. ის შეისწავლის ფიზიკურ, ქიმიურ და ბიოლოგიურ სისტემებში მიმდინარე განვითარების რთული პროცესების კანონზომიერებებს.

სინერგეტიკა - ეს ინტეგრალური მეცნიერება, იკვლევს თვით-ორგანიზაციის პროცესებს და მოიცავს ცოცხალ ბუნებას, ტექნიკას და ეკონომიკას. ის საშუალებას გვაძლევს, რომ წარმოიქმნას ახალი მეტაენა, ჰუმანიტარებსა და ინჟინრებს შორის; ერთ მთლიანობაში გავიგოთ ბუნება და ტექნიკა, ერთიანი სინერგეტიკული კონცეფციის საშუალებით.

რატომ უნდა, სინერგეტიკულ კონცეფციაზე გადასვლა მოითხოვს ახალ სამეცნიერო კვლევებს. ასეთ კვლევას ეხება აღნიშნული ნაშრომი, სადაც წარმოდგენილია პრინციპულად ახალი სინერგეტიკული მიდგომა არაწრფივი დინამიკური ქაოსური სისტემების სინთეზისათვის. ჩვენ ვიყენებთ ინფორმაციის დინამიკური დამუშავების და დაცვის მეთოდს და აგრეგირებული რეგულატორების ანალიზური კონსტრუირების მეთოდს. შემდეგ კი სინერგეტიკული სისტემის თვისებები გადაგვაქვს კონსტრუირებულ სისტემაზე.

ოპტიმალური არაწრფივი სისტემების სინთეზის პრობლემამ აჩვენა, რომ მართვის თეორია არის რედუქციული მეთოდების ტყვე, როდესაც ცდილობს სისტემის ლოკალური აღწერების "შეწებების" გზით ააგოს მისი გლობალური საქციელი. თუმცა, ეს მეთოდები ზოგჯერ წარმატებულია (მაგალითად, წრფივ შემთხვევებში).

არაწრფივი სისტემების ოპტიმალური მართვისათვის მიზანშეწონილია არა მხოლოდ მათემატიკური კონსტრუქციების გამოყენება, ასევე ფიზიკური კანონზომიერებებიც, მართვის თეორიის და სინერგეტიკის თეორიის გამოყენებაც. რაც საშუალებას გვაძლევს ახლებურად მივუდგეთ სისტემების სინთეზის პროცედურას.

ახალი ინტეგრალური მეცნიერების მიხედვით, ღია სისტემებში, რომლებიც გარემოსთან ცვლიან ენერჯიას, ნივთიერებას ან ინფორმაციას, წარმოიქმნება თვითორგანიზაციის პროცესები. ანუ პროცესები იბადება ფიზიკური (ბიოლოგიური, ეკონომიკური, სოციალური) ქაოსიდან. შედეგად მათ აქვთ ახალი მდგრადი მოწესრიგებული სტრუქტურა, სისტემას გააჩნია უკვე ახალი თვისება.

კვლევის მიზანი:

ჩვენს ნაშრომში გადაწყვეტილია მართვის ამოცანა, რომელიც უზრუნველყოფს ქაოსური რხევების ჩახშობას ლორენცის ქაოსურ სისტემაში.

მსგავსი ტიპის ამოცანები წარმოიქმნება იმ შემთხვევებში, როდესაც აუცილებელია კონსტრუქციებში აღმოიფხვრას არასასურველი ვიბრაცია, სხვადასხვა ხმაური და ა.შ.

მაგალითად: ტელე-კომუნიკაციურ სისტემაში კავშირის არხით სიგნალის გადაცემისას შესაძლოა მას დაემატოს არასასურველი ხმაური და შეცვალოს ინფორმაცია.

დასახული მიზნის შესაბამისად ნაშრომში გადაწყვეტილია შემდეგი ძირითადი **ამოცანები**:

1. რეგულარული და ქაოსური დინამიკის მქონე სისტემების ბაზური არაწრფივი მათემატიკური მოდელების კვლევა.

2. ქაოსური გენერატორების აგების მეთოდების კვლევა და ლორენცის ქაოსური გენერატორის არაწრფივი მოდელის შესწავლა.

3. დინამიკური სისტემების რეკონსტრუქციის მეთოდების კვლევა.

4. ქაოსური რხევების ბუნებაზე მოქმედი „მმართველი პარამეტრის“ გაზომვის მეთოდის შემუშავება.

5. მიმდინარე „მმართველი პარამეტრის“ არაწრფივი დინამიკური დამკვირვებლის სინთეზი მიმდინარე ატრაქტორის სტრუქტურისა და დახურული ინფორმაციის შემდგომი აღდგენის მიზნით.

6. „მმართველი პარამეტრების“ გენერატორების სინთეზი ქაოსურ დინამიკურ სისტემებში.

დასკვნა. ამრიგად, შემუშავდა სინერგეტიკული დამკვირვებლის გამოყენებით სისტემის დინამიკის გლობალური რეკონსტრუქციის მეთოდზე დაფუძნებული ინფორმაციის დინამიკური დამუშავებისა და დაცვის ახალი მეთოდი, რომელიც ზუსტად აფასებს მმართველ პარამეტრს და შესაბამისად ახდენს ინფორმაციული სიგნალის რეკონსტრუქციას. ეს კი მოცემული მეთოდის კავშირის არხებში ინფორმაციის დაუმახინჯებელი სახით გადაცემის/აღდგენის ამოცანებში გამოყენების საშუალებას იძლევა.

ასევე შემუშავდა „მმართველი პარამეტრების“ გენერატორების სინერგეტიკული სინთეზის მეთოდი, რომელიც ეფუძნება აგრეგირებული რეგულატორების ანალიზური კონსტრუირების მეთოდის გამოყენებას და შესაძლებელს ხდის ლორენცის მოდელის სტრუქტურაში სასურველი ატრაქტორების ფორმირება მოხდეს.

ორივე მეთოდი თავის გამოყენებას ჰპოვებს ინფორმაციის დამუშავებისა და დაცვის ახალი კლასის თვითორგანიზებადი სისტემის შექმნაში.

Abstract

Analyze of Chaotic Processes in Dynamic Systems by Using of Synergetic Methods

Nowadays, it is most important a problem of managing nonlinear systems like chaotic dynamic. Privately, fighting against chaos, which often breaks the functioning quality of dynamic systems.

In the scientific studies the term 'chaos ' is used to describe such systems, which are in one sight completely random dynamics, but at the same time they have got conspired agenda.

Actual scientific problem of chaotic dynamic management has not been solved yet. We can choose some methods and laws from numerous of quantity of existing aspects to solve it, which increase irregular staggers in nonlinear systems and provide the stabilization of original chaotic model, or its transferring in a sustainable condition.

In modern technical science it is discussed such complex systems, which they resemble ones to natural with their characters and action. Therefore, it will originate demand for revealing the current mechanisms in natural systems, occurring determination of their functioning and development predicting; and obtained results of research to be used in technical systems.

Steady, reliable work of information transmission and precisely restoring, is one of the important problems in TV Communication.

It can be distorted during the transferring of signal with connection channel and then happen to restore it incorrectly to the receiving side. This is rather undesirable phenomenon. Distortion of image signals is often caused by the outstanding characteristics of communication lines and can be improved with a suitable correct. Obstacles that will be involved, is not known in advance, so it is not possible to eliminate it completely. Barriers are different as with their origins as physical features.

In order to be artificial systems in harmony circumstance in relation to the natural world, we profit of united direction of modern science, synergetic. Synergetic - it is a science of self-organization in nonlinear dissipation systems. It studies regularities of complex processes of existing development in physical, chemical and biological systems.

Synergetic - this integral science, researches self-organization processes and includes live nature, technical and economic. It gives us an opportunity to create a new metaena between humanitarians and engineers; to understand nature and technique in whole by means of entire synergetic conception.

To move on to the synergetic conception, it certainly requires new scientific studies. The work concerns such research, where represented principally a new synergetic approach for nonlinear dynamic chaotic systems. We are using

information dynamic processing of information and method of protection. After that we transfer synergetic system features into the designed system.

The problem of synthesis of optimal nonlinear systems showed, that management theory is a captive for reduction methods, when it tries to build its global behavior by the system of local descriptions 'cohesion'. Nevertheless, these methods are sometimes successful (for example, in linear cases).

For optimal managing of nonlinear systems it is advisable to use not only mathematical constructions, but also physical regularities, management theory and using of synergetic theory, as well. Which gives us a chance to approach newly to the procedure of synthesis.

According to the new integral science, in the open systems, which change the energy, substance or information with an environment, creates the processes of self-organizations. So, the processes are born from physical (biological, economical, social) chaos. Resulting, they bring new steady, neat structure; system has already got a new feature.

Researching Purpose:

It is decided a management task in our report, which provides chaotic vibrations suppression in Lawrence chaotic system.

Such kinds of tasks will be appeared in the case, when it is necessary to exterminate undesirable vibration and others into the constructions.

For instance: during signal transferring with a connection channel in the TV communication system, it can be added unwanted noise and substitute information.

According to the goal, it is determined the following main **tasks**:

1. Research of basic nonlinear mathematical models research of regular and chaotic dynamic systems.
2. Searching of methods of chaotic generators construction and learning of nonlinear model of Lorenz chaotic generator.
3. Research of reconstruction methods of dynamic systems.
4. Developing of 'Managing Parameter' of measurement method acting on the nature of chaotic oscillations.
5. Current 'Managing Parameter' dynamic observer's synthesis for purpose of further regeneration of the current attractor structure and closed information.
6. 'Managing Parameter' synthesis of generators into the chaotic dynamic systems.

Conclusion: Thus, there was done a new method of protection and dynamic processing of information based on the method of global reconstruction of system dynamic by using of synergetic observe, which exactly evaluates manager parameter and accordingly does informational signal reconstruction. This gives us an opportunity to use information with wrong way in the tasks of transferring/restoring of information into the connection channels of given method.

There was also developed method of synergetic synthesis of generators 'Managing Parameter', which is based on using the aggregated regulators analytical construct method and makes possible to occur the formation of a desirable attractors in Lorenz model structure.

Both methods are used to process of information and create self-organizing system of the new class protection.

შინაარსი

შესავალი	15
თავი 1. რეგულარული და ქაოსური დინამიკის მქონე არაწრფივი რხევითი სისტემები.	23
1.1. რეგულარული დინამიკის მქონე რხევითი სისტემების ბაზური მოდელები	23
1.1.1. ვან დერ პოლის ოსცილატორი	23
1.1.2. რელეს გენერატორი	27
1.1.3. პუანკარეს მოდელი	29
1.1.4 ბრიუსელატორის მოდელი.	32
1.2. ქაოსური დინამიკის მქონე რხევითი სისტემების ბაზური მოდელები	35
1.2.1. ლორენცის მოდელი	36
1.2.2. რესლერის მოდელი	38
1.2.3. მოდიფიცირებული გენერატორის მოდელი	40
1.2.4. ჩუას გენერატორი	43
1.3. პირველი თავის დასკვნები.	47
თავი 2. ქაოსურ გენერატორებში წესრიგის პარამეტრზე დაკვირვება. გენარატორების სინერგეტიკული სინთეზი	48
2.1. ქაოსის გამოყენება მონაცემთა ფარული გადაცემისათვის.	48
2.2. ლორენცის ქაოსური სისტემის მოძრაობის რეჟიმები	56
2.2.1. ლორენცის ატრაქტორის მიერ ინფორმაციის დამუშავების სიჩქარე.	64
2.2.2. ლორენცის ატრაქტორის ინფორმაციული განზომილება.	66
2.3. დინამიკური სისტემის გლობალური რეკონსტრუქცია.	70
2.3.1. გადაცემული ინფორმაციის რეკონსტრუქციისადმი ზოგადი მიდგომა	73
2.3.2. სინერგეტიკული დამკვირვებლის აგება.	75
2.3.3. მოდელირების შედეგები.	80
2.4. დეტერმინირებული ქაოსის მართვა.	84
2.4.1. ქაოსური სისტემების მართვის ამოცანები.	84
2.4.2. ქაოსური სისტემების მართვის მეთოდები.	90
2.4.2.1. პროგრამული მართვის მეთოდები	90

2.4.2.2. ჩაკეტილი მართვის მეთოდები	91
2.5. „მმართველი პარამეტრის“ სინთეზის მეთოდი ქაოსურ სისტემებში.....	96
2.6. მეორე თავის დასკვნები.....	104
თავი 3 მოდელირება და პროგრამული კოდი	105
3.1. პროგრამის დანიშნულება და სტრუქტურა.....	105
3.2. პროგრამული მოდელის ფუნქციონალური ბლოკების აღწერა Simulink გარემოში	108
3.3.3. მესამე თავის დასკვნები	113
დასკვნა	114
გამოყენებული ლიტერატურა	116
დანართი I.....	120
დანართი II.....	125

ნახაზების ნუსხა

ნახ.1.1. ვან დერ პოლის გენერატორის სქემა	24
ნახ. 1.2. ვან დერ პოლის სისტემის ცვლადების ცვლილება დროის მიხედვით ა) $x(t)$, ბ) $\dot{x}(t)$ როცა $\mu = 0,2$	25
ნახ. 1.3. ვან დერ პოლის გენერატორის ფაზური პორტრეტი როცა $\mu = 0,2$	26
ნახ. 1.4. ვან დერ პოლის სისტემის ცვლადების ცვლილება დროის მიხედვით ა) $x(t)$,ბ) $\dot{x}(t)$ როცა $\mu = 4$	26
ნახ. 1.5. ვან დერ პოლის სისტემის ფაზური პორტრეტი როცა $\mu = 4$..	27
ნახ. 1.6 რელეს გენერატორის ცვლადების ცვლილება დროში შემდეგი მნიშვნელობებისას: ა) $x(t)$, ბ) $\dot{x}(t)$ როცა $\varepsilon = 0,3$	28
ნახ. 1.7 რელეს სისტემის ფაზური პორტრეტი როდესაც $\varepsilon = 0,3$	28
1.8 რელეს გენერატორის ცვლადების ცვლილება დროში ა) $x(t)$, ბ) $\dot{x}(t)$ როცა $\varepsilon = 9$	29
ნახ. 1.9 რელაქსაციური გენერატორის ფაზური პორტრეტი როცა $\varepsilon = 9$	29
1.10 პუნკარეს სისტემის ცვლადების ცვლილება დროში ა) $x(t)$, ბ) $\dot{x}(t)$ როცა $\lambda = 9, p = 1$	32
1.11 პუნკარეს სისტემის ფაზური პორტრეტი როცა $\lambda = 9, p = 1$	32
1.12 ბრიუსელატორის ცვლადების ცვლილება დროში ა) $x(t)$, ბ) $\dot{x}(t)$ როცა $a = 1, b = 3$	34
1.13 ბრიუსელატორის ფაზური პორტრეტი როცა $a = 1, b = 3$	34
ნახ. 1.14 ლორენცის ქაოსური ატრაქტორი ..	37
ნახ. 1.15 რესლერის უცნაური ატრაქტორი	38
ნახ. 1.16 - ინერციული არაწრფივი მოდიფიცირებული გენერატორის სქემა ..	41
ნახ. 1.17 ანიშენკო-ასტრახოვას სისტემის ქაოსური ატრაქტორი	41
ნახ. 1.18 მოდიფიცირებული გენერატორის სისტემის ცვლადების ცვლილება დროში	42
ნახ. 1.19 ჩუას გენერატორის სქემა	44
ნახ. 1. 20 ქაოსური ატრაქტორი ჩუას სისტემაში	44
ნახ. 1.21 ჩუას სისტემის ორგანზომილებიანი პროექცია ა)XY, ბ)XZ, ვ)ZY	45

ნახ. 1.22 ჩუას სისტემის ცვლადების ცვლილება დროში	45
ნახ. 2.1. ინფორმაციის ქაოსური ფორმით გადაცემის სისტემა	49
ნახ. 2.2 ინფორმაციის გადაცემის სისტემა ქაოსური რეჟიმების გადართვით	51
ნახ. 2.3. არაწრფივი დაშიფვრის ინფორმაციის გადაცემის სისტემა ..	52
ნახ.2.4. გადაცემის სისტემა პუნკარეს კვეთის წინსწრების მართვით ..	54
ნახ.2.5. ა) ფაზური ავტოგაწყობის (ფაგ) გამოყენება ინფორმაციის გადაცემისათვის ქაოსის გამოყენებით ბ) ანალოგური ინფორმაციის გადაცემის სქემა	55
ნახ. 2.6 ლორენცის სისტემის უცნაური ატრაქტორი როდესაც: $r = 10, \sigma = 10, b = 8/3$	58
ნახ. 2.7 ლორენცის სისტემის უცნაური ატრაქტორი როდესაც: $r = 16, \sigma = 10, b = 8/3$	58
ნახ. 2.8 ლორენცის ატრაქტორის ერთ-განზომილებიანი ასახვა YZ სიბრტყეზე [36]	59
ნახ. 2.9 ბიფურკაციული მოდელი	60
ნახ. 2.10 ლორენცის ატრაქტორის ერთ-განზომილებიანი ასახვა YZ სიბრტყეზე [37]	61
ნახ. 2.11 ინტერვენტურობის მონაცვლეობა და რეჟიმის წარმოქმნის პირობები	62
ნახ. 2.12 იტერაციული პროცესის ილუსტრაცია "არხში" ბისექტრისასა და მრუდის ასახვას შორის	63
ნახ. 2.13 ლორენცის მოდელში ატრაქტორების მიმდევრობა შემდეგი მნიშვნელობებისას: $\sigma = 10, b = 8/3$	63
ნახ. 2.14 ინფორმაციის სიგნალი გადამცემზე	80
ნახ. 2.15 მიმღებზე $X(t)$ და $Y(t)$ ცვლადების ცვლილებათა გრაფიკი ..	81
ნახ. 2.16 მიმღების გამოსასვლელზე $Z(t)$ ცვლადის ცვლილებათა გრაფიკი	81
ნახ. 2.17 (2.17) სისტემის ფაზური პორტრეტი	81
ნახ. 2.18 – მიმღებზე $X(t)$ და $Y(t)$ ცვლადების ცვლილებათა გრაფიკი ..	82
ნახ. 2.19- მიმღებზე $\hat{r}(t)$ პარამეტრის შეფასების ცვლილების გრაფიკი .	82
ნახ. 2.20 - მიმღების გამოსასვლელზე რეკონსტრუქციული საინფორმაციო სიგნალი	83
ნახ.2.21 $x(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი	100

ნახ.2.22 $\dot{x}(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი	100
ნახ.2.23 $z(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი	100
ნახ.2.24- $r(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი	100
ნახ. 2.25 $\psi(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი	101
ნახ.2.26 $x(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი	101
ნახ.2.27- $\dot{x}(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი	101
ნახ.2.28 $z(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი	102
ნახ.2.29 $r(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი	102
ნახ. 2.30 $\psi(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი	102
ნახ.2.31 $x(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი	102
ნახ.2.32 $\dot{x}(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი	102
ნახ.2.33 $z(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი	103
ნახ.2.34 $r(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი	103
ნახ. 2.35 $\psi(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი	103
ნახ. 3.1. პროგრამის მუშაობის ფუნქციონალური სქემა	106
ნახ. 3.2. ინფორმაციის გადაცემის და რეკონსტრუქციის სისტემის ბლოკ-სქემა	106
ნახ. 3.3. მმართველ პარამეტრზე სინერგეტიკული დამკვირვებლის ბლოკ-სქემა .	107
ნახ. 3.4. მოდელის საერთო სახე	109
ნახ. 3.5. საინფორმაციო სიგნალის ფორმირების ბლოკის სტრუქტურა .	109
ნახ. 3.6 გადამცემის მოდელის ბლოკ-სქემა	110
ნახ. 3.7. კავშირის არხის მოდულის სტრუქტურა	110
ნახ. 3.8 მიმღების მოდულის ფანჯარა.	111

შესავალი

თემის აქტუალურობა. ბუნებრივი სისტემები ტექნიკურისგან განსხვავებით, ფლობენ მთელ რიგ თვისებებს, რომლებიც თანამედროვე მართვის თეორიის თვალსაზრისით საკმაოდ უჩვეულოა. მაგალითად, ბუნებრივი სისტემებისათვის არ არის ცნობილი "განზომილება", რომელსაც არაწრფივი ტექნიკური სისტემები მიჰყავს სხვადასხვა სირთულეებთან: ასიმპტოტური მდგრადობა, სასურველი თვისებების უზრუნველყოფა, ასევე რეგულატორების სინთეზი და პრაქტიკული რეალიზება. ასევე, ბუნებრივ სისტემებში ფუნქციონირების ხარისხი შეიძლება კიდევ უფრო გაიზარდოს მისი ქვესისტემების გაფართოვებით (მაგალითად, მისი პარამეტრების ვარიაცია) და უფრო მეტიც, ეს მრავალფეროვნება, როგორც წესი, ასრულებს სტაბილიზაციის როლს. ამავე დროს, ცნობილია, რომ ტექნიკურ სისტემებში ამ პროცესს, როგორც წესი, მივყავართ ხარისხის გაუარესებისაკენ.

ზემოთ აღნიშნული ბუნებრივი სისტემების შესანიშნავი თვისებების გამო, თანამედროვე მართვის თეორიის განვითარებისათვის სასარგებლოა და პერსპექტიული, რომ მოხდეს ამ ბუნებრივი თვისებების გადმოტანა ტექნიკურ სისტემებზე, უპირველესად არაწრფივ ობიექტებზე. ასეთი გაერთიანებული მიმართულება არის თანამედროვე მეცნიერება - სინერგეტიკა. სინერგეტიკა წარმოდგება ბერძნული სიტყვიდან: $\sigma\nu$ -თან, ერთად. $\xi\lambda\gamma\omicron\nu$ - მოქმედება მოღვაწეობა და ნიშნავს: ერთად მოქმედებას, თანამშრომლობას, კოოპერაციას.

სინერგეტიკის წარმოშობის თარიღად ითვლება 1973 წელი, როდესაც ჩატარდა პირველი კონფერენცია თვითორგანიზაციის პრობლემებთან დაკავშირებით; სადაც შტუტგარტის უნივერსიტეტის პროფესორი ჰერმან ჰაკენი გამოვიდა მოხსენებით ახალი მეცნიერების - სინერგეტიკის შესახებ, (რომელიც სწავლობს სხვადასხვა სისტემებში თვითორგანიზაციის პროცესებს).

ჰერმან ჰაკენის განმარტებით - „სინერგეტიკა ეს არის ზოგადი დისციპლინარული მეცნიერება, კოლექტიურ, სტატისტიკურ და დინამიკურ მოვლენათა შესახებ, ღია და დახურულ მრავალკომპონენტურ სისტემებში, სისტემის ელემენტებს შორის კოოპერატიული ურთიერთქმედებით“. [1]

ჰერმან ჰაკენის ძირითადი დებულებები გამოქვეყნებულ იქნა 1975 წელს ჟურნალში: “Review of Modern Physics”, სტატიის სახით [3]; სადაც ჰაკენმა აღნიშნა, რომ თვითორგანიზაციის პროცესები ხდება სხვადასხვა ბუნების სისტემებში: ლაზერებში, ატმოსფერულ გრიგალში, გარეული ცხოველების ჯგუფებში, ქიმიურ რეაქციებში რ თული მოლეკულების წარმოქმნისას, გალაქტიკაში და ზოგიერთ სოციალურ მოვლენაში. ამასთან, გადასვლის პროცესში ნაკლებად მოწესრიგებულიდან უფრო მოწესრიგებულში, ყველა ამ სისტემაში ადგილი აქვს კოლექტიურ, შეთანხმებულ პროცესებს. ისინი ყველანი იქცევიან ერთმანეთის მსგავსად და ექვემდებარებიან საერთო მათემატიკურ კანონზომიერებებს.

1978 წელს გამოცემულ სინერგეტიკის წიგნის შესავალში ჰერმან ჰაკენი წერს: “სინერგეტიკა ვუწოდებ არა მარტო იმისათვის, რომ მასში შეისწავლება დიდი რაოდენობის სისტემათა ერთობლივი მოქმედება, არამედ იმიტომაც, რომ თვითორგანიზების ზოგადი პრინციპების დასადგენად საჭიროა განსხვავებული დისციპლინების კოოპერირება” [5].

სინერგეტიკა ახალგაზრდა და სწრაფად განვითარებადი მეცნიერებაა, რის გამოც მეცნიერები ჯერ ვერ შეთანხმდნენ მის ერთ განმარტებაზე.

სამეცნიერო ლიტერატურაში სინერგეტიკას სხვადასხვა სახელითაც მოიხსენიებენ, ესენია: “რთული სისტემების ევოლუცია”, “სირთულის თეორია”, “არაწრფივი დინამიკა”, “დისიპაციური სისტემების თვითორგანიზების თეორია”, “ევოლუციური პროცესების ფიზიკა” და ა.შ.

სინერგეტიკამ მიიპყრო მეცნიერთა ფართო წრის ყურადღება, რადგანაც ის შეეხო საბუნებისმეტყველო და ჰუმანიტარული მეცნიერებებისათვის აქტუალურ პრობლემებს. შეიძლება ითქვას, რომ

სინერგეტიკის ჩარჩოებში გაკეთებულია ფუნდამენტალური აღმოჩენა: სამყაროს მთლიან მატერიას, დაწყებული ფიზიკური დონიდან – დამთავრებული ბიოლოგიური და სოციალური დონით, გააჩნია თვითორგანიზაციის, თვითგანვითარების თვისება. ამასთან ერთად, სხვადასხვა ბუნების სისტემებში თვითორგანიზაციის ალგორითმებს, ბევრი რამ აქვთ ერთმანეთთან საერთო.

ზემოთ ხსენებულმა გარემოებამ მეცნიერებს საშუალება მისცა იმისათვის, რომ შემუშავებულიყო სამყაროს ახალი, ევოლუციური სურათი. დაიწყო საუბარი ახალ სამეცნიერო რევოლუციაზე; მთელი რიგი ცნებები, ისეთი როგორცაა ბიფურკაცია, ატრაქტორი, არაწრფივობა, დისიპაციური სტრუქტურები, უკუკავშირი და სხვა, რომლებიც ადრე ცნობილი იყო მხოლოდ სპეციალისტთა ვიწრო წრისათვის, გახდა სხვადასხვა მეცნიერებებისათვის ცნობილი.

დღესდღეობით საკმაოდ აქტუალურია ქაოსური დინამიკის მქონე არაწრფივი სისტემების მართვის პრობლემა. კერძოდ, ქაოსის წინააღმდეგ ბრძოლა, რომელიც ხშირად არღვევს დინამიკური სისტემების ფუნქციონირების ხარისხს.

სამეცნიერო კვლევებში ტერმინი "ქაოსი" გამოყენებულია ისეთი სისტემების აღსაწერად, რომლებიც ერთი შეხედვით არიან სრულიად შემთხვევითი დინამიკის, მაგრამ ამავე დროს მათ გააჩნიათ დაფარული წესრიგი.

ქაოსური დინამიკის მართვის აქტუალური სამეცნიერო პრობლემა ჯერ არ არის მოგვარებული. მისი გადაჭრის არსებული ასპექტების უამრავი რაოდენობიდან შესაძლოა გამოვყოთ ზოგიერთი მეთოდი და კანონი, რომლებიც ამცირებენ არარეგულარულ რხევებს არაწრფივ სისტემებში და უზრუნველყოფენ თავდაპირველი ქაოსური მოდელის სტაბილიზაციას, ანუ მის გადაყვანას მდგრად მდგომარეობაში.

ტელე-კომუნიკაციის სფეროში ერთ-ერთ მნიშვნელოვან პრობლემას წარმოადგენს ინფორმაციის გადაცემისა და ზუსტად აღდგენის სისტემების საიმედო, მდგრადი მუშაობა.

კავშირის არხით სიგნალის გადაცემისას შესაძლოა ის დამახინჯდეს და შემდეგ მიმღებ მხარეზე მოხდეს მისი შეცდომით აღდგენა. რაც საკმაოდ არასასურველი მოვლენაა. შეფერხებაა მუშაობაში, როდესაც შორ მანძილზე მყოფი აბონენტები ცვლიან ინფორმაციას და ამ დროს ხდება ხმის წყვეტა, გამოსახულების დაკარგვა. გამოსახულების სიგნალების დამახინჯება ხშირად გამოწვეულია საკომუნიკაციო ხაზის ცნობილი მახსიათებლებით და შესაძლოა მათი გამოსწორება შესაბამისი კორექტირებით. დაბრკოლებები, რომლებიც ჩაერევიან, წინასწარ არ არის ცნობილი, ამიტომ არ შეიძლება მათი სრულიად აღმოფხვრა. დაბრკოლებები მრავალფეროვანია, როგორც მათი წარმოშობის, ასევე ფიზიკური თვისებებით. შეგვიძლია მოვიყვანოთ დაბრკოლებათა კლასიფიკაცია: ატმოსფერული ჩარევა (ელვა, ჭექა-ქუხილი), სამრეწველო ჩრევა (ელექტრო გადამცემი ხაზების ელექტრულ წრდებში ძაბვის მოულოდნელი ცვლილება), კოსმოსური ჩარევა (წარმოიქმნება კოსმოსში არსებული წყაროებიდან რადიო გამოსხივებით), ელექტრული ჩარევა (როდესაც ქარის სიჩქარე 5.5მ-ზე მეტია), გარე საკომუნიკაციო არხებიდან (რადიოსადგურების მუშაობის გამო ხდება ეს სტაციონალური დაბრკოლება) და შინაგანი ხმაური.

ნებისმიერი რეალური კავშირგაბმულობის არხის ზუსტი მათემატიკური აღწერა, როგორც წესი, საკმაოდ რთულია. ამის ნაცვლად, იყენებენ გამარტივებულ მათემატიკურ მოდელებს, რაც რეალური არხის მნიშვნელოვანი კანონზომიერების იდენტიფიცირების საშუალებას იძლევა. ჩვენ შევისწავლეთ რეგულარული და არარეგულარული ქაოსის მქონე ბაზური მოდელები და ჩვენი არჩევანი შევაჩერეთ ლორენცის ქაოსურ მოდელზე (ინფორმაციის გენერატორი, ატრაქტორი ასეც უწოდებენ) და გამოვიყენეთ ახალი მეცნიერული მიმართულება - სინერგეტიკა.

ჩვენ შევცდებით სინერგეტიკული სისტემის თვისებები გადავიტანოთ კონსტრუირებულ სისტემაზე. ასეთი სინთეზი არის თანამედროვე მართვის მეცნიერებაში პრობლემა, რადგანაც არ ხდება ახალი დისიპაციური

სტრუქტურების მოძებნა, არამედ - არსებული ძველი სტრუქტურების „თავს მოხვევა“ სხვადასხვა ამოცანების ამოხსნისათვის.

ბოლო წლებში მეცნიერთა ნაშრომებში ნაჩვენებია, რომ სისტემებს ახასიათებთ ზოგიერთი მიმზიდველი ზედაპირის არსებობა - ინვარიანტული მრავალსახეობანი. ასეთმა რეჟიმებმა მიიღეს სახელწოდება - ატრაქტორი. ისინი „იზიდავენ“ მეზობელ რეჟიმებს. ატრაქტორი - ეს არის მიმზიდველი სიმრავლე მდგომარეობათა სივრცეში, ანუ ასიმპტოტურად მდრადი სიმრავლე. ხოლო იმ ატრაქტორებს, რომელთაც გააჩნიათ არამდგრადი მდგომარეობა და პერიოდული რხევები, უწოდეს „უცნაური ატრაქტორები“. ასეთი ტიპის ატრაქტორებში ტრაექტორიები დახეტილობენ, არარეგულარულად მოძრაობენ და ძალიან მგრძნობიარენი არიან საწყისი პირობების ცვლილებებისადმი.

მეცნიერთა ბოლო ნაშრომებში, სადაც იკვლევდნენ არაწრფივი დინამიკური სისტემების ატრაქტორებს, აღნიშნულია, რომ ბუნებრივი სიტემებისათვის დამახასიათებელია მოძრაობის რეჟიმი ზოგიერთი მრავალსახეობის მიხედვით მდგომარეობათა სივრცეში.

სინერგეტიკული მიდგომის მიხედვით ინფორმაცია წარმოიქმნება, როგორც სისტემაში სიმეტრიის რღვევისას გამოწვეული ბიფურკაციების კასკადით, ასევე მისი ქაოსური დისიპაციური დინამიკის შედეგად.

ამრიგად, არაწრფივი დინამიკის მეთოდები ინფორმაციის გადამუშავების პრინციპულად ახალი მეთოდების შექმნის შესაძლებლობას იძლევიან.

ნაშრომის მიზნები და კვლევის ძირითადი ამოცანები. ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს დინამიკური სისტემებისათვის სინერგეტიკული სინთეზის მეთოდის გამოყენება; ლორენცის სისტემაში ქაოსური რხევების ჩახშობა და სასურველი ატრაქტორების ჩამოყალიბება; შემდგომ კი სინერგეტიკული სისტემის თვისებების გადატანა კონსტრუირებულ სისტემაზე, კერძოდ კავშირის არხით კავშირგაბმულობაში ინფორმაციის გადამცემ სისტემაზე.

კვლევის მეთოდები. დისერტაციაში დასახული ამოცანების მიღწევისათვის გამოყენებული იქნა თანამედროვე არაწრფივი დინამიკისა და სინერგეტიკის მეთოდები, მართვის სინერგეტიკული თეორიის მეთოდები და დიფერენციალური განტოლებების თეორიები. ასევე, დინამიკური სისტემების მათემატიკური მოდელირების მეთოდები. სინთეზისა და მოდელირებისათვის გამოყენებული იქნა MatLab მათემატიკური პაკეტი.

ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა. დისერტაცია შედგება შესავალისაგან, სამი თავისაგან, დასკვნისაგან, გამოყენებული ლიტერატურის ჩამონათვალისა და დანართებისაგან.

პირველ თავში წარმოდგენილია რეგულარული და ქაოსური დინამიკის მქონე რხევითი სისტემის ბაზური არაწრფივი დინამიკური მოდელების დამახასიათებელი თვისებების განხილვა და ანალიზი, რომლებიც გვევლინებიან ინფორმაციების გენერატორების როლში.

ასევე განხილულია რეგულარული ოსცილატორების სისტემების გავრცელებული მოდელები: ვან დერ პოლის ოსცილატორის მოდელი, რელეს გენერატორის მოდელი, პუნკარესა და ბრიუსელატორის მოდელები, რომლებსაც ცვლადების მერყევი ბუნება ახასიათებთ დროსა და სივრცეში. ასეთ ატრაქტორებს „ზღვრული ციკლის“ ტიპის ატრაქტორებს უწოდებენ.

ნაშრომში ასევე განხილულია და გამოკვლეულია ქაოსური დინამიკის მქონე არაწრფივი რხევითი სისტემების ბაზური მათემატიკური მოდელები, როგორცაა ლორენცის, რესლერის მოდელი და ჩუას გენერატორები.

მეორე თავში გამოკვლეული იქნა მონაცემთა ფარული გადაცემის მიზნით ინფორმაციის დამუშავების სხვადასხვა მეთოდი, რომელიც ქაოსური სისტემების გამოყენებას ეფუძნება. ასევე გამოკვლეულია დინამიკური სისტემების გლობალური რეკონსტრუქციის მეთოდი, როგორც ინფორმაციის დამუშავებისა და ფარული გადაცემის მეთოდი. განხილულია ინფორმაციული სიგნალების რეკონსტრუქციისადმი ზოგადი მიდგომის მეთოდი პარამეტრებით მოდელირებადი ქაოსური გენერატორების გამოყენებით. არაკ-ის (აგრეგირებული რეგულატორების ანალიზური

კონსტრუირება) მეთოდის საფუძველზე შემუშავდა არაწრფივი დინამიკური დამკვირვებლის სინთეზის მეთოდი „მმართველი პარამეტრის“ მიმდინარე იდენტიფიკაციისათვის ატრაქტორის სტრუქტურის აღდგენისა და ინფორმაციის შემდგომი ზუსტი სახით აღდგენის მიზნით. მოყვანილია ასევე კომპიუტერული მოდელირების შედეგები რომლებიც მიღებული იქნა ინფორმაციის რეკონსტრუქციის სისტემით სინერგეტიკული დამკვირვებლის ბაზაზე.

ამავე თავში ასევე წარმოდგენილია ქაოსური დინამიკის მქონე სისტემაში „მმართველი პარამეტრების“ გენერატორების სინთეზის მეთოდი, რომელიც ემყარება არაკ-ის მეთოდს, რაც ლორენცის ტიპის მოდელის სტრუქტურაში სასურველი ატრაქტორების ფორმირების საშუალებას იძლევა.

მესამე თავში აღწერილია პროგრამულ-მოდელირებადი კომპლექსი, რომლის დახმარებითაც შესაძლებელია გამოკვლევულ იქნას ქაოსური დინამიკის მქონე სისტემის ქცევა მმართველი პარამეტრების სხვადასხვა მნიშვნელობების შემთხვევაში. მოცემული მოდელის დახმარებით შესაძლებელია ინფორმაციის დამუშავების პროცესის მოდელირება გადამცემზე და მიმღებ მხარეზე სიგნალის რეკონსტრუქციის.

არაკ-ის მეთოდის გამოყენებით აგებული კომპლექსი „მმართველი პარამეტრის“ გენერატორის მოდელირების შესაძლებლობას იძლევა, რომელიც გამოიყენება კომპლექსური სისტემების ფუნქციონირების დროს წარმოქმნილი ქაოსური რეჟიმების სამართავად.

სადისერტაციო ნაშრომის დასკვნა შეიცავს სამეცნიერო და გამოყენებითი შედეგების ჩამონათვალს. ეს შედეგები მიღებულ იქნა ქაოსური დინამიკის მქონე არაწრფივი დინამიკის ობიექტების მართვის სინერგეტიკული მეთოდების შემუშავების პროცესში და ინფორმაციის ზუსტი სახით აღდგენისათვის დამკვირვებლის სინერგეტიკული სინთეზის პროცესში.

მეცნიერული სიახლე და ნაშრომის პრაქტიკული მნიშვნელობა.

ნაშრომის მეცნიერული სიახლით მიღებული ძირითადი შედეგები:

1. დინამიკური ქაოსის არაწრფივი სისტემების რეკონსტრუქციის სინერგეტიკული მეთოდი, რომელიც ეფუძნება მმართველი პარამეტრების მიმდინარე იდენტიფიკაციის პროცესს.

2. ინფორმაციის დამუშავებისა და ფარული გადაცემის მეთოდი, რაც ეყრდნობა ლორენცის ტიპის ქაოსური ატრაქტორის ფორმირებას ფაზურ სივრცეში თავისუფლების ხარისხის რიცხვის შემცირების გზით, ანუ სისტემაში წარმოიქმნება თვითორგანიზების პროცესი.

3. ლორენცის ტიპის ქაოსური დინამიკის მქონე სისტემებში „მმართველი პარამეტრების“ გენერატორების სინთეზის მეთოდი, რომელიც ქაოსური დინამიკის მქონე სისტემებში მოძრაობის რეგულარული ფორმირების საშუალებას იძლევა, რომელიც აუცილებელია ინფორმაციის მართვისა და დამუშავების რიგი ტექნოლოგიური ამოცანების გადაწყვეტისათვის.

დისერტაციაში შემუშავებული ინფორმაციის დინამიკური დამუშავებისა და აღდგენის მეთოდი ეფუძნება სინერგეტიკული დამკვირვებლის გამოყენებით სისტემის დინამიკის გლობალური რეკონსტრუქციის მეთოდს. მისი საშუალებით შესაძლებელია ინფორმაციის დამუშავებისა და დაცვის ახალი კლასის თვითორგანიზებადი სისტემის შექმნა.

თავი 1. რეგულარული და ქაოსური დინამიკის მქონე არაწრფივი რხევითი სისტემები

1.1. რეგულარული დინამიკის მქონე რხევითი სისტემების ბაზური მოდელები

რეგულარული ქაოსური დინამიკის მქონე ქაოსურ სისტემებს წარმოადგენენ ისეთი დინამიკური სისტემები, რომლებსაც დროში ცვლადების შეცვლის რხევითი ბუნება აქვთ, სივრცეში კი მიზიდვის მრავალფეროვნება - „ზღვრული ციკლის“ ტიპის ატრაქტორები. ასეთ სისტემებს ოსცილატორებსაც უწოდებენ.

დღეისათვის დინამიკური სისტემების სხვადასხვა მოდელის დიდი რაოდენობაა გამოკვლეული, რომლებიც პერიოდული დინამიკით ხასიათდებიან. ევოლუციის ოპერატორის არაწრფივობისა და მისი გარეგანი სპეციფიკის გამო ასეთი დინამიკური სისტემების დამახასიათებელ ნიშან-თვისებას წარმოადგენს სივრცეში მდგომარეობის ზღვრული ციკლის არსებობა. სისტემის პარამეტრები უშუალოდ მოქმედებენ ევოლუციის ოპერატორზე, იმ შემთხვევაში, თუ სისტემაში არსებული ნებისმიერი პარამეტრის მნიშვნელობა ხელს უწყობს დინამიკური სისტემის ფაზურ სივრცეში ზღვრული ციკლის წარმოქმნას ან მის დაკარგვას, შესაძლებელია გაკეთდეს დასკვნა, რომ სისტემაში მოხდა ციკლის წარმოქმნის (დაკარგვის) ბიფურკაცია ან ანდრონოვ-ჰოპფის ბიფურკაცია.

განვიხილოთ შედარებით გავრცელებული, რეგულარული დინამიკის მქონე არაწრფივი სისტემების მოდელები.

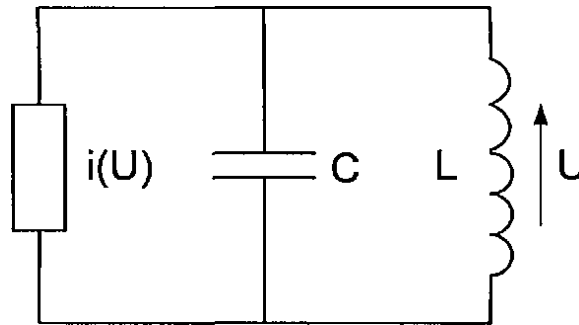
1.1.1. ვან დერ პოლის ოსცილატორი

ვან დერ პოლის ოსცილატორი წარმოადგენს რხევითი არაწრფივი სისტემის შესწავლილ მოდელს, რომელიც აღწერს ავტორხევითი პროცესების მსვლელობას.

ვან დერ პოლის განტოლებას აქვს შემდეგი სახე:

$$x(t) - (\ddot{\mu} - x^2)\dot{x}(t) + x = 0 \quad (1.1)$$

ფიზიკაში ბევრი ამოცანა გადაიჭრება ამ საერთო განტოლების ამონახსნების გამოყენებით [5]. ქვემოთ ნახ.1.1-ზე მოყვანილია ვან დერ პოლის სქემა:



ნახ.1.1. ვან დერ პოლის გენერატორის სქემა

კონტურში წარმოქმნილი რხევები მართავენ L ძაბვას. ჰარმონიული რხევების ამპლიტუდის შემცირება და ენერგიის რაოდენობის დაკარგვა არაწრფივ რხევით C კონტურში გამოწვეულია კონტურში არსებული წინააღმდეგობით. რხევების ამპლიტუდის გაზრდა კონტურში დენის გაზრდას იწვევს, მაგრამ კონტურში შესული ენერგიისა და კონტურის დანაკარგების ტოლობის შემთხვევაში სისტემაში წყდება ამპლიტუდის ზრდა. წინააღმდეგობას არაწრფივი ბუნება აქვს, რაც ოსცილატორით გათავისუფლებული ენერგიის დისიპაციურ აღდგენას იწვევს.

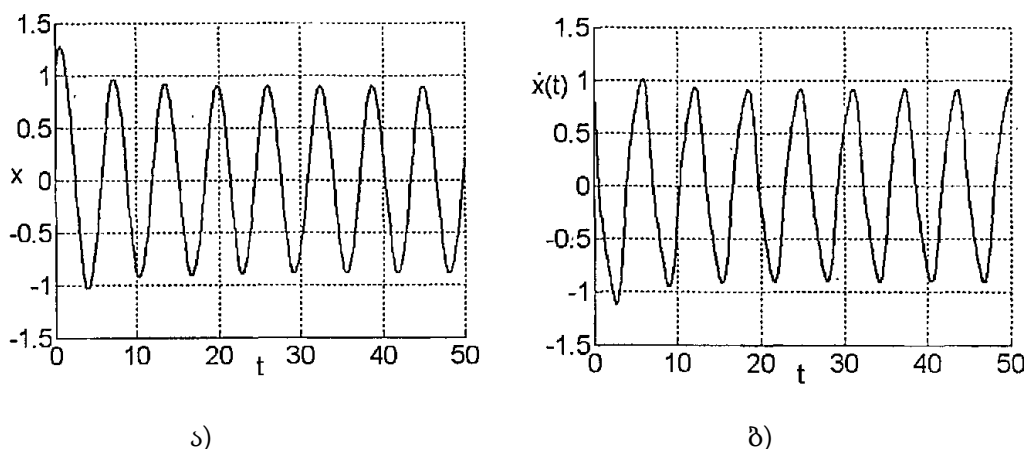
ვან დერ პოლის გენერატორის სქემაში ისეთი აქტიური ელემენტების არსებობა, როგორცაა ნახევარგამტარები, ელექტრონები, ზოგიერთი პლაზმური მოწყობილობები და ა.შ., რომლის დახმარებითაც გადის ელექტრული დენი (L), აძლიერებს რხევებს.

(1.1) ვან დერ პოლ განტოლებას არ აქვს ზუსტი ამონახსნი[6]. თუმცა დადგენილია [7], რომ (1.1) მოდელს კოორდინატა სათავეში გააჩნია ერთი სტაციონარული წერტილი, რომელიც წარმოადგენს მდგრად ფოკუსს ან კვანძს როდესაც $\mu < 0$, ან ცენტრს როცა $\mu = 0$. ხოლო იმ შემთხვევაში, თუ

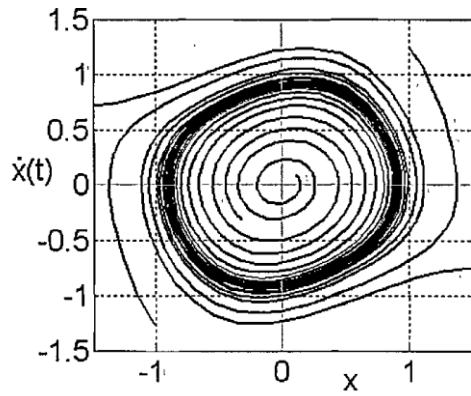
$\mu > 0$ წონასწორობის წერტილი არამდგრადია, სისტემაში იბადება ზღვრული ციკლი.

ზღვრული ციკლი არის ატრაქტორი, დახურული მრუდის სახით, რომელსაც ცენტრი აქვს კოორდინატების დასაწყისში. [8]. (1.1) სისტემაში, როდესაც სრულდება პირობებები: $t \rightarrow \infty, \mu > 0$ ისეთი პერიოდული რხევები არსებობს, რომ აღმოცენდება ზღვრული ციკლი. ამასთან ერთად, საწყის ეტაპზე, ზღვრული ციკლის ამპლიტუდა ნულოვანია. მაგრამ რხევის ამპლიტუდა იცვლება μ მნიშვნელობის გაზრდისას და განისაზღვრება შემდეგი დამოკიდებულებით $a = \sqrt{\mu}$ [7]. საწყისი პირობების მიუხედავად, ვან დერ პოლის მოდელის ნებისმიერი ტრაექტორია ხვდება რა ატრაქტორზე არ კვეთავს მას, გარდა იმ შემთხვევებისა, როდესაც საწყისი პირობა არის სტაციონარული წერტილი.

ასევე μ პარამეტრი განსაზღვრავს პერიოდული რხევების ფორმას. იმ შემთხვევაში, როდესაც μ -ს მნიშვნელობა ნულთან ახლოს არის, ტრაექტორიები მოძრაობენ კოორდინატთა სათავიდან ატრაქტორისაკენ, შემდეგ კი შემოეხვევიან მას; ამ შემთხვევაში, კოორდინატთა სათავის წერტილი არამდგრადი ხდება. ნახ. 1.2-ზე ნაჩვენებია სისტემის შესაბამისი ფაზური პორტრეტი და რხევის კვაზისინუსოიდური ბუნება.



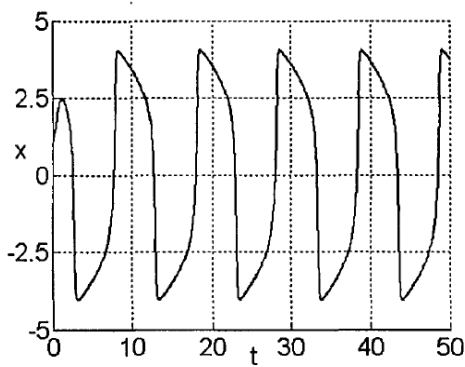
ნახ. 1.2. ვან დერ პოლის სისტემის ცვლადების ცვლილება დროის მიხედვით ა) $x(t)$, ბ) $\dot{x}(t)$ როცა $\mu = 0,2$



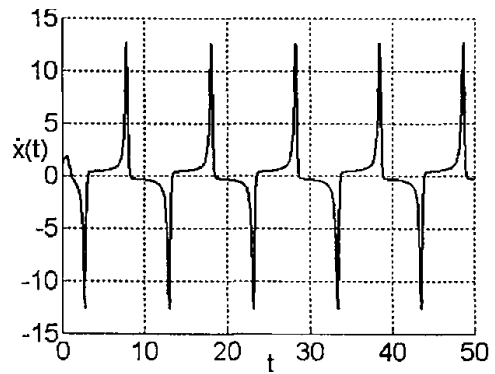
ნახ. 1.3. ვან დერ პოლის გენერატორის ფაზური პორტრეტი როცა $\mu = 0,2$

μ პარამეტრის მნიშვნელობის გაზრდისას იცვლება სტაციონალური წერტილის ტიპი და ფორმას იცვლის ზღვრული ციკლიც: ტრაექტორიები, რომლებიც მივიღეთ საწყისი საცდელი რეჟიმის ამპლიტუდის შემცირების შედეგად. ისინი მოძრაობას იწყებენ ფაზური ღერძების გადაკვეთის წერტილიდან. ფაზურ სივრცეში გამოვლენილ რელაქსაციურ რხევებს აქვთ დამახასიათებელი დაკბილული ან მართკუთხა ფორმა.

(1.1) განტოლების შესაბამისი ამონახსნები მოყვანილია ნახ. 1.4-ზე.

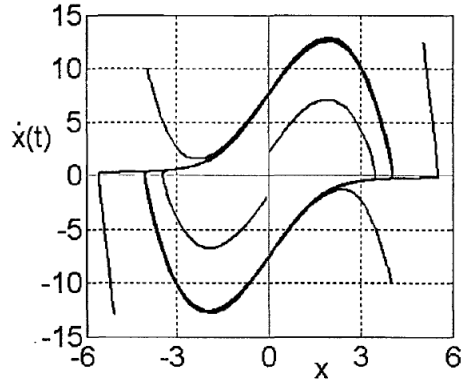


ა)



ბ)

ნახ. 1.4. ვან დერ პოლის სისტემის ცვლადების ცვლილება დროის მიხედვით ა) $x(t)$,
ბ) $\dot{x}(t)$ როცა $\mu = 4$



ნახ. 1.5. ვან დერ პოლის სისტემის ფაზური პორტრეტი როცა $\mu = 4$

1.1.2. რელეს გენერატორი

რელეს განტოლებას აქვს შემდეგი სახე:

$$\ddot{x}(t) - \varepsilon(\dot{x} - ax^2)\dot{x}(t) + \omega^2 x = 0 \quad (1.2)$$

აღნიშნულ მოდელში მმართველი პარამეტრებია ε და a [4].

თუ ვივარაუდებთ, რომ $a = \omega = 1$ და მნიშვნელობა $\varepsilon \gg 1$, მაშინ (1.2) მეორე რიგის მოდელი შეიძლება წარმოდგენილი იყოს ორი პირველი რიგის განტოლებათა სისტემით:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ k\dot{x}_2 &= (1 - x_2^2)x_2 - kx_1 \end{aligned} \quad (1.3)$$

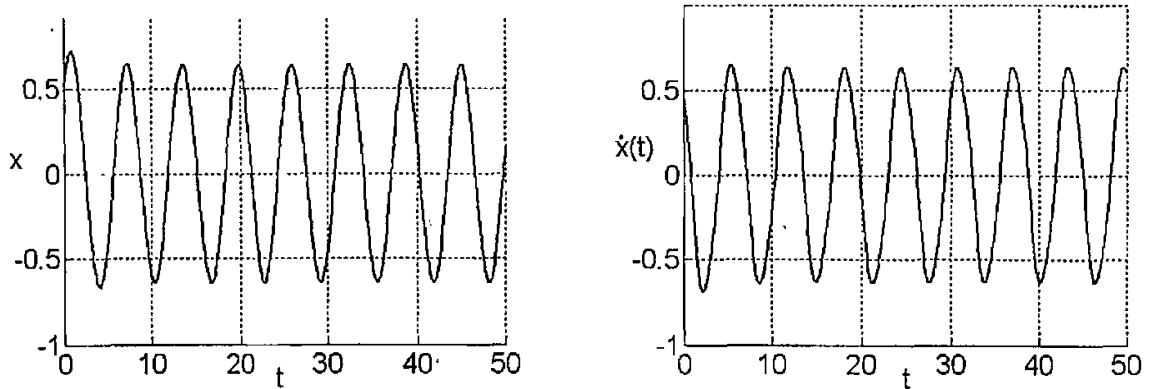
სადაც, $k = 1/\varepsilon$ - გარკვეული მცირე სიდიდეა.

(1.3) სისტემის გამოკვლევა ჩატარებულია [4] ნაშრომში. (1.3) განტოლებაში ჩანს, რომ x_2 ცვლადს გააჩნია სწრაფი დინამიკა, ხოლო x_1 - ს ნელი. აღნიშნული ფაქტი გვაძლევს სისტემის ამოხსნის საშუალებას, თუ ვივარაუდებთ, რომ $x_1 = const$, ამ შემთხვევაში სტაციონალური ამონახსნი გამოითვლება შემდეგი განტოლებიდან:

$$x_2^3 - x_2 + kx_1 = 0 \quad (1.4)$$

გრაფიკის ფაზური სივრცის აგების შემდგომ $x_1 = -\frac{x_2}{k}(1 - x_2^2)$, ამ გრაფის ყველა წერტილი იქნება (1.4) განტოლების ამონახსენი.

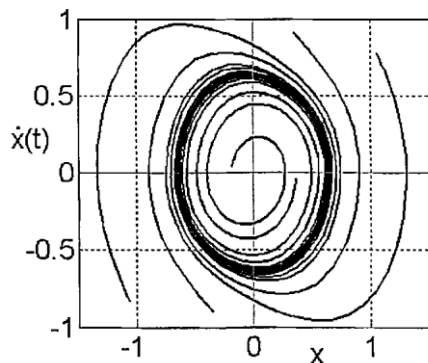
(1.2) მოდელს თუ უკან მივუბრუნდებით აღსანიშნავია, რომ ε პარამეტრი გავლენას ახდენს პერიოდული რხევების ფორმაზე. როდესაც ε არის ნულთან ახლოს, ტრაექტორიები გადაადგილდებიან კოორდინატთა სათავიდან ატრაქტორისკენ და კოორდინატთა სათავის წერტილი არამდგრადია. ნახ. 1.6 და 1.7-ზე მოყვანილია (1.2) სისტემის ცვლადები შესაბამის დამოკიდებულებებთან ერთად და რელეს ფაზური პორტრეტი $\varepsilon = 0,3$ -ს მცირე მნიშვნელობის დროს.



ა

ბ

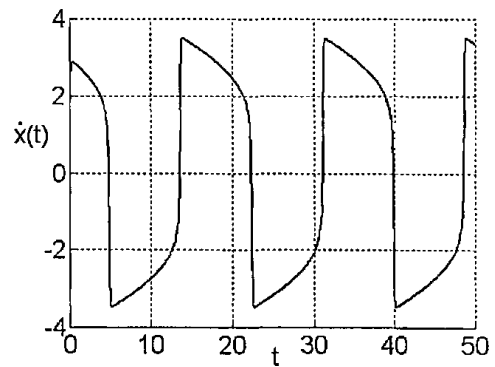
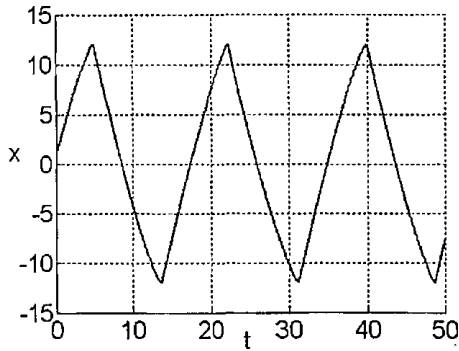
ნახ. 1.6 რელეს გენერატორის ცვლადების ცვლილება დროში შემდეგი მნიშვნელობებისას: ა) $x(t)$, ბ) $\dot{x}(t)$ როცა $\varepsilon = 0,3$



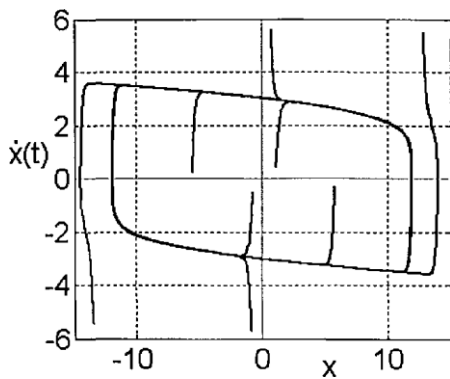
ნახ. 1.7 რელეს სისტემის ფაზური პორტრეტი როდესაც $\varepsilon = 0,3$

(1.2) მოდელის ფაზურ სივრცეში ε პარამეტრის გაზრდისას შეინიშნება რელაქსაციური რხევები. ნახ.1.9-ზე ილუსტრირებულია ფაზური ტრაექტორიის გამოსავალი ზღვრულ ციკლზე, რომელიც ხდება ვერტიკალურ მიმართულებაზე. ხოლო ნახ. 1.8-ზე ასახულია სისტემების

ცვლადების შესაბამისი დამოკიდებულებები დროზე, როდესაც მმართველი პარამეტრი $\varepsilon = 9$.



1.8 რელეს გენერატორის ცვლადების ცვლილება დროში ა) $x(t)$, ბ) $\dot{x}(t)$ როცა $\varepsilon = 9$



ნახ. 1.9 რელაქსაციური გენერატორის ფაზური პორტრეტი როცა $\varepsilon = 9$

1.1.3. პუნკარეს მოდელი

პუნკარეს განტოლებათა სისტემას აქვს შემდეგი სახე:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= (\lambda - x_1^2 - x_2^2)x_1 - px_2, \\ \dot{x}_2(t) &= px_1 + (\lambda - x_1^2 - x_2^2)x_2. \end{aligned} \quad (1.5)$$

თუ ანდრონოვ-ჰოპფის ბიფურკაციული სისტემა ჩაწერილია ფარდობითი კომპლექსური ცვლადების სახით:

$$\dot{z}(t) = (\lambda - ip)z - |z|^2, \quad (1.6)$$

და შევცვლით კომპლექსურ კოორდინანტებს მართკუთხა და პოლარული კოორდინატებით [7], მივიღებთ პუნკარეს განტოლებას, რომელსაც აქვს ორი ამონახსნი; ერთი მათგანი არის გადაგვარებული: $z=0$, ე.ი. $x_1 = x_2 = 0$, მეორე ამონახსნი კი

$$|z|^2 = x_1^2 + x_2^2 = \lambda \quad (1.7)$$

ამ შემთხვევაში კომპლექსური ცვლადის ამპლიტუდა არ არის დაკავშირებული დროსთან და შესაბამისად, (1.7) ამონახსნი ფაზურ სივრცეში არის წრეწირი რადიუსით $r = \sqrt{\lambda}$. შემდგომ დიფერენციალური განტოლებათა სისტემა იღებს კონსერვატიული დინამიკური სისტემის იდეალური ქანქარის ფორმას.

(1.5) განტოლების სტაციონარული ამონახსნების მოსაძებნად, აუცილებელია ჩავწეროთ (1.5) მოდელი პოლარული კოორდინატებით, სადაც r - რადიუს-ვექტორის ამპლიტუდაა და φ - მობრუნების კუთხე და შემოვიტანოთ აღნიშვნები: $x_1 = r \cos \varphi, x_2 = r \sin \varphi$:

$$\begin{aligned} \dot{r}(t) &= \lambda r - r^3, \\ \dot{\varphi}(t) &= p \end{aligned} \quad (1.8)$$

სადაც λ, p - პარამეტრები. (1.8) განტოლებები ერთმანეთთან დაკავშირებული არ არიან.

მაგრამ განვიხილავთ რა მეორე (1.8) განტოლებას, რომელიც აღწერს ფაზათა დინამიკას, მივიღებთ ტოლობას

$$\varphi(t) = \varphi_0 + pt \quad (1.9)$$

(1.9) ტოლობიდან ჩანს, რომ როდესაც $t \rightarrow \infty$ როგორც წესი, ფაზა იზრდება გარკვეული სიჩქარით, შესაბამისად პარამეტრი ω განსაზღვრავს სისტემაში არსებულ რხევათა სიხშირეს.

(1.8) სისტემის პირველი განტოლებას ახასიათებს ამპლიტუდის ცვლილება. ის წარმოადგენს ჩანგლის ტიპის სინერგეტიკულ განტოლებას. მას გააჩნია ორი სტაციონალური მდგომარეობა $r=0$ და $r = \sqrt{\lambda}$, როდესაც $\lambda > 0$ და შესაბამისად, გამოსავალ წერტილს განსაზღვრავენ ეს მდგომარეობებები როგორც ამონახსნის წერტილები, როდესაც $r = \varphi = 0$ და

„ზღვრული ციკლის“ ატრაქტორი. ეს ბოლო წარმოადგენს ფაზურ სივრცეში იდეალურ გარშემოწერილობას რადიუსით $r = \sqrt{\lambda}$ და ცენტრით კოორდინატა სათავეში.

ამგვრად, (1.6) სისტემის დინამიკა ზღვრულ ციკლში დამოკიდებულია ω მნიშვნელობის სიხშირეზე და $r = \sqrt{\lambda}$ ამპლიტუდაზე. პუანკარეს (1.5) მოდელში λ -ს მნიშვნელობა არის სისტემის ბიფურკაციის პარამეტრი. თუ $\lambda = 0$ -ს მაშინ ადგილი აქვს ანდრეი ჰოპფის ბიფურკაციას. λ -ს უარყოფითი მნიშვნელობის შემთხვევაში ამონახსნი $r = \varphi = 0$ არის ასიმპტოტურად მდგრადი. ხოლო λ -ს დადებითი მნიშვნელობის შემთხვევაში ამონახსნი არის არამდგრადი.

(1.5) სისტემის გარდამავალი ამონახსნები, რომლებიც ვიპოვეთ (1.9)-ში ტოლია:

$$x_1(t) = r(t)\cos(\varphi_0 + pt) \text{ და } x_2(t) = r(t)\sin(\varphi_0 + pt) \quad (1.10)$$

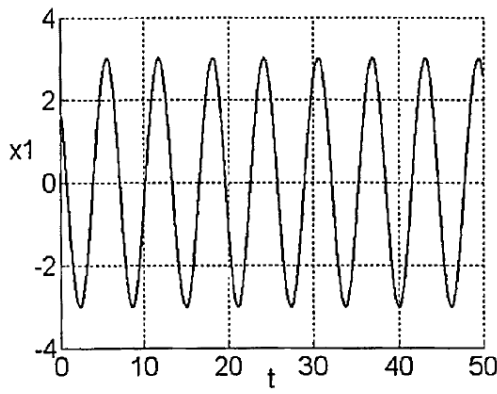
სადაც $r(t) > 0$ - არის შემდეგი სახის ფუნქცია:

$$r(t) = \sqrt{\frac{\lambda r_0^2}{r_0^2 + (\lambda - r_0^2)e^{-2\lambda t}}}, \quad (1.11)$$

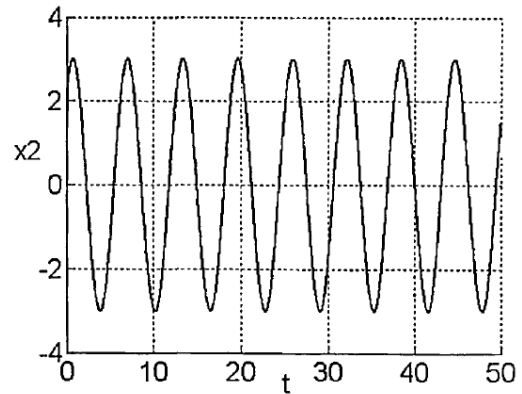
ის იძლევა იმის საშუალებას რომ, მივიღოთ სტაციონალური ამონახსნი [10]:

$$x_{1s}(t) = \sqrt{\lambda} \cos(\varphi_0 + pt) \text{ და } x_{2s}(t) = \sqrt{\lambda} \sin(\varphi_0 + pt) \quad (1.12)$$

(1.10)-(1.12) ამონახსნებიდან ჩანს, რომ (1.13) სისტემის ყველა ტრაექტორია ფაზურ სივრცეში არ არის დამოკიდებული საწყის პირობებზე და ხვდება ზღვრულ ციკლში. თვალსაჩინოებისათვის ნახ.1.10-ზე წარმოდგენილია პუანკარეს სისტემის ცვლადების დამოკიდებულება დროზე. აღნიშნულია [10,11], რომ პუანკარეს მოდელის სისტემის ტრაექტორია მოძრაობს მხოლოდ ატრაქტორზე დროის ერთადერთი მიმართულებით. სისტემის ცვლადების რხევების სინუსოიდური ხასიათი განისაზღვრება პუანკარეს მოდელის ფორმით (1.5). λ -ს პარამეტრის ვარირებით შეიძლება შეიცვალოს სისტემის პერიოდული რხევების ამპლიტუდა.

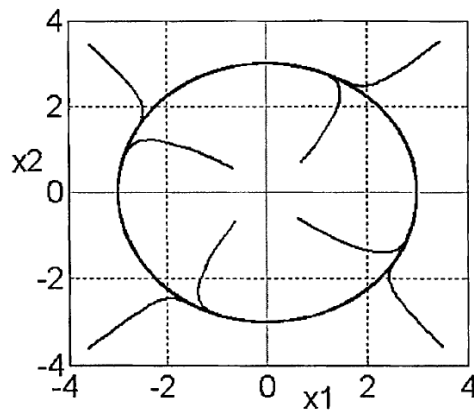


ა)



ბ)

1.10 პუნკარეს სისტემის ცვლადების ცვლილება დროში ა) $x(t)$, ბ) $\dot{x}(t)$ როცა $\lambda = 9, p = 1$



1.11 პუნკარეს სისტემის ფაზური პორტრეტი როცა $\lambda = 9, p = 1$

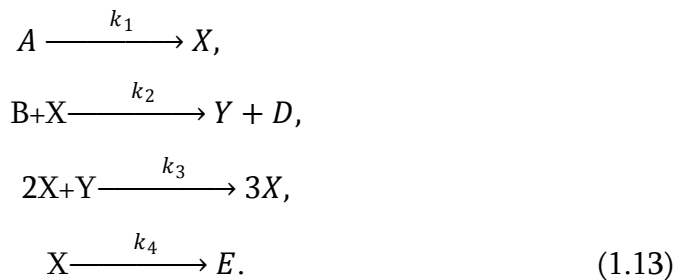
(1.5) სისტემის მიერ დამყარებულ რხევით რეჟიმში არსებობს თვითონ სისტემის დამოკიდებულება ამპლიტუდასა და რხევათა სიხშირეს შორის λ, p პარამეტრებზე.

1.1.4. ბრიუსელატორის მოდელი

მეცნიერებმა ილია პრიგოჟინმა და ლეფერვემა ააგეს ბრიუსელატორის მოდელი. იგი ავტოკატალური სისტემის ქიმიური რეაქციების ტიპური შემთხვევაა რხევითი და სტოქასტური ქცევითი რეჟიმების არსებობის დროს [12,13]. მოცემული სისტემა არაწრფივი მოდელების ნიშან-თვისებების

მნიშვნელოვან რაოდენობას ფლობს, რომლებშიც თვითორგანიზებისა და დისიპაციური სტრუქტურის პროცესები შეიმჩნევა. ამისდა მიუხედავად, ბრიუსელატორი განსაკუთრებული ტიპის ქიმიური და ბიოლოგიური ურთიერთქმედების დინამიკის კვლევის საშუალებას იძლევა.

შემოვიტანოთ აღნიშვნების რიგი, სადაც A, B - გამომავალი სიდიდეებია, D, E - რეაქციის პროდუქცია, X, Y - შუალედური სიდიდეები. ბრიუსელატორის ქიმიური რეაქციების კომპლექტს ექნება სახე:



თუ ვივარაუდებთ, რომ არსებობს დიდი რაოდენობით A ნივთიერებები, ხოლო პირდაპირი რეაქციები (k_1, k_2, k_3, k_4) მიმდინარეობს უფრო ჩქარა, ვიდრე უკუ რეაქციები და სისტემა არის ღია, ბრიუსელატორის ქიმიური რეაქციების კომპლექტი (1.13) შეგვიძლია ჩავწეროთ შემდეგი განტოლებათა სისტემის სახით:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= a - (b + 1)x_1 + x_1^2 x_2 \\ \dot{x}_2(t) &= bx_1 + x_1^2 x_2 \end{aligned} \quad (1.14)$$

სადაც, a, b, x_1, x_2 - A, B, X, Y ნივთიერებათა უგანზომილებო კონცენტრაციებია.

(1.14) მოდელს გააჩნია ერთი სტაციონალური ამონახსნი - თერმოდინამიკური ტოტი [10].

$$x_1 = a, \quad x_2 = \frac{a}{b} \quad (1.15)$$

აღნიშნული ამონახსნი წარმოადგენს მდგრად ფოკუსს იმ შემთხვევაში, თუ

$$(a - 1)^2 < b < a^2 + 1,$$

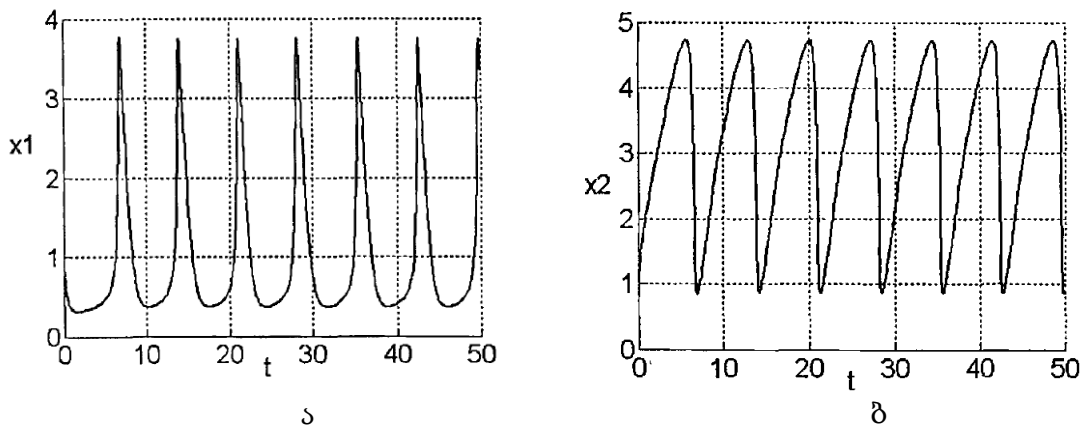
და არამდგრად ფოკუსს ფაზურ სივრცეში ზღვრული ციკლის შემთხვევაში, როცა: $b > a^2 + 1$.

ანდრონოვ-ჰოპფის ბიფურკაციის გამო ბრიუსელატორის ფაზურ სივრცეში, წარმოიქმნება მდგრადი ამონახსნების მიმდევრობა, რომელიც განსაზღვრავს თავდაპირველი მოდელის ავტორხევით ქცევას.

აუცილებელი პირობა, იმისათვის რომ (1.14) სისტემაში არსებობდეს ანდრონოვ ჰოპფის ბიფურკაცია, უნდა სრულდებოდეს ტოლობა: $b = a^2 + 1$

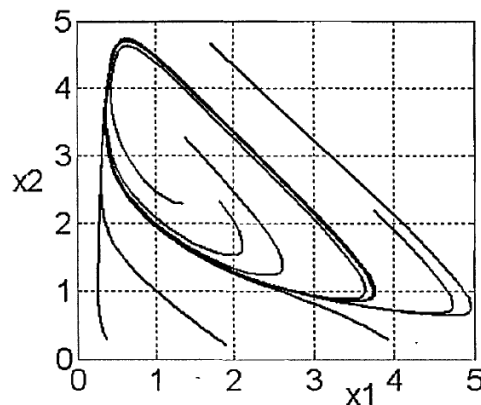
ამასთან ერთად, თუ პარამეტრი b -ს მნიშვნელობა არ არის გაცილებით მეტი ბიფურკაციის ზღვარზე, მაშინ რხევითი რეჟიმები იქნება კვაზი-ჰარმონიული. თუ პარამეტრი b არ აღემატება ბიფურკაციულ მნიშვნელობას, მაშინ (1.14) სისტემაში ხდება რხევების გაქრობა და შესაბამისად წარმოიქმნება მდგრადი ფოკუსი.

ნახ. 1.12-ზე ასახულია ავტორხევების დამყარების პროცესი ქიმიურ სისტემაში. ბრიუსელატორის მოდელის ფაზური პროცესი ნაჩვენებია ნახ.1.13-ზე.



1.12 ბრიუსელატორის ცვლადების ცვლილება დროში ა) $x(t)$,

ბ) $\dot{x}(t)$ როცა $a = 1, b = 3$



1.13 ბრიუსელატორის ფაზური პორტრეტი როცა $a = 1, b = 3$

ზემოთ მოყვანილი ყველა რეგულარული დინამიკის მქონე არაწრფივი რხევითი სისტემების მოდელი პარამეტრების შესაბამისი მნიშვნელობისას საშუალებას იძლევა ფაზურ სივრცეში აღმოვაჩინოთ "ზღვრული ციკლის" ტიპის ატრაქტორი. ასეთი სისტემების ფაზური განზომილება 1-ის ტოლია და ინფორმაციის დამუშავების თვალსაზრისით არაეფექტურია. თუმცა პერსპექტიულია მისი გამოყენება ინფორმაციის შეკუმშვისათვის.

1.2. ქაოსური დინამიკის მქონე რხევითი სისტემების ბაზური მოდელები

დეტერმინირებული ქაოსის ზემოქმედების გამოვლენასთან კავშირში, შეიქმნა ქაოსური დინამიკის მქონე ბაზური მოდელების დამუშავებისა და ანალიზის აუცილებლობა [4,6,12,16-20]. როგორც აღმოჩნდა მე-3 რიგის და ზემოთ არსებულ, არაწრფივი დეტერმინირებული სისტემების ფაზურ სივრცეში შეიძლება შეიმჩნეს რთული ქაოსური მოძრაობები.

დინამიკური ქაოსის [16] რეჟიმების შესწავლის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან მიმართულებას წარმოადგენს ქაოსური თვისებების მქონე სისტემის ბაზური მოდელების შემუშავება და კვლევა.

დეტერმინირებული ქაოსის მათემატიკურ ნიმუშად შესაძლებელია გამოვიდნენ ე.წ. „უცნაური ატრაქტორები“ [7,9,14,20]. ისინი იმით განსხვავდებიან, რომ გააჩნიათ წილადური განზომილება, ფრაქტალური სტრუქტურა, ქცევის არაპროგნოზირება და საწყისი პირობებისადმი მაღალი მგრძობელობა.

ზემოთ აღნიშნულის დასამტკიცებლად განვიხილოთ დეტერმინირებული ქაოსის მქონე სისტემების ბაზური მოდელების თვისებები და ძირითადი მახასიათებლები.

1.2.1. ლორენცის მოდელი

ლორენცის სისტემის განტოლებები მიღებულ იქნა ამინდის პროგნოზირების კვლევისას. ამ დინამიკურ სისტემაში პირველად იქნა გამოკვლეული სტოქასტური ავტორხევეები [18]. მოდელი არის სისტემა, სამი ჩვეულებრივი დიფერენციალური განტოლებებით შედგენილი [20]:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= \sigma(x_2 - x_1), \\ \dot{x}_2(t) &= rx_1 - x_2 - x_1x_3, \\ \dot{x}_3(t) &= x_1x_2 - bx_3,\end{aligned}\tag{1.16}$$

სადაც σ, r, b - მმართველი პარამეტრებია.

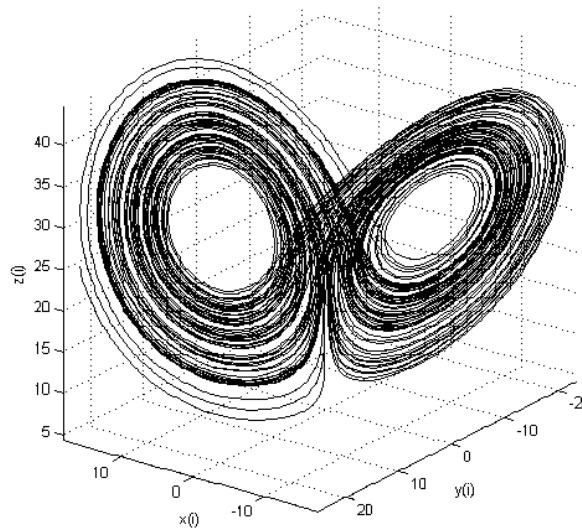
ფიზიკური თვალსაზრისით ცვლადი x_1 განსაზღვრავს კონვექციის ინტენსიურობას, x_2 - ურთიერთსაწინააღმდეგო ნაკადების სხვადასხვა ტემპერატურა, x_3 - ვერტიკალური და წრფივი ტემპერატურის პროფილების განსხვავება [6].

ლორენცის მოდელს გააჩნია თვითაღზუნებადი ბუნების ავტორხევეთი ტიპის ინერციული ხასიათი. ასეთ სისტემაში, გენერაციის მიზეზი არის უკუკავშირის მიზნის ინერცია [18]. სისტემა (1.16) არის დისიპაციური და აქვს სხვადასხვა ქაოსური რეჟიმი.

თავის ნაშრომში [17] ლორენცი მიუთითებს, რომ პარამეტრების $\sigma, r, b > 0$ შემთხვევაში ფაზურ სივრცეში არსებობს ისეთი ატრაქტორი, რომელიც მდებარეობს სფეროს ცენტრის ფარგლებში $(0; 0; \sigma + r)$ და აქვს რადიუსი $K(\sigma + r)$.

როდესაც $0 < r < 1$ სისტემის ყველა ამონახსნი მიისწრაფვის წონასწორული მდგომარეობისაკენ $(0; 0; 0)$. როდესაც $1 < r < 13,926$ ტრაექტორიები გადაადგილდებიან ორი ახალი მდგრადი წონასწორული მდგომარეობიდან ერთ-ერთი მიმართულებით წერტილებში $T_1 = (\sqrt{b(r-1)}, \sqrt{b(r-1)}, r-1)$ და $T_2 = (-\sqrt{b(r-1)}, -\sqrt{b(r-1)}, r-1)$. როდესაც $r \approx 13.926$ ფაზურ სივრცეში არსებობს უნაგირის ტიპის სხვადასხვა ტრაექტორიები. როდესაც $13.926 < r < 24.74$ ხდება ბიფურკაცია,

T_1 და T_2 წერტილების მიზიდვის არეები აღარ განსხვავდებიან ერთმანეთისგან. როდესაც $r = 24,06$ მოულოდნელად იბადება უცნაური ატრაქტორი. T_1 და T_2 წერტილები ხდებიან არამდგრადები როცა $r \approx 24,74$. როდესაც $r > 24,74$ მოძრაობა არის ქაოსური, ტრაექტორია აკეთებს არაპროგნოზირებად ნახტომებს T_1 და T_2 წერტილების მიდამოში. ის რამოდენიმე ხნის განმავლობაში თითოეულის გარშემო მოძრაობს სპირალურად. ბოლოს აღნიშნულ საქციელს მივყავართ უცნაური ატრაქტორის გაჩენასთან, რაც ილუსტრირებულია ნახ. 1.14-ზე



ნახ. 1.14 ლორენცის ქაოსური ატრაქტორი

ლორენცის ატრაქტორი მრავალი მეცნიერის მიერ იქნა გამოკვლეული და დღესაც გრძელდება მისი ქცევის შესწავლა; ნაშრომებში აღნიშნულია, რომ r -ის დიდი მნიშვნელობის დროს ლორენცის ატრაქტორში შეიმჩნევა ქაოსური და პერიოდული ქცევის მონაცვლეობა. კერძოდ, დიდი მნიშვნელობის დროს $145 \leq r \leq 148$ და $210 \leq r \leq 234$ ჩანს ზღვრული ციკლი.

ავტორები [6] საუბრობენ მონაცვლეობის შესახებ, რომელიც თან ახლავს ქაოსში უკუგადასვლებს. [18]- ში საუბარია მოძრაობის პერიოდულ ხასიათზე როდესაც $r \leq 313$. ლორენცის ატრაქტორის განზომილება, გამოთვლილი $b = 4, \sigma = 16, r = 40$ დროს, შეადგენს $1,98 \pm 0,02$.

ლორენცის მოდელის ქაოსური ატრაქტორი (1.16) განსხვავდება არაწრფივი დინამიკის ბევრი სხვა მოდელებისაგან იმით, რომ მისი სტრუქტურა შეესაბამება უცნაურ ატრაქტორს და ხდება უნაგირის ტიპის მოძრაობა.

რადგანაც (1.16) სისტემის ატრაქტორი დამოუკიდებელია მცირე გარე ზემოქმედებაზე, საწყის პირობებსა და პარამეტრებზე, ზოგიერთი მეცნიერი [18] ასეთ ატრაქტორს უხეშად თვლის. სხვა ავტორები [16] კი ლორენცის ატრაქტორს ახასიათებს როგორც კვაზი ჰიპერბოლურს.

ზოგიერთ დინამიკურ მოდელში არსებობს ლორენცის ტიპის ატრაქტორების კლასი [14, 19].

1.2.2 რესლერის მოდელი

რესლერის მოდელი წარმოადგენს არაწრფივ დინამიკურ სისტემას, რომელიც შედგება სამი დიფერენციალური განტოლებისაგან.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= -x_2 - x_3, \\ \dot{x}_2(t) &= x_1 + ax_2, \\ \dot{x}_3(t) &= bx_1 - cx_3\end{aligned}\tag{1.17}$$

სადაც, a, b, c - სისტემის პარამეტრებია.

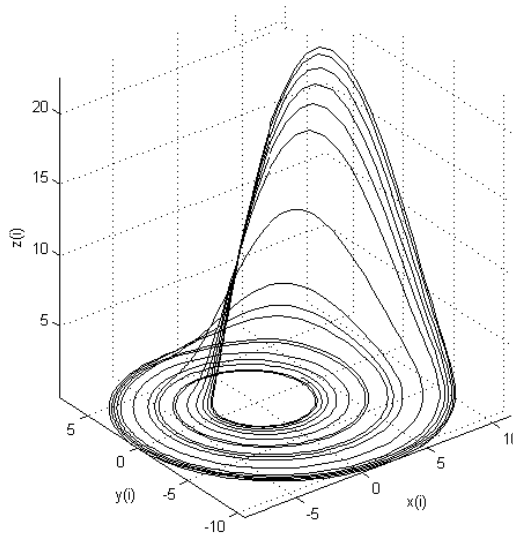
თავდაპირველად, გარკვეული ქიმიკატების ურთიერთქმედების მოდელირებისათვის რესლერის მიერ შემოთავაზებულ იყო მოდელი (1.17). რადგანაც ეს მოდელი გვიჩვენებს ქაოსის გაჩენის და არსებობის ნიშნებს, დღეს ის ფართოდ გამოიყენება სხვადასხვა ბუნების სისტემების კვლევებისას.

1.15 ნახაზზე ასახულია რესლერის ატრაქტორი პარამეტრების შემდეგი მნიშვნელობების დროს: $a=b=0,2, c=9$.

(1.17) განტოლებათა სისტემას აქვს განსაკუთრებული ორი წერტილი:

$$x_{1,2} = \frac{c}{2} \pm \sqrt{\frac{c^2}{4} - ab}, \quad x_{2,1,2} = -x_{3,1,2} = -\frac{x_{1,2}}{a}$$

რომლებიც არსებობენ იმ შემთხვევაში, თუ სრულდება შემდეგი პირობა: $c \geq 2\sqrt{ab}$.



ნახ. 1.15 რესლერის უცნაური ატრაქტორი

პირველი განსაკუთრებული წერტილი ნებისმიერ პირობებში არის არა მდგრადი. მეორე განსაკუთრებული წერტილი შესაძლოა იყოს, როგორც არამდგრადი, ისე მდგრადი. მეორე შემთხვევაში სისტემაში წარმოიქმნება ავტორხევები, რომლებიც დამოკიდებულნი არიან c მმართველ პარამეტრზე.

ნაშრომებში [21,22] წარმოდგენილია (1.15) მოდელის კვლევის შედეგები. რესლერის სისტემაში, როგორც ამ ტიპის უმრავლეს მოდელებში, ქაოსური რხევების წარმოქმნას წინ უსწრებდა ბიფურკაციის ციკლის პერიოდის გაორმაგება. ბიფურკაციების თანმიმდევრობის შედეგად, სისტემაში გარკვეული პარამეტრების დროს ხდება რამოდენიმე ქაოსური ატრაქტორის გაერთიანება. [21,22] ავტორებმა შეისწავლეს c პარამეტრის როლი იმ შემთხვევებში, როდესაც სისტემაში გამოჩნდება მეორე განსაკუთრებული წერტილი და პარამეტრების მნიშვნელობებია: $a=b=0,2$.

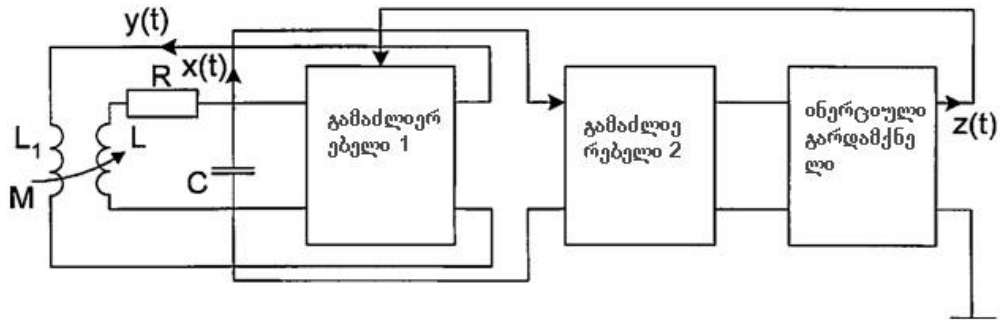
მცირე მნიშვნელობებისას ფაზური ტრაექტორია არის ციკლი ერთი ბრუნვით, რომელსაც შეესაბამება პერიოდული რხევები. როდესაც $c > 3,5$ ხდება ციკლის პერიოდის გაორმაგების ბიფურკაციები. როდესაც მიაღწევს კრიტიკულ მნიშვნელობას $c=4,2$ ფაზურ სივრცეში აღმოცენდება ქაოსური ატრაქტორი, რომელსაც აქვს შრეებიანი სტრუქტურა. ეს უკანასკნელი ქრება როდესაც $c=4,6$.

თუ c პარამეტრები იზრდება მნიშვნელოვნად, მაშინ ატრაქტორის ტიპიც იცვლება. თუ დავაფიქსირებთ პარამეტრებს $b=0,4$ და $c=8,5$ და ამასთანვე შევცვლით a პარამეტრს, მაშინ დავინახავთ „ნაკეცს“, რომელიც ქრება როდესაც $a=0,3$ და მის ნაცვლად ჩნდება „ძაბრი“. [22] აღნიშნული ფაქტის საფუძველზე მიღებულ იქნა დასკვნა, რომ ფაზურ ტრაექტორიებში "უნაგირის" ციკლის და "უნაგირის" წონასწორობებს შორის ხდება მუდმივი ნახტომები.

რესლერის სისტემაში ქაოსის გაჩენა განპირობებულია ამ მოდელის არამდგრადი დინამიკით. მაგრამ ამისდა მიუხედავად, ზოგიერთი ფაზური ტრაექტორია კვლავ ხვდება კოორდინატთა სათავეში. შედეგად, სისტემაში ჩნდება მდგრადი ტიპის ატრაქტორი და აღინიშნება ფაზური მოცულობის შეკუმშვის მაღალი ხარისხი.

1.2.3. მოდიფიცირებული გენერატორის მოდელი

მოდიფიცირებული გენერატორის მოდელი არაწრფივი ინერციით შემუშავდა მეცნიერის კ.ფ. თეოდორჩიკის კლასიკური მოდელის ბაზაზე [23,24]. ამ სისტემის განმასხვავებელ ნიშანს წარმოადგენს კონტურის არაწრფივი კომპონენტის არ არსებობა, მაგრამ კონტურის მართვაში შეტანილი იქნა დამატებითი გამაძლიერებელი და ინერციული გარდამქმნელი. ამრიგად, ნახ. 1.16-ზე ნაჩვენებია არაწრფივი ინერციის მქონე მოდიფიცირებული გენერატორის სქემა.



ნახ. 1.16 - ინერციული არაწრფივი მოდიფიცირებული გენერატორის სქემა

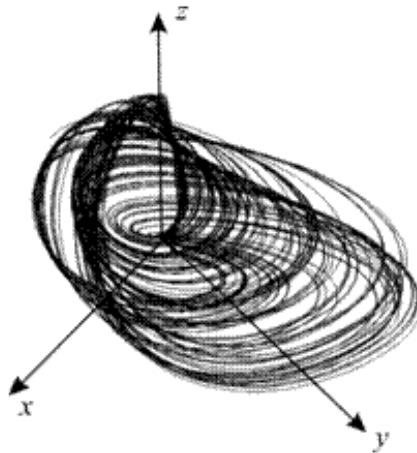
ინერციული არაწრფივი მოდიფიცირებული გენერატორის განტოლება წარმოადგენს სისტემას:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= mx_1 + x_2 - x_1x_3 - dx_1^3 \\ \dot{x}_2(t) &= -x_1 \\ \dot{x}_3(t) &= -gx_3 + gI(x_1)x_1^2 \end{aligned} \quad (1.18)$$

სადაც, d პარამეტრი - ახასიათებს სისტემის დისიპაციურ არაწრფივობას ინერციის გარეშე, $I(x_1)$ - ჰევისაიდის ფუნქცია.

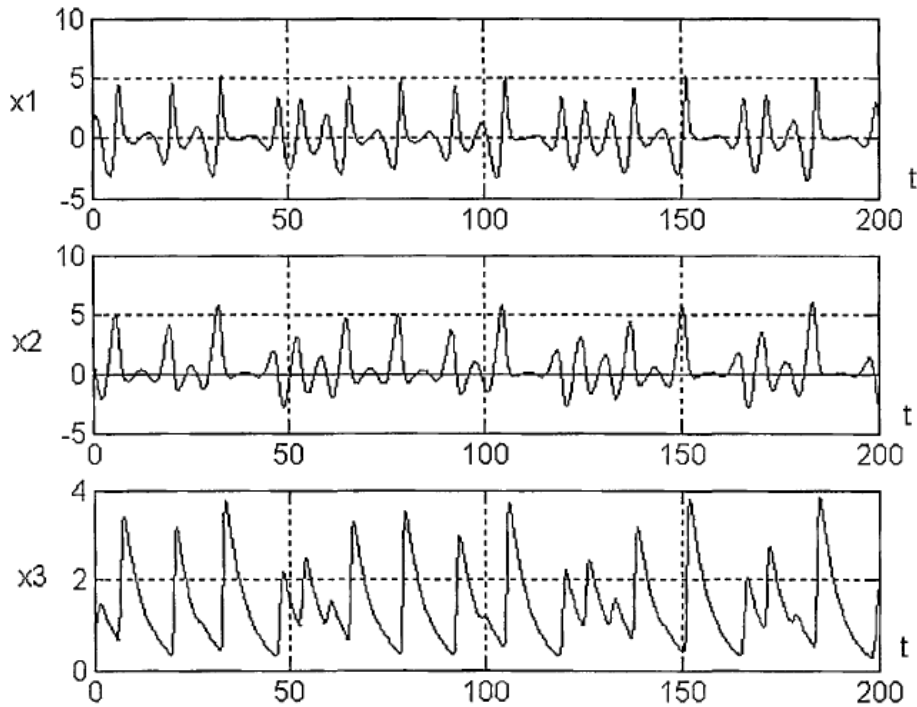
მამრავლი $I(x_1)x_1^2$ განსაზღვრავს ინერციული კონვერტორის ფუნქციონალურ მახასიათებლებს [16].

MGAI (მოდიფიცირებული გენერატორი არაწრფივი ინერციით) მოდელში გარკვეული პირობების განსაზღვრისას გენერირდება ქაოსური რხევები. ნახ. 1.17-ზე გამოსახულია სისტემის ფაზური ტრაექტორია, როდესაც $m=1,5$, $g=0,2$, $d=0$ დეტერმინირებული ქაოსის რეჟიმში.



ნახ. 1.17- ანიშენკო-ასტრახოვას სისტემის ქაოსური ატრაქტორი

ზემოთ აღნიშნული ნახაზებიდან შეიძლება დავასკვნათ, რომ სისტემაში ხდება ციკლური პროცესი. დასაწყისში აღმწერი წერტილი სცილდება კოორდინატთა სათავეს სპირალური ტრაექტორიით. ცოტა ხნის შემდეგ არასტაბილურობის გამო იგი დაუბრუნდება საწყის პირობებს, კერძოდ წერტილების არეს (0, 0; 0). აპერიოდული ტიპის მოძრაობის გამო, მას საკმაოდ რთული დინამიკა გააჩნია.



ნახ. 1.18- მოდიფიცირებული გენერატორის სისტემის ცვლადების ცვლილება დროში

ფიზიკურად, x_3 ცვლადს შეუძლია მიიღოს მხოლოდ $x_3 \geq 0$ მნიშვნელობა. ის განსხვავდება x_1 და x_2 ცვლადებისაგან, რომლებიც განსაზღვრულნი არიან მთელს რიცხვით ღერძზე. პარამეტრი g არ შეიძლება იყოს უარყოფითი. პარამეტრი m მნიშვნელობისას $m < 0$ ახასიათებს გენერატორის არასაკმარის აღზნებას, ხოლო როდესაც $m > 0$ - შექმნილ რხევით რეჟიმს.

მოდელი (1.18) ნებისმიერი საწყისი პირობების დროს არის დისიპაციური, თუ სრულდება შემდეგი უტოლობა:

$$m - g < x_3 + 3dx_1^2 \quad (1.19)$$

იმ ექსპერიმენტებიდან, რომლებიც ჩატარებული იქნა [16, 25, 33] ავტორების მიერ, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ d პარამეტრის გაზრდისას წარმოიქმნება პერიოდული რეჟიმები.

მოდელიზირებული გენერატორის მოდელს (1.18) გააჩნია ერთი განსაკუთრებული წერტილი $(0;0;0)$, რომელიც მდგრადია პარამეტრების შემდეგი მნიშვნელობების დროს: $g > 0$ და $-2 < m < 0$. ამასთან ერთად, $0 < m < 2$ არის მდგრადი წერტილი - უნაგირი - ფოკუსი, ხოლო როდესაც $m > 0$ უნაგირი - კვანძი, და როცა $m = 0$ მაშინ არის ბიფურკაციული. როდესაც პარამეტრი $m = 0$ (1.26) სისტემაში ხდება ანდრონოვ-ჰოპფის ბიფურკაცია, d პარამეტრის სიდიდის მიუხედავად [16].

ქაოსური დინამიკის მქონე სხვა არაწრფივი სისტემებისგან განსხვავებით მოდიფიცირებული გენერატორის რხევების გენერაციის რეჟიმში შეიძლება შევცვალოთ ერთდროულად, ერთმანეთისგან დამოუკიდებლად ერთ განზომილებიანი და ორგანზომილებიანი სხვადასხვა არამდგრადი სახეობები. ბიფურკაციის გაორმაგების და გაყოფის გარდა, (1.18) მოდელში იკვეთება გადანაცვლების მოვლენაც [21].

1.2.4. ჩუას გენერატორი

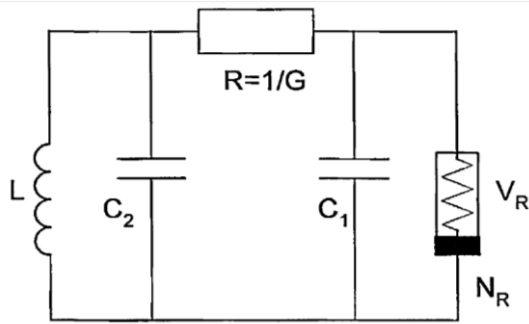
1.19 ნახაზზე წარმოდგენილია ჩუას გენერატორის სქემა [24,25], სადაც ერთადერთი არაწრფივი ელემენტი არის დიოდი.

ჩუას სისტემის განტოლებათა სისტემას აქვს შემდეგი სახე:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= c|x_2 - h(x_1)| \\ \dot{x}_2(t) &= x_1 - x_2 + x_3 \\ \dot{x}_3(t) &= -hx_2 \end{aligned} \tag{1.20}$$

სადაც, $h(x_1) = bx_1 + 0,5(a - b)(|x_1 + 1| - |x_1 - 1|)$;

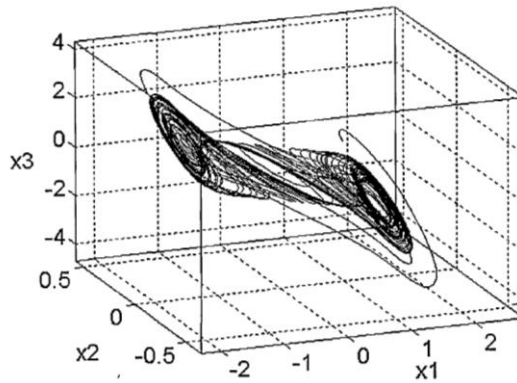
c, h, a, b - სისტემის პარამეტრები.



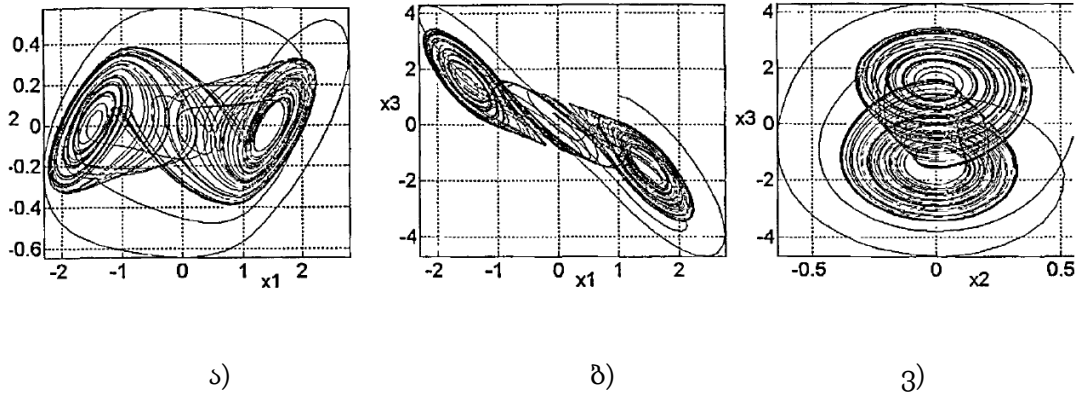
ნახ. 1.19 - ჩუას გენერატორის სქემა

ამ მოდელისათვის ფაზური ტრაექტორიის ქცევა მნიშვნელოვნად გართულებულია, იმის გამო, რომ ჩუას გენერატორის მოდელისათვის დამახასიათებელია სივრცის სიმეტრიის ფენომენი. აღნიშნული ფაქტი ართულებს ქაოსური ატრაქტორის სტრუქტურას.

ნახ. 1.20-ზე ნაჩვენებია ჩუას სისტემაში წარმოქმნილი ფაზური ატრაქტორის პორტრეტი, როდესაც პარამეტრებს აქვთ შემდეგი მნიშვნელობები: $c = 12,5, h = 22, a = -1/7, b = 2/7$. (1.20) გენერატორის ორგანზომილებიანი პროექცია პარამეტრების იმავე მნიშვნელობების დროს მოყვანილია ნახ. 1.21-ზე. ასეთ ატრაქტორს, რომელიც შეესაბამება ჩუას გენერატორს, უწოდებენ „ორმაგ ღეროებს“.

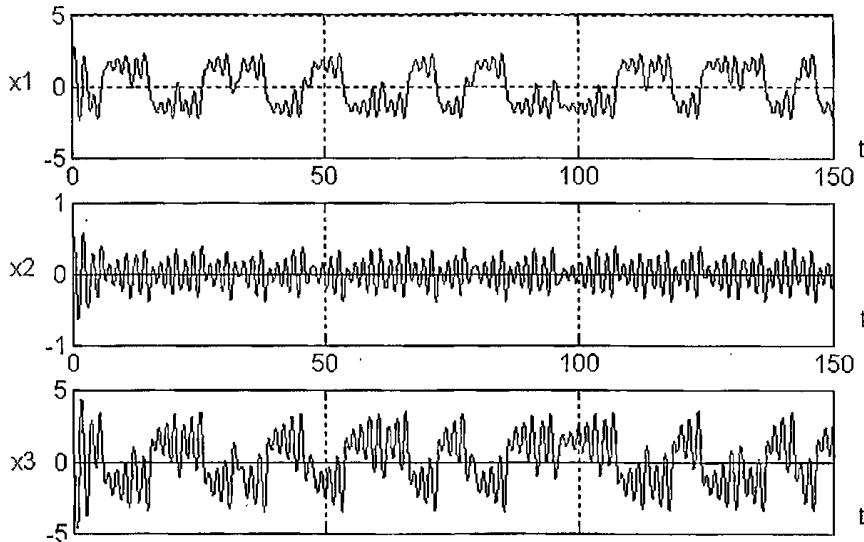


ნახ. 1. 20 - ქაოსური ატრაქტორი ჩუას სისტემაში



ნახ. 1.21 - ჩუას სისტემის ორგანზომილებიანი პროექცია ა)XY, ბ)XZ, ვ)ZY

გრაფიკი 1.22 გვიჩვენებს სისტემური ცვლადების ცვლილებებს დროთა განმავლობაში:



ნახ. 1.22 ჩუას სისტემის ცვლადების ცვლილება დროში

ფიქსირებული პარამეტრების დროს: $h = 22, c = -\frac{1}{7}, b = \frac{2}{7}$, დამოკიდებულნი არიან c პარამეტრის ცვლილებაზე, ჩუას სისტემის დინამიკა (1.20) წარმოდგენილია შემდეგი სახით.

როდესაც $c = 0$ ფაზურ სივრცეში მოძრაობის ტრაექტორიები, მდებარეობენ რა სიბრტყეზე (x_2, x_3) დროთა განმავლობაში სპირალისებურად დაეხვევიან წერტილში, რომლის კოორდინატებიც იცვლება საწყისი პირობებისაგან და გადაინაცვლებს კოორდინატთა სათავის სიახლოვეს. როდესაც პარამეტრს აქვს შემდეგი მნიშვნელობა:

$0 < c \leq 8,7$ ტრაექტორია წარმოადგენს სამგანზომილებიან სპირალს, დაცილებულ ნახვევებს შორს მანძილი თანდათანობით მცირდება. როდესაც $8,7 < c < 12,6$ წარმოიქმნება ძაბრი. შემდგომ მნიშვნელობის ზრდისას $12,06 \leq c \leq 12,71$ წარმოიქმნება მეორე ძაბრი. ბოლო შემთხვევაში ფაზური ტრაექტორიები ტრიალებენ წონასწორობის გარშემო.

ამგვარად, სისტემაში აღმოცენდება უცნაური ატრაქტორი. c -ს დიდი მნიშვნელობის დროს, როცა ის მეტია 12,71-ზე, ფაზური ტრაექტორიები წარმოადგებიან სიბრტყეზე სპირალის სახით, რომელიც ბრუნავს თავდაპირველი პირობებიდან დაცილებულ დიდ მანძილზე.

ჩუას სისტემის (1.20) ფაზურ სივრცეში არსებობს წონასწორობის ორი მდგომარეობა: „უნაგირი-ფოკუსი“-ს ტიპის, რომელის გარშემოც მოძრაობენ ტრაექტორიები. ეს იმას ნიშნავს, რომ მოცემული მოდელი ეკუთვნის ქაოსური სისტემების კლასს.

ჩუას მოდელს (1.0 ფართოდ იყენებენ არაწრფივი დინამიკის სხვადასხვა პრობლემის კლვევისას.

1.3. პირველი თავის დასკვნები

მოცემულ თავში გაანალიზდა რეგულარული დინამიკისა და ქაოსური დინამიკის მქონე რხევითი სისტემების ბაზური არაწრფივი დინამიკური მოდელების თვისებები.

განხილულ იქნა რეგულარული ოსცილატორების სისტემების შედარებით გავრცელებული მოდელები: ვან დერ პოლის ოსცილატორი, რელეს გენერატორი, პუანკარეს მოდელი და ბრიუსელატორის მოდელი, რომლებსაც ახასიათებთ დროში ცვლადების ცვლილების რხევითი თვისება და სივრცეში „ზღვრული ციკლის“ ტიპის ატრაქტორების მდგომარეობა. ასეთ ატრაქტორებს გააჩნიათ 1-ის ტოლი ფაზური სივრცის განზომილება და ამიტომ ნაკლებად ეფექტურები არიან ინფორმაციის შენახვისათვის.

ამ თავში ასევე განხილულია და გამოკვლეულია ქაოსური დინამიკის მქონე არაწრფივი რხევითი სისტემების მათემატიკური მოდელების ბაზური მახასიათებლები, როგორცაა ლორენცის, რესლერის და ანიშენკო-ასტახოვას მოდელი, ჩუას გენერატორი.

უცნაური (ქაოსური) ატრაქტორების განმასხვავებელ თვისებურებას წარმოადგენს მათი გეომეტრიული სტრუქტურის ფრაქტალობა, წილადური მეტრული განზომილება, საწყისი პირობებისადმი მაღალი მგრძნობელობა და ქცევის არაპროგნოზირება. ამიტომ მსგავსი სისტემები ინფორმაციული თვალსაზრისით ფლობენ უნივერსალურ თვისებებს და იდეალურები არიან როგორც ინფორმაციის შენახვის, ისე შეკუმშვისათვის ანუ ინფორმაციის დამუშავებისათვის.

თავი 2. ქაოსურ გენერატორებში წესრიგის პარამეტრზე დაკვირვება; გენერატორების სინერგეტიკული სინთეზი

მოცემულ თავში განხილულია მონაცემთა ფარული გადაცემისათვის ინფორმაციის დამუშავების სხვადასხვა მეთოდი, რომელიც ქაოსური სისტემების გამოყენებას ეფუძნება. ასევე გამოკვლეულია დინამიკური სისტემის გლობალური რეკონსტრუქციის მეთოდი, როგორც ინფორმაციის დამუშავებისა და ფარული გადაცემის მეთოდი.

განხილულია ინფორმაციული სიგნალის რეკონსტრუქციისადმი ზოგადი მიდგომა პარამეტრებით მოდელირებული ქაოსური გენერატორების გამოყენებით. აგრეგირებული რეგულატორების ანალიზური კონსტრუირების მეთოდის საფუძველზე შემუშავებული იქნა არაწრფივი დინამიკური დამკვირვებლის სინთეზის მეთოდი „მმართველი პარამეტრის“ იდენტიფიკაციისათვის, ატრაქტორის სტრუქტურისა და ფარული ინფორმაციის შემდგომი აღდგენის მიზნით.

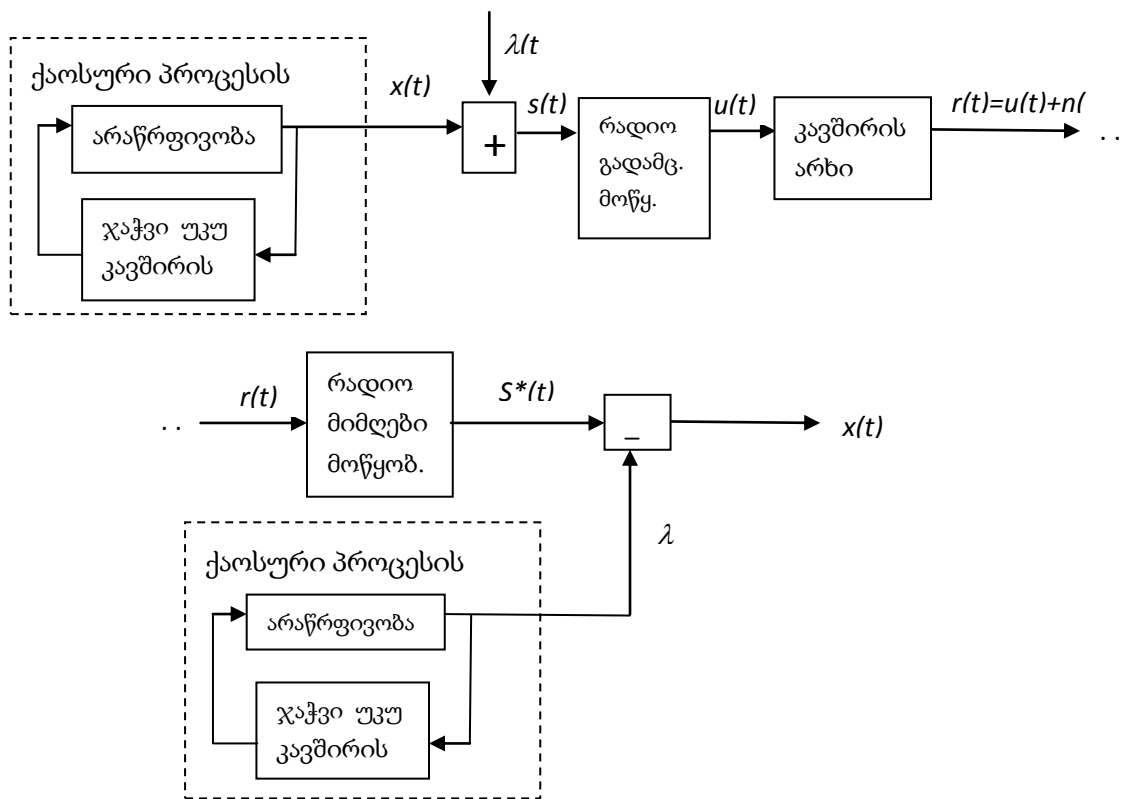
2.1. ქაოსის გამოყენება მონაცემთა ფარული გადაცემისათვის

უკანასკნელი 20 წლის განმავლობაში მეცნიერებმა სიგნალების ფარული გადაცემის მრავალი მეთოდი შემოგვთავაზეს ქაოსური დინამიკის გამოყენებით. მათ შორის შედარებით პოპულარულია ისეთი მეთოდები, როგორიცაა ქაოსური შენიღბვა, ქაოსური რეჟიმების გადართვა, დუალური არაწრფივი გარდაქმნა, პუანკარეს კვეთით მართვა, ქაოსური სიგნალით მოდულაცია და სხვა.

ქაოსური რხევებით შენიღბვა. ხმაურიანი და ქაოსური სიგნალებით შენიღბვის მეთოდი საინტერესოა უშუალოდ პაკეტური კავშირისათვის კონფიდენციალური ინფორმაციის გადასაცემად.

ქაოსური შენიღბვის გამოყენების პროცესი მოყვანილია ნახ. 2.1-ზე, როგორც ჩანს ინფორმაციული სიგნალი $\lambda(t)$ ჯამდება ქაოსური სისტემის გამომავალ სიგნალთან $x(t)$ [26]. სიგნალი $s(t)=x(t)+\lambda(t)$ გარდაიქმნება $u(t)$ სიგნალად და გადაეცემა არხში.

ზოგადად არხში $u(t)$ სიგნალს შეიძლება დაემატოს $n(t)$ არხის ხმაური. მაშინ შესასვლელზე მიმდებარე მიეწოდება სიგნალი $r(t)= u(t)+n(t)$. მიმდებარე მხარეზე კი ხდება უკუგარდასახვა რადიო სიგნალიდან $s(t)$ და $x(t)$ სიგნალად. ამასთან, აუცილებელია რომ $\lambda(t) < x(t)$.



ნახ. 2.1. ინფორმაციის ქაოსური ფორმით გადაცემის სისტემა

კონფიდენციალურობის ხარისხის მქონე მონაცემთა ფარულ გადაცემას გააჩნია სერიოზული ნაკლი: $\lambda(t)$ ინფორმაციული სიგნალის სიმძლავრე რამდენადმე ნაკლები უნდა იყოს $x(t)$ ქაოსური სიგნალის სიმძლავრეზე.

ასეთი დაბალი დონის სიგნალი კავშირის არხის ხმაურის თანაზომადი დონის ხდება, რაც მიმღების გამავალზე სიგნალის/ხმაურის დაბალ შეფარდებას იწვევს და შესაბამისად ამცირებს გადაცემის ხარისხს.

ამრიგად, ქაოსური შენიღბვის მეთოდის გამოყენებისას აუცილებელია უზრუნველყოფილი იყოს ქაოსური სისტემის იდენტურობის მაღალი ხარისხი არა მარტო გადამცემზე და მიმღებზე, ასევე გამოყენებულ უნდა იყოს დაბალი დონის ხმაურის კავშირის არხები.

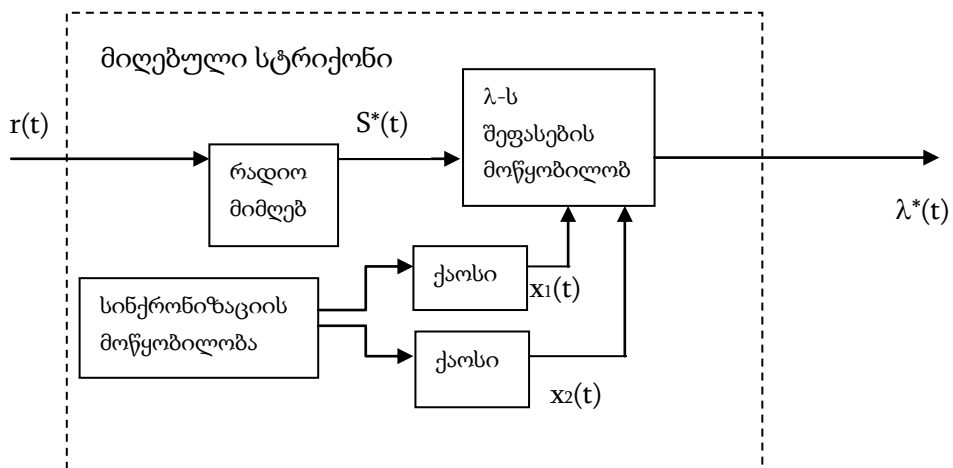
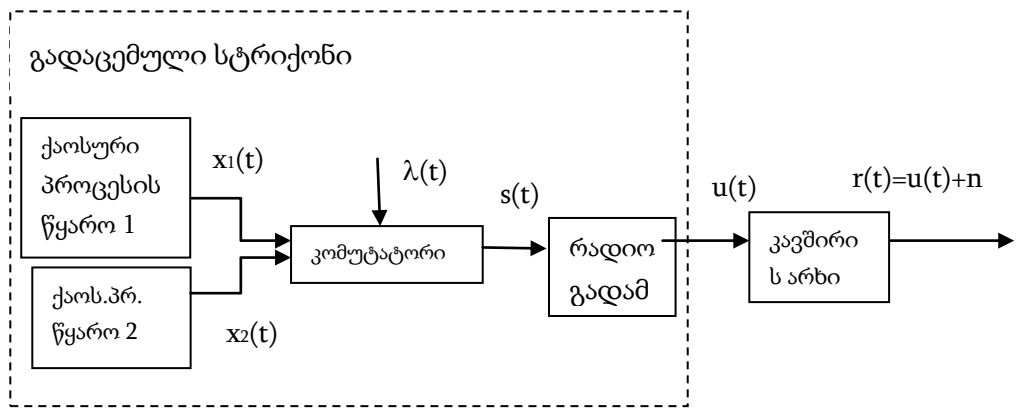
მოცემული მიდგომა ნაკლებად ეფექტურია, რადგან არხს ინფორმაციის თითქმის არ შემცველი სიგნალი გადაეცემა.

გარდა ამისა დაბალი ფრაქტალური სიდიდის ქაოსის წყაროს პარამეტრები შეიძლება განისაზღვროს პარამეტრების შეფასების მეთოდების დახმარებით, რადგან ამ შემთხვევაში ქაოსური მატარებლის სტატისტიკა უშუალოდ არხზე დაკვირვების მიხედვით განისაზღვრება.

ქაოსური რეჟიმების გადართვის მეთოდი. ფარული ინფორმაციის გადაცემის შემდეგ მეთოდს წარმოადგენს ქაოსური რეჟიმების გადართვის მეთოდი [26,27,28]. ეს მეთოდი საკმაოდ მარტივი კონფიგურაციისაა (ნახ. 2.2). გადამცემი შედგება განსხვავებული ან ერთნაირი სტრუქტურის მქონე ორი ქაოსური გენერატორისაგან.

მოცემული მიდგომის დროს გადაცემის პროცესი შემდეგნაირად მიმდინარეობს: დროის ყველა მომენტში გადამცემის კომპუტატორს მხოლოდ ერთ-ერთი გენერატორიდან გადაეცემა ქაოსური სიგნალი $x(t)$. „1“ ბინალური ინფორმაციული სიგნალი კოდირდება ერთი ტიპის $x_1(t)$ ქაოსური სიგნალის გადაცემით და $x_2(t)$ - სხვა ტიპის ქაოსური სიგნალის მეშვეობით, როდესაც გადაეცემა „0“. კონფიდენციალურობის ამაღლების მიზნით ასეთი ქაოსური სიგნალები ირჩევა ისე, რომ მათი სტატისტიკური და სპექტრალური თვისებები ერთმანეთის მსგავსი იყოს.

გადამცემზე ქაოსური რეჟიმები ისე შეირჩევა, რომ მათმა შესაბამისმა სიგნალებმა სინქრონულად მსგავსი სიგნალები გამოავლინოს მხოლოდ საკუთარი ქაოს-პროცესის გამავალზე და იმაზე დამოკიდებულებით რომელი ბინარული სიგნალი მივიდა მმართველ შემავალზე შესაბამისად სინქრონიზრდება ქაოს-პროცესის საწყისი.



ნახ. 2.2 ინფორმაციის გადაცემის სისტემა ქაოსური რეჟიმების გადართვით

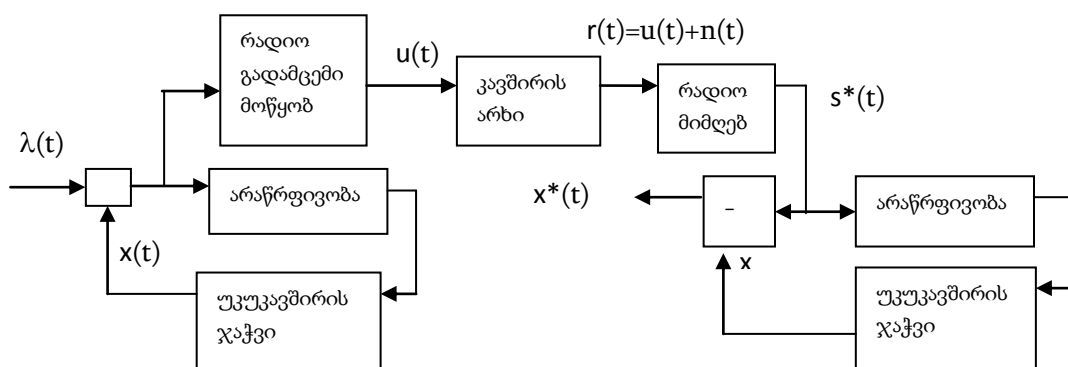
ასეთი მეთოდის უპირატესობა შემდეგში მდგომარეობს: ასეთი მიდგომით მკაცრად არ იზღუდება გამოყენებული ქაოსური სისტემების იდენტურობის ხარისხი გადამცემსა და მიმღებზე და ხმაურის დონე კავშირის არხში. ეს მიდგომა საკმაოდ ეფექტურია, რადგანაც კავშირის არხით გადაცემული ქაოსური სიგნალი ინფორმაციის მატარებელია.

მაგრამ მონაცემთა ფარული გადაცემის ასეთ მეთოდს ერთი მთავარი ნაკლი აქვს: რეჟიმების გადართვისას გადამცემის ქაოსურ სისტემაში წარმოიქმნება გარდამავალი პროცესები, რაც მიმღების ქაოსური სისტემის სინქრონიზაციისას დროით შეყოვნებაში გამოიხატება. აღნიშნული ფაქტორი მნიშვნელოვნად მოქმედებს სქემის ფუნქციონირებაზე და გადართვის სიხშირის ზრდით შეყოვნება შეიძლება გადასაცემი

ინფორმაციული ბიტის ხანგრძლიობის თანაზომადი გახდეს. ამ მეთოდით იზღუდება ინფორმაციის გადაცემის სიჩქარეც.

არაწრფივი დაშიფვრის მეთოდი. არაწრფივი დაშიფვრის მეთოდს (ნახ.2.3) გააჩნია ის თავისებურება, რომ ინფორმაციული სიგნალი უშუალოდ აყალიბებს ქაოს-გენერატორის გამავალ სიგნალს. ინფორმაციის ასეთი შეყვანა არ არის სტანდარტული მოდულაცია და მიმღებ მხარეზე საჭირო სიგნალის მიღება მიმღებში გადამცემისადმი უკუგარდაქმნებს უკავშირდება.

დღეისათვის გარდაქმნების რამოდენიმე წყვილი არსებობს: შეკრება - გამოკლება, გაყოფა - გამრავლება, ფუძით 2 მიმატება მოდულის მიხედვით, ასევე გარდაქმნა ძაბვა-დენი. მეტი გავრცელება ჰპოვეს შეკრება-გამოკლების ოპერაციებზე დაფუძნებულმა სისტემებმა [27,28,29]. საბოლოო სიგნალი უკუკავშირის წრეში შეიყვანება და არაწრფივად გარდაიქმნება. შესაბამისად რადიო გადამცემ დანადგარს გადაეცემა სიგნალი $s(t) = \lambda(t) + x(t)$.



ნახ. 2.3. არაწრფივი დაშიფვრის ინფორმაციის გადაცემის სისტემა

მიმღებ მხარეზე მიმღების უკუკავშირის რღვევის წერტილში ინფორმაციული სიგნალის გამოყოფისათვის შეიტანება გარდამქმნელი, რომელიც უკუგარდაქმნას ასრულებს, უკუკავშირის კვანძში გავლილი სიგნალიდან სიგნალს გარდაქმნის. თუ სისტემა სინქრონიზირებულია

მაშინ გარდამქმნელის გამომავალზე გამოიყოფა ინფორმაციული სიგნალი $X(t)$.

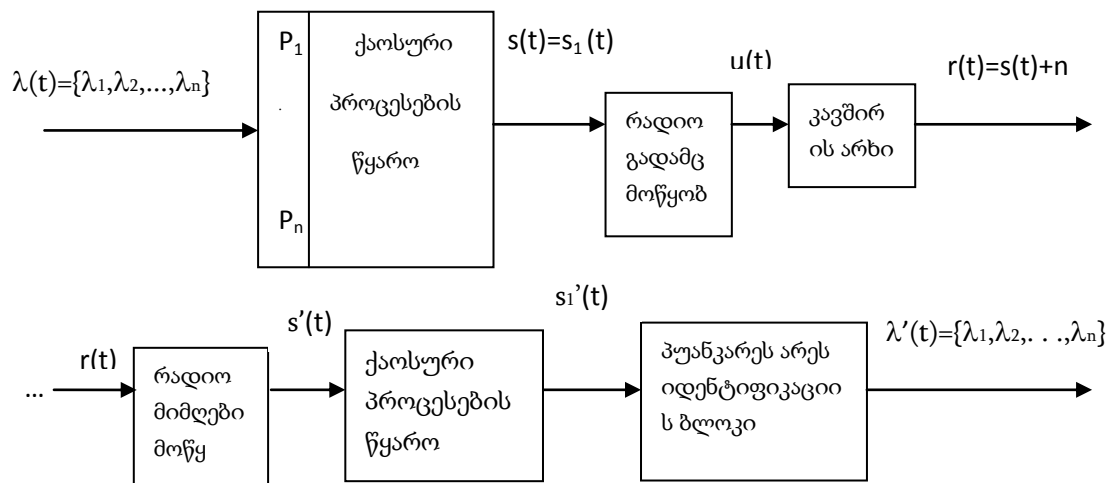
მოცემული მიდგომის განმასხვავებელ თავისებურებას წარმოადგენს ის, რომ შეტყობინების სისმძლავრე შეიძლება იყოს როგორც ნაკლები, ისე ქაოსური სიგნალის შესაბამის მახასიათებლების თანაზომადი ან აღემატებოდეს მათ, რაც დადებითად მოქმედებს მოცემული მიდგომის ენერგეტიკულ ეფექტიანობაზე და გადაცემის ხარისხზე.

გადაცემის კონფიდენციალურობა განისაზღვრება ინფორმაციული სიგნალის დონით და სიგნალის დონის ზრდის შესაბამისად მცირდება. მეორეს მხრივ, სიგნალის გაზრდა ართულებს სინქრონიზატორების აგებულებას და შესაბამისად ამცირებს კავშირის არხში ინფორმაციის მიტაცების შესაძლებლობას.

დუალური არაწრფივი გარდაქმნის მეთოდი. სისტემებში არაწრფივი დუალური გარდაქმნით [29,30,31] გადამცემი ქაოსური სისტემისაგან შედგება, რომელშიც ინფორმაციული სიგნალი შეიტანება. მიმღები გადამცემთან მიმართებით ინვერსიული სისტემაა. სისტემები დუალური არაწრფივი გარდაქმნებით პოტენციურად უზრუნველყოფენ გადაცემის უფრო მაღალ სიჩქარეს, ვიდრე სისტემები ქაოსური გადართვის რეჟიმით, რამდენადაც სინქრონიზაციის მიღწევამდე კავშირის მთელი პერიოდის განმავლობაში გადამცემი და მიმღები სინქრონიზირებულად რჩებიან და არ დესინქრონიზირდებიან ინფორმაციული ბიტის შეცვლის დროს. სისტემები დუალური არაწრფივი გარდაქმნით შესაძლებელია გამოყენებული იქნეს როგორც ანალოგური ისე ციფრული ინფორმაციული სიგნალების გადაცემისათვის.

წინსწრებით მართვა პუანკარეს კვეთით (ნახ. 2.4.). ამ ტიპის მოდულაციაში კოდირებისა და დეკოდირებისათვის გამოიყენება სიმბოლური ანალიზი [32]. ანალოგური ქაოსური სისტემების პუანკარეს კვეთაში იდენტიფიცირდება ორი ან მეტი გაყოფილი უბანი და ინფორმაციის კოდირებისათვის ენიჭებათ განსაზღვრული მნიშვნელობები

(მაგ. ქაოსური პროცესის ერთ ტრაექტორიას პირობითად ენიჭება „0“, მეორეს - „1“). მართვის შესაბამისი მეთოდის დახმარებით გადაცემის სისტემის ფაზური ტრაექტორია მიემართება პუანკარეს კვეთების ერთ-ერთი უბნის გავლით ისე, რომ რეალიზდება გადასაცემი ინფორმაციული სიგნალის შესაბამისი ტრაექტორია. მართვა შეიძლება განხორციელდეს, მაგ. P სტოქსტიური ავტორხევითი სისტემიდან ერთ-ერთი პარამეტრის საზღვრებში უმნიშვნელო შემცირებით გადასაცემი შეტყობინებიდან λ სიმბოლოს შესაბამისად.



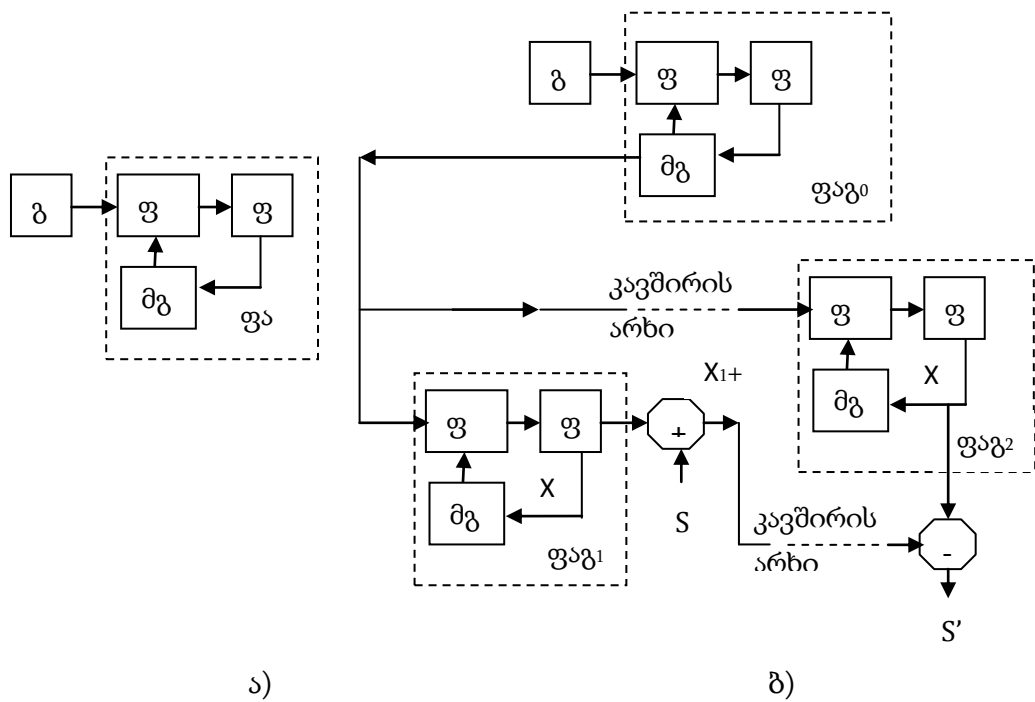
ნახ.2.4. გადაცემის სისტემა პუანკარეს კვეთის წინსწრების მართვით

იდენტური ქაოსური სისტემა მიმღებ მხარეზე გადამცემი სისტემის შესაბამისად მიახლოებით სინქრონიზირდება. სინქრონიზირებულ მიმღებში ინფორმაციული სიგნალი მიიღება პუანკარეს კვეთის შერჩეული უბნის იდენტიფიკაციის გზით ამ უბნების ტრაექტორიის გავლის დროს. იმისათვის, რომ გადასაცემ სიგნალში არსებული ინფორმაცია „დაიმალოს“, მიეწოდება მდგომარეობა ან მდგომარეობის ფუნქცია, რომელსაც აუცილებელი არ არის ჰქონდეს შეხება პუანკარეს კვეთის მდგომარეობასთან. სისტემის ტრაექტორიით პუანკარეს კვეთის გადაკვეთის წინასწარი განსაზღვრით გადამცემმა შეიძლება გამოიყენოს

შეშფოთებისადმი სისტემის მაღალი მგრძობელობა და მცირე დონის სიგნალის დახმარებით უზრუნველყოს არა შეშფოთების სისტემაში ქაოსური სისტემასთან ახლოს მდგომი გადასაცემი ქაოს-პროცესი, ამგვარად შეინარჩუნოს მიმღებში სინქრონიზაციის რეჟიმი.

სიხშირის მიხედვით რეგულირების სისტემის ავტომატური გაწყობა

ინფორმაციის გადაცემის კიდევ ერთი მეთოდია ქაოსური სისტემების გამოყენება ფაზური ავტო გაწყობის სიხშირის მიხედვით [33,34]. ასეთ სისტემებში ინფორმაცია შეიყვანება ფაზების კონტროლის დაბალსიხშირიან ქაოსურ ჯაჭვში. ფაზური ავტომატური სისტემის გაწყობის უპირატესობას წარმოადგენს ქაოსური რხევების სპექტრის უშუალო გაფართოება და რადიო დიაპაზონში რეალიზაციის შედარებითი სიმარტივე.



ნახ.2.5. ა) ფაზური ავტოგაწყობის (ფაგ) გამოყენება ინფორმაციის გადაცემისათვის ქაოსის გამოყენებით ბ) ანალოგური ინფორმაციის გადაცემის სქემა

ნახ.2.5-ზე წარმოდგენილია ფაზური ავტო გაწყობის სისტემის სქემა, რომელიც შედგება უკუკავშირში ჩაკეტილი ფაზური დეტექტორისაგან (ფდ), ფილტრისაგან (ფ) და მმართველი გენერატორისაგან (მგ). დეტექტორს აქვს ორი შემავალი, ერთზე ხვდება სიგნალი მმართველი გენერატორის გამომავლიდან, მეორეზე - საყრდენი გენერატორის (გ) სიგნალი. ჩვეულებრივ ეს სისტემები რეგულირებულ სიგნალებზე მუშაობენ, მათი დანიშნულებაა საყრდენი და მმართველი გენერატორების რხევების სინქრონიზაცია. ამ შემთხვევაში ფილტრებად გამოიყენება პირველი რიგის ფილტრები. შედარებით მაღალი წესრიგის ფილტრების გამოყენების შემთხვევაში სისტემაში შესაძლებელი ხდება ქაოსური რეჟიმის არსებობა.

შრომათა დიდი უმრავლესობა ეძღვნება ქაოსის დახმარებით ინფორმაციის დამუშავებასა და შენახვას, მაგრამ ასევე საინტერესოა ქაოსური სიგნალების გამოყენებით მონაცემთა გადაცემის სისტემა.

2.2. ლორენცის ქაოსური სისტემის მოძრაობის რეჟიმები

ლორენცის ქაოსური გენერატორი წარმოადგენს სამი ცვლადის მქონე არაწრფივ სისტემას, რომელსაც გააჩნია უცნაური ატრაქტორები.

ლორენცის მოდელი წარმოდგენილია შემდეგი განტოლებათა სისტემით:

$$\begin{aligned}\frac{dX}{dt} &= \sigma Y - \sigma X, \\ \frac{dY}{dt} &= -Y + rX - XZ, \\ \frac{dZ}{dt} &= -bZ + XY\end{aligned}$$

(2.1)

სადაც, σ, r, b – მმართველი პარამეტრებია.

ლორენცის მოდელი არის თვით აღზნების ინერციული ხასიათის მქონე ავტორხევადი ტიპის სისტემა. ამასთან ერთად (2.1) სისტემა არის დისიპაციური და ფლობს სხვადასხვა ქაოსურ რეჟიმს.

როდესაც მმართველი პარამეტრები არის დადებითი მნიშვნელობის, ანუ $\sigma, r, b > 0$, მაშინ სისტემის ფაზურ სივრცეში არსებობს ატრაქტორი, რომელიც მდებარეობს სფეროს ფარგლებში ცენტრის წერტილში $(0;0; \sigma + r)$ რადიუსით $K(\sigma + r)$.

(2.1) სისტემას აქვს ორი სტაციონალური მდგომარეობა:

$$1) X_1 = Y_1 = Z_1 = 0$$

$$2) X_2 = Y_2 = \pm\sqrt{b(r-1)}, Z_2 = r - 1.$$

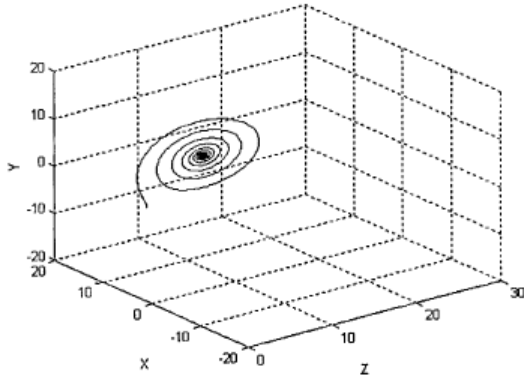
r პარამეტრის სხვადასხვა მნიშვნელობების დროს, ლორენცის მოდელის სისტემას თავის ფაზურ სივრცეში აქვს შესაბამისად სხვადასხვა მდგრადი და არამდგრადი მდგომარეობა და ატრაქტორი.

როდესაც $r < 1$ სისტემას აქვს ერთადერთი მდგრადი სტაციონალური მდგომარეობა კოორდინატთა სათავეში $(0,0,0)$ - მდგრადი ციკლის სახით.

როდესაც $r = 1$ ხდება ჩანგლის ტიპის ბიფურკაცია: უძრავ მდგომარეობაში მყოფი მდგრადი წერტილი ბადებს სხვა ორ უძრავ მდგრად წერტილებს. ამგვარად, სისტემაში აღმოცენდება სრულიად ახალი რეჟიმი, წარმოდგენილი ორი ახალი სტაციონალური მდგომარეობით $(\pm\sqrt{b(r-1)}, \pm\sqrt{b(r-1)}, r - 1)$.

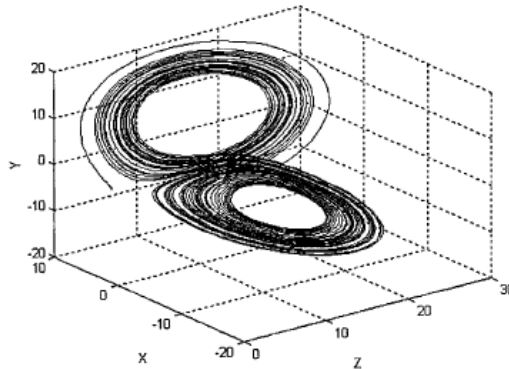
ხოლო, როდესაც $r > 1$ ტრაექტორიები იწყებენ მოძრაობას ორი ახალი მდგრადი მდგომარეობიდან ერთ-ერთის მიმართულებით, როგორც ეს ნაჩვენებია სურათზე 2.6

როდესაც $r \approx 13.926$ ფაზურ სივრცეში არსებობს უნაგირის ტიპის მრავალფეროვანი ტრაექტორიები. როდესაც $13.926 < r < 24.74$ წერტილთა წყვილების მოზიდვის არეები $(\pm\sqrt{b(r-1)}, \pm\sqrt{b(r-1)}, r - 1)$ შეწყვეტენ განსხვავებას. აღნიშნული ილუსტრირებულია ნახ. 2.7 და 2.8-ზე.



ნახ. 2.6 - ლორენცის სისტემის უცნაური ატრაქტორი როდესაც:

$$r = 10, \sigma = 10, b = \frac{8}{3}$$



ნახ. 2.7 - ლორენცის სისტემის უცნაური ატრაქტორი როდესაც:

$$r = 16, \sigma = 10, b = \frac{8}{3}$$

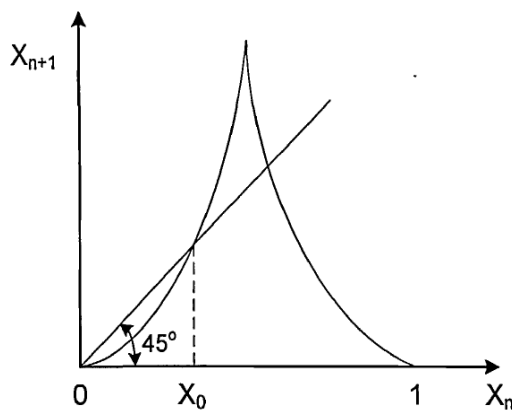
და როცა პარამეტრი r აღწევს მნიშვნელობას:

$$r'_c = \frac{\sigma(\sigma + b + 3)}{\sigma - b - 1},$$

როდესაც $b=8/3$, $\sigma = 10$ ის ტოლია $r'_c = 24,74$. ამასთან ერთად r მმართველი პარამეტრის მნიშვნელობა არის ის სტაციონალური მდგომარეობები, რომლებიც აქამდე იყო მდგრადი; ანუ მდგრადი მდგომარეობა გადადის არამდგრადში და სისტემში ხდება ჰოპფის ბიფურკაცია. როდესაც $r'_c = 24,74$ არსებობს r მმართველი პარამეტრის რამოდენიმე მნიშვნელობა, რომლის დროსაც სისტემა იცვლება: ჩნდება არამდგრადი პერიოდული და აპერიოდული ტრაექტორიები; მაგრამ ამავე

დროს არ არსებობს მიმზიდველი ზღვრული ციკლი, რომელსაც შეესაბამებოდა მდგრადი პერიოდული მოძრაობა.

[36]-ში ნაჩვენები რეჟიმი ჩნდება „მეტასტაბილურ“ ქაოსში (როდესაც $13,926 < r < 24,06$) და გააჩნია ჰისტერიესული ქცევა (როცა $24,06 < r < 24,$ ნახ.2.8-ზე წარმოდგენილია ჰუნკარეს ერთგანზომილებიანი გამოსახულება YZ ატრაქტორის სიბრტყეზე, რომელიც თვალსაჩინოს ხდის მეტასტაბილური ქაოსის მოვლენას. როგორც ნახაზზე ჩანს, ჰუნკარეს ამ გამოსახულების ნაწილს აქვს ერთზე ნაკლები წარმოებული და კოორდინატა სათავეში აქვს მდგრადი უძრავი წერტილი. ნებისმიერი ტრაექტორია, რომელიც თავის სათავეს იღებს წერტილიდან $X < X_0$ მიიზიდება კოორდინატა სათავეს მდგრად წერტილში. ხოლო, ის ტრაექტორიები, რომლებიც გამოდიან წერტილიდან $X > X_0$, გარკვეული დროის განმავლობაში ქაოსურად დახეტიალობენ, სანამდე არ მოხვდებიან არეში $0 < X < X_0$, შემდგომ კი მიზიდულ იქნებიან კოორდინატა სათავეს მდგრად წერტილში. ამასთან ერთად, r პარამეტრის ცვლილებით შეგვიძლია ვარეგულიროთ ამ არეს $((0, X_0)$ ზომა, მივცეთ სასურველი ზომა (მცირე ან დიდი).



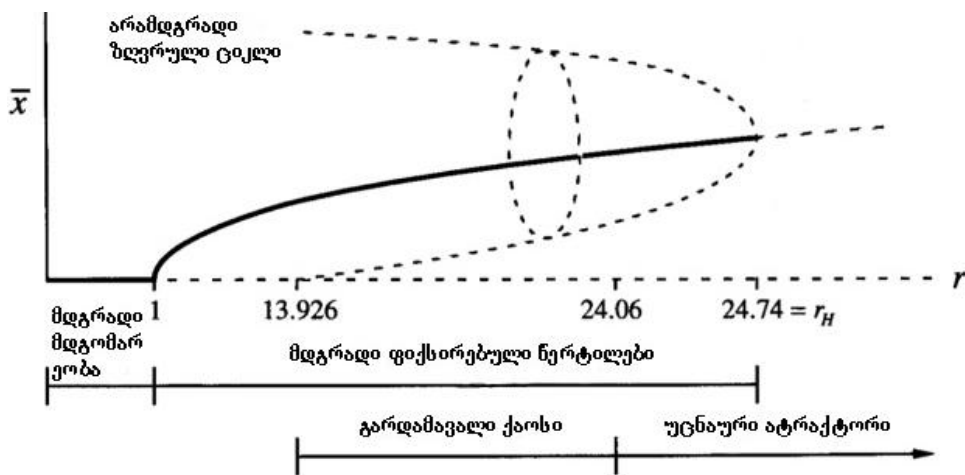
ნახ. 2.8 - ლორენცის ატრაქტორის ერთ-განზომილებიანი ასახვა YZ სიბრტყეზე [36]

შესაბამისად, მეტასტაბილური ქაოსი - უცნაური ატრაქტორია, რომელსაც აქვს რამოდენიმე ნულოვანი ალბათობა გადავიდეს ქაოსური ატრაქტორიდან ზღვრული ციკლის უძრავ წერტილში. მეტასტაბილური

ქაოსი გულისხმობს გარდამავალ რეჟიმს, რომელის დროსაც თითქმის ყველა ტრაექტორია არარეგულარული რხევების დროს საწყის ეტაპზე მისწრაფვის რამე პერიოდულ ტრაექტორიაზე. ასეთი გარდამავალი რეჟიმის ჩაქრობის დროს აადგილი ქვს ექსპონენციალურ განაწილებას.

როდესაც მმართველი პარამეტრი $r > 24.74$ სისტემის მოძრაობა ხდება ქაოსური, ტრაექტორია გარკვეულ დროს განმავლობაში მოძრაობს მდგრადი მდგომარეობის წერტილებიდან $(\pm\sqrt{b(r-1)}, \pm\sqrt{b(r-1)}, r-1)$ სპირალურად; ამასთან ერთად ასრულებს არაპროგნოზირებად ნახტომებს ამ წერტილთა წყვილის სიახლოვეს. სისტემის ასეთი ქცევა იწვევს ფაზურ სივრცეში უცნაური ატრაქტორის გაჩენას.

ზემოთ მოყვანილი სისტემის მოძრაობის სხვადასხვა რეჟიმები, რომლებიც წარმოიქმნება მმართველი პარამეტრის ვარირებისას, ნათლად გამოსახულია სქემაზე 2.9. აქ მთლიანი ხაზები მიუთითებს მდგრად მდგომარეობას, ხოლო დაშტრიხული - არამდგრად მდგომარეობას.



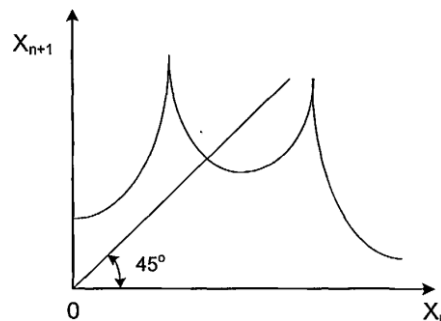
ნახ. 2.9 ბიფურკაციული მოდელი

მმართველი პარამეტრების შემდეგი მნიშვნელობების დროს $24,74 < r < 30,1$ უცნაური ატრაქტორი წარმოადგენს მხოლოდ მდგრად ამონახსნს. ამის შემდეგ, უცნაური ატრაქტორი ნელა ვითარდება მანამდე $r \approx 145$. ამ მომენტიდან ხდება უცნაური ატრაქტორის თვისებების რთული ცვლილებები. ეს პროცესი გრძელდება სანამ $r = 148,4$ და ამასთან ერთად

მმართველი პარამეტრის მნიშვნელობა წარმოქმნის მდგრად ზღვრულ ციკლს.

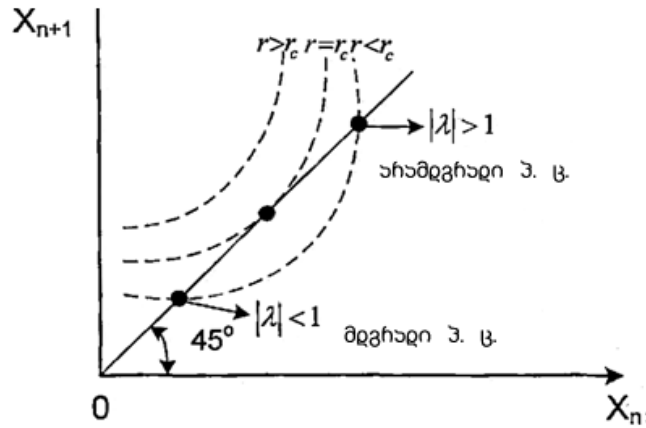
შემდგომ, მნიშვნელობის გაზრდისას $r > r_c = 166,07$ ზღვრული ციკლი, რომელშიც გადაგვარდება უცნაური ატრაქტორი, ხდება არამდგრადი. სისტემაში წარმოიქმნება ახალი დინამიკური რეჟიმი, რომელსაც ეძახიან „მონაცვლეობას“. ეს რეჟიმი ფიზიკურად უძლურია დაამყაროს სინქრონიზაცია ოსცილატორის დისიპაციური არაწრფივ ფაზასა და გარე პერიოდიული აღზნების ფაზებს შორის. შედეგად, იმ მომენტში, როდესაც ზღვრული ციკლი თითქმის იხურება მდგომარეობათა სივრცეში, სისტემაში წარმოიქმნება თრთოლვის მსგავსი რეჟიმი. ის ანგრევს რეგულარულ ტრაექტორიას. ასეთი რეჟიმი ხანმოკლე ინტერვალისგან ქმნის ქაოსურ მოძრაობას, რაც ფართო სპექტრში ხმაურია. შემდგომ სისტემაში ისევ იწყება ზღვრული ციკლი და ყველაფერი იწყება ისევ თავიდან. გარკვეული დროის შემდეგ ხდება, ახალი ქაოსის "აფეთქება", რომლის შემდგომ კვლავ ზღვრული ციკლი იწყება და ა.შ. ასეთი ქაოსური და რეგულარული ფაზების ხანგრძლივობა განაწილებულია შემთხვევითად.

ზემოთ აღწერილი რეჟიმის ილუსტრირება შეგვიძლია პუნკარეს ასახვის მაგალითის გამოყენებით. YZ სიბრტყეზე მმართველი პარამეტრი $r \approx 167$ -ის სიახლოვეს აღმოცენებული ლორენცის ატრაქტორით. აღნიშნული მოყვანილია ნახ. 2.10-ზე.



ნახ. 2.10 - ლორენცის ატრაქტორის ერთ-განზომილებიანი ასახვა YZ სიბრტყეზე [37] უბის რეჟიმის აღმოცენებას. მოცემული ნახაზიდან ჩანს, რომ მრუდის პირველ გადაკვეთაზე ბისექტრისასთან, გვაქვს მდგრადი ფიქსირებული წერტილი.

ის შეესაბამება მდგრად პერიოდულ მოძრაობას. მაგრამ მრუდის გადაადგილებისას აღმოცენდება 2 უძრავი წერტილი, რომლებიც მრუდის შემდგომი მოძრაობისას ერთმანეთს ერწყმიან და შემდეგ საერთოდ ქრებიან.



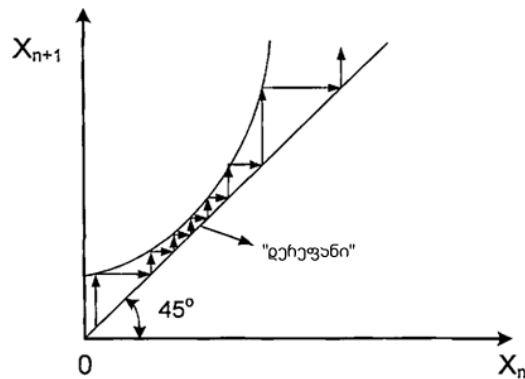
ნახ. 2.11 - ინტერვენტურობის მონაცვლეობა და რეჟიმის წარმოქმნის პირობები

უძრავი წერტილების გაუჩინარების შემდეგ, როდესაც მრუდი კვლავ რჩება ბისექტრისასთან ახლოს, სისტემას ჯერ-ჯერობით ახსოვს ყოფილი მდგრადი ფიქსირებული წერტილი. შესაბამისად სისტემაში არსებობს თითქმის მდგრადი ზღვრული ციკლი გადახრებით პერიოდული რეჟიმიდან, თავიდან - ბოლომდე.

როდესაც მრუდი სცილდება მდგრად წერტილს საკამოდ დიდ მანძილზე, თუ მარცხნიდან დაიწყო იტერაციული პროცესი აღნიშნული წერტილი გადის მრუდსა და ბისექტრისას შორის, შემდეგ შეანლებს თავის მოძრაობას, გაივლის არხით, აჩქარდება და გამოდის არხის მარჯვენა მხრიდან როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 2.12-ზე.

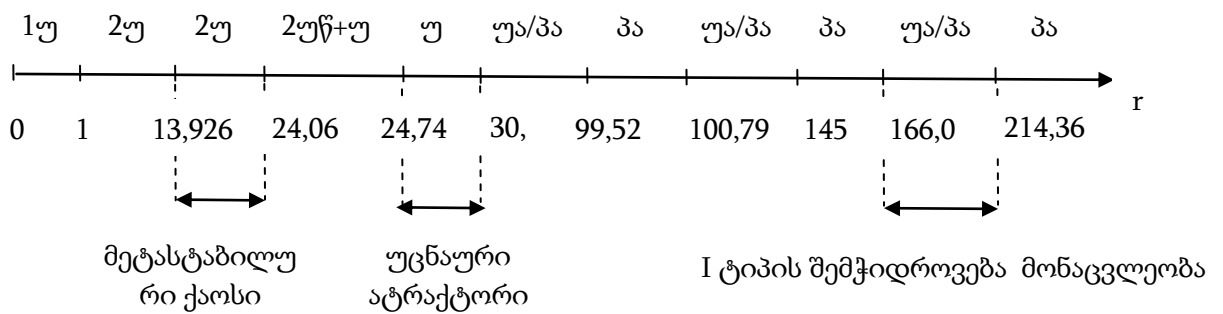
იმ შემთხვევაში, თუ მრუდი კიდევ უფრო ძალიან დასცილდება უძრავ წერტილს, სისტემა გადადის „ტურბოლენტურ“ რეჟიმში. ამ დროს ფაზების სინქრონიზაციისათვის წარმოქმნილი კორელაციები ირღვევიან და სისტემა ასრულებს შემთხვევით ბორიალს მდგომარეობების ფართო არეალში. ქაოსური ფაზების პერიოდი მთავრდება, როდესაც მოძრავი წერტილი მთლიანად მიუახლოვდება ყოფილ მდგრად ზღვრულ ციკლს და ამით

ხელახლა შემოიტანს ტრაექტორიას ყოფილი ფიქსირებული წერტილის სიახლოვეს.



ნახ. 2.12 იტერაციული პროცესის ილუსტრაცია "არხში" ბისექტრისასა და მრუდის ასახვას შორის

ლორენცის მოდელის ანალიზური გამოკვლევა საშუალებას იძლევა სქემატურად წარმოვადგინოთ ატრაქტორების თანმიმდევრობა. იხ. სურათი 2.13 [38].



ნახ. 2.13 ლორენცის მოდელში ატრაქტორების მიმდევრობა შემდეგი მნიშვნელობებისას: $\sigma = 10$, $b = 8/3$

სადაც, უწ - აღნიშნავს უძრავ წერტილს, უა - უცნაური ატრაქტორი, პა - პერიოდული ატრაქტორი, „/“ - სხვადასხვა ატრაქტორების მონაცვლეობა; „+“ - თანაარსებობა.

2.2.1 ლორენცის ატრაქტორის მიერ ინფორმაციის დამუშავების სიჩქარე

ლორენცის ატრაქტორის მიერ წარმოქმნილი ინფორმაციის გამოსათვლელად, შეგვიძლია გამოიყენოთ [37]-ში შემოთავაზებული ერთი მეთოდი, რომელიც შემდეგნაირად გამოიყურება:

როდესაც მოცემულია მმართველი პარამეტრები: $\sigma = 10, B = \frac{8}{3}, r = 28$, პირველ რიგში აუცილებელია ავაგოთ პუნქტარეს ასახვა ამ ატრაქტორის პროექციაზე ZX სიბრტყეზე. ამისათვის, აუცილებელია შევასრულოთ კვეთა ნაკადის პირდაპირ და აღვნიშნოთ მაქსიმალური მნიშვნელობების მიმდევრობა Z ღერძის მიმართულებით.

ატრაქტორიების მიმდევრობით 2-ჯერ გადასვლისას პუნქტარეს კვეთაში დროის ინტერვალის $t(x)$ დაფიქსირებით და $F(x)$ თანმიმდევრობის ფლობით, შეგვიძლია გამოვთვალოთ $P(x)$ ალბათობის სიმკვრივე იტერაციის მეთოდის გამოყენებით. ინფორმაციის წარმოქმნა ტოლია :

$$\langle I \rangle = \int_0^1 P(x) \log_2 \left| \frac{dF(x)}{dx} \right| dx \sim 0,98 \text{ ბიტი იტერაციაზე}$$

ამ შემთხვევაში ინფორმაციის წარმოქმნის სიჩქარე არის:

$$\left\langle \frac{dI}{dt} \right\rangle = \int_0^1 \frac{P(x)}{t(x)} \log_2 \left| \frac{dF(x)}{dx} \right| dx \text{ ბიტი/წამში.}$$

იმ შემთხვევაში, თუ ფუნქცია $P(x)$ არის უცნობი,

$$\left\langle \frac{dI}{dt} \right\rangle = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=i}^n \frac{\log_2 |dF(x)/dx|}{t_n},$$

სადაც, t_n - n-ური გადასვლის მიერ დაკავებული დროის ინტერვალის ხანგრძლივობაა. როგორც ნაჩვენებია [37]-ში ლორენცის ატრაქტორისათვის ინფორმაციის წარმოქმნის სიჩქარე შეადგენს $\sim 1,19$ ბიტი/წმ.

თუ მოცემულია შემდეგი პირობები: საწყისი წერტილი მდებარეობს ინტერვალში $[0,1]$, საიდანაც იწყება იტერაციული ანასახი; $P_0(x)$ განაწილების მქონე გარკვეული განუსაზღვრელობა; აპრიორული განუსაზღვრელობა საწყის წერტილში ტოლია ალბათობის სიმკვრივის

ასიმპტოტური $P(x)$ ფუნქციის (მმართველი პარამეტრის მნიშვნელობა მოცემულია); მაშინ საწყისი პირობების „ინფორმაციული ღირებულება“ განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$S = \int_0^1 P_0(x) \log_2 \left(\frac{P_0(x)}{P(x)} \right) dx \text{ (ბიტი)}$$

სისტემის „მეხსიერება“ წარმოადგენს დროის ინტერვალს, რომლის ამოწურვის შემდეგ ატრაქტორი აღარ არის დამოკიდებული საწყის პირობებზე, მათ საერთოდ “ივიწყებს” და განისაზღვრება შემდეგი სიდიდით:

$$T = \frac{S}{\langle dI/dt \rangle} = \frac{\int_0^1 P_0(x) \log_2 \left(\frac{P_0(x)}{P(x)} \right) dx}{\int_0^1 \frac{P(x)}{t(x)} \log_2 \left(\left| \frac{dF}{dx} \right| \right) dx}$$

ამგვარად, განვითარებადი სისტემა T დროის შემდეგ აჩერებს შენახული ინფორმაციის გადამუშავების პროცესს და თავად იწყებს ახალი ინფორმაციის წარმოქმნას.

ყოველივე ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარეობს, რომ უცნაური ატრაქტორი შეიძლება ჩაითვალოს როგორც ინფორმაციის დამუშავების გარკვეული "მოწყობილობა". როდესაც მმართველი პარამეტრის მნიშვნელობა არის ქაოსის დაწყების ზღვარზე დაბალი და სისტემაში არის მხოლოდ მდგრადი მდგომარეობა და სივრცეში პერიოდული ატრაქტორები მხოლოდ იზიდავენ, და შესაბამისი პუანკარეს ასახვაში იტერაციები სეგმენტზე მონოტონურად გადადიან, ბადებენ ალბათობის სიმკვირვეს, მაშინ $\langle I \rangle < 0$ და სისტემა იქცევა როგორც ინფორმაციის მილი.

იმ შემთხვევაში, როდესაც მმართველი პარამეტრების მნიშვნელობა გადაამეტებს კრიტიკულ რაოდენობას და სისტემაში დგება სრული ქაოსი და სივრცეში თითქმის ყველა მდგომარეობის ტრაექტორია არის არა მდგრადი, მაშინ ზოგიერთი მიმართულების გასწვრივ სივრცეში $\langle I \rangle > 0$ მდგომარეობის დროს, ანუ იქმნება მრავალფეროვნება და იზრდება ენტროპია. ასეთნაირად სისტემა იქცევა წყაროს მსგავსად. გარდა ამისა, უტოლობა $\langle I \rangle < 0$ სრულდება სივრცეში ზოგიერთი სხვა მიმართულების

გასწვრივ, რის შედეგადაც მრავალფეროვნება მცირდება და წამოიქმნება ინფორმაცია (მილი).

აღნიშნული ინფორმაციის წარმოქმნის და დაკარგვის წყალობით, შეგვიძლია ვისაუბროთ დინამიკურ სისტემაზე, როგორც მეტნაკლებად ეფექტურ მოწყობილობაზე, რომელიც დაკავებულია ინფორმაციის დამუშავებით.

2.2.2. ლორენცის ატრაქტორის ინფორმაციული განზომილება

ატრაქტორის ინფორმაციული განზომილება - ეს ძირითადი პარამეტრია, იგი ინფორმაციის შეკუმშვის მოწყობილებაა. სიდიდე მიუთითებს, თუ რა რაოდენობის ინფორმაცია არის აუცილებელი, რომ განსაზღვრული სიზუსტით მიეთითოს წერტილები ატრაქტორზე. ინფორმაციული განზომილება შეიძლება განისაზღვროს როგორც ბიტების რიცხვი, რომლებიც შეიძლება დინამიურად შეინახოს ატრაქტორმა.

დისიპაციური დინამიკური სისტემის საწყისი მდგომარეობის ევკლიდეს სივრცეს დიდი ან თითქმის უსაზღვრო განზომილება აქვს. მაგრამ რაღაცა დროის განმავლობაში როდესაც გარდამავალი პროცესები სრულდება, სისტემის მდგომარეობის აღმწერი წერტილი უახლოვდება ატრაქტორს. რადგან დამოუკიდებელი ცვლადების რაოდენობა დამოუკიდებელი ცვლადების რაოდენობაზე ნაკლები ხდება, რომლებსაც ანიჭებენ საწყისი თვითნებური პირობები, თავისუფლების ხარისხი მცირდება. ასეთი განსხვავება ევკლიდური სივრცის მდგომარეობის განზომილებასა და ატრაქტორის ინფორმაციულ განზომილებას შორის არის ატრაქტორის შეკუმშვის საშუალო ხარისხი.

ატრაქტორის ინფორმაციული განზომილების განსაზღვრისათვის ავტორი გვთავაზობს [38] რიგი გამოთვლების შესრულებას.

თავდაპირველად, მდგომარეობათა სივრცე უნდა დავყოთ $e^{-N}N$ უჯრებად, რომელთაგან თითოეულის ზომაა N , სადაც e - გარჩევადობა და ჩავთვლით, რომ $n(e)$ - იმ უჯრების რაოდენობაა, რომლებიც ფარავენ ატრაქტორს ნულოვანი ალბათობით. მას შემდეგ, რაც სივრცის ზოგ არეში ნაკადი უფრო სხვებზე ხშირად ხდება, ვიდრე ზოგიერთ უჯრებში, მაშინ ზოგიერთ უჯრაში იქნება უფრო მეტი წერტილი ვიდრე სხვებში.

მონაცემთა საშუალო რაოდენობა, რომელსაც შეიცავს ცალკეული განზომილება, ტოლია:

$$I(\varepsilon) = -\sum_{i=1}^n P_1(e) \log_2 P_1(e) \text{ [ბიტი]}$$

სადაც $P_1(e)$ – სიმკვრივის ალბათობა, რომ ატრაქტორი მოხვდება i -ურ უჯრაში.

ჯ. ნიკოლისი [51] ამტკიცებს, რომ ინფორმაციული განზომილება D_I ეს არის ინფორმაციის მოცულობის ზრდის სიჩქარე, როდესაც განზომილება იზრდება გარკვეული სიზუსტით:

$$D_I = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left[\frac{I(\varepsilon)}{|\log_2 \varepsilon|} \right] \tag{2.2}$$

(2.2) ფორმულიდან ჩანს, რომ ინფორმაციული განზომილება D_I განისაზღვრება $I(\varepsilon)$ გრაფიკის კუთხური კოეფიციენტის ასიმპტოტური მნიშვნელობით და დამოკიდებულია $\log_2(1/\varepsilon)$ -ზე.

ამიტომ, თუ ცნობილია ატრაქტორის ინფორმაციის ზომა, მაშინ ერთ განზომილებაში ინფორმაციის მოცულობა ტოლია : $I(\varepsilon) = D_I |\log_2 \varepsilon|$

და თუ ყველა უჯრედების დატეხვის ალბათობა თანაბარია, მაშინ $I(\varepsilon) = \log_2 n(\varepsilon)$.

ასეთ შემთხვევაში ინფორმაციის ზომა მაშინ იქნება მაქსიმალური, როდესაც დაემთხვევა ფრაქტალურ ზომას, რომელიც ტოლია:

$$D_F = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log_2 [n(\varepsilon)]}{\log_2 (1/\varepsilon)}$$

აღნიშნულიდან გამომდინარეობს, რომ ინფორმაციული განზომილების ზემოთა ზღვარი არის ფრაქტალური ზომა.

(2.2) ფორმულა არ გვაძლევს იმის საშუალებას, რომ ზუსტად გამოვთვალოთ ინფორმაციის ატრაქტორის განზომილება. პრაქტიკაში e -ს ზღუდავენ შიდა ფლუქტუაციები სისტემაშიც და გასაზომ მოწყობილობაშიც.

იმისათვის, რომ შევაფასოთ e -ს ოპტიმალური და არა 0-ოვანი უნარი, აუცილებელია განვსაზღვროთ $C_I = N - D_I$ ატრაქტორის შეკუმშვის საშუალო დონე, გამოვთვალოთ კრიტიკული დონე e^* , როდესაც D_I აღწევს მაქსიმუმს.

რადგანაც ინფორმაციის მაქსიმალური განზომილებაა D_I , მოცემული არანულოვანი უნარის დროს e არის ატრაქტორის ფრაქტალური განზომილება, რომელსაც აღწევს როდესაც $P_i(e) = const = 1/n(e)$.

შესაბამისად,

$$D_I = \frac{\ln[n(e)]}{\ln e}$$

და

$$C_I = N + \frac{\ln[n(e)]}{\ln e} = \frac{N \ln e + \ln[n(e)]}{\ln e} = \frac{\ln[e^N n(e)]}{\ln e}$$

(2.3)

ამჯერად ვივარაუდოთ, რომ M - წერტილების რაოდენობაა პუანკარეს ერთგანზომილებიან პერიოდულ ანასახზე, რომლიც წარმოქმნილია ლორენცის ატრაქტორის მიერ. ანუ, ორბიტა - სტრიქონი, რომელსაც აქვს M სიმბოლოების სიგრძე. უჯრების რაოდენობა, რომლებიც წარმოადგენენ ატრაქტორს, ტოლია $n(e)$, სადაც e - უჯრის დიამეტრია. თუკი შესაძლებელია M სიმბოლოების ყველა საწყისი ორბიტა ზუსტად განისაზღვროს, მაშინ e -ს აზრი ექნება.

რადგანაც სისტემის დინამიკა ყოველ ნიბიჯზე წარმოდგება ორი მდგომარეობით (მაგალითად 0 და 1), გამოსავალის რაოდენობა ტოლია 2^M . შესაბამისად, e აირჩევა ისე, რომ

$$e \sim \frac{1}{2^M}$$

რადგანაც ატრაქტორი წარმოდგენილია M - წერტილებით, მაშინ დრო იქნება t_c , რომლის დროსაც აირჩევა თითოეული ელემენტი. ამგვარად, აზრი აქვს:

$$\frac{n(e)}{M} \sim t_c$$

რადგანაც, უცნაურ ატრაქტორს გააჩნია ქაოსური ხასიათი, t_c დროის შემდეგ სისტემა მთლიანად დაივიწყებს საწყის პირობებს. t_c შეგვიძლია შევაფასოთ, როგორც

$$e^{-\lambda_+ t_c} \sim 1,$$

სადაც λ_+ -ლიაპუნოვის დადებითი მაჩვენებელია. შესაბამისად,

$$t_c \sim \frac{\ln(1/e)}{\lambda_+}$$

და საბოლოოდ

$$n(\varepsilon) = \frac{\ln^2(1/e)}{\lambda_+ \ln 2}$$

$n(\varepsilon)$ -სთვის მიღებული გამოსახულება ჩავსვათ (2.3) ფორმულაში, C_I -სთვის მივიღებთ:

$$C_I = N + \frac{2 \ln^2(\ln(1/e)) + \ln\left(\frac{1}{\lambda_+ \ln 2}\right)}{\ln e}$$

ან

$$C_I = N + \frac{2 \ln^2(\ln(1/e)) + \gamma}{\ln e}$$

სადაც, $\gamma = \ln\left[\frac{1}{\lambda_+ \ln 2}\right]$

ინფორმაციის მაქსიმალური განზომილების შემთხვევაში $\frac{\partial C_I}{\partial \varepsilon} = 0$, ოპტიმალური გაფართოვების სიდიდე:

$$\dot{\varepsilon} = \exp\left[-e^{-(2-\gamma)/2}\right];$$

ხოლო კოდის ოპტიმალური სიგრძე

$$M = \frac{\ln(1/\dot{\varepsilon})}{\ln 2}$$

და მაშინ

$$C_I = N - 2e^{-(2-\gamma)/2} \text{ [ბიტი].}$$

ზემოთ აღწერილი ფორმულების გამოთვლების და კომპიუტერის გამოყენების შედეგად, შეგვიძლია განვსაზღვროთ, რომ ლორენცის ატრაქტორისათვის მმართველი პარამეტრების დროს: $b = 4, \sigma = 16, r \approx 45,92$ ლიაპუნოვის დადებითი მაჩვენებელი $\lambda_+ \sim 1,5$, შესაბამისად $\gamma \sim -0,03895$. ამასთან ერთად, ატრაქტორის ინფორმაციის განზომილება $D_I \approx 0,721$, ხოლო შემჭიდროვების საშუალო ხარისხი ტოლია $C_{I(\epsilon)} \sim 3 - 0,72157 \sim 2,28$, დასაშვები მნიშვნელობა $e \sim 0,062$ და სტრიქონის (ორბიტის) სიგრძე: $M^* \sim 4$. ანუ, ოპტიმალურ კოდს, რომელიც ახდენს ლორენცის ატრაქტორის „მეხსიერების“ მოცულობის მაქსიმიზაციას, აქვს სიგრძე ~ 4 ბიტი. მიუხედავად იმისა, რომ იმაზე მეტი ინფორმაცია იკუმშება, ვიდრე ჩვენ ეს შევაფასეთ, როდესაც ვითვლიდით ინფორმაციის განზომილებას $e \rightarrow 0$ $C(0) = 3 - 2,06 = 0,94$ მნიშვნელობების დროს.

2.3. დინამიკური სისტემის გლობალური რეკონსტრუქცია

მოცემულ თავში წარმოდგენილია დინამიკური სისტემების გლობალური რეკონსტრუქციის მეთოდი კავშირის არხით გადასაცემი ინფორმაციის დაცვისათვის.

1 თავში ყველა აღწერილი არაწრფივი დინამიკის ალგორითმები გასაანალიზებელი სისტემის აღმწერ ცვლადების არსებობას გულისხმობენ. პრაქტიკაში ხშირად არ არის იმის შესაძლებლობა, რომ მოხდეს სისტემის მდგომარეობის ყველა ცვლადზე დაკვირვება. ასევე არ არსებობს ინფორმაცია შემავალ ზემოქმედებებზე. ხშირად ხელმისაწვდომია დაკვირვება ერთ ან რამოდენიმე მდგომარეობის კოორდინატზე. ამ შემთხვევაში აუცილებელია გატარდეს დანარჩენი პარამეტრების ქცევის რეკონსტრუქცია ექსპერიმენტალური მონაცემების შეზღუდული შერჩევით. როდესაც უცნობია შემავალი სიგნალის გარდაქმნის ოპერატორები,

სიტუაცია მიდის იდენტიფიკაციის ამოცანის წარმოქმნამდე და „შავი ყუთის“ კონცეფციამდე. თუმცა სავალდებულო არ არის შემავალი სიგნალის არსებობა. დინამიკური სისტემის რეკონსტრუქცია ნიშნავს მოდელური სისტემის აღდგენას ექსპერიმენტალური დროითი t რიგის მიხედვით.

[35] ნაშრომში აღწერილი დინამიკური სისტემის გლობალური რეკონსტრუქციის ალგორითმის მიზანს წარმოადგენს საკვლევი დინამიკური სისტემის მათემატიკური მოდელის აგება. ამისათვის დინამიკური სისტემა წარმოვადგინოთ n განზომილებიან დისკრეტულ გამოსახულებად.

$$\begin{aligned} X_{j,i+1} &= F_j(X_{1,i}, X_{2,i}, \dots, X_{n,i}), \\ &\dots\dots\dots \\ X_{n,i+1} &= F_n(X_{1,i}, X_{2,i}, \dots, X_{n,i}) \end{aligned} \quad (2.4)$$

სადაც, $X_{j,i}$ - მდგომარეობის ვექტორის კოორდინატებია, რომელიც განიხილება $-i\Delta t$ დროის მომენტში; F_j - არაწრფივი ფუნქციები.

ამ ეტაპზე დინამიკური სისტემის მათემატიკური მოდელის აგების ძირითადი პრობლემა არის არჩევანის გაკეთება. გადასაწყვეტია, მარჯვენა მხარიდან კონკრეტული ტიპის რომელი F_j ფუნქცია ავირჩიოთ. როგორც წესი, ფუნქციის ტიპი აირჩევა აპრიორულად, თვითნებურად. პრაქტიკულად შეუძლებელია F_j ფუნქციის კონკრეტულ ტიპის გამოცნობა. თუმცა, გამოცდილებიდან გამომდინარე შეგვიძლია გადავარჩიოთ ყველა ცნობილი ტიპი და ასე შევარჩიოთ ემპირიულად.

ხშირად F_j წარმოდგება ზოგიერთი X_k ბაზური ფუნქციის სუპერპოზიციად:

$$F_j(X_{1,i}, X_{2,i}, \dots, X_{n,i}) = \sum_{k=1}^L C_{k,j} X_k(X_{1,i}, X_{2,i}, \dots, X_{n,i}), \quad (2.5)$$

ან ν ხარისხის პოლინომების სახით:

$$F_j(\vec{x}_i) = \sum_{l_1, l_2, \dots, l_n=0}^{\nu} C_{j, l_1, \dots, l_n} \prod_{k=1}^n X_{k,i}^{l_k}, \quad \sum_{k=1}^n l_k \leq \nu \quad (2.6)$$

სადაც,

C_{j, l_1, \dots, l_n} - მოსაძებნი უცნობი კოეფიციენტებია.

F_j ფუნქციის ყველა კოეფიციენტის მოსაძებნად აუცილებელია ამოვხსნათ N წრფივი ალგებრული განტოლებათა სისტემა

$$X_{j,i+1} = \sum_{l_1, l_2, \dots, l_n=0}^v C_{j, l_1, \dots, l_n} \prod_{k=1}^n X_{k,i}^{l_k}, \quad i = 1, \dots, N \quad (2.7)$$

უცნობებით C_{j, l_1, \dots, l_n} , რომლებშიც N - სკალარული მწკრივის წერტილების რაოდენობა v - პოლინომის ხარისხი.

K პოლინომების კოეფიციენტების საერთო რაოდენობა შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით: $K = \frac{(n+v)!}{n!v!}$ როდესაც n და v -ს მნიშვნელობები წინდაწინ მოცემულია. იმ შემთხვევაში, თუ $N \gg K$ ევოლუციის კონკრეტული ოპერატორის განსასაზღვრად აუცილებელია ამოვხსნათ (2.7) სისტემა უმცირესი კვადრატების მეთოდით.

დინამიკური სისტემის მსგავსი ფორმით აღდგენა შესაძლებელია 1 რიგის ჩვეულებრივი დიფერენციალური განტოლებების სისტემის სახით:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= F_1(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ &\dots \\ \frac{dx_n}{dt} &= F_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (2.8)$$

რადგანაც F_j ფუნქციის აზრი არ შეცვლილა, ხოლო ალგორითმის რეკონსტრუქციის პირველ საფეხურზე ფაზური ტრაექტორიის არსებობა ადასტურებს იმას, რომ ყველა x_i არის ცნობილი და მათი წარმოებულები გამოითვლება რიცხვითი საშუალებით. ამიტომ (2.8) წარმოადგენს ალგებრულ განტოლებათა სისტემას, რომელიც არის წრფივი უცნობი კოეფიციენტების მიმართ.

მათემატიკური მოდელი შეიძლება ადვილად აღდგეს უფრო მარტივი გზით; თუ ფაზურ სივრცეში მდგომარეობის ვექტორი მოცემულია მიმდევრობითი დიფერენციაციის მიხედვით და კოორდინატებს შორის ურთიერთობა ცალსახად არის განსაზღვრული $\vec{x}(t) = (x_1, x_2, \dots, x_n)$:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2, \frac{dx_2}{dt} = x_3, \dots, \frac{dx_n}{dt} = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.9)$$

ამდენად, ზემოთ მოყვანილი ალგორითმი საშუალებას იძლევა, მოიყვანოს მათემატიკური მოდელი სკალარული დროის რიგში.

2.3.1 გადაცემული ინფორმაციის რეკონსტრუქციისადმი ზოგადი მიდგომა

[39,40] თავებში განხილულია პარამეტრებით მოდელირებული ქაოსური გენერატორების გამოყენებით ინფორმაციული სიგნალების რეკონსტრუქციისადმი ზოგადი მიდგომა. ამ მეთოდის არსი მდგომარეობს შემდეგში.

დინამიკური სისტემის საწყისი სახე, რომელიც დამუშავების სიგნალს ქმნის, არის გამოსახულება:

$$\frac{dx}{dt} = F(x, \mu^0), \quad x \in R^n, \quad \mu^0 \in R^m \quad (2.10)$$

სადაც x - გენერატორის მდგომარეობის ცვლადების ვექტორი, F - ქაოსური გენერატორის მოდელის მარჯვენა ნაწილის ვექტორი, μ^0 - ქაოსური გენერატორის მუდმივი პარამეტრების ვექტორი (მათი ნომინალური მნიშვნელობა).

μ^0 ვექტორის ცალკეული პარამეტრები საკმაოდ ნელა მოდელირდებიან გადამცემ ინფორმაციულ სიგნალებად $\mu_i(t)$. რის შედეგადაც წარმოიქმნება ქაოსური გენერატორის ახალი პარამეტრები:

$$\mu_i^*(t) = \mu_i^0 + \mu_i(t), \quad i = 1, \dots, m \quad (2.11)$$

ნელი მოდულაციის პირობები შეიძლება წარმოდგენილი იყოს შემდეგი უტოლობის სახით:

$$\left| \frac{d\mu_i}{dt} \right| \ll \left| \frac{dx_j}{dt} \right| \quad (2.12)$$

ნებისმიერი i და j -სათვის.

მაშინ (2.11)-ის გათვალისწინებით (2.10) განტოლებათა სისტემა შეიცვლება შემდეგნაირად:

$$\frac{dx}{dt} = F(x, \mu^0 + \mu(t)), \quad (2.13)$$

$$\text{სადაც, } \mu^0 = (\mu_1^0, \mu_2^0, \dots, \mu_m^0), \quad \mu(t) = (\mu_1(t), \mu_2(t), \dots, \mu_m(t)).$$

(2.13) მოდელის ზოგიერთი ცვლადის შეცვლით (თითოეული ტიპის ქაოსური გენერატორისთვის ეს ჩანაცვლება სხვადასხვაა) იგი გარდაქმნება შემდეგი სახით:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2; \\ \frac{dx_2}{dt} &= x_3; \\ &\dots \\ \frac{dx_{n-1}}{dt} &= x_n; \\ \frac{dx_n}{dt} &= f(x, \mu^*) \end{aligned} \quad (2.14)$$

შემდეგ, $x_n(t)$ სიგნალი გადაეცემა კავშირის არხზე.

ხოლო მიმღებ მხარეს, $x_1(t), \dots, x_{n-1}(t)$ სიგნალების მნიშვნელობები მიღებულია თანამიმდევრულად რიცხვითი (ან აპარატურული) ინტეგრაციით, (2.14) განტოლებათა სისტემის შესაბამისად.

$x_i(t), i = 1, \dots, n$ სიგნალების ცნობილი მნიშვნელობებიდან μ^* უცნობი პარამეტრები მიმღებ მხარეს, მოიძებნება განტოლებიდან მცირე კვადრატების მეთოდით

$$f(x, \mu^*) = 0 \quad (2.15)$$

საბოლოოდ, რეკონსტრუირებული ინფორმაციული სიგნალები მიღებულია (2.11) გამოსახულებიდან, (2.15) ის გათვალისწინებით ანუ

$$\widehat{\mu}_i(t) = \widehat{\mu}_i^*(t) - \mu_i^0,$$

სადაც, $\widehat{\mu}_i(t)$ - რეკონსტრუირებული ინფორმაციული სიგნალია, $\widehat{\mu}_i^*(t)$ - განახლებული მოდულირებული პარამეტრი.

[53]-ში გამოყენებული რეკონსტრუქციული მიდგომა არსებითად სტატიკურია.

გარდა ამისა, განვიხილოთ უცნობ პარამეტრებზე დინამიკური დამკვირვებლის აგება, რომელიც ეფუძნება სინერგეტიკული მართვის თეორიას (სმთ). რომელიც პროფესორ ა. ა. კოლესნიკოვმა განავრცო თავის ნამუშევრებში. [41,42].

2.3.2. სინერგეტიკული დამკვირვებლის აგება

დამკვირვებლის აგება განვიხილოთ კონკრეტული მაგალითის მიხედვით - ავადობის ქაოსური გენერატორის დამკვირვებელი ლორენცის მოდელით [4].

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \sigma(y - x); \\ \frac{dy}{dt} &= rx - y - xz; \\ \frac{dz}{dt} &= -bz + xy\end{aligned}\tag{2.16}$$

სადაც, $x = (x, y, z)$ - ცვლადების მდგომარეობის ვექტორია, $\mu^0 = (\sigma, r, b)$ - მუდმივი (ნომინალური) პარამეტრების ვექტორი.

ჩვენი მოდელი გარდავქმნათ შემდეგი სახით. ამისათვის შევცვალოთ ცვლადები [53]:

$$X = x; Y = \sigma(y - x); Z = \sigma((r + \sigma)x - (\sigma + 1)y - xz).$$

შედეგად ვიღებთ ახალ სისტემას

$$\begin{aligned}\frac{dX}{dt} &= Y; \\ \frac{dY}{dt} &= Z; \\ \frac{dZ}{dt} &= f(X, Y, Z, \mu^0)\end{aligned}\tag{2.17}$$

სადაც

$$f(X, Y, Z, \mu^0) = b\sigma Xr_i - b(\sigma + 1)Y - (b + \sigma + 1)Z - X^2Y - \sigma X^3 + \frac{Y((\sigma + 1)Y + Z)}{X}\tag{2.18}$$

$$r_i = r - 1.$$

ამგვარად, გვაქვს ლორენცის ქაოსური გენერატორის ახალი პარამეტრი

$$r^*(t) = r + \mu(t) . \quad (2.19)$$

(2.17) სისტემის მიერ წარმოქმნილი $Z(t)$ სიგნალი გადაეცემა კავშირის არხზე (2.18), (2.19) -ის გათვალისწინებით.

მისაღებია შემდეგი ვარაუდები:

- მოდულაციის სიგნალი $\mu(t)$ არის მუდმივი ნაწილაკი, ანუ ხდება ციფრული ინფორმაციის გადაცემა;
- σb პარამეტრები - ცნობილია, ხოლო r პარამეტრი არის მოდულირებული, ამასთან ერთად $r > 0$.

როგორც ცნობილია [52]-დან, r პარამეტრის მნიშვნელობის მიხედვით (σ, b -ს, მუდმივობის დროს) აღმოცენდება ქაოსური რეჟიმი. როდესაც $24,74 < r < 30,1$ ლორენცის სისტემაში (2.16) აღინიშნება ფუნქციონირების ქაოტური რეჟიმი, ანუ ქაოსური რხევების გენერაცია.

მიმღებ მხარეს (2.17) სისტემისათვის ავაგოთ დამკვირვებელი, პარამეტრის შემდეგი მნიშვნელობისათვის: $r_i = r - 1$. სინერგეტიკული მართვის თეორიის შესაბამისად, (2.17) სისტემის პარამეტრის r_i -ის დამკვირვებლის ასაგებად, აუცილებლად უნდა შეიცვალოს უცნობი პარამეტრი მისი დინამიკური მოდელით, რომელიც ასახავს ამ პარამეტრის ევოლუციას. ჩვენს შემთხვევაში ეს არის მოდელი

$$\frac{dw}{dt} = 0$$

რადგანაც ამ დიფერენციალური განტოლების ამონახსენი არის $w(t) = const$ და ის ასახავს r_i პარამეტრის მუდმივობას.

აღნიშნულის საფუძველზე, ჩამოვყალიბოთ შემდეგი გაფართოვებული სისტემა, რომელიც გამოიყენება დამკვირვებლის სინთეზის პროცედურაში [55,56]:

$$\frac{dX}{dt} = Y;$$

$$\frac{dY}{dt} = Z;$$

$$\frac{dZ}{dt} = b\sigma Xw - b(\sigma + 1)Y - (b + \sigma + 1)Z - X^2Y - \sigma X^3 + \frac{Y((\sigma + 1)Y + Z)}{X};$$

$$\frac{dw}{dt} = 0$$

ახ

$$\frac{dX}{dt} = Y;$$

$$\frac{dY}{dt} = Z;$$

(2.20)

$$\frac{dZ}{dt} = b\sigma Xw + G_i$$

;

$$\frac{dw}{dt} = 0$$

სადაც,

$$G_i = -b(\sigma + 1)Y - (b + \sigma + 1)Z - X^2Y - \sigma X^3 + \frac{Y((\sigma + 1)Y + Z)}{X}$$

w - დინამიკური მოდელის მუდმივი მდგომარეობის პარამეტრი r_i -ის ცვლადი.

როგორც ჩანს, (2.20) სისტემაში (2.17)-ისგან განსხვავებით, r_i პარამეტრი შეცვლილია დინამიკური მოდელის მუდმივი მდგომარეობის პარამეტრის ცვლადით w . (2.20) სისტემაში დაკვირვებადი (ცნობილი) არის X , Y , Z და ცვლადები ხოლო არა დაკვირვებადი (უცნობი) ცვლადი - w .

დავუშვათ \hat{w} - სამეზნი r_i პარამეტრის შეფასებაა და $\hat{w} = \hat{r}_i$. პარამეტრის შეფასების შესაქმნელად შემოვიტანოთ მაკრო ცვლადი

$$\psi = w - \hat{w} \tag{2.21}$$

და ჩავწეროთ დაყვანის განტოლება

$$\hat{w} = Q(X, Y, Z) + v_i$$

სადაც, $Q(X, Y, Z)$ - უცნობი ფუნქცია, (2.20) სისტემის მდგომარეობის დაკვირვების ცვლადის (2.20), v_i - დინამიკური მდგომარეობის დამკვირვებლის ცვლადი.

განტოლების რედუქციის წარმოებულ დროის მიხედვით

$$\frac{d\hat{w}}{dt} = 0 - \left(\frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial X} \frac{dX}{dt} + \frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Y} \frac{dY}{dt} + \frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Z} \frac{dZ}{dt} + \frac{dv_i}{dt} \right) \quad (2.22)$$

(2.21) მაკროცვლადი უნდა აკმაყოფილებდეს სინერგეტიკული მართვის თეორიის ფუნქციონალურ განტოლებას:

$$\frac{d\psi}{dt} + L(X, Y, Z)\psi = 0, \quad (2.23)$$

სადაც $L(X, Y, Z)$ - არის უცნობი ფუნქცია, რომელიც უზრუნველყოფს (3.33) განტოლების მდგრადობას.

მაკრო ცვლადის წარმოებული დროის მიხედვით (2.21)

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{dw}{dt} = \frac{d\hat{w}}{dt}$$

ეს განტოლება შევცვალოთ შესაბამისი გამოსახულებით

წარმოებულებისათვის (2.20) და (2.22) -დან, მივიღებთ

$$\begin{aligned} \frac{d\psi}{dt} &= 0 - \left(\frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial X} \frac{dX}{dt} + \frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Y} \frac{dY}{dt} + \frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Z} \frac{dZ}{dt} + \frac{dv_i}{dt} \right) \\ &= - \frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial X} \frac{dX}{dt} - \frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Y} \frac{dY}{dt} - \frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Z} \frac{dZ}{dt} - \frac{dv_i}{dt} \end{aligned}$$

განტოლება შევცვალოთ (2.23)-ში (2.21)-ის გათვალისწინებით,

გვექნება:

$$\begin{aligned} - \frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial X} \frac{dX}{dt} - \frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Y} \frac{dY}{dt} - \frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Z} \frac{dZ}{dt} - \frac{dv_i}{dt} + L(X, Y, Z)(w - \hat{w}) \\ = 0 \end{aligned}$$

შევცვალოთ ამ განტოლებაში შესაბამისი გამოსახულებები წარმოებული X ,

Y, Z ცვლადები სათვის (2.20)-დან, მივიღებთ:

$$- \frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial X} Y - \frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Y} Z - \frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Z} (b\sigma X w + G_i) - \frac{dv_i}{dt} + L(X, Y, Z)(w - \hat{w}) = 0 \quad (2.24)$$

რადგანაც, დამკვირვებლის განტოლება არ უნდა შეიცავდეს არადაკვირვებად მდგომარეობის ცვლადებს, აუცილებელია ამოვწეროთ ბოლო განტოლებიდან ყველა შესაკრები, რომელიც შეიცავს არადაკვირვებად w ცვლადს:

$$w \left(- \frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Z} b\sigma X + L(X, Y, Z) \right) = 0,$$

მიღებული ტოლობა სრულდება შემდეგი პირობის დაკმაყოფილების დროს:

$$-\frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Z} b\sigma X + L(X, Y, Z) = 0 \quad (2.25)$$

ისე, როგორც $w \neq 0$.

(2.25)-დან ჩანს, რომ

$$\frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Z} = \frac{L(X, Y, Z)}{b\sigma X}$$

გაინტეგრალებით მივიღებთ:

$$Q(X, Y, Z) = \frac{L(X, Y, Z)}{b\sigma X} Z \quad (2.26)$$

მიღებული თანაფარდობის გათვალისწინებით გვექნება:

$$L(X, Y, Z) = aX^2 \quad (2.27)$$

სადაც, $a > 0$ - მუდმივი კოეფიციენტია, რომელიც ადგენს უცნობი პარამეტრის r_i დინამიკას (სიჩქარე).

(2.26) და (2.27)დან გვაქვს:

$$Q(X, Y, Z) = \frac{a}{b\sigma} ZY \quad (2.28)$$

ეხლა, ვიცით რა $Q(X, Y, Z)$ (3.38) და $L(X, Y, Z)$ ჩვენ შეგვიძლია (2.24)-დან დავწეროთ დამკვირვებლის დინამიკური შემფოთების განტოლება:

$$\frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial X} Y - \frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Z} G_i - L(X, Y, Z) \hat{w} = -\left(\frac{a}{b\sigma} Z\right) Y - \left(\frac{a}{b\sigma} X\right) G_i - aX^2 \left(\frac{a}{b\sigma} XZ + v_i\right), \quad (2.29)$$

რადგან $\frac{\partial Q(X, Y, Z)}{\partial Y} = 0$.

ასევე გამოსახულება r_i შეფასების პარამეტრისათვის:

$$\hat{w} = \hat{r}_i = \frac{a}{b\sigma} XZ + v_i. \quad (2.30)$$

საბოლოოდ, (2.18) და (2.30)-დან მივიღებთ:

$$\hat{r} = 1 + \hat{r}_i = 1 + \frac{a}{b\sigma} XZ + v_i \quad (2.31)$$

ამგვარად, r_i პარამეტრის სინთეზირებული სინერგეტიკული დამკვირვებელი შედგება ორი კომპონენტისგან:

- დინამიკური, დიფერენციალური განტოლება (2.29);
- სტატიკური, მოცემული გამოსახულება (2.31).

მიმღებ მხარეზე რეკონსტრუირებული ინფორმაციული სიგნალი შეგვიძია ვიპოვოთ თანაფარდობიდან (2.19):

$$\mu_{\text{რეკონსტრ.}}(t) = \hat{r} - r, \quad (2.32)$$

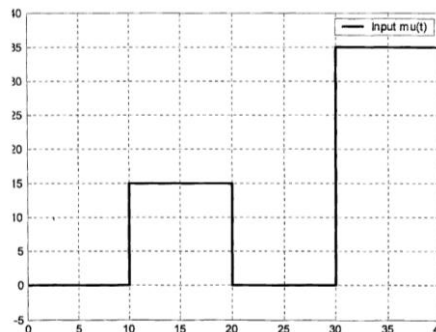
ანუ რეკონსტრუირებული საინფორმაციო სიგნალი ტოლია შესაფასებელი პარამეტრის და მისი ნომინალური მნიშვნელობის სხვაობის.

2.3.3. მოდელირების შედეგები

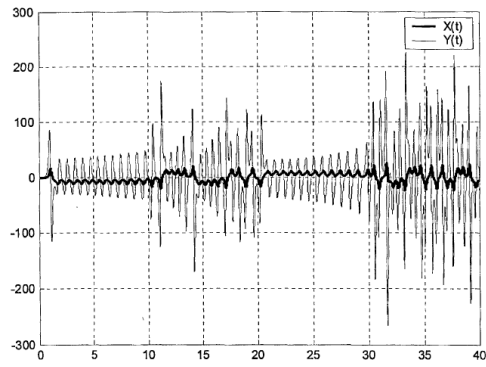
პარამეტრზე სინერგეტიკული დაკვირვებით, ლორენცის ქაოსური გენერატორების საფუძველზე, ინფორმაციის რეკონსტრუქციით მიღებულ სისტემას მოდელირება გავუკეთეთ MATLAB -ის მათემატიკურ პაკეტში.

ლორენცის სისტემის უცვლელი პარამეტრები: $b = 8/3$, $\sigma = 10$; მოდულირებული პარამეტრის ნომინალური მნიშვნელობა $r = 24$.

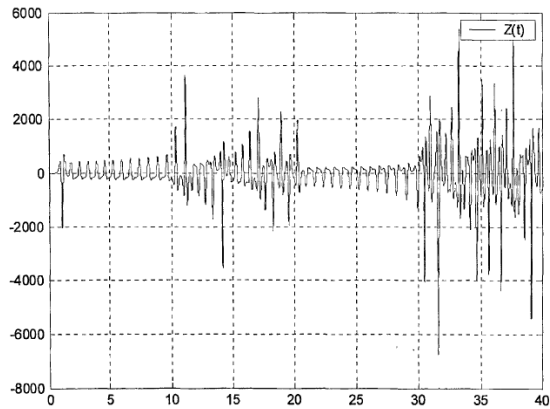
საინფორმაციო სიგნალი $\mu(t)$ გადამცემზე ნაჩვენებია ნახ. 2.14-ზე. ხოლო ნახაზებზე 2.15 და 2.16 ილუსტრირებულია (2.17) სისტემის მოდელირების შედეგები, ანუ ქცევა გადამცემზე. ხოლო ნახ. 2.17-ზე ნაჩვენებია (2.17) სისტემის ფაზური პორტრეტი.



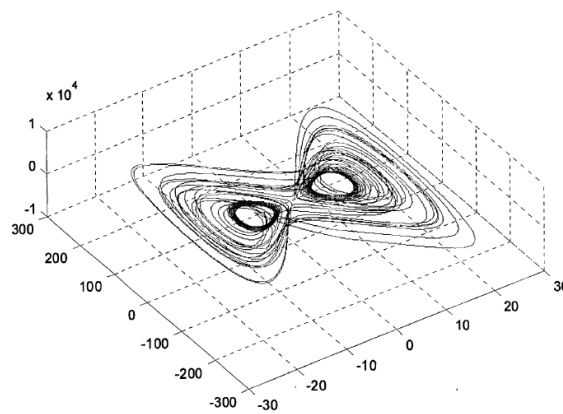
ნახ. 2.14 - ინფორმაციის სიგნალი გადამცემზე



ნახ. 2.15 – მიმღებზე $X(t)$ და $Y(t)$ ცვლადების ცვლილებათა გრაფიკი

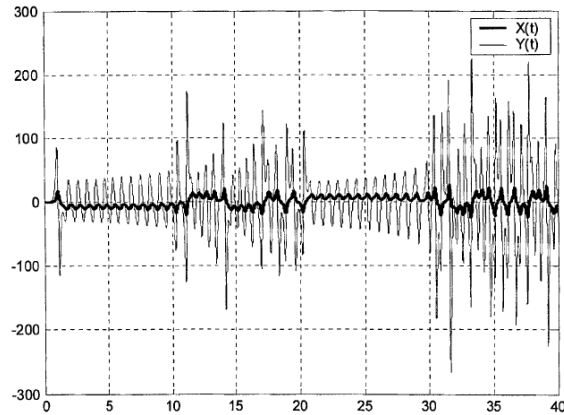


ნახ. 2.16– მიმღების გამოსასვლელზე $Z(t)$ ცვლადის ცვლილებათა გრაფიკი

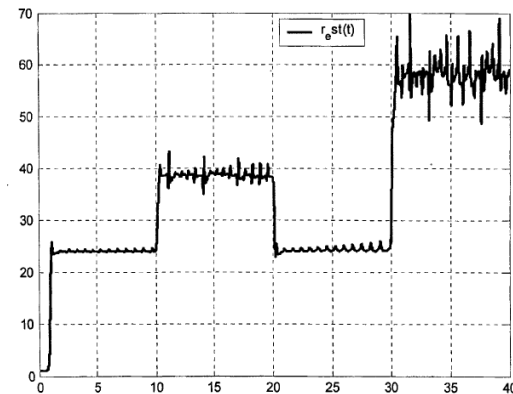


ნახ. 2.17 – (2.17) სისტემის ფაზური პორტრეტი

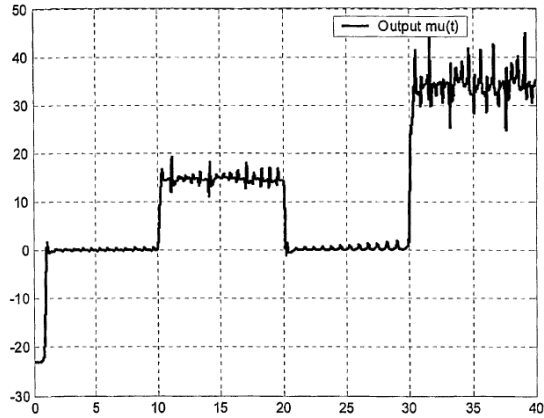
სინერგეტიკული დამკვირვებლის პარამეტრი $a=0,2$. რეკონსტრუირებული (2.17) სისტემის ქცევა მიმღებზე ილუსტრირებულია ნახაზზე 2.18. r პარამეტრის შეფასება $\hat{r}(t)$ ნაჩვენებია ნახ.2.19-ზე. (2.32) გამოსახულების თანახმად, რეკონსტრუირებული ინფორმაციის სიგნალი მიმღებზე $\mu_{\text{რეკონსტრ.}}(t)$ წარმოდგენილია ნახ. 2.20-ზე.



ნახ. 2.18 – მიმღებზე $X(t)$ და $Y(t)$ ცვლადების ცვლილებათა გრაფიკი



ნახ. 2.19- მიმღებზე $\hat{r}(t)$ პარამეტრის შეფასების ცვლილების გრაფიკი



ნახ. 2.20 - მიმღების გამოსასვლელზე რეკონსტრუქციული საინფორმაციო სიგნალი

მოდელირების შედეგებიდან ჩანს, რომ პარამეტრის სინთეზირებული დამკვირვებელი ზუსტად აფასებს R მმართველ პარამეტრს და ახდენს ინფორმაციული სიგნალის რეკონსტრუქციას. ასევე აუცილებელია განხორციელდეს შეფასების გაგლუვება და შესაბამისად სიგნალის რეკონსტრუქცია.

ამრიგად, შემოთავაზებულია ინფორმაციის დინამიკური დამუშავებისა და დაცვის ახალი მეთოდი, რომელიც სინერგეტიკული დამკვირვებლის გამოყენებით სისტემის დინამიკის გლობალური რეკონსტრუქციის მეთოდს ეფუძნება. მოდელირების შედეგებიდან გამომდინარე, სინთეზირებული დამკვირვებელი ზუსტად აფასებს $r(t)$ მმართველ პარამეტრს და ინფორმაციული სიგნალის რეკონსტრუქციას.

აგრეგირებული რეგულატორების ანალიზური კონსტრუირების მეთოდის გამოყენებით შესაძლებელია როგორც „მმართველი პარამეტრის“ მიმდინარე მნიშვნელობის, ასევე - „მმართველი პარამეტრის“ ცნების განსაზღვრა და ქაოსის მართვის სისტემების სინთეზის პროცედურის აგება.

2.4. დეტერმინირებული ქაოსის მართვა

ქაოსური სისტემები მგრძობიარენი არიან მმართველ ზემოქმედების მიმართ და შესაძლებლობების ფართო სპექტრს შეიცავენ. რეგულირებული დინამიკის მქონე სისტემებისაგან განსხვავებით, რომლებზეც ზემოქმედებისათვის აუცილებელია ფუნქციონირების პირობების მნიშვნელოვანად შეცვლა, ქაოსური ატრაქტორის მქონე სისტემები მნიშვნელოვანად იცვლიან ქცევას მიცემული მცირე მმართველი ზემოქმედების შედეგად.

ქაოსური რხევების ფართოდ გავრცელებამ სხვადასხვა ბუნების სისტემებში მკვლევართა ყურადღება მიიპყრო. არაწრფივი რხევების თეორია დიდი ხანია ცალკე მეცნიერულ მიმართულებად იქცა. მის განვითარებას ხელი შეუწყო გამოჩენილ მეცნიერთა მთელმა პლეადამ: ა. პუანკარე, ა.ა. ანდრონოვი, ნ.მ. კრილოვი, ბ.ვან დერ პოლი, ე ჰონფი. დღეისათვის მნიშვნელოვანი წარმატებები მიაღწია რეგულარული და ქაოსური რეჟიმების შესწავლის მხრივ და მათემატიკურ ინტერპრეტაციაში და ეს წარმატებები ნაწილობრივ არის ასახული ამ ნაშრომში. თუმცა აღნიშნულ პროგრესს უპირველეს ყოვლის შესაბამისი მათემატიკური კონსტრუქციების აგებასა და ფორმალიზებულ მეთოდებს უკავშირებენ, ეჭვს გარეშეა მისი გამოყენებითი მნიშვნელობაც. ამ თვალსაზრისით აქტუალური ხდება რხევითი რეჟიმების მიზანმიმართული ორგანიზაციის, დეზორგანიზაციისა ან მოდიფიკაციის პრობლემა განსხვავებული ბუნების სისტემებსა და პროცესებში, რაც არაწრფივი რხევების (ქაოსის) მართვის პრობლემას წარმოადგენს.

2.4.1. ქაოსური სისტემების მართვის ამოცანები

გასული საუკუნის 70-იან წლებში დეტერმინირებული ქაოსის მოვლენის აღმოჩენამ დიდ რაოდენობის ფუნდამენტალურ და გამოყენებით

კვლევებს უზიდა მეცნიერებისა და ტექნიკის სხვადასხვა სფეროებში. ქაოსის მართვის პრობლემა, ანუ ქაოსური დინამიკით დეტერმინირებული სისტემების ქცევის მიზანმიმართულმა შეცვლამ 1990 წლების დასაწყისში მეცნიერთა ყურადღება მიიპყრო და ამ დროიდან იგი მეცნიერების ინტენსიური ყურადღების ცენტრშია. მართლაც ძნელია ქაოსური სისტემის დინამიკის განსაზღვრა, მაგრამ მისი მართვა შესაძლებელია.

სისტემის „ქაოსურობის“ ხარისხზე ზემოქმედებას, უპირველეს ყოვლისა პრაქტიკული მიმართულება აქვს, რადგან აღმოჩნდა სისტემათა მთელი რიგი, რომლებშიც არასასურველია ან პირიქით სასურველია არარეგულარული რხევები. მაგ. მექანიკაში სხვადასხვა მეთოდს იყენებენ ქანქარიან და გიროსკოპულ სისტემებში, მტკიცე კონსტრუქციებში, გიროსტატებში, კოსმოსურ აპარატებში და სხვა. მეორეს მხრივ, ქცევის განზრახულმა „ქაოსიზაციამ“ შესაძლებელია მნიშვნელოვნად დააჩქაროს მექანიკური სისტემების დინამიკა. ზოგიერთი ქიმიური ტექნოლოგიებისათვის საბოლოო პროდუქტის რეაქციის ინტენსიურობისა და ხარისხის თვალსაზრისით ქაოსიზაცია დადებით ეფექტს იძლევა. არარეგულარული რხევების მართვის ამოცანათა სიმრავლე არსებობს ბიოლოგიაში, ეკოლოგიაში, ტექნიკაში და ა.შ [43].

პრაქტიკული მახასიათებლების ანალიზი ქაოსური სისტემების მართვის შემდეგი ტიპური ამოცანების გამოყოფის საშუალებას იძლევა [44]:

1. არარეგულარული რხევების სტაბილიზაციის ამოცანა. ამ შემთხვევაში მართვის საშუალებით ხდება რხევების ჩახშობა და სისტემის სტაბილურ წონასწორულ მდგომარეობაში გადაყვანა. მსგავსი ამოცანები წარმოიქმნება არასასურველი ხმაურის, კონსტრუქციის ვიბრაციის და ა.შ. გამოსარიცხად.

2. არარეგულარული რხევების გენერაციის ამოცანა (ქაოსიზაციის ამოცანა). აქ მართვის ფუნქციის დანიშნულებაა სისტემის წესრიგის დარღვევა და არარეგულარული რხევების გამოწვევა. ქაოსური დინამიკის

წარმოქმნაზე შეიძლება ვისაუბროთ ირიბი მაჩვენებლების მიხედვით: უდიდესი ლიაპუნოვის მაჩვენებელი, ცვლადების სიმძლავრის სპექტრი, ატრაქტორის ფრაქტალობა.

3. არარეგულარული რხევების სინქრონიზაცია. სინქრონიზაციაში იგულისხმება რამოდენიმე ოსცილატორის რხევების შეთანხმება ზოგიერთი მაჩვენებლების მიხედვით; მაგ. სიხშირე, ამპლიტუდა, ფაზა. ქაოსური რხევების შემთხვევაში სიმძლავრის სპექტრი მთლიანია. რხევები არ არსებობს (აპერიოდული რხევები), ამიტომ სინქრონული ქაოსის ფორმულირების დროს არ გამოდგება მისი კლასიკური განმარტება. მიღებულია განვასხვავოთ ქაოსური რხევების სრული სინქრონიზაცია, როდესაც ორი ოსცილატორის ცვლადები სრულეხით იმეორებენ ერთმანეთს, ანუ იცვლებიან „სინფაზურად“ და ნაწილობრივ სინქრონიზაციას, როდესაც მყარდება თანაფარდობა რხევების ცალეულ მაჩვენებლებს შორის. ნაშრომში [16] განხილულია ნაწილობრივი სინქრონიზაციის რამოდენიმე ტიპი მაგ. ოსცილატორების ფაზური და ტრაექტორიების გადართვის ნაწილობრივი სინქრონიზაცია სპირალური ქაოსის ტიპით ან ტრაექტორიების გადართვის სინქრონიზაცია ერთი უნაგირა ფოკუსის მიდამოდან მეორეს მიდამოში გადამრთავი ტიპის ქაოსის დროს (მაგ. ლორენცის სისტემა და ჩუას გენერატორი).

4. რხევების მოდიფიკაციის ამოცანა. ამ შემთხვევაში მმართველი ზემოქმედებით არარეგულარული რხევები პერიოდულად გარდაიქმნება და პირიქით. ყალიბდება შეკუმშვის რეჟიმი. მსგავსი სახეობის ამოცანები აქტუალურია ლაზერულ, ტელეკომუნიკაციურ, ქიმიურ ტექნოლოგიებში, ბიოლოგიასა და მედიცინაში.

ქაოსური რხევების რეგულარულში გადასვლას ზოგჯერ არამდგრადი პერიოდული გადაწყვეტილებების სტაბილიზაციას უწოდებენ. ამ შემთხვევაში არარეგულარული რხევების სტაბილიზაციისა და მოდიფიკაციის ამოცანებს ქაოსის დამრთავუნველ ამოცანებს ან ანტიქაოსური მართვის ამოცანებს უწოდებენ. აუცილებლად უნდა

აღინიშნოს, რომ სადისერტაციო კვლევის ძირითად საგანს სწორედ მსგავსი ამოცანები წარმოადგენენ.

ქაოსის მართვის სფეროში თეორიული და ექსპერიმენტალური კვლევების დახმარებით გამოვლინდა ქაოსური სისტემების შესანიშნავი თვისება - გარე ზემოქმედებისადმი მოჭარბებული მგრძობელობა და შედეგად მისი კარგი მართულობა.

ერთი შეხედვით ეს მოცემულობა მოულოდნელი ფაქტია, მაგრამ მისი ახსნა შესაძლებელია შემდეგნაირად. ქაოსური სისტემების დამახასიათებელ თვისებებს წარმოადგენს ტრაექტორიების ექსპონენციალური არამდგრადობა და მოძრაობის გადაჭარბებული დამოკიდებულება საწყის პირობებზე. ამიტომ მარტივია ასეთი სისტემების „საჭირო მიმართულებით“ მიმართვა. გარდა ამისა, არარეგულარული რეჟიმების წარმოქმნის პროცესებში საკვანძო როლს თამაშობენ ე.წ. ბიფურკაციული მექანიზმები, რომლებიც ხარისხობრივად ცვლიან სისტემის ქცევას მმართველი პარამეტრების უმნიშვნელო ცვლილების შემთხვევაში.

ქაოსური სისტემების კარგი მართულობა პრაქტიკულად ხსნის კითხვას არარეგულარულ პროცესებზე მიზანმიმართული ზემოქმედების პრინციპულ შესაძლებლობაზე. მაშინ ისმის კითხვა, როგორ უნდა მოხდეს დეტერმინირებული ქაოსით მმართველი ზემოქმედება სისტემაზე, იმისათვის რომ მის ქცევას საჭირო ბუნება ჰქონდეს? ამ კითხვაზე პასუხი თვითონ მართვის თეორიის საკვანძო პრობლემაში - მმართველი ზემოქმედების სინთეზის პრობლემები - აისახება. მოცემული პრობლემა ასევე ძირითადია ქაოსური სისტემების მართვის სხვადასხვა ამოცანების გადაწყვეტისათვის.

გთავაზობთ ქაოსური სისტემებისათვის მმართველი ზემოქმედების სინთეზის ამოცანების დამახასიათებელ მათემატიკურ ფორმულირებას. მმართველი სისტემების დინამიკის მათემატიკური აღწერის გავრცელებული ფორმას წარმოადგენს მოდელი:

$$\dot{x}(t) = F(x, u) \quad (2.33)$$

სადაც x - დინამიკური სისტემის n განზომილების მდგომარეობის ვექტორია, u - m განზომილების მმართველი ზემოქმედების ვექტორი. მმართველ ზემოქმედებად შეიძლება გამოვიდეს ზოგიერთი გარე ზემოქმედება ან სისტემის შიდა პარამეტრები.

ზოგჯერ [45] მართვას განიხილავენ - მართვას პარამეტრების შეცვლის მიხედვით (პარამეტრული მართვა) და მართვას გარეშე ზემოქმედების დახმარებით (ძალისმიერი მართვა). არაწრფივი სისტემის კლასისათვის, რომელსაც ყველა ქაოსური სისტემა განეკუთვნება, ასეთი განსხვავება არაპრინციპულია, მოდელი (2.33) კი ორივე შემთხვევისათვის სამართლიანია.

არარეგულარული რხევების დათრგუნვის ამოცანების ამოხსნის დროს მართვის მიზანი ფორმალურად შემდეგნაირად განისაზღვრება:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t) - \dot{x}(t)) = 0 \quad (2.34)$$

სადაც, $x(t)$ და $\dot{x}(t)$ სისტემის მიმდინარე და სასურველი მდგომარეობაა. სისტემის სასურველი მდგომარეობა ის განსაზღვრული სტაციონარული რეჟიმია, რომელიც შეესაბამება ან რხევების შენელებას, ან ამ რხევებისათვის რეგულარულ თვისებების მინიჭებას. ტოლობა (2.34) შეიძლება განიხილოს როგორც სისტემის (2.33) დიფერენცირებული განტოლების ამონახსნთა სიმრავლის სტაბილიზაციის პირობა რომელიმე $\dot{x}(t)$ ეტალონური გადაწყვეტილების მიმართ. (2.34) შესაძლებელია მიეცეს გეომეტრიული ინტერპრეტაციაც, თუ სისტემის მდგომარეობის სივრცეში $\dot{x}(t)$ ჩაითვლება „წერტილის“ ან „ზღვრული ციკლის“ ტიპის მიზნობრივ ატრაქტორად. ხშირად (2.34) სახის მართვის მიზანი ფორმულირდება სისტემის ცალკეული ცვლადისათვის და არა მდგომარეობის მთელი ვექტორისათვის.

მმართველი ზემოქმედების სინთეზის ამოცანა ნიშნავს მართვის ვექტორის, როგორც დროითი ფუნქციის მოძებნას

$$u = u(t) \quad (2.35)$$

ან ცვლადების მდგომარეობის

$$u = ut(x) \quad (2.36)$$

რომელიც უზრუნველყოფს (2.34) პირობის შესრულებას სისტემის საწყისი პირობის სიმრავლისათვის.

თუ მმართველი ზემოქმედება დროის ფუნქციად ფორმირდება, მაშინ მას გახსნილი ან პროგრამული ეწოდება. მართვის როგორც სისტემის კოორდინატთა ფუნქციის ძიებისას მიღებულია საუბარი როგორც ჩაკეტილი სისტემის სინთეზზე ან სისტემაზე უკუკავშირით. გამოსახულებას (2.34) მართვის კანონს უწოდებენ. მითითებული მართვის ორი პრინციპი საერთოა მართვის ტრადიციული თეორიისათვის და თანაბრად გამოიყენება ქაოსური სისტემების მართვის ამოცანებში.

ცნობილია მართვის ამ პრინციპების დადებითი მხარეები და ნაკლოვანებები. ამიტომ, მათი შედარებითი შეფასებით უნდა აღინიშნოს შემდეგი: ქაოსური პროცესების მართვის ამოცანებისადმი მიმართული მეცნიერული კვლევები შეიქმნა მართვის თეორიისა და არაწრფივი დინამიკის თანაკვეთაში. თითოეულ მეცნიერული კვლევის მიმართულებას ახასიათებს განსაზღვრული მიდგომა და შერჩეული მეთოდოლოგია. არაწრფივი დინამიკაში მიღებულია გაანალიზდეს სისტემის ქცევა მმართველი პარამეტრების მიცემული ცვლილებებისა და ზოგიერთი „ეტალონური“ გარე ზემოქმედების დროს. ამრიგად, ხორციელდება გახსნილი მართვის პრინციპი. პირიქით, მართვის თანამედროვე თეორიაში, რომელიც აღიარებს სისტემების კონსტრუირების პრინციპს, აშკარად შეიმჩნევა ჩაკეტილი მართვის პრინციპის დომინირება. ასეთი ტენდენცია უკავშირდება იმ ფაქტს, რომ მხოლოდ უკუკავშირების მეშვეობით შეიძლება გავითვალისწინოთ ინფორმაცია მიმდინარე მდგომარეობაზე და ადექვატურად გამოვიყენოთ.

რეალურ პირობებში ყოველთვის არ არის შესაძლებელი სამართავი სისტემების პროგნოზირება და შესაბამისად მისი პროგრამირება.

2.4.2. ქაოსური სისტემების მართვის მეთოდები

ქაოსური სისტემების პროგრამული და ჩაკეტილი მართვის კანონების სინთეზის დროს იყენებენ მართვის თეორიის ტრადიციული და არაწრფივი დინამიკის მეთოდებს. მოცემული თავი ეძღვნება ამ კვლევის შედეგების ჩვენებას.

2.4.2.1. პროგრამული მართვის მეთოდები

პროგრამული მართვა, რომელიც შეიძლება იყოს პარამეტრული ან სიმბოლური, $u = u(t)$ ეტალონური დროითი ფუნქციის სახით მმართველი ზემოქმედების ფორმირებას გულისხმობს. როგორც წესი ასეთ ფუნქციად გამოდის პერიოდული ან კვაზიპერიოდული სიგნალი, ამიტომ ასეთ მართვას ნაწილობრივ უწოდებენ ადგენებას (პერიოდულს, კვაზიპერიოდულს, მადალსიხშირიანს, რეზონანსულს და ა.შ). პროგრამული მართვის უპირატესობას მიაკუთვნებენ იმას, რომ არ არის აუცილებელი სისტემის მიმდინარე მდგომარეობის შეფასება.

ქაოსური სისტემების პროგრამული მართვის ძირითადი იდეა ეკუთვნით პ.ლ. კაპიცას („კაპიცას ქანქარა“) და ა. სტივენსონს. მათ შრომებში ნაჩვენებია არამდგრადი სისტემების სტაბილიზაციის შესაძლებლობა მაღალი ხარისხის ადგენების გზით. არაწრფივი სისტემების დინამიკაზე მაღალი სიხშირის შემფოთების გავლენის შემდგომ კვლევებში გამოიყენებოდა კრილოვ-ბოგოლიუბოვის გაშუალების მეთოდი.

ქაოსური სისტემების პროგრამული მართვის მიხედვით მნიშვნელოვანი შედეგები მიღებულია ე.წ. „რეზონანსული“ მიდგომის ფარგლებში, რომელიც საშუალო სიხშირის შემფოთების იდეას ეყრდნობა, როდესაც პარამეტრული ან ძალისმიერი შემფოთების სიხშირე თვითონ სისტემის საკუთარი სიხშირის ცენტრში მდებარეობს. უნდა აღინიშნოს, რომ შედეგთა უმრავლესობას ნახევრად ემპირიული ხასიათი აქვს და

სისტემის კომპიუტერულ მოდელირებას ეყრდნობა. რეზონანსული შემფოთების ანალიზური დასაბუთებისათვის გამოიყენება ვ.კ. მელნიკოვის თეორია, რომელიც აფასებს მდგრად და არამდგრად ტრაექტორიებს შორის მანძილს და ანალიზებს ჰომოკლინური მარყუჟის დაშლის შედეგებს.

საინტერესოა მიდგომა, რომელიც პროგრამული მართვის ფორმირებისას სისტემის მოდელების განტოლებებს იყენებს [40,41]. ამ დროს ითვლება, რომ ცნობილია $\dot{x}(t)$ სისტემის სასურველი ამონახსენი, მმართველი ზემოქმედება ადიტიურად შედის მოდელის განტოლებაში:

$$\dot{x}(t) = F_1(x) + B_u$$

მაშინ $n=m$ და $\det B \neq 0$ მმართველი ზემოქმედება ფორმირდება როგორც

$$u(t) = B^{-1}(\dot{x}(t) - F_1\dot{x}(t))$$

მოცემული მეთოდის გამოყენება შეზღუდულია სისტემის გლობალური მდგრადობის პირობების თვალსაზრისით, ანუ, დამოკიდებულია საწყის პირობებზე, ასევე $\dot{x}(t)$ ფუნქციის არჩევაზე. ქაოსური სისტემების პროგრამული მართვის სფეროში კვლევის შედეგების ანალიზით, შეიძლება აღინიშნოს, რომ შეთავაზებული მეთოდების უმრავლესობა კერძო ამოცანების ამოხსნისათვის გამოიყენება, რომელიც ეყრდნობა ინტუიტიურ და ემპირიულ ვარაუდებს და რიცხვით ექსპერიმენტებს. ამრიგად, არარეგულარული რხევების დათრგუნვის პრობლემის ანალიზური გადაწყვეტა გახსნილი მართვის გზით, რომელიც ქაოსური სისტემების შემფოთების შესაბამისი პირობების განსაზღვრაში მდგომარეობს, დღეისათვის გადაუჭრელია.[42]

2.4.2.2. ჩაკეტილი მართვის მეთოდები

დინამიკური სისტემების ახალი კლასის აღმოჩენის შემდეგ, მისი მათემატიკური აღწერის სიმარტივის მიუხედავად, მისით ავტომატური მართვის სპეციალისტები დაინტერესდნენ.

ქაოსური სისტემები ერთგვარ სატესტო მოდელებად იქცნენ, მათი დახმარებით ფასდება ჩაკეტილი მართვის კანონების სინთეზის ესა თუ ის მეთოდი, ანუ, უკუკავშირით მართვა. ამ მიზნისათვის განიხილება კლასიკური და თანამედროვე მართვის თეორიებისადმი სახდასხვაგვარი მიდგომა. დღეისათვის არსებობს მეცნიერული შრომების მნიშვნელოვანი რაოდენობა, რომლებიც ეხება ქაოსური სისტემების ჩაკეტილი მართვის ამოცანების ამოხსნას.

ზოგიერთ შემთხვევაში მართვის მიზანი უბრალო პროპორციული ან მოდალური გენერატორის საშუალებითაც მიიღწევა [43,44]. მაგრამ ასეთი „წრფივი“ კანონების ფუნქციონირება შეზღუდულია მდგრადი ჩაკეტილი სისტემების გლობალური მდგრადობის თვალსაზრისით. ამას გარდა, როგორც წესი, განიხილება პრაქტიკაში იშვიათი შემთხვევა $m=n$ (მართვის არხების რაოდენობა ტოლია მათემატიკური მოდელის წესრიგის).

ქაოსური სისტემების ჩაკეტილი კანონების მოსაძიებლად ზოგი ავტორი ე.წ. უკუკავშირის გაწრფივების მეთოდის გამოყენებას გვთავაზობს [47]. შედეგად მიღებულია უკუკავშირის გაწრფივების კრიტერიუმები, მაგრამ არ არსებობს ცვლადების შეცვლის უნივერსალური რეკომენდაციები, უმრავლეს შემთხვევებში, კი გაწრფივების პირობებს ლოკალური ხასიათი აქვს. ამის პარალელურად ასეთი ხელოვნური მიდგომა ქაოსური სისტემის საკუთარი არაწრფივი დინამიკის ჩახშობის პრინციპს ეფუძნება. შესაბამისად, ექვს იწვევს ავტომატური რეგულირების წრფივი თეორიების კლასიკური მეთოდების გამოყენების მიზანშეწონილობა არარეგულარული რხევების რეჟიმების სტაბილიზაციის ამოცანებში. დღეისათვის არსებობს არაწრფივი მართვის თანამედროვე მეთოდების მდიდარი არსენალი, რომელიც ფართოდ გამოყენებულ იქნა განსახილველი პრობლემის ამოსახსნელად.

უკუკავშირით არაწრფივი სისტემების თეორიების მეთოდებს საფუძვლად არშტეინისა და სონტაგის მიერ შემოთავაზებული ე.წ. ლიაპუნოვის მიდგომა და ლიაპუნოვის მმართველი ფუნქციის კონცეფცია

აქვს. ამ კონცეფციის მიხედვით მდგრადობის პირობები გამოყენებულ იქნა სისტემების სტაბილიზაციის ამოცანების ამოხსნის ინსტრუმენტად. ანუ განხორციელდა ლიაპუნოვის $V(x)$ ფუნქციის (ლიაპუნოვის მმართველი ფუნქციის) არჩევა და $u(x)$ მართვის მოძებნის მცდელობა, რომელიც $\dot{V}(x, u)$ უარყოფითად განსაზღვრულს აქცევს.

ნებისმიერი $V(x)$ არჩევით ასეთი მცდელობა შეიძლება წარმატებული არ იყოს, მაგრამ თუ $V(x)$ - ლიაპუნოვის მმართველი ფუნქციაა, მაშინ შეიძლება მოიძებნოს მართვის სტაბილიზაციის კანონი. უნდა აღინიშნოს, რომ ლიაპუნოვის მმართველი ფუნქციის აგება რთული ამოცანაა, რომელიც მხოლოდ განსაკუთრებული კლასის სისტემებისათვის ამოიხსნა.

ასეთ მეთოდებს განეკუთვნება სწრაფი დაშვების მეთოდი [57], რომელშიც გამოიყენება რომელიმე $Q(x)$ მიზნობრივი ფუნქციის სიჩქარის გრადიენტის იდეა $Q \frac{dQ(x)}{dt} = \frac{\partial Q(x)}{\partial x} F(x, u) \rightarrow 0$ დროში.

მიზნობრივ ფუნქციად შეიძლება გამოიყოს მანძილი მიმდინარე და სასურველ მდგომარეობას შორის $Q(x) = \|x(t) - \dot{x}(t)\|^2$ ან მანძილი რაიმე მიზნობრივ ზედაპირამდე $Q(x) = \|h(x)\|^2$ სიჩქარის გრადიენტიანი მეთოდი ეყრდნობა ლიაპუნოვის ფუნქციის კონსტრუქციას, რომელიც დახურული სისტემის ტრაექტორიის გასწვრივ იღევა. ლიაპუნოვის ეს ფუნქცია ჩვეულებრივ შეესაბამება $Q(x)$ მიზნობრივ ფუნქციას. სიჩქარის გრადიენტიანი მეთოდის დახმარებით, მაგ. წარმატებით გადაწყდა ლორენცის სისტემაში წონასწორობის მდგომარეობის სტაბილიზაციის ამოცანა. რადგან ლიაპუნოვის ფუნქციის კონსტრუირების პრობლემა დინამიკური სისტემების ყველა კლასისათვის დღეისათვის გადაუწყვეტელი რჩება, სიჩქარის გრადიენტიანი მეთოდის გამოყენება გულისხმობს მიზნობრივი ფუნქციის ადექვატურად ფორმირების აუცილებლობას.

სხვა მეტად პოპულარულ მეთოდს წარმოადგენს პ. კოკოტოვიჩის მიერ შემოთავაზებული ლიაპუნოვის მმართველ ფუნქციის იდეაზე დაფუძნებული ბეკსტეპინგის (backstapping) პროცედურა. [51] ნაშრომში

ნაჩვენებია ამ პროცედურის გამოყენება მართვის ანტიქაოსური კანონების სინთეზისათვის ლორენცის სისტემისა და ჩუას გენერატორის მიერ.

უკანასკნელ ათწლეულში მართვის თეორიის ფარგლებში გაძლიერებულად ვითარდება ე.წ. გეომეტრიული მეთოდები, რომლებიც იყენებენ ჩვეულებრივი დიფერენციალური განტოლებების ტერმინოლოგიასა და მეთოდოლოგიას (მაგ. ცენტრალური მრავალფეროვნების მეთოდი, ფარდობითი არაწრფიულობისა და ნული-დინამიკის და სხვა). ასეთ მეთოდებს მიაკუთვნებენ აგრეგირებული რეგულატორების კონსტრუირების ანალიზურ მეთოდს, რომელიც მართვის თეორიაში ახალი სინერგეტიკული მიდგომის ბირთვს შეადგენს და არაწრფივი დინამიკური და მრავალგვარი ბუნების მქონე სისტემების მართვის კანონების სინთეზის ეფექტური ინსტრუმენტია. ეს მეთოდი ეფუძნება მიზიდვად ინვარიანტულ მრავალფეროვნების იდეას, სადაც ჩვეულებრივ თანხმდება სამართავი სისტემის არაწრფიული თვისებები და მართვის მიზნები. ნაშრომში [10] წარმოდგენილია აგრეგირებული რეგულატორების ანალიზური კონსტრუირების მეთოდის წარმატებული გამოყენება ანტიქაოსური რეგულატორების სინთეზისათვის, რომელიც უზრუნველყოფს მართვად გადასვლას „ქაოსი - წონასწორული მდგომარეობა“ და „ქაოსი - რეგულარული რხევები“ ლორენცისა და რესლერის სისტემებში. აღსანიშნავია, რომ მარტივი სტრუქტურების მრავალფეროვნების შემოტანა იქამდე მიდის, რომ დინამიკის საბოლოო განტოლება (დეკომპოზირებული სისტემების განტოლება) სტრუქტურით ემთხვევა ტიპური ბიფურკაციის მქონე სისტემების განტოლებებს. ვითვალისწინებთ, რა რომ ქაოსური სისტემების დინამიკაში ბიფურკაციური მექანიზმები პირველხარისხოვან როლს თამაშობენ, შეიძლება ითქვას, რომ მართვის სინთეზირებულ კანონებს ბუნებრივი ხასიათი აქვთ, ანუ გამოხატავენ სამართავი პროცესების არსს.

ერთ-ერთი პირველი სტატია, რომელიც ქაოსური სისტემების ჩაკეტილი მართვის პრობლემას ეძღვნებოდა იყო ე.ოტტას, ს.გრაბოჯის და

დ. იორკეს ნაშრომი [53], რომელიც გვთავაზობს სინთეზის ორიგინალურ მეთოდს (OGY მეთოდი). მოცემული მეთოდი ეფუძნება საწყისი უწყვეტი მოდელიდან მისი სხვაობით აპროქსიმირებაზე გადასვლას, რომელიც მიიღება მოძრაობის საბაზისო ტრაექტორიის რაიმე სიბრტყესთან გადაკვეთის შედეგად (ე.წ. პუნკარეს კვეთა). მიღებული დისკრეტული მოდელი გაწვრივდება დისკრეტიზაციის ბიჯზე და იძენება სტაბილიზაციური მართვა წრფივი უკუკავშირის მდგომარეობის სახით. ამავდროულად უკუკავშირს „ეპიზოდური“ ხასიათი აქვს და მოქმედებს ტრაექტორიის სასურველი მდგომარეობის მიდამოში დაბრუნების დროს. მიუხედავად მოდიფიკაციების სიმრავლისა და OGY მეთოდის სრულყოფისა [53,54], მისთვის დამახასიათებელია აპროქსიმაციური მდგომარეობის დამახასიათებელი ზოგიერთი ნაკლოვანება: დისკრეტული მოდელის ადექვატურობა მისი გაწვრივებული ანალოგისადმი და კვეთის სიბრტყის სწორედ არჩევის პრობლემა, ცვლადების მიმდინარე მნიშვნელობების განზომილების არასრულობა.

უკანასკნელ ხანებში პოპულარობით სარგებლობს უკუკავშირის დაგვიანების მეთოდი (პირაგასის მეთოდი) [55], რომლის თანახმად მართვის კანონი შემდეგი სახით ფორმირდება: $u(t) = c(x(t) - x(t - \tau))$. (2.37) სადაც c - გადაცემის კოეფიციენტი, τ - დაგვიანების დრო.

მოცემული მეთოდი გამოიყენება არამდგრადი პერიოდული ქაოსური სისტემების სტაბილიზაციის ამოცანებში. აღსანიშნავია რომ მართვის არ არსებობის დროს, დაგვიანების დროის სიდიდე საბაზისო პერიოდული გადაწყვეტის რაიმე პერიოდს უტოლდება; სისტემის ტრაექტორიები შესაბამის ორბიტაზე რჩებიან და მისკენ მიიზიდებიან კიდევ. სამწუხაროდ, დიდ პრობლემას წარმოადგენს პირაგასის რეგულატორით სისტემების ანალიზური კვლევა. დღეისათვის ძირითადად მიღებულია ექსპერიმენტალური და რიცხვითი შედეგები, რომლებიც ეხება პერიოდული გადაწყვეტილებების სტაბილიზაციის პრობლემის განსაზღვრას და კონკრეტულ გამოყენებით ამოცანებში გამოყენების

მეთოდს. ასევე ამოუხსნელი რჩება (2.37) გამოსახულებაში τ სიდიდის არჩევის პრობლემა, რაც უკავშირდება ქაოსურ სისტემების დინამიკაში შესაძლო პერიოდული ამონახსლების თეორიულად უსაზღვრო სიმრავლის არსებობას.

ამრიგად, წარმოდგენილი იქნა მეტად გავრცელებული და აპრობირებული მიდგომები, რომლებიც მოქმედებენ ქაოსური სისტემების მართვის სხვადასხვა თეორიული და გამოყენებითი ამოცანების ამოხსნაში. ამ განხილვის მიღმა რჩება სხვა მეთოდებიც (მაგ. ადაპტური, არამკაფიო, ნეიროქსელური და სხვა მართვის მეთოდები).

აგრეგირებული რეგულატორების ანალიზური კონსტრუირების მეთოდის გამოყენებით გთავაზობთ „მმართველი პარამეტრების“ გენერატორების სინთეზის მეთოდს ქაოსური დინამიკის მქონე სისტემებში, რომელიც ლორენცის ტიპის მსგავს არაწრფივ რთულ სისტემებში სასურველი ატრაქტორების ფორმირების საშუალებას იძლევა.

2.5 „მმართველი პარამეტრის“ სინთეზის მეთოდი ქაოსურ სისტემებში

თანამედროვე არაწრფივი მეცნიერების განვითარებამ აჩვენა, რომ ბევრ რთულ ბუნებრივ და ტექნიკურ სისტემებში მნიშვნელოვან როლს თამაშობენ ბიფურკაციური და ქაოსური მოვლენების თანმხლები დისიპაციური სტრუქტურები, ასეთი სისტემების ქაოსური რეჟიმი როგორც არასასურველი ისე მოთხოვნადია ტექნოლოგიურ პროცესებში. ობიექტების არასასურველი ქაოსური ქცევა ხშირად მათი მოძრაობის კრიტიკულ რეჟიმებში წარმოიქმნება.

ამასთან დაკავშირებით წარმოიქმნება ქაოსის მართვის პრინციპულად ახალი პრობლემა, რომელსაც ყურადღება ექცევა სამეცნიერო ტექნიკურ ლიტერატურაში [56-58]. ნაშრომთა უმრავლესობაში ქაოსის მართვისათვის

გამოიყენება სამი ძირითადი მიმართულება: პროგრამული მართვა; წრფივობის მეთოდი და დაგვიანებითი უკუკავშირის მეთოდი[59]. საბაზისო მოდელებად გამოდიან ლორენცის, რესლერის მოდელები და მათი მსგავსი სხვა არაწრფივი მოდელები.

ქაოსის მართვის პრობლემა ელის ამოხსნას და მართვის მეცნიერებაში ახალი მიმართულებების განვითარებას ითხოვს. ამასთან დაკავშირებით განვიხილოთ აგრეგირებული რეგულატორების ანალიზური კონსტრუირების მეთოდის გამოყენება [59-60] ლორენცის მოდელის მაგალითზე ქაოსური დინამიკით არაწრფივი ობიექტების მართვის რთული ამოცანების ამოსახსნელად, რომელშიც მართვის არ არსებობის დროს წარმოიქმნება ქაოსური რეჟიმები.

ჩავწეროთ ლორენცის მოდელი (2.61) შემდეგი სახით:

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) + (1 + \sigma)\dot{x}(t) + \sigma(1 - r - z)x &= 0 \\ \dot{z}(t) &= -bz + \frac{1}{\sigma}x\dot{x}(t) + x^2 \end{aligned} \quad (2.38)$$

(2.38) სისტემის მეორე განტოლებაში მივუმატოთ x^2 და გადავწეროთ შემდეგი სახით

$$\dot{z}(t) + bz - x^2 + \left(1 - \frac{b}{2\sigma}\right)x^2 - \frac{1}{\sigma}x\dot{x}(t) = 0 \quad (2.39)$$

ახლა, მაკრო ცვლადის შემოტანისას

$$\psi_1 = z - \frac{1}{2\sigma}x^2 \quad (2.40)$$

(2.39) - ის და (2.38) განტოლებათა სისტემის პირველი განტოლების საფუძველზე ჩავწეროთ ლორენცის მოდელი შემდეგი ახალი ფორმით:

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) + (1 + \sigma)\dot{x}(t) + \sigma\left(1 - r + \frac{1}{2\sigma}x^2 + \psi_1\right)x &= 0 \\ \dot{\psi}_1(t) + b\psi_1 - \left(1 - \frac{b}{2\sigma}\right)x^2 &= 0 \end{aligned} \quad (2.41)$$

ლორენცის მოდელის (2.41) მიღებული ფორმა საშუალებას გვაძლევს მოვახდინოთ მისი დამატებითი ფუნქციების იდენტიფიცირება; თუ ჩვენ ვივარაუდებთ

$$b \geq 2\sigma \quad (2.42)$$

მაშინ ლორენცის მოდელი (2.41) მიიღებს არაკ მეთოდის შესაბამის სტანდარტულ ფორმას. ამ შემთხვევაში ლორენცის მოდელი, დაწყებული x_0, \dot{x}_0, z_0 ნებისმიერი საწყისი პირობებიდან, მმართველი პარამეტრის r -ის ნებისმიერი მნიშვნელობისთვის $t = \frac{3+4}{\sigma}$ დროის შემდეგ აუცილებლად შედის ორ განზომილებიან ინვარიანტულ მრავალფეროვნებაში $\psi_1 = 0$ (2.40). მოძრაობა აღწერილია შემდეგი დიფერენციალური განტოლებით:

$$\dot{x}_\psi(t) + (1 + \sigma)\dot{x}_\psi(t) + \sigma\left(1 - r + \frac{1}{2\sigma}x_\psi^2\right)x_\psi = 0 \quad (2.43)$$

ასე რომ, თუ (2.42) პარამეტრული პირობა დაკმაყოფილებულია, ლორენცის მოდელი (2.41) იქნება მესამე რიგის დიფერენციალური განტოლებებით წარმოდგენილი არაწრფივი სისტემა. რომელსაც გააჩნია ორგანზომილებიანი მიზიდვის მრავალფეროვნება, აღწერილი (2.43) განტოლებით. თუ (2.41)-ში პარამეტრი $r \leq 1$, მაშინ (2.43)-ის თანახმად, (2.41) ლორენცის სისტემა ფლობს ასიმპტოტურ მდგრად წონასწორულ მდგომარეობას: $x_s = \dot{x}_s = z_s = 0$. როდესაც $r > 1$ ლორენცის მოდელი (2.42) პირობის დროს გადის ატრაქტორზე „ჩანგლის“ ტიპის ბიფურკაციით.

ახლა მოვახდინოთ გენერატორის $r(t)$ "მმართველი პარამეტრის" სინთეზირება. ამისათვის ჩავწეროთ (2.16) მოდელი შემდეგი სახით:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= y, \\ \dot{y}(t) &= -(1 + \sigma)y - \sigma(1 - r + z)x, \\ \dot{z}(t) &= -bz + \frac{1}{\sigma}xy + x^2, \\ \dot{r}(t) &= u(x, y, z) = F(t), \end{aligned} \quad (2.44)$$

სადაც $u(x, y, z) = F(t)$ არის $r(t)$ "მმართველი პარამეტრის" სასურველი ცვლილების გენერატორი, რათა შეიქმნას შესაბამისი სტრუქტურები - ატრაქტორები ლორენცის მოდელში.

ამრიგად, ისმება შემდეგი ამოცანა: სინთეზირდეს $u(x, y, z)$ უკუ კავშირი, რომელიც უზრუნველყოფს x_0, y_0, z_0, r_0 ნებისმიერი საწყისი პირობების დროს, ლორენცის მოდელის სტრუქტურაში სასურველი ატრაქტორების შესაბამისი ბიფურკაციებით ფორმირებას. მაგალითად,

„ჩანგლის“ ტიპი. ამ ამოცანის ამოსახსნელად შემოვიტანოთ შემდეგი მაკრო ცვლადი:

$$\psi = z - r + \mu - \alpha \cos x \quad (2.45)$$

ψ მაკრო ცვლადის წარმოებულის:

$$\dot{\psi}(t) = \frac{\partial \psi}{\partial z} \dot{z}(t) + \frac{\partial \psi}{\partial r} \dot{r}(t) + \frac{\partial \psi}{\partial x} \dot{x}(t) \quad (2.46)$$

სადაც, $\frac{\partial \psi}{\partial z} = 1, \frac{\partial \psi}{\partial r} = -1, \frac{\partial \psi}{\partial x} = \alpha \sin x$.

ჩავსვათ რა ψ -ს (2.45) $\dot{\psi}(t)$ (2.46) ფუნქციაში $T\dot{\psi}(t) + \psi = 0$

მივიღებთ:

$$\dot{z}(t) - \dot{r}(t) + \alpha \sin x + \frac{1}{T} \psi = 0$$

შეცვალოთ ამ განტოლებაში შესაბამისი ასახვა $z(t)$ და $r(t)$ -სათვის (2.44)-დან, მივიღებთ:

$$-bz + \frac{1}{\sigma} xy + x^2 - u + \alpha \sin x + \frac{1}{T} \psi = 0,$$

საიდანაც,

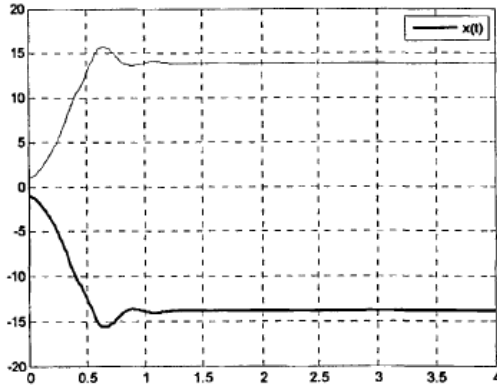
$$u = -bz + \frac{1}{\sigma} xy + x^2 + \alpha \sin x + \frac{1}{T} \psi \quad (2.47)$$

აშკარაა, რომ (2.44) და (2.47) სისტემა დაწყებული x_0, y_0, z_0, r_0 თვითნებური საწყისი პირობებიდან, $t = (3 \div 4)$ დროის შემდეგ T გადის მრავალსახეობაზე $\psi = 0$ (2.44), რომლის გასწვრივ მოძრაობაც აღიწერება დიფერენციალური განტოლებით

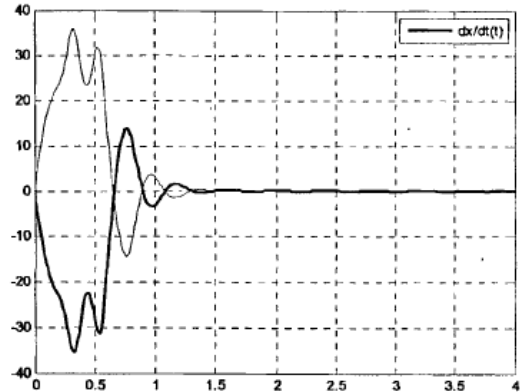
$$\ddot{x}_\psi(t) + (1 + \sigma)\dot{x}_\psi(t) + \sigma(1 - \mu + \alpha \cos x_\psi)x_\psi = 0 \quad (2.48)$$

2.21-2.25 ნახაზებზე ნაჩვენებია (2.44), (2.47) სისტემის მოდელირების შედეგები, $\sigma = 10; b = \frac{8}{3}; \mu = 0,5; \alpha = -2; T = 0,2$ პარამეტრებისათვის, როდესაც საწყისი პირობებია: $r(0) = 28, x(0) = 1, \dot{x}(0) = 0,2, z(0) = 0$. ამ შემთხვევაში, (2.48) განტოლების სტრუქტურიდან გამომდინარე, (2.44) და (2.47) სისტემა თავისი მოძრაობის ფინალურ ეტაპზე გადის „ჩანგლის“ ტიპის ბიფურკაციის ატრაქტორზე. მისი პარამეტრები დამოკიდებულია $\pm x_0$ -ის საწყისი კოორდინატის ნიშანზე. რაც თვალნათლივ ჩანს ნახ. 2.26-ზე. ამასთან ერთად, $z(t), r(t), \psi(t)$ -ს ცვლილებების გრაფიკი ერთმანეთისგან პრაქტიკულად არ განსხვავდება. 2.21-2.25 ნახაზებიდან

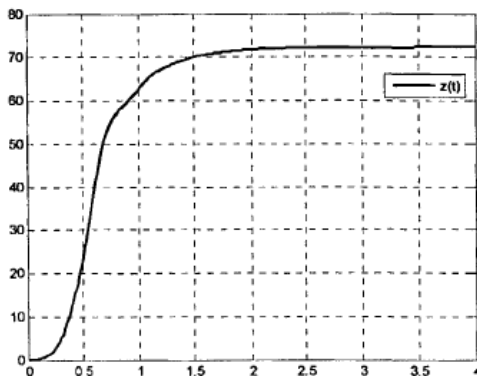
ჩანს, რომ (2.44), (2.47) სისტემაში არ ხდება რაიმე ქაოსური მოძრაობა. თუმცა, როგორც ცნობილია, (2.16) ლორენცის მოდელში პარამეტრებით $\sigma = 10; b = \frac{8}{3}; r_0 = 28$ ასეთი ქაოსური რეჟიმი ყოველთვის არსებობს.



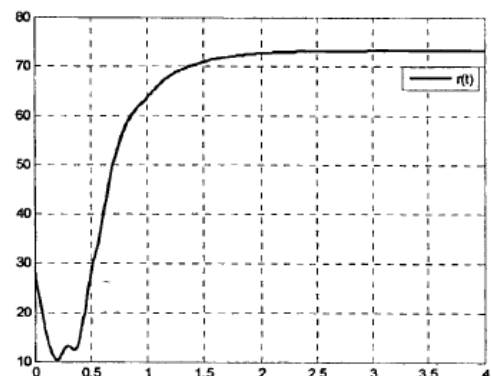
ნახ.2.21- $x(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი



ნახ.2.22 $\dot{x}(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი

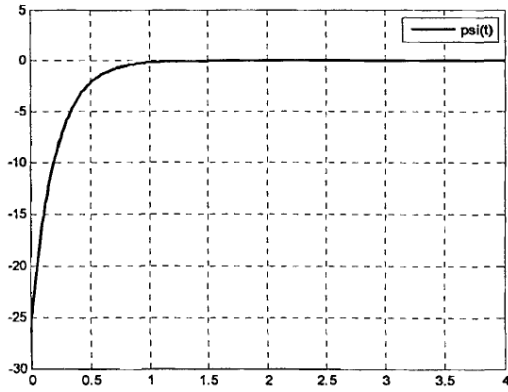


ნახ.2.23 - $z(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი



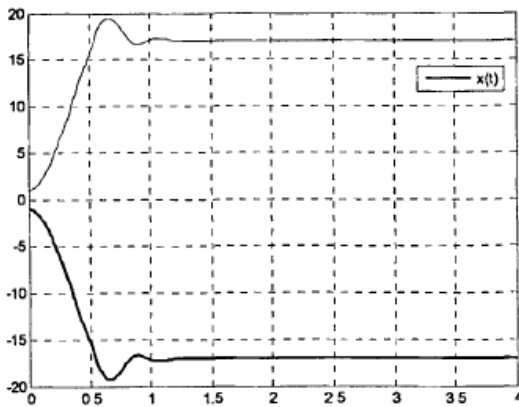
ნახ.2.24- $r(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი

ანალოგიურად, 2.26-2.30 ნახაზებზე ნაჩვენებია (2.44), (2.47) სისტემის მოდელირების შედეგები პარამეტრებისათვის $\sigma = 10; b = \frac{8}{3}; \mu = 0,5; \alpha = 2; T = 0,2$, საწყისი პირობებით $r(0) = 28, x(0) = 1, \dot{x}(0) = 0,2, z(0) = 0$. ამ შემთხვევაში (2.44) და (2.47) სისტემა თავისი მოძრაობის ფინალურ ეტაპზე გადის „ჩანგლის“ ტიპის ბიფურკაციის ატრაქტორზე.

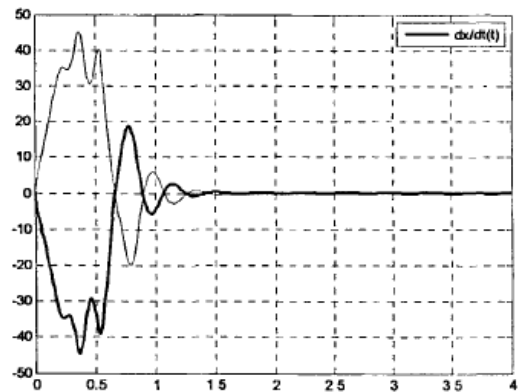


ნახ. 2.25 $\psi(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი

მისი პარამეტრები დამოკიდებულია $\pm x_0$ -ის საწყისი კოორდინატის ნიშანზე. რაც თვალნათლივ ჩანს ნახ. 2.26-ზე. ამასთან ერთად, $z(t), r(t), \psi(t)$ -ს ცვლილებების გრაფიკი ერთმანეთისგან პრაქტიკულად არ განსხვავდება. 2.26-2.30 ნახაზებიდან ჩანს, რომ (2.44), (2.47) სისტემაში არ ხდება რაიმე ქაოსური მოძრაობის რეჟიმი.

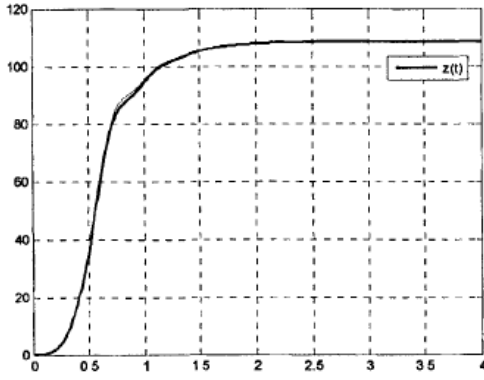


ნახ.2.26 - $x(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი

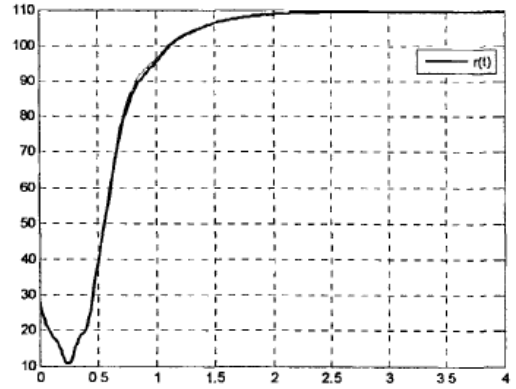


ნახ.2.27- $\dot{x}(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი

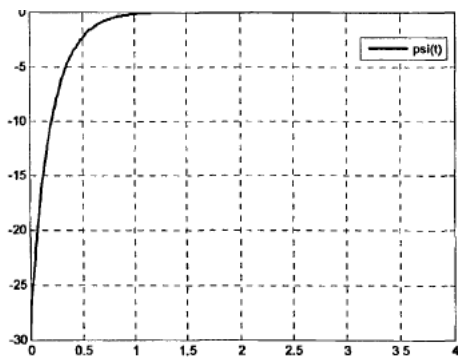
r პარამეტრის დიდი მნიშვნელობის შემთხვევაში, მიღებული (2.44), (2.47) სისტემის მოდელირების შედეგები ნაჩვენებია ნახაზზე 2. 2.31- 2.35. ამ შემთხვევაში მოხდა შემდეგი პარამეტრების შერჩევა: $\sigma = 10$; $b = \frac{8}{3}$; $\mu = 0,5$; $\alpha = 2$; $T = 0,2$ და საწყისი პირობებია $r(0) = 150, x(0) = \pm 0,5, \dot{x}(0) = 0, z(0) = 0,5$.



ნახ.2.28 – $z(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი

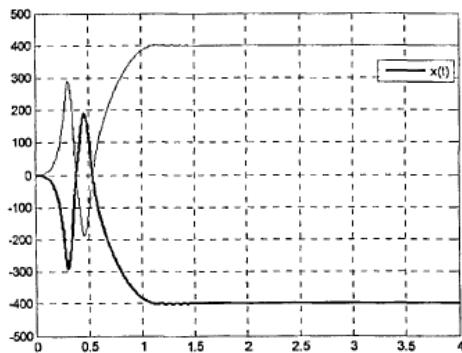


ნახ.2.29- $r(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი

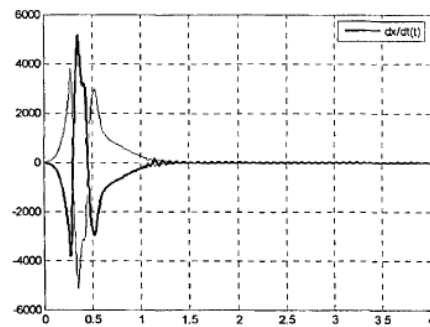


ნახ. 2.30 $\psi(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი

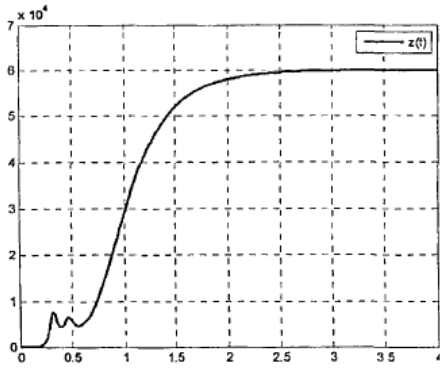
ამ შემთხვევაში (2.44), (2.47) სისტემა თავისი მოძრაობის ფინალურ ეტაპზე გადის „ჩანგლის“ ტიპის ბიფურკაციის ატრაქტორზე. მისი პარამეტრები დამოკიდებულია $\pm x_0$ -ის საწყისი კოორდინატის ნიშანზე. აღნიშნული თვალნათლივ ჩანს ნახ. 2.31-ზე.



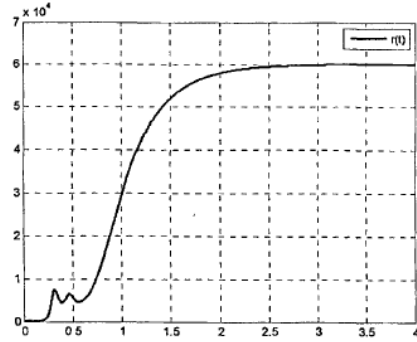
ნახ.2.31 – $x(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი



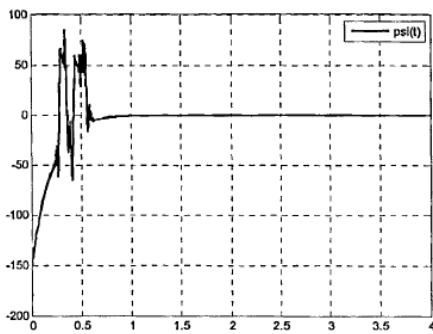
ნახ.2.32- $\dot{x}(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი



ნახ.2.33 – $z(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი



ნახ.2.34- $r(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი



ნახ. 2.35 $\psi(t)$ -ს ცვლილების გრაფიკი

ეს გვიჩვენებს, რომ თუ ჩვენ შევძლებთ $r(t)$ გენერატორის "მმართველი პარამეტრის" სინთეზირებას, მაგ: (2.47), მაშინ ლორენცის მოდელი ხდება ჩვეულებრივი დიფერენციალური განტოლებათა სისტემა, სადაც არ არსებობს არც უცნაური ატრაქტორი, არც ფრაქტალური განზომილება და არც ქაოსი. აქედან გამომდინარე კი, რთული სისტემების მართვა ხდება შესაძლებელი. თუმცა, რეალობაში ეს ყოველთვის არ არის შესაძლებელი.

2.6. მეორე თავის დასკვნები

მოცემულ თავში შემუშავდა სინერგეტიკული დამკვირვებლის გამოყენებით სისტემის დინამიკის გლობალური რეკონსტრუქციის მეთოდზე დაფუძნებული ინფორმაციის დინამიკური დამუშავებისა და დაცვის ახალი მეთოდი, რომელიც ზუსტად აფასებს მმართველ პარამეტრს და შესაბამისად ახდენს ინფორმაციული სიგნალის რეკონსტრუქციას. ეს კი მოცემული მეთოდის კავშირის არხებში ინფორმაციის დაუმახინჯებელი სახით გადაცემის/აღდგენის ამოცანებში გამოყენების საშუალებას იძლევა.

ასევე შემუშავდა „მმართველი პარამეტრების“ გენერატორების სინერგეტიკული სინთეზის მეთოდი, რომელიც ეფუძნება აგრეგირებული რეგულატორების ანალიზური კონსტრუირების მეთოდის გამოყენებას და შესაძლებელს ხდის ლორენცის მოდელის სტრუქტურაში სასურველი ატრაქტორების ფორმირება მოხდეს.

ორივე მეთოდი თავის გამოყენებას ჰპოვებს ინფორმაციის დამუშავებისა და დაცვის ახალი კლასის თვითორგანიზებადი სისტემის შექმნაში.

თავი 3. მოდელირება და პროგრამული კოდი

3.1. პროგრამის დანიშნულება და სტრუქტურა

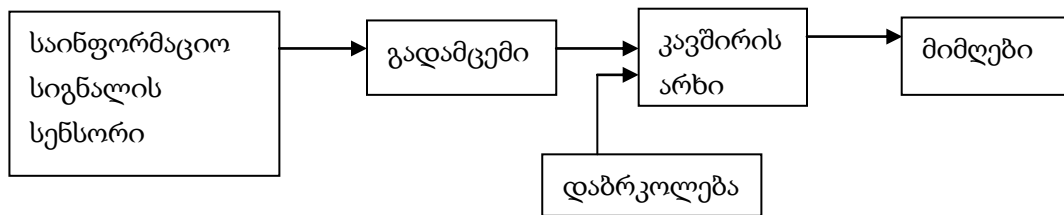
ქაოსური დინამიკის მქონე სისტემების პროგრამული მოდელირება განხორციელდა MATLAB-ის Simulink პაკეტის გარემოში და განკუთვნილია ქაოსური პროცესების მართვისათვის დინამიკური სისტემების სინთეზირების მეთოდების მოდელირებისთვის.

სიგნალის დასამუშავებლად, MATLAB Simulink პაკეტის გარემოში აიგო დინამიკური სისტემის მათემატიკური მოდელი. ეს სისტემა ეფუძნებოდა ლორენცის მოდელს, რომელშიც ჩნდება სტრუქტურა ე.წ. "უცნაური" ატრაქტორის სახელით. ამ მოდელისთვის შემოვიტანეთ მმართველი ზემოქმედება, რომელიც მივიღეთ სინერგეტიკული სინთეზის პროცესში (პროცედურა აღწერილია წინა თავში) მაკროცვლადების არჩევანის საფუძველზე. ამდენად, მოდელირების გარემო წარმოდგენილია შემდეგი მოდულებით:

- საწყისი პირობების მითითების მოდული ;
- მოდელისთვის პარამეტრების მინიჭების მოდული;
- სიმულაციური პარამეტრების შესაქმნელი მოდული;
- მოდელირების შედეგების გამოსატანი მოდული;
- მოდელირების შედეგების შენახვის მოდული შედეგების შემდგომი ანალიზისათვის (მოდელირების სხვადასხვა საწყისი პირობებისა და პარამეტრების დროს);
- გადამცემზე ინფორმაციის დამუშავების მოდული;
- მიმღებ მხარეზე სიგნალის რეკონსტრუქციის მოდული;
- საინფორმაციო სიგნალის სენსორის მოდული;
- კავშირის არხის მოდული;
- შემთხვევითი სიგნალების (დაბრკოლება, ხმაური) გენერირების მოდული;

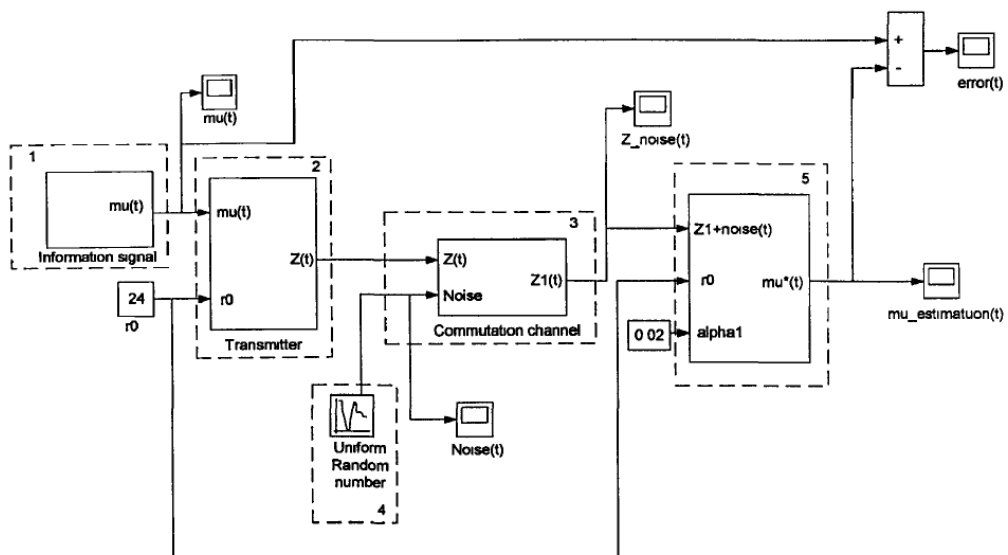
- "მმართველი პარამეტრის" გენერატორის მოდული.

მოდელირების პროცესში სენსორის სიგნალი შედის ინფორმაციის დამუშავების მოდულში, შემდეგ კავშირის არხის მოდულში, სადაც სასურველი სიგნალი განიცდის ხმაურის ზეგავლენას. შემდეგ მოდიფიცირებული სასურველი სიგნალი მიმდებს მიეწოდება (სიგნალის რეკონსტრუქციის მოდული), სადაც მეორე თავში შემოთავაზებული სიგნალის რეკონსტრუქციის ალგორითმები სრულდება. იხ. ნახაზი 3.1.



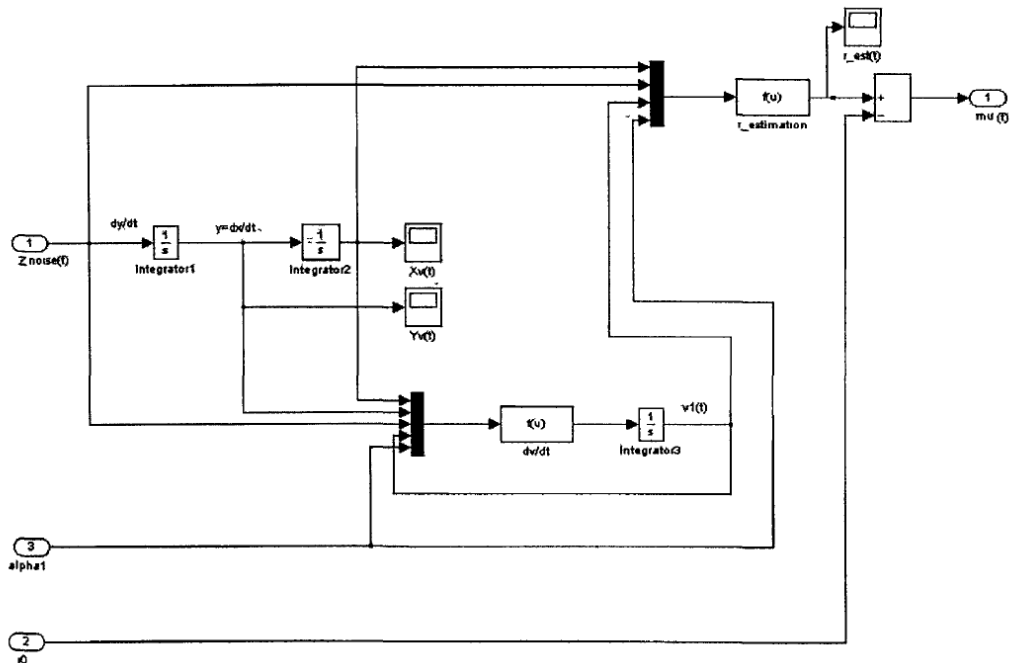
ნახ. 3.1. პროგრამის მუშაობის ფუნქციონალური სქემა

ნახაზ 3.2-ზე ნაჩვენებია შემოთავაზებული სისტემის და რეკონსტრუქციის ინფორმაციის ბლოკ-სქემა MATLAB პაკეტის Simulink გარემოში.



ნახ. 3.2. ინფორმაციის გადაცემის და რეკონსტრუქციის სისტემის ბლოკ-სქემა

სინერგეტიკული დამკვირვებლის ბლოკ-სქემა წარმოდგენილია MATLAB პაკეტის Simulink გარემოში ნახაზი 3.3.



ნახ. 3.3. მმართველ პარამეტრზე სინერგეტიკული დამკვირვებლის ბლოკ-სქემა

1 - საინფორმაციო სიგნალის სენსორი; 2 - გადამცემი; 3- კავშირის არხი; 4-დაყოვნების სენსორი; 5 - მიმღები.

როდესაც დამკვირვებლის გამოყენებით ვახდენთ სისტემის მუშაობის მოდელირებას, სრულდება შემაშფოთებელი ზეგავლენის მქონე პარამეტრების შეაფასება. აღნიშნულს შემდგომ გამოვიყენებთ მიმღების მოდულში სასარგებლო სიგნალის რეკონსტრუქციისათვის.

Simulink-ის გარემოს გამოყენებით, თითოეული მოდული წარმოდგენილია თვალსაჩინო სახით. გამოყენებული მოდულური პრინციპი (მოდელის შექმნა ფუნქციურად სრული ელემენტებისგან) პროგრამული მოდელების კომპლექსს ხდის მოქნილს, როგორც სისტემის სტრუქტურის შეცვლის თვალსაზრისით, ასევე მისი პარამეტრების ვარირებით.

გარდა ამისა, კომპლექსის სტრუქტურა შეიცავს სხვადასხვა სისტემებისგან შემდგარ მოდელთა ბანკს, რომელთა ფუნქციონირებისადაც

წარმოიქმნება "უცნაური" ატრაქტორები. საჭიროების შემთხვევაში, მომხმარებელს შეუძლია შეცვალოს ლორენცის მოდელი სხვა მოდელით.

ამ დროისათვის მოდელირების კომპლექსის რეალიზაცია ხდება სტრუქტურების სახით Simulink-ის გარემოში და სრულდება MATLAB სისტემაში. საჭიროების შემთხვევაში, შესაძლებელია კომპლექსის პროგრამული უზრუნველყოფის დახვეწა და ცალკეული stand-alone-fyaujia - ის შექმნა, რომელიც საშუალებას გვაძლევს შევასრულოთ სიმულაციები MATLAB-Simulink სისტემის გაშვების გარეშე. გარდა ამისა, Simulink -ის გარმოს ფუნქციური მოდელი შეიძლება ექსპორტირებულ იქნას, პროგრამულის კოდის სახით, ზოგიერთ თანამედროვე მაღალი დონის ენების გარემოში (Simulink -ის მოდელი შეიძლება აღიწეროს C, C ++ ენებზე და სხვა). ეს უკანასკნელი გულისხმობს იმას, რომ შესაძლებელია უკვე შექმნილი მეთოდები და ალგორითმები გამოვიყენოთ მონაცემთა კვლევის და მოდელირების სხვა პროგრამების შექმნისას.

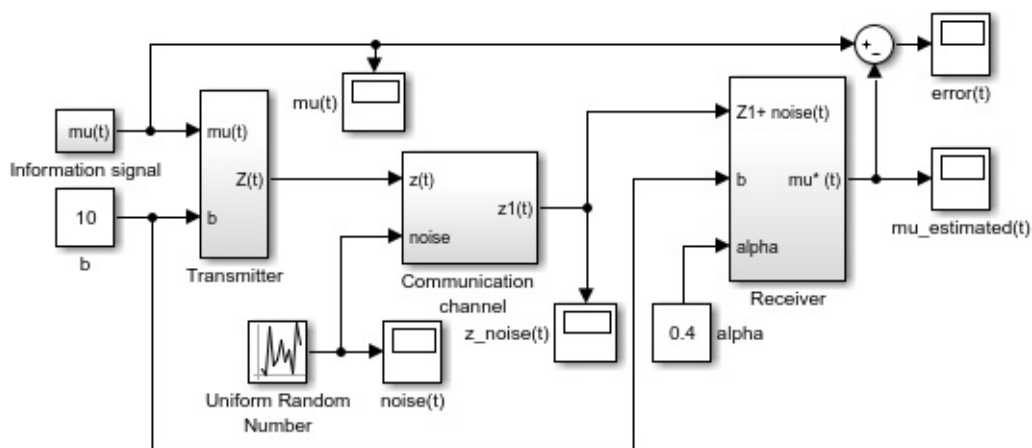
პროგრამული მოდელირება ხორციელდება MATLAB-Simulink სისტემაში, რომელსაც შეიძლება ეწოდოს ულტრა მაღალი დონის პროგრამირების ენა, მაგრამ შემოთავაზებული კომპლექსი არ არის ოპტიმალური სისწრაფის თვალსაზრისით და მას აქვს რეალური დროის მქონე სისტემებისათვის პირდაპირი გამოყენების შეზღუდვა.

3.2. პროგრამული მოდელის ფუნქციონალური ბლოკების აღწერა Simulink გარემოში

პროგრამული მოდელი შედგება როგორც Simulink ბიბლიოთეკის სტანდარტული მოდულებისაგან (სიმულაციური შედეგების ჩვენების მოდულები, მუდმივების და ცვლადების მითითება, სტანდარტული ინტეგრატორის მოდული და ა.შ.) ასევე იმ მოდულებისაგან, რომელთა სტრუქტურა და პარამეტრებიც განსაზღვრულია კომპლექსის შემუშავების

დროს. ქვემოთ მოყვანილია ჩვენს მიერ შემუშავებული მოდულები (ბლოკები)-ს აღწერა.

მოდელის საერთო სახე, რომელიც შეესაბამება 3.1 ნახ.-ის სტრუქტურას და 3.2 დიაგრამას წარმოდგენილია ნახაზ. 3.4.-ზე.



ნახ. 3.4. მოდელის საერთო სახე

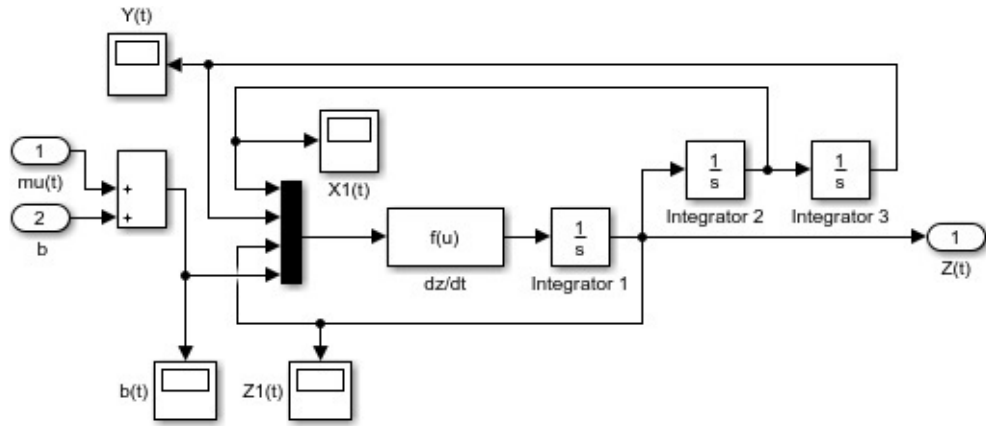
ამ მოდელს აქვს შემდეგი ბლოკები:

1. საინფორმაციო სიგნალის ფორმირების ბლოკი (Information signal). ეს არის ბლოკი ერთი საინფორმაციო გამომავალით; წარმოდგენილია შემადგენელი მოდულის სახით, რომლის სტრუქტურა ნაჩვენებია ნახ. 3.5-ზე (შემადგენელი მოდულების სტრუქტურების სანახავად, თავის მაჩვენებლით ორჯერ უნდა დააჭიროთ ძირითადი პროგრამული მოდელის კომპლექსის სქემაზე შესაბამის მოდულს Simulink ფანჯარაში).



ნახ. 3.5. საინფორმაციო სიგნალის ფორმირების ბლოკის სტრუქტურა

2. გადამცემის ბლოკი (Transmitter) ნაჩვენებია ნახ. 3.6. ის არის „დაკეცილი“ მოდული, რომელშიც არის კიდევ გადამცემის მოდელიც. აღნიშნული რელიზებულია შემდეგი სქემის სახით:

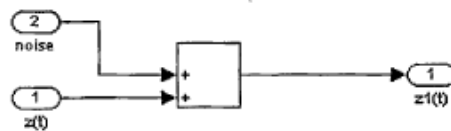


ნახ. 3.6 გადამცემის მოდელის ბლოკ-სქემა

გადამცემის მოდული აქვს 1 საინფორმაციო შესასვლელი, 1 მუდმივი სიგნალის შეტანა და 1 საინფორმაციო გამომავალი. ამ მოდულის კონფიგურაციისა და ტესტირებისათვის გათვალისწინებულია მისი ავტონომიური მოდელირების შესაძლებლობა. ამისათვის სტრუქტურულ დიაგრამაზე ვირტუალურ ოსცილოგრაფებზე სიგნალების ასახვის მოდულები. გადამცემის მოდულთან მუშაობის მაგალითი მოდელირების ავტონომიურ რეჟიმში ნაჩვენებია ნახაზზე 3.6.

ინტეგრატორების პარამეტრების შეცვლის გარდა, გადამცემი მოდულის ძირითადი პარამეტრები მიეთითება $f(u)$ ფუნქციის ბლოკის სახით.

3. კავშირის არხის მოდული (Communication channel). წარმოდგენილია ნახ. 3.7-ზე „დაკეცილი“ მოდულის სახით, რომელიც ახდენს შემდეგი სტრუქტურის რეალიზაციას:

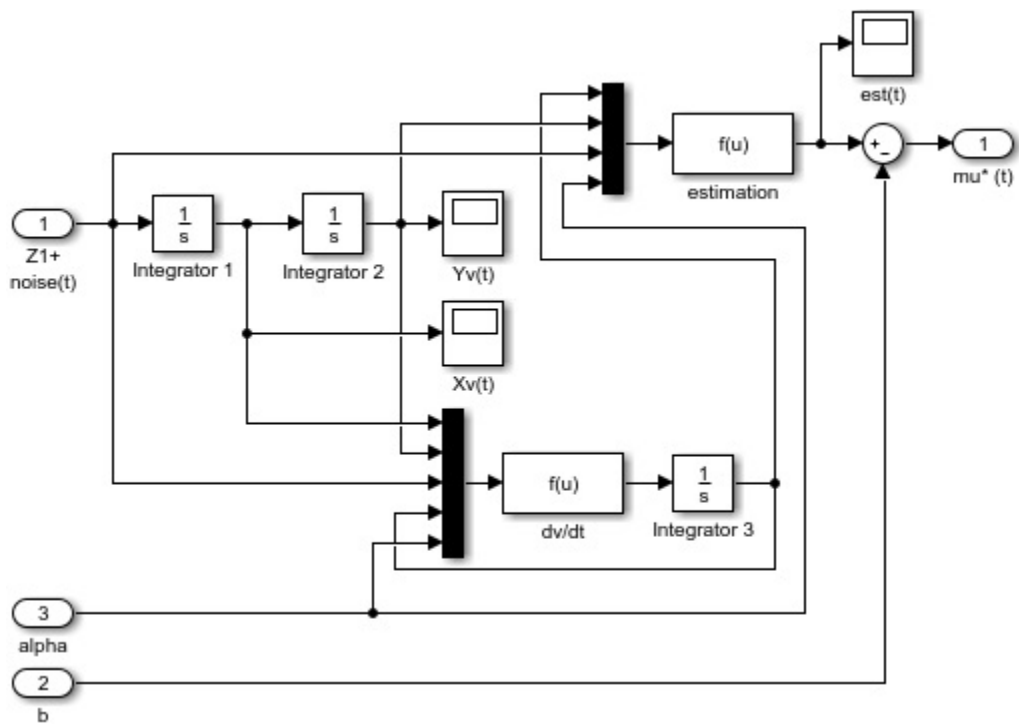


ნახ. 3.7. კავშირის არხის მოდულის სტრუქტურა

არხის მოდულს გააჩნია ორი საინფორმაციო პორტი და ერთი ინფორმაციის გამომავალი; ის ფორმირების ბლოკში ასრულებს შეკრების ფუნქციას: კრებს მომხმარებლის საინფორმაციო სიგნალს და შემთხვევით

გენერირებულს. მოდულის გამოსასვლელზე, ფორმირდება სიგნალი $z(t)$, რომელიც ახდენს კომუნიკაციის არხზე გადაცემული რეალური სიგნალის ქცევის მოდელირებას. ამ მოდულის ავტონომიური მოდელირება ამ ეტაპზე არ არის გათვალისწინებული.

4. მიმღების მოდული (Receiver) არის "დაკეცილი" მოდული, სიგნალისათვის აქვს 1 საინფორმაციო შესასვლელი, ასევე ორი შესასვლელი მმართველი პარამეტრების მისათითებლად. მოდულის სტრუქტურა ნაჩვენებია ნახაზზე. 3.7. პარამეტრების შესარჩევად მოდული ითვალისწინებს მოდელირების შესაძლებლობას ავტონომიურ რეჟიმში. (იხილეთ ნახ. 3.8).



ნახ. 3.8 მიმღების მოდულის ფანჯარა.

მომდევნო ეტაპზე მიმღების მოდულის გამომავალი სიგნალი მიეთითება ვირტუალურ ოსცილოგრაფზე და გამომავალი სიგნალი ასევე შედარებულია ორიგინალ (დამახინჯებული, ხმაურის გარეშე) საინფორმაციო სიგნალთან, გამოტანლია შეცდომის გრაფიკი სიგნალის აღდგენის პროცედურის დასრულების შემდგომ.

პროგრამული მოდელის სტრუქტურაში გამოიყენება სხვა მოდულებიც, თუმცა მათი უმრავლესობა არის Simulink სისტემის სტანდარტული მოდულები და ემსახურებიან მუდმივების შექმნას, სიგნალის მულტიპლექსურ შესრულებას და ძირითადი არითმეტიკული ოპერაციების შესრულებას, ასევე შედარების ოპერაციას.

ამ მარტივი სტანდარტული მოდელების აღწერა აქ არ არის მოცემული; დამატებითი ინფორმაციის გაცნობა შესაძლებელია MATLAB / Simulink სისტემის დოკუმენტაციაში. ამდენად, შემოთავაზებული პროგრამული მოდელი შედგება Simulink სისტემის სტანდარტული მოდულების კომპლექსისაგან, რომელთა სტრუქტურაც ახდენს დისერტაციის მე -2 თავით შემუშავებულ დახურულ სისტემების რეალიზებას. პროგრამული მოდელის პარამეტრების შეცვლა კი შეიძლება მოდელის ტოპოლოგიაში, ან MATLAB Simulink სისტემის გრაფიკული ინტერფეისის საშუალებით.

3.3. მესამე თავის დასკვნები

აღნიშნულ თავში აღწერილია პროგრამული მოდელირება, რომელიც საშუალებას იძლევა გამოკვლევულ იქნას ქაოსური დინამიკის მქონე სისტემების ქცევა მმართველი პარამეტრების სხვადასხვა მნიშვნელობების დროს. აღნიშნული პროგრამა საშუალებას იძლევა, რომ მოვახდინოთ გადამცემზე ინფორმაციის დამუშავების პროცესის და მიმღებ მხარეზე კავშირის არხში გავლილი სიგნალის რეკონსტრუქციის პროცესის მოდელირება. მოყვანილია ძირითადი ფუნქციური მოდულის დეტალური აღწერა. შექმნილი პროგრამის პრაქტიკული ღირებულება განისაზღვრება შემდეგი კომპონენტებით:

1. სისტემის სტრუქტურა, რომელიც ასახავს ნაშრომის შედეგებს, აღწერილია მე-2 თავში.
2. მართვის ფუნქციები, რომლებიც მითითებულია MATLAB / Simulink სისტემის მომხმარებლის მოდულებიდან, მიიღება მე-2 თავიდან სინერგეტიკული მართვის თეორიის სისტემური მეთოდების კონსტრუირებით.
3. მე-2 თავში მიღებული პარამეტრების გამოყენება შესაძლებელია პროცესის სიმულაციური მოდელირებისათვის.

გარდა ამისა, აგებული კომპლექსი იძლევა იმის შესაძლებლობას, რომ მოდელირება გაუკეთდეს "მმართველი პარამეტრის" გენერატორს. აღნიშნული დაფუძნებულია არაკ მეთოდზე, რათა მოხდეს მართვა იმ ქაოსური რეჟიმების, რომელიც აღმოცენდება დინამიკური სისტემების ფუნქციონირებისას.

დასკვნა

ნაშრომში გამოკვლეულ იქნა არაწრფივი დინამიკის მეთოდები, თვითორგანიზებადი ინფორმაციული სისტემების ახალი კლასის შესაქმნელად.

ამისათვის შესწავლილია ინფორმაციის თეორიისადმი არსებული მიდგომები; გაანალიზებულია არაწრფივი დინამიკის მქონე ავტორხვევითი სისტემების რეგულარული და ქაოსური დინამიკის მქონე ბაზური მოდელები.

ასევე გამოკვლეულია ქაოსის მართვის პრობლემები არაკ მეთოდის გამოყენებით; ქაოსური დინამიკის მქონე არაწრფივი ობიექტების სამართავად - მაგალითისათვის მოყვანილია ლორენცის მოდელი. (აქ თუ მართვა არ სრულდება, აღმოცენდება ქაოსური რეჟიმები). გამოკვლეულია ინფორმაციის დამუშავების სხვადასხვა მეთოდები იმ მიზნით, თუ როგორ ხდება ინფორმაციის დაფარული გადაცემა ქაოსურ სისტემებში.

მიღებული შედეგებია:

1. შემუშავებულია სინერგეტიკული მეთოდი დინამიკური ქაოსის მქონე არაწრფივი სისტემების რეკონსტრუქციისათვის, რაც დაფუძნებულია მიმდინარე მმართველი პარამეტრის იდენტიფიკაციაზე.

2. შემუშავებულია პარამეტრის დამკვირვებელზე სინერგეტიკული სინთეზის მეთოდი.

3. შემუშავებულია ინფორმაციის დამუშავების და გადაცემის ახალი მეთოდი, რომელიც ეფუძნება ლორენცის ქაოსური ატრაქტორის ფორმირებას (ფაზურ სივრცეში თავისუფლების ხარისხის შემცირების გზით. ე.ი. სისტემაში აღმოცენდება თვითორგანიზების პროცესი).

4. შემუშავებულია გენერატორების სინთეზის მეთოდი „მმართველი პარამეტრების“ ლორენცის ქაოსური დინამიკის მქონე სისტემაში, რომელიც საშუალებას გვაძლევს ქაოსურ სისტემაში ფორმირება გავუკეთოთ მოძრაობის რეგულარულ რეჟიმებს.

5. შემუშავებულია პროგრამული მოდელი რომელიც საშუალებას იძლევა, გამოვიკვლიოთ ქაოსური დინამიკის მქონე სისტემის საქციელი მოძრაობის სხვადასხვა რეჟიმებში.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Haken H. Information and Self-Organization. Verlag Springer. 2006. 258 p
2. Никитенков Н.Н. Синергетика для инженеров. Изд-во ТПУ, 2009. 168 с
3. Haken H. “Modellierungskonzepte der Synergetik und Theorie der Selbstorganisation”. Review of Modern Physics , Journal. 1975.
4. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами. Изд. стереотип. 2018 г. 240с.
5. Haken H . Self-Organization in Physics, Chemistry and Biology. Berlin, Germany. Verlag Springer. 1978
6. Hazime Mori , By (author) Yoshiki Kuramoto , Translated by G.C. Paquette. Dissipative Structures and Chaos. Publisher Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. KG. 2011. 299p.
7. Васин В.В., Ряшко Л.Б., Элементы нелинейной динамики. Изд. Институт компьютерных исследований. 2006. 164
8. Ильин, Колесников, Саратов. Теория колебаний. Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2003. 272
9. Nicolis Gregorie, Prigoginie Ilia, Exploring Complexity: An Introduction. Science. 1989. 313p.
10. Трубецков Дмитрий. Введение в синергетику. Колебания и волны. Изд. Либроком. 2015. 224с.
11. Астрахов В., Вадивасова Т.Е., Анищенко В.С. Нелинейная динамика хаотических и стохастических систем. Изд. Институт компьютерных исследований. 2004 г. 115-230с. 544с.
12. Lichtenberg, Allan, Lieberman, Michael. Regular and Chaotic Dynamics. Verlag Sringer. 1992. 643p.
13. Ланда П.С. Нелинейные колебания и волны. Издат: Либроком. 2019. 552
14. Коровин С.К. (Ред.) Нелинейная динамика и управление. Издательство: Едиториал УРСС 1999. 288
15. Wenjing Ding. Self-Excited Vibration Theory, Paradigms, and Research Methods. Verlag: Springer Berlin Heidelberg. 2010. 56-78p.
16. Walter Fox Smith. Waves and Oscillations A Prelude to Quantum Mechanics. Oxford University press. 2010. 416p.
17. Edward N. Lorenz. Deterministic nonperiodic flow. Journal of the Atmospheric Sciences. Vol. 20, #2, March, 1963, pp. 130-141 1963.

18. Anishchenko V. S., Dynamical Chaos-Models and Experiments.
Publisher: WSc Pub Co Inc . 1995. 400 p.
19. Guckenheimer J., Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems. Bifurcations of Vector Fields. Publisher: Springer; 1st ed. 1983. Corr. 6th printing 2002 edition (February 8, 2002) . 462 pages.
20. Qais H. Alsafasfeh, Mohammad S. Al-Arni. A New Chaotic Behavior from Lorenz and Rossler Systems and Its Electronic Circuit Implementation.
Journal: Circuits and Systems, Vol.2 No.2, March 28, 2011
21. Cvitanovic P.. Universality In Chaos, 2nd Edition. Publisher:Taylor and Francis. 1989. 648 pages
22. Crutchfield J. P.. Power Spectra and Mixing Properties of Strange Attractors.
Publisher: Annals of the New York Academy of Sciences 1980 357p.
23. Магницкий Н.А. Теория динамического хаоса. изд. ленанд 2011. 230
24. Малинецкий Г.Г. Математические основы синергетики. Изд.стереотип. 2016. 310
25. Olfa Boubaker Sajad Jafari. Recent Advances in Chaotic Systems and Synchronization 1st Edition. Academic Press. 2018. 391p.
26. Табор М. Хаос и интегрируемость в нелинейной динамике. , М.: Едиториал УРСС, 2001. 320 с
27. Залогин Николай, Кислов Владимир. Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. Издательство Радиотехника. 2006. 208ст.
28. Федорова И.Б. . Информационные технологии в радиотехнических системах (3-е издание). Изд. МГТУ. 2011. 848 ст.
29. Бодров О.А. Синтез фазо- и частотноманипулированных сигналов в радиотехнических системах. Издательство: Горячая линия – Телеком. 2016.
30. Eisenkraft Marcio. Chaotic Signals in Digital Communications. Press T & F group . 2014. 439
31. Steven H. Strogatz Nonlinear Dynamics and Chaos. Publisher: CRC Press; 1 edition (December 29, 2000) . 512 pages
32. Шахтарин Б.И., Кобылкина П.И., Сидоркина Ю.А. и др. Генераторы хаотических колебаний. Изд. Горячая Линия - Телеком . 2014. 248 стр.

33. Магницкий Николай. Методическое пособие по курсу "Основы хаотической динамики". Издательство Ленанд. 2017. 46ст.
34. Овсянникова Д. А.. Динамика, оптимизация, управление. Издат: СПбГУ. 2004. 164
35. Huaguaang Zhang. Controlling chaos: suppression, synchronization and chaotification., Verlag: Springer, 2009, 357.
36. Luis Vazquez de Frutos , Salvador Jimenez. Newtonian Nonlinear Dynamics for Complex Linear and Optimization Problems. Publisher Springer-Verlag New York Inc. 2012. 140p.
37. Kapitula T., Promislow K., Dynamical Stability of Nonlinear Waves. Verlag Springer. 2013. 369 pages.
38. Андреева Елена Аркадьевна. Оптимальное управление динамическими системами. Изд: Тверской государственный университет . 2016. 188.
39. Климонтович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса. Ленанд. 2014. 328
40. Алексеевский В.С. Синергетика менеджмента. Либроком. 2017. 360
41. Израилович М.Я., Обухов А.Н. Параметрическое управление автоколебаниями. Либроком. 2010. 160
42. Ahmad Taher Azar, Sundarapandian Vaidyanathan, Adel Ouannas. Fractional Order Control and Synchronization of Chaotic Systems. Springer. 2018. 877
43. Васина Г. Методы инженерного синтеза сложных систем управления. Издательство: МГТУ. 2016. 273
44. Нартов Б., Братцев С., Мурзин Ф., Пунтус. А. Конфликт сложных систем. Модели и управление. Издательство МАИ. 2014. 118.
45. Баркин А.И. Абсолютная устойчивость систем управления. Либроком. 2012. 176
46. Sparrow C. The Lorenz Equations. Springer. Vol. 41. 1982. 270p.
47. Christos H. Skiadas, Charilaos Skiadas. Handbook of Applications of Chaos Theory. Chapman and Hall/CRC . Published June 1, 2016 . 934 Pages
48. Tomasz Kapitaniak , J. Brindley. Chaos and Nonlinear Mechanics: Proceedings of Euromech Colloquium 308 "Chaos and Noise in Dynamical Systems". Publisher: World Scientific Publishing Co Pte Ltd (1 October 1994). 400

49. Nada Jevtic and Jeffrey S. Schweitzer. Identifying Chaotic and Quasiperiodic Time-Series Candidates for Efficient Nonlinear Projective Noise Reduction. World Scientific. 2001. 101-110.
50. Buscarino A, Fortuna L, Stoop R. Advances on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems. World Scientific. January 2019. 152p.
51. Cencini M., Cecconi F., Vulpiani A. Chaos From Simple Models to Complex Systems. World Scientific. September 2009. 480
52. Zhang H., Liu D., Wang Z. Controlling Chaos: Suppression, Synchronization and Chaotification. publisher Springer. 2011. 244p
53. John Boardman, Brian Sauser. Systems Thinking: Coping with 21st Century Problems. CRC Press. Published January 17, 2008. 240 p.
54. Kristina Mallory and Robert A. Van Gorder. Competitive Modes for the Detection of Chaotic Parameter Regimes in the General Chaotic Bilinear System of Lorenz Type. International Journal of Bifurcation and Chaos Vol. 25, No. 04, 1530012 (2015).
55. Шабунин А.В. Синхронизация и мультистабильность в связанных системах с хаотической динамикой. Изд-во Сарат. ун-та, 2013. — 137 с
56. Анищенко В., Астахов В., Вадивасова Т. Регулярные и хаотические автоколебания. Интеллект. 2009. 312с.
57. Olfa Boubaker Sajad Jafari. Recent Advances in Chaotic Systems and Synchronization. Academic Press. 8th November 2018. 391
58. ჯ. ხუნწარია, ვ. აბულაძე. ტელეკომუნიკაციის სისტემები. თბილისი. 2001. 123
59. რობერტ ჰილბორნი. ქაოსი და არაწრფივი სისტემების დინამიკა. შესავალი კურსი მეცნიერებისა და ინჟინრებისათვის. (პირველი ქართული გამოცემა). ილიას სახელმწიფო უნივერსიტეტის გამომცემლობა. 2010. 769
60. ა. გუგუშვილი. მართვის სისტემები, მესამე ნაწილი. სინერგეტიკა. სტუ. თბილისი. 2004. 690.
61. ვ.სესაძე, ვ.კეკელაძე, ნ. სესაძე. სინერგეტიკა, არაწრფივი სისტემების სინთეზი. მონოგრაფია, სტუ.თბილისი. 2009. 275გვ.

დანართი I

ინფორმაციის დამამუშავებელი და კავშირის არხზე
გადამცემი სისტემის მოდელირების პროგრამის ლისტინგი

```
clear all      % მუხსიერების გაწმენდა
global sigma b r0 al rm t1k t2k t3k tmax rm2
              % გლობალური ცვლადების
გამოცხადება
sigma=10;
b=8/3;
r0=24;
al=0.2;
rm=15;
rm2=35;
t1k=10;
t2k=20;

t3k=30;
sgl=1;

                                % ინტეგრირება %
t0=0;  %დროის საწყისი მომენტი
tmax=40; %დროის ბოლო მომენტი
              %საწყისი პირობები, ანუ ცვლადები
              მნიშვნელობები t0 დროს %
x0=[0.01 0 0 0];
disp('INTEGRATION...')
```



```

opt=odeset('MaxStep',0.003); %ინტეგრირების
მაქსიმალური ნაბიჯი

% პროგრამის გამოძახება რათა მოხდეს დიფ.განტოლების
მარჯვენა ნაწილის ინტეგრირება, რომელიც მოცემულია
სკრიპტში sys_fx_2.m დროის ინტერვალში [t0 tmax] საწყისი
პირობით x0.

ინტეგრირების შედეგები ინახება t 2 მასივში - დროებითი
ანგარიშები,

y2 - მდგომარეობის ცვლადების მნიშვნელობა (მასივი 4
სვეტისაგან და N სტრიქონისაგან, სადაც N=size(y2,1)) %
[t2,y2]=ode45('sys_fx_2',[t0 tmax] ,x0',opt);

% ჯამში ფორმირებულია სიგნალი კავშირის არხში
გადასაცემად z(t)=y2(:,3) %

PLOTTING
disp('PLOTTING...')

% გადამცემზე მდგომარეობის ცვლადების ცვლილებების
გრაფიკების გამოტანა ერთ ფანაჯრაში %
figure(1)
plot(t2,y2(:,1), 'r',t2,y2(:,2), 'k'),grid,legend('X(t) ', 'Y(t)')
figure(2)
plot(t2,y2(:,3), 'k'),grid,legend('Z(t)')
n=size(y2,1);
for i=1:n
mu(i)=stepP(t2(i),t1 k,t2k,0,rm, 1 )+stepP(t2(i),t3k,tmax,0,rm2,1);
end
figure(3)

```

```

plot(t2,mu, 'k'),grid,legend('Input mu(t)')
%სიგნალის Z(t)=y2(:,3) გადაცემა კავშირის არხით%
noise_power=40; % დეციბალში
zv = awgn(y2(:,3),noise_power); % Z(t) თეთრი ხმაურით
figure(4)
plot(t2,zv, 'k'),grid,Legend('Znoise(t)')
% მიმღებში სიგნალების ფორმირება და შეფასების
გამოთვლა%
yv(1)=0; xv(1)=0.01; wl(1)=0;
tk(1)=t2(1);
rvl_est(1)=1+vv1 ( 1 )+a 1 *xv( 1 )*zv(1)/(b* sigma);
mu_(1)=rvl_est(1)-r0;
k=1;
while k<n
    h=(t2(k+1 )-
    t2(k))/1 ;
    %hh(k)=h;
    yv(k+1)=yv(k)
    +h*zv(k);
    xv(k+1)=xv(k)
    +h*yv(k);
    G1 (k)=-b* (sigma+1 )*yv(k)-(b+sigma+1 )*zv(k)-
xv(k)^2*y v(k)- sigma*xv(k)^3+yv(k)* ( (sigma+1)*yv(k)+zv(k)
)/xv(k);
    vv1 (k+1 )=vv1 (k)+h* (-a 1 *zv(k)*yv(k)/(b* sigma)- al
    *xv(k)*(G1(k))/(b*sigma)-al *xv(k)^2*(vv1(k)+al
    *xv(k)*zv(k)/(b*sigma))); rvl_est(k+1 )= 1 +vv1 (k)+a 1 *xv(k)*
    zv(k)/(b* sigma);

```

```

mu_(k+1)-rv 1 _est(k+1)-r0;
tk(k+1)=t2(k+1);
k=k+1;
end
figure(5)
plot(tk,x,v,'b' tk, yv, 'r'),grid,legend('Xv (t) ',
'Yv(t)') figure(5)
plot(t2,rv1_est,
'r'),grid,legend('r_est(t)') figure(6)
plot3(y2(:,1),y2(:,2),y2(:,3),
'b'),grid figure(7)
plot(tk,mu_),grid,legend('Output mu(t)')
function fx=sysfx_2(t,xx)
x=xx(1); y=xx(2); z=xx(3); vl=xx(4);
global sigma b r0 al rm t1k t2k t3k rm2 t max %
მუდმივები %
r=r0+stepP(t,t1k,t2k,0,rm, 1)+stepP(t,t3k,tmax,0,rm2,1);
G1=-b*(sigma+1)*y-(b+sigma+1)*z-x^2*y-sigma*x^3+y*
*((sigma+1)*y+z)/x; % მარჯვენა
ნაწილი %
fx
=
[y
;
z;
b*sigma*(r-1)*x+G1;

```

$$\begin{aligned}
 & -aI \cdot z \cdot y / (b \cdot \sigma) - aI \\
 & \cdot x \cdot (G1) / (b \cdot \sigma) - \\
 & aI \cdot x^2 \cdot (v1 + aI \cdot x \cdot z / (b \cdot \sigma))].
 \end{aligned}$$

დანართი II

ქაოსური დინამიკის სისტემებში "მმართველი პარამეტრების" გენერატორების მოდელირების პროგრამის ლისტინგი

```
function graph_lorentz(tt,yy,tsk)
global sigma b mu beta T a
nn=size(yy,1);
if tsk=0
    figure(1)
    plot(tt,yy(:,1),'k'),grid,legend('x(t)')
    figure(2)
    plot(tt,yy(:,2),'k'),grid,legend('
dx/dt(t)') else
    if tsk=1
    figure(1)
    plot(tt,yy(:,1)
'k'),grid,legend('x(t)') figure(2)
    plot(tt,yy(:,2),
'k'),grid,legend('dx/dt(t)')
    figure(3)
    plot(tt,yy(:,3),'k'),grid,legend('z(t)')
    figure(4)
    plot(tt,yy(:,4),'k'),grid,legend('r
(t)') %return
    cU=[];cPsi=[];
    for i=1:nn
    cU(i)=U_lorentz02(tt(i),yy(i,:));
```

```

cPsi(i)=yy(i,3)-yy(i,4)+mu-a*cos(yy(i,1)); % psi=z-
r+mu+beta*x*y;
end

figure(5)
plot(tt,cU, 'k'),grid,legend('U(t) ')

figure(6)
plot(tt,c,Psi, 'k')grid,legend('psi(t)')
end

return

function fx=lorentz_fx_0(t,xx)
x=xx(1); y=xx(2);
%constants global sigma b mu beta al mul w
% right parts

%  $x'' + (1 + \sigma - \beta \sigma x^2) x' + \sigma(1 - \mu)x = 0$ 
%  $x' = y, y' = -F$ 
%  $fx = [x'; y'];$ 
%  $fx = [y;$ 
%  $-(1 + \sigma - \beta \sigma x^2)y - \sigma(1 - \mu)x];$ 
% Van-der-Pole %

fx=[y;
mul*(1-al*x^2)*y - w^2*x];
%  $fx = [y;$ 
%  $-(1 + \sigma)y - \sigma(1 - \mu + al \cos(x))x];$ 
fx=[y;
```

```

    -(1+sigma-beta*sigma^2*x^2)*y - sigma*(1- mu+al
*x^2+beta*sigma*x^2)*x];

```

```

return

```

```

function fx=lorentz_fx_1(t,xx)

```

```

    x=xx(1); y=xx(2); z=xx(3); r=xx(4);

```

```

%constants global sigma b mu

```

```

U = U_lorentz_02(t,xx);

```

```

%right parts

```

```

fx=[y;

```

```

-(1+sigma)*y - sigma* (1-r+z)*x;

```

```

-b*z + 1/sigma*x*y+x^2;

```

```

U];

```

```

Return

```

```

% main lorentz

```

```

clear all

```

```

global sigma b mu beta T al mul w

```

```

    %object constants sigma=10

```

```

    -(1+sigma-beta*sigma^2*x^2)*y - sigma*(1- mu+al
*x^2+beta*sigma*x^2)*x];

```

```

return

```

```

function fx=lorentz_fx_1(t,xx)

```

```

x=xx(1); y=xx(2); z=xx(3); r=xx(4);
%constants global sigma b mu
U = U_lorentz_02(t,xx);

%right parts
fx=[y;
-(1+sigma)*y - sigma* (1-r+z)*x;
-b*z + 1/sigma*x*y+x^2;
U];
Return

% main lorentz
clear all
global sigma b mu beta T al mul w

global SIGMA RHO BETA
A = [BETA  0  Y(2)
      0  -SIGMA  SIGMA
      -y(2)  RHO  -1 ];
ydot = A*y;

```