

თ ე მ შ რ რ ი ბ ი შ ვ ი ლ ი

**ოპტიმალური მართვის ალგორითმებისა
და მოწყობილობების დამუშავება მოსკოალე
რეჟიმების გამოყენებით**

**წარმოდგენილია დოქტორის
აკადემიური ხარისხის მოსაკრებლად**

**საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
თბილისი 0175, საქართველო
მარტი 2012 წელი**

საავტორო უფლება: თემურ რიბიშვილი, 2012 წ.

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით თემურ რიგიშვილის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „**ოპტიმალური მართვის ალგორითმებისა და მოწყობილობების დამუშავება მოსრიალე რეჟიმების გამოყენებით**“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი: 201... წ.

ხელმძღვანელი: ტ. მ. დ. სრული პროფესორი
ბესარიონ შანშიაშვილი

რეცენზენტი: ტ. მ. დ. ოთარ ლაბაძე

რეცენზენტი: სრული პროფესორი ომარ კოტრიკაძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2012 წელი

ავტორი: თემურ რიგიშვილი

დასახელება: „ოპტიმალური მართვის ალგორითმებისა და მოწყობილობების დამუშავება მოსრიალე რეჟიმების გამოყენებით“

ფაკულტეტი: ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა:

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

ავტორის ხელმოწერა

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

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

რეზიუმე

თემის აქტუალობა. ავტომატური მართვის სიზუსტის მოთხოვნების უწყვეტი ზრდა, მმართველი მოწყობილობის ფუნქციონალური დანიშნულების გაფართოება, ავტომატიზაციას დაქვემდებარებული ობიექტების სირთულე და მახასიათებლების ცვლილებები, მართვის სისტემის უნივერსალურობის ზრდა – ყველაფერი ეს ემსახურება ავტომატური მართვის თვითაწყობადი სისტემების განვითარების სტიმულირებას. აქედან გამომდინარე ავტომატური მართვის თეორიაში თვითაწყობადი სისტემების სფერო წარმოადგენს ერთ-ერთ აქტუალურს. თვითაწყობადი სისტემების კლასს მიეკუთვნება ავტომატური ოპტიმიზაციის სისტემები. ფართო გაგებით ოპტიმიზაცია წარმოადგენს ზოგიერთი ფუნქციონალის ექსტრემუმის ავტომატურ მოძებნას სხვადასხვა შეზღუდვების პირობებში. ობიექტის ოპტიმიზაციის თავისებურება კი მდგომარეობს იმაში, რომ ჯერ ერთი, ობიექტის მახასიათებლის ზუსტი სახე და შეზღუდვის ფუნქციები წინასწარ უცნობია და ინფორმაციის ერთადერთ წყაროს ობიექტის მდგომარეობის შესახებ წარმოადგენს მათი პარამეტრების გასაზომი მნიშვნელობები, მეორეს მხრივ, როგორც წესი, ობიექტს გააჩნია ექსტრემალური მახასიათებელი და აქედან გამომდინარე არ არსებობს ურთიერთცალსახა შესაბამისობა მათ მნიშვნელობებსა და მართვად ცვლადებს შორის. ოპტიმიზაციის ობიექტის მართვის სპეციფიკა დაკავშირებულია გაურკვევლობასთან, მას გააჩნია უცნობი და ნიშანცვლადი გაძლიერების კოეფიციენტი, რომელიც იცვლება ობიექტის მდგომარეობის მიხედვით.

ზემოთ ჩამოყალიბებული ამოცანის გადასაწყვეტად ცნობილია მრავალი სხვადასხვა მეთოდი, რომელთა მნიშვნელოვანი ნაწილი ემყარება ამოცანის გადაწყვეტას ორ ეტაპად. დასაწყისში ობიექტის შესავალზე საძიებო სიგნალების მიწოდებით და ობიექტის გამოსავალზე რეაქციის ანალიზით, ან ობიექტის შესავალი და გამოსავალი კოორდინატების დიფერენცირებით განისაზღვრება ობიექტის გაძლიერების კოეფიციენტი, რომლის ინფორმაცია გამოიყენება მართვის ფუნქციის ჩამოსაყალიბებლად და ეს კი უზრუნველყოფს მოძრაობას ექსტრემუმისკენ. როგორც პრაქტიკამ გვიჩვენა, ასეთი ოპტიმალური სისტემები ყოველთვის ვერ უზრუნველყოფენ ძიების მაღალ სიჩქარეს და ხარისხს, საკმაოდ რთული და ძვირადღირებული ტექნიკური მოწყობილობებია საჭირო, ასევე საძიებო სიგნალების მიწოდება იწვევს ობიექტის იძულებით რხევებს, რაც ხშირად მიუღებელია ტექნოლოგიური თვალსაზრისით.

სადისერტაციო ნაშრომის ძირითად მიზანს წარმოადგენს ოპტიმიზაციის ისეთი სისტემის აგება, რომლებსაც გააჩნიათ შემდეგი თვისებები:

- ობიექტის ექსტრემალური მახასიათებლის გრადიენტის (ან მისი პროექციის) გაზომვის გარეშე აწარმოოს ექსტრემუმის მოძებნა;
- გარდამავალ პროცესში ობიექტის გამოსავალი სიდიდე არ განიცდიდეს რხევას;
- მართვაზე არსებული შეზღუდვების მიუხედავად უზრუნველყოს ძიების მაქსიმალური სიჩქარე;
- უნივერსალურობა, ე. ი. აქვს უნარი წინასწარ აწყობის გარეშე გადაწყვიტოს ოპტიმიზაციის ამოცანა ობიექტების ფართო კლასისათვის (შეცვალოს არა მარტო პარამეტრები, არამედ სტრუქტურაც);

- ტექნიკური რეალიზაციის სიმარტივე;

ნაშრომის მიზნიდან გამომდინარე ოპტიმიზაციის ამოცანის გადასაწყვეტად დამუშავებულია სისტემის აგების სხვა პრინციპი, რომელიც ემყარება ცვლადი სტრუქტურის სისტემებში მოსრიალე რეჟიმების გამოყენებას. აღწერილი მიდგომის იდეა მდგომარეობს მიმყოლი სისტემის აგებაში, სადაც ობიექტის გამოსავალი სიდიდე ედარება სპეციალურად შერჩეულ მონოტონურად ზრდად (კლებად) დამკვეთ ზემოქმედებას. ობიექტის შესავალი ზემოქმედება ფორმირდება ობიექტის გამოსავალ სიდიდესა და დამკვეთ ზემოქმედებას შორის განუთანხმოების სიგნალის საფუძველზე, შედეგად ობიექტის გამოსავალი სიდიდე მოსრიალე რეჟიმში მიჰყვება დამკვეთ ზემოქმედებას და აღწევს ექსტრემუმს.

ნაშრომში განხილულია სტატიკური ობიექტის ოპტიმიზაციის რეალური სისტემა. დამუშავებულია ორი ტიპის ოპტიმალური მართვის ალგორითმი – ექსტრემუმის ძიების მუდმივი და ცვლადი სინქარით. ნაჩვენებია, რომ მართვაზე შეზღუდვების მიუხედავად, სისტემის პარამეტრების შესაბამისი შერჩევით მიიღწევა ექსტრემუმთან მიახლოების მაქსიმალური სინქარე. შემდგომში ნაჩვენებია ამ მეთოდების და ალგორითმების გამოყენება არასტაციონარული და მრავალექსტრემუმიანი ობიექტების ოპტიმიზაციის ამოცანის გადასაჭრელად.

დამუშავებულია ოპტიმიზაციის ალგორითმები უწყვეტი მართვის პირობებში, როდესაც მოსრიალე რეჟიმები გამოიყენება დამკვეთი ზემოქმედების კონტურში, ოპტიმიზაციის ალგორითმები მართვის საშუალო მნიშვნელობით და მართვადი დამკვეთი ზემოქმედებით. გამოკვლეულია ობიექტის ოპტიმიზაციის გარდამავალი პროცესის თვისებრიობა მცირე პარამეტრის მეთოდის გამოყენებით.

ოპტიმალური მართვის ალგორითმების პრაქტიკული რეალიზაციის დროს, რეგულირების რეალური არხების მახასიათებლები შეიძლება მნიშვნელოვნად განსხვავდებოდეს იდეალურისაგან. ასეთი ობიექტების მართვისას უფრო ეფექტურია ბინარობის პრიციპის გამოყენება. განხილულია ოპტიმალური მართვის ბინარული სისტემების სინთეზის მეთოდები რეგულირების არხებში და გადამრთველ მოწყობილობებში არაიდეალურობის არსებობისას. შემოთავაზებულია ანალიზის მეთოდები და მიღებულია თანაფარდობები, რომლებიც უზრუნველყოფენ ჩაკეტილი სისტემის სინთეზის განხორციელებას მოცემულ პირობებში. განხილულია ავტომატური მართვის ბინარული სისტემების მდგრადობის პრობლემა გადამრთველ მოწყობილობებში დაგვიანების და ჰისტერეზისის ტიპის არაიდეალურობისას. შემოთავაზებულია ასეთი სისტემების ანალიზის მეთოდები, გამოკვლეულია მათი თვისებები, რაც საბოლოო ჯამში ქმნიან განხილული კლასის სისტემების პარამეტრული სინთეზის საფუძველს.

ჩატარებული სამუშაოს ძირითადი პრაქტიკული ღირებულება მდგომარეობს იმაში, რომ ნაშრომში ჩატარებული გამოკვლევების და დამუშავებული ალგორითმების საფუძველზე შემოთავაზებულია ავტომატური ოპტიმიზატორების სტრუქტურული და პრინციპული სქემები და მათ ბაზაზე აგებული რეგულატორების რამოდენიმე სახეობა, რომლებიც აკმაყოფილებენ ნაშრომში დასმული ამოცანის მიზნებს და საწარმოო პირობებში მუშაობის მოთხოვნებს.

განხილულია ექსტრემალური რეგულატორების გამოყენების მაგალითები ამიაკის გვარჯილის და ბისერის წარმოების ტექნოლოგიური პროცესების მართვის ავტომატური სისტემებში. ნაჩვენებია მათი მუშაობის

უპირატესობა არსებული მართვის სისტემებთან შედარებით, მათი გამოყენების შესაძლებლობა არამარტო ექსტრემალური მახასიათებლის მქონე ობიექტების მართვისას, არამედ ჩვეულებრივი სტაბილიზაციის ამოცანების გადასაწყვეტად რთული ტექნოლოგიური პროცესების მართვის დროს.

SUMMARY

Actuality. Continuous growth for accuracy requirement of automatic control, increase of control device functionality, complexity of the objects subordinate to automation and change of characteristics, increase flexibility of control system - all these serves to stimulate the development of self-tuning systems of automatic control. Thus, in the automatic control theory the sphere of self-tuning systems is one of the most topical. Automatic optimization systems belong to the class of self-tuning systems. In a broad understanding optimization is an automatic finding of an extremum of some functionals under different limitations. Peculiarity of the optimization of the object is that, on the one hand, the exact characteristic of the object and limiting functions are not known in advance and the only source of information on the state of the object are the measured values of their parameters; on the other hand, as a rule, the object has an extreme characteristic, and therefore there is no biunique correspondence between its values and controlled variables.

The specificity of control of optimization object is vague, it has unknown and alternating gain, which varies according to the state of the object.

Various methods can be used to solve the above raised problem; most of them are based on the solution of the task in two phases. In the beginning the gain of the object could be determined by means of sending search signals to the input of the object and the analysis of the reaction at the output, or by differentiation of the input and output coordinates of the object; this information is used to form the control function that maintains the movement towards the extremum. As proved through practice, such optimal systems could not always provide the high search speed and quality. It needs rather complex and expensive technical equipment; besides signal flow causes forced vibration of the object, which is often unacceptable in terms of technology.

The main goal of the thesis is to construct the system of optimization having the following properties:

- Find an extremum without measuring the gradient (or its projection) of the object's extreme characteristic.
- In the transition process the output value does not fluctuate;
- Provide the maximum search speed despite the existing limitations on the control;
Universality, i. e. the ability to solve the optimization problem without preliminary tuning for a wide class of objects (change not only the parameters, but also the structure);
- Simplicity of technical realization

Ensuing from the objective of the work for solving the problem of optimization, another principle of system construction based on the usage of sliding modes in variable structure systems has been developed. This idea implies construction of the follow-up system, where the output value is compared with specially selected monotonically increasing (decreasing) reference variable. The input variable of the object is

formed on the basis of the signal of mismatch between the output value and reference variable. As a result the output value of the object follows the reference variable in a sliding mode and reaches the extremum.

The paper discusses the relay system of optimization of extreme static object. Two types of optimal control algorithm with variable and constant speed for extremum search have been developed. It is shown that despite the restrictions on control, the maximum speed to reach the extremum is achieved through selection of appropriate system parameters. Later there is shown the use of these methods and algorithms to solve the problem of optimization of nonstationary and multiextremal objects.

There have been developed optimization algorithms in terms of continuous control, when the sliding modes are used in the circuit of reference variable, optimization algorithms with mean value of control and controllable reference variable. The Properties of transient process of optimization of the object are investigated by a small parameter method.

During practical implementation of optimal control algorithms, characteristics of the real channels of regulation may significantly vary from ideal ones. More effective in managing such facilities is the use of binary principles. The methods of synthesis of the binary systems of optimal control in the regulation channels and in switching devices in terms of non ideality have been discussed.

The methods of analysis are proposed and the ratio which will provide the implementation of the synthesis of the closed system in the given conditions has been obtained. The thesis considers the problem of stability of the binary systems of automatic control in the switching devices in terms of delay or non ideality of hysteresis type. The proposed methods of analysis of such systems and the investigated properties ultimately form the basis for the parametric synthesis of the examined types of the systems.

The main practical value of the carried out work is that on the basis of the research and developed algorithms there is proposed structural and principal schemes of automatic optimizers and several types of based on them regulators that satisfy the objectives of the paper and requirements of a work in industrial environments.

In the thesis there is considered the examples of the use of extreme regulators in automated control systems of technological processes of production of ammonia nitrate and biseris (Copolymer of styrene). There is shown their advantages over the existing control systems, the possibility to use them not only in managing the objects with extreme characteristics, but also to solve the usual tasks of stabilization when controlling complex technological processes.

შინაარსი

შესავალი	13
თავი 1. ოპტიმიზაციის ავტომატური სისტემების აბეზის პრინციპი	
1.1. შესავალი	19
1.2. ოპტიმიზაციის ამოცანის დასმა და მათი გადაწყვეტის მეთოდების ზოგადი ბანხილვა	20
1.3. მოსრიალე რეჟიმების წარმოქმნის, არხეზობის პირობები და მათემატიკური აღწერა	23
1.4. უცნობნიშნისანი ბაქლიერების კოეფიციენტის მქონე ობიექტის მართვის პრინციპი	26
1.5. დასკვნა	28
თავი 2. ერთბანხომილეზიანი ექსტრემალური მახასიათებლის მქონე სტატიკური ობიექტის ოპტიმიზაცია	
2.1. შესავალი	30
2.2. ოპტიმიზაცია მუღვივ სიჩქარიანი დამკვეთი ზემოქმედებით	31
2.3. ოპტიმიზაცია ცვლად სიჩქარიანი დამკვეთი ზემოქმედებით	37
2.4. არასტაციონარული ობიექტის ოპტიმიზაცია მოსრიალე რეჟიმების ბამოყენებით	41
2.5. მრავალექსტრემუმიანი ობიექტების ოპტიმიზაცია	46
2.6. დასკვნა	52
თავი 3. ოპტიმიზაციის ალგორითმები უწყვეტი მართვის პირობებში და მათი სტატისტიკური ანალიზი	
3.1. შესავალი	54
3.2. ოპტიმიზაციის ალგორითმები მოსრიალე რეჟიმებით დამკვეთი ზემოქმედების კონტურში	55
3.3. ოპტიმიზაციის ალგორითმები მართვის საშუალო მნიშვნელობით	57
3.4. ოპტიმიზაციის ალგორითმები მართვადი დამკვეთი ზემოქმედებით	61
3.5. ოპტიმიზაციის სისტემის სტატისტიკური ანალიზი მართვადი დამკვეთი ზემოქმედებით	65
3.6. ოპტიმიზაციის ბარდამავალი პროცესის თვისობრიობის ბამოკვლევა მცირე პარამეტრის მეთოდის ბამოყენებით	57
3.7. დასკვნა	68
თავი 4. ოპტიმალური მართვის ბინარული სისტემების დინამიკური თვისებების ბამოკვლევა	
4.1. შესავალი	75
4.2. ოპტიმალური მართვის ბინარული სისტემების სინთეზის მეთოდები რეგულირების არხებში არაიდეალურობების არხეზობისას	76
4.3. არასტაციონარული პროცესების მართვის ბინარული სისტემების დინამიკის ანალიზი რეგულირების არხებში დავიანების არხეზობისას	91
4.4. არასტაციონარული წრფივი პროცესების მართვის ბინარული სისტემების სინთეზი ხმაურის არხეზობის შემთხვევაში	98
4.5. მართვის ბინარული სისტემების მღბრადობა ბადამრთველი მოწყობილობის არხებში არაიდეალურობის არხეზობისას	108
4.6. დასკვნა	119
თავი 5. ავტომატური ოპტიმიზატორების აბეზა მოსრიალე რეჟიმებზე და მათი ექსპერიმენტული კვლევა	
5.1. შესავალი	120

5.2. პნევმატური ექსტრემალური რეზულატორი ძიების მუღმივი სიჩქარით ერვ-3	121
5.3. პნევმატური ექსტრემალური რეზულატორი ძიების ცვლადი სიჩქარით ერვ-1	131
5.4. ავტომატური ოპტიმიზატორი პაო-1	135
5.5. ავტომატური ოპტიმიზატორი პაო-2	137
5.6. ავტომატური ოპტიმიზატორების ექსპერიმენტული გამოკვლევა	140
5.7. ექსტრემალური რეზულატორების გამოყენება ტექნოლოგიური პროცესების მართვის ავტომატურ სისტემებში	146
5.8. დასკვნა	157
დასკვნა	159
დანართი 1-2	160
ლიტერატურა	164

ნახაზების ნუსხა

1. ნახ. 1 – ინერციული ობიექტის მართვის სტრუქტურული სქემა.	14
2. ნახ. 2.2.1 – ექსტრემალური ობიექტის მართვის სტრუქტურული სქემა	32
3. ნახ. 2.2.2. – ობიექტის მართვის რელეური სისტემის სქემა	33
4. ნახ. 2.2.3. – რელეური ფუნქციის მახასიათებლები	33
5. ნახ. 2.2.4. – სამპოზიციური პოლარული ელემენტის მახასიათებელი	36
6. ნახ. 2.4.1. – ოპტიმიზაციის სისტემის სტრუქტურული სქემა	41
7. ნახ. 2.5.1. – ოპტიმიზაციის სისტემის სტრუქტურული სქემა	48
8. ნახ. 3.31. – ოპტიმიზაციის სისტემის სტრუქტურული სქემა დინამიური ფილტრის გამოყენებით	58
9. ნახ. 3.6.1. – ოპტიმიზაციის სისტემის სტრუქტურული სქემა ინტეგრატორით	69
10. ნახ. 3.6.2. – ოპტიმიზაციის სისტემის სტრუქტურული სქემა დინამიური რგოლით	69
11. ნახ. 4.2.1. მართვის ბინარული სისტემის სტრუქტურული სქემა კოორდინატული-ოპერატორული უკუკავშირით	79
12. ნახ. 4.5.1. – მართვის ბინარული სისტემის სტრუქტურული სქემა კოორდინატული და კოორდინატულ-პარამეტრული უკუკავშირით	109
13. ნახ. 4.5.2. – რელეური ელემენტის მახასიათებელი პისტერეზისული მარყუქით	113
14. ნახ. 5.2.1. – ობიექტის ოპტიმიზაციის ბლოკ-სქემა	123
15. ნახ. 5.2.2. – მავალებელი ზემოქმედების მაფორმირებელი ინტეგრატორის პრინციპული პნევმატური სქემა	124
16. ნახ. 5.2.3. – საწყისი პირობების მაფორმირებელი ბლოკის პრინციპული პნევმატური სქემა	126
17. ნახ. 5.2.4. – მართვის სიგნალის მაფორმირებელი ბლოკის პრინციპული პნევმატური სქემა.	127
18. ნახ. 5.2.5. – ინტეგრატორის ბლოკის პრინციპული პნევმატური სქემა	128
19. ნახ. 5.2.6 – ექსტრემალური რეგულატორის მრპ-3 პრინციპული პნევმატური სქემა	129
20. ნახ. 5.2. 7. – ექსტრემალური რეგულატორის მუშაობის დროითი დიაგრამა	130
21. ნახ. 5.3.1 – პნევმატური ექსტრემალური რეგულატორის მრპ-1 სტრუქტურული სქემა	131
22. ნახ. 5.3.2. – პნევმატური ექსტრემალური რეგულატორის მრპ-3 მუშაობის დროითი დიაგრამა	134
23. ნახ. 5.3.3. – პნევმატური ექსტრემალური რეგულატორის მრპ-1 მუშაობის დროითი დიაგრამა	134
24. ნახ. 5.4.1. – ავტომატური ოპტიმიზატორის პაო-1 სტრუქტურული სქემა	136
25. ნახ. 5.4.2. – ავტომატური ოპტიმიზატორის პაო-1 მუშაობის დროითი დიაგრამა (მარცხენა შტო)	136

26. ნახ. 5.5.1. – ავტომატური ოპტიმიზატორის პაო-1 მუშაობის დროითი დიაგრამა (მარჯვენა შტო)	137
27. ნახ. 5.5.2. – ავტომატური ოპტიმიზატორის პაო-2 პრინციპი-ალური პნევმატური სქემა	138
28. ნახ. 5.5.3. – ავტომატური ოპტიმიზატორის პაო-2 მუშაობის დროითი დიაგრამა.	139
29. ნახ. 5.6.1. – ექსტრემალური რეგულატორების ექსპერიმენტული გამოკვლევის მოწყობილობის სტრუქტურული სქემა.	142
30. ნახ. 5.6.2. ექსტრემალური რეგულატორების მუშაობის დროითი დიაგრამები.	143
31. ნახ. 5.6.3. – ექსტრემალური რეგულატორის მუშაობის დროითი დიაგრამა (ცვლადი სინქარით)	144
32. ნახ. 5.6.4. – ექსტრემალური რეგულატორის მუშაობის დროითი დიაგრამა (მუდმივი სინქარით)	144
33. ნახ. 5.6.5. – ობიექტის ექსტრემალური მახასიათებლის მოდელის ბლოკ-სქემა	145
34. ნახ. 5.6.6. – ობიექტის ექსპერიმენტული მოდელის – პარაბოლას მახასიათებელი	145
35. ნახ. 5.7.1. – PH-ის მახასიათებელი მრუდი	147
36. ნახ. 5.7.2. – PH-ის მახასიათებელი მრუდი სტაბილიზაციის პროცესში	148
37. ნახ. 5.7.3. – ნეიტრალიზაციის პროცესის ოპტიმალური მართვის სტრუქტურული სქემა	150
38. ნახ. 5.7.4. – PH-ის მახასიათებელი მრუდი ოპტიმალური მართვის დროს	150
39. ნახ. 5.7.5. – სოპოლიმერიზაციის პროცესის ტემპერატურული რეჟიმის მრუდი სტაბილიზაციის პროცესში	152
40. ნახ. 5.7.6. – სოპოლიმერიზაციის პროცესის ტემპერატურული რეჟიმის მრუდი	152
41. ნახ. 5.7.7. – სოპოლიმერიზაციის პროცესის ტემპერატურული რეჟიმის ოპტიმალური მართვის სისტემის სტრუქტურული სქემა	153
42. ნახ. 5.7.8. – სოპოლიმერიზაციის პროცესის ტემპერატურული რეჟიმის მრუდი კომბინირებული მართვის დროს	156
43. ნახ. 5.7.9. – სოპოლიმერიზაციის პროცესის ტემპერატურული რეჟიმის მრუდი ცვლადი სტრუქტურის რეგულატორით მართვისას	156
44. ნახ. 5.7.10. – სოპოლიმერიზაციის პროცესის ტემპერატურული რეჟიმის მრუდი კომბინირებული მართვით	157

მადლიერება

უპირველესად, უდიდესი მადლიერება მინდა გამოვხატო ჩემი ხელმძღვანელის, ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორის, საქართველოს საინჟინრო აკადემიის ნამდვილი წევრის, სრული პროფესორის ბესარიონ შანშიაშვილის მიმართ, რომლის მიერ დოქტორანტურაში სწავლის პერიოდში ჩემი მუშაობის სწორად წარმართვის, მაღალკვალიფიციური კონსულტაციებისა და ჩემდამი კეთილგანწყობის გარეშე, წარმოდგენილი ნაშრომი ვერ შეიქმნებოდა.

განსაკუთრებით მინდა აღვნიშნო ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორის, პროფესორ ვადიმ ივანეს ძე უტკინის და ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორის, პროფესორის, რუსეთის მეცნიერებათა აკადემიის აკადემიკოსის სერგეი კონსტანტინეს ძე კოროვინის ღვაწლი, მოსკოვის მართვის პრობლემების ინსტიტუტის ასპირანტურაში სწავლის დროს სადისერტაციო ნაშრომის თემატიკის შერჩევაში და დამუშავებაში გაწეული ხელმძღვანელობისათვის.

უდიდესი მადლიერების გრძნობით მინდა მოვიხსენიო მოსკოვის მართვის პრობლემების ინსტიტუტის ყოფილი დირექტორის ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორის, პროფესორის, საქართველოს მეცნიერებათა ეროვნული აკადემიის აკადემიკოსის ივერი ვარლამის ძე ფრანგიშვილის ჩემი ასპირანტურაში სწავლის პერიოდში გაწეული კონსულტაციებისათვის და მხარდაჭერისათვის, აგრეთვე ქ. ორესოვო-ზუევოში ქარხანა „კარბოლიტში“ მართვის ოპტიმალური სისტემის დანერგვის დროს გამოყენებული პროცესორის ПС-300 დანერგვაში გაწეული კონსულტაციებისათვის და დახმარებისათვის.

მადლიერების გრძნობით მინდა მოვიხსენიო ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი ალმასხან გუგუშვილი, ასპირანტურაში სწავლის დროს ნაშრომზე მუშაობისას გაწეული კონსულტაციებისა და ერთობლივი სამუშაოების შესრულებისას, რომლის დროსაც მასთან ერთად თანაავტორობით მიღებულ იქნა რამოდენიმე საავტორო გამოგონება.

შესავალი

ავტომატური მართვის თეორიის და პრაქტიკის თანამედროვე განვითარებამ მიგვიყვანა მართვის სისტემების სრულიად ახალ და უფრო სრულყოფილი სახეების შექმნამდე, რომელშიც გათვალისწინებულია პარამეტრების და ზოგ შემთხვევაში კი სისტემის სტრუქტურის ავტომატური ცვლილება იმ მიზნით, რომ შენარჩუნებულ იქნეს მართვის პროცესების უცვლელი ხარისხი იმ შემთხვევაშიც კი, როდესაც იცვლება ტექნოლოგიური პროცესების მახასიათებლები. ასეთ ავტომატურ სისტემებს უწოდებენ თვითაწყობად ან შეგუებად სისტემებს, რომელთაგან ერთ-ერთ ძირითად კლასს, რომელსაც დიდი თეორიული და პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს, წარმოადგენს ავტომატური ოპტიმიზაციის სისტემები.

ძირითადი ამოცანა, რომლის გადაწყვეტილებაზეც არის ორიენტირებული ავტომატური ოპტიმიზაციის სისტემები, ანალიტიკურად ფორმირდება შემდეგი სახით.

დავუშვათ, რომ მართვის ობიექტის გამოსავალ y და შესავალ x სიდიდეებს შორის კავშირი აღიწერება შემდეგი ფუნქციონალური დამოკიდებულებით:

$$y = f(x), \quad x = x_1, \dots, x_n, \quad (1)$$

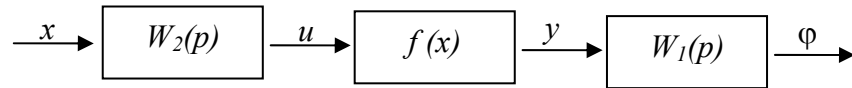
თანაც f ფუნქციის სახე წინასწარ ზუსტად ცნობილი არ არის, ან იმდენად რთულია, რომ ანალიტიკური გამოკვლევა $f(x)$ ფუნქციის გაძნელებულია ან საერთოდ გამორიცხებულია. პრობლემა შესდგება კოორდინატთა ისეთი ერთობლიობის განსაზღვრაში. $x_j^* (j=1, \dots, n)$, რომლის დროსაც y სიდიდე აღწევს ექსტრემალურ მნიშვნელობას. მაგალითად, თუ ექსტრემალურ მნიშვნელობას წარმოადგენს მინიმუმი, მაშინ

$$x_j^* \in M \left\{ x : x = \text{avg} \min_x f \right\} \quad (2)$$

აღვნიშნოთ, რომ ხშირ შემთხვევაში ვექტორის არჩევა შეზღუდულია დასაშვები მნიშვნელობის ზოგიერთი არით, D ე. ი.

$$X \in D \quad (3)$$

ამას გარდა, პრაქტიკული პროცესების ოპტიმიზაციის დროს, ხშირად საჭიროა გათვალისწინებულ იქნას ობიექტის ინერციულობის თვისება. ამას მიყვარათ ზემოთ ჩამოყალიბებული ამოცანის გართულების აუცილებლობამდე, რომლის დროსაც x მიიღებს შემდეგ სახეს (ნახ. 1).



ნახ. 1

$$\begin{aligned}
 w_1(p)y &= \varphi, \\
 y &= f(x), \\
 w_2(p)x &= u
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

მართვის u სიდიდის არჩევით აუცილებელია დროის ყოველ მომენტში ტოლობის შესრულება

$$y(x) = \min_x f(x),$$

სადაც კავშირი ობიექტის გამოსავალ სიდიდეს y და მართვის u სიდიდეს შორის განსაზღვრულია განტოლებით (4), სადაც w_1 და w_2 დინამიური რგოლების ოპერატორებია, რომლებიც მოთავსებულია შესაბამისად ობიექტის ექსტრემალური მახასიათებლის წინ და უკან.

ოპტიმალური მართვის ამოცანა რთულდება იმ შემთხვევაში, როდესაც ობიექტის ექსტრემალური მახასიათებელი არის არასტაციონალური, ე. ი.

$$y = f(x, t),$$

მაშინ (4)-ში აუცილებელია გათვალისწინებულ იქნას დეტერმინირებული ან შემთხვევითი დაბრკოლება, მაშინ (4)-ში x წარმოადგენს ვექტორულ სიდიდეს, რომელიც ეკუთვნის დასაშვები D არის მნიშვნელობას.

აღნიშნოთ, რომ არსებული წარმოდგენით $f(x)$ მახასიათებლის და D არის აპრიორული ინფორმაციის მოცულობა, რომელიც შეიძლება გამოყენებულ იქნას (1)-(3) ამოცანის გადაწყვეტისას, განსაზღვრავს

მის მიკუთვნებას მათემატიკური პროგრამირების და ავტომატური ოპტიმიზაციის სფეროსი.

პირველ შემთხვევაში, საქმე ეხება, როგორც წესი, იტერაციული პროცედურის აგებას, თავმოყრილს M სიმრავლეში, მეორე შემთხვევაში, ზოგიერთი ტექნიკური მოწყობილობის ფუნქციონირების ალგორითმის აგებაში, წოდებულს ოპტიმიზატორად, რომელიც ავტომატურად უზრუნველყოფს y სიდიდის მიახლოებას ექსტრემუმთან.

წარმოდგენილი ნაშრომი ძირითადად ეხება მეორე მიდგომას და ამოცანის გადაწყვეტის ძიება წარმოებს ავტომატური მართვის თეორიის პოზიციიდან. ამ შემთხვევაში (1) ფუნქციას ვუწოდოთ მართვის ობიექტი და (1)-(3) ამოცანის გადაწყვეტის ქვეშ ვიგულისხმოთ ისეთი მართვის სინთეზი, რომელიც უზრუნველყოფს ობიექტის გამოსავალ y სიდიდის მიახლოების ექსტრემუმისკენ (მაქსიმუმის ან მინიმუმის).

ჩვეულებრივად, რელეურ ექსტრემალურ სისტემებში წარმოებს ექსტრემალური მახასიათებლის წერტილების წარმოებულების გაზომვა. გაზომვისთვის კი აუცილებელია მადიფერენცირებელი მოწყობილობის ჩართვა, ან მოწყობილობის, რომელიც ობიექტზე გარკვეულ სასინჯ ზემოქმედებას მოახდენს და შემდგომ გააანალიზებს ამ რეაქციას ობიექტის გამოსავალზე.

როგორც პრაქტიკამ გვიჩვენა, ასეთი ოპტიმალური სისტემის გამოყენებისას, ყოველთვის ვერ უზრუნველყოფენ ძიების მაღალ სიჩქარეს და ხარისხს, აგრეთვე საძიებო რხევების არსებობა იწვევს ობიექტის იძულებით რხევას, რაც ხშირად მიუღებელია ტექნიკური და ტექნოლოგიური პირობებით.

წარმოდგენილ სადისერტაციო ნაშრომში გამოყენებულია ექსტრემუმის ძიების სრულიად განსხვავებული მეთოდი, რომელიც მდგომარეობს მიმყოლი სისტემის აგებაში, სადაც ობიექტის გამოსავალი სიდიდე y ედარება სპეციალურად შერჩეულ დამკვეთ g ზემოქმედებას, რომელიც დასმული ამოცანის მიხედვით ფორმირდება მონოტონურად ზრდადი ან კლებადი დროის ფუნქციის სახით $g(t)$. ობიექტის შესავალი ზემოქმედება ფორმირდება ობიექტის გამოსავალ y სიდიდესა და დამკვეთ g ზემოქმედებას შორის განუთანხმოების

სიგნალის ε საფუძველზე: $\varepsilon = g(t) - y(t)$ და ეს განუთანხმოება უნდა მივიყვანოთ ნულამდე. შედეგად ობიექტის გამოსავალი y სიდიდე მოსრიალე რეჟიმში მიჰყვება მონოტონურად კლებად g ზემოქმედებას და აღწევს თავის ექსტრემუმს.

დისერტაცია შედგება 5 თავის, დანართისა და დასკვნისაგან.

I თავში განიხილება ოპტიმიზაციის ავტომატური სისტემების აგების პრინციპები, ოპტიმიზაციის ამოცანის დასმა და მათი გადაწყვეტის მეთოდების ზოგადი განხილვა, მოცემულია მოკლე მიმოხილვა ცვლადი სტრუქტურის სისტემების და მოსრიალე რეჟიმების თეორიიდან, მათი წარმოქმნის, არსებობის პირობები და მათემატიკური აღწერა, განიხილება უცნობნიშნის გაძლიერების კოეფიციენტის მქონე ობიექტის მართვის პრინციპი.

ნაშრომის II თავში განიხილება ერთგანზომილებიანი ექსტრემალური მახასიათებლის მქონე სტატიკური ობიექტის ოპტიმიზაციის რეალური სისტემა. გამოკვლეულია ორი ტიპის სისტემა – მუდმივ და ცვლადსიჩქარიანი დამკვეთი ზემოქმედებით. პირველი ტიპის სისტემაში ობიექტის გაძლიერების კოეფიციენტის გაზომვის გარეშე შესაძლებელია ობიექტის გამოსავალი სიდიდის მიღწევა მუდმივი სიჩქარით ექსტრემუმის ზოგიერთ მიდამოში, სადაც წარმოიქმნება რხევა. ეს ნაკლოვანებები აღმოიფხვრება მეორე რიგის სისტემაში, რომელშიც დამკვეთი ზემოქმედების ცვლილების სიჩქარე დამოკიდებულია მართვის საშუალო სიდიდეზე, ისე, რომ ის ავტომატურად ირჩევს ობიექტის გამოსავალი სიდიდის ცვლილების მაქსიმალურად შესაძლო სიჩქარეს. ასეთ სისტემაში y კოორდინატა მონოტონურად მიისწრაფის ექსტრემუმის წერტილისაკენ და სისტემის პარამეტრების შესაბამისი შერჩევით მიიღწევა ექსტრემუმთან მიახლოების მაქსიმალური სიჩქარე. შემდგომში ეს მეთოდი გამოიყენება არასტაციონარული და მრავალექსტრემუმიანი ობიექტების ოპტიმიზაციის ამოცანის გადასაჭრელად.

III თავში დამუშავებულია ოპტიმიზაციის ალგორითმები უწყვეტი მართვის პირობებში და განიხილება მათი სტატიკური ანალიზი, განიხილება ოპტიმიზაციის ალგორითმები, როდესაც მოსრიალე რეჟიმები გამოიყენება დამკვეთი ზემოქმედების კონტურში, ოპტიმიზაციის

ალგორითმები მართვის საშუალო მნიშვნელობით და მართვადი დამკვეთი ზემოქმედებით, გამოკვლეულია ობიექტის ოპტიმიზაციის გარდამავალი პროცესის თვისობრიობა მცირე პარამეტრის მეთოდის გამოყენებით.

ოპტიმალური მართვის ალგორითმების პრაქტიკული რეალიზაციის დროს რეგულირების რეალური არხების მახასიათებლები შეიძლება მნიშვნელოვნად განსხვავდებოდეს იდეალურისაგან. ასეთ შემთხვევაში ისმება ამოცანა გამოკვლეული იქნას დინამური არაიდეალურობის გავლენა ბინარული სისტემების დინამიკაზე. IV თავში განიხილება დინამური თვისებების შესწავლის პრობლემები ოპტიმალური მართვის ბინარულ სისტემებში, როცა ადგილი აქვს სხვადასხვა ტიპის არაიდეალურობას გადამრთველი მოწყობილობების არხებში. გამოკვლეულია მართვადი პროცესების ასიმპტოტური თვისებების ანალიზი, განიხილება ბინარული სისტემების დინამური თვისებების ანალიზის პრობლემა რეგულირების არხებში გამოყენებულ გადამრთველ მოწყობილობებში დაგვიანების არსებობისას. ჩამოყალიბებულია დაგვიანების სიდიდის გავლენის შეფასების მეთოდიკა ჩაკეტილი სისტემის დინამიურობაზე. განიხილება შეზღუდული ხმაურის პირობებში მართვის ბინარული სისტემების ქცევა წრფივი სასრულგანზომილებიანი დინამური პროცესებით. განიხილება ავტომატური მართვის ბინარული სისტემების მდგრადობის პრობლემა გადამრთველ მოწყობილობებში დაგვიანებისა და ჰისტერიზისის ტიპის არაიდეალურობის არსებობისას.

შემოთავაზებულია ანალიზის მეთოდები და მიღებულია თანაფარდობები, რომლებიც უზრუნველყოფენ ჩაკეტილი სისტემის სინთეზის განხორციელებას რეგულირების მოცემულ არხებში.

დისერტაციის პრაქტიკულ მხარეს წარმოადგენს შემოთავაზებული ოპტიმალური მართვის ალგორითმებზე სხვადასხვა სახის ავტომატური ოპტიმიზატორების სტრუქტურული და პრინციპული სქემების დამუშავება და მათ ბაზაზე ოპტიმიზატორების აგება მოსრიალე რეჟიმების გამოყენებით.

V თავში განიხილება პნევმატური ექსტრემალური რეგულატორები ძიების მუდმივი და ცვლადი სიჩქარით, პნევმატური ექსტრემალური რეგულატორი მოსრიალე რეჟიმებით აგებული მიმდევრო სისტემაზე.

ჩატარებულია ავტომატური ოპტიმიზატორების ექსპერიმენტული გამოკვლევა, ნაჩვენებია მათი მუშაობის დიაგრამები ექსტრემუმის ძიების პროცესები სხვადასხვა შემთხვევაში, მოცემულია გარკვეული მოსაზრება რეგულატორის პარამეტრების შერჩევისათვის და მათი გამოყენების პერსპექტივა სხვადასხვა ტექნოლოგიური პროცესების მართვის ოპტიმალური სისტემების აგებისას.

თავი 1. ოპტიმიზაციის ავტომატური სისტემების აგების პრინციპი

1. შესავალი

თანამედროვე ავტომატიკის პრობლემებს შორის წამყვანი ადგილი უკავია ოპტიმიზაციის სისტემების აგების პრობლემებს. ფართო გაგებით ოპტიმიზაცია წარმოადგენს ზოგიერთი ფუნქციონალის ექსტრემუმის ავტომატურ მოძებნას სხვადასხვა შეზღუდვების პირობებში. ობიექტის ოპტიმიზაციის თავისებურება მდგომარეობს იმაში, რომ ჯერ ერთი, ობიექტის მახასიათებლის ზუსტი სახე და შეზღუდვის ფუნქციები წინასწარ უცნობია და ინფორმაციის ერთადერთ წყაროს ობიექტის მდგომარეობის შესახებ წარმოადგენს მათი პარამეტრების გასაზომი მნიშვნელობები, მეორეს მხრივ, როგორც წესი, ობიექტს გააჩნია ექსტრემალური მახასიათებელი და აქედან გამომდინარე არ არსებობს ურთიერთცალსახა შესაბამისობა მათ მნიშვნელობებსა და მართვად ცვლადებს შორის. მოყვანილი მსჯელობიდან გამომდინარე ჩანს, რომ ოპტიმიზაციის ობიექტის მართვის სპეციფიკა დაკავშირებულია გაურკვევლობასთან. ობიექტს გააჩნია უცნობი და ნიშანცვლადი გაძლიერების კოეფიციენტი, რომელიც იცვლება ობიექტის მდგომარეობის მიხედვით. აღსანიშნავია, რომ ობიექტის გაძლიერების კოეფიციენტზე ინფორმაციის მიღება ფაქტიურად ნიშნავს ექსტრემალური მახასიათებლის გრადიენტის (ან მისი რომელიმე პროექციის) გაზომვას, რომელიც უმეტეს შემთხვევაში გათვალისწინებულია ექსტრემალურ სისტემებში.

ქვემოთ განხილულია ასეთ შემთხვევაში წარმოქმნილი ოპტიმალური მართვის სპეციფიკური ამოცანის დასმა და მათი გადაწყვეტის მეთოდების ზოგადი მიმოხილვა, განხილულია ცვლადი სტრუქტურის სისტემებში მოსრიადე რეჟიმების წარმოშობის, არსებობის პირობები და მათი თვისებების გამოყენების შესაძლებლობა ნაშრომში დასმული ოპტიმალური მართვის სისტემის აგებისას.

12. ოპტიმიზაციის ამოცანის დასმა და მათი გადაწყვეტის მეთოდების ზოგადი განხილვა

შესავალში განხილვისას წარმოქმნილი მართვის სპეციფიკური ამოცანა განვიხილოთ ექსტრემალური მახასიათებლის მქონე სტატისტიკური ობიექტის მაგალითზე

$$y = f(x), \quad (12.1)$$

სადაც x და y ობიექტის შესავალი და გამოსავალი კოორდინატებია, ხოლო $f(x)$ – უწყვეტი დიფერენცირებადი ფუნქციაა. ვთქვათ ექსტრემუმის ძებნა ხორციელდება ობიექტის შესავალი სიდიდის x უწყვეტი ცვლილებით მართვის u სიგნალის ხარჯზე, რომელიც მიეწოდება ინტეგრალურ შემსრულებელ მექანიზმს შესასვლელზე.

$$\dot{x} = u, \quad (12.2)$$

და ამოცანის მიზანია შეირჩეს ისეთი მართვა u , რომლის დროსაც ობიექტის გამოსავალი y სიდიდე მცირდება (იზრდება) მინიმუმამდე (მაქსიმუმამდე). y სიდიდის ცვლილება ექვემდებარება განტოლებას

$$\dot{y} = \frac{df}{dx} u, \quad (12.3)$$

საიდანაც ჩანს, რომ მართვის სიგნალის წინ დგას უცნობნიშნაანი $\frac{df}{dx}$

კოეფიციენტი და შესაბამისად მართვის სინთეზისათვის არ შეიძლება გამოვიყენოთ დინამიკური სისტემების სინთეზის მეთოდი, დამყარებული უარყოფით უკუკავშირის გამოყენებაზე, რომლისთვისაც ამ კოეფიციენტის

ნიშანი ხშირ შემთხვევაში ცნობილია. განხილულ შემთხვევაში $\frac{df}{dx}$ სი-

დიდე, ან $f(x)$ -ის გრადიენტის პროექცია მრავალგანზომილებიანი ოპტიმიზაციის ამოცანის ძიების მიმართულების შემთხვევაში, როდესაც არგუმენტი x (12.1)-ში n -განზომილებიანი ვექტორია, შეიძლება მისი ინტეგრირება როგორც ობიექტის გაძლიერების ლოკალური კოეფიციენტის.

ზემოთ ჩამოყალიბებული ამოცანის გადასაწყვეტად ცნობილია მრავალი სხვადასხვა მეთოდი [1, 2, 3, 4, 5], რომელთა მნიშვნელოვანი ნაწილი ემყარება ამოცანის გადაწყვეტას ორ ეტაპად. დასაწყისში ობიექტის შესასვლელზე საძებნი სიგნალების მიწოდებით და ობიექტის

გასასვლელზე რეაქციის ანალიზით, ან ობიექტის შესავალი და გამოსავალი კოორდინატების დიფერენცირებით განისაზღვრება ობიექტის გაძლიერების კოეფიციენტი $\frac{df}{dx}$, შემდგომ მიღებული ინფორმაცია გამოიყენება მართვის ფუნქციის ჩამოსაყალიბებლად, რომელიც უზრუნველყოფს მოძრაობას ექსტრემუმისკენ [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

არსებობს კიდევ ოპტიმიზაციის სხვა მეთოდები, რომელთათვის დამახასიათებელია სისტემის გაძლიერების კოეფიციენტის შეფასება და მართვის ამოცანის ერთდროული გადაწყვეტა. ამ შემთხვევაში, თუ საქმე ეხება ანალოგიური ტიპის ალგორითმებს, სისტემაში იქმნება ავტორხევეების რეჟიმი, რომლის დროსაც ობიექტის გამოსავალი y უახლოვდება ექსტრემუმს [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20]. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ აღწერილი მიდგომა არ მოიცავს ოპტიმიზაციის ყველა სხვა მეთოდებს. მათ შორის საინტერესო იდეაა დიფერენციალური ძიება [21, 22], რომელიც ეფუძნება ობიექტის სპეციფიკას და უშვებს ობიექტის ზუსტი მოდელის შექმნას; სხვადასხვა ევრისტიკული ალგორითმები, შემოთავაზებულ ნაშრომებში [19, 23, 24, 25]; ექსტრემუმის დამახსოვრების მეთოდები [6, 9, 26]; აგრეთვე მეთოდები, განსაზღვრული სპეციალური სახეობის ობიექტების ოპტიმიზაციისათვის, რომლებიც ითვალისწინებენ ობიექტის გამოსავალი კოორდინატის მრავალჯერად დიფერენცირებას [27, 28, 29, 30, 31], ან ობიექტის ოპტიმიზაციის მეთოდები, რომლებიც ემყარება ობიექტის რეაქციას შესავალი პარამეტრის ნახტომისებრ ცვლილებებზე [18, 30, 32, 33]. ბოლოს უნდა აღინიშნოს, რომ ჩვენ არ ვიხილავთ ოპტიმიზაციის სისტემების თეორიის განვითარების ისტორიას, რადგანაც ეს საკმაოდ დაწვრილებით არის გადმოცემული ბევრ ნაშრომში [8, 9, 18, 34, 35, 36, 37].

უნდა აღინიშნოს, რომ ოპტიმიზაციის სისტემებში, სადაც გამოყენებულია საძიებო რხევები და ავტორხევეები, გათვალისწინებულია ობიექტის გამოსავალი სიდიდის რხევაც, რომლის არსებობაც ხშირად ტექნოლოგიური პირობების გამო არასასურველია [18, 21, 38], რაც ხშირად ხდება მიზეზი ასეთი ოპტიმიზაციის სისტემების გამოუყენებლობის სახალხო მეურნეობაში. ამას გარდა უნდა აღინიშნოს, რომ ასეთ სისტემებში მართვაზე არსებული შეზღუდვების გამო, პრინციპუ-

ლად შეუძლებელია ექსტრემუმის ძიების დროს მაქსიმალური სწრაფ-მოქმედების მიღწევა. ეს დაკავშირებულია იმასთან, რომ ძიების დროს მართვა ხორციელდება ე. წ. კვაზისტაციონალურ რეჟიმებში, როდესაც ობიექტის მდგომარეობის საგრძნობი ცვლილების დრო, განსაზღვრული ძირითადი მართვადი სიგნალით, დიდია საცდელი რხევების პერიოდთან შედარებით. სისტემისათვის ავტორხევებით ძიების დროს, რხევის პერიოდის გარკვეულ ნაწილში ობიექტის გამოსავალი სიდიდე უახლოვდება ექსტრემუმს, და სხვა ნაწილში შორდება ექსტრემუმს. ასევე უნდა აღინიშნოს ის ფრიად მნიშვნელოვანი მიზეზიც, რომ დიფერენციალური სისტემების გამოყენებისას საჭიროა საკმაოდ რთული და ძვირადღირებული ტექნიკური მოწყობილობები: გენერატორები, გამამრავლებელი და გამყოფი რგოლები, ინერციული რგოლები და სხვა.

ამ შემთხვევაში, როგორც თეორიული, ისე პრაქტიკული მიზნებისათვის ინტერესს წარმოადგენს ოპტიმიზაციის ისეთი სისტემის აგება, რომლებსაც გააჩნიათ შემდეგი თვისებები:

- ობიექტის ექსტრემალური მახასიათებლის გრადიენტის (ან მისი პროექციის) გაზომვის გარეშე აწარმოოს ექსტრემუმის მოძებნა;
- გარდამავალ პროცესში ობიექტის გამოსავალი ცვლადი არ განიცდიდეს რხევას;
- მართვაზე არსებული შეზღუდვების მიუხედავად უზრუნველყოს ძიების მაქსიმალური სიჩქარე;
- უნივერსალურობა, ე. ი. აქვს უნარი წინასწარი აწყობის გარეშე გადაწყვიტოს ოპტიმიზაციის ამოცანა ობიექტების ფართო კლასისათვის (შეცვალოს არა მარტო პარამეტრები, არამედ სტრუქტურაც);
- ტექნიკური რეალიზაციის სიმარტივე.

წარმოდგენილ ნაშრომში ოპტიმიზაციის სისტემის აგების ამოცანა, რომლებსაც გააჩნიათ ზემოთ ჩამოთვლილი თვისებები, ეყრდნობა ტრადიციულად ცნობილ ცვლადი სტრუქტურის სისტემებში მოსრიალე რეჟიმების გამოყენებას, ამიტომ სასურველია მიმოვიხილოთ მოკლე ინფორმაცია ცვლადი სტრუქტურის სისტემების და მოსრიალე რეჟიმების თეორიიდან [39, 40, 42, 42, 43, 44].

1. 3. მოსრიალე რეჟიმების წარმოქმნის, არსებობის პირობები და მათემატიკური აღწერა

ამ პარაგრაფში ოპტიმიზაციის სისტემის აგების ამოცანა, რომელსაც გააჩნია შესავალში ჩამოთვლილი თვისებები, ემყარება სისტემაში მოსრიალე რეჟიმების შექმნას, ამიტომ მიზანშეწონილია მოკლედ მიმოვიხილოთ ცვლადი სტრუქტურის სისტემების და მოსრიალე რეჟიმების თეორია.

ცვლადი სტრუქტურის სისტემების თეორიაში ფაზური სივრცითი მეთოდების გამოყენებით, რომელიც დამუშავებულია ა. ა. ანდრონოვის და მისი სკოლის ნაშრომებში [45], გამოკვლეულია დინამიკური სისტემის ქცევა

$$\dot{x} = f(x,t) + B(x,t)u, \quad (1.3.1)$$

სადაც x და f – n -განზომილებიანი სვეტის ვექტორია, B – $n \times m$ -მატრიცა, u -მართვის ვექტორი კომპონენტებით $u_1 \dots u_m$, რომელიც განიცდის წყვეტას შესაბამის ზედაპირებზე $\sigma_i(x) = 0$, მოცემული ფაზურ სივრცეში ($x_1 \dots x_n$):

$$u_i = \begin{cases} u_i^+(x,t) & \text{როცა } \sigma_i(x) > 0, \\ u_i^-(x,t) & \text{როცა } \sigma_i(x) < 0, \end{cases} \text{ სადაც } i=1 \dots m, \quad (1.3.2)$$

$\sigma_i(x)$, u_i^+ , u_i^- – ზოგიერთი უწყვეტი ფუნქციებია. (1.3.1) და (1.3.2) სისტემის განსაკუთრებულობა მდგომარეობს იმაში, რომ ყველა ან ზოგიერთი გადართვების $\sigma_i(x) = 0$ ზედაპირების გადაკვეთაზე შეიძლება წარმოიქმნას მოძრაობის განსაკუთრებული სახე – ე. წ. მოსრიალე რეჟიმი. ასე მაგალითად, ერთ ზედაპირზე $\sigma_i = 0$ წარმოიქმნება მოსრიალე რეჟიმი, თუ შესრულებულია პირობები მოყვანილი [46]-ში.

$$\begin{aligned} \lim_{\sigma_i \rightarrow -0} \sigma_i > 0 & \quad \text{და} \quad \lim_{\sigma_i \rightarrow +0} \sigma_i < 0 \\ \sigma_i & \rightarrow -0 \end{aligned} \quad (1.3.3)$$

რომლებიც აღნიშნავენ, რომ (1.3.1) და (1.3.2) სისტემის ტრაექტორიები, მომიჯნავე $\sigma_i = 0$ -ის, მიმართულია ამ ზედაპირისაკენ. შესაბამისად, $\sigma_i = 0$ -ზე გამომსახველი წერტილის მოხვედრისას, მას არ შეუძლია დატოვოს ეს ზედაპირი (1.3.1) და (1.3.2) სისტემის ნებისმიერი ტრაექ-

ტორიიდან და ასრულებს მოძრაობას $\sigma_i = 0$ -ის გარშემო. მოძრაობის ასეთ სახეს უწოდებენ იდეალურ მოსრიალვე რეჟიმს. მოსრიალვე რეჟიმი წარმოიქმნება $\sigma_i(x) = 0, i = 1, \dots, m$ ზედაპირების გადაკვეთაზე, თუ თითოეულისათვის სრულდება (1.3.3) პირობები. საერთო შემთხვევაში მოსრიალვე რეჟიმის წარმოქმნის ამოცანა $\sigma_i(x) = 0, i = 1, \dots, m$ გადაკვეთაზე ექვივალენტურია სივრცის $(\sigma_1, \dots, \sigma_m)$ საწყისი კოორდინატების მდგრადობის ამოცანის სისტემისათვის, რომელიც აღწერს (1.3.1) და (1.3.2) სისტემის ფაზური ტრაექტორიის პროექციას ამ სივრცეზე

$$\dot{\sigma} = G_\sigma f(x, t) + G_\sigma B(x, t), \quad (1.3.4)$$

და ამოიხსნება ლიაპუნოვის მეორე მეთოდის საფუძველზე [40]. (1.3.4)-ში $G_\sigma - m \times n$ მატრიცაა, რომლის სტრიქონი შედგენილია $\sigma_i(x)$ ფუნქციის გრადიენტებისაგან. სრიალის განტოლების მისაღებად ჩვენ გამოვიყენებთ ექვივალენტური განტოლების მეთოდს [40, 47], რომლის თანახმადაც საჭიროა (1.3.4) გამოსახულება გაუტოლოთ ნულს და ამოვხსნათ მიღებული განტოლება u ვექტორის მიმართ:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= G_\sigma + G_\sigma B u_{\text{ექვ}} = 0, \\ u_{\text{ექვ}} &= -(G_\sigma B)^{-1} G_\sigma f. \end{aligned} \quad (1.3.5)$$

მიღებული $u_{\text{ექვ}}$ მნიშვნელობა ჩავსვათ საწყის განტოლებაში (1.3.1) და მივიღებთ მოსრიალვე მოძრაობის განტოლებას შემდეგი სახით.

$$\dot{x} = [E - (G_\sigma B)^{-1} G_\sigma] f(x, t). \quad (1.3.6)$$

მოსრიალვე რეჟიმის არსებობისათვის აუცილებელია, რომ (1.3.5) განტოლებას ჰქონდეს ამონახსენი (არ არის აუცილებელი ერთადერთი) u -ს მიმართ და თუნდაც ერთ-ერთი მათგანის ამონახსენი უნდა აკმაყოფილებდეს პირობას:

$$\begin{aligned} \min(u_i^+, u_i^-) \leq u_{i\text{ექვ}} \leq \max(u_i^+, u_i^-) \\ i = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (1.3.7)$$

მოყვანილი შედეგები მართებულია, იმ წინადადებით, რომ მართვის ფუნქციის (1.3.2) რეალიზაცია იდეალურია, რეალურ ფიზიკურ სისტემებში სხვადასხვა სახის არაიდეალურობის გამო (ჰისტერეზისის, ინერციულობის, დაგვიანების და სხვ.) მართვა განსხვავდება (1.3.2)-სგან, და

სისტემის მოქმედება (1.3.1) განტოლებისაგან განსხვავებით აღიწერება განტოლებით

$$\dot{x} = f(x, t) + B(x, t)\tilde{u}, \quad (1.3.8.)$$

სადაც \tilde{u} – ყველგან განსაზღვრული მართვის ფუნქციაა, რომელიც ითვალისწინებს ამ არაიდეალურობას. ასეთ სისტემებში შეიძლება წარმოიშვას ე. წ. რეალური მოსრიალე რეჟიმი, რომლის დროსაც (1.3.8.) სისტემის ფაზური ტრაექტორიები მიეკუთვნება ზოგიერთს, დამოკიდებულს არაიდეალურობასთან, Δ -გადაკვეთის მიდამოებში $\sigma(x) = 0$, ე. ი. $\|\sigma\| \leq 0$.

[47] ნაშრომში დამტკიცებულია, რომ არაიდეალურობის ამ სახეების დამოუკიდებლად, მათი მისწრაფება ნულისკენ, ერთი და იგივე საწყისი პირობის დროს (1.3.6.) და (1.3.8.) განტოლებების ამონახსნები ერთმანეთს ემთხვევა. ეს ფაქტი ასაბუთებს მართებულობას გამოვიყენოთ ექვივალენტური მართვის მეთოდი. ექვივალენტურ მართვას, მიღებული ფორმალური პროცედურის თანახმად (1.3.5.) აქვს უბრალო ფიზიკური არსი. ეს ფუნქცია ტოლია მართვის საშუალო მნიშვნელობის $u_{\text{საშ.}}$, რომელიც წარმოადგენს ვექტორული ფილტრის გამოსავალ სიდიდეს

$$\tau \dot{u}_{\text{საშ.}} + u_{\text{საშ.}} = \tilde{u}, \quad \tau = \text{const}, \tau > 0, \quad (1.3.9.)$$

თუ გარკვეული სახით შეთანხმებულია ფილტრის დროს მუდმივა τ და არეს სიგანე Δ , რომელშიც წარმოებს რეალური სრიალი. ადგილი აქვს თანაფარდობას

$$\begin{aligned} \lim_{\tau \rightarrow 0, \Delta \rightarrow 0, \Delta/\tau \rightarrow 0} u_{\text{საშ.}} &= u_{\text{ექვ.}} \\ \tau \rightarrow 0, \Delta \rightarrow 0, \Delta/\tau &\rightarrow 0 \end{aligned} \quad (1.3.10.)$$

და ბოლოს შეიძლება აღვნიშნოთ, რომ ცვლადი სტრუქტურის სისტემის სინთეზი წარმოადგენს ისეთი გადართვების ზედაპირის $\sigma_i(x) = 0$ და მართვის ფუნქციების u_i^+ , u_i^- შერჩევას, რომლის დროსაც $\sigma(x) = 0$ -ზე ყოველთვის წარმოიქმნება მოსრიალე რეჟიმი და მოძრაობა მოსრიალე რეჟიმში, აღწერილი (1.3.6.) განტოლებით ფლობს სასურველ თვისებებს.

1. 4. უცნობნიშნიანი გაძლიერების კოეფიციენტის მქონე ობიექტის მართვის პრინციპი

განვიხილოთ უცნობნიშნიანი გაძლიერების კოეფიციენტის მქონე ობიექტის მართვის იდეა სისტემაში მდგრადობის უზრუნველყოფის ამოცანის მაგალითზე

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = bu, \quad (14.1)$$

სადაც x_1, x_2 – სისტემის კოორდინატებია, b – უცნობნიშნიანი მუდმივი კოეფიციენტი, u – სკალარული მართვა. როდესაც ცნობილია b -ს ნიშანი, ამოცანა, თანახმად ცვლადი სტრუქტურის სისტემის სინთეზის მეთოდებისა [39] ამოიხსნება განტოლების დახმარებით

$$u = -\varphi x_1, \quad \varphi = \begin{cases} \alpha & \text{როცა } x_1 \sigma > 0, \\ -\alpha & \text{როცა } x_1 \sigma < 0, \end{cases} \quad \sigma = cx_1 + x_2 \quad (14.2)$$

(14.1), (14.2) სისტემაში გათვალისწინებულია ორი განსხვავებული წრფივი სტრუქტურა, რომელიც შეესაბამება φ კოეფიციენტის ორი მნიშვნელობა α და $-\alpha$ ($\alpha = const, \alpha > 0$), იგი ნახტომისებურად იცვლება გამომსახველი წერტილის $x_1 = 0$ და $\sigma = 0$ ხაზებზე მოხვედრის შემთხვევაში. თუ კოეფიციენტს $c > 0$ ავირჩევთ ისეთი სახით, რომ პირდაპირი ხაზი $\sigma = 0$ იმყოფება x_1 ღერძსა და ჰიპერბოლური ტრაექტორიის ასიმპტოტას შორის $\varphi = -\alpha$, მაშინ ასეთ სისტემაში გამომსახველი წერტილი ნებისმიერი საწყისი მდგომარეობიდან მოხვდება $\sigma = 0$ პირდაპირ გადაკვეთაზე, რომელზეც წარმოიქმნება მოსრიალე რეჟიმი. სრიალის განტოლებას აქვს სახე

$$\dot{x}_1 + cx_1 = 0.$$

ამ განტოლების ნებისმიერი ამონახსნი ასიმპტოტურად მიისწრაფის ნულისაკენ, რაც წყვეტს დასმულ ამოცანას. მოყვანილი განმარტებიდან ჩანს, რომ ობიექტის გაძლიერების კოეფიციენტის ნიშნის ცვლილების დროს მდგრადობის უზრუნველსაყოფად აუცილებელია შეიცვალოს საწინააღმდეგოდ ნიშანი და სტრუქტურის გადართვის კანონი. ეს გვაძლევს საშუალებას ჩამოვაყალიბოთ მართვის კანონი ასეთი ობიექტებისათვის, რომელსაც ექნება შემდეგი სახე:

$$u = -\varphi x_1, \quad \varphi = \begin{cases} \alpha & \text{როცა } x_1 \sigma_1 \sigma_2 > 0, \\ -\alpha & \text{როცა } x_1 \sigma_1 \sigma_2 < 0, \end{cases} \quad (14.3.)$$

სადაც $\sigma_1 = cx_1 + x_2$, $\sigma_2 = (c + \delta)x_1 + x_2$, δ – მცირე დადებითი სიდიდეა, რომელიც განსაზღვრავს $\sigma_1 = 0$ და $\sigma_2 = 0$ გადაკვეთის ხაზების „სიას-ლოვეს“. (14.1.) და (14.3.) სისტემაში $\sigma_1 \sigma_2 < 0$ სექტორში მდებარე გამომსახველი წერტილის საწყის მდგომარეობაში ყოველთვის აღიძვრება მოსრიალე რეჟიმში. ამ მტკიცებულების დასასაბუთებლად სისტემის მოძრაობის განტოლება დაეწეროს σ_1 და σ_2 კოორდინატებთან შეფარდებით:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_1 &= c x_2 - \alpha b |x_1| \operatorname{sign} \sigma_1 \sigma_2, \\ \dot{\sigma}_2 &= (c + \delta) x_2 - \alpha b |x_1| \operatorname{sign} \sigma_1 \sigma_2. \end{aligned} \quad (14.4.)$$

(14.4.) განტოლებიდან ჩანს, რომ $\sigma_1 \sigma_2 < 0$ სექტორში და მის ზოგიერთ გარემოში $\alpha |b| > (c + \delta)^2$ უტოლობის შესრულების დროს $\dot{\sigma}_1$ და $\dot{\sigma}_2$ ფუნქციების ნიშნები ერთმანეთს ემთხვევა და განისაზღვრებიან მეორე შესაბამისად b -ს ნიშანზე დამოკიდებულებით ერთ-ერთი ამ სიდიდეთაგანს (σ_1 როცა $b > 0$ ან σ_2 როცა $b < 0$) აქვს ნიშანი სინქარის საწინააღმდეგო ნიშნისა, ე. ი. ამ სიდიდისათვის შესრულებულია პირობა (1.3.3.) და შესაბამისი ხაზის გადაკვეთაზე წარმოიქმნება მოსრიალე რეჟიმში. მოსრიალე რეჟიმში სისტემის მოქმედება აღიწერება განტოლებით $\dot{x}_1 + c x_1 = 0$ როცა $b > 0$, $\dot{x}_1 + (c + \delta) x_1 = 0$ როცა $b < 0$ და შესაბამისად, მოცემულ სექტორში $\sigma_1 \sigma_2 < 0$ წონასწორობის მდგომარეობიდან ნებისმიერი საწყისი გადახრები ასიმპტოტურად მცირდება ნულამდე დამოუკიდებლად b კოეფიციენტის ნიშნისა. ნებისმიერი საწყისი პირობების დროს მდგრადობის ამოცანა იქნება გადაწყვეტილი, თუ გავითვალისწინებთ მოწყობილობას, რომელიც უზრუნველყოფს სისტემაში $\sigma_1 \sigma_2 < 0$ საწყისი პირობების შექმნას.* აქედან გამომდინარე ნაჩვენებია, რომ მართვის ჩამოყალიბებული პრინციპი (14.3.) უზრუნველყოფს ობიექტის გამოსავალი კოორდინატის მართვის ამოცანის გადაწყვეტას ობიექტის გაძლიერების კოეფიციენტის შესახებ რაიმე ინფორმაციის გარეშე. ზემოთ აღინიშნა,

* ასეთი მოწყობილობის აღწერა მოყვანილია II და V თავში

რომ ობიექტის ოპტიმიზაციის სპეციფიკა მდგომარეობს იმაში, რომ ობიექტის გაძლიერების ლოკალური კოეფიციენტი [(1.2.1)-(1.2.3.) ამ კოეფიციენტის როლს თამაშობს $\frac{df}{dx}$ სიდიდე] უცნობია და ნიშანცვლადი, ამიტომ ასეთი ობიექტის გამოსავალი სიდიდის მართვისათვის სასურველია გამოყენებულ იქნას შემოთავაზებული მართვის პრინციპი.

1.5. დასკვნა

განხილულია ოპტიმიზაციის ავტომატური სისტემების აგების პრინციპი. ნაჩვენებია ობიექტის ოპტიმიზაციის თავისებურება, რაც მდგომარეობს იმაში, რომ ობიექტის მახასიათებლის ზუსტი სახე და შეზღუდვის ფუნქციები წინასწარ უცნობია და არ არსებობს ურთიერთცალსახა შესაბამისობა მათ მნიშვნელობებსა და მართვად ცვლადებს შორის. ასეთ შემთხვევაში წარმოქმნილი მართვის სპეციფიკური ამოცანა განხილულია ექსტრემალური მახასიათებლის მქონე სტატიკური ობიექტის მაგალითზე. დასმულია ამოცანა, შეირჩეს ისეთი მართვა, რომლის დროსაც ობიექტის გამოსავალი სიდიდე მიისწრაფის ექსტრემუმისაკენ. ასეთი ამოცანის გადასაწყვეტად განხილულია მართვის ცნობილი სხვადასხვა მეთოდები, რომელთა მნიშვნელოვანი ნაწილი ემყარება ორ ეტაპს: დასაწყისში ობიექტის შესასვლელზე საძებნი სიგნალების მიწოდებით და ობიექტის გასასვლელზე რეაქციის ანალიზით, ან ობიექტის გაძლიერების კოეფიციენტის განსაზღვრით, რომელიც შემდგომში გამოიყენება მართვის ფუნქციის ჩამოსაყალიბებლად. განხილული მეთოდებით ტექნიკური და ტექნოლოგიური ობიექტების მართვა გაძნელებულია.

სადისერტაციო ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს ოპტიმიზაციის ისეთი სისტემის აგება, რომლებსაც გააჩნიათ შემდეგი თვისებები: ობიექტის ექსტრემალური მახასიათებლის გრადიენტის გაზომვის გარეშე აწარმოოს ექსტრემუმის მოძებნა, გარდამავალ პროცესში ობიექტის გამოსავალი ცვლადი არ განიცდიდეს რხევას, მართვაზე არსებული შეზღუდვების მიუხედავად უზრუნველყოს ძიების მაქსიმალური სიჩქარე, უნივერსალობა, ე. ი. მართვის პროცესში შეიცვალოს არა მარტო პარამეტრები, არამედ სტრუქტურაც და ტექნიკური რეალიზაციის სიმარტივე.

ნაჩვენებია, რომ ოპტიმიზაციის სისტემის აგების ამოცანა ეყრდნობა ტრადიციულად ცნობილ ცვლადი სტრუქტურის სისტემებში მოსრიალე რეჟიმების გამოყენებას, მიმოხილულია მოკლე ინფორმაცია ცვლადი სტრუქტურის სისტემების და მოსრიალე რეჟიმების თეორიიდან, განხილულია უცნობნიშნიანი გაძლიერებს კოეფიციენტის მქონე ობიექტის მართვის პრინციპი.

თავი 2. ერთგანზომილებიანი ექსტრემალური მახასიათებლის მქონე სტატიკური ობიექტის ოპტიმიზაცია

2.1. შესავალი

ნაშრომის ამ თავში განიხილება ექსტრემალური მახასიათებლის მქონე სტატიკური ობიექტის ოპტიმიზაციის ჩვეულებრივი ამოცანის გადაწყვეტის მეთოდები, რომლებიც განიხილავენ ოპტიმიზაციის ობიექტის შესავალი პარამეტრების ისეთ თანაფარდობას, რომლის დროსაც ობიექტის გამოსავალი სიდიდე იღებს ექსტრემალურ მნიშვნელობას. შემოთავაზებული ოპტიმიზაციის სისტემები ეკუთვნიან უწყვეტი სისტემების კლასს, რომელთაც საფუძვლად უდევს ობიექტის შესავალი ზემოქმედების უწყვეტი ცვლილება დამოკიდებული სისტემის მდგომარეობაზე. იდეა შემოთავაზებული [48, 49] ერთგანზომილებიანი სტატიკური ობიექტის ოპტიმიზაციისათვის მდგომარეობს შემდეგში. ობიექტის გამოსავალი სიდიდე y , ედარება სპეციალურად შერჩეულ დამკვეთ ზემოქმედებას g , რომელიც დასმული ამოცანის მიხედვით ფორმირდება მონოტონურად ზრდადი ან კლებადი დროის ფუნქციის სახით $g(t)$. ობიექტის შესავალი ზემოქმედება ფორმირდება ობიექტის გამოსავალ y სიდიდესა და დამკვეთით ზემოქმედებას g შორის განუთანხმოების ε სიგნალის საფუძველზე:

$$\varepsilon = g(t) - y(t),$$

და ეს განუთანხმოება უნდა მივიყვანოთ ნულამდე. შედეგად ობიექტის გამოსავალ y სიდიდე მოსრიად რეჟიმში მიჰყვება მონოტონურად კლებად დამკვეთ ზემოქმედებას g და აღწევს თავის ექსტრემუმს. ამოცანის სპეციფიკა, დაკავშირებული თავისებური მიმყოლი სისტემის აგებაში, მდგომარეობს იმაში, რომ ობიექტის გაძლიერების კოეფიციენტი,

რომლის როლს თამაშობს $\frac{df}{dx}$ -ის პროპორციული სიდიდე, უცნობია და

იცვლება როგორც სიდიდით, ასევე ნიშნით. ფიზიკური თვალსაზრისით,

მმართველმა მოწყობილობამ ასეთ სისტემაში, $\frac{df}{dx}$ კოეფიციენტზე რაიმე

ინფორმაციის გარეშე, უნდა უზრუნველყოს ობიექტის შესავალი სიდიდის ცვლილების ისეთი მიმართულება, რომ ობიექტის გამოსავალი სიდიდე ყოველთვის მცირდებოდეს, იმეორებს რა დამკვეთ ზემოქმედებას მიუხედავად იმისა, თუ ექსტრემალური მახასიათებლის რომელ მხარეს იმყოფება ამ მომენტისათვის ობიექტის გამოსავალი. ჩამოყალიბებული ასეთი სახით მიყოლის ამოცანა, ექსტრემალური მახასიათებლის ყოველ წერტილში გაძლიერების ლოკალური კოეფიციენტის $\frac{df}{dx}$ გაზომვის გარეშე,

გადაწყვეტილი იქნება სისტემაში მოსრიადე რეჟიმების მოძრაობის წინასწარგანზრახული შეყვანით. აღვნიშნოთ, რომ ობიექტის გაძლიერების ლოკალურ კოეფიციენტზე ინფორმაციის მიღება ფაქტობრივად ნიშნავს ექსტრემალური მახასიათებლის გრადიენტის გაზომვას (ან მისი რომელიმე პროექციის), რომელსაც ზოგადად ითვალისწინებენ ექსტრემალურ სისტემებში. არსებითია, რომ თვითონ გაზომვა ხშირად დაკავშირებულია სისტემაში სპეციალური მოწყობილობების შეყვანით, რომელთა დახმარებითაც წარმოებს ობიექტის შესასვლელზე სასინჯი ზემოქმედების ორგანიზება და გამოსავალზე მისი რეაქციის ანალიზი [1, 6, 8, 9, 12, 50].

წარმოდგენილ ნაშრომში შემოთავაზებული მიდგომა საშუალებას იძლევა უარი ვთქვათ ასეთი მოწყობილობების გამოყენებაზე და შესაბამისად გავამარტივოთ ოპტიმიზაციის სისტემები. 2.2. და 2.3 პარაგრაფებში განიხილება შემოთავაზებული ალგორითმები რომლებიც რეალიზაციას უკეთებენ აღწერილი ძიების პრინციპს. მომდევნო პარაგრაფებში ოპტიმიზაციის ამოცანა განიხილება იმ შემთხვევაში, როცა ობიექტის ექსტრემალური მახასიათებელი არის არასტაციონარული და მრავალექსტრემუმიანი.

2.2. ოპტიმიზაცია მუდმივ სიჩქარეში დამკვეთი ზემოქმედებით

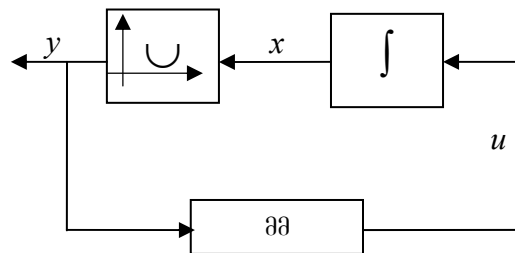
განვიხილოთ სტატიკური ობიექტის ოპტიმიზაციის მარტივი ამოცანა, აღწერილი განტოლებით

$$y = f(x) \tag{2.2.1}$$

სადაც x შესავალი და y გამოსავალი სიდიდეებია ობიექტის, ფუნქცია $f(x)$ დიფერენცირებადი, რომელიც აღწევს მინიმუმს შესავალი სიდიდის

რომელიც უცნობი მნიშვნელობის დროს x_0 და $\frac{df}{dx} \neq 0$ როცა $x_0 \neq x$.

ამოცანა შესდგება ისეთი ძიების ორგანიზებაში, რომელიც იძლევა საშუალებას მინიმუმამდე დაყვანილ იქნას ობიექტის გამოსავალი სიდიდე y . შევეცდებით ოპტიმიზაციის ეს ამოცანა გადავწყვიტოთ ალგორითმების კლასში, რომელთაც საფუძვლად უდევს შესავალი ზემოქმედების სიჩქარის უწყვეტი ცვლილება დამოკიდებული სისტემის მდგომარეობაზე. ზოგადად ასეთი სისტემა შედგება მმართველი მოწყობილობისგან (ნახ. 2.2.1).



ნახ. 2.2.1

ინტეგრალური რგოლისაგან, რომლის შესასვლელზე მიეწოდება მართვის სიგნალი u , გამოსასვლელი x კი ობიექტის შესასვლელს, რის შედეგადაც განხორციელდება ექსტრემუმის ძიების პროცესი. თანახმად ზემოთ დასახული ოპტიმიზაციის ამოცანის გადასაწყვეტად, ჩვენ მოგვიწევს ისეთი სისტემის აგება, რომელშიც ობიექტის გამოსავალი სიდიდე y მიჰყვება წინასწარ შერჩეულ მონოტონურად ზრდად დამკვეთ ზემოქმედებას და ამით ის აღწევს ექსტრემუმს. მართვის მიზანია ε განუთანხმობის ნულამდე დაყვანა

$$\varepsilon = g(t) - y(t), \quad (2.2.2)$$

სადაც $g(t)$ მონოტონურად ზრდადი (კლებადი) ფუნქციაა, რომელიც შემდგომში იწოდება დამკვეთ ზემოქმედებად. ამ პარაგრაფში განხილული იქნება ოპტიმიზაციის სისტემა, რომელშიც დამკვეთი ზემოქმედება იცვლება მუდმივი სიჩქარით.

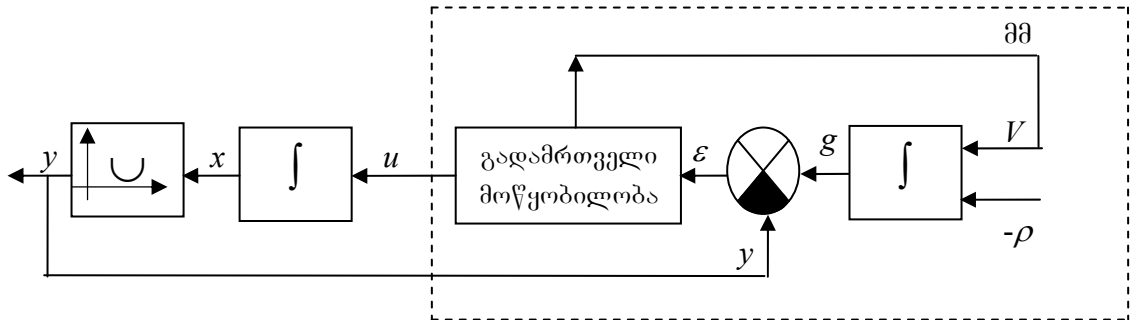
ასეთი სახით ჩამოყალიბებული ამოცანის გადაწყვეტა ვეძებთ რეალური სისტემების კლასში, რომელშიც მართვის სიგნალს u შეუძლია მიიღოს ორიდან მხოლოდ ერთი მნიშვნელობა. ასეთი სისტემის სტრუქტურული სქემა გამოსახულია ნახ. 2.2.2-ზე და მოძრაობა მასში აღწერილია განტოლებით:

$$y = f(x), \dot{x} = u, u = A \text{sign}(\sigma_1, \sigma_2), \dot{g} = -\rho + V, \quad (2.2.3)$$

სადაც $\rho, A = \text{const}, \rho > 0, \sigma_1 = \varepsilon, \sigma_2 = \varepsilon + \delta$, მცირე დადებითი სიდიდეა. დამატებითი ზემოქმედების V შესახებ განვმარტავთ ქვემოთ.

ზოგადად რელეურ სისტემებში მართვის ფუნქციას აქვს შემდეგი სახე.

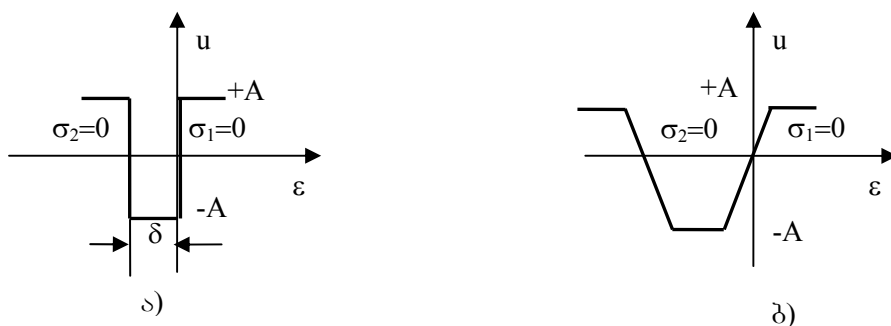
$$u = A \text{sign} \varepsilon.$$



ნახ. 2.2.2.

ასეთი მართვის სიგნალის გამოყენებისას ჩვენს მიმდევრო სისტემაში ექსტრემალური მახასიათებლის ერთ მხარეს ის მიგვიყვანს უარყოფით უკუკავშირამდე, შესაბამისად მეორე მხარეს დადებით უკუკავშირამდე. მაშასადამე, ასეთ სისტემაში (იგულისხმება, თუ არ წარმოებს გრადიენტის სიდიდის გაზომვა) შეუძლებელია უზრუნველვეყოთ ოპტიმიზაციის ობიექტის გამოსავალი y სიდიდის მიყოლა დამკვეთი ზემოქმედების $g(t)$ მიმართ. ვაჩვენოთ, რომ ეს ამოცანა შეიძლება გადაჭრილი იქნას ზემოთ ჩამოყალიბებული პრინციპის საფუძველზე, რომლის თანახმადაც მმართველი სიგნალი ირჩევა თანახმად (2.2.3.) და წარმოადგენს ორი არგუმენტის რელეურ ფუნქციას (ნახ. 2.2.3ა).

$$u = A \text{sign}(\sigma_1, \sigma_2)$$



ნახ. 2.2.3.

დავუშვათ სისტემაში საწყისი პირობები ისეთია, რომ

$$\sigma_1(t_0) \sigma_2(t_0) < 0, \quad (2.2.4.)$$

$$A \left| \frac{df}{dx} \right| > \rho \quad (2.2.5.)$$

და დავუშვათ, რომ ფუნქცია $V = 0$

განვიხილოთ ასეთ საწყის პირობებში სისტემის მოქმედება, რომელიც განუთანხმობის \mathcal{E} მიმართ თანახმად (2.2.3.) მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\dot{\mathcal{E}} = -\rho - \frac{df}{dx} A \text{sign}(\sigma_1 \sigma_2). \quad (2.2.6.)$$

ვინაიდან $\dot{\mathcal{E}} = \dot{\sigma}_1 = \dot{\sigma}_2$, მაშინ (2.2.4.) საწყისი პირობების დროს ერთ-ერთი σ_1 (ან σ_2) ფუნქციისათვის შესრულდება უტოლობა $\sigma_1 \dot{\sigma}_1 < 0$ (ან $\sigma_2 \dot{\sigma}_2 < 0$). ამიტომ სიდიდე σ_1 (ან σ_2), შეიცვლის ნიშანს და (2.2.5.), (2.2.6.)-ის თანახმად შესაბამისად შეიცვლის ნიშანს წარმოებული $\dot{\sigma}_1$ (ან $\dot{\sigma}_2$), ე. ი. $\sigma_1 = 0$ (ან $\sigma_2 = 0$) წერტილის მიდამოში ადგილი აქვს უტოლობას $\sigma_1 \dot{\sigma}_1 < 0$ (ან $\sigma_2 \dot{\sigma}_2 < 0$). ეს ნიშნავს, რომ მართვის სიგნალის გადართვა ხდება დიდი სიხშირით და სიდიდე σ_1 (ან σ_2) შეიცვლება იგივე სიხშირით და მცირე ამპლიტუდით.* ასეთ მოძრაობას უწოდებენ მოსრიალე რეჟიმს, ამ მოძრაობის დროს $\sigma_1 = 0$ (ან $\sigma_2 = 0$).

დავუშვათ, რომ პირობა $A \left| \frac{df}{dx} \right| > \rho$ ირღვევა ექსტრემუმის ზოგიერთ მიდამოში. მაშინ, თანახმად იმისა, რომ $y = g$, ან $y = g + \delta$, $g(t)$

კი არის მონოტონურად კლებადი (ზრდადი) ფუნქცია $\dot{g} = -\rho < 0$, ობიექტის გამოსავალი სიდიდე საბოლოო დროს მიაღწევს ამ მიდამოში.

შევარჩიოთ ახლა ზემოქმედება V , რომელზედაც ზემოთ იყო საუბარი, ისეთი სახით, რომ ზემოქმედებამ ერთის მხრივ შექმნას სისტემაში საწყისი პირობები (2.2.4.) სახის, და მეორეს მხრივ მოახდინოს სისტემის მოძრაობის სტაბილიზირება ექსტრემუმის მიდამოებში. ამ ამოცანის გადაწყვეტის აუცილებლობა განპირობებულია იმით, რომ ზემოთ განხილული მსჯელობა მართებულია მხოლოდ (2.2.4.) საწყისი

* ამ რეჟიმის ამპლიტუდა და სიხშირე განისაზღვრება არაიდეალურობით გადამრთველ მოწყობილობაში, როგორცაა დაგვიანება, პისტრეზისი და სხვ. იდეალურ შემთხვევაში სიხშირე ტოლია უსასრულობის, ამპლიტუდა კი – ნული.

პირობების დროს, და ექსტრემუმის მიდამოებში მიღწევის შემდეგ დამკვეთი ზემოქმედების $g(t)$ შემდგომ კლებას აზრი არა აქვს. ამ მიზნისთვის V ფუნქცია უნდა შეირჩეს მოდულით დიდი და დადებითი როცა $\sigma_1 < 0, \sigma_2 < 0$, უარყოფითი – როცა $\sigma_1 > 0, \sigma_2 > 0$ და ნულის ტოლი, როცა $\sigma_1 \sigma_2 < 0$. მაშინ დამკვეთი ზემოქმედების $g(t)$ „ჩქარი“ ცვლილებით სისტემაში წარმოიშვება (2.2.4.) სახის საწყისი პირობები. რადგანაც მაინტეგრირებელი რგოლი, რომელშიც ფორმირდება დამკვეთი ზემოქმედება $g(t)$, წარმოადგენს მმართველი მოწყობილობის ელემენტს, მაშინ სიდიდე g შეიძლება შეიცვალოს რაც შეიძლება ჩქარა, და შემდგომში შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ სისტემაში საწყისი პირობები შეიქმნება მყისიერად.

ზემოთ მოყვანილი მსჯელობის შესაბამისად ამის შემდეგ სისტემაში წარმოიქმნება მოსრიალე რეჟიმი, რომელიც $V = 0$ -ის დროს უზრუნველყოფს ექსტრემუმისკენ მოძრაობას. ამ მოძრაობის დროს σ_1 და σ_2 სიდიდეებისაგან ერთ-ერთი მუდმივნიშნაანია, მეორე კი – ნიშანცვლადი სიდიდე, რომელიც იცვლება დიდი სიხშირით და პატარა ამპლიტუდით. აღწერილ კანონში V ფუნქციის ცვლილების σ_1 და σ_2 ნიშნების თანხვედრის დროს მოსრიალე რეჟიმში V სიდიდე განსხვავებული იქნება ნულისაგან, ფუნქცია \dot{g} კი ამ შემთხვევაში არ იქნება $-\rho$ -ს ტოლი, და შეიძლება აღმოჩნდეს, რომ დამკვეთი ზემოქმედება $g(t)$ აღარ იყოს მონოტონურად კლებადი დროის ფუნქცია. აქ ჩვენ არ შევჩერდებით ამასთან დაკავშირებული საკითხების განსახილველად. ვაჩვენოთ მხოლოდ, რომ ეს მოვლენა შეიძლება გამოვრიცხოთ, თუ გადამრთველ მოწყობილობას, სადაც ხდება V ფუნქციის რეალიზება, გააჩნია სიმეტრიული პისტერეზისული მარყუჟი, რომელთა სიგანე აღემატება σ_1 და σ_2 რხევის ორმაგ ამპლიტუდას მოსრიალე რეჟიმში. რეალურ მოსრიალე რეჟიმში σ_1 და σ_2 -ის რხევის ამპლიტუდის შეფასება ძნელი არ არის. თუ ვივარაუდებთ გადამრთველ მოწყობილობაში არაიდეალურობის თვისებებზე. მაგალითად, მაშინ, როცა არაიდეალურობა აღიწერება მუდმივი დაგვიანებით $e^{-p\tau_0}$ აღწერილი [45] მეთოდით, ძნელი არ არის დავრწმუნდეთ, რომ

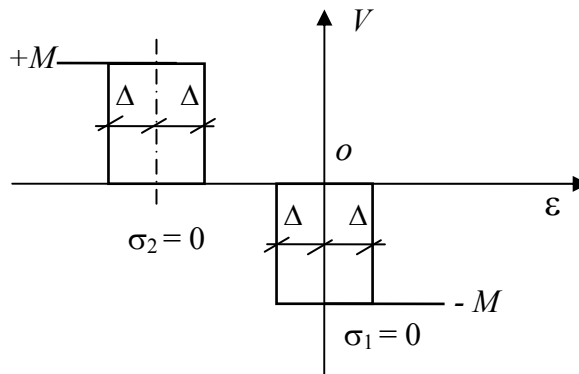
დამყარებულ რეალურ მოსრიალე რეჟიმში რხევის ამპლიტუდა არ აღემატება $\left(\rho + A \left| \frac{df}{dx} \right| \right) \tau_0$ სიდიდეს. იმ შემთხვევაში, თუ ობიექტის გამოსავალ კოორდინატზე გამოყენებულია შემთხვევითი სიგნალი, მაშინ ჰისტერეზისული მარყუჟის სიგანე რეკომენდებულია ავირჩიოთ „სამი სიგმას კანონის“ საფუძველზე, ე. ი. ჰისტერეზისული მარყუჟის სიგანე სამჯერ უნდა აღემატებოდეს დაბრკოლების საშუალო კვადრატულ გადახრას. შედეგად V ფუნქცია მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$V = \begin{cases} -M & \text{როცა } \sigma_1 - \Delta > 0 \text{ და } \sigma_2 > 0, \\ 0 & \text{როცა } (\sigma_1 + \Delta)(\sigma_2 - \Delta) < 0, \\ +M & \text{როცა } \sigma_1 < 0 \text{ და } \sigma_2 + \Delta < 0 \end{cases}$$

(2.2.7.)

$$M = \text{const}, \quad M \gg \rho,$$

სადაც 2Δ ჰისტერეზისული მარყუჟის სიგანეა (ნახ. 2.2.4).



ნახ. 2.2.4.

ინტერვალებში $|\sigma_1| < \Delta$ და $|\sigma_2| < \Delta$ ფუნქცია V ინახუნებს იმ მნიშვნელობას $(-M, 0, +M)$, რომელიც მას ჰქონდა გამომსახველი წერტილის ამ ინტერვალში მოხვედრამდე. აღვნიშნოთ, რომ როგორც მოვიხსენიეთ შესავალში, სისტემის ანალიზი ტარდება ფაზური სივრცის გაგების გამოყენებით. ამ შემთხვევაში განხილული სისტემის მდგომარეობა ხასიათდება გამომსახველი წერტილის მდებარეობით ε ღერძზე. ასეთი მეთოდით ჩამოყალიბებული V ზემოქმედების დროს გამომსახველი წერტილი საწყის პერიოდში „შეიგდება“ არა $\sigma_1 \sigma_2 < 0$ არეში, არამედ

$(\sigma_1 + \Delta)(\sigma_2 - \Delta) < 0$ არეში, შემდგომ, როგორც ადრე სარეგულირებელი სიდიდე მოსრიალე რეჟიმის ხარჯზე მოხედება ექსტრემუმის შემცველ ზოგიერთ E გარემოში, რომელშიც ირღვევა პირობა

$$A \left| \frac{df}{dx} \right| \geq \rho \quad (2.2.8.)$$

I დანართში გამოკვლეულია სისტემის მოძრაობა ამ გარემოში მოხედრის შემდეგ, და ნაჩვენებია, რომ ზემოქმედება V (2.2.7.)-ის სახით უზრუნველყოფს y და g სიდიდეების შემდგომ კლებას რხევით რეჟიმში, თითქმის ექსტრემუმამდე, რის შემდეგაც მყარდება ავტორხევები, რომელთა ამპლიტუდა ტოლია Δ და ეს კი განსაზღვრავს ძიების ცდომილებას.

ასეთი სისტემის მუშაობის პრინციპი შეიძლება განვმარტოთ შემდეგნაირად. დაუშვათ წყვეტილი მართვა (ნახ. 2.2.3ა). რეალიზებული გაძლიერების დიდი კოეფიციენტით, წარმოადგენს \mathcal{E} ცდომილების უწყვეტ ფუნქციას, ნაჩვენებია ნახ. 2.2.3ბ-ზე. ასეთ მახასიათებელს აქვს ორი დახრილი მონაკვეთი აბსოლუტური სიდიდით და სხვადასხვა ნიშნით, კუთხური კოეფიციენტით. გასაგებია, რომ ობიექტის გაძლიერების კოეფიციენტის ნებისმიერი ნიშნის დროს ერთ-ერთი ამ კოეფიციენტებიდან შეესაბამება მდგრად სისტემას, და მეორე – არამდგრადს. საწყისი პირობები შეირჩევიან ისეთნაირად, რომ \mathcal{E} ცდომილების სიდიდე იმყოფებოდეს მახასიათებლის საშუალო მონაკვეთის ფარგლებში (ნახ. 2.2.3ბ). ამის შემდეგ სისტემა ავტომატურად გადადის იმ დახრილ მონაკვეთზე, რომელიც შეესაბამება მდგრადობას.

ამ მონაკვეთის დახრის საკმაოდ დიდი კოეფიციენტის დროს უზრუნველყოფილია ობიექტის გამოსავალი y სიდიდის მაღალხარისხიანი მიყოლა მონოტონურად კლებად დამკვეთი ზემოქმედების g , რის შედეგადაც უზრუნველყოფილია მოძრაობა ექსტრემუმისკენ.

2.3. ოპტიმიზაცია ცვლად სიჩქარიანი დამკვეთი ზემოქმედებით

როგორც ცნობილია, ძიების ცდომილების გარდა ნებისმიერი ექსტრემალური სისტემის მუშაობის ერთ-ერთი ძირითადი მაჩვენებელია ექსტრემუმის მოძებნის დროს. იგულისხმება, რომ სწრაფმოქმედების

საკითხი მჭიდროდ არის დაკავშირებული მმართველი ზემოქმედების გარკვეული შეზღუდვების არსებობაზე. ასე მაგალითად, თუ ადრე განხილულ სისტემაში მართვა არ არის შეზღუდული, მაშინ შეიძლება ნებისმიერი სწრაფმოქმედების მიღწევა, თუ შესაბამისად ავირჩევთ სიდიდეს ρ – ობიექტის გამოსავალი სიდიდის ექსტრემუმისკენ მიახლოების სიჩქარეს. მაგრამ თუ მართვაზე მოცემულია შემდეგი სახის შეზღუდვა:

$$|U| \leq V_0, \quad (2.3.1)$$

მაშინ განხილულ სისტემაში მოძრაობა ექსტრემუმისკენ სწარმოებს აშკარად არა მაქსიმალური სიჩქარით. ნამდვილად, შესავალი სიდიდის ცვლილების მაქსიმალური სიჩქარე ტოლია V_0 და მეორე მხრივ, მოსრიალე რეჟიმში სისტემის მოძრაობისა, როცა $\dot{y} = \dot{g} = -\rho$, თანახმად (2.2.8.) გვაქვს

$$|\dot{x}| = \frac{|\dot{y}|}{\left| \frac{df}{dx} \right|} = \frac{\rho}{\left| \frac{df}{dx} \right|} < A \leq V_0. \quad (2.3.2)$$

სისტემის მოძრაობას E გარემოში, განსაზღვრული უტოლობით $A \left| \frac{df}{dx} \right| < \rho$, აქვს რხევითი ხასიათი და თანახმად I დანართისა შემავალი

სიდიდის საშუალო სიჩქარე ფასდება უტოლობით

$$|\dot{x}_{საშ.}| = A \frac{\left| \frac{df}{dx} \right|}{\rho} < A \leq V_0 \quad (2.3.3)$$

უშუალოდ (2.3.2.) და (2.3.3.)-ის შეპირისპირებით ჩანს, რომ მცდელობა დაჩქარდეს ძიების პროცესი დამკვეთი ზემოქმედების სიჩქარის ცვლილების ხარჯზე, არ მიგვიყვანს სასურველ შედეგებამდე. ამასთან

დაკავშირებით დგება ისეთი სისტემის აგების საკითხი, სადაც $\frac{df}{dx}$ სი-

დიდის პირდაპირი გაზომვის გარეშე თანაფარდობა $\rho / \frac{df}{dx}$ შენარჩუნდუ-

ბა V_0 -თან ახლოს. ასეთ სისტემაში უზრუნველყოფილი იქნება მონოტონური მოძრაობა ექსტრემუმისკენ სიჩქარით, რომელიც ახლოა მაქსიმალ-

ლურთან. ვიდრე აღწერილი იქნება სისტემა, რომელშიც იწარმოებს ნახევრები თვისებების რეალიზაცია, აღვნიშნოთ, რომ მოსრიალე რეჟიმში წყვეტილი მართვის საშუალო სიდიდე (2.3.3.) სისტემაში შეიცავს ინფორმაციას $\frac{df}{dx}$ სიდიდის შესახებ. ეს ფაქტი ნათელია შემდეგი მოსაზრებიდან: მოსრიალე რეჟიმში ობიექტის გამოსავალი სიდიდე კლებულობს მუდმივი სიჩქარით თანახმად $\dot{y} = -\rho$, ექსტრემალური მახასიათებლის გრადიენტის სიდიდე $\frac{df}{dx}$ იცვლება ამ მოძრაობის დროს, და მაშასადამე, მართვის საშუალო მნიშვნელობა ეწეობა ისეთნაირად, რომ შენარჩუნდეს \dot{y} კლების სიჩქარე მუდმივი. მართვის საშუალო სიდიდის $u_{საშ}$ გაზომვა შეიძლება ინერციული რგოლის დახმარებით

$$\tau \dot{u}_{საშ} + u_{საშ} = u \quad (2.3.4.)$$

სადაც τ დროის მცირე მუდმივაა. მაშინ თანახმად [47] მოცემული τ და არაიდეალურობისას სისტემები მიისწრაფვიან ნულისაკენ $u_{საშ} = u_{აშ}$, რომელიც წარმოადგენს განტოლების ამონახსნს

$$\dot{\sigma} = -\frac{df}{dx} u_{აშ} - \rho = 0 \quad (2.3.5.)$$

ე. ი. $u_{საშ} = -\rho / \frac{df}{dx}$.

გონივრულია თუ ამ ინფორმაციას გამოვიყენებთ ოპტიმიზაციის სისტემების აგებისას. იმისათვის რომ მივიღოთ სისტემა ზემოთ აღნიშნული თვისებებით, დავლოთ A სიდიდე ტოლი V_0 -ის, მხოლოდ დამკვეთი ზემოქმედება $g(t)$ კი (2.3.3.)-ის განსხვავებით ავირჩიოთ მართვის ფუნქციისგან დამოკიდებული შემდეგნაირად:

$$\dot{g} = -\rho = -\rho_0 \left(1 - \frac{u}{V_0} \text{sign} Z\right), \quad (2.3.6.)$$

$$\tau \dot{z} + z = \frac{u}{V_0},$$

სადაც $\rho_0 = \text{const}$, z ინერციული რგოლის გამოსავალი დროის მცირე მუდმივათი τ . II დანართში ნაჩვენებია, რომ $2\tau\rho_0 \text{Ln} 2 < \Delta$ დროს (2.3.3.), (2.2.7.) სისტემაში (2.3.6.) დამკვეთი ზემოქმედებით წარმოიშვება მოსრი-

აღე რეჟიმი, ობიექტის შესავალი სიდიდე x მონოტონურად უახლოვდება ექსტრემალურ მნიშვნელობას x_0 , თანაც ρ_0 -ის მისწრაფება უსასრულობისაკენ უზრუნველყოფს შესავალი სიდიდის ცვლილების მაქსიმალურ სიდიდეს. განხილული სისტემის სიზუსტე, განსხვავებული სისტემის სიზუსტისაგან, რომელშიც ობიექტის გამოსავალი სიდიდე მოსრიალე რეჟიმში კლებულობდა მუდმივი სიჩქარით, განისაზღვრება δ სიდიდით, რომელიც ტოლია σ_1 და σ_2 სიდიდეებს შორის სხვაობის. აღნიშნოთ, რომ ასეთივე შედეგებს აქვს ადგილი იმ შემთხვევაში, როდესაც სიდიდე ρ , რომელიც დამკვეთი ზემოქმედების სიჩქარის მახასიათებელია, (2.3.6.)-ისგან განსხვავებით ფორმირდება შემდეგი სახით

$$-\rho = -\rho_0(1-|z|). \quad (2.3.7.)$$

ამ შედეგების დასამტკიცებლად საჭიროა ვისარგებლოთ დანართი II-ის მსჯელობებით. მიღებულ შედეგს შეიძლება მიეცეს შემდეგი განმარტება: როდესაც მოსრიალე რეჟიმი არ არსებობს მართვის სიგნალი u ტოლია $-V_0$, ან $+V_0$ -ის, z -ის ნიშანი ემთხვევა u -ს ნიშანს, და შესაბამისად, დამკვეთი ზემოქმედების სიჩქარე თანახმად (2.3.6.) ტოლია ნულის. ეს ნიშნავს, რომ ექსტრემუმის გარეთ ნებისმიერ წერტილში სრულდება ერთ-ერთი უტოლობა მაინც $\sigma_1\dot{\sigma}_1 < 0$ ან $\sigma_2\dot{\sigma}_2 < 0$ და სისტემაში ყოველთვის აღიძვრება მოსრიალე რეჟიმი. ინერციული რგოლი გაფილტრავს მართვის ფუნქციის მაღალსიხშირულ მდგენელს და მისი გამოსავალი სიდიდე z ტოლი იქნება მართვის საშუალო სიდიდის $u_{საშ}$, მოთავსებულს $-V_0$ და V_0 . მოძრაობა მოსრიალე რეჟიმში განსაზღვრული იქნება მართვის ამ საშუალო სიდიდით, ამიტომ დამკვეთი ზემოქმედების სიჩქარე ტოლი იქნება

$$\dot{g} = -\rho = -\rho_0 \left(1 - \frac{|u_{საშ}|}{V_0} \right). \quad (2.3.8.)$$

ასეთ შემთხვევაში, მოსრიალე რეჟიმს ადგილი ექნება ρ_0 -ის ნებისმიერი მნიშვნელობის დროს.

მმართველი ზემოქმედების u შეზღუდვის თანახმად ობიექტის გამოსავალი სიდიდე y შეიძლება მიჰყვეს სიჩქარით შეზღუდულ დამკვეთ ზემოქმედებას, განსაზღვრულს ρ სიდიდით. ეს ნიშნავს, რომ

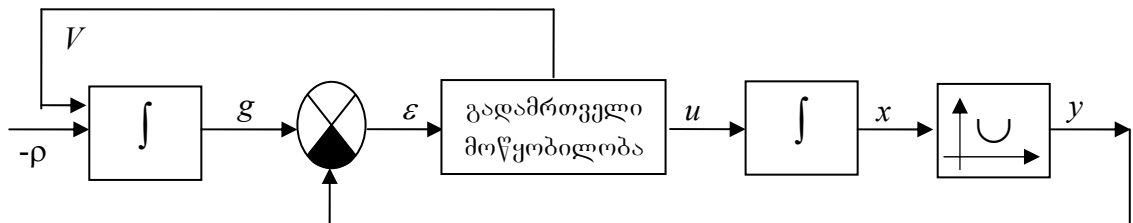
ρ_0 -ის მისწრაფებისას უსასრულობისაკენ $|\mu_{საშ}|$ მიისწრაფის V_0 -სკენ, ე. ი. დასაშვებ ზღვარში ობიექტის შესავალი სიდიდე x იცვლება მაქსიმალური სიჩქარით.

და ბოლოს, (2.2.3.), (2.2.7.) და (2.3.6.) ალგორითმების საფუძველზე დამუშავებულია სხვადასხვა სახის ოპტიმიზატორები [51, 52, 53, 54, 55, 56], რომლებიც დაწვრილებით აღწერილია თავი V-ში.

2.4. არასტაციონარული ობიექტის ოპტიმიზაცია მოსრიალე რეჟიმების გამოყენებით

ექსტრემალური წერტილის ავტომატური მოძებნის ამოცანა რთულდება იმ შემთხვევაში, როდესაც ამ წერტილის კოორდინატები და ობიექტის არაწრფივი მახასიათებლის სახე იცვლება დროში. ამასთან დაკავშირებით საინტერესოა გამოვიკვლიოთ რამდენად შეინარჩუნებს ასეთი ობიექტისათვის მოსრიალე რეჟიმში ექსტრემუმის ძიების იმ მიზიდველ თვისებებს, რომლებსაც ადგილი აქვთ სტაციონარული ერთექსტრემუმიანი სტატიკური ობიექტის ოპტიმიზაციის შემთხვევაში.

მოსრიალე რეჟიმებზე სისტემის ოპტიმიზაციის სტრუქტურული სქემას, თანახმად [57] აქვს შემდეგი სახე, გამოსახული ნახ. 2.4.1.



ნახ. 2.4.1.

და სისტემაში მოძრაობა აღიწერება შემდეგი განტოლებებით:

$$\begin{aligned} y &= f(x), \quad \dot{x} = u, \quad u = V_0 \text{sign}(\sigma_1 \sigma_2) \\ \varepsilon &= g - y, \quad \sigma_1 = \varepsilon, \quad \sigma_2 = \sigma_1 + \delta, \quad \dot{g} = -\rho + v, \end{aligned} \quad (2.4.1)$$

სადაც x და y შესაბამისად ოპტიმიზაციის ობიექტის შესავალი და გამოსავალი კოორდინატებია. $g(t)$ – დამკვეთი ზემოქმედება, რომელიც ფორმირდება მონოტონურად კლებადი (ზრდადი) დროის ფუნქციის სახით; ε – განუთანხმოება ექსტრემუმის ძიების დროს y სიდიდესა და $g(t)$ შორის; ρ, V_0, δ – დადებითი მუდმივი სიდიდეებია, V – დამხ-

მარე მართვას, რომელიც ფორმირდება სამპოზიციურ პოლარიზებულ ელემენტზე და აქვს შემდეგი სახე:

$$V = \begin{cases} -M & \text{როცა } \sigma_1 - \Delta > 0, \quad \sigma_2 > 0, \\ 0 & \text{როცა } (\sigma_1 + \Delta)(\sigma_2 - \Delta) < 0, \\ +M & \text{როცა } \sigma_1 < 0, \quad \sigma_2 + \Delta < 0. \end{cases} \quad (2.4.2)$$

(2.4.2.)-ში 2Δ პისტერეზისული მარყუქის სიგანეა. $|\sigma_1| < 0$ და $|\sigma_2| < 0$ ინტერვალში V მართვა შეინარჩუნებს იმ მნიშვნელობებს $(-M, 0, +M)$, რომელიც მას ჰქონდა გამომსახველი წერტილის მოხვედრამდე ამ ინტერვალში. იგულისხმება, რომ $\frac{df}{dx}$ სიდიდის ცვლილებების მთელ ინტერვალში $M \gg \rho + \frac{df}{dx} V_0$. როგორც ნახვენებია [48, 49], ასეთ სისტემაში

$$V_0 \left| \frac{df}{dx} \right| > \rho \quad (2.4.3)$$

პირობების შემთხვევაში ყოველთვის უზრუნველყოფილია მოსრიალე რეჟიმში ოპტიმიზაციის ობიექტის გამოსავალი y სიდიდის მიყოლა მონოტონურად კლებადი დამკვეთი ზემოქმედების, რაც იძლევა საშუალებას y სიდიდემ მიაღწიოს ექსტრემუმის მიდამოში. დამკვეთი ზემოქმედების $g(t)$ შემცირების სიჩქარის ფორმირების სხვადასხვა მეთოდები იძლევიან საშუალებას ძიების გარდამავალი პროცესი აღიჭურვოს სასურველი თვისებებით. ასე მაგალითად, როდესაც $\rho = const$, უზრუნველყოფილია ექსტრემუმის მოძებნა თანაბარი სიჩქარით, მაგრამ როდესაც

$$\rho = \rho_0(1 - |u_{საშ}|), \quad \rho_0 const > 0, \quad (2.4.4)$$

სადაც $u_{საშ}$ არის ინერციული ფილტრის გამოსავალი სიდიდე დროის მცირე მუდმივით τ

$$\tau \dot{u}_{საშ} + u_{საშ} = \frac{u}{V_0} \quad (2.4.5)$$

ρ_0 პარამეტრით, რომელიც მიისწრაფვის უსასრულობისაკენ, $|u_{საშ}|$ მიისწრაფვის V_0 -საკენ, სისტემაში უზრუნველყოფილი იქნება ექსტრემუმის ძიების მაქსიმალური სიჩქარე [58, 59].

გამოვიკვლიოთ ახლა (2.4.1), (2.4.2) სისტემის შესაძლებლობები (2.4.4.) და (2.4.5.) დამკვეთი ზემოქმედებით არასტაციონარული ობიექტის ოპტიმიზაციის ამოცანის გადასაწყვეტად, რომელიც აღიწერება შემდეგი განტოლებით

$$y = f(x, t), \quad (2.4.6)$$

იმ პირობით, რომ დროის ნებისმიერ მომენტში ობიექტის მახასიათებელს გააჩნია ერთადერთი ექსტრემუმი x_0 და y_0 წერტილში, $\frac{df}{dx}$ სიდიდე კი შეზღუდულია x და t -ს ნებისმიერი მნიშვნელობისათვის.

(2.4.6.) სისტემის გამოკვლევამდე აღვნიშნოთ, რომ სისტემაში ძიების სიზუსტეზე საგრძნობლად მოქმედებს დინამიკური ცდომილება, რომელიც წარმოიქმნება ობიექტის მახასიათებლის დრეიფის დროს. დინამიკური ცდომილების შესამცირებლად აუცილებელია, როგორც წესი, ძიების სიჩქარის გაზრდა, რომლის გაზრდითაც სულ უფრო და უფრო თავს იჩენს ობიექტის დინამიკური მახასიათებლის თვისებები და საერთო ცდომილება შეიძლება გაიზარდოს კიდევ [26, 60]. ჩვენ აქ არ განვიხილავთ ასეთი ამოცანების გადაწყვეტის სხვადასხვა მეთოდებს, რომლებიც საკმაოდ დაწვრილებით არის განხილული ლიტერატურაში [7, 50]. შემოვიფარგლებით მხოლოდ (2.4.6.) ობიექტის ოპტიმიზაციის დროს (2.4.1.) სისტემის ალგორითმების განხილვით (2.4.4.) და (2.4.5.) დამკვეთი ზემოქმედებით. არასტაციონარულობის ორი კერძო შემთხვევისათვის: y_0 ექსტრემალური მნიშვნელობის დრეიფის და x_0 ექსტრემალური წერტილის დრეიფის დროს. შევნიშნოთ, რომ y_0 სიდიდის ცვლილების სიჩქარე არ აღემატება $\frac{df}{dx}$ სიდიდის მაქსიმალურ მნიშვნელობას. მართლაც

$$\dot{y} = \frac{df}{dx}(x, t)\dot{x} + \frac{df}{dt}(x, t), \quad (2.4.7)$$

$$\text{ან} \quad \frac{df}{dx}(x_0, t) = 0, \quad (2.4.8)$$

პირობის გათვალისწინებით, მივიღებთ:

$$|\dot{y}_0| = \left| \frac{df}{dt}(x_0, t) \right| \leq \max_{x, t} \left| \frac{df}{dt} \right|. \quad (2.4.9)$$

ექსტრემუმის ძიება ხორციელდება მოსრიალე რეჟიმში, რომლის დროსაც ობიექტის გამოსავალი სიდიდე y მიჰყვება დამკვეთ ზემოქმედებას $g(t)$, რომელიც მონოტონურად მცირდება ρ სიჩქარით. როგორც ჩანს, იმისათვის, რომ დამკვეთ ზემოქმედებას შეეძლოს „დაწვევა“ ექსტრემუმის წერტილისათვის, რომელიც იცვლის თავის მდებარეობას, საჭიროა შესრულდეს პირობა

$$\rho > \frac{df}{dt}. \quad (2.4.10.)$$

მეორე შემთხვევაში, იმისათვის რომ x კოორდინატს შეეძლოს „დაწვევა“ ექსტრემალური $x_0(t)$ წერტილისათვის უნდა შესრულდეს თანაფარდობა

$$\max|\dot{x}| = V_0 > |\dot{x}_0(t)|. \quad (2.4.11.)$$

(2.4.6.) სახის არასტაციონარული ობიექტის ოპტიმიზაციის დროს (2.4.1.) ალგორითმის თვისებების გამოყენების მიზნით, რომლის დროსაც დამკვეთი ზემოქმედება იცვლება მუდმივი სიჩქარით, განვიხილოთ სისტემის მოძრაობის განტოლება ε განუთანხმოების მიმართ, რომელიც ამ შემთხვევაში მიიღებს სახეს:

$$\dot{\varepsilon} = -\rho - \frac{df}{dx}u - \frac{df}{dt}. \quad (2.4.12.)$$

შემოვიტანოთ დამკვეთი ზემოქმედების „ექვივალენტური“ სიჩქარე:

$$-\rho^* = -\rho - \frac{df}{dt} \quad (2.4.13.)$$

თუ გავითვალისწინებთ (2.4.13.)-ს განტოლება (2.4.12.) გადაიწერება შემდეგი სახით:

$$\dot{\varepsilon} = -\rho^* - \frac{df}{dx}u, \quad (2.4.14.)$$

$$\rho^* > 0. \quad (2.4.15.)$$

(2.4.15.) პირობის შესრულების შემთხვევაში (2.4.1.) ალგორითმი მიისწრაფის ექსტრემუმისაკენ, თანაც იძლევა სიზუსტის გარანტიას არაუარესი Δ პისტერეზისული მარყუჟის ნახევარსიგანისა. (2.4.15) პირობის დარღვევის შემთხვევაში, სისტემას არ შეუძლია „დაეწიოს“ ექსტრემუმის წერტილს, რომელიც იცვლის თავის მდგომარეობას.

განვიხილოთ ახლა (2.4.1), (2.4.4.) და (2.4.5.) სისტემის ძიების ალგორითმების თანხვედრის და სიზუსტის საკითხი. ამ შემთხვევაში $\dot{\epsilon}$ გამოსახულება, როცა $\sigma_1\sigma_2 < 0$ მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\dot{\epsilon} = -\rho_0(1 - |u_{\text{საშ}}|) - \frac{df}{dx} V_0 \text{sign}(\sigma_1\sigma_2) - \frac{df}{dt}. \quad (2.4.16.)$$

ამ გამოსახულებიდან ჩანს, რომ უტოლობა

$$\left| \frac{df}{dx} \right| V_0 > \left| \frac{df}{dt} \right|, \quad (2.4.17.)$$

წარმოადგენს ზოგადად მოსრიალე რეჟიმების არსებობის პირობას. იგი განსაზღვრავს სისტემის ძიების სიზუსტეს არასტაციონარულობის პირობებში.

განვიხილოთ არასტაციონარულობის კერძო შემთხვევები, შემოვიფარგლოთ (2.4.1), (2.4.4.) და (2.4.5.) სისტემის გამოკვლევით. დავუშვათ, რომ ობიექტის მახასიათებელი წარმოდგენილია შემდეგი სახით:

$$f(x, t) = f[x - h(t)] + r(t), \quad (2.4.18.)$$

მაშინ გამოსახულება (2.4.16.) მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\dot{\epsilon} = -\rho_0(1 - |u_{\text{საშ}}|) - \frac{df}{dx} \left[V_0 \text{sign}(\sigma_1\sigma_2) - \dot{h} \right] - \dot{r}, \quad (2.4.19)$$

უტოლობის შესრულების შემთხვევაში

$$\left| \frac{df}{dx} \right| V_0 > \left| \frac{df}{dx} \dot{h} - \dot{r} \right|, \quad (2.4.20.)$$

სისტემაში არსებობს მოსრიალე რეჟიმი და ობიექტის გამოსავალი y სიდიდე. მცირდება შემდეგი განტოლების შესაბამისად:

$$\dot{y} = -\rho_0 \left[1 - \frac{\rho_0 + \dot{r} - \frac{df}{dx} \dot{h}}{\rho_0 + V_0 \left| \frac{df}{dx} \right|} \right]. \quad (2.4.21.)$$

ექსტრემუმის მიდამოებში (2.4.20.) პირობა ირღვევა და შეიძლება ვაჩვენოთ, რომ $V_0 > |\dot{h}|$, $|\dot{r}| > 0$ შემთხვევაში σ_2 მიდამოებში მყარდება რხევითი რეჟიმი [45], რომლის დროსაც ობიექტის გამოსავალი სიდიდე „მცირდება“ ექსტრემუმამდე, ამ დროს სისტემის ძიების სიზუსტე განისაზღვრება δ სიდიდით, რომელიც ტოლია $\delta = \sigma_2 - \sigma_1$. თუ $\dot{r} < 0$, მაშინ

სისტემა შორდება ექსტრემუმს მანამდის, ვიდრე არ შესრულდება (2.4.20.) უტოლობა, რომელიც განსაზღვრავს ექსტრემუმის დრეიფის მიყოლის დინამიკურ ცდომილებას.

ზემოთ ჩამოყალიბებულიდან შეიძლება გავაკეთოთ დასკვნა, რომ (2.4.1), და (2.4.4.) და (2.4.5.) ალგორითმების გამოყენებას დამკვეთი ზემოქმედების როგორც მუდმივი, ისე ცვლადი სიჩქარის დროს, მიყვარვართ ანალოგიურ შედეგებამდე.

ობიექტის მახასიათებლის არეში სისტემა მოძებნის ექსტრემუმს, რომელშიც შეიძლება წარმოიშვას სისტემის რხევები, და არასტაციონარულობის ზოგად შემთხვევაში, უტოლობა განსაზღვრულია შემდეგი გამოსახულებით:

$$\left| \frac{df}{dx} \right| V_0 \leq \left| \frac{df}{dt} \right| \quad (2.4.22.)$$

კერძო შემთხვევაში, როცა (2.4.6.) მახასიათებელი შეიძლება წარმოდგენილ იქნას (2.4.18.)-ის სახით როცა $\dot{r} > 0$, თუ $V_0 > |\dot{h}|$, მაშინ ძიების შეცდომის სიდიდე არ აღემატება δ -ს სხვაობას ორ σ_2 და σ_1 სიდიდეებს შორის, მაგრამ როცა $\dot{r} < 0$ ძიების სიზუსტე განისაზღვრება უტოლობით (2.4.22.), რომელიც ამ შემთხვევისათვის მიიღებს სახეს:

$$\left| \frac{df}{dx} \right| V_0 \leq \left| \dot{r} - \frac{df}{dx} \dot{h} \right|. \quad (2.4.23.)$$

როგორც მოყვანილი თანაფარდობიდან გამომდინარეობს (2.4.1), (2.4.4.) და (2.4.5.) ალგორითმები ჩამორჩება სიზუსტით (2.4.1.) ალგორითმს მუდმივი სიჩქარის მქონე დამკვეთი ზემოქმედებით, მაგრამ უკეთესია სწრაფმოქმედებით, რომელიც შეიძლება მიახლოებულ იქნას გარკვეულ ზღვრამდე ρ_0 პარამეტრის გაზრდის ხარჯზე.

2.5. მრავალქსტრემუმიანი ობიექტების ოპტიმიზაცია

ობიექტის ოპტიმიზაციის ამოცანის გადაწყვეტის დროს შეიძლება აღმოჩნდეს, რომ ობიექტის ექსტრემალურ მახასიათებელს ჰქონდეს რამოდენიმე ლოკალური ექსტრემუმი, და მინიმალური მნიშვნელობა, რომელიც უნდა განისაზღვროს, მიიღწევა ერთ-ერთ მათგანს შორის. ამ შემთხვევაში ზემოთ აღწერილი ალგორითმები უზრუნველყოფენ ამათ-

გან ერთ-ერთი ლოკალური ექსტრემუმის ძიებას. ამოცანის ასეთი დაყენების შემთხვევაში ობიექტის ოპტიმიზაციის ამოცანის გადასაწყვეტად არსებობს მრავალი მეთოდი, რომლებიც ხშირ შემთხვევაში ემყარება სამ მეთოდს: მეთოდს, დამყარებულის სკანირებაზე, ე. ი. სისტემის ყველა შესაძლო მდგომარეობის მიმდევრობით გადარჩევით და მინიმუმებს შორის მინიმალური კოორდინატის დამახსოვრებით [18, 61]; მეთოდს, დამყარებულს მართვის კანონში შემთხვევითი ელემენტის გამოყენების შესაძლებლობაზე [62, 63]; და ბოლოს – ამ მეთოდების შეთავაზებას ლოკალური ძიების რომელიმე მეთოდთან [18, 64]. განსაზღვრულ დადებით თვისებებთან ერთად, ამ მეთოდებს გააჩნიათ სერიოზული ნაკლოვანებები. სკანირების მეთოდისათვის ისინი დაკავშირებული არიან დროის დიდი დანაკარგებით, ძიების შემთხვევითი მეთოდი კი გამოიყენება სტაციონარული ობიექტების ოპტიმიზაციის დროს, ამ შემთხვევაში ეს მეთოდი არის ეფექტური [18, 65].

ასეთი ამოცანის გადაწყვეტის კიდევ ერთი საინტერესო შესაძლებლობა ემყარება „მძიმე ბურთულას“ მეთოდს [66, 67]. ამ მეთოდის საფუძველში ჩადებულია ანალოგია მატერიალური სხეულის მოძრაობის, ჩამოსრიალებულს ხახუნით შეღუნული ფიალის შიგა ზედაპირზე და მოძრაობებს ოპტიმიზაციის სისტემებში, რომლის მოქმედება აღიწერება განტოლებით:

$$\ddot{x} + 2R\dot{x} + gzadf = 0. \quad (2.5.1)$$

კვადრატული ობიექტის შემთხვევისათვის მახასიათებლით

$$y = y_0 + \frac{1}{2}k(x - x_0)^2. \quad (2.5.2)$$

მოძრაობა სისტემაში სრულდება შესაბამისად განტოლებისა, ჩაწერილი x კოორდინატის გადახრით ექსტრემალური წერტილის x_0 -ის მიმართ:

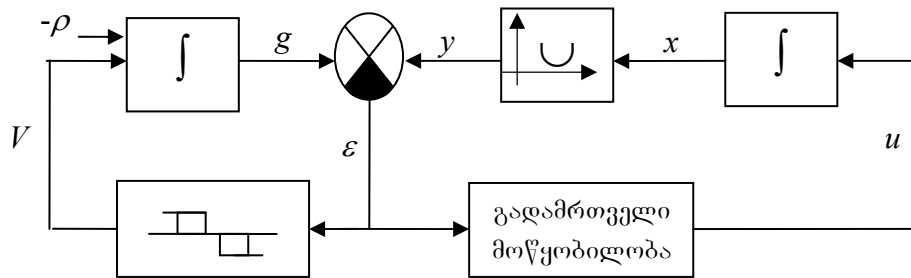
$$\Delta\ddot{x} + 2R\Delta\dot{x} + k\Delta x = 0, \quad (2.5.3)$$

სადაც სიდიდე R არჩეულია პირობიდან $k - R^2 > 0$. (2.5.3) ალგორითმის ძიების არალოკალური ხასიათი განპირობებულია ექსტრემალური წერტილის მიდამოში სისტემის რხევით ქმედებასთან, რომლის ხარჯზე სისტემა ადვილად გადალახავს ნაკლებადღრმა ლოკალურ მინიმუმებს. თუ პირველი ლოკალური მინიმუმის სიღრმე არ აღემატება y კოორდი-

ნატის სიდიდის მაქსიმალურ ზრდას, მაშინ (2.5.3) სისტემა „გაძვრება“ ამ მინიმუმს და დაიწყება შემდეგი მინიმუმის ძიება.

მსგავსი თვისებებით შეიძლება შეექმნათ ალგორითმები, განხილული ამ ნაშრომში, თუ დამკვეთი ზემოქმედების ცვლილების კანონის შესაბამისი შერჩევით უზრუნველყოფთ რხევის კრებადობას ექსტრემუმისკენ [68].

მოსრიალე რეჟიმში სისტემის ოპტიმიზაციის სტრუქტურული სქემა ნაჩვენებია ნახ. 2.5.1.



ნახ. 2.5.1.

და მოძრაობა მასში აღწერილია განტოლებით (2.4.1).

მრავალექსტრემუმიანი ობიექტებისათვის (2.4.1) სისტემის გამოყენება შეიძლება იმ შემთხვევაში თუ დამკვეთ ზემოქმედებას ავირჩევთ შემდეგი სახის:

$$\dot{g} = \dot{g}_1 + \dot{g}_2, \quad (2.5.4)$$

სადაც \dot{g}_1 განისაზღვრება გამოსახულებით

$$\dot{g}_1 = \rho_0(1 - |u_{\text{ბსმ}}|), \quad (2.5.5)$$

$u_{\text{ბსმ}}$ კი განისაზღვრება განტოლებით:

$$\pi i_{\text{ბსმ}} + u_{\text{ბსმ}} = \frac{u}{V_0}, \quad (2.5.6)$$

\dot{g}_2 – კი ფორმირდება შემდეგი გამოსახულებით:

$$\dot{g}_2(t) = -\alpha \dot{g}_1(t - T) \frac{u}{V_0} \text{sign } u_{\text{ბსმ}}, \quad (2.5.7)$$

სადაც α და T დადებითი სიდიდეებია, $0 < \alpha < \frac{1}{2}$.

ექსტრემუმის მიდამოებში ძიების რხევითი რეჟიმი დაკავშირებულია (2.5.4) გამოსახულების მეორე შესაკრებში არსებული დაგვიანების

არსებობით, განპირობებული იმ ფაქტით, რომ მოსრიალე რეჟიმში ექსტრემუმის წერტილში მიღწევის შემდეგ, მოსრიალე რეჟიმი არ წყდება, ჯამი $g_1 + g_2$ ხდება დადებითი და $g(t)$ იწყებს ზრდას. ობიექტის გამოსავალი სიდიდე y მოსრიალე რეჟიმში ტოლია $g(t)$ ან $g(t) + \delta$, და შესაბამისად იზრდება, რაც აძლევს საშუალებას სისტემას „გაძვრეს“ ნაკლებად დრმა ექსტრემუმებს.

ვაჩვენოთ, რომ სისტემაში (2.4.1). (2.5.4.) და (2.5.7.) ყოველთვის აღიძვრება მოსრიალე რეჟიმი. ნამდვილად, ნებისმიერი საწყისი პირობებისას V ზემოქმედება უზრუნველყოფს სისტემაში $\sigma_1 \cdot \sigma_2 > 0$ პირობას და შემდგომში სისტემაში მოძრაობა ხორციელდება თანახმად განტოლებისა:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= -\rho (1 - |u_{\text{ბაჭ}}|) - \alpha g_1(t-T) \text{sign}(\sigma_1 \sigma_2) \text{sign} u_{\text{ბაჭ}} - \frac{df}{dx} V_0 \text{sign}(\sigma_1 \sigma_2); \\ \tau \dot{u}_{\text{ბაჭ}} + u_{\text{ბაჭ}} &= \text{sign}(\sigma_1 \sigma_2). \end{aligned} \quad (2.5.8.)$$

შემოვიზღუდოთ იმ შემთხვევის გარჩევით, როცა $\frac{df}{dx} > 0$, მაშინ თანახმად II დანართის შედეგებისა $2\rho\tau Ln 2 < \Delta$ პირობის შესრულების დროს (2.5.8.) გამოსახულებაში პირველი შესაკრები შეიძლება უგულებელვყოთ, $\text{sign} u_{\text{ბაჭ}} = -1$, და მაშინ (2.5.8.) განტოლება გადაიწერება შემდეგი სახით:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\sigma}_1 = \alpha \rho_0 (1 - |u_{\text{ბაჭ}}(t-T)|) \text{sign} \sigma_1 - \frac{df}{dx} V_0 \text{sign} \sigma_1, \quad (2.5.9.)$$

საიდანაც $\alpha g_1(t-T) \leq 0$ -ის გათვალისწინებით ჩანს, რომ $\sigma_1 = 0$ -ზე აღიძვრება მოსრიალე რეჟიმი. დავუშვათ, რომ პარამეტრები α , T შერჩეულია ისეთნაირად, რომ მოსრიალე რეჟიმში ექსტრემალური წერტილისკენ მოძრაობისას სრულდება უტოლობა

$$-\rho_0(1 - |u_{\text{ბაჭ}}|) + \alpha \rho_0 (1 - |u_{\text{ბაჭ}}(t-T)|) \cdot |u_{\text{ბაჭ}}| \leq 0, \quad (2.5.10.)$$

მაშინ ობიექტის გამოსავალი სიდიდე y მონოტონურად მცირდება მინიმუმისაკენ. თუ ექსტრემუმის მიღწევის დრო მეტია T -ზე, მაშინ ექსტრემალურ წერტილში მოსრიალე რეჟიმი არ წყდება. ეს ფაქტი გამომდინარეობს დამკვეთი ზემოქმედების სიჩქარის ტოლობიდან ნულთან ექსტრემუმის წერტილში, ე. ი. ტოლობა

$$-\rho_0 (1 - |u_{\text{საშ}}|) + \alpha \rho_0 (1 - |u_{\text{საშ}}(t-T)|) \cdot |u_{\text{საშ}}| = 0, \quad (2.5.11.)$$

და გამოსახულება (2.5.8.), რომელშიც უნდა ვივარაუდოთ რომ $\frac{df}{dx} = 0$.

ამგვარად, სისტემა მოსრიალე რეჟიმში „გაივლის“ ექსტრემუმის წერტილს და ობიექტის გამოსავალი გაიზრდება, იცვლება რა თანახმად განტოლებისა, რომელიც მიღებულია [40] აღწერილი მეთოდის მიხედვით.

$$\dot{y} = \left| \frac{df}{dx} \right| V_0 \frac{\rho_0}{\rho_0 - \alpha \dot{g}_1(t-T) - V_0 \left| \frac{df}{dx} \right|} \quad (2.5.12.)$$

y სიდიდის ზრდა წყდება მოსრიალე რეჟიმის შეწყვეტის დროს, ე. ი. პირობის შესრულებისას

$$\left| \frac{df}{dx} \right| V_0 = \alpha \rho_0 (1 - |u_{\text{საშ}}(t-T)|), \quad (2.5.13.)$$

რომელიც მიღებულია (2.5.8.)-დან, როცა $|u_{\text{საშ}}| = 1$.

ამ უტოლობით შეიძლება ვისარგებლოთ „სიდრმის“ ლოკალური ექსტრემუმის შესაფასებლად, რომლებიც შეუძლია „გააღწიოს“ სისტემამ, მაგრამ ამისათვის აუცილებელია ვიცოდეთ სიდიდე $|u_{\text{საშ}}(t-T)|$, რომელიც გამოთვლაც ძნელი არ არის, თუ გვეცოდინება ექსტრემალური მახასიათებლის სახის რაიმე ვარაუდი.

მოსრიალე რეჟიმის $\sigma_1 = 0$ -ზე შეწყვეტის შემდეგ ის კვლავ აღიჭვრება $\sigma_2 = 0$ -ზე. შემდგომი მოძრაობის დროს y სიდიდე ეცემა ექსტრემუმამდე და სისტემაში მყარდება რხევები. ვაჩვენოთ რომ ისინი მიიღევა. ვივარაუდოთ, რომ სიდიდეები δ , Δ , და τ იმდენად მცირეა, რომ პროცესი, რომელიც დაკავშირებულია გამომსახველი წერტილის ერთი მოსრიალე სიბრტყიდან მეორეში გადასვლასთან, შეიძლება უგულებელვყოთ, ე. ი. შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ მოსრიალე რეჟიმის ჩაშლის შემდეგ ერთ სიბრტყეში, ის მომენტალურად წარმოიქმნება მეორე სიბრტყეში, მაშინ (2.5.13.)-ში $|u_{\text{საშ}}|$ მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$|u_{\text{საშ}}| = \frac{\rho_0}{\rho_0 - \alpha \dot{g}_1(t-T) + V_0 \left| \frac{df}{dx} \right|}. \quad (2.5.14.)$$

(2.5.13.) და (2.5.14.)-დან ადვილად შეიძლება მივიღოთ:

$$\frac{1 - |u_{\text{ბაშ}}|}{1 - |u_{\text{ბაშ}}|(t-T)} = \frac{2 \alpha \rho_0}{\rho_0 + 2 V_0 \left| \frac{df}{dx} \right|}. \quad (2.5.15.)$$

ვივარაუდოთ ახლა, რომ $f(x)$ ფუნქცია მკაცრად ამოზნექილია ქვევით, განვიხილოთ სისტემის მდგომარეობა დროის $0, T, 2T, \dots, NT$ მომენტებში, სადაც ათვლის დასაწყისი ემთხვევა მოსრიდელ რეჟიმის პირველი ჩაშლის დროს. დროის შემდგომი ორი მომენტისათვის სამართლიანია უტოლობა:

$$\frac{1 - |u_{\text{ბაშ}}|_{(N+1)T}}{1 - |u_{\text{ბაშ}}|_{NT}} \leq \frac{2 \alpha \rho_0}{\rho_0 + 2 V_0 \left| \frac{df}{dx} \right|_{(N+1)T}} \quad (2.5.16.)$$

(2.5.16.)-ის გამოყენებისას გათვალისწინებულია $\frac{df}{dx}$ მონოტონურობა და ის ფაქტი, რომ $\frac{df}{dx}$ -ის დიდ მნიშვნელობას შეესაბამება $(1 - |u_{\text{ბაშ}}|)$ -ს დიდი მნიშვნელობა. (2.5.16.) უტოლობა შეიძლება გადავწეროთ შემდეგი სახით:

$$\left| \frac{df}{dx} \right|_{(N+1)T} \leq \frac{2 \alpha \rho_0}{\rho_0 + 2 V_0 \left| \frac{df}{dx} \right|_{(N+1)T}} \cdot \left| \frac{df}{dx} \right|_{NT}. \quad (2.5.17.)$$

ვინაიდან $\left| \frac{df}{dx} \right|(t) \leq \left| \frac{df}{dx} \right|_{NT}$, როცა, $t \gg NT$, მაშინ, როცა $\alpha < \frac{1}{2}$, (2.5.17)-

დან გამომდინარეობს, რომ $\left| \frac{df}{dx} \right|$ მიისწრაფის ნულისკენ. ეს კი ნიშნავს, რომ რხევები სისტემაში მიიღევა.

ამ რხევების დროს, ექსტრემალური მახასიათებლის გრადიენტების სიდიდეები, რხევების მაქსიმუმის ორი მომდევნო წერტილისათვის, აკმაყოფილებენ უტოლობას

$$\left| \frac{df}{dx} \right|_{N+1} \leq \frac{2 \alpha \rho_0}{\rho_0 + 2 V_0 \left| \frac{df}{dx} \right|_{N+1}} \cdot \left| \frac{df}{dx} \right|_N. \quad (2.5.18.)$$

მაშინ, როცა $\alpha > \frac{1}{2}$ ეს რხევები მიიღევა, (2.5.18.) თანაფარდობა შეიძლება გამოყენებულ იქნას რხევების მიღევის სიჩქარის შესაფასებლად. იმ შემთხვევაში, თუ ექსტრემუმი არის ლოკალური მინიმუმის წერტილი და თუ მრუდის მონაკვეთზე ამ მინიმუმსა და შემდგომ მაქსიმუმს შორის $\frac{df}{dx}$ სიდიდე არ აღემატება სიდიდეს, გამოთვლილს (2.5.18.)-ის საშუალებით, მაშინ ისე როგორც „მძიმე ბურთულას“ მეთოდის დროს, სარეგულირებელი კოორდინატი აღწევს ამ მაქსიმუმს და სისტემაში იწარმოებს შემდეგი მინიმუმის მოძებნა.

რა თქმა უნდა, არც შემოთავაზებული მეთოდი, არც „მძიმე ბურთულას“ მეთოდი არ იძლევიან გლობალური მინიმუმის მოძებნის გარანტიას. ეს მეთოდები შეიძლება აღმოჩნდნენ ეფექტურები იმ შემთხვევაში, როცა ექსტრემალურ მახასიათებელს გააჩნია მკაფიოდ გამოხატული გლობალური მინიმუმი და რამოდენიმე ნაკლებად დრმა ლოკალური ექსტრემუმი.

არსებითი განსხვავება ნაშრომში შემოთავაზებულ მეთოდსა და „მძიმე ბურთულას“ მეთოდს შორის მდგომარეობს იმაში, რომ მისი რეალიზაციისათვის არ საჭიროებს ინფორმაციას $\frac{df}{dx}$ -ის შესახებ, მაშინ როდესაც მეორე მეთოდისთვის ეს ინფორმაცია აუცილებელია.

2.6. დასკვნა

დასკვნაში მიზანშეწონილია აღინიშნოს ექსტრემუმის ძიების აღწერილი სისტემის განსხვავება სხვა ფართოდ გავრცელებული ოპტიმიზაციის რელეური სისტემებისაგან (საკმაოდ დაწვრილებით ეს სისტემები აღწერილია [65]-ში).

ჩვეულებრივად რელეურ ექსტრემალურ სისტემებში სწარმოებს ექსტრემალური მახასიათებლების წარმოებულების გაზომვა, რომლებიც განსაზღვრავენ ექსტრემუმისაკენ მოძრაობის მიმართულებას, და თვითონ მოძრაობის ორგანიზება სწარმოებს რელეურ ზემოქმედების დახმარებით, ჩამოყალიბებული ამ ინფორმაციის საფუძველზე. გაზომვის აუცილებლობა დაკავშირებულია სისტემაში მადიფერენცირებელი მოწყო-

ბილობის შეყვანით, ან მოწყობილობის საცდელი ზემოქმედებისათვის და ობიექტის შესასვლელზე და გასასვლელზე რეაქციის ანალიზით.

წარმოდგენილ ნაშრომში ოპტიმიზაციის ამოცანის გადასაწყვეტად დამუშავებულია სისტემის აწყობის პრინციპი, რომელსაც შეუძლია მართოს ობიექტი ნიშანცვლადი და გაძლიერების უცნობი კოეფიციენტით (ამ კოეფიციენტის როლს ასრულებს ექსტრემალური მახასიათებლის წარმოებული), და შემდგომ ასეთი სისტემის დახმარებით ობიექტის გამოსავალი სიდიდე მცირდება მინიმალურ მნიშვნელობამდე.

ასეთი მიდგომა იძლევა საშუალებას უარი ვთქვათ ობიექტის რაიმე მახასიათებლის გაზომვისგან და თავიდან ავიცილოთ რხევები, გამოწვეული საცდელი სიგნალებისაგან. რა თქმა უნდა, მაღალსიხშირული რხევები მოსრიალე რეჟიმის დროს არ შეიძლება განვიხილოთ როგორც საცდელი, რადგანაც იგი განპირობებულია იმით, რომ გადამრთველი ელემენტების რეალიზაცია არ არის იდეალური, მაშინ, როცა წყვეტილ-წრფივი მახასიათებლის დახმარებით მართვის რეალიზაციის დროს (ნახ. 2.2. 3ბ) ეს რხევები საერთოდ არ არსებობენ.

ზემოთ ჩამოყალიბებულიდან შეიძლება გავაკეთოთ დასკვნა, რომ (2.4.1.), (2.4.4.) და (2.4.5.) ალგორითმების გამოყენებისას დამკვეთი ზემოქმედების როგორც მუდმივი, ისე ცვლადი სიჩქარის დროს, მიყვავართ ანალოგიურ შედეგებამდე, თუმცა (2.4.4.) და (2.4.5.) ალგორითმები ჩამორჩება სიზუსტით (2.4.1.) ალგორითმს მუდმივი სიჩქარის მქონე დამკვეთი ზემოქმედებით, მაგრამ უკეთესია სწრაფმოქმედებით, რომელიც შეიძლება მიღწეულ იქნას გარკვეულ ზღვრამდე ρ_0 სიდიდის გაზრდით.

თავი 3. ოპტიმიზაციის ალგორითმები უწყვეტი მართვის პირობებში და მათი სტატისტიკური ანალიზი

3.1. შესავალი

წინა თავებში განხილული იყო ოპტიმალური მართვის ალგორითმები, რომლის დროსაც წინასწარგანზრახვით იქმნებოდა მოსრიალე რეჟიმები რეგულირების კონტურში. ხშირ შემთხვევაში მოსრიალე რეჟიმების ასეთმა გამოყენებამ შეიძლება მიგვიყვანოს არასასურველ მოვლენამდე, ამიტომ საინტერესოა ოპტიმიზაციის ისეთი სისტემების აგება, რომელშიც მართვის სიგნალი არის უწყვეტი და ფორმირდება, როგორც ზემოთ განხილულ სისტემებში, $\frac{df}{dx}$ სიდიდის მნიშვნელობის ინფორმაციის გარეშე. ამ მიმართულებით ერთ-ერთ გზას წარმოადგენს იდეა, რეალიზებული [48], რომელიც მიზნად ისახავს მართვის კანონში იდეალური ელემენტის შეცვლას ელემენტზე გაჯერებული წრფივი არით. ასეთ სისტემებში მართვა ყოველთვის უწყვეტია, მაგრამ ობიექტის გამოსავალი სიდიდე y უკვე ზუსტად აღარ მიჰყვება დამკვეთ ზემოქმედებას $g(t)$, მიყოლის ცდომილება კი მცირდება წრფივი არის გადაცემის კოეფიციენტის გაზრდით.

ქვემოთ განხილულია ასეთი ალგორითმების შესაძლო ვარიანტები, გამოკვლეულია მათი თვისებები, ასევე შემთხვევები, როდესაც ოპტიმიზაციის ამოცანის გადაწყვეტისას მოსრიალე რეჟიმები იქმნება დამკვეთი ზემოქმედების კონტურში, განხილულია შემთხვევა, როდესაც ობიექტის მართვა წარმოებს მმართველი სიგნალის საშუალო მნიშვნელობით, ასევე მართვადი დამკვეთი ზემოქმედებით. გამოკვლეულია ოპტიმიზაციის სისტემების გარდამავალი პროცესების თვისობრიობა მცირე პარამეტრის მეთოდის გამოყენებით. განხილულია მართვადი დამკვეთი ზემოქმედების მქონე ოპტიმიზაციის სისტემის სტატისტიკური ანალიზი.

3. 2. ოპტიმიზაციის ალგორითმები მოსრიალე რეჟიმებით დამკვეთი ზემოქმედების კონტურში

შესავალში აღნიშნული იყო უკუკავშირის მთავარ კონტურში მოსრიალე რეჟიმების გარეშე ოპტიმიზაციის სისტემის აგების პრაქტიკული მიზანშეწონილობა უწყვეტი მართვის გამოყენების საფუძველზე, რომელიც ფორმირდება $\frac{df}{dx}$ სიდიდის შესახებ რაიმე ინფორმაციის გარეშე. ამ მიდგომის საფუძველზე, რომელიც გვთავაზობს მოსრიალე რეჟიმების არსებობას და მიმყოლი სისტემის აგებას, რომელშიც ობიექტის გამოსავალი კოორდინატი იმეორებს ამ ზემოქმედებას, მიყოლის ამოცანა წყდებოდა ძირითადი მართვის ხარჯზე, რომელიც მართავდა ობიექტის შესავალი პარამეტრის ცვლილებას.

შევეცდებით მიყოლის ეს ამოცანა გადავწყვიტოთ დამკვეთი ზემოქმედების პარამეტრების კომუტაციის საფუძველზე და მოსრიალე რეჟიმის ორგანიზებით უკუკავშირის მეორე კონტურში, რომელიც გააჩნიათ განხილულ კლასის ოპტიმიზაციის სისტემებს [69, 70]. წარმოვიდგინოთ, რომ რაღაცნაირად უზრუნველყოფილია მოსრიალე რეჟიმში g მიყოლა $y(t)$, მაშინ როგორც ჩანს მართვის საშუალო სიდიდე შეიცავს ინფორმაციას $\frac{dy}{dt}$ -ს შესახებ. გამოიყოფა რა ეს ინფორმაცია ინერციული ფილტრის დახმარებით, შეიძლება ჩამოვაყალიბოთ მართვის სიგნალი, რომელიც მიიყვანს y სიდიდეს შემცირებამდე.

ამ იდეის ერთ-ერთი შესაძლო რეალიზაცია არის ოპტიმიზაციის ალგორითმები, აღწერილი განტოლებათა სისტემით:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u, \\ \tau \dot{u}_1 + u_1 &= u_2, \quad \tau = const > 0 \\ u_2 &= V_0 \operatorname{sign}(\sigma_1 \sigma_2), \\ \sigma_1 &= g - y, \quad \sigma_2 = \sigma_1 + \delta, \\ \dot{g} &= -\rho - \alpha \operatorname{sign}(\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3) + V, \\ \sigma_3 &= \sigma_1 + \sigma_2, \end{aligned} \tag{3.2.1}$$

სადაც α და ρ ზოგიერთი პარამეტრებია ან სისტემის კოორდინატების ფუნქციებია, რომელთა ფორმირებასაც განვიხილავთ ქვემოთ.

განტოლებათა სისტემა (3.2.1) თითქმის ემთხვევა წინ განხილულ სისტემას და მისგან განსხვავდება მცირე დროის მუდმივა τ -ს მქონე მასწორებელი ფილტრის არსებობით და მცირე რელეური დანამატით დამკვეთი ზემოქმედების ფორმირების კანონში. სახელდობრ ამ დანამატმა უნდა უზრუნველყოს მოსრიალე რეჟიმში $g(t)$ -ს მიყოლა $y(t)$, რომელიც თავის მხრივ იცვლება u_1 მართვის ზემოქმედებით

$$\dot{y} = \frac{df}{dx} u_1 \quad (3.2.2)$$

გამოვიკვლიოთ (3.2.1) სისტემის თვისებები წინადადებით, რომ α და ρ არიან u_2 მართვის საშუალო მნიშვნელობის ფუნქციები, ე. ი. u_1 ფუნქციები:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0 \left(1 - \frac{|u_1|}{V_0}\right) \\ \alpha &= \alpha_0 \left(1 - \frac{|u_2|}{V_0}\right), \quad \alpha_0 > \rho_0. \end{aligned} \quad (3.2.3)$$

ნებისმიერი საწყისი პირობების დროს V სიგნალი უზრუნველყოფს g -ს ისეთ მნიშვნელობას, რომლის დროსაც ცდომილება $\varepsilon(t)$ აღმოჩნდება $\sigma_1 \sigma_2 < 0$ ინტერვალის შიგნით. თუ ვისარგებლებთ დანართი II-ის შედეგებით, მაშინ შეიძლება დავადგინოთ, რომ უტოლობის შესრულების შემთხვევაში $2(\alpha_0 + \rho_0) \tau \ln 2 < \Delta$, მოძრაობა სისტემაში იწარმოებს ისეთნაირად, რომ როცა $\frac{df}{dx} < 0$ $\varepsilon(t)$ მიისწრაფის ნულისაკენ $\varepsilon = 0$,

როცა $\frac{df}{dx} > 0$ $\varepsilon(t)$ მიისწრაფის $\varepsilon = -\delta$. ორივე შემთხვევაში ამ წერტილებში წარმოიშობა მოსრიალე რეჟიმი. თუ მოძრაობის განტოლებას ჩავწერთ მიყოლის ცდომილების ε მიმართ და მოვახდენთ ზოგიერთ ტექნიკურ ცვლილებას, მივიღებთ შემდეგ განტოლებას

$$u_{\text{მძ}}^* = \frac{u_2 \text{ მძ}}{V_0} \quad (3.2.4)$$

$$-\rho(1-u_{\text{adj}}^*) - \alpha_0(1-|u_{\text{adj}}^*|) - V_0 \frac{df}{dx} u_{\text{adj}}^* = 0, \text{ მართებულია } \frac{df}{dx} \text{-ის ნების-}$$

მიერი ნიშნის დროს.

ამოვიხსნათ ეს განტოლება, მივიღებთ, რომ

$$\left. \begin{aligned} \text{როცა } \frac{df}{dx} > 0, \alpha_0 (u^*)^2 + (\rho_0 + \alpha_0 + V_0 \frac{df}{dx}) u^* + \rho_0 = 0, \\ \text{როცა } \frac{df}{dx} < 0, \alpha_0 (u^*)^2 + (\rho_0 - \alpha_0 + V_0 \frac{df}{dx}) u^* - \rho_0 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.2.5)$$

ძნელი არ არის დავრწმუნდეთ, რომ (3.2.5) განტოლებას $(-1, 1)$ ინტერვალში აქვს თითო ფესვი და ის უარყოფითია პირველ შემთხვევაში, დადებითია – მეორე შემთხვევაში. ეს ნიშნავს, რომ $y(t)$ მონოტონურად კლებულობს ექსტრემუმამდე, რომლის მიდამოში მყარდება რხევები ამპლიტუდით $y - y_{\min}$, რომელიც არ აღემატება δ სიდიდეს.

საინტერესოა აღინიშნოს, რომ როცა α_0 და ρ_0 მიისწრაფიან უსასრულობისაკენ.

$$u^* \rightarrow -\text{sign} \frac{df}{dx} \quad (3.2.6)$$

და, მაშასადამე, ასეთ სისტემაში მართვაზე შეზღუდვების მიუხედავად შესაძლებელია მაქსიმალური სწრაფმოქმედების რეალიზება.

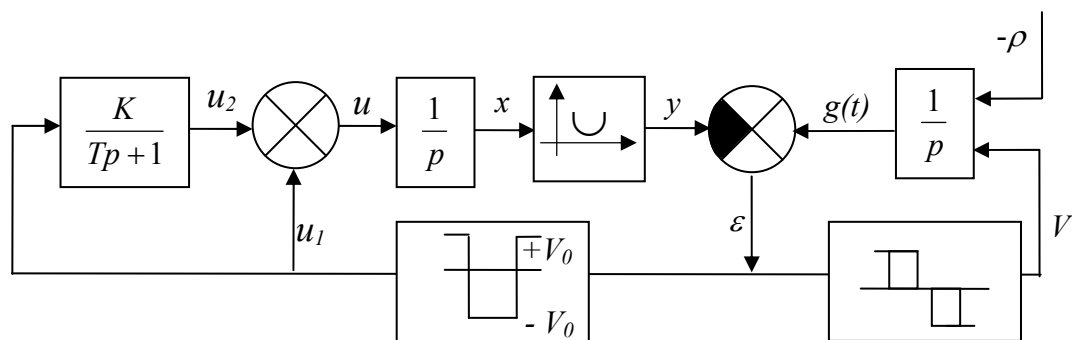
3.3. ოპტიმიზაციის ალგორითმები მართვის საშუალო მნიშვნელობით

ზემოთ განხილული (2.2.3), (2.2.7) ალგორითმებში ოპტიმიზებადი კოორდინატის ზუსტი მიყლის ეფექტი მონოტონურად კლებადი დამკვეთი შემოქმედების მიმართ მიიღწევა წყვეტილი (რელეური) მართვის ხარჯზე, რომელიც იღებს ორი შესაძლო მნიშვნელობიდან $+V_0$ ან $-V_0$. ერთ-ერთი სიდიდე V_0 შეირჩევა გამომდინარე მოთხოვნილებიდან, წარდგენილი ძიების სისტემის სწრაფმოქმედებისადმი და ექსტრემალური წერტილის დრეიფის ზუსტი მიყლის უნარისადმი. როგორც წესი, ეს სიდიდე მიიჩნევა მაქსიმალურად შესაძლებელ მნიშვნელობად. მართვის ხშირი გადართვები $+V_0$ -დან $-V_0$ -ზე ხაზს უსვამენ რეალურ სისტემებში სხვადასხვა სახეობის დინამიკურ არაიდეალურობას, რომელთა

გაგლეხა ძიების ხარისხზე სასურველია შემცირდეს. ამისათვის საინტერესოა ოპტიმიზაციის ისეთი სისტემის აგება, რომელშიც წყვეტილი სიგნალის ამპლიტუდა იქნებოდა უმნიშვნელო, და შეძლებისდაგვარად სისტემის სწრაფმოქმედება და დრეიფის მიყოლის შესაძლებლობა დარჩენილიყო უცვლელი.

ოპტიმიზაციის ასეთი სისტემის აგებისათვის ვისარგებლოთ იდეით, შემოთავაზებული [48]-ში, რომელიც დაკავშირებულია დიფერენცირების და ფილტრაციის ამოცანის გადაწყვეტასთან. განხილულ სისტემებთან მიმართებაში, ეს იდეა ემყარება დინამიკური ფილტრის გამოყენებას, მაგალითად, ინერციული რგოლის დროის მცირე მუდმივათი, რომლის დანიშნულებაცაა წყვეტილი სიგნალის გასწორება. ასეთი ფილტრის არსებობა არ იძლევა საშუალებას სისტემაში იდეალური მოსრიალე რეჟიმის არსებობის და წარმოიქმნება ე. წ. რეალური მოსრიალე რეჟიმი, რომლის დროსაც ობიექტის გამოსავალი კოორდინატა დაიწყებს რხევას დამკვეთი ზემოქმედების მიმართ ამპლიტუდით, პროპორციული ფილტრის დროის მუდმივასი. ეს რხევა შეიძლება მოისპოს თუ ძირითად მართვის სიგნალთან ერთად გამოვიყენებთ დამატებით წყვეტილ მართვის კომუტირებულ სიგნალს მცირე ამპლიტუდით. მაშინ, განსაზღვრულ პირობებში, სისტემაში შეიქმნება მოსრიალე რეჟიმი, მაგრამ უკვე მცირე სიგნალების კომუტაციის ხარჯზე, რაც იძლევა საშუალებას აღმოვფხვრათ არაიდეალურობის გავლენა.

სისტემის სტრუქტურული სქემა, რომელშიც რეალიზებულია ეს იდეა მოცემულია ნახ. 3.3.1.-ზე.



ნახ. 3.3.1.

ნახ. 3.3.1.-ზე გამოსახული ოპტიმიზაციის სისტემის განტოლება, (2.2.3.), (2.2.7.), (2.2.6) სისტემის განტოლების ანალოგიურია და განსხვავ-

დება მხოლოდ მართვის სიგნალის ფორმირების საშუალებით, რომელსაც ამ შემთხვევაში ექნება შემდეგი სახე:

$$u = u_1 + u_2, \quad (3.3.1)$$

სადაც u_1 ემთხვევა მართვის სიგნალს (2.2.3). ე. ი.

$$u_1 = V_0 \operatorname{sign}(\sigma_1 \sigma_2) \quad (3.3.2)$$

და u_2 კი წარმოადგენს ინერციული ფილტრის გამოსავალს დროის მუდმივათი τ .

$$\tau \dot{u}_2 + u_2 = k u_1, \quad k = \operatorname{const} > 1. \quad (3.3.3)$$

ასეთი სისტემის გამოკვლევისას, მოხერხებულობისათვის შემოვიფარგლოთ შემთხვევით, როცა $\frac{df}{dx} > 0$; შემდგომი შემთხვევისათვის, როცა $\frac{df}{dx} < 0$ ანალოგიურია, მხოლოდ იმ თავისებურების გათვალისწინებით, რომ $\varepsilon = 0$ წერტილის მაგივრად, განხილვაში უნდა ფიგურირებდეს წერტილი $\varepsilon = -\delta$, მართვის კანონში კი $\sigma_2 < 0$ -ის ნაცვლად უნდა ჩაისვას $\sigma_1 < 0$.

ამ ვარაუდით და (2.2.3), (2.2.6), (2.3.6), (3.3.1)... (3.3.3) თანაფარდობის გათვალისწინებით სისტემის მოძრაობის განტოლება ε და u_2 -ის მიმართ, მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= -\rho - \frac{df}{dx} V \operatorname{sign} \varepsilon - \frac{df}{dx} u_2 \\ \tau \dot{u}_2 &= -u_2 + k V_0 \operatorname{sign} \varepsilon. \end{aligned} \right\} \quad (3.3.4)$$

თუ გავითვალისწინებთ უტოლობის შესრულებას

$$\left| \frac{df}{dx} \right| (1+k) V_0 > \rho, \quad (3.3.5)$$

და II დანართში განხილულ განმარტებას, შეიძლება ვაჩვენოთ, რომ

$$2\rho \tau k \operatorname{Ln} 2 < \Delta, \quad (3.3.6)$$

პირობის შესრულების შემთხვევაში (3.3.4)-ში $\varepsilon = 0$ ყოველთვის აღიჭურვა მოსრიალე რეჟიმი. თუ დროის მუდმივა τ ისეთია, რომ შესრულებადია მოთხოვნილება, მოყვანილი II დანართში, ე. ი. ის საკმარისია მოსრიალე რეჟიმის მაღალსიხშირული მდგენელის ფილტრაციისათვის,

მაშინ მოძრაობის განტოლება მოსრიად რეჟიმში გარკვეული მოქმედების შემდეგ მიიღებს სახეს:

$$u_{\text{დაბ}} = -\frac{\rho}{\frac{df}{dx}} \cdot \frac{1}{1+k}, \quad (3.3.7.)$$

და შესაბამისად, კოორდინატა y მონოტონურად კლებულობს შემდეგი კანონით $\dot{y} = -\rho$, ვიდრე სრულდება უტოლობა (3.3.5).

როგორც ალგორითმებში (2.2.3.), (2.2.6.) (2.3.6.), ისე აქაც შესაძლებელია ორი ვარიანტი: მუდმივი სიხარით შემცირება $g(t)$, ე. ი. $\rho = \text{const}$ და ცვლადი, რომელიც იცვლება შემდეგი კანონით

$$\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{|u_2|}{k V_0}\right), \quad \rho_0 = \text{const} < 0. \quad (3.3.8.)$$

პირველ შემთხვევაში y სიდიდის მონოტონურად კლებალობა უზრუნველყოფილია ექსტრემუმის წერტილის მიდამოებამდე, რომელშიც ირღვევა (3.3.5) უტოლობა, შემდგომში $y(t)$ ასევე მცირდება, მხოლოდ უკვე რხევით რეჟიმში. ცდომილება y და y_{\min} შორის განისაზღვრება Δ სიდიდით.

ალგორითმის მეორე შემთხვევაში, ე. ი. როცა ρ არჩეულია (3.3.8.)-ის სახით, ექსტრემუმამდე კლებალობა მონოტონურია და ამას გარდა (3.3.7.) და (3.3.8.)-დან ჩანს, რომ როცა ρ_0 მიისწრაფის უსასრულობისაკენ

$$\lim_{\rho_0 \rightarrow \infty} \dot{x} = (1+k) V_0 \operatorname{sign} \frac{df}{dx}, \quad (3.3.9.)$$

ე. ი. სისტემაში მიიღწევა მაქსიმალური სწრაფმოქმედება. ძიების ცდომილება y და y_{\min} -ს შორის განისაზღვრება სიდიდით $\sigma = \sigma_2 - \sigma_1$.

აღვნიშნოთ, რომ $(1+k)V$ სიდიდის მუდმივი და ტოლი მაქსიმალურად შესაძლო მნიშვნელობის დროს, ამპლიტუდა V_0 შეიძლება შეირჩეს საკმაოდ მცირე, ე. ი. მართვა განხილულ ექსტრემალურ სისტემაში იქნება „თითქმის“ უწყვეტი.

3.4. ოპტიმიზაციის ალგორითმები მართვადი დამკვეთი ზემოქმედებით

ზემოთ განხილული ოპტიმიზაციის სისტემის (2.2.3.) ერთ-ერთ თავისებურებას წარმოადგენს ის, რომ დამკვეთი ზემოქმედების ცვლილების სიჩქარე წარმოდგენილია ორი სიგნალის $-\rho$ და V ჯამით, რომელთა დანიშნულებაა სხვადასხვა ამოცანის გადაწყვეტა. სიგნალი $-\rho$ განსაზღვრავს დამკვეთი ზემოქმედების ცვლილების კანონს მოსრიალე რეჟიმში. მეორე სიგნალი V განკუთვნილია ორი პირობის დასაკმაყოფილებლად: ჯერ ერთი, სისტემაში საწყისი პირობების შესაქმნელად (2.2.4.), რომლის დროსაც გარანტირებულია მოსრიალე რეჟიმის წარმოქმნა, და მეორე – სისტემის მოძრაობის სტაბილიზაციისათვის ექსტრემუმის მიდამოში. ასეთი სისტემის ანალიზი ტარდება იმ ვარაუდით, რომ მოსრიალე რეჟიმში სიგნალი V ნულის ტოლია და ამ პირობის შესასრულებლად V ფორმირების დროს გამოყენებული უნდა იქნას მოწყობილობა, რომლის ჰისტერიზისული პეტლის სიგანე უნდა აღემატებოდეს σ_1 და σ_2 რხევის გაორმაგებულ ამპლიტუდას მოსრიალე რეჟიმში. რეალურ სისტემებში სხვადასხვა არაიდეალურობის არსებობის, ან შემთხვევითი შეშფოთების გამო, მოძრაობა მოსრიალე რეჟიმში წარმოებს არა ($\sigma_1 = 0$ ან $\sigma_2 = 0$) გადართვების ზედაპირზე, არამედ მის ზოგიერთ მიდამოში. ექსტრემუმის ძიების სიზუსტის გასაზრდელად საჭიროა ჰისტერეზისული სიგანის შემცირება, მაგრამ შემთხვევითი შეშფოთების არსებობის გამო ყოველთვის არსებობს შემთხვევითი პროცესის გამოსვლის ალბათობა ჰისტერეზისული ზონის ფარგლებს გარეთ, რასაც შეუძლია გამოიწვიოს სისტემის მუშაობის უნარის დარღვევა. ჩვენ განვიხილავთ ალგორითმს ჰისტერეზისის გარეშე და ვაჩვენებთ, რომ იდეალური მოსრიალე რეჟიმისათვის სისტემის ძიების სიზუსტე განსაზღვრული იქნება τ სიდიდით (დანართი 1). შემდგომში ვაჩვენებთ, რომ ოპტიმიზაციის ალგორითმები დამკვეთი ზემოქმედების მართვადი სიჩქარით გამოირჩევა მაღალი დაბრკოლებამდგრადობით და ამის გამო უპირატესობა აქვს ალგორითმს, შემოთავაზებულს [48]-ში.

წინასწარ გაგანალიზოთ (2.3.6.) სისტემის მოქმედება, რომელშიც ჰისტერეზისის სიდიდე ნულის ტოლია, ე. ი. დამკვეთი ზემოქმედების სიჩქარე იცვლება შემდეგი კანონით

$$\begin{aligned} \dot{g} &= -M \operatorname{sign} \sigma_1 + M \operatorname{sign} (-\sigma_2) - \rho_0 (1 - |z|), \\ \tau \dot{z} + z &= \frac{u}{V_0}, \end{aligned} \quad (3.4.1)$$

სადაც $\operatorname{sign} x$ ტოლია $+1$, როცა $x \geq 0$ და $\operatorname{sign} x$ ტოლია ნულის, როცა $x < 0$. როგორც ჩანს პირველი ორი შესაკრები (3.4.1.)-ში ემთხვევა V ფუნქციას როცა $\Delta = 0$.

ვაჩვენოთ, რომ (3.2.1.) სისტემაში დამკვეთი ზემოქმედებით (3.4.1.) ყოველთვის აღიძვრება მოსრიალე რეჟიმი. ჩავწეროთ ცდომილების კოორდინატის სიჩქარის გამოსახულება $\dot{\varepsilon} = \dot{\sigma}_1 = \dot{\sigma}_2$, რომელიც (3.4.1.)-ის თანახმად მიიღებს სახეს:

$$\dot{\varepsilon} = -M \operatorname{sign} \sigma_1 + M \operatorname{sign} (-\sigma_2) - \rho_0 (1 - |z|) - \frac{df}{dx} V_0 \operatorname{sign} (\sigma_1 \sigma_2) \quad (3.4.2)$$

ამ გამოსახულებიდან ჩანს, რომ უტოლობის შესრულების შემთხვევაში

$$M \gg \rho_0 + V_0 \left| \frac{df}{dx} \right| \quad (3.4.3)$$

სისტემაში ყოველთვის წარმოიქმნება საწყისი პირობები $\sigma_1 \sigma_2 < 0$ და შემდგომში მოძრაობა განხორციელდება შესაბამისად განტოლებისა

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= -\rho_0 (1 - |z|) - V_0 \frac{df}{dx}, \\ \tau \dot{z} + z &= -1. \end{aligned} \quad (3.4.4)$$

თუ მივიჩნევთ დროის τ მუდმივას მცირედ და უგულებელყოფთ ფილტრის საკუთარ მოძრაობას, ძნელი არ არის დავასკვნათ, რომ $\dot{\varepsilon}$ სიჩქარის ნიშანი (3.4.4.)-ში განსაზღვრული იქნება მეორე შესაკრებით

$\frac{df}{dx} V_0$ და შესაბამისად კოორდინატა ε გაიზრდება ნულამდე, როცა

$\frac{df}{dx} > 0$ და შემცირდება $-\delta$ -მდე, როცა $\frac{df}{dx} < 0$. პირველ შემთხვევაში

(როცა $\frac{df}{dx} > 0$) მოსრიალე რეჟიმი წარმოიქმნება $\sigma_1 = 0$ სიბრტყეზე,

მეორე შემთხვევაში კი $\sigma_2 = 0$ სიბრტყეზე. ამაში აღვიღად დავრწმუნ-

დებით, თუ ჩავწერთ გამოსახულებას $\dot{\sigma}_1$ და $\dot{\sigma}_2$ -ისათვის, რომლებიც (3.4.2.)-ის თანახმად მიიღებენ შემდეგ სახეს:

$$\dot{\sigma}_1 = -M \operatorname{sign} \sigma_1 - \rho_0(1-|z|) - \frac{df}{dx} V_0 \operatorname{sign} \sigma_1 \quad (3.4.5.)$$

$$\dot{\sigma}_2 = -M \operatorname{sign}(-\sigma_2) - \rho_0(1-|z|) + \frac{df}{dx} V_0 \operatorname{sign} \sigma_2 \quad (3.4.6.)$$

(3.4.5.) და (3.4.6.)-დან პირდაპირ ჩანს, რომ როცა $\frac{df}{dx} > 0$ შესრულებულია პირობა $\sigma_1 \dot{\sigma}_1 < 0$, და როცა $\frac{df}{dx} < 0$ პირობა $\sigma_2 \dot{\sigma}_2 < 0$ და შესაბამისად (3.2.1.) სისტემაში (3.4.1.) დამკვეთი ზემოქმედებით აღიძვრება მოსრიალე რეჟიმი $\sigma_1 = 0$ -ზე როცა $\frac{df}{dx} > 0$ და $\sigma_2 = 0$, როცა $\frac{df}{dx} < 0$. ჩვენი მიზნისათვის საჭიროა ვიცოდეთ დამკვეთი ზემოქმედების სიჩქარის გამოსახულება როგორც პირველი, ისე მეორე შემთხვევისათვის. ეს გამოსახულება შეიძლება მოძებნილ იქნას შემდეგნაირად: თუ ვთვლით, რომ $\operatorname{sign} \sigma_1$ ($\operatorname{sign} \sigma_2$) მართვაა, მაშინ უნდა ამოვხსნათ განტოლება $\dot{\sigma}_1 = 0$ (შესაბამისად $\dot{\sigma}_2 = 0$) და ჩავსვათ მიღებული გამოსახულება (3.4.1.)-ში, შედეგად მივიღებთ

$$\dot{g} = -\frac{df}{dx} \frac{\frac{M}{2} + \rho_0}{\frac{M}{2} + \rho_0 + \frac{df}{dx} V_0} V_0, \text{ როცა } \frac{df}{dx} > 0, \quad (3.4.7.)$$

$$\dot{g} = -\frac{df}{dx} \frac{\frac{M}{2} - \rho_0}{\frac{M}{2} - \rho_0 - \frac{df}{dx} V_0} V_0, \text{ როცა } \frac{df}{dx} < 0 \quad (3.4.8.)$$

მიღებული გამოსახულებიდან (3.4.3.)-ის გათვალისწინებით გამომდინარეობს, რომ მოსრიალე რეჟიმში დამკვეთი ზემოქმედების სიჩქარე უარყოფითია, როცა $\frac{df}{dx} > 0$ და დადებითია, როცა $\frac{df}{dx} < 0$. ვინაიდან მოსრიალე რეჟიმში $y = g$ (ან $y = g + \delta$), ეს ნიშნავს, რომ ობიექტის გამოსავალი კოორდინატა კლებულობს პირველ შემთხვევაში და იზრ-

დება მეორე შემთხვევაში, ე. ი. როცა $\frac{df}{dx} < 0$ (3.2.1), (3.4.1) სისტემა მიმინიზაციის ამოცანას ვერ ასრულებს.

გარდაეკმნათ (3.2.1) და (3.4.1) ალგორითმები ისეთნაირად, რომ ობიექტის გამოსავალი სიდიდე y კლებულობდეს მოსრიალე რეჟიმში მიუხედავად $\frac{df}{dx}$ სიდიდის ნიშნისა. სისტემა იქნება ასეთი თვისებებით აღჭურვილი, თუ დამკვეთ ზემოქმედებას ავირჩევთ შემდეგი სახის:

$$\begin{aligned} \dot{g}_1 &= -M \operatorname{sign} \sigma_1 + M \operatorname{sign} (-\sigma_2) - \rho_0(1-z) \operatorname{sign} (-\sigma_2) \\ \tau \dot{z} + z &= \frac{u}{V_0}, \end{aligned} \quad (3.4.9)$$

(3.4.9.) გამოსახულების განსხვავება (3.4.1.)-სგან შედგება იმაში, რომ უწყვეტი კომპონენტის $\rho_0(1-|z|)$ ნაცვლად, რომელიც დამოკიდებულია ფილტრის გამოსავალი კოორდინატის მოდულზე, გამოიყენება წყვეტილი კომპონენტი $-\rho_0(1-z) \operatorname{sign} (-\sigma_2)$. შეიძლება ვაჩვენოთ, რომ (3.2.1) და (3.4.9.) სისტემაში $\frac{df}{dx} \neq 0$ -ის ნებისმიერი მნიშვნელობის დროს ყოველთვის აღიძვრება მოსრიალე რეჟიმი. შესავალი კოორდინატა x მოსრიალე რეჟიმში $\rho_0 > \frac{M}{2}$ -ის პირობის შესრულების შემთხვევაში მონოტონურად უახლოვდება ექსტრემალურ მნიშვნელობას. ამ შემთხვევაში და აგრეთვე (3.2.1) და (3.4.1) ალგორითმებისათვის ძიების სიჩქარე შეიძლება მიუახლოვდეს მაქსიმალურს M და ρ_0 პარამეტრების შერჩევით.

ობიექტის შესავალი კოორდინატის ცვლილების სიჩქარე:

$$\dot{x} = -\frac{M}{M + 2\frac{df}{dx}V_0}V_0, \text{ როცა } \frac{df}{dx} > 0, \quad (3.4.10.)$$

და

$$\dot{x} = (1 - \frac{M}{\rho_0})V_0, \text{ როცა } \frac{df}{dx} < 0,$$

საიდანაც ჩანს, რომ კოორდინატა x იცვლება მაქსიმალური სიჩქარით როცა M და ρ_0 მიისწრაფვიან უსასრულობისაკენ ისეთნაირად, რომ

$\frac{M}{\rho_0} \rightarrow 0$ განხილული სისტემის სიზუსტე, განსხვავებული [48] ფასდება (თანახმად დანართი 1) უტოლობით

$$\Delta x \leq 2 \tau V_0 L n \frac{2\rho_0}{M}. \quad (3.4.11.)$$

(3.4.11.)-დან ჩანს, რომ ცდომილება ექსტრემალური მნიშვნელობის განსაზღვრაში (3.2.1.) (3.4.9.) სისტემისათვის პროპორციულია ფილტრის დროის მუდმივასი τ (3.4.9.) და მიისწრაფის ნულისაკენ, როცა τ მიისწრაფის ნულისაკენ. რა თქმა უნდა ეს დასკვნა მართებულია მხოლოდ სისტემის იდეალური მოდელისათვის, ე. ი. იგულისხმება, რომ გადამრთველი მოწყობილობანი რეალიზებულია იდეალურად. რეალურ სისტემებში ყოველთვის არსებობს არაიდეალურობა (დაგვიანება, ინერციულობა, ჰისტერიზისი და ა. შ.), სადაც τ უკვე აღარ შეიძლება მიისწრაფოდეს ნულისაკენ და მინიმალური მნიშვნელობის არჩევა საჭიროა შეთანხმდეს არაიდეალურობის სათანადოდ.

3.5. ოპტიმიზაციის სისტემის სტატისტიკური ანალიზი მართვადი დამკვეთი ზემოქმედებით

ნებისმიერი მართვის სისტემის, მათ შორის ოპტიმიზაციის სისტემის ხარისხის მნიშვნელოვან მახასიათებელს შემთხვევითი შემფოთების მოქმედებისას წარმოადგენს სისტემის მდგრადობა.

ამ ქვეთავში ჩვენ განვიხილავთ საკითხს იმის შესახებ, თუ რამდენად შეინარჩუნებს ზემოთ აღწერილი მართვადი დამკვეთი ზემოქმედების ალგორითმი თავის თვისებებს, თუ ობიექტის გამოსავალ კოორდინატზე ადიტიურად გამოყენებულია სტაციონარული ნორმალური სიგნალი. ამის გამოსაკვლევადა, ოპტიმიზაციის ავტომატური სისტემების არაწრფივი მახასიათებლის გამო, გამოვიკვლიოთ სტატისტიკური გაწრფივების მეთოდი.

შემთხვევითი პროცესის თვისებებთან შედარებით $\xi(t)$, რომელიც ადიტიურად შედის სისტემის ცდომილებაში $\varepsilon = g - y + \xi(t)$, ვივარაუდოთ პირობის შესრულებადობა:

$m_\xi = 0$, $k(t-t^1) = \sigma^2 z(\tau)$, $\tau = t-t^1$, სადაც m_ξ მათემატიკური მოლოდინია, σ_ξ^2 -დისპერსია, $z(\tau)$ კი $\xi(t)$ პროცესის კორელაციის კოეფიციენტი, თანაც $z(\tau)$ – ორმაგი უწყვეტი დიფერენცირებადი სისტემაა, ამას გარდა:

1) $\xi(t)$ წარმოადგენს მაღალსიხშირულს იმ გაგებით, რომ მისი სპექტრი დევს სისტემის დინამიკური რგოლების გამტარი ზოლის საზღვრებს გარეთ;

2) სიდიდე δ ისეთია, რომ შეიძლება ეფექტების უგულვებლყოფა, დაკავშირებული $\xi(t)$ ამოგდებასთან δ ზღვარს მიღმა.

აღნიშნოთ აგრეთვე, რომ ანალიზი საკმარისად შეიძლება შეიზღუდოს $\frac{df}{dx} < 0$ შემთხვევის განხილვით, ასე რომ $\frac{df}{dx}$ -ის დროს ძიების მდგრადობის შენარჩუნება 1) და 2) პირობის შესრულებისას, როგორც ჩანს შესაძლებელია. ამ ვარაუდით ვაწარმოთ (3.2.1), (3.4.9) სისტემის არაწრფივი ელემენტების სტატისტიკური გაწრფივება, შედეგად მივიღებთ ცვლადების მათემატიკური მოლოდინის შემდეგ დინამიკურ განტოლებას

$$\begin{aligned} \dot{m}_\zeta^\phi &= (M - \rho + \rho m_z)(1 + k_0 m_\zeta) + V_0 \frac{df}{dx} k_0 m_\zeta; \\ \dot{m}_z &= -\frac{1}{\tau} m_z - \frac{k_0}{\tau} m_\zeta, \end{aligned} \tag{3.5.1}$$

და სტატისტიკური განტოლება შემთხვევითი მდგენელისათვის

$$\zeta_2^0(t) = \xi(t) - \frac{df}{dx} x^0(t) + g^0(t). \tag{3.5.2}$$

$x^0(t)$, $g^0(t)$ პროცესები არაკორელირებულია პროცესებთან $\zeta_2^0(t)$, როგორც ნორმალური პროცესის წარმოებულები, $x_0(t)$ და $\xi(t)$ კორელაციები შეიძლება უგულვებლვყოთ მეორე ვარაუდით. მაშინ $x^0(t)$ და $g^0(t)$ პროცესების კორელაცია ტოლია $k_{xg} = \left| \frac{df}{dx} \right| \sigma_x^2$, დისპერსიისათვის კი მივიღებთ განტოლებას

$$\sigma_{\zeta}^2 = \sigma_{\xi}^2 + \sigma_g^2 + 2 \left(\frac{df}{dx} \right)^2 \sigma_x^2. \quad (3.5.3.)$$

ამ გამოსახულებაში σ_x^2 განსაზღვრულია განტოლებით

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{2n} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{V_0^2 k_1^2}{\left| \zeta \omega + k_1 \left| \frac{df}{dx} \right| V_0 \right|^2} \zeta_{\xi}(\omega) d\omega, \quad (3.5.4.)$$

სადაც $\zeta_{\xi}(\omega)$ სპექტრალური სიმკვრივეა $\xi(t)$: 1)-ის ვარაუდით სიდიდე σ_x^2 მცირეა და მისი წველილი σ_{ζ}^2 -ის დისპერსიაში უმნიშვნელოა.

σ_g^2 -სთვის ძნელი არ არის მივიღოთ ტოლობა

$$\sigma_g^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{k_1^2 \left[\rho(1 + k_0 m_{\zeta}) + (M - \rho + \rho m_z) \right]^2}{\omega^2} S_{\zeta}(\omega) d\omega. \quad (3.5.5.)$$

განტოლებები (3.5.1), (3.5.3), (3.5.5) მთლიანად განსაზღვრავენ გაწრფივებული სისტემის ქმედებას და შეიძლება გამოყენებულ იქნას პარამეტრების ანგარიშისას. (3.5.4) და (3.5.5) ფორმულების ზუსტი ანგარიში შეიძლება შესრულდეს მხოლოდ გრაფიკული მეთოდით, ამიტომ შემოვიფარგლოთ შემდგომში მხოლოდ ხარისხობრივი განმარტებებით, რომელიც იძლევა საშუალებას ვიმსჯელოთ სისტემის სტატისტიკურ თვისებებზე.

მივიღოთ მხედველობაში ის, რომ მდგომარეობის დამყარებულ მიდამოში (3.5.1)-ის მეორე განტოლების ტემპი მნიშვნელოვნად აღემატება პირველი განტოლების ტემპს. შესაბამისად, ჩვენი დაშვების ზღვრებში, შეიძლება ვივარაუდოთ:

$$m_z = k_0 m_{\zeta} \quad (3.5.6.)$$

ჩავსვათ (3.5.6) თანაფარდობა (3.5.1)-ის პირველ განტოლებაში, მივიღებთ

$$\dot{m}_{\zeta} = (M - \rho - \rho k m_{\zeta})(1 + k_0 m_{\zeta}) + V_0 \frac{df}{dx} k_0 m_{\zeta}. \quad (3.5.7.)$$

(3.5.7)-დან შეიძლება შევნიშნოთ, რომ როდესაც $m_{\zeta} = 0$ სიდიდე \dot{m}_{ζ} უარყოფითია, როცა $k_0 m_{\zeta} = 1$ - დადებითი. შესაბამისად, (0, 1) ინტერვალში არსებობს ისეთი მნიშვნელობა $k_0 m_{\zeta}$, რომლის დროსაც \dot{m}_{ζ} ტო-

ლია ნული. ეს მნიშვნელობა წარმოადგენს შემდეგი განტოლების ამონახსნს a პარამეტრის მიმართ:

$$\rho a^2 + (V_0 \frac{df}{dx} + M)a + \rho - M = 0, \quad (3.5.8.)$$

და ემთხვევა ექვივალენტური მართვის $V_{\text{ექვ}}$ მნიშვნელობას. ამ განხილვებიდან და წინა პარაგრაფების შედეგებიდან გამომდინარე მიიღება ობიექტის გამოსავალი კოორდინატის მათემატიკური მოლოდინის მინიმალურ მნიშვნელობასთან კრებადობა. ობიექტის გამოსავალი სიგნალის დისპერსია სასრულია და გამოითვლება შემდეგი გამოსახულების შესაბამისად

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{df}{dx} \right)^2 \sigma_x^2, \quad (3.5.9.)$$

სადაც σ_x^2 განსაზღვრულია (3.5.4.) გამოსახულებით და შესაბამისად, σ_y^2 პატარაა.

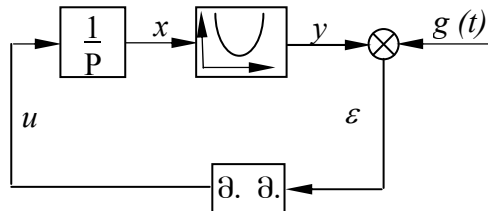
მოყვანილმა ანალიზმა გვაჩვენა, რომ ალგორითმი დამკვეთი ზემოქმედების მართვადი სიჩქარით, ალგორითმებისაგან განსხვავებულს, შემოთავაზებულს [36], მაღალსიხშირული შემთხვევითი ზემოქმედების მიმართ, ავლენს წრფივ თვისებს იმ აზრით, რომ სისტემის მოძრაობის განტოლებები მათემატიკური მოლოდინის სიდიდეებისათვის ემთხვევა დეტერმინირებული შემთხვევის განტოლებას, მართვადი კოორდინატის დისპერსია კი პროპორციულია შესავალი სიგნალის დისპერსიის, როგორც ეს შეიძლება დადგინდეს (3.5.4.) გამოსახულებიდან. ეს ნიშნავს, რომ ყოველ შემთხვევაში 1) და 2) ვარაუდების შესრულებისას დამკვეთი ზემოქმედების ცვლადი სიჩქარის ალგორითმი ინარჩუნებს შრომისუნარიანობას დაბრკოლების მოქმედების ქვეშ. ამას გარდა სისტემის პარამეტრების არჩევაზე არავითარი სპეციალური შეზღუდვები ამ შემთხვევაში არ იდება.

3.6. ოპტიმიზაციის გარდამავალი პროცესის თვისობრიობის გამოკვლევა მცირე პარამეტრის მეთოდის გამოყენებით

არაწრფივი დინამიკური სისტემის ოპტიმიზაციის გარდამავალი პროცესის თვისობრიობის გამოკვლევისათვის ხშირად იყენებენ მცირე პარამეტრის მეთოდს.

ამასთან დაკავშირებით საინტერესოა გაირკვეს რამდენად შეინარჩუნებს ეს მეთოდი თავის თვისებებს დინამიკური ობიექტის ოპტიმიზაციის სისტემის გამოკვლევისას.

წარმოდგენილ ნაშრომში აღწერილია ოპტიმიზაციის სისტემა ძიების მუდმივი სიჩქარით (2.2.1), ე. ი. როცა $\dot{g} = -\rho$. ამ სისტემაში (მისი სტრუქ-



ნახ. 3.6.1.

ტურული სქემა ნაჩვენებია ნახ. 3.6.1-

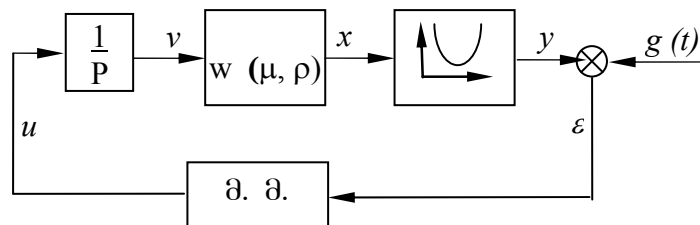
ზე), როცა $U_o \left| \frac{df}{dx} \right| > \rho$ არსებობს მოს-

რიალე რეჟიმი მიეოლის ცდომილე-

ბით $\varepsilon = 0$, როცა $\frac{df}{dx} > 0$. ფაქტიუ-

რად ასეთი სისტემა არის იდეალური,

მაგრამ პრაქტიკულად ყოველთვის არსებობს ზოგიერთი „ჩქარი“ დინამიკა (ეს გათვალისწინებული არ არის [48] ობიექტის მოდელის შექმნისას). ამ ქვეთავში ჩვენ განვიხილავთ შემთხვევას, როცა გაითვალისწინება რეალური სისტემის დინამიკა შემოთავაზებული [71]-ში. დავეშვათ ეს დინამიკური ნაწილი ჩართულია ისე, როგორც ნაჩვენებია ნახ. 3.6.2.-ზე.



ნახ. 3.6.2.

შევაფასოთ ამ დინამიკის მოქმედება შემდეგი წინადადებით:

$$w(\mu, \rho) = w(0, \rho) = 1;$$

$$w(\mu, 0) = 1,$$

მისი საკუთარი მოძრაობა ასიმპტოტურად მდგრადია და ფესვები მისწრაფიან უსასრულობისაკენ როცა $\mu \rightarrow 0$.

ფორმალურად ამ სისტემის მოძრაობის განტოლებას აქვს შემდეგი სახე:

$$\begin{aligned} y &= f(x), & u &= \text{sign } \varepsilon \\ W(\mu, \rho)x &= V, & \varepsilon &= g - y, \\ \dot{v} &= u, & \dot{g} &= -\rho \end{aligned} \quad (3.6.1)$$

აქ განიხილება შემთხვევა, როცა $\frac{df}{dx} > 0$ და იგულისხმება, რომ შესაძლო რხევების ამპლიტუდა არ აღემატება Δ -ს, ამიტომ (3.6.1) განტოლებაში არ არის სიგნალი V .

დროის და კოორდინატების აშკარა შეცვლით $t = \mu\tau$, $x_i = x$, $\dot{x} = x_i + 1$ (3.6.1) სისტემიდან შეიძლება გადავიდეთ შემდეგ სისტემაზე

$$\begin{aligned} y &= f(x_1), \\ \frac{dx_i}{d\tau} &= x_i + 1, i = 1, \dots, n-1, \\ \frac{dx_n}{d\tau} &= -\frac{1}{a_n} \sum_{i=1}^n a_{i-1} x_i + \frac{v}{a_n}, \\ \frac{dv}{d\tau} &= \mu u, \\ \frac{d\varepsilon}{d\tau} &= -\mu \left(-\rho - \frac{df}{dx} x_2 \right), \end{aligned} \tag{3.6.2}$$

აქ a_i პარამეტრებია $w(\mu, \rho)$, თანაც $a_0 \equiv 1$ თანახმად $w(\mu, 0) = 1$.

ამოცანის დანიშნულებაა y კოორდინატის $g(t)$ მიმართ მიყოლის რეჟიმში გადახრის მაქსიმუმის შეფასება.

იმ შემთხვევაში, თუ $\mu = 0$, მაშინ სიგნალი $V = x_1$ და სისტემაში აღგილი აქვს იდეალურ მოსრიალე რეჟიმს, $\mu \neq 0$, $V \neq 0$ და აღვნიშნოთ მათი სხვაობა $\chi = x_1 - V$ და გამოვრიცხოთ x_1 კოორდინატა (3.6.2)-დან, მივიღებთ:

$$\begin{aligned} \chi_1 &= x_w - \mu u, \\ \dot{\chi}_i &= x_{i+1}, i = 2, \dots, n-1, \\ \dot{\chi}_n &= -\frac{1}{a_n} \sum_{i=1}^n a_{i-1} x_i - \frac{1}{a_n} \chi_1. \end{aligned} \tag{3.6.3}$$

უნდა აღინიშნოს, რომ $\mu = 0$, ჩვენ გვაქვს ასიმპტოტურად მდგრადი წრფივი სისტემა.

ასეთი სისტემისათვის, თანახმად ლიაპუნოვის თეორიისა [72, 73] არსებობს დადებითად განსაზღვრული კვადრატული ფორმა $V = \tilde{x}^T b \tilde{x}$,

რომლის წარმოებული, თანახმად (3.6.3) სისტემისა, განხორციელებულია და ტოლია $V = -\|\tilde{x}\|^2$, სადაც $\tilde{x}^T = (x_1, x_2 \dots x_n)$.

გამოთვალეთ ახლა V -ს წარმოებული თანახმად (3.6.3) სისტემის, როცა $\mu = 0$, მაშინ მივიღებთ:

$$\dot{V} = -\|\tilde{x}\|^2 - \frac{\partial v}{\partial \chi_1} \chi_1 = -\|\tilde{x}\|^2 - \frac{\partial v}{\partial \chi_1} \mu u$$

ნათელია, რომ პირობის შესრულების შემთხვევაში

$$\|\tilde{x}\|^2 > \mu u_0 \left| \frac{\partial v}{\partial \chi_1} \right| \quad (3.6.4)$$

სიდიდე $\dot{V} = 0$. გარემო G , რომელშიც როგორც ამბობენ $\dot{V} \geq 0$, მოცემულია უტოლობით

$$\|\tilde{x}\|^2 \leq \mu u_0 \left| \frac{\partial v}{\partial \chi_1} \right| \quad (3.6.5)$$

$\frac{dv}{d\chi}$ შეფარდების მისაღებად, აღვნიშნოთ, რომ

$$\frac{\partial v}{\partial \chi_1} = \frac{\partial}{\partial \chi_1} \left[\sum_{j=1}^n b_{ij} \tilde{x}_i \tilde{x}_j \right] = 2 \sum_{j=1}^n b_{ij} \tilde{x}_j,$$

სადაც b_{ij} ელემენტებია მატრიცის $B = \|b_{ij}\|$, შესაბამისად:

$$\left| \frac{\partial v}{\partial \chi_1} \right| \leq 2 \sum_{j=1}^n |b_{ij}| \|\tilde{x}\|.$$

ჩავსვამთ რა ამ უტოლობას (3.6.5)-ში, მივიღებთ გარემოს შეფასებას შემდეგი სახით:

$$\|\tilde{x}\| \leq 2 \mu u_0 \sum_{j=1}^n |b_{ij}|. \quad (3.6.6)$$

შევაფასოთ ახლა გარემო, სადაც მთავრდება (3.6.3) სისტემის ყველა მოძრაობა.

ამისათვის „ჩაგუშვათ“ G გარემო, გარემოში, შეზღუდული ზედაპირული საზღვრების დონით $V \leq C_\mu$. შემდეგ გადავიღეთ „სფერული“

გარემოს შეფასებაზე, რომლებიც მოიცავენ დონის $V \leq C_\mu$ ყველა ზედაპირს.

ამისათვის გამოვიყენოთ უტოლობა

$$\lambda_{\min}^2 \|\tilde{x}\|^2 \leq V \leq \lambda_{\max}^2 \|\tilde{x}\|^2, \quad (3.6.7.)$$

სადაც $\lambda_{\min, \max}$ შესაბამისად $B = \begin{vmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & & & \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_n \end{vmatrix}$ მატრიცის საკუთარი რიცხვ-

ბის min და max-ია.

(3.6.6)-დან და (3.6.7.) მარჯვენა უტოლობიდან გვაქვს

$$V_{(x)} \leq \lambda_{\max}^2 2\mu\mu_0 \sum_{j=1}^n |b_{ij}|.$$

ეს უტოლობა (3.6.7.) მარცხენა უტოლობის გათვალისწინებით მოგვცემს

$$\|\tilde{x}\|^2 \leq \frac{\lambda_{\max}^2}{\lambda_{\min}^2} 2\mu\mu_0 \sum_{j=1}^n |b_{ij}|. \quad (3.6.8.)$$

მიღებული უტოლობა (3.6.8.) იძლევა გარემოს შეფასებას, სადაც მთავრდება სისტემის ყველა მოძრაობა. (3.6.6.) უტოლობიდან მივიღებთ ანალიტიურად \tilde{x} ვექტორის პირველი კოორდინატისათვის, ე. ი. χ_1 -თვის.

$$|\chi_1| = |x_1 - v| \leq 2\mu\mu_0 \sum_{j=1}^n |b_{ij}| \frac{\lambda_{\max}^2}{\lambda_{\min}^2}$$

განვსაზღვროთ ახლა y კოორდინატის გადახრა ნომინალური რეჟიმიდან, როცა $\mu = 0$

$$y(x_1) = y(\chi_1 + v) = f(v + \chi_1) = f(v) + \frac{df}{dx}(\xi)\chi_1,$$

სადაც ξ ინტერვალის $[v, v + \chi_1]$ ზოგიერთი წერტილია. შესაბამისად,

$$\varepsilon = g - y(x_1) = g(t) - f(v) - \frac{df}{dx}(\xi)\chi_1, \text{ სადაც } g(t) - f(v) = 0. \text{ ვინაიდან ეს}$$

შეესაბამება იდეალურ მოსრიალე რეჟიმს, ამიტომ

$$|\varepsilon| \leq \left| \frac{df}{dx}(\xi) \right| |\chi_1| \leq 2 \left| \frac{df}{dx}(\xi) \right| \mu\mu_0 \sum_{j=1}^n |b_{ij}| \frac{\lambda_{\max}^2}{\lambda_{\min}^2},$$

მაშასადამე

$$|\varepsilon| \leq 2 \left| \frac{df}{dx}(\xi) \right| \mu \mu_0 \sum_{j=1}^n |b_{ij}| \frac{\lambda_{\max}^2}{\lambda_{\min}^2} \quad (3.6.9.)$$

ეს არის საძიებელი შეფასება. (3.6.9.)-დან ჩანს, რომ როცა $\mu \rightarrow 0$, განუთანხმობის ცდომილება $|\varepsilon| \rightarrow 0$.

3.7. დასკვნა

განხილულია უკუკავშირის მთავარ კონტურში მოსრიალე რეჟიმების გარეშე ოპტიმიზაციის სისტემის აგების პრაქტიკული მიზანშეწონილობა უწყვეტი მართვის გამოყენების საფუძველზე, რომელიც ფორმირდება $\frac{df}{dx}$ სიდიდის შესახებ რაიმე ინფორმაციის გარეშე. ეს ამოცანა წყდებოდა ძირითადი მართვის ხარჯზე, რომელიც მართავდა ობიექტის შესავალი პარამეტრების ცვლილებას. ამ თავში ოპტიმიზაციის ეს ამოცანა გადაწყვეტილია დამკვეთი ზემოქმედების პარამეტრების კომპუტაციის საფუძველზე და მოსრიალე რეჟიმის ორგანიზებით უკუკავშირის მეორე კონტურში, რომელიც გააჩნიათ განხილული კლასის ოპტიმიზაციის სისტემებს. განხილულია ოპტიმიზაციის ალგორითმები მართვის საშუალო მნიშვნელობით, რომელიც ემყარება დინამიკური ფილტრის გამოყენებას, მაგალითად, ინერციული რგოლის დროის მცირე მუდმივათი, რომლის დანიშნულებაა წყვეტილი სიგნალის გასწორება, თუმცა ასეთი ფილტრის გამოყენება არ იძლევა სისტემაში იდეალური მოსრიალე რეჟიმის არსებობის საშუალებას. შემუშავებულია ოპტიმიზაციის ალგორითმები მართვადი დამკვეთი ზემოქმედებით. ნახვენებია, რომ დამკვეთი ზემოქმედების ცვლილების სიჩქარე წარმოდგენილია ორი სიგნალის ჯამით, რომელთა დანიშნულებაა სხვადასხვა ამოცანის გადაწყვეტა. პირველი განსაზღვრავს დამკვეთი ზემოქმედების კანონს მოსრიალე რეჟიმში, მეორე განკუთვნილია ორი პირობის დასაკმაყოფილებლად: ჯერ ერთი, სისტემაში საწყისი პირობების შესაქმნელად, რომლის დროსაც გარანტირებულია მოსრიალე რეჟიმის წარმოქმნა, და მეორე – სისტემის მოძრაობის სტაბილიზაციისათვის ექსტრემუმის მიდამოში. ნახვენებია, რომ იდეალური მოსრიალე რეჟიმისათვის სისტემის ძიების სიზუსტე განსაზღვრულია ინერციული რგოლის

7 სიდიდით და ოპტიმიზაციის ალგორითმები დამკვეთი ზემოქმედების მართვადი სიჩქარით გამოირჩევა მაღალი დაბრკოლება მდგრადობით და ამის გამო უპირატესობა აქვს სხვა შემთავაზებულ ალგორითმებთან. განხილულია სისტემის მდგრადობა, როდესაც ობიექტის გამოსავალ კოორდინატზე ადგილურად გამოყენებულია სტაციონარული ნორმალური სიგნალი და ნაჩვენებია, თუ როგორ ინარჩუნებს ზემოთ აღწერილი მართვადი დამკვეთი ზემოქმედების ალგორითმი შრომისუნარიანობას დაბრკოლების მოქმედების ქვეშ. გამოკვლეულია ოპტიმიზაციის გარდამავალი პროცესის თვისობრიობა მცირე პარამეტრის მეთოდის გამოყენებით, როცა გათვალისწინებულია რეალური სისტემის დინამიკა. ნაჩვენებია, რომ ამ შემთხვევაშიც საძიებელი შეფასება – განუთანხმობის ცდომილება ε მიისწრაფის ნულისკენ.

თავი 4. ოპტიმალური მართვის ბინარული სისტემების დინამიკური თვისებების გამოკვლევა

4.1. შესავალი

ოპტიმალური მართვის ალგორითმების პრაქტიკული რეალიზაციის დროს, რეგულირების რეალური არხების მახასიათებლები შეიძლება მნიშვნელოვნად განსხვავდებოდეს იდეალურისაგან. ასეთი სიტუაცია შეიძლება შეინიშნებოდეს, მაგალითად, ოპტიმალური მართვის სისტემებში, რომლებიც ტექნიკურად რეალიზებულია პნევმატურ და სხვა ელემენტებზე, რომლებსაც გააჩნიათ საკუთარი დინამიკა და ეს შეიძლება განხილულ იქნას როგორც არაიდეალურობა რეგულირების არხებში. ასეთ შემთხვევაში ისმება ამოცანა, გამოკვლეულ იქნას დინამიური არაიდეალურობის გავლენა წრფივი, არსებითად არასტაციონარული ობიექტის მართვისას.

ასეთი ობიექტის მართვისას უფრო ეფექტურია ბინარობის პრინციპის გამოყენება, რომლის იდეა მდგომარეობს მართვის სისტემის მდგომარეობის სივრცის გაფართოებაში, ანუ ობიექტის მდგომარეობის კოორდინატების და მართვის სისტემის ოპერატორების ერთობლივ განხილვაში.

განიხილება დინამიური თვისებების შესწავლის პრობლემები ოპტიმალური მართვის ბინარულ სისტემებში, როცა ადგილი აქვს სხვადასხვა ტიპის არაიდეალურობას გადამრთველი მოწყობილობების არხებში. შემოთავაზებულია ანალიზის მეთოდები და მიღებულია თანაფარდობები, რომლებიც უზრუნველყოფენ ჩაკეტილი სისტემის სინთეზის განხორციელებას მოცემულ პირობებში. გამოკვლეულია მართვადი პროცესების ასიმპტოტური თვისებების ანალიზი. ნაჩვენებია სხვადასხვა არაიდეალურობების გავლენა მართვის ბინარული სისტემის დინამიკაზე. განიხილება ბინარული სისტემის დინამიური თვისებების ანალიზის პრობლემა რეგულირების არხებში გამოყენებულ გადამრთველ მოწყობილობებში დაგვიანებულის არსებობისას. ჩამოყალიბებულია დაგვიანების სიდიდის გავლენის შეფასების მეთოდიკა ჩაკეტილი სისტემის დინამიურობაზე. მიღებულია რეგულირების ხარისხის შეფასება.

მართვადი პროცესების დინამიკის გამოკვლევა უფრო დაწვრილებით განხორციელებულია იმ წინადადებაში, რომ ინფორმაცია პრო-

ცესის მდგომარეობის შესახებ არის სრული და მართვა მიმდინარეობს გამზომი მოწყობილობების არხებში ხმაურის არსებობის გარეშე. ამავე დროს, ავტომატური მართვის სისტემების ექსპლუატაცია, როგორც წესი, მიმდინარეობს მნიშვნელოვანი ხმაურის პირობებში. ამასთან დაკავშირებით უფრო აქტუალური ხდება ავტომატური მართვის ბინარული სისტემების დინამიურ თვისებებზე ხმაურის გავლენის შეფასება. ამ თავში განიხილება შეზღუდული ხმაურის პირობებში მართვის ბინარული სისტემების ქცევა წრფივი სასრულგანზომილებიანი დინამიური პროცესებით.

განხილულია ავტომატური მართვის ბინარული სისტემების მდგრადობის პრობლემა გადამრთველ მოწყობილობებში დაგვიანებისა და პისტერიზისის ტიპის არაიდეალურობების არსებობისას. გამოკვლეულია ამ ტიპის არაიდეალურობების ზემოქმედება ბინარული სისტემების დინამიკაზე. შემოთავაზებულია ასეთი სისტემების ანალიზის მეთოდები, გამოკვლეულია მათი თვისებები.

4.2. ოპტიმალური მართვის ბინარული სისტემების სინთეზის მეთოდები რეზულირების არხებში არაიდეალურობების არსებობისას

არასტაციონარული წრფივი დინამიური ობიექტებისათვის [74] შემოთავაზებულია, ხოლო [75-78] მნიშვნელოვნად განვითარებულია ახალი მიდგომა, რომელიც ეყრდნობა მასტაბილიზებელ უკუკავშირის სინთეზს. [74-78] მიღებული შედეგები იძლევა საშუალებას ვამტკიცოთ, რომ განსაზღვრული დაშვებებით განუსაზღვრელი წრფივი დინამიური პროცესების მართვის ამოცანა შესაძლებელია სრულყოფილად გადაიჭრას. ასეთ დაშვებების რიცხვს, კერძოდ, მიეკუთვნება გადამრთველი მოწყობილობების არხებში დინამიური არაიდეალურობების და გამზომ ხელსაწყოებში შემოფოთებების არარსებობა. ამასთან ერთად, ბინარულ სისტემებში არაიდეალურობების და შემოფოთებების გავლენის შეფასება მართვადი პროცესების დინამიკაზე არის ძალზე მნიშვნელოვანი ამოცანა შესაძლო პრაქტიკული გამოყენების თვალსაზრისით. აღსანიშნავია, რომ ბინარული სისტემების დინამიური თვისებების გამოკვლევისას, როცა რეგულირების არხებში არსებობს არაიდეალურობები, რომლებიც აღიწერება მეორე რიგის

წრფივი დიფერენციალური განტოლებების სისტემით, ამოხსნის მიდგომა მოყვანილია [79].

ნაშრომში შემოთავაზებულია ოპტიმალური მართვის ბინარული სისტემების სინთეზის მეთოდები რეგულირების არხებში არაიდეალურობების და ნებისმიერი სრულგანზომილებიანი ობიექტების პროცესის მდგომარეობის ინფორმაციაში შეშფოთების არსებობისას.

ამოცანის დასმა

განიხილება დინამიური სისტემა, რომელიც აღიწერება ვექტორული დიფერენციალური განტოლებით

$$S: \dot{x}(t) = A(t)x(t) + D(t)z(t) + B(t)u(t), \quad t \geq t_0 \quad (4.2.1)$$

სადაც t – არის დრო (დამოუკიდებელი ცვლადი); t_0 – დროის საწყისი მომენტი, $x(t)$ – მართვადი პროცესი. ყოველი ფიქსირებული $t (t \geq t_0)$:

$x = (x_1, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^n$ – სისტემის მდგომარეობის კოორდინატების ვექტორია, $z = (z_1, \dots, z_k)^T \in \mathbb{R}^k$ – კოორდინატული შეშფოთებების ვექტორია, $A(t) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $d(t) \in \mathbb{R}^{n \times k}$, $B(t) \in \mathbb{R}^n$ – სისტემის პარამეტრებია; $u(t) \in \mathbb{R}^1$, – მართვა; T – ტრანსპონირების ნიშანია.

ვარაუდობენ, რომ $A(t), D(t), B(t)$ პარამეტრები და $z(t)$ შეშფოთება არის დროის ნებისმიერი ფუნქციები და განისაზღვრებიან სიზუსტით კლასამდე, გამოყოფილი თანაფარდობებით:

$$\left. \begin{aligned} A^- \leq A(t) \leq A^+; \quad D^- \leq D(t) \leq D^+; \\ B^- \leq B(t) \leq B^+; \quad \|z(t)\| \leq z_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.2.2)$$

და სრულდება ყველა $t \geq t_0$. (4.2.2)-ში A^\pm, D^\pm, B^\pm – შესაბამისი განზომილების ცნობილი მატრიცებია, z_0 – ცნობილი მუდმივაა. სამუშაოში გამოიყენება შემდეგი აღნიშვნები: $\|\cdot\|$ – ოკტაედრული ნორმის ნიშანია; $\text{sgn}(y)$ – სკალარული არგუმენტის ნიშნის ფუნქციაა; $|y| = (|y_1|, \dots, |y_p|)^T \in \mathbb{R}^p$ – ვექტორი შედგენილი შესაბამისი ვექტორის მოდულებიდან $y = (y_1, \dots, y_p)^T \in \mathbb{R}^p$. თუ $W \in \mathbb{R}^{p \times q}$ რაიმე მატრიცაა,

მაშინ w_i და w^j - i -რი სტრიქონი და j -რი სვეტია W მატრიცის, $(i = \overline{1, p}; j = \overline{1, q})$.

(4.2.1) და (4.2.2) ობიექტების მართვა ხორციელდება გადახრის უკუკავშირის გამოყენებით $u(t) = u(x(t), z(t), t)$, რომლებიც ამორჩევალი ფუნქციების კლასიდან. მართვა მითითებული კლასის გამოყენებით უზრუნველყოფს S -სახის ჩაკეტილ სისტემიდან ამონახსნების არსებობას და $t \geq t_0$ ნახევარდერძზე გახანგრძლივებას:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(x(t), z(t), t) + D(t)z(t), t \geq t_0 \quad (4.2.3)$$

ახლა კი ჩამოვყალიბოთ მართვის ამოცანა. ის შედგება ისეთი $u \in U$ მართვის ამორჩევაში და პირობების განსაზღვრაში, რომლის დროსაც შესრულდება თანაფარდობანი

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \|x(t)\| \in B_r, \quad (4.2.4)$$

$$\|x(t)\| \leq N_1 \|x(t_0)\| + N_2, \quad t \geq t_0, \quad (4.2.5)$$

სადაც N_1, N_2, r - რაიმე დადებითი მუდმივებია, $B_r = \{x \in \mathbb{R}^n : \|x\| \leq r\}$.

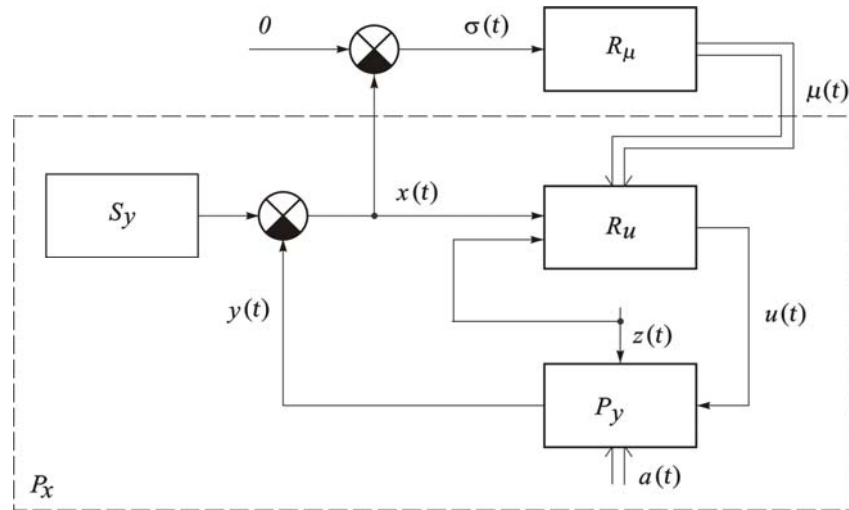
მართვის დასმული ამოცანა შესაძლებელია გადაწყვეტილ იქნას ბინარული სისტემების თეორიის მეთოდებით [74-78]. ბინარობის პრინციპის იდეა [74] მდგომარეობს სისტემის მდგომარეობის სივრცის გაფართოებაში, ანუ ობიექტის კოორდინატების მდგომარეობის და მართვის სისტემის ოპერატორების ერთობლივ განხილვაში.

ამასთან, მართვის სისტემის ოპერატორები შესაძლებელია გარდაიქმნან, იმის მსგავსად, როგორც ამას ადგილი აქვს ობიექტის მდგომარეობის კოორდინატებისათვის. ამგვარად, ოპერატორები შესაძლებელია იყვნენ არაფიქსირებული, ხოლო ფორმირდებოდნენ სისტემის მდგომარეობაზე დამოკიდებულობის მიხედვით მისი ფუნქციონირების პროცესში.

ნახ. 4.2.1. მოყვანილია მართვის ბინარული სისტემის სტრუქტურული სქემა, სინთეზირებული კოორდინატულ-ოპერატორული უკუკავშირის გამოყენებით [79].

სტრუქტურულ სქემაში გამოყენებულია შემდეგი აღნიშვნები:

P_y – მართვის ობიექტი $y(t)$ მდგომარეობის კოორდინატების ვექტორით და მასზე მოქმედი $a(t)$ პარამეტრული და $z(t)$ კოორდინატული შეშფოთებებით;



ნახ. 4.2.1

S_y – დამკვეთი, რომელიც გამოიმუშავებს გარე $y^s(t)$ დავალებას;

R_u – უკუკავშირის ოპერატორი, რომელიც ახორციელებს $x(t) = y^s(t) - y(t)$ კოორდინატის დინამიურ გარდაქმნას $u(t)$ მმართველ კოორდინატაში. [60]-ს შესაბამისად, ასეთ უკუკავშირს ეწოდება კოორდინატული უკუკავშირი (კშპ);

R_μ – ოპერატორი, რომელიც $\sigma(t)$ კოორდინატის მიხედვით აფორმირებს ოპერატორულ $\mu(t)$ ცვლადს, რომელიც განსაზღვრავს R_u ოპერატორის სახეს. ასეთ უკუ კავშირს ეწოდება კოორდინატულ-ოპერატორული უკუკავშირი (კოშპ) [74].

[74-78] შესაბამისად, ასეთ სისტემაში მართვის $u \in U$ ამორჩევა მიმართულია პირობების შესრულებაზე, რომლის შესრულების დროსაც S -სისტემის თითოეული გადაწყვეტა რაღაც დროის მომენტის შემდეგ ჩაიძირება სიმრავლეში

$$G_{\delta, \eta} = \{x \in \mathbb{R}^n : |\sigma(x)| \leq \delta \beta |x| + \eta\}, \quad (4.2.6)$$

$$\sigma(t) = c x(t), \quad (4.2.7)$$

სადაც σ – ფუნქციაა, მოცემული რაღაც \mathbb{R}^n ჰიპერსიბრტყეზე, $c^T \in \mathbb{R}^n$, $c_n \stackrel{\Delta}{=} 1$, $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_n)^T \in \mathbb{R}^n$ მუდმივი ვექტორები, $(0 < \beta_i \leq 1, i = \overline{1, n})$; $\delta > 0$, $\eta \geq 0$ რაღაც მუდმივებია. ამასთან იგულისხმება, რომ თუ ივარაუდება ჩართვა $x \in G_{\delta, \eta}$, მაშინ პროცესებს S -სისტემაში გააჩნია სასურველი თვისებები. ამრიგად, დასმული ამოცანის ამოსხნა დაიყვანება შემდეგი პარამეტრების განსაზღვრაზე:

- 1) c, δ, β, η – მუდმივები, რომლებიც მოთხოვნილი დინამიკის გარანტიას იძლევიან, როცა $x \in G_{\delta, \eta}$;
- 2) $u \in U$ – უზრუნველყოფს მართვადი პროცესების მოცემულ ასიმპტოტიკას, როცა $x \in G_{\delta, \eta}$.

განვიხილოთ ერთ-ერთი შესაძლო ალგორითმი, რომელიც ამოსხნის მართვის ამოცანას (4.2.4), (4.2.5) S -სისტემისათვის (4.2.3), სინთეზირებული სტრუქტურული სქემის ჩარჩოებში, მოყვანილს ნახ. 4.2.1-ზე.

ალგორითმები კოორდინატული და კოორდინატულ-ოპერატორული უკუკავშირებით, ვრცლად გამოკვლეული ქვემოთ, მოცემულია როცა $t \geq t_0$, შემდეგი თანაფარდობებით:

$$u(x, z, t) = \mu(t)(\kappa^0 |x(t)| + l^0 |z(t)|) \quad (4.2.8)$$

$$\dot{\mu}(t) = \begin{cases} -\alpha \operatorname{sgn} \sigma(t), & \text{როცა } |\mu(t)| \leq 1, \\ -\omega \mu(t), & \text{როცა } |\mu(t)| > 1, \quad |\mu(t_0)| \leq 1. \end{cases} \quad (4.2.9)$$

სადაც $\alpha = \operatorname{const} > 0$ – კოორდინატულ-ოპერატორული უკუკავშირის კონტურში გაძლიერების კოეფიციენტი; ω – რაიმე მცირე დადებითი რიცხვია; μ – ოპერატორული ცვლადია, რომელიც ფორმირდება (პოშპ)-ის კონტურში; $\kappa^0 = (\kappa_1^0, \dots, \kappa_n^0)^T \in \mathbb{R}^n$, $l^0 = (l_1^0, \dots, l_\kappa^0) \in \mathbb{R}^\kappa$ – ვექტორის მუდმივებია, რომლებიც განსაზღვრავენ გაძლიერების კოეფიციენტებს (პშპ) კონტურში.

იმ შემთხვევაში, როდესაც $z(t)$ შემფოთება შეუძლებელია გაიზომოს, (4.2.8) ნაცვლად შესაძლებელია u -ს ფორმირებისათვის გამოყენებულ იქნეს შემდეგი კანონი:

$$u(x, t) = \mu(t)(\kappa^0 |x(t)| + l z_0), \quad (4.2.10)$$

სადაც $l = \text{const} > 0$.

შემდგომში S -სისტემას, რომელიც ჩაკეტილია და ფუნქციონირებს (4.2.7)-(4.2.9), (4.2.10) ტიპის ალგორითმების გამოყენებით, ვუწოდებთ S_μ -სისტემას.

[77] განსაზღვრულია პირობები, რომლის დროსაც შესაძლებელია ამოიხსნას ამოცანები (4.2.4), (4.2.5), ანუ უზრუნველყოფილია მართვის პროცესების კრებადობა S -სისტემის საწყის კოორდინატების მოცემულ მიდამოში. S_μ -სისტემის გამოკვლევა ჩატარებულია იმ ვარაუდით, რომ რეგულირების არხებს იდეალური მახასიათებლები გააჩნიათ, ანუ (4.2.7)-(4.2.9) თანაფარდობები სრულად ადეკვატურად აღწერენ მართვის ალგორითმს. მაგრამ, მართვის ალგორითმების პრაქტიკული რეალიზაციის დროს, არხების რეალური მახასიათებლები შესაძლებელია მნიშვნელოვნად განსხვავდებოდეს იდეალურისაგან, მოცემული (4.2.7)-(4.2.9) თანაფარდობებით. ასეთ სიტუაციას შესაძლებელია ადგილი ჰქონდეს, მაგალითად, მართვის სისტემებში რომლებიც რეალიზებულია პნევმატურ და სხვა ელემენტებზე, რომლებსაც გააჩნია საკუთარი დინამიკა, და შესაძლებელია განიხილებოდეს როგორც არაიდეალურობის მქონე მართვის არხი. მაშასადამე, წარმოიშვა კვლევის ამოცანა – მართვის ალგორითმში დინამიური არაიდეალურობის გავლენა ბინარულ სისტემების დინამიკაზე.

მოცემულ სამუშაოში ანალიზირდება S_μ – სისტემის თვისებები არაიდეალიზირებულობების არსებობისას sgn ფუნქციის რეალიზაციისას (4.2.9)-ს მიხედვით.

პირველ შემთხვევაში ითვლება, რომ ოპერატორული μ ცვლადის ფუნქციონირების კანონი რეალიზდება (4.2.9)-ში შემდეგი სახით:

$$\dot{\mu}(t) = \begin{cases} -\alpha \operatorname{sgn} \sigma(t - \tau), & \text{როცა } |\mu(t)| \leq 1, \\ -\omega \mu(t), & \text{როცა } |\mu(t)| > 1, \quad |\mu(t_0)| \leq 1, t \geq t_0. \end{cases} \quad (4.2.11)$$

ჩავთვალოთ, რომ $\sigma(t)$ არის $G_{[t_0 - \tau; t_0]}$ კლასის ფუნქცია. (4.2.11) თანაფარდობის ინტეგრირება შესაძლებელია როგორც გადამრთველი მოწყობილობის არხში τ დროით დაყოვნება.

ზოგად შემთხვევაში არაიდეალურობის მეორე ტიპი შეგვიძლია წარმოვიდგინოთ შემდეგნაირად:

$$\dot{\mu}(t) = \begin{cases} -\alpha \operatorname{sgn} \sigma(t), & \text{როცა } |\sigma(t)| \geq \Delta \text{ და } |\mu(t_0)| \leq 1 \\ f(\Delta, x, t), & \text{როცა } |\sigma(t)| < \Delta \text{ და } |\mu(t_0)| \leq 1 \\ -\omega \mu(t), & \text{როცა } |\mu(t_0)| \leq 1, t \geq t_0 \end{cases} \quad (4.2.12)$$

სადაც Δ – მუდმივაა, რომელიც განსაზღვრავს სკალარული $f(\Delta, x, t)$ ფუნქციის მოქმედების არეს და ახასიათებს არაიდეალურობის სახეს. ვარაუდობენ, რომ ყველა $t \geq t_0$ და $x \in \mathbb{R}^n$ სრულდება შეზღუდვა

$$f(\Delta, x, t) \leq f_0 = \text{const.}$$

(4.2.12) თანაფარდობა შესაძლებელია განვიხილოთ როგორც $[-\Delta; \Delta]$ მონაკვეთზე „კვადრი არეს“ არსებობა, რომელზეც კოორდინატულ-ოპერატორულ უკუკავშირის კონტურში რეგულირების კანონს (4.2.9) აქვს არარეგულარული ხასიათი, განსაზღვრულს $f(\Delta, x, t)$ სახით.

არსებულ ნაშრომში გამოიკვლევა ასევე შემთხვევა კოორდინატულ-ოპერატორულ უკუკავშირის კონტურში ორივე ტიპის არაიდეალურობის კომბინაციის (4.2.11) და (4.2.12) არსებობა. ამ შემთხვევაში $\dot{\mu}(t)$ განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით

$$\dot{\mu}(t) = \begin{cases} -\alpha \operatorname{sgn} \sigma(t - \tau), & \text{როცა } |\sigma(t)| \geq \Delta \text{ და } |\mu(t_0)| \leq 1 \\ f(\Delta, x, t), & \text{როცა } |\sigma(t)| < \Delta \text{ და } |\mu(t_0)| \leq 1 \\ -\omega \mu(t), & \text{როცა } |\mu(t_0)| > 1, \quad |\mu(t_0)| \leq 1, t \geq t_0 \end{cases}, \quad (4.2.13)$$

სადაც $\sigma(t)$ არის $G_{[t_0 - \tau; t_0]}$ კლასის ფუნქცია.

შემდგომში, S -სისტემას ჩაკეტილს ალგორითმებით (4.2.7), (4.2.8), (4.2.11), ვუწოდებთ S_μ^τ -სისტემას; S -სისტემას ჩაკეტილს ალგორითმებით

(4.2.7), (4.2.8), (4.2.12), ვუწოდებთ S_μ^Δ -სისტემას და, ბოლოს, S -სისტემას ჩაკეტილს ალგორითმებით (4.2.7), (4.2.8), (4.2.13) უწოდებთ $S_\mu^{\tau, \Delta}$ -სისტემას.

ნაშრომში დეტალურად აღიწერება $S_\mu^{\tau, \Delta}$ სისტემის გამოკვლევის მეთოდები. ეს დაკავშირებულია იმასთან, რომ, პირველ რიგში, გამოყენებული მიდგომის ანალიზის თავისებურებანი განსახილავი სისტემების კლასში სწორედ, რომ მკვეთრად მუდავნდება ამ შემთხვევაში. მეორე რიგში, $S_\mu^{\tau, \Delta}$ -სისტემის ანალიზის მეთოდები არის უნივერსალური და გამოსაყენებელია როგორც S_μ^τ -სისტემის ანალიზისათვის, ასევე S_μ^Δ -სისტემისათვის.

გავაგრძელებთ რა დასმული ამოცანის განხილვას ვაჩვენებთ, რომ მართვის სინთეზის ამოცანა S_μ -სისტემაში, როცა გაზომვებში არსებობს შეზღუდული შეშფოთება, ინფორმაციის იდეალური მდგომარეობის პირობებში ამოცანა შესაძლებელია დაყვანილ იქნეს სინთეზის ამოცანაზე S_μ^Δ -სისტემაში.

ვთქვათ, S -სისტემის (4.2.1) მართვა იგება (4.2.7)-(4.2.9) ალგორითმების გამოყენებით, მაგრამ ამასთან რეალური ობიექტიდან $x(t)$ სიდიდე აითვლება ცდომილებით:

$$\hat{x}(t) = x(t) + \xi(t), \quad (4.2.14)$$

სადაც $\xi \in \mathbb{R}^n$ – შეზღუდული შეშფოთებაა ნებისმიერი ბუნების $\|\xi(t)\| \leq \xi_0 = \text{const}$ ყველა $t \geq t_0$.

განსახილავ სისტემაში წარმოიქმნება მართვის სინთეზის ამოცანა სმაურიანი სიგნალის მიხედვით. ამ შემთხვევაში:

$$\hat{\sigma}(t) = c\hat{x}(t) = cx(t) + c\xi(t) = \sigma(t) + c\xi(t) \quad (4.2.15)$$

ნათელია, რომ $\text{sgn } \hat{\sigma}(t) = \text{sgn } \sigma(t)$ ტოლობა გარანტირებულია მხოლოდ როცა $|\sigma(t)| \geq \Delta$, სადაც

$$\Delta > c_m \xi_0 \geq \sup_{t \geq t_0} |c \xi(t)|, \quad c_m = \max_{i=1, n} |c_i| \quad (4.2.16)$$

აქედან გამომდინარეობს (4.2.12) სახის არაიდეალურობის არსებობის აუცილებლობა $\mu(t)$ რეალიზაციის დროს.

შეშფოთების არსებობა გავლენას ახდენს მართვის $u(t, \hat{x}(t), z(t))$ სიგნალის ფორმირებაზე. თუ გავითვალისწინებთ, რომ (4.2.10) თანახმად: $u(t, \hat{x}(t), z(t)) = \mu(t)(\kappa^0 |\hat{x}(t)| + lz_0)$ და $|\hat{x}_i| = |x_i + \xi_i| = |x_i| + \text{sgn}(x_i \xi_i) |\xi_i|$, ($i = \overline{1, n}$) (4.2.3)-დან მივიღებთ:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t, x(t), z(t)) + D_\xi(t)z_\xi(t); \quad t \geq t_0 \quad (4.2.17)$$

$$\left. \begin{aligned} D_\xi(t) &= (D(t); \mu(t)B(t)\kappa^0 S^{x\xi}(t)) \\ z_\xi(t) &= (z(t), |\xi(t)|)^T \end{aligned} \right\}, \quad (4.2.18)$$

სადაც $S^{x\xi}(t) = \text{diag}(\text{sgn}(x_i(t)\xi_i(t)))$,

ყველა ფიქსირებული $t: D_\xi(t) \in \mathbb{R}^{n \times (n+k)}$, $z_\xi(t) \in \mathbb{R}^{n+k}$.

აღვნიშნოთ, რომ $D_\xi(t)$ და $z_\xi(t)$ აკმაყოფილებენ (4.2.2) სახის თანაფარდობებს, ანუ $D_\xi^- \leq D_\xi(t) \leq D_\xi^+$, $\|z_\xi(t)\| \leq z_0$, ყველა $t \geq t_0$. ამაში დარწმუნება ადვილია (4.2.2) და (4.2.18) თანაფარდობებიდან გამომდინარე.

როგორც (4.2.17) და (4.2.12) გამომდინარეობს, კვლავ მივდივართ $S_\mu^{\tau, \Delta}$ -სახის მართვის სისტემის სინთეზის ამოცანაზე, ანუ კოორდინატულ-ოპერატორულ კონტურში არაიდეალურობის არსებობის და შეშფოთებების გარეშე.

ძირითადი შედეგები

განხილული სისტემების ფორმალური შედეგების თვისებების ანალიზისას, ყურადღება ექცევა შემდეგს.

თანაფარდობებით, მოცემულს S_μ^Δ -სისტემიდან გამომდინარეობს, რომ ის აღიწერება დიფერენციალური განტოლებებით წყვეტილი მარჯვენა მხარით. წყვეტებს აქვს ადგილი როცა $|\mu| = 1$, და შესაძლებელია განპირობებული იყვნენ $f(\Delta, x, t)$ ფუნქციის სტრუქტურით. კერძო შემ-

თხვევაში, როცა $f(\Delta, x, t) = -\alpha \operatorname{sgn} \sigma(x)$ S_μ^Δ -სისტემა გადაგვარდება S_μ -სისტემაში და წყვეტებს ექნება ადგილი როცა $|\mu(t)|=1$ და $\operatorname{sgn} \sigma(x)=0$.

სისტემა $S_\mu^{\tau, \Delta}$ როცა $\tau > 0$ და $\Delta \geq 0$ აღიწერება დიფერენციალურ-სხვაობითი განტოლებებით. მსგავსი სისტემების გამოკვლევა მნიშვნელოვნად გართულებულია იმით, რომ, ზოგადად რომ ვთქვათ, მათი ფაზური სივრცე არის უსასრულო ფუნქციონალური სივრცე. მაგრამ განსახილავი დიფერენციალურ-სხვაობითი განტოლებების კლასისათვის შესაძლებელია გამოვიყენოთ პირობა, რომლის დროსაც შესაძლებელია გამოვიყენოთ \mathbb{R}^n სივრცე $S_\mu^{\tau, \Delta}$ -სისტემაში მართვადი პროცესების ანალიზისათვის.

$S_\mu^{\tau, \Delta}$ -სისტემის ამონახსნი განისაზღვრება $(x(t), \mu(t))$ წყვილით დროის t მომენტში. ამოხსნის არსებობის და მისი დროის $t \geq t_0$ ნახევარდერძის გაგრძელების საკითხები გადაიჭრება შედეგების შესაბამისად მოყვანილი [80].

გადავიდეთ კვლევის შედეგების გადმოცემაზე. შემდგომში მნიშვნელოვანი როლი ენიჭება მოყვანილ ვარაუდებს.

ვარაუდი 1⁰. ყველა $\tilde{c} \in \Sigma$ აქვს ადგილი თანაფარდობას:

$$\inf |\tilde{c}b(t)| \geq \text{const} > 0 \quad (4.2.19)$$

სადაც $\Sigma = \{\tilde{c}^T \in \mathbb{R}^n : \tilde{c} = \lambda e + c, |\lambda| \leq 1, e = (\pm \delta \beta_1, \dots, \pm \delta \beta_n)\}$. ამის გარდა, $\tilde{c}b(t)$ ფუნქცია $[t_0; \infty)$ ნახევარმონაკვეთზე ინახავს თავის ნიშანს.

$S_\mu^{\tau, \Delta}$ -სისტემაში მმართველი პროცესის ასიმპტოტური თვისებების ანალიტიკური კვლევის ჩასატარებლად, როცა სრულდება $x(t) \in G_{\delta, \eta}$ ჩართვა, მოსახერხებელია ე. წ. RS -სისტემის გამოყენება:

$$RS: \begin{cases} \dot{x}' = A_x(t)x'(t) + h_x(t)\sigma(t) + D_x(t)z(t) \\ \dot{\sigma} = a_\sigma(t)x'(t) + h_\sigma(t)\sigma(t) + d_\sigma(t)z(t) + cb(t)u(t) \end{cases} \quad (4.2.20)$$

განტოლება (4.2.20) მიიღება სისტემა (4.2.1)-სთვის კვაზიგაყოფის მეთოდის [81] გამოყენებით. S -სისტემის $A_x, h_x, D_x, a_\sigma, h_\sigma, d_\sigma$ გამოსახუ-

ლებები შესაძლებელია ვიპოვოთ [81]. ფორმალურად, კვაზიგაყოფის მე-
 თოდის გამოყენება მდგომარეობს ცვლადების შეცვლაში თანაფარ-
 დობით (4.2.1):

$$x(t) = M(t) \begin{pmatrix} x'(t) \\ \sigma(t) \end{pmatrix} \quad (4.2.21)$$

სადაც $x' \in \mathbb{R}^{n-1}$, $\sigma = cx$, ხოლო მატრიცა არ არის გადაგვარებული
 როცა სრულდება ვარაუდი 1^0 და აქვს სახე:

$$M(t) = \left(\begin{array}{c|c} E_{n-1} & b(t) \\ \hline -c' & cb(t) \end{array} \right), \quad \det M(t) = 1 \quad (4.2.22)$$

სადაც $c' = (c_1, \dots, c_{n-1})$, E_{n-1} ერთეულოვანი მატრიცა. (4.2.21) და (4.2.22)

$$\text{გამომდინარეობს } x(t) = \left(\begin{array}{c} E_{n-1} \\ -c' \end{array} \right) x'(t) + \frac{b(t)}{cb(t)} \sigma(t). \quad (4.2.23)$$

ვარაუდი 2⁰. $M(t)$ და $M^{-1}(t)$ მატრიცებისათვის ადგილი აქვს
 უტოლობას:

$$\sup_{t \geq t_0} \|M(t)\| < \infty, \quad \sup_{t \geq t_0} \|M^{-1}(t)\| < \infty.$$

შემდეგი მტკიცება იძლევა $S_\mu^{\tau, \Delta}$ -სისტემაში მართვადი პროცესის
 ხასიათის შეფასების საშუალებას $x(t) \in G_{\delta, \eta}$ ჩართვის შესრულებისას.

თეორემა 1. ვთქვათ კოშის $\Phi(t, t')$ სისტემის $\dot{x}' = A_x x'$ მატრიცი-
 სათვის

$$\text{ადგილი აქვს: } \|\Phi(t, t')\| \leq c_0 e^{-\delta_0(t-t')}, \quad t \geq t' \geq t_0, \quad (4.2.24)$$

სადაც c_0, δ_0 – დადებითი მუდმივებია.

ამის გარდა, ვთქვათ, ჭეშმარიტია ვარაუდები 1^0 და 2^0 და
 სრულდება თანაფარდობები

$$\delta_0 > \kappa \quad (4.2.25)$$

$$\nu > 0 \quad (4.2.26)$$

მაშინ, თუ $t \geq t_1$, $x(t) \in G_{\delta, \eta}$, როცა $t \geq t_1$ ჭეშმარიტია შეფასება

$$\|x(t)\| \leq R^{-(\delta_0 - \kappa)(t-t_1)} \|x(t_1)\| + (T + \eta P) \left(1 - e^{-(\delta_0 - \kappa)(t-t_1)} \right) + \eta \cdot Q \quad (4.2.27)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \|x(t)\| = T + \eta(P + Q), \quad (4.2.28)$$

$$\text{სადაც } R = c_0 \sup_{t \geq t_0} \|M^{-1}(t)\| \cdot \gamma \quad (4.2.29)$$

$$T = c_0 \sup_{t \geq t_0} \|D_x(t)z(t)\| / (\delta_0 - \kappa) \quad (4.2.30)$$

$$P = c_0 \sup_{t \geq t_0} \|h_x(t)z(t)\| \frac{\gamma}{\nu} / (\delta_0 - \kappa) \quad (4.2.31)$$

$$Q = \frac{1}{\nu} \sup_{t \geq t_0} \left\| \frac{b(t)}{cb(t)} \right\| \quad (4.2.32)$$

$$\kappa = c_0 \sup_{t \geq t_0} \|h_x(t)\| \cdot \delta \beta_{\max} \cdot \gamma \quad (4.2.33)$$

$$\gamma = \frac{1 + c'_m}{\nu}; \quad \nu = 1 - \delta \beta_{\max} \sup_{t \geq t_0} \left\| \frac{b(t)}{cb(t)} \right\| \quad (4.2.34)$$

$$\beta_{\max} = \max_{i=1, n} \beta_i; \quad c'_m = \max_{i=1, n} |c'_i| \quad (4.2.35)$$

როგორც თეორემა I (4.2.27) და (4.2.28) მტკიცებულებებიდან გამომდინარე, ზოგად შემთხვევაში როცა $x(t) \in G_{\delta, \eta}$ შესაძლებელია გარანტირებულად ვამტკიცოთ მართვადი პროცესების კრებადობა რაიმე ნულის მიდამოში, რომლის რადიუსი $G_{\delta, \eta}$ სიმრავლის წრფივი η ზომის და T სიდიდის პროპორციულია. ამ მიდამოში კრებადობის სიჩქარე განისაზღვრება ისეთი პარამეტრებით როგორც არის $G_{\delta, \eta}$ სიმრავლის δ კუთხური ზომა და ვექტორის β და $|c'|$ მაქსიმალური კომპონენტები.

აღსანიშნავია, რომ თეორემა I ფორმულირებაში და დამტკიცებაში არსად არ გამოიყენება განსახილავი მართვის ალგორითმის კონკრეტული სახე. მნიშვნელოვან მომენტად არის მხოლოდ ის, რომ ასეთ სისტემაში მართვის ალგორითმმა უნდა უზრუნველყოს მართვის პროცესების მიკუთვნილობა $G_{\delta, \eta}$ სიმრავლისადმი, დაწყებული რაიმე დროის მომენტიდან. კონკრეტულად როგორ მიიღწევა ეს მოცემულ შემთხვევაში არ არის მნიშვნელოვანი.

განვიხილოთ $G_{\delta,\eta}$ სიმრავლის ინვარიანტობის საკითხი. შესაბამისი დებულება ჩამოვაყალიბოთ სამუშაოში გამოყენებული L – ინვარიანტობის ცნებაზე დაყრდნობით (იხ. განსაზღვრა I).

თეორემა 2. ვთქვათ $S_{\mu}^{\tau,\Delta}$ -სისტემისათვის სრულდება ვარაუდი 1^0 და შემდეგი თანაფარდობები:

$$\kappa_i^0 \operatorname{sgn}(\tilde{c}b) > \sup_{x \rightarrow \infty} \frac{|\tilde{c}a^i(t)|}{|\tilde{c}b(t)|}, \quad i = \overline{1, n} \quad (4.2.36)$$

$$l z_o \operatorname{sgn}(\tilde{c}b) > \sup_{x \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^k |ad^j(t)z_i(t)| / |\tilde{c}b(t)|, \quad (4.2.37)$$

ნებისმიერი $\tilde{c} = c + e$, $e = (\pm\delta\beta_1, \dots, \pm\delta\beta_n)$,

$$\alpha \geq \frac{2\left(\frac{L_1}{\delta} + \frac{L_2}{\eta} z_0\right)}{\left(1 - \frac{\Delta}{\eta}\right) - \tau\left(\frac{L_1}{\delta} + \frac{L_2}{\eta} z_0\right)}, \quad (4.2.38)$$

$$1 - \frac{\Delta}{\eta} > \tau\left(\frac{L_1}{\delta} + \frac{L_2}{\eta} z_0\right), \quad (4.2.39)$$

სადაც
$$L_1 = \max_{\substack{i=1, n \\ \tilde{c} \in \Sigma}} \left\{ \sup_{\substack{t \geq t_0 \\ |r| \leq 1}} \frac{1}{\beta_i} |\tilde{c}(a^i(t) + b(t)r\kappa_i^0)| \right\} \quad (4.2.40)$$

$$L_2 = \max_{\tilde{c} \in \Sigma} \sup_{t \geq t_0} 2\tilde{c}b(t)l \quad (4.2.41)$$

Σ განსაზღვრულია (4.2.19)-ში. მაშინ $G_{\delta,\eta}$ სიმრავლე არის $S_{\mu}^{\tau,\Delta}$ -სისტემის $G_{0,\Delta}$ -ინვარიანტული სიმრავლე.

თეორემა 2-ის პირობები განსაზღვრავენ შეზღუდვებს გაძლიერების კოეფიციენტებზე უკუკავშირის კონტურებში: კოორდინატულში (იხ. (4.2.36), (4.2.37)) და კოორდინატულ-ოპერატორულში (იხ. (4.2.38)). ამ პირობების შესრულება გარანტირებულია $G_{0,\Delta}$ – ინვარიანტულობა $G_{\delta,\eta}$ სიმრავლის მიმართ. მიუთითებთ მნიშვნელოვან განსხვავებაზე მოყვანილი პირობების იმ პირობებთან შედარებით, რომლებიც

ჩვეულებრივ გამოიყენება ბინარული სისტემის თეორიაში S_μ სისტემის სინთეზისათვის. ეს განსხვავება გამოსახულია (4.2.39) უტოლობაში. აქედან გამომდინარეობს სამი პრინციპული დასკვნა:

პირველი – η სიდიდე უნდა აკმაყოფილებდეს უტოლობას $\eta > \Delta$, ანუ ქვევიდან შეზღუდულია Δ სიდიდით, რომელიც განსაზღვრავს $f(\Delta, x, t)$ ფუნქციის მოქმედების არის ზომებს.

მეორე – $\eta = 0$ შეგვიძლია დაუშვათ მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როცა როგორც $z_0 = 0$, ასევე $\Delta = 0$, ანუ $S_\mu^{\tau, \Delta}$ -სისტემა გადაგვარდება სისტემაში დროით დაყოვნებებით გადამრთველ მოწყობილობებში, რომლებზეც არ მოქმედებენ კოორდინატული შეშფოთებები. მოცემული ნაშრომის ჩარჩოებში ითვლება, რომ $z_0 > 0$ და ამიტომ $\eta = 0$ შემთხვევა არ განიხილება.

მესამე – (4.2.39)-დან გამომდინარეობს, რომ არსებობს დაყოვნების $\tau_{კრ}$ კრიტიკული მნიშვნელობა, ისეთი, რომ ყველა $\tau \in [0; \tau_{კრ})$ -სთვის შესაძლებელია უზრუნველყოთ $G_{0, \Delta}$ – ინვარიანტულობა $G_{\delta, \eta}$ სიმრავლის მიმართ, ამავედროულად შენარჩუნდეს ლიპშიცის ფუნქციების კლასის მართვის კუთვნილება.

$\tau_{კრ}$ მნიშვნელობა განისაზღვრება შემდეგი თანაფარდობით:

$$\tau_{კრ} = \left(1 - \frac{\Delta}{\eta}\right) / \left(\frac{L_1}{\delta} + \frac{L_2}{\eta} z_0\right).$$

აღვნიშნოთ ასევე, რომ როცა $\tau = \tau_{კრ}$ დასმული ამოცანა, ზოგადად რომ ვთქვათ, შესაძლებელია ამოხსნილი იყოს წყვეტილი განტოლებების გამოყენებით; თუ კი $\tau > \tau_{კრ}$, მაშინ, ზოგადად შემთხვევაში, პრობლემა $G_{0, \Delta}$ – ინვარიანტულობა $G_{\delta, \eta}$ სიმრავლის მიმართ არ ამოიხსნება განხილული მეთოდებით და მისი ამოხსნისათვის უნდა ვეძებოთ განსხვავებული მიდგომებით.

შენიშვნა. (4.2.36), (4.2.37) თანაფარდობები არის $G_{0, \Delta}$ სიმრავლის მიზიდულობის საკმარისი პირობები. აღვნიშნოთ, რომ მითითებული პირობები ემთხვევა $G_{0, 0}$ სიმრავლის მიზიდულობის პირობებს მოყვა-

ნილს [75-78]. პირობების დასაბუთებისთვის შესაძლებელია გამოვიყენოთ იქ მოყვანილი მეთოდები. ამოცანის ამოსხნა მიზიდულობაზე, სიმრავლის $G_{\delta, \eta}$ ინვარიანტობაზე და ადრე ჩატარებული მართვადი პროცესების ასიმპტოტიკის გამოკვლევები, როცა $x \in G_{\delta, \eta}$ ნებართვას გვაძლევს გადავიდეთ ზოგიერთი შეფასებების დასაბუთებაზე. ადგილი აქვს შემდეგ თეორემას.

თეორემა 3. თუ შესრულებულია 1 და 2 თეორემების პირობები, მაშინ ნებისმიერად მართვადი პროცესი $S_{\mu}^{\tau, \Delta}$ -სისტემაში ყველა $t \geq t_0$ ჭეშმარიტია შეფასება: $\|x(t)\| \leq N_1 \|x(t_0)\| + N_2$, სადაც

$$N_1 = R \frac{c_M}{\delta \beta_{\min}} e^{F(2/\alpha + \tau)} \quad (4.2.42)$$

$$N_2 = T + R \frac{c_M}{\delta \beta_{\min}} e^{F(2/\alpha + \tau)} \frac{D_{\max}}{F} + \eta(Q + P) \quad (4.2.43)$$

$$F = \max_{S; |r| \leq 1} \left\{ \sup_{t \geq t_0} \|A(t) + rb(t)\kappa^0 S\| \right\} \quad (4.2.44)$$

ოპერაცია \max (4.2.44)-ში გამოითვლება ნებისმიერი გამოსახულებებით

$$S = \text{diag}(S_1, \dots, S_n), \quad S_i = \pm 1, \quad i = \overline{1, n}$$

$$D_{\max} = \sup_{t \geq t_0} \|D(t)z(t)\| \quad (4.2.45)$$

$$c_M = \max_{i=1, n} |c_i| = \max(1, c'_M), \quad \beta_{\min} = \min_{i=1, n} \beta_i \quad (4.2.46)$$

გამოსახულებები R, T, P, Q მოყვანილია (4.2.29)-(4.2.32).

დასკვნა

განხილული სისტემების კლასისთვის 1-3 თეორემებში მოყვანილი შედეგები იძლევა საშუალებას ავაგოთ მართვა და შევაფასოთ მისი ხარისხი. ასეთი სისტემების პარამეტრული სინთეზის სქემა წარმოადგენს ჩვეულებრივი ავტომატური მართვის ბინარული სისტემას, მაგრამ, დამატებით, აუცილებელია გავითვალისწინოთ (4.2.39) უტოლობა.

დასკვნისას აღვნიშნოთ, რომ ყველა მიღებული შედეგი ვრცელდება იმ შემთხვევებზე, როდესაც არაკონტროლირებადი ცვლადი $\tau(t)$

და $\Delta(t)$ სიდიდეები შემავალი (4.2.13) აკმაყოფილებენ ჩართვის პირობებს $\tau(t) \in [0, \tau_0]$, $\Delta(t) \in [0, \Delta_0]$ ყველა $t \geq t_0$ მნიშვნელობებისათვის.

ამ პირობებში, (4.2.38), (4.2.39) ტიპის სინთეზის განხორციელებისათვის, ადრე მიღებულ თანაფარდობებში უნდა მონაწილეობდეს τ_0 და Δ_0 სიდიდეები. ამასთან Δ_0 მნიშვნელობა შესაძლებელია იყოს ნებისმიერად დიდი, მაგრამ ამ შემთხვევაში (როგორც გამომდინარეობს (4.2.28)-დან და იმიტომ, რომ $\eta > \Delta_0$), არის რადიუსი იზრდება Δ_0 -ის პროპორციულად, რომელშიც მართვადი პროცესები კრებადობს ე. ი. გაუარესდება რეგულირების ხარისხი. აშკარაა, რომ სიდიდე τ_0 უნდა აკმაყოფილებდეს $\tau_0 < \tau_{კრ}$ უტოლობას.

4.3. არასტაციონარული პროცესების მართვის ბინარული სისტემების დინამიკის ანალიზი რეგულირების არხებში დაბზიანების არსებობისას

ავტომატური მართვის ბინარული სისტემების თეორიის სხვადასხვა ნაშრომებში [74, 77] გადმოცემულია არასტაციონარული წრფივი დინამიური ობიექტების მართვის სინთეზის მეთოდები იმ წინადადებით, რომ რეგულირების არხებს გააჩნიათ იდეალური მახასიათებლები და სრულად შეესაბამებიან მიღებულ მათემატიკურ აღწერილობას, რომელიც ჩადებულია სინთეზის საფუძველში. მაგრამ მართვის აღგორითმების პრაქტიკული რეალიზაციის დროს შეიძლება წარმოიქმნას ისეთი პირობები, როდესაც რეგულირების არხების რეალური მახასიათებლები მნიშვნელოვნად განსხვავდებიან იდეალურისაგან. მსგავსი პრობლემები წარმოიქმნება სახელდობრ მართვის სისტემებში, აგებული პნევმატურ ან სხვა მოწყობილობებზე, რომლებსაც საკუთარი დინამიკა გააჩნიათ, და ეს შეიძლება განხილულ იქნას რეგულირების არხებში როგორც არაიდეალურობის არსებობა. ამასთან დაკავშირებით ისმება ამოცანა გამოკვლეულ იქნას სხვადასხვა სახის არაიდეალურობის გავლენა მართვის სისტემის დინამიკაზე.

ნაშრომის ამ თავში გამოკვლეული იქნება მართვის ბინარული სისტემის ანალიზი, რომლებიც ფუნქციონირებენ გადამრთველ მოწყო-

ბილობებში დროებითი დაგვიანების არსებობისას. უნდა აღინიშნოს, რომ ანალოგიური, კერძოდ, დასმული ამოცანა ობიექტებისათვის, აღწერილი მეორე რიგის დიფერენციალური განტობებებით, განხილულია [82]-ში.

განიხილება სარეგულირო არასტაციონარული დინამიური სისტემა, რომლის აღწერა მოცემულია შემდეგი განტოლებით:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + b(t)u(t), \quad t \geq t_0 \quad (4.3.1)$$

სადაც t – დროა; $x(t) = (x_1(t) \dots x_n(t))^T \in R^n$ – მართვადი პროცესი (T – ტრანსპონირების ნიშანია); – მართვა; $u(t) \in R^n$ სისტემის პარამეტრები.

სავარაუდოა, რომ (4.3.1) სისტემის პარამეტრები ცნობილია ყველა $A(t) \in R^{n \times n}, B(t) \in R^n$ -ისთვის შემდეგი თანაფარდობის $t \geq t_0$ სიზუსტით.

$$A^- \leq A(t) \leq A^+, \quad B^- \leq B(t) \leq B^+, \quad (4.3.2)$$

(4.3.2)-ში $A^\pm \in R^{n \times n}, B^\pm \in R^n$ – ცნობილი მუდმივი მატრიცებია.

დაისმის $u(t, x)$ მართვის არჩევის ამოცანა ლიპშიცის ფუნქციის u კლასიდან, რომელიც იძლევა შემდეგი თანაფარდობის შესრულების გარანტიას:

$$\text{Lim} \|x(t)\| = 0; \quad \|x(t)\| \leq N_1 \|xb\|, \quad N_1 = \text{const} \quad (4.3.3)$$

ჩაკეტილი S სისტემის ამონახსნი, რომლის მოქმედება აღიწერება განტოლებით:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + b(t)u(t) x(t), \quad t \geq t_0 \quad (4.3.4)$$

(4.3.3)-ში $\|\cdot\|$ ოქტაედრული ნორმის სიმბოლოა. (4.3.3) ამოცანის ამოხსნისას, გამოვიყენებთ მიდგომას, განვითარებულს ავტომატური მართვის ბინარულ სისტემების თეორიაში. [74, 77]-დან გამომდინარე ჩავთვალთ, რომ S სისტემაში სამართავ პროცესებს გააჩნიათ სასურველი თვისებები, თუ იწვევა დროის რომელიღაც მომენტში (სასრულ ან უსასრულო), ისინი იძირებიან სიმრავლეში $G_\delta = \{x \in R^n : |\sigma(x)| \leq \delta\beta|x|\}$,

სადაც $\sigma = cx$; $C^T, \beta^T \in R^n$ ზოგიერთი მუდმივი ვექტორებია, სადაც

$0 \leq \beta_i \leq 1 \quad (i = \overline{1, n}) \quad (\beta_i - \beta \text{ ვექტორის კომპონენტებია}), \quad C_n \triangleq 1;$

$\delta = const > 0; \quad |x| \in R^n$ ვექტორია, რომელიც შედგება x ვექტორის კომპონენტის მოდულებისაგან.

(4.3.3.) ამოცანის გადაწყვეტა ამ შემთხვევაში დაიყვანება c, β და δ მუდმივების განსაზღვრაში, რომლებიც იძლევიან სასურველი დინამიკის გარანტიას, როცა $x \in G_\delta$ და $u \in U$ მართვის არჩევაში, რომელიც უზრუნველყოფს სასურველ ჩართვას და მართვადი პროცესების მოცემულ ასიმპტოტიკას, როცა $x \notin G_\delta$.

განვიხილოთ მართვის ალგორითმის ერთ-ერთი შესაძლო ვარიანტი, რომელიც ხსნის S სისტემისათვის დაყენებულ (4.3.3.) მართვის ამოცანას. შემდგომში დაწვრილებით გამოკვლეულ მართვის ალგორითმს, სინთეზირებულს კოორდინატული და კოორდინატულ-ოპერატორული უარყოფითი კავშირის გამოყენებით [74, 77], აქვს შემდეგი სახე:

$$u(t, x) = \mu(t) k^0 |x|, \quad (4.3.5.)$$

$$\dot{\mu}(t) = \begin{cases} -\alpha \text{Sgn} \sigma(x(t)) & \text{როცა } |\mu(t)| \leq 1 \\ -\omega \mu(t) & \text{როცა } |\mu(t)| > 1, \quad |\mu(t_0)| \leq 1, \quad t \geq t_0 \end{cases} \quad (4.3.6.)$$

(4.3.5.)-ში $k^0 = (k_1^0 \dots k_n^0)^T \in R^n$ მუდმივი ვექტორი და $\alpha = const > 0$ სიდიდეებია, რომლებიც კოორდინატულ და კოორდინატულ-ოპერატორული უკუკავშირების კონტურებში განსაზღვრავენ, შესაბამისად, გაძლიერების კოეფიციენტებს; ω – ზოგიერთი ძალიან მცირე დადებითი რიცხვია; μ – ცვლადი ოპერატორი, ფორმირებული კოორდინატულ-ოპერატორული უკუკავშირის კონტურში.

გადამრთველ მოწყობილობაში τ დაგვიანების არსებობის შემთხვევაში, $|\mu(t)| \leq 1$ ოპერატიული ცვლადის ჩამოყალიბების კანონი მიიღებს სახეს:

$$\dot{\mu}(t) = \begin{cases} -\alpha \text{Sgn} \sigma(t - \tau) & \text{როცა } |\mu(t)| \leq 1 \\ -\omega \mu(t) & \text{როცა } |\mu(t)| > 1, \quad |\mu(t_0)| < 1. \end{cases} \quad (4.3.7.)$$

შემდგომში S -სისტემას, ჩაკეტილს (4.3.5), (4.3.7) მართვის ალგორითმით, უწოდებთ S_μ^τ სისტემას. (4.3.4), (4.3.5) და (4.3.7) თანაფარდობებიდან გამომდინარეობს, რომ S_μ^τ სისტემა აღიწერება დიფერენციალურ-სხვაობითი განტოლებათა სისტემით. ამასთან დაკავშირებით ჩავთვლით, რომ σ არის $C[t_0 - \tau, t_0]$ კლასის ფუნქცია. ასეთი სახის სისტემის გამოკვლევა გარკვეულწილად გართულებულია იმით, რომ მათი მდგომარეობის არე არის უსასრულოგანზომილებიანი ფუნქციონალური არე [69]. მაგრამ შემდგომში ნაჩვენები იქნება, რომ გარკვეული პირობების დროს, შეიძლება გამოყენებულ იქნას \mathbb{R}^n არე S_μ^τ სისტემაში მართვის პროცესების ანალიზისათვის. ასევე უნდა აღინიშნოს, რომ S_μ^τ სისტემა არის სისტემა წყვეტილი მარჯვენა ნაწილით, რომელთა არსებობის და ხანგრძლივობის გადაწყვეტის საკითხი განიხილებოდა [80]-ში.

ძირითადი შედეგები

შედეგების ჩამოყალიბებისათვის უფრო ხელსაყრელია ვისარგებლოთ შემდეგი განმარტებებით.

განსაზღვრება 1. სიმრავლე $M \subset \mathbb{R}^n$ არის L ინვარიანტული სიმრავლე S_μ^τ სისტემის ($L \subset M$) თუ ნებისმიერი გადაწყვეტილებისათვის S_μ^τ სისტემის $(x(t), \mu(t))$ საწყისი პირობებით $x_0 \in L_0$ ყველა $t \geq t_0$ -სთვის აქვს ადგილი $x(t) \in M$ ჩართვას.

განსაზღვრება 2. სიმრავლე $M \subset \mathbb{R}^n$ არის მიმზიდველი სიმრავლე სისტემის, თუ ნებისმიერი გადაწყვეტილებისათვის S_μ^τ სისტემის $(x(t), \mu(t))$ საწყისი პირობებით $x_0 \notin M$, $|\mu_0| \leq 1$ არსებობს დროის მომენტი $t_1 (t_1 > t_0)$, ისეთი, რომ $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) \in M$. S_μ^τ სისტემის სინთეზის ამოცანა მდგომარეობს G_0 ინვარიანტობის და G_δ მიზიდვის სიმრავლის უზრუნველყოფაში და მართვის პროცესების დინამიური თვისებების გამოკვლევაში, როცა სრულდება ჩართვა $x \in G_\delta$.

დასმულ ამოცანას ამოვხსნით, თუ ჩათვლით, რომ ყველა $\tilde{c} \in C$ შესრულებულია შემდეგი უტოლობა:

$$\inf_{t \geq t_0} \tilde{c}b(t) \geq \text{const} > 0, \quad (4.3.8.)$$

სადაც $C = \{\tilde{c}^t \in IR^n : \tilde{c} = c + m, \quad |m| \leq \delta\beta\}$.

შემოვიტანოთ განსახილველად \bar{A} მატრიცა და h და h^1 ვექტორები, რომელნიც დაკავშირებული არიან S -სისტემის A და B პარამეტრებთან შემდეგი თანაფარდობით [77].

$$\bar{A} = A^1 - a_n^1 c^1 - h^1 (c^1 A^1 - c^1 a_n^1 c^1 + (a^n)^1 - a_m c^1);$$

$$h = a_n^1 - \frac{c a_n^1}{c b} b^1; \quad h^1 = \frac{b^1}{c b},$$

სადაც A^1 მატრიცაა, მიღებული A -დან n -სვეტიდან n სტრიქონის ამოშლით; c^1 , b^1 და ა. შ. ვექტორებია, მიღებული c , b -დან და ა. შ. ბოლო კომპონენტის ამოგდებით; a_i და a_j შესაბამისად A მატრიცის i -ური სვეტი და j -ური სტრიქონია.

S_μ^τ -სისტემის დინამიური თვისებების გამოკვლევისას დავეყრდნობით შემდეგი პირობის შესრულების შესაძლებლობას:

$$\max \left[\sup_{t \geq t_0} \|h^1(t)\|, \quad \sup_{t \geq t_0} \left\| \frac{dh^1(t)}{dt} \right\| \right] < \infty \quad (4.3.9.)$$

S_μ^τ სისტემაში მართვადი პროცესების ასიმპტოტური ქცევის ანალიზისათვის, როცა $x \in G_\delta$, გამოვიყენოთ შედეგი მოყვანილი [77]-ში.

თეორემა 1. ვთქვათ შესრულებულია (4.3.8.), (4.3.9.) და $\varphi(t, \tau)$ სისტემის კოშის მატრიცა $\dot{x}^1 = \bar{A}x^1$ აკმაყოფილებს თანაფარდობას $\|\varphi(t, \tau)\| \leq C_0 e^{\delta_0(t-\tau)}$ როცა $t \geq \tau \geq t_0$, სადაც C_0 , δ_0 დადებითი კონსტანტებია. ამის გარდა დავუშვათ, რომ შესრულებულია უტოლობა

$$\delta_{\beta m} \sup_{t_1 > t_0} \|h^1(t)\| < 1, \quad (4.3.10)$$

სადაც $\bar{\beta}_M = \beta_M \frac{1+C_M}{1-\delta\beta_M}$, $\beta_M = \max_{i=1,n} \beta_i$; $C_M = \max_{i=1,n} |C_i|$. მაშინ, თუ

$x(t) \in G_\delta$ როცა $t \geq t_1 \geq t_0$, ყველა $t \geq t_1$ -სთვის სამართლიანია შეფასება:

$$\|x(t)\| \leq M_1 e^{-(\delta_0 - \delta_m)(t-t_1)} \cdot \|x(t_1)\|, \quad (4.3.11)$$

$$\text{სადაც } M = \frac{1+C_m}{1-\delta\beta_m} C_0 \cdot \frac{1+\delta\beta_m \sup_{t \geq t_0} \|h^1(t)\|}{1-\delta\bar{\beta}_m \sup_{t \geq t_0} \|h^1(t)\|},$$

$$M = \frac{C_0 \bar{\beta}_m \sup_{t \geq t_0} \left\| h^1(t) + \bar{A}(t)h^1(t) - \frac{dh^1(t)}{dt} \right\|}{1-\delta\bar{\beta}_m \sup_{t \geq t_0} \|h^1(t)\|}$$

თეორემა 1-ის დამტკიცებას შეიძლება გავეცნოთ [77] სამუშაოში.

თეორემა 1-დან გამომდინარეობს, რომ თუ $\delta_0 > M_\delta$, მაშინ ყველა $x \in G_\delta$ დროს უზრუნველყოფილია სარეგულირებელი კოორდინატების ვექტორის ნორმის ექსპონენციალური თანხვედრა ნულთან $\delta_0 - M_\delta$ მაჩვენებლით. ძნელი არ არის დავინახოთ, რომ მიღებულ განზრახულობაში მოთხოვნილი უტოლობა $\delta_0 - M_\delta > 0$ შეიძლება უზრუნველდეს δ კონსტანტის შესაბამისი დანიშნულებით.

თანაფარდობა, რომელიც უზრუნველყოფს $x \in G_\delta$ -ს ჩართვას t_1 მომენტიდან ($t_1 > t_0$) $x(t_1) \in G_0$ (ე. ი. $\sigma(x(t_1)) = 0$), პირობის შესრულებისას, მოცემულია შემდეგ დამტკიცებაში.

თეორემა 2. დაეუშვათ S_μ^r სისტემისათვის შესრულებულია (4.3.8), (4.3.9.) პირობები და შემდეგი თანაფარდობები:

$$K_i^0 \text{Sgn}(\tilde{c}b) > \sup_{t \geq t_0} \left| \frac{\tilde{c}(a^i(t))}{\tilde{c}(b(t))} \right|, i = \overline{1, n}, \quad (4.3.12)$$

$$\tau\gamma < 1, \quad (4.3.13)$$

$$\alpha \geq \frac{2\gamma}{1-\tau\gamma}, 1 \quad (4.3.14)$$

$$\text{სადაც } \gamma = \max_{i=1,n} \left[\frac{1}{\delta \beta_i} \text{Sup}_{\substack{t \geq t_0 \\ |d| \leq 1}} |\tilde{c}(a^i(t) + b(t)dK_i^0)| \right]. \text{ მაშინ } G_\delta \text{ სიმრავლე წარ-}$$

მოადგენს S_μ^τ სისტემის G_0 ინვარიანტულ სიმრავლეს.

ჩამოყალიბებული მტკიცებულების კომენტარისას აღვნიშნოთ შემდეგი. თეორემის პირობებს განსაზღვრავენ ჩაკეტილი სისტემის პარამეტრების არჩევაზე არსებული შეზღუდვები, რომელთა შესრულება უზრუნველყოფენ $x \in G_\delta$ ჩართვის მოთხოვნებს, და როგორც შედეგი მართვადი პროცესების მოცემულ დინამიკას. მიღებული პირობები განსხვავდებიან ინვარიანტობის პირობებისგან ჩამოყალიბებული ბინარული სისტემების თეორიაში განხილული ობიექტების კლასისათვის, როცა $\tau = 0$ (4.3.13) უტოლობის არსებობით. ეს თანაფარდობა აჩვენებს, რომ არსებობს დაგვიანების ისეთი კრიტიკული მნიშვნელობა $\tau_{კრ}$, რომ ყველა $\tau \in [0; \tau_{კრ}]$ -თვის ხერხდება G_δ სიმრავლის G_0 ინვარიანტულობის უზრუნველყოფა ისე, რომ შენარჩუნდეს მართვის კუთვნილება ლიპშიცის ფუნქციის კლასის. $\tau_{კრ}$ მნიშვნელობა განისაზღვრება თანაფარდობით $\tau_{კრ} = \alpha^{-1}$. აღვნიშნოთ, რომ როცა $\tau = \tau_{კრ}$ დასმული ამოცანა შეიძლება გადაწყვეტილ იქნას ცვლადი სტრუქტურის სისტემების თეორიის მეთოდებით, ე. ი. წყვეტილი მართვის ჩართვით. შევნიშნავთ აგრეთვე, რომ თანაფარდობები (4.3.12)-(4.3.14) წარმოადგენენ საკმარის პირობებს G_δ სიმრავლის მიზიდულობას. ამაში შეიძლება დავრწმუნდეთ თუ გამოვიყენებთ იდეას ჩამოყალიბებულს [74, 77]-ში.

მართვადი პროცესები ასიმპტოტიკის მოყვანილი ანალიზი როცა $x \in G_\delta$, აგრეთვე ინვარიანტულობის მიღებული პირობები G_δ სიმრავლის მიზიდულობისადმი იძლევიან საშუალებას ჩამოვაყალიბოთ S_μ^τ -სისტემის მართვადი პროცესების ქცევის ზოგიერთი დასკვნა.

სამართლიანია შემდეგი თეორემა.

თეორემა 3. დაუშვათ, რომ 1 და 2 თეორემის პირობები შესრულებულია და ამას გარდა აქვს ადგილი თანაფარდობებს:

$$K_i^0 \text{Sgn}(\tilde{c}b) - \text{Sup}_{t \geq t_0} \left| \frac{\tilde{c}(a^i(t))}{\tilde{c}(b(t))} \right| \geq V = \text{const} > 0 \quad i = \overline{1, n}, \quad (4.3.15.)$$

მაშინ ყველა $t \in [t_0; t_0 + 2/\alpha]$ -ისთვის

$$\|x(t)\| \leq \|x_0\| e^{2\omega/\alpha} \quad (4.3.16.)$$

და ყველა $t \geq t_0 + 2/\alpha$ -სთვის სამართლიანია შემდეგი შეფასება:

$$\|x(t)\| \leq M_1 \frac{C_m}{\delta \beta_m} \|x(t_0 + 2/\alpha)\| e^{-L(t-t_0-2/\alpha)}, \quad (4.3.17.)$$

სადაც $\omega = \text{Sup}_{t \geq t_0} (\|A(t)\| + \|b(t)K^0\|)$, $L = \min(\delta_0 - \delta_m, \nu/cm)$.

დასკვნა

ავტომატური მართვის ბინარული სისტემების სინთეზის საშუალებას, გადამრთველ მოწყობილობაში დაგვიანებების არსებობისას, გვაჩვენებს (4.3.17.) თანაფარდობა, რომ როცა $\tau < \tau_{gr} = \gamma^{-1}$, მაშინ (4.3.3.) მართვის დასმული ამოცანა შეიძლება გადაწყვეტილ იქნას და მითუმეტეს, ჩაკეტილ სისტემაში გარანტირებულია მართვადი პროცესების ნორმის ექსპონენციალური თანხვედრა ნულთან. აღვნიშნოთ აგრეთვე, რომ ყველა მიღებული შედეგი ვრცელდება ცვლადი დაგვიანების $\tau_0(t) \in [0; \tau]$ შემთხვევაში და ბინარული სიტემის სხვა კლასებზე: $S_{\mu\rho}^\tau$ -სისტემის, $S_{\mu\rho\nu}^\tau$ -სისტემის.

4.4. არასტაციონარული წრფივი პროცესების მართვის ბინარული სისტემების სინთეზი ხმაურის არსებობის შემთხვევაში

ბინარულობის პრინციპის გამოყენება უფრო ეფექტურია განუსაზღვრელი დინამიური პროცესების მართვის შემთხვევაში, სახელდობრ წრფივი არასტაციონალური ობიექტების მართვისას. მართვადი პროცესების დინამიურობის გამოკვლევა უფრო დაწვრილებით მოყვანილია იმ წინადადებით, რომ პროცესის მდგომარეობის ინფორმაცია არის სრული და მართვა მიმდინარეობს გამზომი მოწყობილობების არსებში ხმაურის

არსებობის გარეშე [74, 77, 78]. ამასთან მართვის ავტომატური სისტემების ექსპლუატაცია ხორციელდება, როგორც წესი, მნიშვნელოვანი ხმაურის პირობებში. ამასთან დაკავშირებით აქტუალური ხდება ხმაურის გავლენის შეფასების პრობლემა ავტომატური მართვის ბინარული სისტემების დინამიურ თვისებებზე. ამ პარაგრაფში წარმოებს წრფივი სასრულგანზომილებიანი დინამიური პროცესების მართვის ბინარული სისტემის ქცევის გამოკვლევა შეზღუდული ხმაურის არსებობისას [83].

განიხილება დინამიური სისტემების კლასი, აღწერილს თანაფარდობით:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t), \quad t \geq t_0 \quad (4.4.1)$$

სადაც t დამოუკიდებელი ცვლადია (დრო), t_0 – მისი საწყისი მნიშვნელობა, $x(t) \in R^n$ – მართვადი პროცესია, $u(t) \in R$ – მართვა, $A(t) \in R^{n \times m}$, $B(t) \in R^n$ – პარამეტრებია, რომელთათვის სრულდება პირობები:

$$\begin{aligned} A^- &\leq A(t) \leq A^+ \\ B^- &\leq B(t) \leq B^+ \end{aligned} \quad (4.4.2)$$

ყველა $t \geq t_0$, სადაც A^\pm , B^\pm ცნობილი მუდმივებია. იგულისხმება, რომ პროცესის მდგომარეობის ვექტორი იზომება ზოგიერთი ხმაურით და მართვის სინთეზისას შეიძლება გამოყენებულ იქნას $\hat{x}(t)$ ვექტორი განსაზღვრული თანაფარდობით

$$\hat{x}(t) = x(t) + \xi(t),$$

სადაც $\xi(t)$ ხმაურის სიგნალია, ყოველი $t \geq t_0$ $\xi(t) \in R^n$, ყველა $t \geq t_0$ $\|\xi(t)\| \leq \xi_0 = \text{const}$ -თვის (აქ $\|\cdot\|$ კვადრატული ნორმის სიმბოლოა). ზოგიერთი დამატებითი წინადადებები $\xi(t)$ თვისებების შესახებ განხილული იქნება ქვემოთ.

მართვა $u(t) = u(t, \hat{x}(t))$ ფორმირდება ლიფშიცის ფუნქციის U კლასში. ამასთან ერთად ითვლება, რომ ხმაური $u \in U$ ისეთია, რომ

$u \in U$ გარანტირებულია არსებობა და ხანგრძლივობა შემდეგი სისტემის გადაწყვეტილების ნახევარ ღერძზე:

$$\dot{x}(t) = A(t) + B(t)u(t, x(t) + \xi(t)), \quad t \geq t_0 \quad (4.4.3.)$$

მართვის ამოცანა მდგომარეობის $u \in U$ ფუნქციის არჩევაში და პირობების განსაზღვრაში, რომლებიც უზრუნველყოფენ შემდეგი თანაფარდობის შესრულებას:

$$\|x(t)\| \leq N_1 \|x(t_0)\| + N_2, \quad t \geq t_0 \quad (4.4.4a)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x(t)\| \in B_r \quad (4.4.4b)$$

სადაც $B_r = \{x \in R^n; \|x\| \leq r\}$, N_1, N_2, r – ზოგიერთი დადებითი კონსტანტებია.

ფუნქციონალური თანაფარდობების მეთოდის ჩარჩოებში [74, 77, 78] მართვის არჩევა მიმართულია იმ პირობის შესასრულებლად, რომლის დროსაც (4.4.3.) სისტემის თითოეული ამონახსნი, დაწყებული დროის რომელიმე მომენტიდან, იძირება სიმრავლეში

$$G_{\delta, \eta} = \{x \in R^n \mid |\sigma(x)| \leq \delta_\beta |x| + \eta\},$$

სადაც $\sigma(x) = cx(t)$, $c^T \in R^n$ – ზოგიერთი ფიქსირებული ვექტორია, $c_n = 1$, T – ტრანსპონირების ნიშანია, $\beta^T \in R^n$ – მუდმივი ვექტორია, რომლის თითოეული კომპონენტი $\beta_i (i = \overline{1, n})$ აკმაყოფილებს თანაფარდობას $0 < \beta_i \leq 1$; $\delta > 0$, $\eta > 0$ მუდმივებია, $|x| \in R^n$ ვექტორია, შედგენილი $x \in R^n$ ვექტორის შესაბამისი კომპონენტების მოდულებისგან. ამ შემთხვევაში იგულისხმება, რომ $x \in G_{\delta, \eta}$ -ს დროს ჩაკეტილ სისტემაში მართვად პროცესებს გააჩნიათ მოთხოვნილი დინამიური თვისებები და კერძოდ, თუ $x \in G_{\delta, \eta}$ ყოველი $t \geq t_0$ -ის დროს, მაშინ ადგილი აქვს (4.4.4a) და (4.4.4b) თანაფარდობებს.

შემდეგში წარმოებს ერთ-ერთი შესაძლო მართვის ალგორითმის გამოკვლევა, სინთეზირებული ბინარული სისტემის ჩარჩოებში კოორდი-

ნატული და კოორდინატულ-ოპერატორული ტიპის უკუკავშირების გამოყენებით [74, 77, 78]:

$$u(t, (x(t)) + \mu(t)(k^0 |x(t)|),$$

$$\dot{\mu}(t) = \begin{cases} -\alpha \operatorname{sgn} \sigma(t) & \text{როცა } |\mu(t)| \leq 1, \\ -\omega \mu(t) & \text{როცა } |\mu(t)| > 1, \quad |\mu(t_0)| \leq 1 \quad t \geq t_0 \end{cases} \quad (4.4.5)$$

სადაც $\alpha = \text{const} > 0$, ω – ზოგიერთი მცირე დადებითი რიცხვია. μ – ცვლადი ოპერატორი, $(k^0)^T \in R^n$ – ზოგიერთი მუდმივი ვექტორი, რომელიც განსაზღვრავს გაძლიერების კოეფიციენტს მართვის კოორდინატორულ კონტურში. ხმაურის არსებობის შემთხვევაში (4.4.5) ალგორითმი მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$u(t, \hat{x}(t)) = \mu(t)(k^0 |\hat{x}(t)| + l) \quad (4.4.6a)$$

$$\dot{\mu}(t) = \begin{cases} -\alpha \operatorname{sgn} \sigma(\hat{x}(t)) & \text{როცა } |\mu(t)| \leq 1, \\ -\omega \mu(t) & \text{როცა } |\mu(t)| > 1, \quad |\mu(t_0)| \leq 1, \quad t \geq t_0. \end{cases} \quad (4.4.6b)$$

გამოვიკვლიოთ ხმაურის გავლენა ცვლადი ოპერატორის $\mu(t)$ ფორმირების კანონზე. ფუნქცია $\sigma(\hat{x})$ განსაზღვრულია თანაფარდობით $\sigma(\hat{x}) = c\hat{x} = cx + c_\xi = \sigma(x) + c_\xi$, აქედან გამომდინარეობს, რომ $\operatorname{sgn} \sigma(x) = \operatorname{sgn} \sigma(\hat{x})$ ყველა $|\sigma(x)| > \sup_{t \geq t_0} |c_\xi(t)|$. მიღებული პირობა გვაძლევს საშუალებას (4.4.6b) თანაფარდობა წარმოდგენილი იქნას შემდეგი სახით:

$$\dot{\mu}(t) = \begin{cases} -\alpha \operatorname{sgn} \sigma(\hat{x}(t)) & \text{როცა } |\sigma(x(t))| \geq \Delta, \quad |\mu(t)| \leq 1; \\ -\alpha \operatorname{sgn} \sigma(\hat{x}(t)) & \text{როცა } |\sigma(x(t))| < \Delta, \quad |\mu(t)| \leq 1; \\ -\omega \mu(t) & \text{როცა } |\mu(t)| > 1, \quad |\mu(t_0)| \leq 1, \quad t \geq t_0, \end{cases} \quad (4.4.7)$$

სადაც $\Delta = \sup_{t \geq t_0} |c_\xi(t)|$. $\operatorname{sgn} \sigma(\hat{x}(t))$ ფუნქციას, როცა $|\sigma(x(t))| < 0$ შეუძლია მიიღოს თავისუფლად ± 1 მნიშვნელობა, დამოკიდებული $c_\xi(t)$ მნიშვნელობისგან. ამ ფაქტის ინტერპრეტირება შეიძლება, როგორც

$|\sigma(x)| < 0$ -ის დროს არაიდეალურობის არსებობა მოწყობილობაში, რომელიც უზრუნველყოფს $\text{sgn } \sigma(x)$ ფუნქციის რეალიზებას.

(4.4.3.) განტოლებაში გამოვეყნოთ მდგენელი, წარმონაქმნი $\xi(t)$ ხმაურით. ამისათვის თანაფარდობა (4.4.6ა) წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით:

$$u(t, \hat{x}(t)) = \mu(t)(k^0 |\hat{x}(t)| + l) = \mu(t)(k^0 |x(t)| + l) + \mu(t)k^0 s^{x\xi(t)}(t)\xi(t),$$

$$\text{სადაც } s^{x\xi}(t) = \text{diag}(\text{sgn } x_i(t)\xi_i(t)), \quad (i = \overline{1, n}).$$

ამ შემთხვევაში (4.4.3.), (4.4.6ა)-დან მივიღებთ:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)\varphi(t) + b(t)\ddot{u}(t), \quad t \geq t_0 \quad (4.4.8.)$$

$$\bar{u}(t) = \mu(t)(k^0 |x(t)| + l) \quad (4.4.9.)$$

$$\varphi(t) = \mu(t)k^0 s^{x\xi}(t)\xi(t) \quad (4.4.10.)$$

[84]-ში ჩატარებული ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მართვის დასმული ამოცანა შეიძლება განხილულ იქნას როგორც უკუკავშირის სინთეზის ამოცანა, რომელიც უზრუნველყოფს (4.4.8.) სისტემის დისიპატიურობას, (4.4.7.), 4.4.9.) ჩაკეტილი მართვის ალგორითმებით, $x(t)$ -ს იდეალური ინფორმაციის პირობებში, როცა არსებობს $\varphi(t)$ აღშფოთება. შემდგომში ასეთ სისტემას უწოდებთ S_μ^Δ სისტემას.

განვიხილოთ, ბინარული სისტემის სინთეზის ზოგიერთი თავისებურებანი (4.4.8.) ობიექტისათვის. განსახილველი ამოცანა (4.4.4ა), (4.4.4ბ) წარმოადგენს მართვის ამოცანას იძულებითი მოძრაობით. გარე ხემოქმედების როლს ამ შემთხვევაში თამაშობს $\varphi(t)$ ფუნქცია. როგორც (4.4.9.)-დან ჩანს, $\varphi(t)$ წარმოადგენს შეზღუდულ ფუნქციას და ყველა $t \geq t_0$ -სთვის ადგილი აქვს უტოლობას $|\varphi(t)| \leq \|k^0\| \|\xi(t)\| \leq \|k^0\| \xi_0$. მნიშვნელოვანია, რომ $\varphi(t)$ აღშფოთება და $\ddot{u}(t)$ მართვა მოქმედებს ერთიდაიგივე $B(t)$ ვექტორზე. როგორც [77, 78] ნაშრომიდან გამომდინარეობს მნიშვნელოვნად ამარტივებს ჩაკეტილი სისტემის სინთეზს. ასევე აღვნიშნოთ ის, რომ S_μ^Δ სისტემის გადაწყვეტილება წარმოიქმნება

$(x(t), \mu(t))$ წყვილებით, საწყისი პირობებით (x_0, μ_0)
 $V = \{(x, \mu) \mid x \in R^n, |\mu| \leq 1\}$ სიმრავლიდან (4.4.7.)-დან გამომდინარეობს,
 რომ განტოლების მარჯვენა ნაწილს, რომელიც აღწერს S_μ^Δ სისტემას,
 გააჩნია წყვეტები, ამიტომ მისი ამოხსნის არსებობა და ხანგრძლივობა
 განისაზღვრება [80] სამუშაო არსში.

S_μ^Δ სისტემის თვისებების გამოკვლევისას ხელსაყრელი იქნება
 ვისარგებლოთ შემდეგი განსაზღვრებებით.

განსაზღვრება 1. სიმრავლე $M \subset R^n$ არის L -ინვარიანტული
 სიმრავლე S_μ^Δ სისტემის, თუ მისი ნებისმიერი ამონახსნი $(x(t), \mu(t))$
 საწყისი პირობებით $x_0 \in L$ ($L \subset M$) ყველა $t \geq t_0$ -თვის აქვს
 ჩართვას $x(t) \in M$.

განსაზღვრება 2. სიმრავლე $M \subset R^n$ არის მიმზიდველი სიმრავლე
 S_μ^Δ სისტემის, თუ მისი ნებისმიერი ამონახსნი $(x(t), \mu(t))$ ისეთია,
 რომ $x(t) \notin M$ არსებობს დროის ისეთი t_1 ($t_1 > t_0$) მომენტი, როცა
 $\lim_{t \rightarrow t_1} x(t) \in M$.

ნაშრომში გამოყენებული ფუნქციონალური თანაფარდობის მეთოდ-
 დი განსაზღვრავს პირობების მოძებნას, რომლის დროსაც S_μ^Δ სისტე-
 მის მართვადი პროცესების ასიმპტოტიკას, $x \in G_{\delta, \eta}$ -ს შემთხვევაში,
 აქვს მოცემული თვისება და სიმრავლე $G_{\delta, \eta}$ წარმოადგენს $G_{0, \Delta}$ ინვა-
 რიანტულ და მიმზიდველ სიმრავლეს.

მართვადი პროცესების ასიმპტოტიკური ქცევის ანალიზისათვის,
 როცა $x \in G_{\delta, \eta}$ ვისარგებლოთ კვაზიდაყოფის მეთოდით [81]. მისი
 გამოყენება (4.4.8.)-თვის მიგვიყვანს შემდეგ განტოლებამდე:

$$\begin{aligned} \dot{x}'(i) &= A(t)x(t)x'(t) + hx(t)\sigma(t) \\ \dot{\sigma}(t) &= a\sigma(t)x'(t) + h\sigma(t)\dot{\sigma}(t) + d\sigma(t)\varphi(t) + cb(t)u(t), \quad t \geq t_0. \end{aligned} \quad (4.4.11.)$$

თანაფარდობა, რომელიც აკავშირებს (4.4.8.) სისტემის A , B პარამეტრებს და Ax , hx , $a\sigma$, $h\sigma$, $d\sigma$ მოცემულია [81]-ში იგულისხმება, რომ $\max \left[\sup_{t \geq t_0} (\|Ax(t)\|, \|hx(t)\|, |a\sigma(t)|, |h\sigma(t)|, |d\sigma(t)|) \right] < \infty$. აღვნიშნოთ, რომ პირველი თანაფარდობიდან მარჯვენა ნაწილში $\varphi(x)$ -ის არარსებობა აიხსნება იმით, რომ $\varphi(t)$ მოქმედებს (4.4.8.)-ში. იგივე $b(t)$ ვექტორზე, რაზედაც მართვის ფუნქცია $u(t)$. ასეთ შემთხვევაში (4.4.8) სისტემისათვის შესრულებულია ევრეთწოდებული z_0 პირობა [81].

ფორმალური მხრიდან კვაზიდაყოფის მეთოდის გამოყენება შედგება (4.4.8.)-ში ცვლადი სიდიდეების შემდეგი თანაფარდობის შეცვლით

$$x(t) = M(t) \begin{pmatrix} x'(t) \\ \sigma(t) \end{pmatrix}, \quad (4.4.12.)$$

სადაც $M(t) = \begin{pmatrix} E_{n-1} & b(t) \\ -c' & cb(t) \end{pmatrix}$, $x' \in R^{n-1}$, $\sigma \in R$, $E_{n-1} \in R^{(n-1) \times (n-1)}$ ერთეული მატრიცაა. (4.4.12.)-ის გარდაქმნა შეიძლება განვასორციელოთ იმ შემთხვევაში, როცა $M(t)$ იქნება ლიაპუნოვის მატრიცა. ამის აუცილებელ პირობას წარმოადგენს მისი გადაუგვარებლობა, ე. ი. შესრულება თანაფარდობის

$$\inf_{t \geq t_0} |cb(t)| \geq const > 0. \quad (4.4.13.)$$

შემდგომში საჭირო იქნება უფრო ძლიერი პირობა, ვიდრე (4.4.13.) ითვლება, რომ ყველა $\tilde{c} \in C$ -სთვის

$$\inf_{t \geq t_0} |\tilde{c}b(t)| \geq const > 0, \quad (4.4.14.)$$

$$\text{სადაც } C = \left\{ \tilde{c}^T \in R^T \mid \tilde{c} = c + m, |m| \leq \delta_\beta \right\}.$$

მართვადი პროცესების დინამიური თვისებების შეფასებას $x \in G_{\delta, \eta}$ დროს იძლევა შემდეგი თეორემა.

თეორემა 1. ვთქვათ შესრულებულია (4.4.14.) უტოლობა. და $\Phi(t, \tau)$ სისტემის კოშის $\dot{x}' = A_x x'$ მატრიცისათვის ადგილი აქვს შეფასებას:

$$\|\varphi(t, \tau)\| \leq c_0 e^{-\delta_0(t-\tau)}, \quad t \geq \tau \geq t_0 \quad (4.4.15.)$$

სადაც c_0, δ_0 დადებითი კონსტანტებია. მაშინ, თუ

$$\begin{aligned} (1 - \delta_\beta \max b_m) \delta_0 - c_0 \sup_{t \geq t_0} \|h_x(t)\| \cdot \delta_\beta \max(1 + c'_m) = r_0 > 0, \\ (1 - \delta_\beta \max b_m) > 0, \end{aligned} \quad (4.4.16.)$$

სადაც $\beta_{\max} = \max_{i=1, n} \beta_i, \quad b_m = \sup_{t \geq t_0} \left\| \frac{b(t)}{cb(t)} \right\|, \quad c'_m = \max_{i=1, n-1} |c_i|$ $u \quad x(t) = G_{\delta, \eta},$

ყველა $t \geq t_1$ ($t_1 \geq t_0$), მაშინ $t \geq t_1$ სამართლიანია თანაფარდობა

$$\|x(t)\| \leq q \left(c_0 \|x(t_1)\| \sup_{t > t_0} \|M^{-1}(t)\| e^{-p(t-t_1)} + \frac{c_0}{p} \eta' \sup_{t > t_0} \|h_x(t)\| + b_m \eta' \right), \quad (4.4.17.)$$

$$t \geq t_0, \quad \text{სადაც } q = (1 + c'_m + \delta' b_m), \quad \delta' = \delta_\beta \max \frac{1 + c'_m}{1 - \delta_\beta \max b_m},$$

$$\eta = \frac{\eta}{1 - \delta_\beta \max b_m}, \quad p = \frac{r_0}{1 - \delta_\beta \max b_m}.$$

როგორც მოყვანილი მტკიცებულებიდან ირკვევა, (4.4.13.) და (4.4.15.) პირობების შესრულების დროს δ კონსტანტის შესაბამისი შერჩევის ხარჯზე, ყოველთვის შეიძლება ექსპონენციალური თანხვედრის გარანტირება მართვადი $x \in G_{\delta, \eta}$ -ის დროს პროცესების p მაჩვენებელთან R_x^n სივრცის საწყისი კოორდინატების ზოგიერთ მიდამოებში, რომლის ზომებიც პროპორციულია η სიდიდის.

$G_{\delta, \eta}$ ინვარიანტულობის - $G_{0, \Delta}$ პირობა, რომელიც იძლევა $x \in G_{\delta, \eta}$ შესაძლო ჩართვის გარანტირებას t_1 მომენტიდან $x(t_1) \in G_{0, \Delta}$ პირობის შესრულებისას, მოყვანილია შემდეგ თეორემაში.

თეორემა 2. ვთქვათ შესრულებულია (4.4.14.) პირობა და ყველა $\tilde{c} \in C$ -თვის ადგილი აქვს შემდეგ თანაფარდობებს:

$$k_i^0 \operatorname{sgn}(\tilde{c}b) > \sup_{t \geq t_0} \left| \frac{\tilde{c}a^i(t)}{\tilde{c}b(t)} \right|, \quad i = \overline{1, n} \quad (4.4.18.)$$

$$l > \|k^0\| \xi_0, \quad (4.4.19.)$$

$$\eta > \Delta, \quad (4.4.20.)$$

$$\alpha \geq \frac{2\gamma}{1 - \frac{\Delta}{\eta}}, \quad (4.4.21)$$

სადაც $\gamma = \max_{\substack{i=1, n \\ \tilde{c} \in C, |d| \leq 1}} \left\{ \sup_{t \geq t_0} \left[\frac{1}{\delta_{\beta i}} \left| \tilde{c} \left(a^i(t) + b(t) dk_i^0 \right) \right|, \frac{1}{\eta} \left| \tilde{c} b(t) (\varphi(t) + dl) \right| \right] \right\}$ მა-

შინ $G_{\delta, \eta}$ სიმრავლე წარმოადგენს S_μ^Δ სისტემის $G_{0, \Delta}$ ინვარიანტულ სიმრავლეს.

(4.4.18.), (4.4.19.) და (4.4.21.) განსაზღვრავენ უარყოფითი უკუკავშირის კოეფიციენტის არჩევაზე შეზღუდვას, (4.4.18.), (4.4.19.) კოორდინატულ და (4.4.20.) და (4.4.21.) კოორდინატულ-ოპერატორული უკუკავშირის კონტურში. აღვნიშნოთ მოყვანილი პირობის ის განსაკუთრებულობა, რომ η სიდიდე არ შეიძლება შერჩეულ იქნას ნებისმიერი, არამედ უნდა აკმაყოფილებდეს (4.4.20.) უტოლობას. თუ გავითვალისწინებთ, რომ $\Delta = \sup_{t \geq t_0} |c\xi(t)|$ (4.4.17.)-დან შეიძლება გავაკეთოთ დასკვნა იმის

შესახებ, რომ როცა $x \in G_{\delta, \eta}$ ადგილი აქვს მართვადი პროცესების ექსპონენციალურ თანხვედრას R_x^n ნულის გარშემო, რომლის ზომები პროპორციულია $\xi(t)$ ხმაურის სიდიდის.

თუ გამოვიყენებთ მეთოდიკას გადმოცემულს [77, 78]-ში, შეიძლება ითქვას, რომ თეორემა 2-ის პირობები იძლევიან აგრეთვე $G_{\delta, \eta}$ სიმრავლის მიზიდვის გარანტიას, უფრო მეტიც, იძლევიან გარანტიას S_μ^Δ სისტემის თითოეული $x(t)$, $\mu(t)$ ამონახსნისათვის ისეთი საბოლოო მომენტის არსებობის, რომ $x(t_1) \in G_{\delta, \eta}$.

გადაწყვეტილი ამოცანების ერთობლიობა იძლევა საშუალებას ჩამოვყალიბოთ მართვადი პროცესების შეფასების ზოგიერთი საერთო შედეგი (4.4.4) სახით S_μ^Δ სისტემაში.

თეორემა 3. დავუშვათ, რომ შესრულებულია თეორემა 1 და თეორემა 2-ის პირობები. მაშინ

$$N_1 = qc_0 \sup_{t \geq t_0} \|M^{-1}(t)\| \frac{c_m}{\delta \beta_m} e^{2\omega/\alpha} \quad (4.4.22)$$

$$N_2 = q \left(c_0 \sup_{t \geq t_0} \|M^{-1}(t)\| \frac{c_m}{\delta \beta_m} r_1 + \frac{c_0}{p} \eta^1 \sup_{t \geq t_0} \|hx(t)\| \right) + b_m \eta', \quad (4.4.23)$$

$$r = q \frac{c_0}{p} \eta' \sup_{t \geq t_0} \|h_x(t)\| + b_m \eta', \quad (4.4.24)$$

სადაც $\omega = \sup_{t \geq t_0} (\|A(t)\| + \|B(t)k^0\|)$, (4.4.25)

$$r_1 = \frac{\sup_{t \geq t_0} \|b(t)\| (l + \|k^0\| \xi_0)}{\omega} \left(e^{2\omega/\alpha} - 1 \right), \quad (4.4.26)$$

$$c_m = \max_{i=1,n} |c_i|, \quad \beta_m = \min_{i=1,n} \beta_i.$$

დასკვნა

მიღებული შედეგები გვაძლევენ საშუალებას შევავასოთ შეზღუდული ხმაურის გავლენა მართვადი პროცესების დინამიკაზე და განვახორციელოთ ავტომატური მართვის ბინარული სისტემების სინთეზი პროცესის სარეგულირებელი კოორდინატების ინფორმაციაში არაკონტროლირებადი ხმაურის არსებობისას. აღვნიშნოთ, რომ თუ $\|\xi(t)\| = 0$ როცა $t \geq t_0$ (4.4.7)-ში $\Delta = 0$ და ავირჩევთ სიდიდეს $\eta = 0$ 1-3 თეორემებში, მივდივართ თანაფარდობამდე ბინარული სისტემის სინთეზისათვის იდეალური ინფორმაციის პირობებში, ჩამოყალიბებული და მიღებული ადრე [74, 77, 78]-ში.

4.5. მართვის ბინარული სისტემების მდგრადობა გადამრთველი მოწყობილობის არხებში არაიდეალურობის არსებობისას

განხილება არაავტონომიური სისტემის მართვის ამოცანა აღწერილი ჩვეულებრივი მეორე რიგის დიფერენციალური განტოლებით [85].

$$\ddot{x}(t) + a_2 \dot{x}(t) + a_1 x(t) = u(t), \quad t \geq t_0, \quad (4.5.1)$$

რომლის პარამეტრები წარმოადგენენ დროის თავისუფალ ფუნქციებს, რომლებიც იცვლებიან შეზღუდულ ცნობილ დიაპაზონში $a_i(t) \in [a_i^-, a_i^+]$, $i=1,2$, $t \geq t_0$. მართვის $u(t)$ ფუნქციის არჩევით უზრუნველყოფილი უნდა იქნას მართვადი პროცესების თვისებების მცირედი დამოკიდებულება საწყისი სისტემის ცვლად პარამეტრებზე და გარანტირებული იყოს თანხვედრა $|x(t) \rightarrow 0|$, როცა $t \rightarrow \infty$.

ცნობილია დასმული ამოცანის გადაწყვეტის სხვადასხვა მეთოდები. ყველაზე უფრო ფართო შესაძლებლობები პრაქტიკული გამოყენების მიზნით გააჩნია მიდგომას, განვითარებულს ავტომატური მართვის ბინარული სისტემების თეორიაში [86]. ამ მეთოდზე დაყრდნობით მოკლედ აღვწეროთ ზოგიერთი იდეა, გამოყენებული ბინარული სისტემების სინთეზის დროს.

შევნიშნავთ, რომ მოთხოვნები, წაყენებული მართვადი პროცესების მიმართ ჩაკეტილ სისტემაში დაკმაყოფილებულია, თუ თითოეულ მის ამოხსნაზე დაწყებული შესაბამისი t_1 დროის მომენტიდან შესრულებულია ტოლობა $\sigma(x(t)) = 0$, სადაც

$$\sigma(x) = cx + \dot{x}, \quad (4.5.2)$$

და $c = const > 0$. თუ $\sigma(x(t)) = 0$, მაშინ ფუნქცია $x(t)$ წარმოადგენს შემდეგი დიფერენციალური განტოლების ამონახსნს:

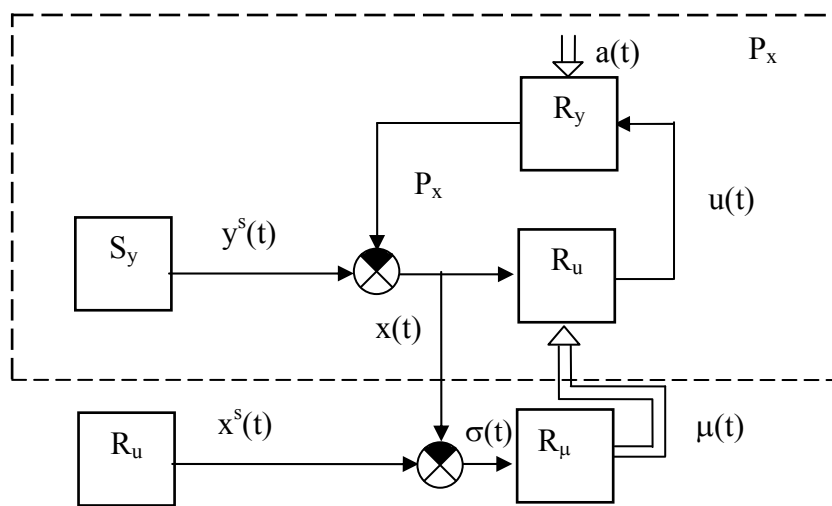
$$cx(t) + \dot{x}(t) = 0, \quad t \geq t_1 \quad (4.5.3)$$

და შესაბამისად,
$$x(t) = x(t_1) \exp[-c(t - t_1)] \quad (4.5.4)$$

როგორც ჩანს, განხილულ შემთხვევაში გარდამავალი პროცესი არ არის დამოკიდებული S -სისტემის $a_i(t)$, $i=1,2$, პარამეტრებზე და ჩაკეტილი სისტემის ამონახსნი ექსპონენტიურად მდგრადია, ე. ი. დასმული ამოცანა მთლიანად გადაწყვეტილია.

[85, 86]-ში შემოთავაზებულია $\sigma(t)$ ფუნქციის განხილვა, როგორც კოორდინატულ-პარამეტრული მართვის კონტურის რეგულირების ცდომილების. მისი სიდიდე განსაზღვრავს მართვადი პროცესის მოწყობილობის მოთხოვნილებიდან გადახრას, მოცემულს თანაფარდობით $\sigma(x(t))=0$.

$\sigma(t)$ ცდომილების კომპენსაციისათვის იქმნება კოორდინატულ-პარამეტრული ტიპის უკუკავშირი. შედეგად, ჩაკეტილი სისტემების სტრუქტურული სქემა სინთეზირებული ორი ტიპის უარყოფითი უკუკავშირის გამოყენებით: ჩვეულებრივი კოორდინატული და კოორდინატულ-პარამეტრული, მიიღებს სახეს, წარმოდგენილს (ნახ. 4.5.1) [85, 87].



ნახ. 4.5.1

ნახაზზე საწყისი S -სისტემა წარმოდგენილია R_y ოპერატორით, კოორდინატული ტიპის უკუკავშირი R_u , კოორდინატულ-პარამეტრული ტიპის უკუკავშირი R_μ . ორმაგი ისრები აღნიშნავენ პარამეტრული ტიპის კავშირის არსებობას, ან სისტემაზე პარამეტრული აღშფოთების მოქმედების არსებობს. ჩაკეტილი სისტემის დინამიური თვისების დამკვეთი S_x უნდა შეირჩეს ისეთი სახით, რომ კოორდინატულ-პარამეტრული კონტურის $\sigma(t)$ ცდომილება განსაზღვრული იყოს (4.5.2.)-ის თანახმად.

ასეთი სტრუქტურის თვისებების შემდგომში გამოკვლევა და მათ საფუძველზე ჩაკეტილი სისტემის აგება მოითხოვს შესაბამისი სახის

ოპერატორების კონკრეტულობას. მართვის კოორდინატული კონტურის ოპერატორი R_μ განისაზღვრება არაწრფივი თანაფარდობით:

$$u(t) = K(t)|x(t)| \quad (4.5.5.)$$

გადაცემის ცვლადი კოეფიციენტით $K(t)$, რომელიც ყალიბდება კოორდინატულ-პარამეტრული კონტურში შემდეგი სახის:

$$K(t) = K_0 \mu(t)$$

$$\dot{\mu}(t) = \begin{cases} -\alpha \operatorname{sgn} \sigma(t) & \text{როცა } |\mu(t)| \leq 1, \\ -\omega \mu(t) & \text{როცა } |\mu(t)| > 1, \quad |\mu(t_0)| \leq 1. \end{cases} \quad (4.5.6.)$$

სადაც α , K_0 – ზოგიერთი დადებითი მუდმივებია, მაგრამ ძალიან მცირედი განსხვავებებთან ნულისაგან.

თანაფარდობები (4.5.1.), (4.5.2.), (4.5.5.) და (4.5.6.) აღწერენ ჩაკეტილ სისტემას კოორდინატულ და კოორდინატულ-პარამეტრული ტიპის უკუკავშირებით.

ასეთ სისტემას [75]-ის შესაბამისად ვუწოდებთ $S_\mu(1)$ სისტემას. აქ ინდექსი μ აჩვენებს, რომ ჩაკეტილი სისტემის სინთეზის დროს კოორდინატული უკუკავშირის გარდა გამოყენებულია კოორდინატულ-პარამეტრული უკუკავშირი, რიცხვი 1 კი უჩვენებს იმას, რომ კოორდინატული კონტურის რეგულირების კანონში მონაწილეობს მხოლოდ ცდომილების კოორდინატა $x(t)$. შევნიშნავთ, რომ კოორდინატულ-პარამეტრული უკუკავშირის შეყვანას მივყავართ ჩაკეტილი $S_\mu(1)$ -სისტემის მდგომარეობის სივრცის გაფართოებამდე საწყის S -სისტემასთან შედარებით. $S_\mu(1)$ -სისტემის გადაწყვეტილება ყალიბდება სამეულობით $(x(t), \dot{x}(t), \mu(t))$, მათი ანალიზისთვის გამოყენებული იქნება აპარატი, დამუშავებული [80]-ში.

როგორც [77, 87]-ში არის ნაჩვენები, ზუსტი ტოლობა $\sigma(x(t)) = 0$ $S_\mu(1)$ -სისტემის ამონახსნზე შესაძლებელია მხოლოდ გადაცემის უსასრულობის კოეფიციენტების გამოყენებით მართვის კოორდინატულ-პარამეტრულ კონტურში. ამას მივყავართ იქამდე, რომ რეგულირების კანონი ნაჩვენებ კონტურში ხდება რელეური, და მართვის კონტურში, ჩაკეტილს

ობიექტით, შესაძლებელია მოსრიალე რეჟიმების წარმოქმნა, რომელიც ზოგიერთ შემთხვევაში არ არის სასურველი სისტემის ექსპლუატაციის პირობებიდან გამომდინარე. ამასთანავე, $S_\mu(1)$ -სისტემაში გადაცემის სასრული კოეფიციენტების გამოყენება იძლევა საშუალებას უზრუნველყოთ მოთხოვნილი ტოლობა $\sigma(x(t))=0$ მიახლოებულია შემდეგი არსით. $S_\mu(1)$ სისტემის კონსტრუქციული პარამეტრების შესაბამისი შერჩევით შეიძლება უზრუნველყოთ $(x(t), \dot{x}(t))$ ვექტორის მიკუთვნება G_σ სიმრავლის სარეგულირო კოორდინატების, მოცემულის შემდეგი სახით:

$$G_\sigma = \{(x, \dot{x}) \in R_x^2 : |\sigma(x)| \leq \sigma|x|\},$$

სადაც σ ზოგიერთი დადებითი კონსტანტაა. $(x(t), \dot{x}(t)) \in G_\sigma$ ჩართვის შესრულებისას დაწყებულს $S_\mu(1)$ -სისტემის შესაბამისი გადაწყვეტილების ზოგიერთი მომენტიდან, მართებულია შეფასება:

$$|x(t_1)| \exp[-(c + \delta)(t - t_1)] \leq |x(t_1)| \exp[-(c - \delta)(t - t_1)]. \quad (4.5.7)$$

აქედან ჩანს, რომ σ -ს საკმაოდ მცირე მნიშვნელობის დროს მართვის პროცესის თვისება $(x(t), \dot{x}(t))$ ახლოს იქნება მოცემულთან, და პარამეტრული აღშფოთების გავლენა ასევე განისაზღვრება σ სიდიდით.

მოყვანილი მსჯელობები გვაძლევს საშუალებას გავაკეთოთ დასკვნა იმის შესახებ, რომ დასაწყისში დასმული მართვის ამოცანა შეიძლება გადაწყვეტილი იქნას ავტომატური რეგულირების ბინარული სისტემების კლასში.

ჩაკეტილი სისტემის თვისებები ტექნიკური რეალიზაციის დროს ადეკვატური იქნება $S_\mu(1)$ -სისტემის მათემატიკური თვისებების იმ შემთხვევაში, თუ ფიზიკური სისტემის ელემენტებს ექნებათ იდეალური, ან იდეალურთან მიახლოებული მახასიათებლები. ამავე დროს ზოგიერთ შემთხვევაში შეუძლებელია უგულვებლყოთ გადამრთველ მოწყობილობებში დაგვიანების, ინერციულობის და სხვათა არსებობა. ამასთან დაკავშირებით დაისმის ამოცანა – გამოვიკვლიოთ სხვადასხვა სახეობის არაიდეალურობის გავლენა ავტომატური რეგულირების ბინარული სისტემის დინამიკაზე.

ამ ნაშრომში ირკვევა კოორდინატულ-პარამეტრული კონტურის რეალური ელემენტის მახასიათებელში დაგვიანების და ჰისტერეზისის ტიპის არაიდეალურობის გავლენა $S_\mu(1)$ -სისტემის დინამიკაზე, შემოთავაზებულია ასეთი სისტემის ანალიზის მეთოდები, გამოიკვლევა მათი თვისებები.

ფორმალურად რეალურ ელემენტში მუდმივი დაგვიანების $\tau = const > 0$ არსებობა მიგვიყვანს იქამდე, რომ რეგულირების კანონი (4.5.6.) მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$K(t) = K_0 \mu(t)$$

$$\dot{\mu}(t) = \begin{cases} -\alpha \operatorname{sgn} \sigma(t - \tau) & \text{при } |\mu(t)| \leq 1, \\ -\omega \mu(t) & \text{при } |\mu(t)| > 1, |\mu(t_0)| \leq 1. \end{cases} \quad (4.5.8.)$$

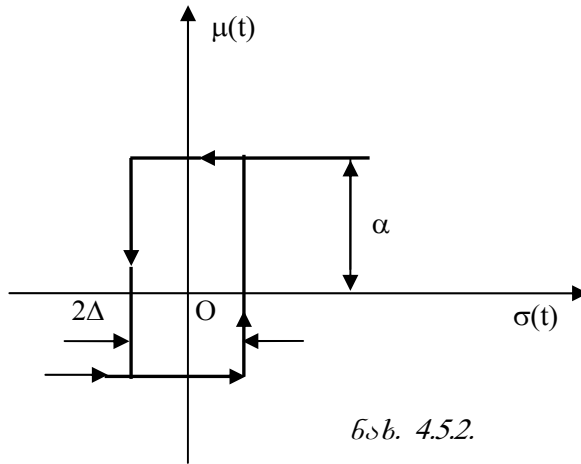
ჰისტერეზისის მარყუქის სიდიდით 2Δ რეალური ელემენტის მახასიათებელში (იხ. ნახ. 4.5.2.) მივყავართ თავის მხრივ კოორდინატულ-პარამეტრულ კონტურში მართვის შემდეგ კანონამდე:

$$K(t) = K_0 \mu(t)$$

$$\dot{\mu}(t) = \begin{cases} -\alpha \operatorname{sgn} \sigma(t) & \text{როცა } \sigma(t) \geq \Delta, |\mu(t)| \leq 1, \\ -\alpha \operatorname{sgn} \sigma(t) & \text{როცა } \sigma(t) < \Delta, |\mu(t)| \leq 1, \\ -\omega \mu(t) & \text{როცა } |\mu(t)| > 1, |\mu(t_0)| \leq 1. \end{cases} \quad (4.5.9.)$$

(4.5.1.), (4.5.2.), (4.5.5.) და (4.5.8) თანაფარდობები აღწერენ კოორდინატულ-პარამეტრული უკუკავშირის გადამრთველ მოწყობილობაში $S_\mu(1)$ -სისტემას τ დაგვიანებით, შემდგომში მას ვუწოდოთ $S_\mu^\tau(1)$ -სისტემა. შესაბამისად (4.5.1.), (4.5.2.), (4.5.5.) და (4.5.9.) განტოლებები იძლევიან $S_\mu(1)$ -სისტემის არაიდეალურობის ჰისტერეზისის ტიპის $S_\mu^\Delta(1)$ -სისტემას.

მართვის ამოცანის დასმა, ახლადშემოყვანილი სისტემისათვის, შევინარჩუნოთ იმ სახით, რომელიც იყო ჩამოყალიბებული (4.5.1.) სისტემისათვის.



ნახ. 4.5.2.

გამოვიკვლიოთ $S_\mu^\tau(1)$ -სისტემა. ადრე იყო ნახვენები, რომ თუ $S_\mu^\tau(1)$ -სისტემის ნებისმიერი გადაწყვეტილების პროექცია R_x^2 -ზე (აქ და შემდგომში პროექციაში იგულისხმება ვექტორი (x, \dot{x})) დაწყებული t_1 დროის შესაბამისი მომენტიდან აკმაყოფილებს ჩართვას $(x, \dot{x}) \in G_\delta$, მაშინ ადგილი აქვს შეფასებას (4.5.7). ამიტომ დასმული ამოცანა იქნება გადაწყვეტილი, თუ იმ პირობიდან, წაყენებული სისტემის დინამიკაზე, განსაზღვრული იქნება c და δ მუდმივები. ალგორითმის კონსტრუქციული პარამეტრების α და K_0 არჩევა იძლევა სარეგულირო კოორდინატების (x, \dot{x}) არჩეულ G_σ სიმრავლეზე მიკუთვნების გარანტიას, დაწყებული t_1 დროის ზოგიერთი მომენტიდან.

$S_\mu^\tau(1)$ -სისტემის გამოკვლევისადმი მსგავსი მიდგომა, როგორც [75, 77, 87, 88]-შია ცნობილი, გულისხმობს ერთმანეთთან დაკავშირებული სამი ამოცანის ამოხსნას: (ა) – G_δ -სთან $S_\mu^\tau(1)$ -სისტემის ამონახსნის პროექციის კრებადობის უზრუნველყოფა R_x^2 -ზე; (ბ) – $(x, \dot{x}) \in G_\delta$ პირობის უზრუნველყოფა $S_\mu^\tau(1)$ -სისტემის ნებისმიერი ამონახსნისათვის დაწყებული დროის შესაბამისი მომენტიდან $T_\delta (T_\delta \geq t_0)$; (გ) – პირობების განსაზღვრა, რომლებიც უზრუნველყოფენ მართვის პროცესის მოთხოვნილ დინამიკას $(x(t), \dot{x}(t)) \in G_\delta, t \geq T_\delta$ -ს დროს. (ა), (ბ), (გ) ამოცანების ამოხსნა წარმოადგენს კვლევის მიზანს.

განვიხილოთ (ბ) ამოცანის ამოხსნა იმ წინადადებით, რომ სიმრავლე G_δ მოცემულია. შემდგომში შედეგების ჩამოსაყალიბებლად, მოსაზერებელია თუ ვისარგებლებთ შემდეგი განსაზღვრებით [85].

განსაზღვრება 1. სიმრავლე G_σ წარმოადგენს δ ინვარიანტულს $S_\mu^\tau(1)$ -სისტემის სიმრავლის, თუ მისი ამოხსნისათვის $(x(t), \dot{x}(t), \mu(t))$ ისეთია, რომ $(x(t_0), \dot{x}(t_0)) \in G_0, |\mu(t_0)| \leq 1$ ყველა $t \geq t_0$ -სთვის ადგილი აქვს ჩართვას $(x(t), \dot{x}(t)) \in G_\delta$. აქ $G_0 = \{(x, \dot{x}) \in R_x^2 | \sigma(x) = cx + \dot{x} = 0\}$.

ასეთ შემთხვევაში (ბ) ამოცანის ამოხსნისათვის საკმარისია G_δ სიმრავლის σ -ინვარიანტულობის უზრუნველყოფა. ამისათვის შესაბამის პირობებს იძლევა თეორემა 1.

თეორემა 1. დავუშვათ $S_\mu^\tau(1)$ -სისტემისათვის შესრულებულია თანაფარდობები:

$$K_0 > m, \quad (4.5.10)$$

$$\delta > (K_0 + m)\tau, \quad (4.5.11)$$

$$\alpha > \frac{2(K_0 + m)}{\delta - (K_0 + m)}, \quad (4.5.12)$$

სადაც $m = \max |a_1(t) - a_2(t)| (c + \alpha\delta) + (c + \alpha\delta)^2 / |\alpha| \leq 1, t \geq t_0$.

მაშინ G_δ სიმრავლე წარმოადგენს $S_\mu^\tau(1)$ -სისტემის სიმრავლის σ -ინვარიანტულობას

ჩამოყალიბებული მტკიცებულების კომენტარებისას აღვნიშნოთ შემდეგი: (4.5.10), (4.5.11), (4.5.12) თანაფარდობები განსაზღვრავენ გაძლიერების კოეფიციენტებს შესაბამისად კოორდინატულ და კოორდინატულ-პარამეტრული უკუკავშირების კონტურებში. თეორემა 1-დან გამომდინარეობს, რომ G_δ -ს σ -ინვარიანტულობა შეიძლება გარანტირებულ იქნას მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როცა შესრულებულია (4.5.11) პირობა. იმ შემთხვევაში, თუ $\delta = (K_0 + m)\tau$ σ -ინვარიანტულობის თვისება მიიღწევა $\mu(t)$ სიდიდის ცვლილების რელეური ხასიათის დროს. მოყვანილის გათვალისწინ

ნებით გამომდინარეობს, რომ $S_\mu^\tau(1)$ -სისტემაში σ და c სიდიდეები არ შეიძლება შერჩეულ იქნას თავისუფლად გამომდინარე მხოლოდ იმ პირობებით, რომლებიც წარედგინებათ მართვადი პროცესების დინამიკას, და ამ შემთხვევაში გათვალისწინებული უნდა იქნას (4.5.11) თანაფარდობა. ამას გარდა, აღნიშნული თანაფარდობის მარტივი ანალიზი აჩვენებს, რომ c -ს თითოეულ ფიქსირებულ მნიშვნელობას შეესაბამება ისეთი τ სიდიდის ისეთი კრიტიკული მნიშვნელობა τ_{cr} , რომ ყველა τ -თვის, რომლებიც აკმაყოფილებენ უტოლობას $\tau \leq \tau_{cr}$, (4.5.11) პირობა გამოყოფს რიცხობრივ ღერძზე σ სიმრავლის შესაძლო მნიშვნელობებს. სამართლიანია აღინიშნოს ისიც, რომ τ საკმაოდ დიდი მნიშვნელობის დროს შეუძლებელია არამარტო სარეგულირო კოორდინატების ვექტორის G_δ სიმრავლისადმი მიკუთვნების გარანტია, ასევე ჩაკეტილი სისტემის გადაწყვეტის მდგრადობა. მეორეს მხრივ, τ -ს მცირე მნიშვნელობის დროს, როგორც ჩანს, ყოველთვის შეიძლება ისეთი δ არჩევა, რომელიც დააკმაყოფილებს (4.5.11) უტოლობას. ასევე უნდა აღინიშნოს, რომ როცა $\tau = 0$ (4.5.11) და (4.5.12) უტოლობიდან გადავდივართ თანაფარდობებზე, რომლებიც იძლევიან გარანტიას G_δ -ს σ -ინვარიანტულობის.

(ა) ამოცანის ამოხსნისათვის ვისარგებლოთ განსაზღვრებით [85].

განსაზღვრება 2. G_δ სიმრავლე არის $S_\mu^\tau(1)$ -სისტემის მიმზიდველი სიმრავლე, თუ $S_\mu^\tau(1)$ -სისტემის ნებისმიერი ამონახსნისათვის $(x(t), \dot{x}(t), \mu(t))$ ისეთია, რომ $(x(t_1), \dot{x}(t_1)) \in G_\delta$, ან $\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t), \dot{x}(t)) \in G_\delta$.

აღვნიშნოთ, რომ პირობა რომელიც იძლევა G_δ სიმრავლის მიმზიდველობის თვისების გარანტიას, უზრუნველყოფს ერთდროულად (ა) ამოცანის გადაწყვეტას. შემდეგი თეორემა იძლევა საძიებელ პირობებს.

თეორემა 2. დაუშვათ $S_\mu^\tau(1)$ -სისტემისათვის შესრულებულია (4.5.11) თანაფარდობა.

$$K_0 > c_1 \quad (4.5.14)$$

და მახასიათებლის განტოლებას $P^* + a_2^*P + a_1^* + K_0 = 0$ არ გააჩნიათ ნამდვილი ფესვები a^* და a_2^* ფიქსირებული ნებისმიერი პარამეტრების დროს, დიაპაზონიდან $a_1^* \in [a_1^-, a_2^+]$, $a_2^* \in [a_1^-, a_2^+]$, მაშინ G_δ სიმრავლე წარმოადგენს $S_\mu^z(1)$ -სისტემისათვის მიმზიდველ სიმრავლეს.

$S_\mu^z(1)$ -სისტემაში რეგულირების ხარისხის უზრუნველყოფის ამოცანის ამოხსნა მიიღება (4.5.7) შეფასების დახმარებით, რომელიც მართებულია $(x, \dot{x}) \in G_\delta$ -ს დროს. (4.5.7) თანაფარდობა, სახელდობრ აჩვენებს, რომ თუ $(x, \dot{x}) \in G_\delta$ და $c - \delta > 0$, მაშინ $|x(t)| + |\dot{x}(t)| \rightarrow 0$, როცა $t \rightarrow \infty$.

აქედან გამომდინარე, $S_\mu^z(1)$ -სისტემის გამოკვლევისას მოყვანილი შედეგების ერთობლიობა გვაძლევს საშუალებას ვამტკიცოთ შემდეგი. თუ შესრულებულია 1 და 2 თეორემების პირობები და უტოლობა $c > \delta$, მაშინ $S_\mu^z(1)$ -სისტემის ნებისმიერი ამონახსნისათვის ადგილი აქვს თვისებას $|x(t)| + |\dot{x}(t)| \rightarrow 0$, როცა $t \rightarrow \infty$ და ამას გარდა როცა $(x, \dot{x}) \in G_\delta$ მართებულია ექსპონენციალური შეფასება (4.5.7).

განხილული სისტემის რეგულირების კოორდინატების ვექტორის მიკუთვნების უზრუნველყოფა G_δ სიმრავლისადმი შეუძლებელია ჰისტერეზისის არსებობის გამო, თუნდაც გამოყენებულ იქნას რელეური კოორდინატულ-პარამეტრული უკუკავშირი. ეს ფაქტი აღნიშნულია სახელდობრ [39]-ში. მიუხედავად ამისა, როგორც ეს ნაჩვენებია იქნება შემდგომში, $S_\mu^z(1)$ -სისტემის ამოხსნისათვის, თუ შესაბამისად შეირჩევა კონსტრუქციული პარამეტრები, შეიძლება მივაღწიოთ $(x(t), \dot{x}(t)) \in G_{\delta, \eta}$ ჩართვას $G_{\delta, \eta}$ სიმრავლეებისთვის მოცემული სახით $G_{\delta, \eta} = \{(x, \dot{x}) \in R_x^2 : |\sigma(x)| \leq \delta|x| + \eta\}$.

აქ $\eta = const$, $\eta > \Delta$, სადაც Δ გადამრთველი მოწყობილობას მახასიათებლის ჰისტერეზისის მარყუჟის სიგანეა.

შეიძლება ვაჩვენოთ, რომ თუ $S_\mu^\Delta(1)$ -სისტემის ზოგიერთი ამონახსნისათვის, დაწყებული დროის t_1 მომენტიდან ყველა $t \geq t_1$ -სათვის, შესრულებულია ჩართვა $(x, \dot{x}) \in G_{\delta, \eta}$, მაშინ მართებულია $x(t)$ სიდიდის ცვლილებაზე შემდეგი შეფასება:

$$|x(t)| \leq |x_1(t)| \exp[-(c - \delta)(t - t_1)] + \frac{\eta}{c - \delta} [1 - \exp(-(c - \delta)(t - t_1))], \quad (4.5.15)$$

$$t \geq t_1$$

განვახორციელოთ $S_\mu^\Delta(1)$ -სისტემის გამოკვლევა ზემოთ შემოთავაზებული სქემის მიხედვით და ამოვხსნათ მისთვის (ა), (ბ), (გ) ამოცანების ერთობლიობა.

პირობას, რომელიც უზრუნველყოფს (ბ) ამოცანის გადაწყვეტას, იძლევა შემდეგი მტკიცებულება.

თეორემა 3. დაეუშვათ $S_\mu^\Delta(1)$ -სისტემისთვის შესრულებულია თანაფარდობა:

$$\alpha > \frac{2(K_0 + m)}{\delta(\eta - \Delta)} \eta \quad (4.5.16)$$

$$\max_{t \geq t_0} [c - a_2(t)] < 0 \quad (4.5.17)$$

მაშინ $G_{\delta, \eta}$ სიმრავლე არის σ -ინვარიანტული $S_\mu^\Delta(1)$ -სისტემის სიმრავლის.

თუ შევადარებთ მოყვანილ მტკიცებულებას 1 თეორემასთან, აღვნიშნავთ, რომ $S_\mu^\Delta(1)$ -სისტემისაგან განსხვავებით, რომლისთვისაც გადამრთველი მოწყობილობის არხში გარკვეული კრიტიკული სიდიდის მნიშვნელობის დაგვიანების არსებობის დროს, შეუძლებელია G_σ სიმრავლის σ -ინვარიანტულობის გარანტირება, განსაზღვრული თავისუფალი c და δ მუდმივებით.

ამ შემთხვევაში იგულისხმება, რა თქმა უნდა, რომ G_σ სიმრავლე არ ემთხვევა R_x^2 სივრცეს, მაგრამ უზრუნველყოფს თანხვედრას $|x(t)| + |\dot{x}(t)| \rightarrow 0$, როცა $(x(t), \dot{x}(t)) \in G_{\delta, \eta}$ და $t \rightarrow \infty$. $S_\mu^\Delta(1)$ -სისტემი-

სათვის $G_{\delta, \eta}$ სიმრავლის ასეთი არჩევა არ არის რთული, საკმარისია მხოლოდ უზრუნველყოფა უტოლობის $\eta > \Delta$. ამასთანავე, როგორც (4.5.15.) უტოლობიდან გამომდინარეობს, $S_\mu^\Delta(1)$ -სისტემაში შეუძლებელია სარეგულირო კოორდინატების ვექტორის ნორმის ნულთან თანხვედრის გარანტირება, მაგრამ შესაძლებელია მხოლოდ $S_\mu^\Delta(1)$ -სისტემის პროექციის თანხვედრის უზრუნველყოფა კოორდინატების ზოგიერთ საწყის მიდამოში. აღვნიშნოთ აგრეთვე ისიც, რომ $\Delta=0$ -ის დროს $S_\mu^\Delta(1)$ -სისტემა გადაგვარდება $S_\mu^\Delta(1)$ -სისტემად და მიღებული შედეგები აღეკვატურია $S_\mu^\Delta(1)$ -სისტემის გამოკვლევის [75].

(ა) ამოცანის ამოხსნას $S_\mu^\Delta(1)$ -სისტემისათვის იძლევა შემდეგი მტკიცებულება.

თეორემა 4. დავუშვათ, რომ $S_\mu^\Delta(1)$ -სისტემისათვის შესრულებულია თანაფარდობები (4.5.10.), (4.5.16.), მაშინ $G_{\delta, \eta}$ სიმრავლე წარმოადგენს $S_\mu^\Delta(1)$ -სისტემის მიმზიდველ სიმრავლეს.

ჩამოყალიბებული მტკიცებულების კომენტარს თუ გავაკეთებთ, აღვნიშნავთ, რომ თეორემა 4-ის პირობების შესრულების დროს $S_\mu^\Delta(1)$ -სისტემის თითოეული ამონახსნისთვის არსებობს დროის ბოლო მომენტი $t_1 = t_1(x(t_0), \dot{x}(t_0))$, $\mu(t_0) > t_0$ ისეთი, რომ $(x(t), \dot{x}(t)) \in G_{\delta, \eta}$. ამასთან $S_\mu^\Delta(1)$ სისტემისათვის იგივე პირობების შესრულების დროს, ან თეორემა 2. პირობების, არ გამოირიცხება ისეთი ამონახსნის არსებობა, რომელთათვისაც $|x(t)| + |\dot{x}(t)| \rightarrow 0$, როცა $(x(t), \dot{x}(t)) \in G_{\delta, \eta}$ და $t \rightarrow \infty$ t -ს ასეთი საბოლოო მნიშვნელობის დროს.

უტოლობა (4.5.15.) სამართლიანი $x(t)$ ცდომილების კოორდინატებისათვის, როცა $(x, \dot{x}) \in G_{\delta, \eta}$ და იძლევა საშუალებას შეფასდეს $S_\mu^\Delta(1)$ -სისტემაში რეგულირების ხარისხი.

მოყვანილი შედეგები უჩვენებენ იმას, რომ თუ შესრულებულია თეორემა 3-ის პირობები და უტოლობა $c > \delta$, მაშინ კონსტრუქციული პარამეტრების სათანადო შერჩევით შესაძლებელია $S_\mu^\Delta(1)$ -სისტემაში მართვის პროცესების საჭირო დინამიკის უზრუნველყოფა.

4.6. დასკვნა

გამოკვლეულია დინამიური არაიდეალურობის გავლენა წრფივი არასტაციონარული ობიექტების მართვისას, რომლის დროსაც გამოყენებულია ბინარულობის პრინციპის იდეა, რომელიც მდგომარეობს სისტემის მდგომარეობის სივრცის გაფართოებაში, ანუ ობიექტის კოორდინატების და მართვის სისტემის ოპერატორების ერთობლივ განხილვაში.

განხილულია ოპტიმალური მართვის ბინარული სისტემების სინთეზის მეთოდები რეგულირების არხებში და გადამრთველ მოწყობილობებში არაიდეალურობის არსებობისას. შემოთავაზებულია ანალიზის მეთოდები და მიღებულია თანაფარდობები, რომლებიც უზრუნველყოფენ ჩაკეტილი სისტემის სინთეზის განხორციელებას მოცემულ პირობებში.

გამოკვლეულია წრფივი სასრულგანზომილებიანი დინამიური პროცესების მართვის ბინარული სისტემის მუშაობა რეგულირების არხებში ხმაურის და დაგვიანების არსებობის შემთხვევაში.

განხილულია ავტომატური მართვის ბინარული სისტემების მდგომარეობის მდგრადობის პრობლემა გადამრთველ მოწყობილობებში დაგვიანებისა და ჰისტერეზისის ტიპის არაიდეალურობის არსებობისას. შემოთავაზებულია ასეთი სისტემების ანალიზის მეთოდები, გამოკვლეულია მათი თვისებები. ბოლოს შეიძლება აღვნიშნოთ, რომ ნაშრომში მიღებული შედეგები ბინარული სისტემების გამოკვლევისას, რომლებიც ფუნქციონირებენ გადამრთველი მოწყობილობების არხებში დაგვიანების, ან ჰისტერეზისული პეტლის არსებობისას ქმნიან განხილული კლასის სისტემების პარამეტრული სინთეზის საფუძველს.

თავი 5. ავტომატური ოპტიმიზატორების აბეზა მოსრიალე რეჟიმებზე და მათი ექსპერიმენტული ბამოკვლევა

1. შმსავალი

თანამედროვე პერიოდში გამოთვლითი ტექნიკის, მიკროპროცესორების, სხვადასხვა სახის კონტროლერების, კომპიუტერული ტექნიკის და მათი პროგრამული უზრუნველყოფის განვითარების მიუხედავად დიდი ყურადღება ექცევა ავტომატური ოპტიმიზატორების თეორიის და მათი აგების ინჟინრული მეთოდების განვითარებას, შემოთავაზებულია დიდი რაოდენობის მართვის ალგორითმები და მათ ბაზაზე აგებული მოწყობილობები და სისტემები, მაგრამ მათი გამოყენება რეალური ტექნიკური სისტემების დამუშავებისას გარკვეულ წილად შეზღუდულია (ზოგიერთ შემთხვევაში კი საერთოდ შეუძლებელია).

სადისერტაციო ნაშრომში ჩატარებული გამოკვლევების და დამუშავებული ალგორითმების საფუძველზე განვიხილოთ ავტომატური ოპტიმიზატორების სტრუქტურული და პრინციპული სქემები და მათ ბაზაზე აგებული ავტომატური ოპტიმიზატორების რამოდენიმე სახეობა, რომლებიც საწარმოო პირობებში უნდა აკმაყოფილებდნენ რიგ მოთხოვნებს:

- აპარატურა უნდა იყოს უნივერსალური, რათა შესაძლებელი იყოს მათი გამოყენება სხვადასხვა ტექნოლოგიური ობიექტებისათვის;
- გამოყენებული აპარატურის საიმედოობა უნდა იყოს მაღალი;
- ოპტიმიზატორების სქემები უნდა იყოს მარტივი ექსპლუატაციისათვის;
- მათი გამოყენების შესაძლებლობა აფეთქებასაფრთხიან და აგრესიულ გარემოში, სადაც არის რადიაცია და ელექტრული დაბრკოლება;
- სტანდარტულ ელემენტებზე მათი აწყობის შესაძლებლობა ქარხნულ პირობებში.

როგორც ცნობილია მეტალურგიულ, ენერგეტიკულ, რადიოტექნიკურ და მრეწველობის სხვა დარგებში (გარდა ქიმიური და ნავთობ-ქიმიური წარმოებების) ფართოდ გამოიყენება ელექტრული და ელექტ-

რონული რეგულატორები. ასეთი აპარატურის უპირატესობა მათი ნაკლები ინერციულობაა. მაგრამ მათი გამოყენება შეზღუდულია აფეთქებასაფრთხიან პირობებში და იქ, სადაც არის რადიაცია და ელექტრული დაბრკოლება. ამასთან დაკავშირებით დამუშავებულ იქნა სამრეწველო პნევმოავტომატიკის ელემენტების უნივერსალური სისტემა (УСЭ ППА) [89]. ასეთი ელემენტების ფუნქციონალური შესაძლებლობა იმდენად დიდია, რომ მათ ბაზაზე შეიძლება შეიქმნას ნებისმიერი მმართველი მოწყობილობა და სისტემა როგორც უწყვეტი, ასევე დისკრეტული მოქმედების, შეუძლიათ იმუშაონ საიმედოდ აფეთქებასაფრთხიან და აგრესიულ გარემოში, აგრეთვე გარემოში, სადაც არის რადიაცია და ელექტრული დაბრკოლება, მარტივია კონსტრუქციულად და აქვს საშუალება იმუშაოს კომპლექტში ნებისმიერ ელექტრონულ და კომპიუტერულ ტექნიკასთან.

ქვემოთ განხილულია უნივერსალური პნევმოელემენტების ბაზაზე აგებული ავტომატური ოპტიმიზატორების რამოდენიმე სახეობას [51-56]. გამოკვლეულია მათი მუშაობა, მოცემულია პარამეტრების არჩევის რეკომენდაცია, ნაჩვენებია ტექნოლოგიური ობიექტების ოპტიმალური მართვის სისტემებში ავტომატური ოპტიმიზატორების გამოყენების მაგალითები, როგორც ექსტრემალური მახასიათებლის მქონე ობიექტის მართვისას ასევე სტაბილიზაციის ამოცანის გადაწყვეტისას [90-93].

5.2. პნევმატური ექსტრემალური რეგულატორი ძიების

მუდმივი სიჩქარით – ერკ-3

განვიხილოთ ექსტრემალური რეგულატორის აგების შესაძლებლობა შემოთავაზებული (2.2.3) და (2.2.7) ალგორითმების საშუალებით, რომლის თანახმად ობიექტის გამოსავალი სიდიდე y მიმდევრო სისტემაში ედარება სპეციალურად შერჩეულ დამკვეთ ზემოქმედებას, რომელიც ფორმირდება მონოტონურად ზრდადი ან კლებადი დროის ფუნქციის სახით $g(t)$. თუ უზრუნველყოფთ y -ის მიყოლას $g(t)$ -ს მიმართ, მაშინ y მონოტონურად მიისწრაფის ექსტრემუმისკენ [49]. ასეთი სისტემის სტრუქტურული სქემა მოცემულია ნახ. 2.2.2.-ზე და მოძრაობა მასში აღიწერება განტოლებით:

$$\begin{aligned} y &= f(x) & \varepsilon &= g - y \\ \dot{x} &= u = u_0 \operatorname{sign}[\varepsilon(\varepsilon + \delta)], & \dot{g} &= -\rho(u) + V, \end{aligned} \quad (5.2.1.)$$

სადაც $u_0 = \text{const}$, $u_0 > 0$ – განსაზღვრავს მმართველი სიგნალის სიდიდეს, $\delta > 0$ მმართველი სიგნალის გადართვის წერტილების „სიახლოვეს“ ε ღერძზე, $\rho(u)$ – დამკვეთი ზემოქმედების სიჩქარის ცვლილება, სიგნალი V განკუთვნილია $y(0)$ და $g(0)$ საწყისი პირობების შესათანხმებლად და ფორმირდება სამპოზიციურ პოლარიზებულ ელემენტზე პისტერეზისული მარყუჟის სიგანით

$$V = \begin{cases} +M, & \text{როცა } \sigma_1 - \Delta > 0 \text{ და } \sigma_2 > 0, \\ 0, & \text{როცა } (\sigma_1 + \Delta)(\sigma_2 - \Delta) < 0, \\ -M, & \text{როცა } \sigma_1 < 0 \text{ და } \sigma_2 + \Delta < 0; \end{cases} \quad (5.2.2.)$$

$$M \gg \rho, \quad \sigma_1 = \varepsilon, \quad \sigma_2 = \varepsilon + \delta.$$

[49]-ის თანახმად ნებისმიერი საწყისი პირობებისას ასეთ სისტემაში ყოველთვის აღიძვრება მოსრიალე რეჟიმი, რომლის დროსაც ობიექტის გამოსავალი კოორდინატა მონოტონურად მიისწრაფის მინიმუმისკენ თანახმად განტოლებისა:

$$\dot{y} = -\rho(u) \quad (5.2.3.)$$

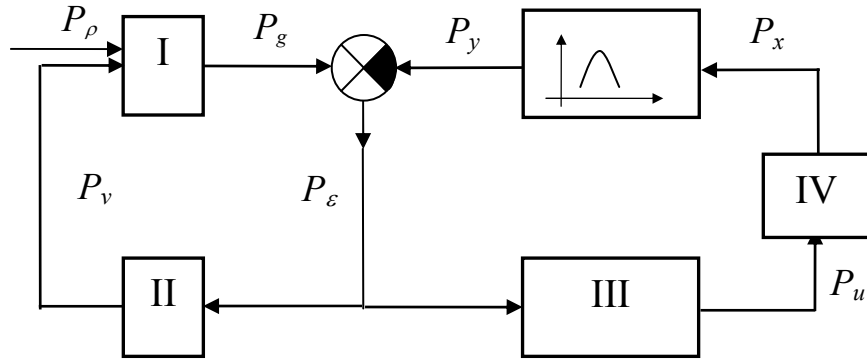
გვაქვს რა საშუალება ავირჩიოთ დამოკიდებულება $\rho(u)$, შეიძლება შევქმნათ გარდამავალი პროცესი სასურველი თვისებებით, მათ შორის უზრუნველყოთ ექსტრემუმთან მიახლოების მაქსიმალური სიჩქარე. ასეთი მიდგომა შეიძლება გამოყენებული იქნას ოპტიმიზაციის ამოცანის გადაწყვეტისას, როდესაც არსებობს შეზღუდვა

$$x \in D(x), \quad (5.2.4.)$$

და იმ შემთხვევაშიც, როდესაც აუცილებელია გათვალისწინებულ იქნას ობიექტის დინამიური თვისებები.

განვიხილოთ (5.2.1.) და (5.2.2.) ალგორითმების ბაზაზე აგებული ექსტრემალური რეგულატორის მუშაობის პრინციპი რეალიზებული პნევმოელემენტებზე [51-53].

პნევმატური ექსტრემალური რეგულატორი მრკ-3 გამოიყენება ექსტრემალური მახასიათებლის მქონე ნაკლებად ინერციული ობიექტების ოპტიმიზაციისათვის. მისი ბლოკ-სქემა მოცემულია ნახ. 5.2.1.-ზე.



ნახ. 5.2.1.

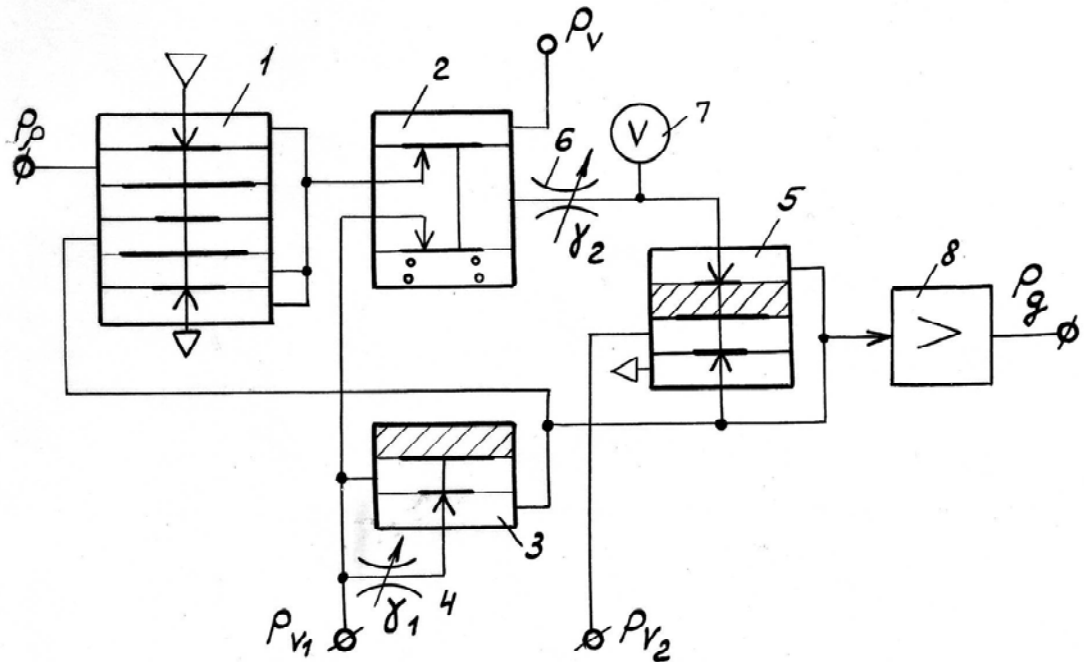
I ბლოკი წარმოადგენს P_g დამკვეთი ზემოქმედების მაფორმირებელ ინტეგრატორს, II – საწყისი პირობების მაფორმირებელი ბლოკი გამოსავალი P_v სიგნალით, III – P_u მართვის სიგნალის მაფორმირებელი ბლოკი, IV – ობიექტის შესავალი P_x სიგნალის მაფორმირებელ ინტეგრატორს. P_y , P_x , P_ε , P_g – წნევებია, პროპორციული ობიექტის გამოსავალი კოორდინატის, ობიექტის შესავალი პარამეტრის, განუთანხმობის სიდიდის და დამკვეთი ზემოქმედების, შესაბამისად. რეგულატორში იგულისხმება, რომ $P_\rho = const$, რაც შეესაბამება P_y -ის თანაბრად მიახლოებას P_y^{max} . სისტემებში ძიების მუდმივი სიჩქარით ექსტრემუმთან მიახლოებისას გლუვი მახასიათებლის გამო $\frac{df}{dx}$ კოეფიციენტის სიდიდე მცირდება და მოსრიალე რეჟიმი წყდება. შემდეგ წარმოიქმნება რხევითი რეჟიმი და ამ რეჟიმში P_y განაგრძობს მოძრაობას ექსტრემუმისკენ. ექსტრემუმის მიდამოში მყარდება რხევები, რომლის ამპლიტუდა Δ -ს პროპორციულია და ეს კი განსაზღვრავს ძიების ცდომილებას.

განვიხილოთ თითოეული ბლოკის რეალიზაციის შესაძლებლობა პნევმოელემენტებზე და შემდგომ მთლიანად ექსტრემალური რეგულატორის.

დამკვეთი ზემოქმედების მაფორმირებელი ინტეგრატორის დანიშნულებაა P_g დამკვეთი ზემოქმედების ფორმირება მონოტონურად ზრდადი დროის ფუნქციის სახით:

$$\dot{P}_g = P_\rho + P_v, \quad P_\rho = \text{const} > 0 \quad (5.2.5.)$$

ინტეგრატორი (ნახ. 5.2.2.) შედგება შედარების ელემენტისაგან – 1, რელესაგან – 2, სარქველისაგან – 3, ცვლადი დროსელისაგან – 4, რელე – 5, ინერციული რგოლისაგან, რომელიც შედგება ცვლადი დროსელისა – 6 და მოცულობისაგან – 7, და გამაძლიერებლისაგან – 8.



ნახ. 5.2.2.

სქემის მუშაობის გასარკვევად განვიხილოთ შემთხვევა, როცა შემავალი სიდიდეები $P_v = P_{v_1} = P_{v_2} = 0$, სადაც P_v , P_{v_1} და P_{v_2} I ინტეგრატორის მმართველი შესავალი სიგნალებია, რომელთა მნიშვნელობები ფორმირდება II ბლოკში. ამ პირობების დროს P_ρ სიდიდე, რომელიც მეტია ნულზე $P_\rho > 0$, მიეწოდება შედარების ელემენტის 1 დადებით კამერაში, რომლის გამოსავალი ამომრთველი რელეს 2 ნორმალურად ღია საქშენის გავლით მიეწოდება ინერციულ რგოლს. ინერციული რგოლის გამოსავალი რელე 5-ის ნორმალურად ღია საქშენის გავლით მიეწოდება 8 გამაძლიერებლის შესავალს და ინერციული რგოლის დადებითი უკუკავშირის დახმარებით გამაძლიერებლის გამოსავალზე მივიღებთ P_g სიგნალს, პროპორციულს ინტეგრატორისა P_ρ -დან. ინტე-

გრატორის დროის მუდმივა რეგულირდება ფართო დიაპაზონში ცვლადი დროსელის γ_2 დახმარებით.

განვიხილოთ მეორე შემთხვევა, როცა შესავალი სიგნალები $P_v = 1$, $P_{v_1} = 1$ და $P_{v_2} = 0$. P_v სიგნალი, რომელიც მიეწოდება ამომრთველი რელეს მმართველ კამერას, დაკეტავს ნორმალურად ღია საქშენს და გახსნის ნორმალურად ჩაკეტილ საქშენს. რელე 5-ის გამოსავალზე შეიკრიბება P_{v_1} სიგნალი, გამავალი ამომრთველი რელეს ღია საქშენის გავლით, ინერციული რგოლის და 3 რელეს სარქველის გავლით. ამ შემთხვევაში P_g -ს ცვლილების სიჩქარე შეიძლება გაეზარდოს γ_1 დროსელის გამტარიანობის ცვლილებით:

მესამე შემთხვევაში $P_v = P_{v_2} = 1$ და $P_{v_1} = 0$. ამ დროს დამკვეთი ზემოქმედება რელე 5-ის ღია სარქველის გავლით სწრაფად იცლება, რის შედეგადაც მყისიერად იქმნება პირობა, რომლის დროსაც დამკვეთი ზემოქმედება P_g სწრაფად „ეწევა“ ობიექტის P_y გამოსავალს.

საწყისი პირობების მაფორმირებელი ბლოკის II – დანიშნულებაა მართვის სისტემაში საწყისი პირობების მყისიერი შექმნა:

$$(P_g - \Delta + \delta)(P_g + \Delta) \leq 0, \quad (5.2.6)$$

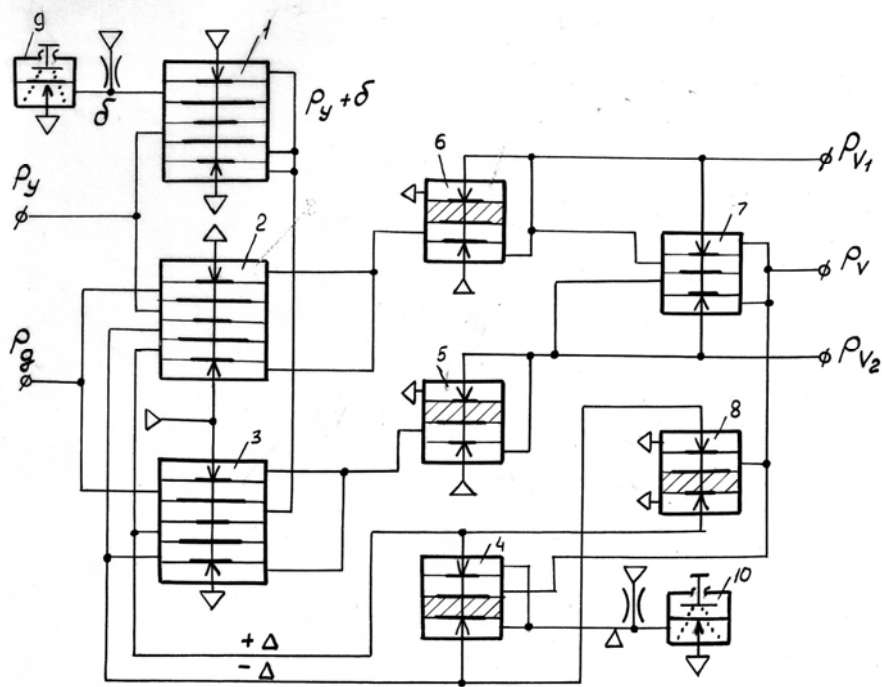
და განტოლებას, რომელიც აღწერს მის მუშაობას, აქვს შემდეგი სახე:

$$P_v = \begin{cases} 1 & \text{როცა } P_g - (P_y + \Delta) < 0 \text{ და } P_g - (P_y + \delta - \Delta) < 0; \\ 0 & \text{როცა } [P_g - (P_y - \Delta)] [P_g - (P_y + \delta + \Delta)] < 0; \\ -1 & \text{როცა } P_g - (P_y + \Delta) > 0 \text{ და } P_g - (P_y + \delta - \Delta) < 0; \end{cases}$$

$$P_{v_1} = \begin{cases} 1 & \text{როცა } P_g - (P_y + \Delta) < 0; \\ 0 & \text{როცა } P_g - (P_y - \Delta) > 0; \end{cases} \quad (5.2.7)$$

$$P_{v_2} = \begin{cases} 1 & \text{როცა } P_g - (P_y + \delta + \Delta) < 0; \\ 0 & \text{როცა } P_g - (P_y + \delta - \Delta) > 0; \end{cases}$$

საწყისი პირობების მაფორმირებელი ბლოკი, რომლის პრინციპული სქემა მოცემულია ნახ. 5.2.3-ზე, შედგება შედარების სამი ელემენტისგან, 1, 2, და 3; ხუთი რელესაგან 4, 5, 6, 7, 8 და ორი მაგალბლისაგან 9 და 10. ბლოკის შემავალი სიდიდეებია P_y და P_g , გამოსავალი – P_v , P_{v_1} , P_{v_2} . შედარების ელემენტებზე 2 და 3 დამკვეთი ზემოქმედება P_g ედარება $P_y + \Delta$ და $P_y + \delta + \Delta$ სიგნალებს, სადაც δ და Δ მცირე დადებითი სიდიდეებია, რომლებიც რეგულირდება 9 და 10 დამკვეთით.



ნახ. 5.2.3.

განვიხილოთ სქემის მუშაობა იმ შემთხვევაში, როცა სრულდება უტოლობა $P_g < P_y + \Delta$, ამ დროს შედარების ელემენტის 2 გამოსავალი სიგნალი მიეწოდება რელე 6-ის დადებით კამერაში, რომლის გამოსავალი მიერთებულია რელე 7-ის შესავალთან, მისი გამოსავალი – რელე 4-ის და 8 შესასვლელებთან. ასეთ შემთხვევაში ბლოკის გამოსასვლელი სიგნალები $P_{v_1} = P_v = 1$, ხოლო $P_{v_2} = 0$ და ერთდროულად 4 და 7 რელეების დახმარებით Δ სიდიდე შედარების ელემენტების დადებითი კამერებიდან გადაირთვება უარყოფით კამერებში.

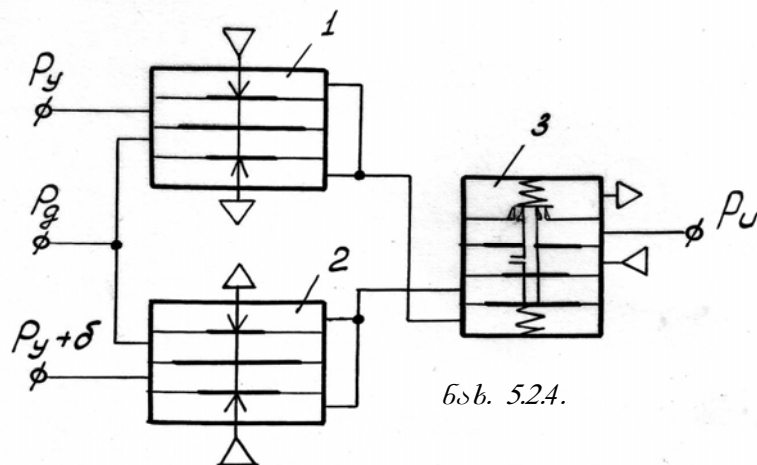
მეორე შემთხვევაში, როცა სრულდება უტოლობა

$$P_y - \Delta < P_g < P_y + \delta + \Delta,$$

შედარების 2, 3 ელემენტების გამოსავალი სიგნალები ტოლი გახდება ნულის და შესაბამისად ბლოკის გამოსავალი სიგნალები $P_v = P_{v_1} = P_{v_2} = 0$. მესამე შემთხვევაში, როდესაც სრულდება უტოლობა $P_g > P_y + \delta - \Delta$, შედარების ელემენტ 2-ის გამოსავალი სიგნალი უდრის ნულს და შესაბამისად $P_{v_1} = 0$, ხოლო შედარების ელემენტ 3-ის გამოსავალი სიგნალი განსხვავდება ნულისაგან და შესაბამისად რელე 5 და რელე 7-ის გამოსავალი სიგნალები $P_{v_2} = P_v = 1$.

მართვის სიგნალის მაფორმირებელი ბლოკის დანიშნულებაა P_u სიგნალის ფორმირება შემდეგი გამოსახულებით:

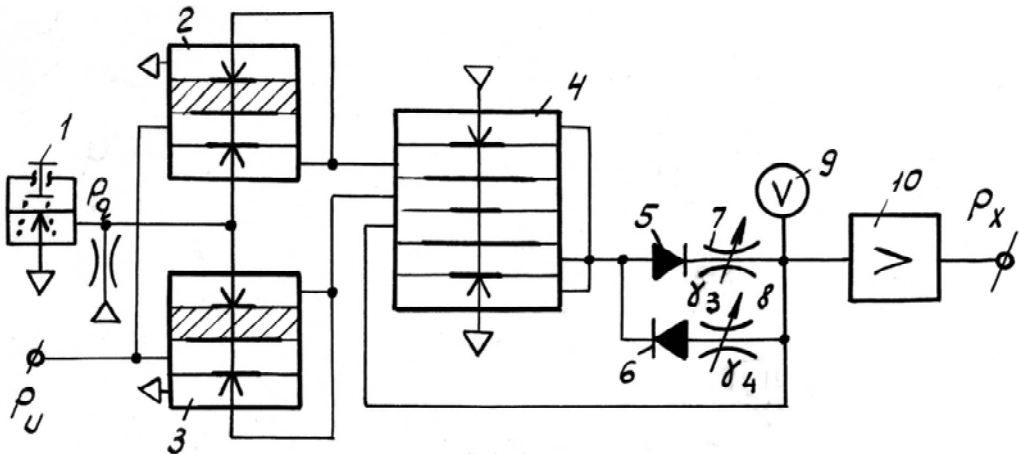
$$P_u = \begin{cases} 0 & \text{როცა } P_g - P_y < 0 \text{ და } P_g - (P_y + \delta) > 0; \\ 1 & \text{როცა } (P_g - P_y) [P_g - (P_y + \delta)] < 0. \end{cases} \quad (5.2.8.)$$



დამკვეთი ზემოქმედების სიდიდე P_g 1 და 2 ელემენტებზე (ნახ. 5.2.4.) ედარება ობიექტის გამოსავალ P_y სიდიდესა და $P_y + \delta$ სიდიდეს. პირველ შემთხვევაში როცა $P_g < P_y$, გამოსავალი სიგნალები 1 და 2 ელემენტების ტოლია 1-ის და მიეწოდება რელე 3-ის დადებით და უარყოფით კამერაში, ამ დროს ბლოკის გამოსავალი სიგნალი $P_u = 0$. როცა სრულდება უტოლობა $P_y < P_g < P_y + \delta$, ელემენტი 1-ის გამოსავალი სიგნალი ტოლია ნულის, ელემენტ 2-ის გამოსავალი სიგნალი - 1-ის, რომელიც მიეწოდება რელე 3-ის დადებით კამერას და

შესაბამისად ბლოკის გამოსავალი სიგნალი $P_u = 1$. მესამე შემთხვევაში, როცა სრულდება უტოლობა $P_g < P_y + \delta$, გამოსავალი სიგნალები ტოლია ნულის და შესაბამისად, ბლოკის გამოსავალი სიგნალი $P_u = 0$.

ზემოთ აღწერილიდან ჩანს, რომ მართვის სიგნალი არის რელეური და შემდგომში იგი მიეწოდება ინტეგრატორს, რომლის გამოსავალი წარმოადგენს ობიექტის შესავალ სიგნალს P_x .



ნახ. 5.2.5.

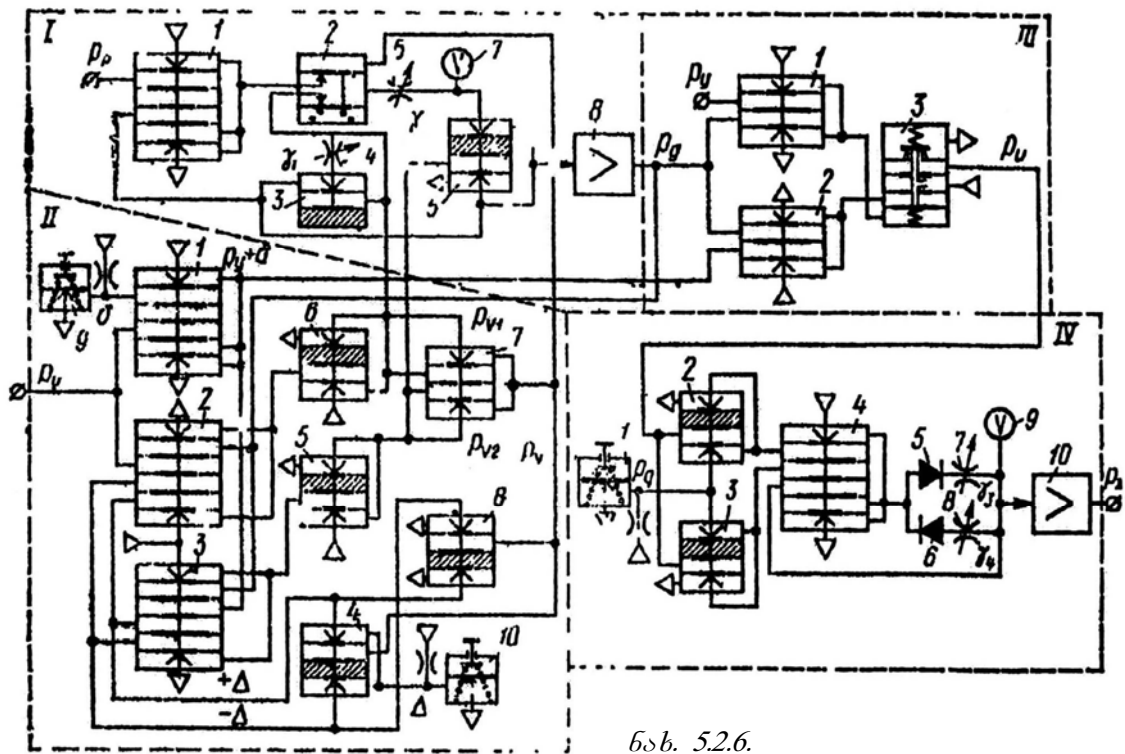
ინტეგრატორის ბლოკის (ნახ. 5.2.5) დანიშნულებაა ობიექტის შესავალი კოორდინატის P_x ცვლილება, რომლის მუშაობა აღიწერება განტოლებით

$$P_x = \begin{cases} P_q \gamma_3 & \text{როცა } P_u = 1; \\ -P_q \gamma_4 & \text{როცა } P_u = 0; \end{cases} \quad (5.2.9)$$

$$P_q > 0, \gamma_3 > 0, \gamma_4 > 0,$$

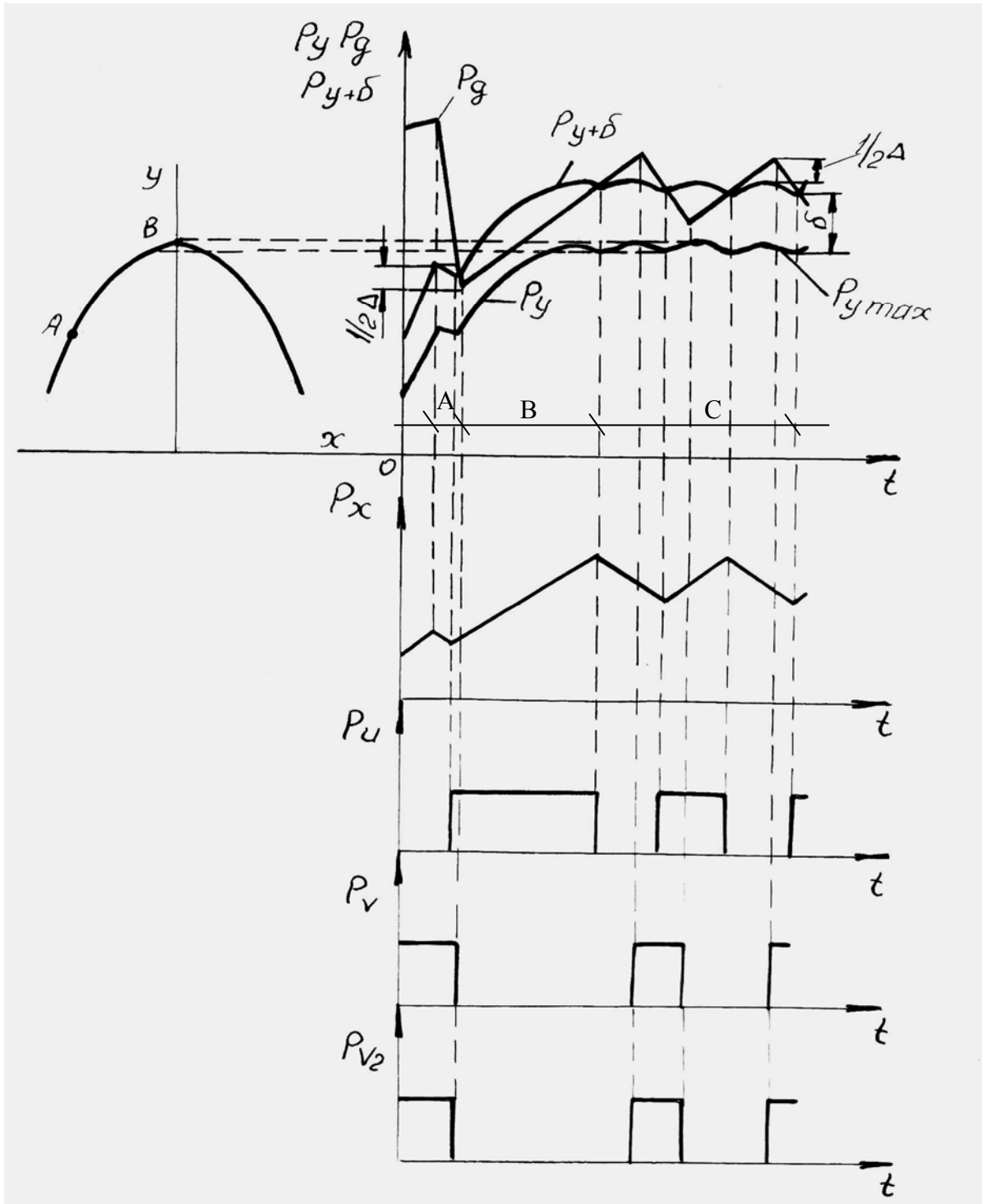
სადაც P_q სიდიდე ასახავს P_x -ის ცვლილების სიჩქარეს, ხოლო γ_3 და γ_4 წარმოადგენენ სარეგულირებელ პარამეტრებს, რომელთა არჩევა წარმოებს ობიექტის ექსტრემალური მახასიათებლის $f(x)$ -ის სახის მიხედვით. როდესაც ინტეგრატორის შესავალი მართვის სიგნალი $P_u = 1$, გამოსავალი სიგნალი P_x იზრდება. \dot{P}_x ზრდის სიჩქარე განისაზღვრება P_q სიდიდით და ცვლადი დროსთვის γ_3 გამტარიანობით. როდესაც $P_u = 0$, სიდიდე P_q სხვადასხვა არხების გავლით შემდეგ უერთდება

ატმოსფეროს და შესაბამისად \dot{P}_x სიდიდე იწვევს შემცირებას, რომლის სიჩქარე დამოკიდებულია P_q სიდიდესა და ცვლადი დროსელის γ_4 გამტარიანობით. პნევმატური ექსტრემალური რეგულატორის – მრპ-3 საერთო პრინციპული სქემა მოცემულია ნახ. 5.2.6 და მისი მუშაობის დროითი დიაგრამა ნახ. 5.2.7.



ნახ. 5.2.6.

ზემოთ აღწერილ შემთხვევაში, როგორც ეს ჩანს რეგულატორის მუშაობის დროითი დიაგრამიდან, ძიების პროცესი შედგება სამი ეტაპისაგან. პირველ ეტაპზე (ზონა A) დამკვეთი ზემოქმედების P_g სიდიდე „ეწვეა“ ობიექტის P_y გამოსავალს. მეორე ეტაპზე (ზონა B) ობიექტის გამოსავალი სიდიდე იზრდება მაქსიმუმამდე, მიჰყვება რა მუდმივი სიჩქარით ზრდად დამკვეთ ზემოქმედებას. მესამე ეტაპზე (ზონა C) ექსტრემუმის მიღამოებში წარმოიქმნება ავტორხევები, რომლის ამპლიტუდა განისაზღვრება Δ სიდიდით.



ნახ. 5.2.7.

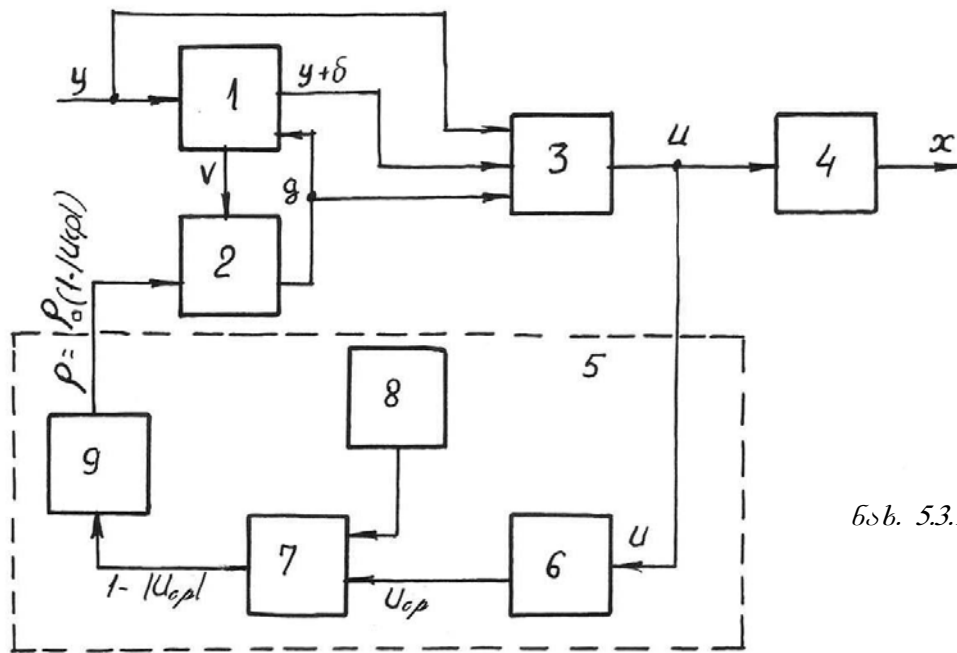
როგორც დიაგრამიდან ჩანს მაქსიმუმის ძიების მეორე ეტაპზე დაძვეული ზემოქმედების სიჩქარის ცვლილება მუდმივია, ამის გამო ექსტრემალური ობიექტის მახასიათებლის დახრილობის ცვლილების შემთხვევაში განხილულ რეგულატორში მოძრაობა ექსტრემუმისაკენ ხორციელდება არასაკმარისი სიჩქარით. ასეთი ობიექტებისათვის სასუ-

რგულია ისეთი ექსტრემალური რეგულატორის დამუშავება, სადაც ძიების სიჩქარე იცვლება ობიექტის მახასიათებლის დახრილობის ცვლილების მიხედვით.

ქვემოთ განხილულია ერთ-ერთი ასეთი პნევმატური ექსტრემალური რეგულატორი [54].

5.3. პნევმატური ექსტრემალური რეგულატორი კიბის ცვლადი სიჩქარით – მრკ-1

როგორც ცნობილია, ნებისმიერი ექსტრემალური სისტემის მუშაობის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან მაჩვენებელს წარმოადგენს ექსტრემუმის ძიების დრო. ქვემოთ განიხილება პნევმატური ექსტრემალური რეგულატორის მრკ-1 მოწყობილობა და მუშაობის პრინციპი ექსტრემუმის ძიების ცვლადი სიჩქარით. რეგულატორი, რომლის სტრუქტურული სქემა ნაჩვენებია ნახ. 5.3.1-ზე.



ნახ. 5.3.1.

იგი შედგება გადართვის ბლოკისაგან 1, დამკვეთი ზემოქმედების მაფორმირებელი პირველი ინტეგრატორისაგან 2, რევერსული სიგნალის მაფორმირებელი ბლოკისაგან 3, მეორე ინტეგრატორისაგან 4 და არაწრფივი დინამიკური კორექციის რგოლისაგან 5, რომელიც შედგება ინერციული რგოლისაგან 6, ამჯამავე მოწყობილობის 7, მავალელებით 8

ერთეული სიგნალის მიწოდებისათვის და გამაძლიერებლისაგან მუდმივი კოეფიციენტით 9 [54].

პნემატური ექსტრემალური რეგულატორის მრკ-1 მუშაობის პრინციპი ანალოგიურია ზემოთ აღწერილი ექსტრემალური რეგულატორის მრკ-3, განსხვავება არის მხოლოდ იმაში, რომ აქ შეიძლება შეიცვალოს ობიექტის ექსტრემალური მახასიათებლის დახრილობა და საჭიროა, რომ ექსტრემუმის ძიების სიჩქარე იცვლებოდეს მახასიათებლის დახრილობაზე დამოკიდებულებით. ასეთი მიდგომა გვაძლევს

საშუალებას გავზარდოთ ძიების ტემპი $\frac{df}{dx}$ კოეფიციენტის დიდი მნიშვნელობის დროს და შევანელოთ $\frac{df}{dx}$ მცირე მნიშვნელობის დროს. რა

თქმა უნდა, ისეთ სისტემაში, როგორც წინა თავებში იყო ნახვენები, დაუშვებელია $\frac{df}{dx}$ -ის პირდაპირი გაზომვა. ამ რეგულატორში ინფორ-

მაციას $\frac{df}{dx}$ -ის შესახებ შეიცავს მართვის საშუალო მნიშვნელობა $u_{საშ.}$, რომელიც წარმოადგენს ინერციული რგოლის 6 გამოსავალს დროის მცირე τ მუდმივით.

მაციას $\frac{df}{dx}$ -ის შესახებ შეიცავს მართვის საშუალო მნიშვნელობა $u_{საშ.}$, რომელიც წარმოადგენს ინერციული რგოლის 6 გამოსავალს დროის მცირე τ მუდმივით.

$$\tau \dot{u}_{საშ.} + u_{საშ.} = u, \quad (5.3.1)$$

სადაც u – წარმოადგენს რევერსული ბლოკის 3 გამოსავალს. სასურველი დამოკიდებულება ძიების სიჩქარისა $\frac{df}{dx}$ -თან ექნება ადგილი იმ შემთხვევაში, თუ დამკვეთი ზემოქმედების სიჩქარის ცვლილებას ჩამოვაყალიბებთ შემდეგი სახით.

$$\rho = \rho_0 (1 - |u_{საშ.}|). \quad (5.3.2)$$

ვინაიდან მოსრიალე რეჟიმში ინერციული რგოლი (5.3.1) გაფილტვრავს მართვის ფუნქციის მაღალსიხშირულ მდგენელს, მისი გამოსავალი სიდიდე ტოლი იქნება მართვის საშუალო მნიშვნელობის $u_{საშ.}$, მოთავსებულს $-u_0$ და $+u_0$ -ს შორის. მოძრაობა მოსრიალე რეჟიმში განპირობებული იქნება მართვის ამ საშუალო მნიშვნელობით

და ამიტომ ძიების სიჩქარის სასურველ დამოკიდებულებას $\frac{df}{dx}$ -გან

ექნება ადგილი იმ შემთხვევაში, თუ დამკვეთი ზემოქმედების სიჩქარის ზრდას ექნება შემდეგი სახე:

$$\dot{g} = \rho_0(1 - |u_{საშ.}|), \quad (5.3.3.)$$

სადაც ρ_0 მუდმივი სიდიდეა, $\rho_0 > 0$ რომლის ნებისმიერი მნიშვნელობის დროს წარმოიქმნება მოსრიალე რეჟიმი.

(5.3.3.)-ში მითითებული დამოკიდებულების რეალიზაციისათვის ობიექტის მართვის სისტემაში გამოიყენება არაწრფივი დინამიკური კორექციის რგოლი 5 [54]. ზემოთ აღწერილიდან ჩანს, რომ ექსტრემალური მახასიათებლის დახრილობის ცვლილების დროს, მაგალითად მისი გაზრდისას იზრდება მართვის u სიგნალის გადართვის სიხშირე და შესაბამისად მცირდება ინერციული სიგნალი რგოლის 6 გამოსავალი სიდიდე. მაგრამ შემდგომში $|u_{საშ.}|$ ამჟამავ მოწყობილობაში 7 ერთეულ სიგნალთან შეჯამების შემდეგ 7-ის გამოსავალი სიდიდე $(1 - |u_{საშ.}|)$ იზრდება და შემდგომ $\rho_0 > 0$ მუდმივ სიდიდეზე გამრავლებისას ერთდროულად იზრდება მე-9 ბლოკის გამოსავალი სიგნალი

$$\rho = \rho_0(1 - |u_{საშ.}|).$$

ρ -ს ზრდის შესაბამისად იზრდება დამკვეთი ზემოქმედების სიჩქარე

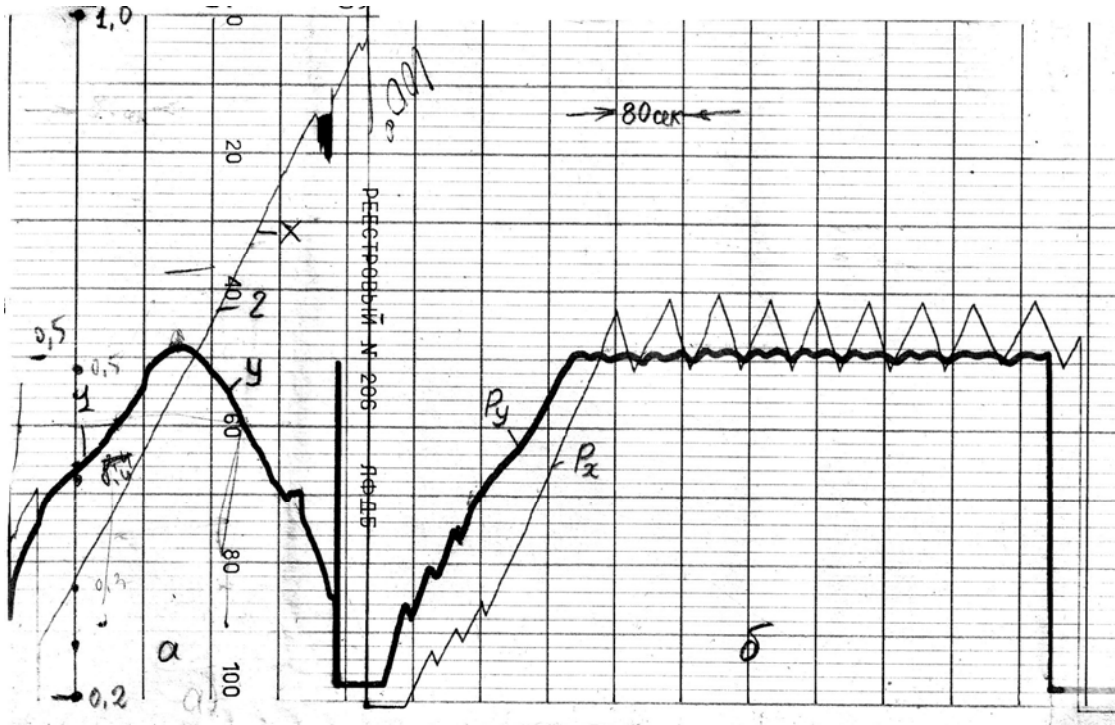
$$\dot{g} = \rho,$$

რაც უზრუნველყოფს ჯამში ექსტრემუმის ძიების სიჩქარის გაზრდას.

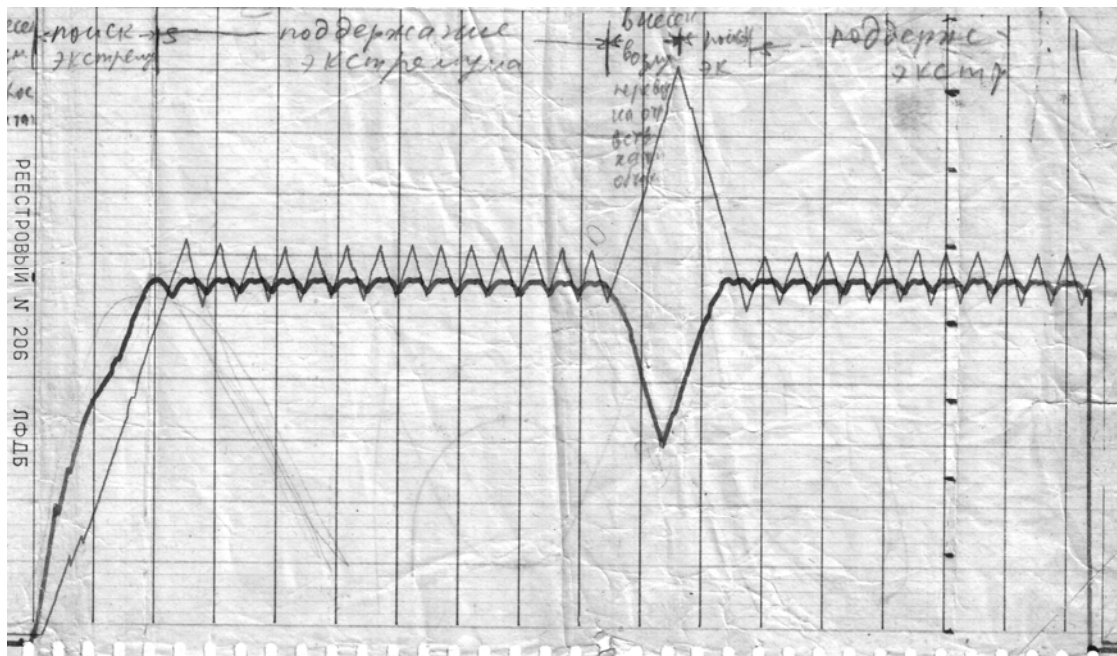
ნახ. 5.3.2. და 5.3.3.-ზე გამოსახული მუშაობის დიაგრამებიდან ჩანს ძიების სიჩქარის სხვადასხვაობა ზემოთ აღწერილ პნევმატურ ექსტრემალურ რეგულატორებს შორის, რომელთაგან ნახ. 5.3.2.-ზე ნაჩვენებია პნევმატური ექსტრემალური რეგულატორის მრპ-3-ის ძიების პროცესი მუდმივი სიჩქარით.

ხოლო ნახ. 5.3.3.-ზე პნევმატური ექსტრემალური რეგულატორის მრპ-1-ის მიერ მაქსიმუმის ძიების პროცესი ცვლადი სიჩქარით, რომელიც იცვლება მახასიათებლის დახრილობის მიხედვით. დიაგრამების შედარებისას ნათლად ჩანს, რომ მუდმივი სიჩქარით ძიების პროცესის დროს რევერსული გადართვები უფრო ხშირია, რაც იწვევს ძიების პროცესის თითქმის 1,5-ჯერ შემცირებას, მაშინ როდესაც ცვლადი

სიხარით ძიების პროცესის დროს რევერსული გადართვები თითქმის არ არის და ამით მიიღწევა ძიების მაქსიმალური სიხარე.



ნახ. 5.3.2.



ნახ. 5.3.3.

ნაკლებად ინერციული ტექნოლოგიური ობიექტების ოპტიმიზაციის დროს ექსტრემალური რეგულატორების გამოყენება გაძნელებულია მართვის სიგნალის გადართვის დიდი სიხშირის გამო, განსაკუთრებით

ექსტრემუმის მიდამოებში. გადართვის ასეთ სიხშირეს შემსრულებელი მექანიზმები ხშირად ვერ უძლებენ, მითუმეტეს, თუ ეს შემსრულებელი მექანიზმები არის მემბრანული. ამას გარდა, როგორც ზემოთ იქნა აღნიშნული, მართვის სიგნალის ხშირი გადართვის შემთხვევაში ექსტრემუმის ძიების სიჩქარე არ არის მაქსიმალური.

ამ გარემოებამ მიგვიყვანა ავტომატური ოპტიმიზატორების ახალი სქემების დამუშავების აუცილებლობამდე [55, 56, 94].

5.4. ავტომატური ოპტიმიზატორი – პაო-1

ავტომატური ოპტიმიზატორი პაო-1, რომლის სტრუქტურული სქემა მოცემულია ნახ. 5.4.1-ზე, შედგება მართვის სიგნალის მაფორმირებელი ბლოკისაგან 1, დამკვეთი ზემოქმედების ფორმირების ინტეგრატორისგან 2 და ობიექტის შესავალი სიგნალის ფორმირების ინტეგრატორისაგან 3 [55].

ოპტიმიზატორის მუშაობის პრინციპი მდგომარეობის შემდეგში. ობიექტის გამოსავალი y სიდიდე შედარების ელემენტზე 6 ედრება ცვლად სიდიდეს z , რომელიც ტოლია

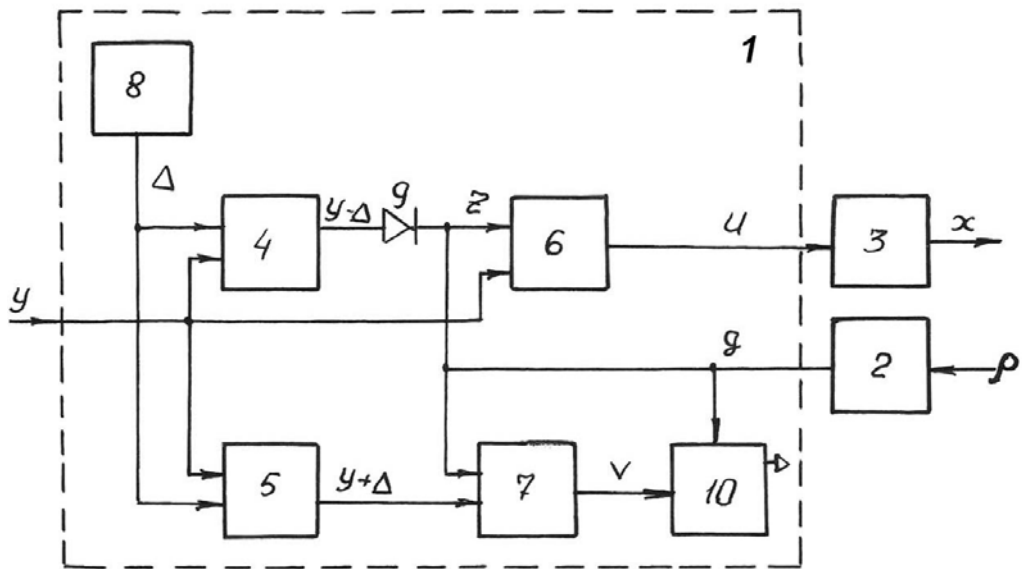
$$Z = \begin{cases} g, & \text{როცა } g - (y - \Delta) > 0, y - (y + \Delta) < 0, \\ y - \Delta, & \text{როცა } g - (y - \Delta) < 0, y - (y + \Delta) > 0, \end{cases} \quad (5.4.1)$$

სადაც $\dot{g} = \rho$ ინტეგრატორის 2 გამოსავალი დამკვეთი ზემოქმედებაა და წარმოადგენს მონოტონურად ზრდად დროის ფუნქციას, $\rho = const$, Δ – მცირე დადებითი სიდიდე, რომელიც რეგულირდება მავალელებით 8.

მიღებული განუთანხმოების სიგნალი $\varepsilon = z - y$ გამოიყენება მმართველი სიგნალის u ჩამოსაყალიბებლად, ტოლი

$$u = \begin{cases} 0, & \text{როცა } \varepsilon < 0, \\ 1, & \text{როცა } \varepsilon > 0, \end{cases} \quad (5.4.2)$$

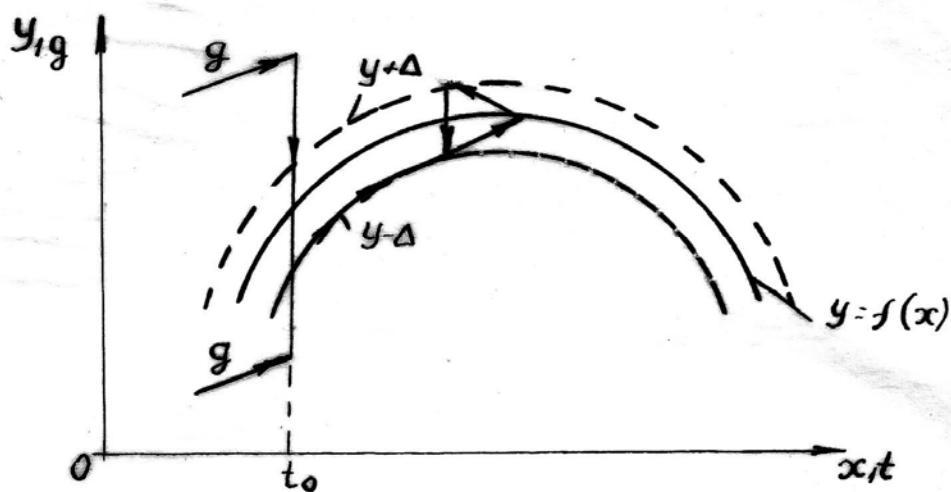
რომელიც იმოქმედებს რა გამოსავალ ინტეგრატორზე 3, მიიყვანს ამ განუთანხმოების ცდომილებას ნულამდე და უზრუნველყოფს შემდგომში y სიდიდის მიახლოებას ექსტრემუმთან. ექსტრემუმის წერტილის მიდამოში, როგორც ზემოთ აღწერილ ალგორითმებში (2.2.3), (2.2.4) და (2.2.7), აღიძვრება რხევითი რეჟიმი, რომლის ამპლიტუდა განსაზღვრავს ძიების ცდომილებას V სიგნალის დახმარებით



ნახ. 5.4.1.

$$V = \begin{cases} 0, & \text{როცა } z - (y + \Delta) < 0, \\ 1, & \text{როცა } z - (y + \Delta) > 0, \end{cases} \quad (5.4.3)$$

ექსტრემუმის მიდამოში მიიღწევა სისტემის სტაბილიზაცია. ოპტიმიზატორის ასეთი სქემური გადაწყვეტილების საშუალებით, როგორც ეს ჩანს მოწყობილობის მუშაობის დროითი დიაგრამიდან (ნახ. 5.4.2.), ობიექტის გამოსავალი სიდიდე y უახლოვდება ექსტრემუმს საკმაოდ მაღალი სიჩქარით შემსრულებელი მექანიზმის რევერსის გარეშე.



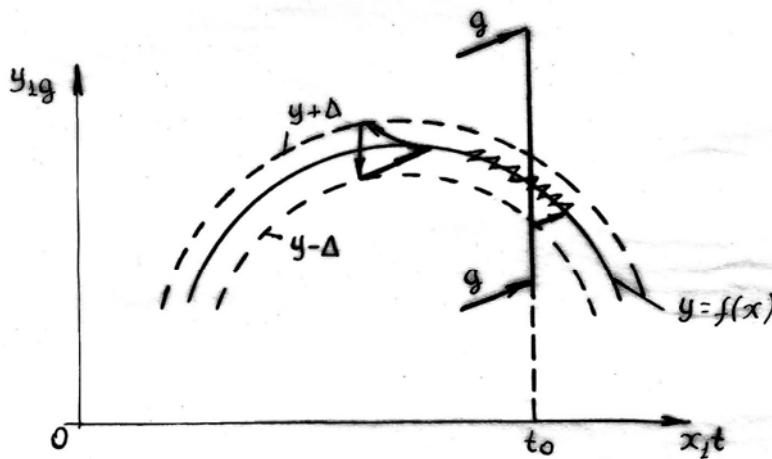
ნახ. 5.4.2

ოპტიმიზატორის სწრაფმოქმედების გაზრდა იძლევა საშუალებას შევამციროთ ექსტრემუმის ძიების დრო.

5.5. ავტომატური ოპტიმიზატორი – პაო-2

ზემოთ აღწერილი ოპტიმიზატორის ძირითად ნაკლოვანებას წარმოადგენს ის, რომ ძიების მაქსიმალური სიჩქარის მიღწევა შეიძლება მხოლოდ მაშინ, როცა ოპტიმიზირებადი სიდიდე y იმყოფება ექსტრემალური მახასიათებლის მარცხენა შტოზე (მაქსიმუმის ძიების დროს), ე. ი. როცა $\dot{y} > 0$ იმ შემთხვევაში y სიდიდე იმყოფება მახასიათებლის მარჯვენა მხარეს, ე. ი. როცა $\dot{y} < 0$, როგორც ეს ჩანს დიაგრამიდან (ნახ. 5.5.1), ექსტრემუმის ძიება მიმდინარეობს შემსრულებელი მექანიზმის ხშირი გადართვებით, რაც საბოლოო ჯამში ექსტრემუმის ძიების დროის გაზრდას იწვევს.

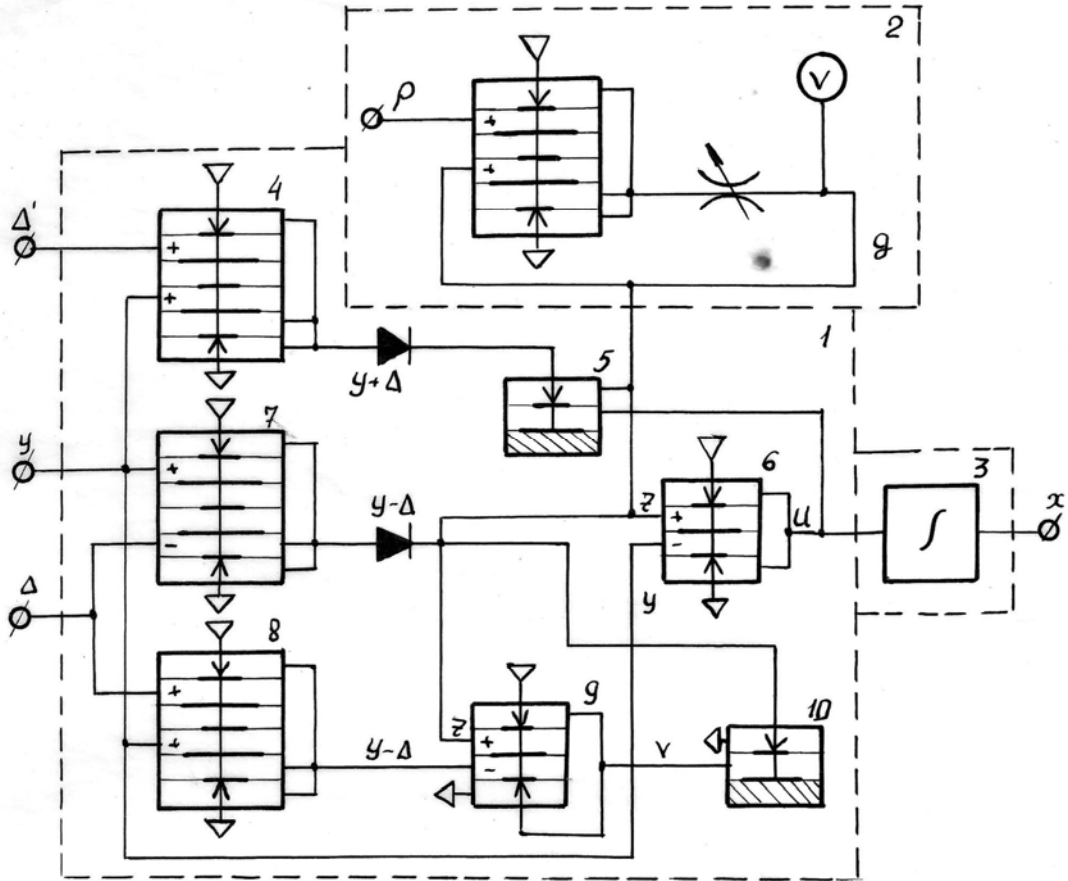
განვიხილოთ ავტომატური ოპტიმიზატორის პაო-2 მუშაობის პრინციპი, რომელიც რეალიზებულია უნივერსალურ პნევმოელემენტებზე [56] და წარმოადგენს ავტომატური ოპტიმიზატორის პაო-1 მოდიფიკაციას [55].



ნახ. 5.5.1.

ავტომატური ოპტიმიზატორი პაო-2 შედგება მართვის ფორმირების ბლოკისგან 1 (ნახ. 5.5.2), დამკვეთი ზემოქმედების ფორმირების ინტეგრატორისგან 2 და ობიექტის შესავალი სიგნალის ფორმირების ინტეგრატორისგან 3. სისტემის მოძრაობა აღიწერება შემდეგი განტოლებით.

$$\begin{aligned}
 y &= f(x), \\
 \dot{x} &= u, \\
 \varepsilon &= z - y,
 \end{aligned}
 \quad U = \begin{cases} 1, & \text{როცა } \varepsilon > 0, \\ 0, & \text{როცა } \varepsilon < 0. \end{cases}
 \quad (5.5.1)$$



ნახ. 5.5.2.

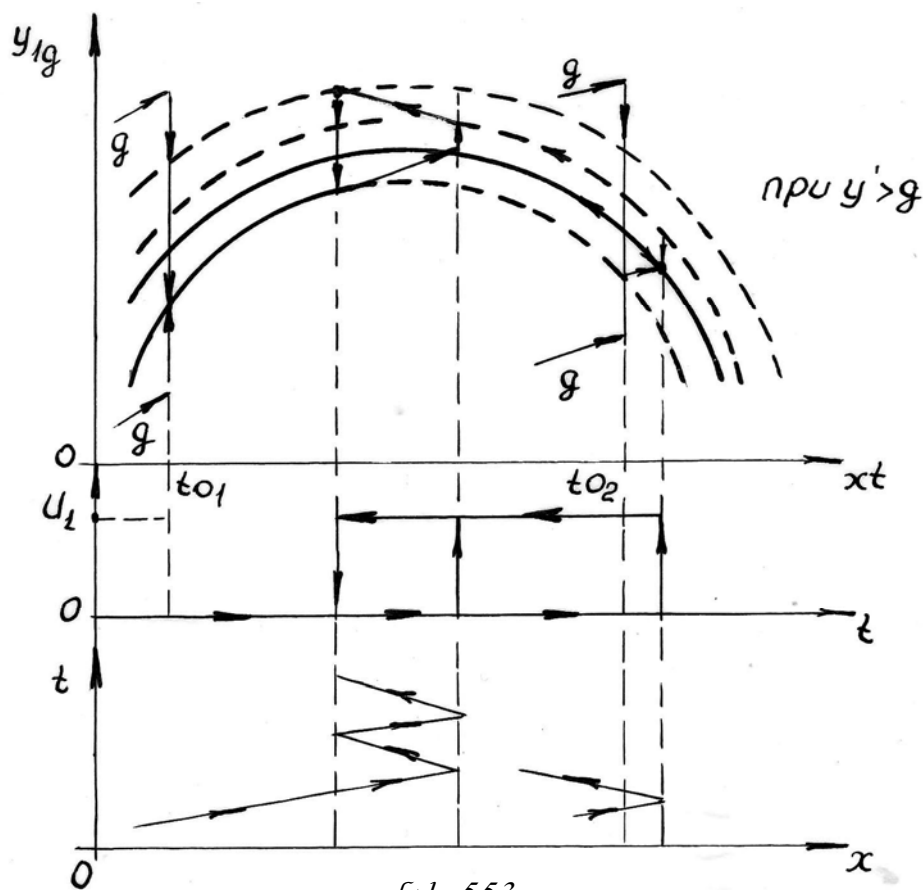
ავტომატური ოპტიმიზატორის პაო-2 მუშაობის პრინციპი ანალოგიურია პაო-1-ის. ობიექტის გამოსავალი სიდიდე y შედარებით ელემენტზე 6 ედარება ცვლად z სიდიდეს, რომელიც ტოლია

$$Z = \begin{cases} g, & \text{როცა } [g - (y - \Delta)](g - y) < 0, \text{ და } [g - (y + \Delta')][g - (y + \Delta)] < 0, \\ y - \Delta, & \text{როცა } [y - (y + \Delta)][g - (y - \Delta)] < 0, \\ y + \Delta', & \text{როცა } (g - y)[g - (y + \Delta')] < 0, \end{cases}
 \quad (5.5.2.)$$

სადაც g , როგორც ოპტიმიზატორში პაო-1, დამკვეთი ზემოქმედება $\dot{g} = \rho$, Δ და Δ' მცირე $\Delta \gg \Delta'$. მიღებული განუთანხმობის სიგნალის $\varepsilon = z - y$ საფუძველზე, ყალიბდება მმართველი სიგნალი u , განსაზღვ-

რული (5.5.1.) გამოსახულებით, რომლის დახმარებით განუთახმოების ცლომილება მიიყვანება ნულამდე და უზრუნველყოფს y სიდიდის მიღწევას ექსტრემუმთან. ექსტრემუმის მიდამოში აღიძვრება რხევითი რეჟიმი, რომლის ამპლიტუდაც განსაზღვრავს ძიების ცლომილებას. V სიგნალის (5.4.3.) დახმარებით სისტემა სტაბილიზდება ექსტრემუმის მიდამოში.

როგორც ოპტიმიზატორის პაო-2, მუშაობის დიაგრამიდან ჩანს (ნახ. 5.5.3) y სიდიდე უახლოვდება მაქსიმუმს საკმარისად დიდი სიჩქარით როგორც ექსტრემალური მახასიათებლის მარცხენა, ისე მარჯვენა შტოზე შემსრულებელი მექანიზმის გადართვის გარეშე, ეს კი გვაძლევს საშუალებას მაქსიმალურად შევამციროთ ძიების დრო.



ნახ. 5.5.3.



ზემოთ აღწერილი ოპტიმიზატორები შეიძლება დამზადდეს ორი სახის: ბლოკური და ცალკე ხელსაწყო სახით. ბლოკური ოპტიმიზატორები (იხ. ფოტო) ჩამოეკიდება მეორად ჩამწერ ხელსაწყოებს ПВ10.1Э ან ПВ10.2Э და უერთდება მას პნევმატური გასართით, ისე როგორც სისტემა „სტარტის“ სტანდარტული რეგულატორები. ხელსაწყო სახით დამზადებული ოპტიმიზატორი ჩასმულია კორპუსში და მაგრდება დამოუკიდებლად ტექნოლოგიური პროცესის მართვის ფარზე ჩამწერი ხელსაწყო გვერდით.

ასეთი ოპტიმიზატორები მარტივია კონსტრუქციულად, საიმედოა ექსპლუატაციაში.

ქვემოთ აღწერილია მათი ექსპერიმენტალური გამოკვლევის შედეგები და პრაქტიკაში გამოყენების რამოდენიმე მაგალითი.

5.6. ავტომატური ოპტიმიზატორების ექსპერიმენტული გამოკვლევა

ავტომატური ოპტიმიზატორების [55, 56] ექსტრემალური რეგულატორების [51-54] და საერთოდ ოპტიმიზაციის ავტომატური სისტემების მახასიათებლების შესწავლის სხვადასხვა მეთოდებთან ერთად ეფექ-

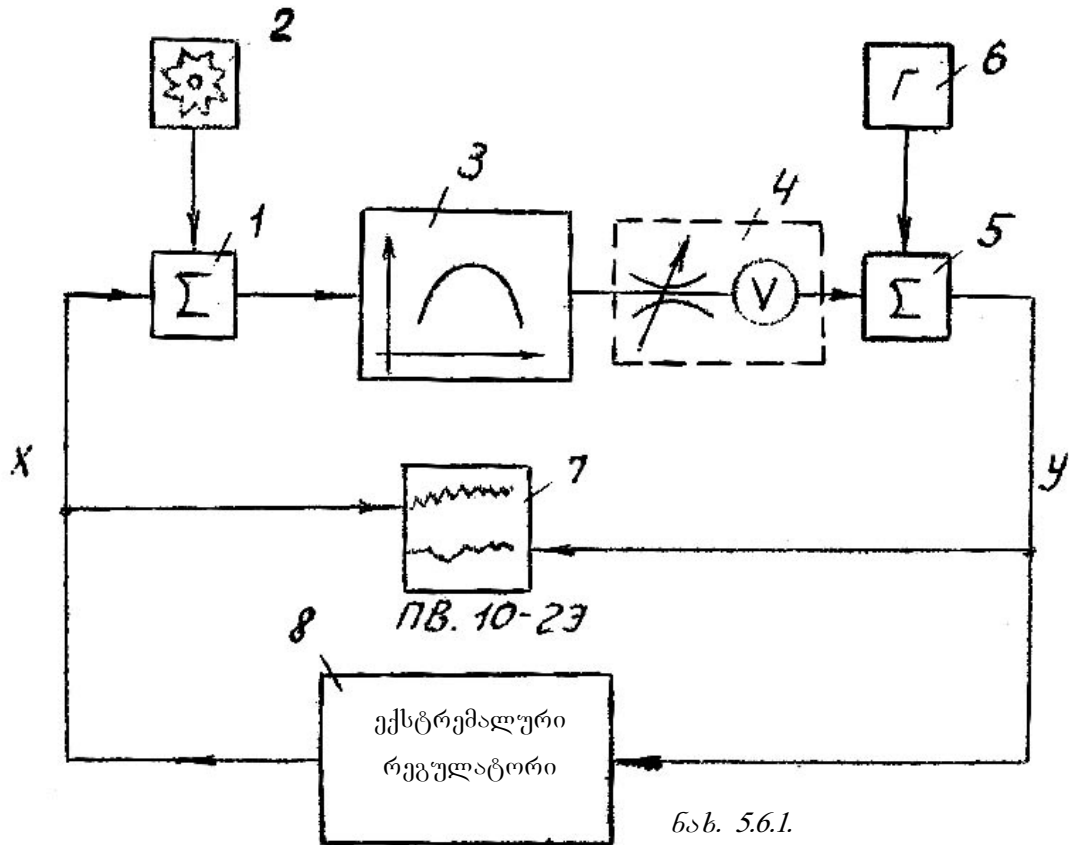
ტურია მათი ექსპერიმენტული გამოკვლევა მოწყობილობაზე ობიექტის მოდელით.

ცნობილია ექსტრემალური მახასიათებლის მქონე სტატიკური ობიექტის მრავალი მოდელი და ექსტრემალური რეგულატორები დამუშავებული შრომებში [14, 18, 95, 96, 97, 98, 99, 100]. ასეთი მოწყობილობები ობიექტის მოდელით გამოიყენება სამრეწველო ავტომატური ოპტიმიზატორების მონტაჟის და გამართვისათვის, აგრეთვე იმის გასარკვევად, თუ რა უპირატესობა ან ნაკლოვანებები გააჩნიათ სხვადასხვა ფუნქციონალურ ელემენტებს და ბლოკებს მათი გამოყენებისას ავტომატურ ოპტიმიზატორებში. ამასთან თუ გამოყენებული იქნება სხვადასხვა ტიპის ექსტრემალური რეგულატორები, შეიძლება ექსპერიმენტების საშუალებით გამოკვლევულ იქნას მათი შედარებითი მახასიათებლები. ასეთი მოწყობილობის გამოყენება შეიძლება აგრეთვე სასწავლო ინსტიტუტების ლაბორატორიებში ადაპტური სისტემების შესწავლის დროს.*

პირველ ვარიანტში ექსტრემალური მოწყობილობის ძირითად კვანძებს წარმოადგენენ (ნახ. 5.6.1):

- სუმატორი 1 და მავალელებისაგან 2, რომელთა დახმარებითაც ხორციელდება ექსტრემუმის მდგომარეობის ცვლილება;
- არაწრფივი გარდამქმნელი 3, ობიექტის სტატიკური ექსტრემალური მახასიათებლის იმიტატორი (ΠΔ-36A);
- ინერციული რგოლი 4;
- სუმატორი 5 და გენერატორი 6, რომელთა დახმარებითაც მიეწოდება მუდმივი შემფოთება (სხვადასხვა სიხშირის რხევები);
- მეორადი ხელსაწყო 7 ორი პარამეტრის ჩვენებით და უწყვეტი ჩაწერით;
- ექსტრემალური რეგულატორი ან ავტომატური ოპტიმიზატორი 8 [39-44], რეალიზებული მართვის ალგორითმები (2.2.3), (2.2.6), (2.2.7), (2.3.6), (2.3.8).

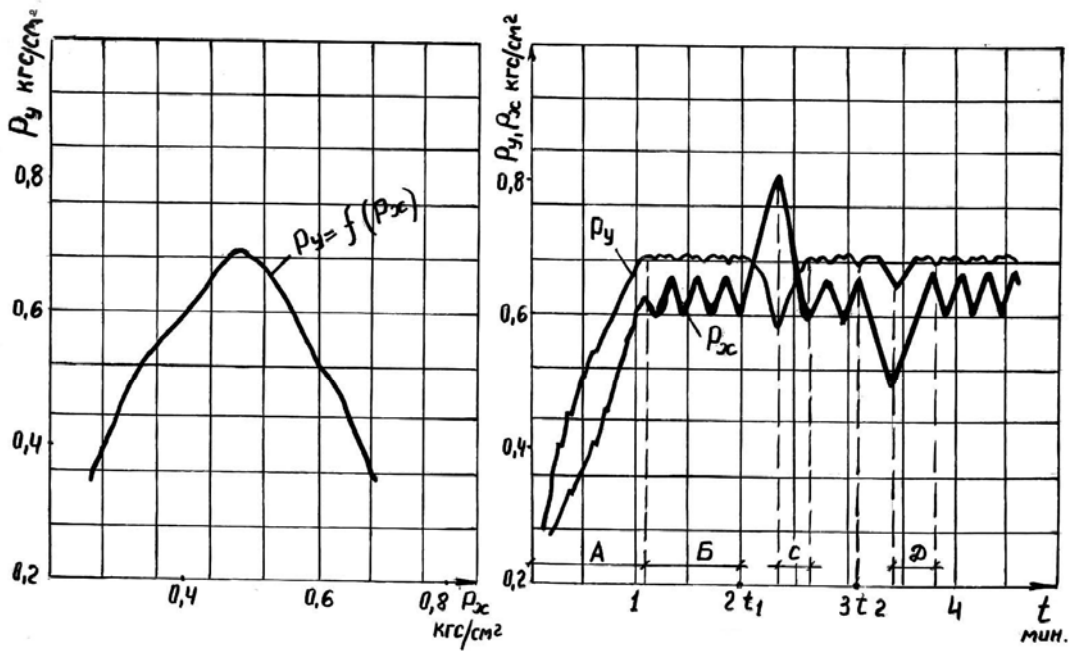
* ასეთი მოწყობილობა დანერგილ იქნა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების კათედრის ერთ-ერთ ლაბორატორიაში, სადაც სტუდენტები შეისწავლიან ადაპტურ სისტემებს.



ნახ. 5.6.1.

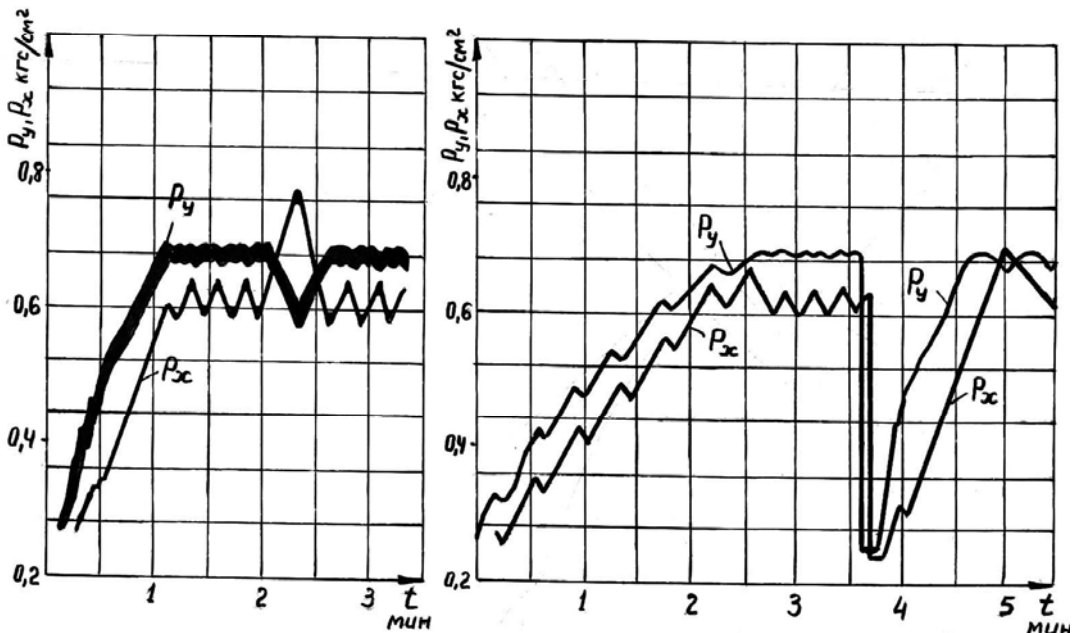
ექსტრემალური ობიექტის პნევმატური მოდელის სტატიკური მახასიათებელი და კვლევის რეზულტატები ილუსტრირებულია ნახ. 5.6.2. ა) ბ) გ) დ) ე). ნახ. 5.6.3, ნახ. 5.6.4.

ნახ. 5.6.2 ბ) ნაჩვენებია ექსტრემუმის ძიების პროცესის დიაგრამა. მონაკვეთი ა) შეესაბამება გარდამავალ პროცესს, მონაკვეთი ბ) – ექსტრემუმის გარშემო ხეტიალს. დამყარებულ რეჟიმში t_1 დროის მომენტში ობიექტის შესავალზე მიწოდებული იქნა დადებითი ცალკეული „ნახტომი“, რის შედეგადაც ობიექტის გამოსავალი y სიდიდე გადაყვანილ იქნა „იძულებით“ ექსტრემალური მახასიათებლის მარჯვენა მხარეს. მას შემდეგ, რაც მოიხსნა დადებითი „ნახტომისებური“ იმპულსი, ოპტიმიზატორმა კვლავ მოძებნა მაქსიმუმი (მონაკვეთი C). შემდგომში t_2 დროის მომენტში ობიექტის გამოსავალი y სიდიდე იძულებით გადაყვანილ იქნა ექსტრემალური მახასიათებლის მარცხენა შტოზე იძულებითი იმპულსის მოხსნის შემდეგ ოპტიმიზატორის დახმარებით y სიდიდე მიყვანილ იქნა მაქსიმუმამდე (მონაკვეთი D).



ა

ბ



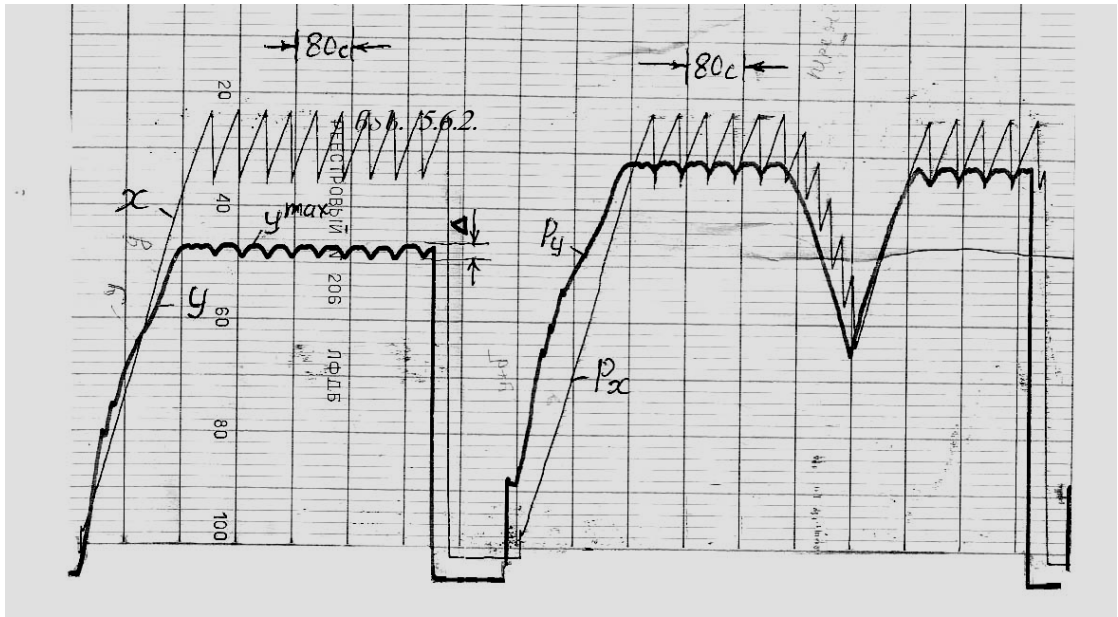
გ

დ

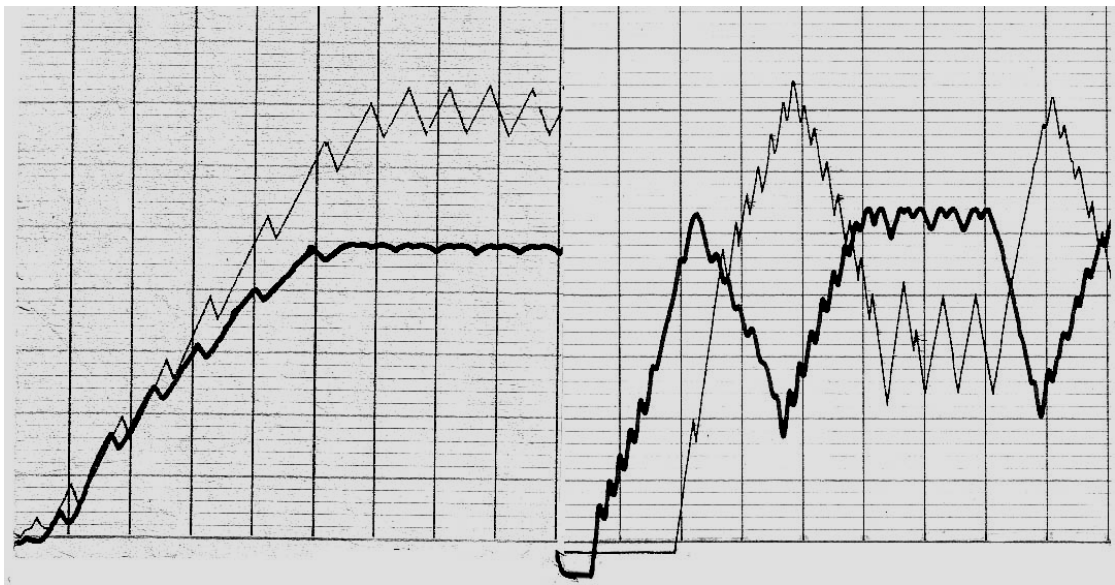
ე

ნახ. 5.6.2.

ნახ. 5.6.2. გ)-ზე ნაჩვენებია ექსტრემუმის ძიების პროცესი, როდესაც ობიექტის გამოსავალი y სიგნალზე ემატება პერიოდული დაბრკოლება. გარდამავალი პროცესის გასაუმჯობესებლად (2.2.3), (2.2.6) და (2.2.7) ალგორითმებში შეიძლება გამოვიყენოთ ძიების ტემპის შემცირება, მაგრამ როგორც ეს ნახ. 5.6.2 დ) დიაგრამიდან ჩანს, იზრდება ექსტრემუმის ძიების დრო, რაც არასასურველია. ძიების ტემპის გაზრდით ექსტრემუმის მოძიების დრო მცირდება, სამაგიეროდ ცდომილება იზრდება (ნახ. 5.6.2. ე)).



ნახ. 5.6.3.

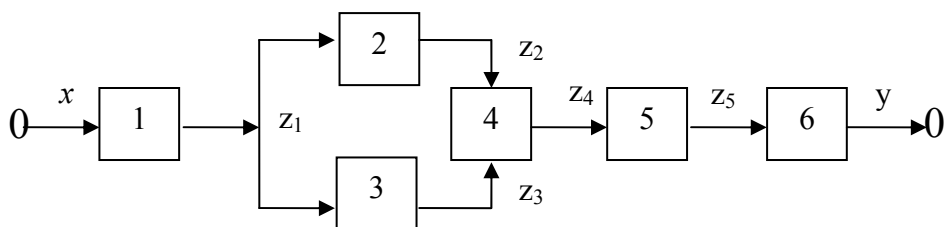


ნახ. 5.6.4.

ზემოთ აღწერილი ექსპერიმენტული მოწყობილობის უარყოფით მხარეს წარმოადგენს ის, რომ ობიექტის მოდელს გააჩნია შეზღუდული ფუნქციები, ავტომატური ოპტიმიზატორების გამოკვლევის პროცესში ძნელია ობიექტის ექსტრემალური მახასიათებლის ფორმისა და კოორდინატების შეცვლა. ამ მიზნით დამუშავებული იქნა ობიექტის მოდელი, რომელსაც გააჩნია შემდეგი სახის ექსტრემალური სტატიკური მახასიათებელი:

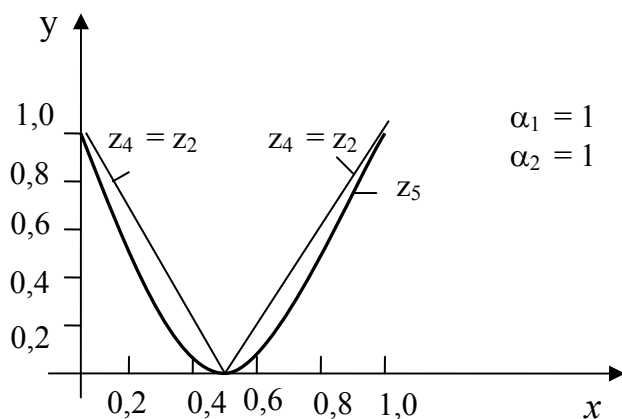
$$y = \alpha_2(1 - 2\alpha_1 x)^2 \vee \alpha_2(2\alpha_1 x - 1)^2,$$

სოლო მისი ბლოკ-სქემა მოცემულია ნახ. 5.6.5-ზე, სადაც 1 და 6 კოეფიციენტზე გამრავლების პირველი და მეორე ბლოკია, 2 და 3 – პირველი და მეორე სუმატორი შესაბამისად, 4 – ელემენტი „ან“, 5 –



ნახ. 5.6.5.

კვადრატში ახარისხების ბლოკი. პირველ ბლოკში $z_1 = \alpha_1 x$, სადაც $\alpha_1 \geq 1$, მეორე ბლოკში $y = \alpha_2 z_5$, სადაც $\alpha_2 \leq 2$. პირველი სუმატორი ასრულებს ოპერაციას $z_2 = 1 - 2z_1$, მეორე $z_3 = 2z_1 - 1$, ელემენტი „ან“ $z_4 = z_2 \vee z_3$, კვადრატში ახარისხების ბლოკი $z_5 = z_4^2$ და გარდაქმნის z_4 სიგნალს პარაბოლურ სიგნალად z_5 , რომელიც გამოიყენება ექსტრემალური ობიექტის მოდელად (ნახ. 5.6.6) სარეგულირებელი კოეფიციენტების α_1 და α_2 დახმარებით შეიძლება შეიცვალოს ექსტრემალური მახასიათებლის ფორმა და კოორდინატები, ეს კი გვაძლევს საშუალებას ერთი და იგივე ექსტრემალური რეგულატორი გამოვცადოთ ობიექტის სხვადასხვა მოდელზე და ამით შევარჩიოთ შესაბამისი ობიექტისათვის შესაბამისი რეგულატორი.



ნახ. 5.6.6.

**ექსტრემალური რეგულატორების პარამეტრების
შერჩევის რეკომენდაციები**

ექსტრემალური რეგულატორის ანგარიში და პარამეტრების რეგულირება მჭიდროდ უნდა იყოს დაკავშირებული ობიექტის ექსტრემალური მახასიათებლის სახესთან $f(x)$ და შეთანხმებული კონკრეტულად დასმულ ამოცანასთან. მიუხედავად ამისა შეიძლება ჩამოვაყალიბოთ სხვადასხვა სახის საერთო რეკომენდაციები.

ძირითადად ყველაზე მაღალი მოთხოვნა წაყენება ძიების სიზუსტეს და სწრაფმოქმედებას. ჩვენს მიერ დამუშავებული პნევმატურ ექსტრემალურ რეგულატორში მრკ-3 სწრაფმოქმედება განისაზღვრება სიდიდეებით P_ρ , γ_1 და γ_2 , დამყარებული რეჟიმში ძიების ცდომილება – Δ სიდიდით. დანართი 1-ში მოყვანილი თანაფარდობის საფუძველზე $f(x)$ სახის მიხედვით განისაზღვრება P_ρ, γ_1 და γ_2 , თანაც $\gamma_2 \gg \gamma_1$. სიდიდეები P_g , γ_3 და γ_4 , განსაზღვრავენ მართვის სიგნალს და ნაკლებად ინერციული ობიექტებისათვის რეკომენდებულია შეირჩეს ისინი მაქსიმალური, თანაც სიმეტრიული $f(x)$ -ისთვის, $\gamma_3 \approx \gamma_4$. ინერციული ობიექტებისათვის τ დროის მუდმივათი პარამეტრები P_ρ , P_q , γ_3 და γ_4 განისაზღვრებიან გამომდინარე თანაფარდობიდან:

$$\Delta \geq 4\tau P_\rho P_q \gamma_3$$

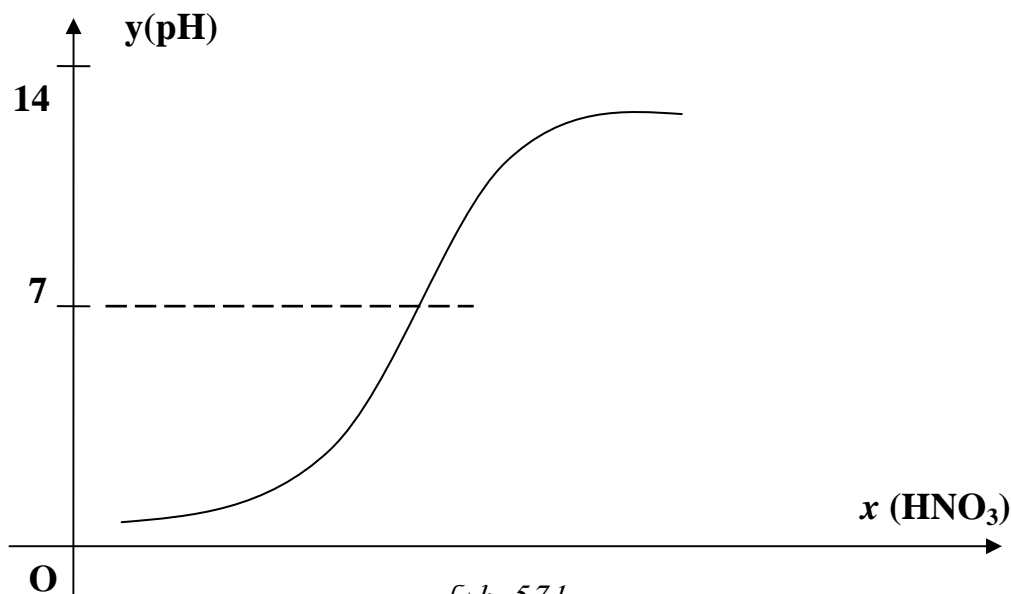
5.7. ექსტრემალური რეგულატორების გამოყენება ტექნოლოგიური პროცესების მართვის ავტომატურ სისტემებში

განვიხილოთ ექსტრემალური რეგულატორების გამოყენების რამოდენიმე მაგალითი, რომლებიც მათი ექსპერიმენტული გამოკვლევის დროს შერჩეულ იქნა სხვადასხვა ტექნოლოგიური პროცესისათვის.

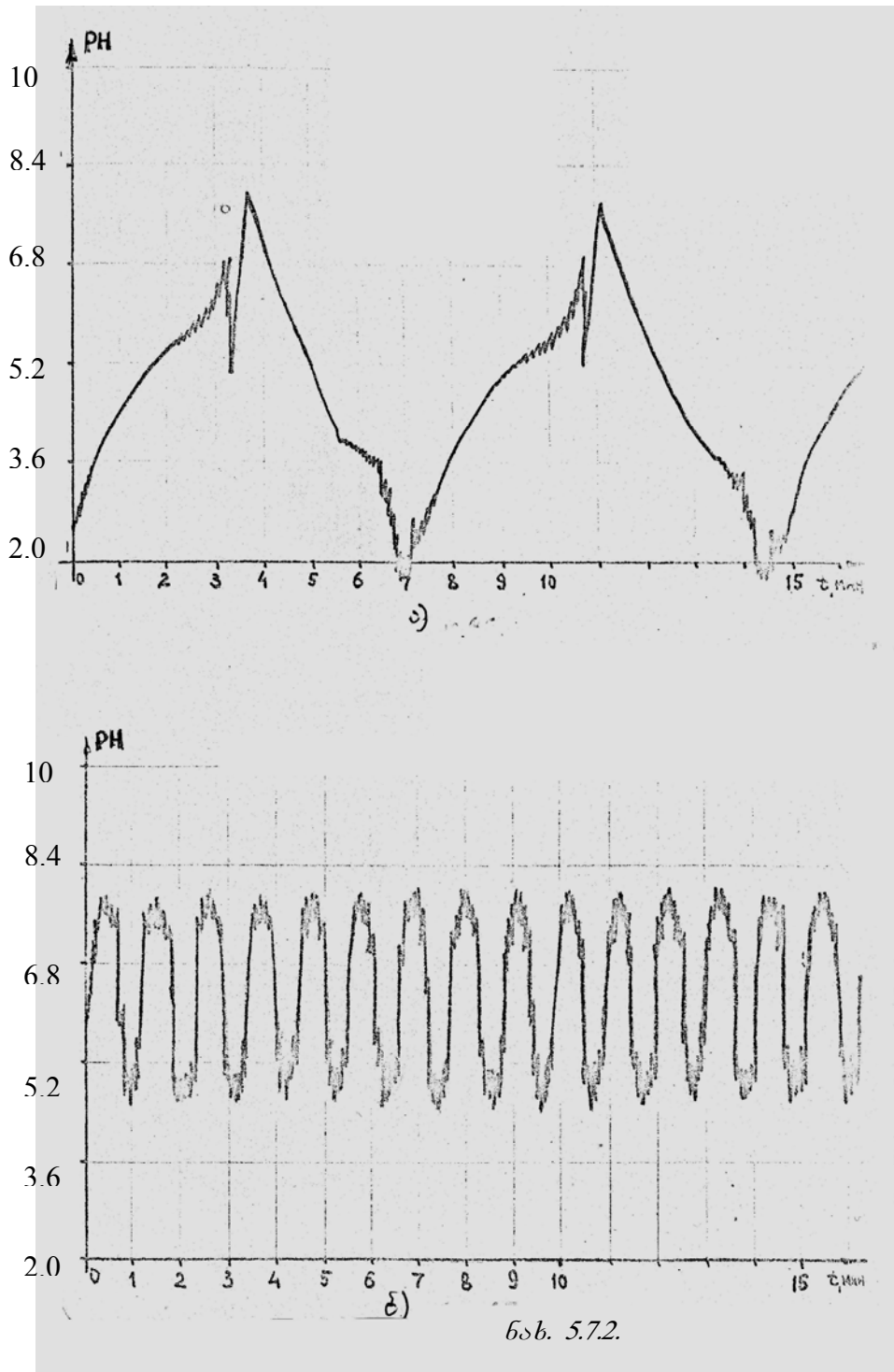
მართვის თვალსაზრისით ამიაკის გვარჯილის წარმოება, რომელიც მიმდინარეობს უწყვეტი ტექნოლოგიური ხაზით, წარმოადგენს ერთ-ერთ რთულ ტექნოლოგიურ პროცესს. ნეიტრალიზატორში მიღგაყვანილობების დახმარებით უწყვეტად ჩაედინება და ერთმანეთს შეერევა რეაქციის ორი ძირითადი კომპონენტი – აზოტმჟავა და თხევადი ამიაკი [101].

ნეიტრალიზაციის რეაქციის შედეგად წარმოიქმნება ორთქლით გაჯერებული ქიმიური ნაერთი, რომელიც შემდგომ უწყვეტად გამოიღვენება რეაქტორიდან. შემდეგ ეტაპზე ხდება ნაერთისგან ორთქლის მრავალჯერადი ამოშრობა და პროცესის ბოლო სტადიაზე ხდება მისი კრისტალიზაცია. ტექნოლოგიური პროცესის მთელი ციკლი მთავრდება მინერალური სასუქის – ამიაკის გვარჯილის მიღებით. ზემოთ აღწერილი ტექნოლოგიური სქემის მიხედვით თხევადი ამიაკის ხარჯი ძირითადად არის უცვლელი და განსაზღვრავს აგრეგატის წარმადობას, აზოტმჟავას ხარჯი კი უნდა შეირჩეს თხევად ამიაკთან ისეთი თანაფარდობით, რომელიც უზრუნველყოფს სასურველ ტექნოლოგიურ პროცესს.

იმ შემთხვევაში, თუ დაირღვა რეაგენტების თანაფარდობა, იცვლება რეაქციის მიმდინარეობის პირობა, რის შედეგადაც მიიღება უხარისხო პროდუქტი. რეაქცია რომ მიმდინარეობდეს იდეალურად, ე. ი. შენარჩუნებულ იქნას აზოტმჟავას და თხევადი ამიაკის თანაფარდობა ტექნოლოგიური რეგლამენტის მოთხოვნის შესაბამისად, ამასთანავე შეირჩეს შესაბამისად ქიმიური პროცესის მიმდინარეობის ტემპერატურული რეჟიმი, მაშინ ადვილი იქნებოდა ტექნოლოგიური პროცესის ოპტიმალური რეჟიმის მიღწევა. როგორც ცნობილია [102] რეაქციის ოპტიმალურ რეჟიმში მჟავიანობის მაჩვენებელი ტოლია PH-ის 7 ერთეულის და ძნელი არ არის ვაჩვენოთ აზოტმჟავას ხარჯის პირდაპირი დამოკიდებულება თხევადი ამიაკის მოცემულ ხარჯზე (ნახ. 5.7.1).



ნახ. 5.7.1.



რეალურ პირობებში სხვადასხვა არაკონტროლირებადი შეშფოთების გამო [103] მუავიანობის მაჩვენებლის ეს მნიშვნელობა უკვე არ შეესაბამება ოპტიმალურ რეჟიმს. ასეთ შემთხვევაში ტექნოლოგიური პროცესის მართვა კლასიკური სქემით, სადაც გამოყენებულია თანაფარდობის რეგულატორი, არ იძლევა სასურველ შედეგს და დიდად არ განსხვავდება პროცესის ხელით მართვისაგან (ნახ. 5.7.2 ა).

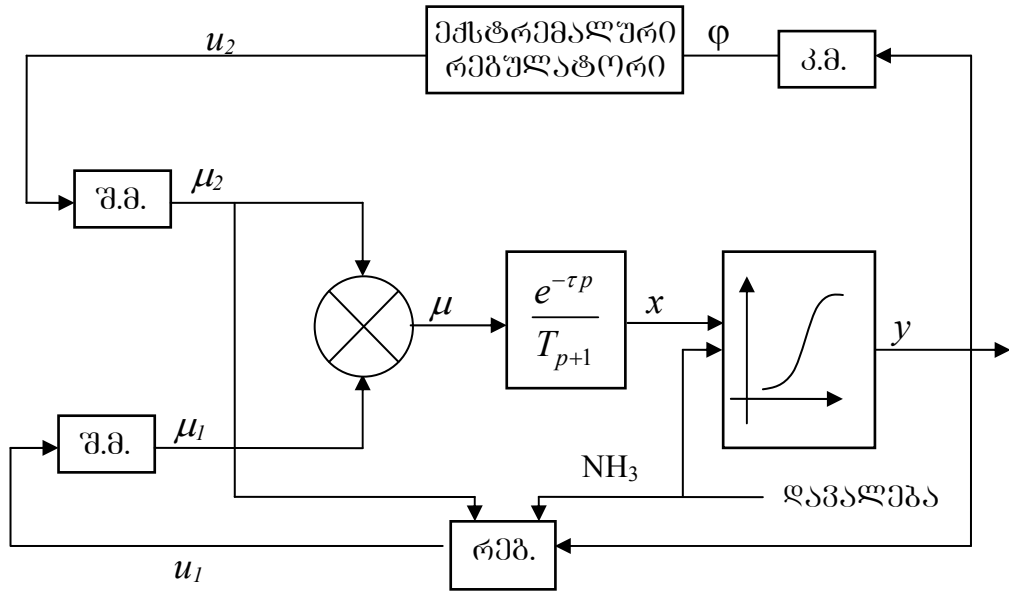
ტექნოლოგიური პროცესის მართვის გაუმჯობესების მიზნით ჩვენს მიერ დამუშავებული იქნა ნეიტრალიზაციის პროცესის მართვის ავტომატური მოწყობილობა [93], სადაც დამატებით გამოყენებული იქნა ცვლადი სტრუქტურის რეგულატორი. როგორც დიაგრამიდან ჩანს (ნახ. 5.7.2 ბ) ასეთი მოწყობილობის დახმარებით გაუმჯობესდა ტექნოლოგიური პროცესის მართვის ხარისხი, მართვის კლასიკურ მეთოდთან შედარებით. მაგრამ ასეთი მართვა არ არის ოპტიმალური. ამისათვის ისმება ამოცანა პროცესის მართვის საუკეთესო რეჟიმის ავტომატური მოძებნის და მისი შენარჩუნების.

ეს ამოცანა გადაწყვეტილ იქნა შემდეგი მიდგომით. აზოტმჟავას ხარჯის ცვლილებისას ობიექტის მართვის ოპტიმალური რეჟიმი, თანახმად [101, 104] შეესაბამება PH გადამწოდის მრუდის გადაღუნვის წერტილს, რომელშიც გადამწოდის გამოსავალი სიდიდის წარმოებულის მნიშვნელობა მაქსიმალურია. ამ მაქსიმუმის მოძებნა, PH-ის შენარჩუნება მოძებნილი მნიშვნელობის მიდამოში წარმოადგენს მართვის სისტემის მიზანს.

ჩამოყალიბებული ამოცანის გადასაწყვეტად დამუშავებულ იქნა ობიექტის მართვის სტრუქტურული სქემა ძირითადი და დამატებითი არხებით (ნახ. 5.7.3), რომლის დინამიკა აღიწერება გადაცემის ფუნქციით.

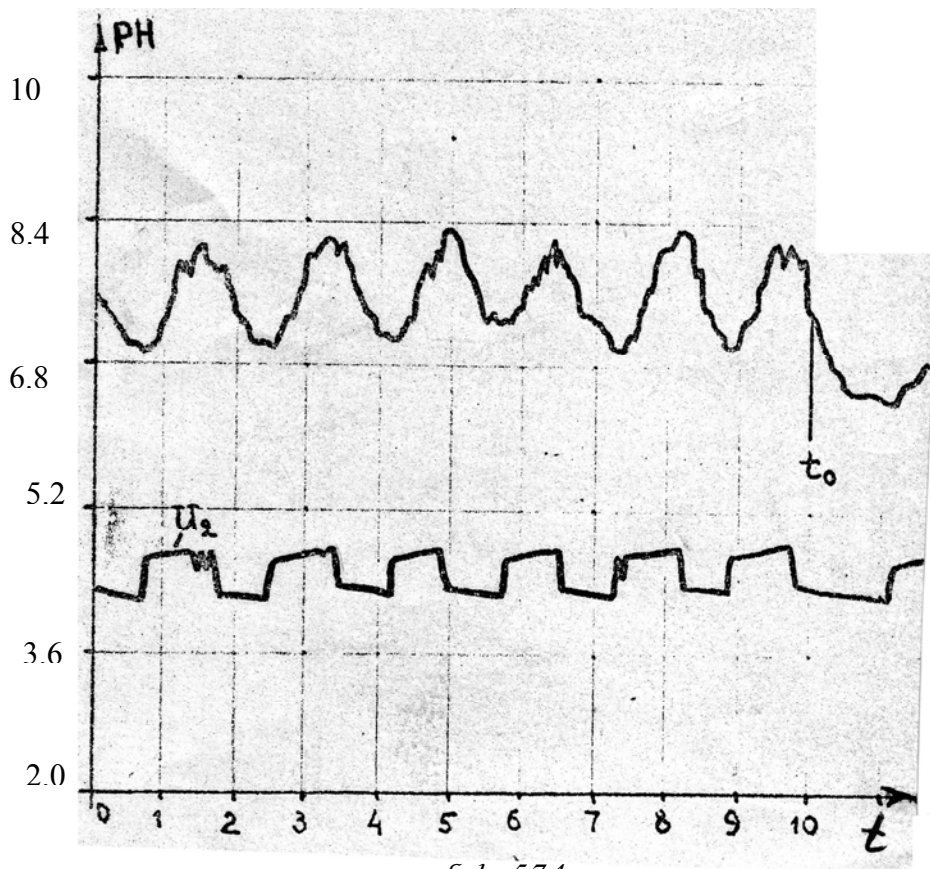
$$W(P) = \frac{K}{T_p + 1} e^{-p\tau}.$$

დამატებითი კონტურის რეგულატორის მიზანია სისტემის სტაბილიზაცია წონასწორობის მდგომარეობაში, რომელიც შეესაბამება რეაქციის ძირითადი კომპონენტების მიმდინარე ხარჯებს. დამატებითი კონტურის მართვის პ-დ კანონის პარამეტრები შეირჩევა ექსპერიმენტული გზით. მართვის ძირითადი კონტურის საშუალებით აზოტმჟავას ხარჯის ცვლილებით წარმოებს მაქსიმუმის მოძებნა, რომელიც შეესაბამება ოპტიმალურ რეჟიმს (PH-ის 7 ერთეულის მიდამოში).



ნახ. 5.7.3.

ოპტიმალური მართვის სისტემის აგებისას გამოყენებულია ალგორითმები, დამუშავებული მე-2 თავში, ხოლო ექსტრემალურ რეგულატორად შერჩეულ იქნა პნევმატური ექსტრემალური რეგულატორი ძიების ცვლადი სიჩქარით მრპ-1 [53].



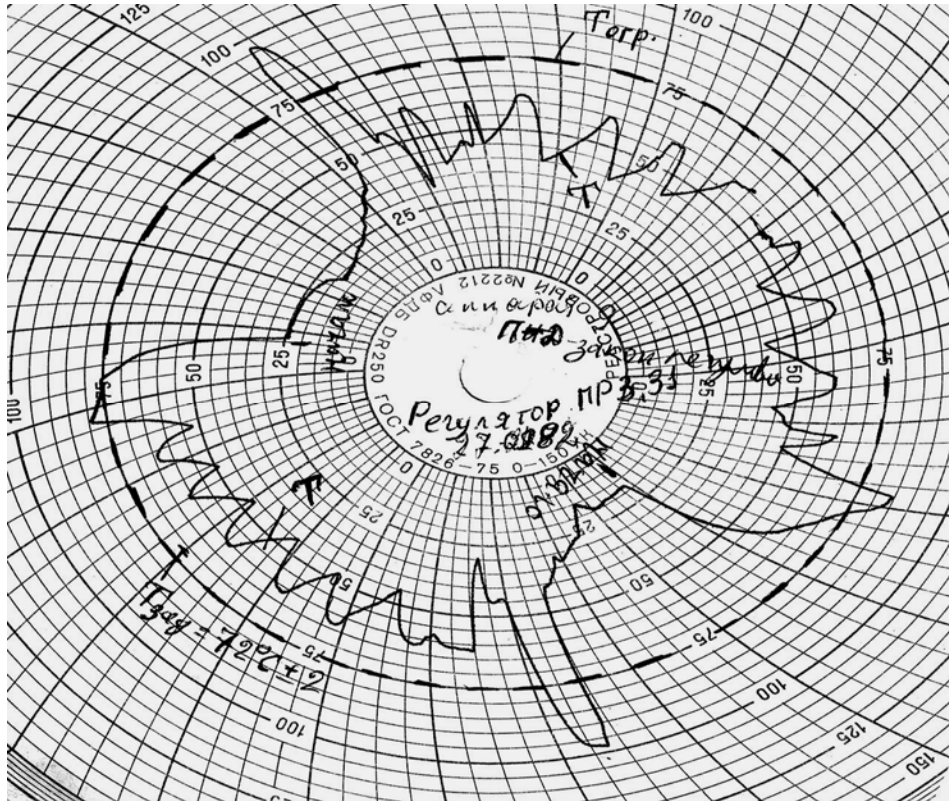
ნახ. 5.7.4.

ასეთი გზით აგებული ამიაკის გვარჯილის წარმოების ნეიტრალიზაციის პროცესის მართვის ოპტიმალური სისტემა, რეაქტორის ტემპერატურული რეჟიმების მართვის ავტომატურ სისტემასთან ერთად [92] (რომელიც დამუშავებულია ჩვენს მიერ), უზრუნველყოფს PH შენარჩუნებას $\pm 0,5$ სიზუსტით ოპტიმალურ რეჟიმში და გარდამავალი პროცესების ხანგრძლივობის შემცირებას დაახლოებით 2-ჯერ, არსებული რეგულირების სისტემებთან შედარებით (ნახ. 5.7.4).

განხილული ოპტიმალური სისტემის მუშაობა შემოწმებულ იქნა რუსთავის ს. გ. „აზოტის“ ამიაკის გვარჯილის წარმოებაში.

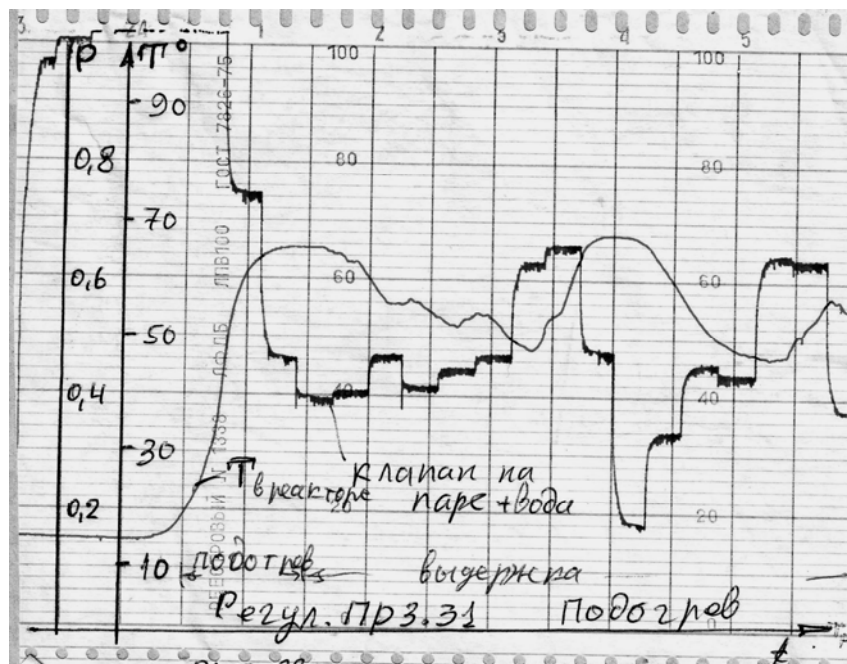
ექსტრემალური მართვის პრინციპი შეიძლება გამოყენებული იქნას სხვადასხვა მიზნებისათვის, მათ შორის რთული ტექნოლოგიური პროცესების მართვისას, როდესაც რეგულირების ჩვეულებრივი, კლასიკური კანონების გამოყენებით სტაბილიზაციის ამოცანის გადაწყვეტა არ იძლევა სასურველ შედეგს. განვიხილოთ სტიროლის სოპოლიმერიზაციის ტექნოლოგიური პროცესი, რომელიც პერიოდულია და მიმდინარეობს რეაქტორში შემრევით [105]. მზა პროდუქციის ბისერის სტრუქტურა არსებითად დამოკიდებულია ტექნოლოგიური პროცესის ტემპერატურულ რეჟიმზე. სოპოლიმერიზაციის რეაქცია არის ეგზოთერმული და პროდუქციის თანდათანობით მომზადებასთან ერთად ეგზოთერმიის ინტენსივობა იზრდება, რაც ართულებს პროცესის სტაბილიზაციას.

ეგზოთერმული რეაქციის პროგოცირებისათვის საჭიროა რეაქციის ნაერთის ტემპერატურა გარკვეული პროგრამით გაიზარდოს 70°C . ეგზოთერმიის ინტენსივობა ძლიერადაა დამოკიდებული რეაქციული ნაერთის ტემპერატურაზე, რომელიც თავის მხრივ ფუნქციონალურ დამოკიდებულებაშია რეაქციის მიმდინარეობის ხანგრძლივობასთან, ეს კი ქმნის არასასურველ პირობას პროცესის ავტომატური რეგულირებისათვის. ამიტომ პროცესის ტემპერატურის რეგულირების ავტომატურ სისტემას წაეყენება შედარებით მკაცრი მოთხოვნები მდგრადობის შენარჩუნების და სოპოლიმერიზაციის გარდამავალი პროცესების საუკეთესო ხარისხის უზრუნველსაყოფად.



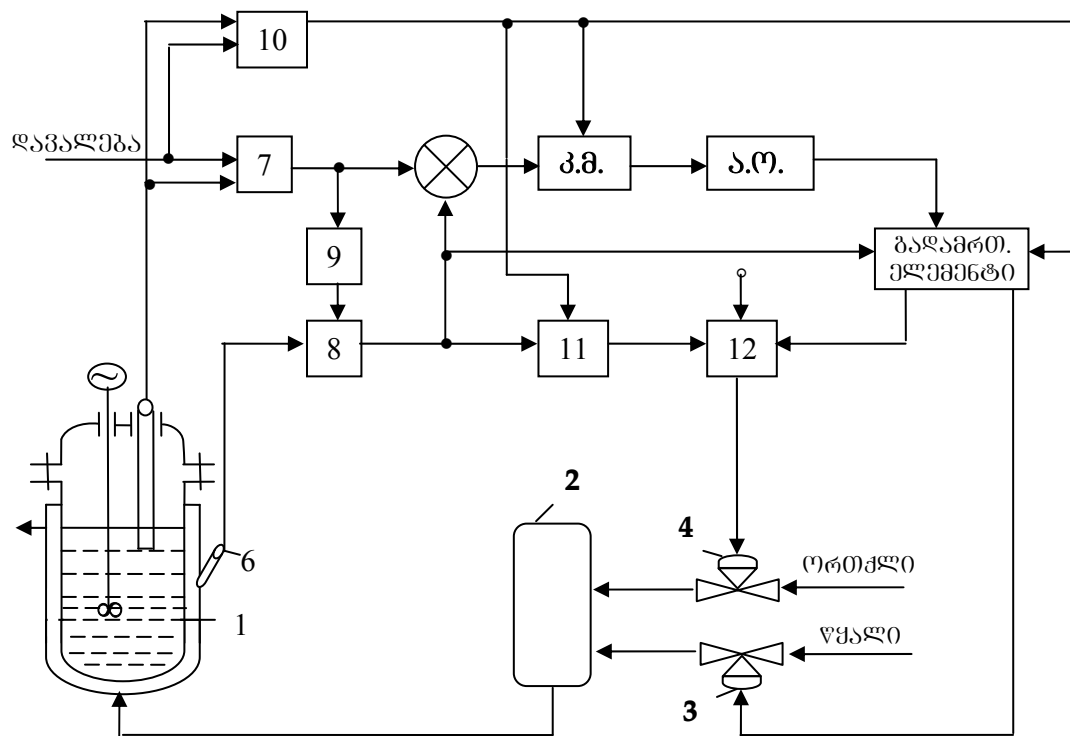
ნახ. 5.7.5.

როგორც პრაქტიკამ გვიჩვენა ექსპერიმენტების ჩატარების დროს პროცესის სტაბილიზაციისათვის რეგულირების კლასიკური კანონების გამოყენება ვერ უზრუნველყოფს რეაქტორში სასურველი ტემპერატურული რეჟიმის სტაბილიზაციის მოთხოვნილ სიზუსტეს (ნახ. 5.7.5 და 5.7.6).



ნახ. 5.7.6.

ცნობილია აგრეთვე რეაქტორში ტემპერატურული რეჟიმის ავტომატური მართვის მეთოდი, რომელიც ითვალისწინებს კომპონენტების თანაფარდობის რეგულირებას რეაქტორის გამოსავალზე ნაერთის ტემპერატურის კორექციით და წყლის ხარჯით, დამოკიდებულს რეაქტორის შესავალზე და გამოსავალზე ნაერთის ტემპერატურებს შორის სხვაობაზე. ცნობილია აგრეთვე რეაქტორის ტემპერატურული რეჟიმის მართვის მეთოდი და მოწყობილობა, სადაც ორთქლის ხარჯს დამატებით ცვლიან რეაქტორის ტემპერატურაზე და ორთქლის და წყლის ნაერთის ტემპერატურაზე დამოკიდებულებით [90, 91]. ასეთი მოწყობილობები აუმჯობესებენ რეაქტორის მართვას, მაგრამ ვერ უზრუნველყოფენ რეაქტორში რეაქციული ნაერთის ტემპერატურის სტაბილიზაციის მაღალ ხარისხს, რის გამოც სოპოლიმერიზაციის პროცესი არ მიმდინარეობს ოპტიმალურ რეჟიმში. ზემოთ აღნიშნულის გამო ჩვენს მიერ დამუშავებულ იქნა სტიროლის სოპოლიმერიზაციის ტემპერატურული რეჟიმის მართვის ოპტიმალური სისტემა, რომელიც არასტაციონარულობის პირობებში იძლევა საშუალებას იმართოს პროცესი კვაზიოპტიმალურ რეჟიმში. ასეთი სისტემის სტრუქტურული სქემა მოცემულია ნახ. 5.7.7.



ნახ. 5.7.7.

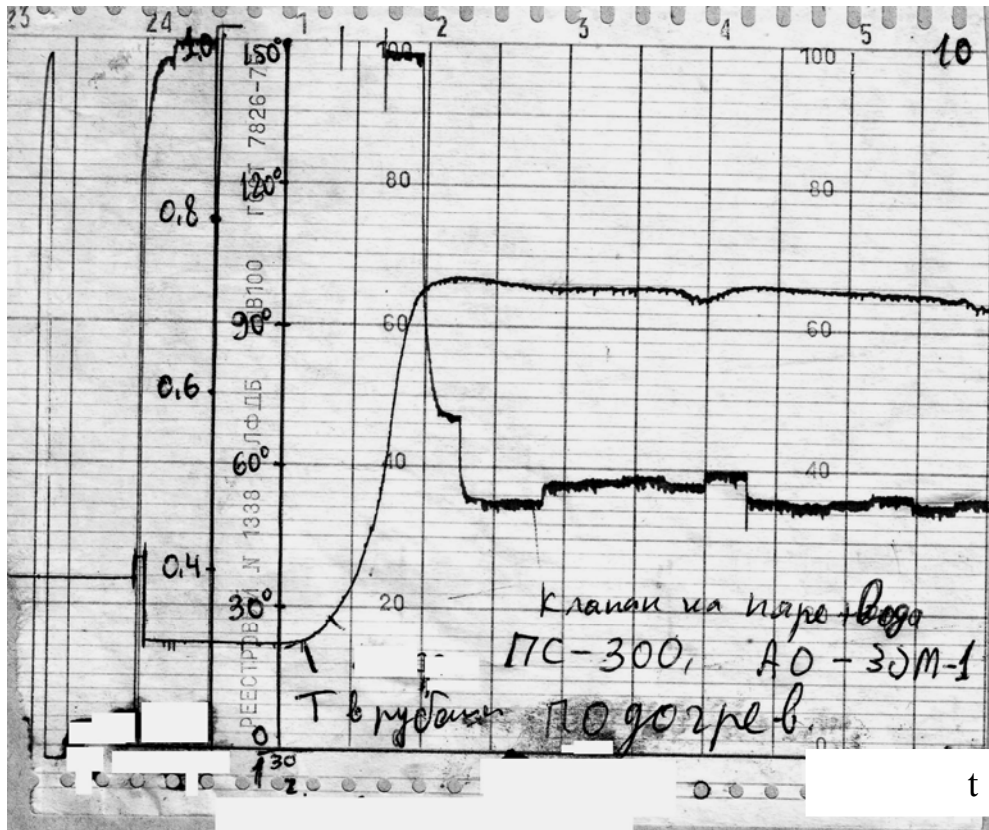
სისტემა შედგება რეაქტორისაგან 1, შემრევისაგან 2, წყლის და ორთქლის სარქველებისაგან 3 და 4, ტემპერატურული გადამოწდები 5 და 6, რომელთა გამოსავალი შესაბამისად შეერთებულია პროპორციულ-დიფერენციალურ და პროპორციულ-ინტეგრალურ რეგულატორებთან 7 და 8, ფუნქციური გარდამქმნელი 9, რომლის გამოსავალი წარმოადგენს რეგულატორის 8 დავალებას. 10, 11, 12 ლოგიკურ ელემენტებს, ოპტიმალობის კრიტერიუმის მაფორმირებელი ბლოკი, გადამრთველი ელემენტი და ავტომატური ოპტიმიზატორი მართვადი დამკვეთი ზემოქმედებით.

სისტემა მუშაობს შემდგენიარად. დასაწყისში ავტომატური ოპტიმიზატორის დახმარებით რეაქციული ნაერთის ტემპერატურა განსაზღვრული პროგრამით მიაღწევს 70°C . შემდგომში ოპტიმიზატორის დამკვეთი ზემოქმედების ზრდის სიჩქარე იცვლება ავტომატურად და ნაერთის ტემპერატურა მდორედ გადაჰყავს 72°C -მდე. მას შემდეგ, რაც განუთანხმოების ცდომილება $\varepsilon < \Delta$, სადაც Δ არის მცირე დადებითი სიდიდე ტოლი $\Delta = 1^{\circ}\text{C}$, ოპტიმიზატორი გამოირთვება და პროცესის მართვაში ჩაირთვება სტაბილიზაციის კვანძი. თუ ტემპერატურა რეაქტორში მეტია დავალებაზე (72°C), მაგრამ განუთანხმოების ცდომილება $\varepsilon \leq \Delta$, მაშინ ლოგიკური სქემის დახმარებით ორთქლის მიმწოდებელი შემსრულებელი მექანიზმი 4 იკეტება, ხოლო წყლის მიმწოდებელი შემსრულებელი მექანიზმი 3 გადამრთველი ელემენტის დახმარებით უერთდება რეგულატორი 8-ის გამოსავალს, რომლის დავალება ფორმირდება რეაქტორის ტემპერატურის და მისი ცვლილების სიჩქარის მიხედვით პროპორციულ დიფერენციალურ რეგულატორში 7. აქედან გამომდინარე წყლის ხარჯი რეგულირდება რეაქტორსა და მის პერანგში არსებული ტემპერატურის მიხედვით. იმ შემთხვევაში, თუ რეაქტორში ტემპერატურა მცირდება დავალების ქვევით, მაგრამ, ჯერ არ გასცდა $\pm\Delta$ -ს ზონას, შემსრულებელი მექანიზმი 4 უერთდება რეგულატორს 8, სარქველი 3 კი იკეტება. რეგულატორის დავალება ფორმირდება ზემოთ აღწერილის მსგავსად და ორთქლის ხარჯის ცვლილება წარმოებს რეაქტორში და პერანგში არსებული ტემპერატურების მიხედვით.

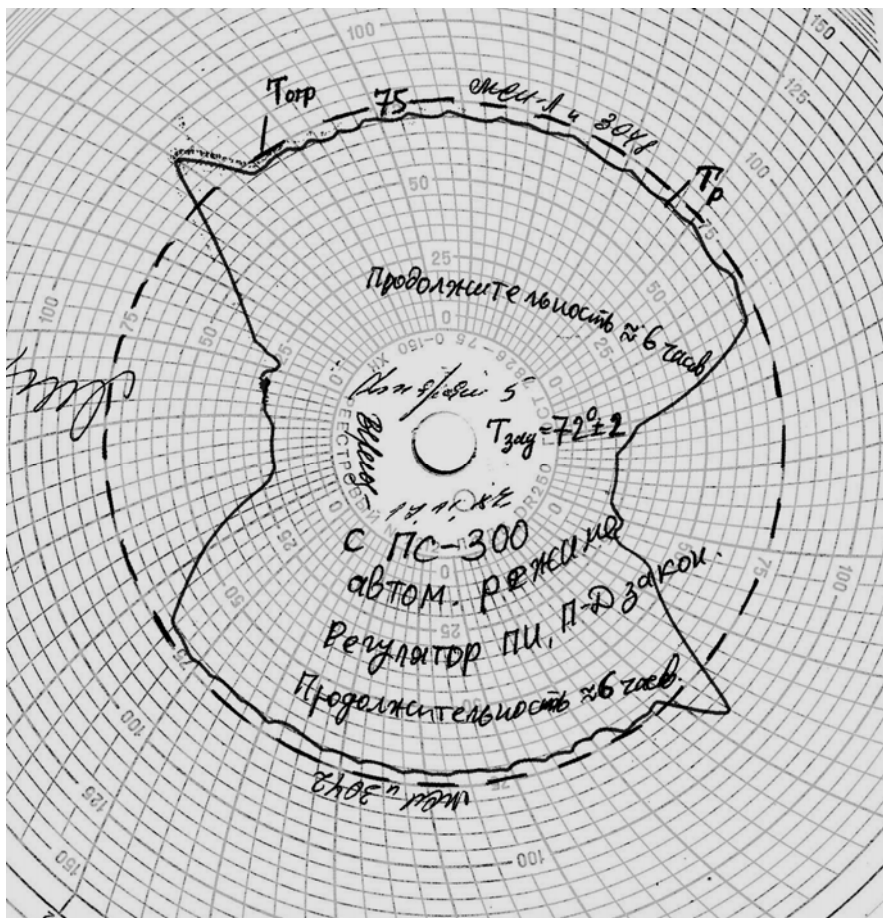
იმ შემთხვევაში თუ რეაქტორში ტემპერატურა გასცდა დავალებიდან დასაშვებ ზღვრებს $-\Delta > \varepsilon > +\Delta$, სარქველები 3 და 4 ლოგიკუ-

რი სქემის დახმარებით კომუტირდება ოპტიმიზატორის გამოსასვლელთან, რომელიც ამ განუთანხმოებას ε მიიყვანს ნულთან. წონასწორობის პირობებში, როდესაც $T_{რეაქტ.} - T_{ლაგ.} = 0$, რეაქტორის პერანგში მიწოდებული წყლის და ორთქლის ხარჯი არის ისეთი, რომ უზრუნველყოს შეშფოთების ზემოქმედების კომპენსაცია. აქედან გამომდინარე, ზემოთ აღწერილი კომბინირებული მართვა იძლევა საშუალებას უზრუნველყოს რეაქტორში ტემპერატურის რეგულირების მაღალი სიზუსტე და ხარისხი, რაც საბოლოოდ აუმჯობესებს გამოშვებული პროდუქციის ხარისხს და ზრდის მის რაოდენობას. ნახ. 5.7.8, 5.7.9 და 5.7.10-ზე ნაჩვენებია რეაქტორში ტემპერატურული რეჟიმების დიაგრამები. ნახ. 5.7.8 და 5.7.10 გამოსახული ტემპერატურის დიაგრამა შეესაბამება რეაქტორის ტემპერატურული რეჟიმის კომბინირებულ მართვას, ხოლო ნახ. 5.7.9-ზე – მხოლოდ სტაბილიზაციის კვანძის მუშაობას. როგორც ამ დიაგრამების შედარებიდან ჩანს რეაქტორის ტემპერატურული რეჟიმის მართვა უფრო ოპტიმალურია კომბინირებული მეთოდით მართვისას, რაც იძლევა საშუალებას შევამციროთ სოპლიმერიზაციის პროცესის ხანგრძლივობა დაახლოებით 2 საათით, რის შედეგადაც იზრდება გამოშვებული პროდუქციის რაოდენობა და ხარისხი.

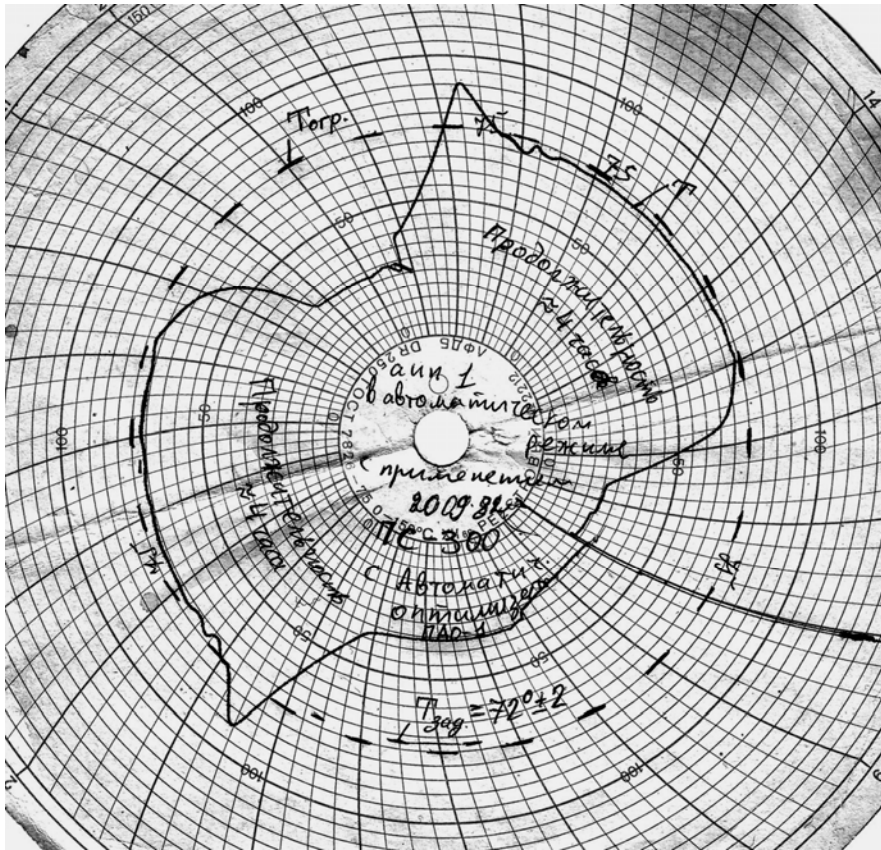
რეაქტორის ტემპერატურული რეჟიმის ოპტიმალური მართვის ალგორითმი გამოყენებულია მიკროპროცესორული ტექნიკის PIC-300-ის ბაზაზე აგებულ ბისერის წარმოების ტექნოლოგიური პროცესის მართვის ავტომატიზებული სისტემის მათემატიკურ და პროგრამულ უზრუნველყოფაში (ს. გ. „კარბოლიტი“, ქ. ორეხო-ვოზუევო).



б.б. 5.7.8.



б.б. 5.7.9.



ნახ. 5.7.10.

5.8. დასკვნა

ნაშრომში ჩატარებული გამოკვლევების და დამუშავებული ალგორითმების საფუძველზე განხილულია ავტომატური ოპტიმიზატორების სტრუქტურული და პრინციპული სქემები და მათ ბაზაზე აგებული რეგულატორების რამოდენიმე სახეობა, რომლებიც აკმაყოფილებენ საწარმოო პირობებში მუშაობის მოთხოვნებს.

განხილულია ექსტრემალური რეგულატორის აგების შესაძლებლობა უნივერსალური პნევმოელემენტების ბაზაზე, დასაბუთებულია მათი გამოყენების უპირატესობა აფეთქებასფრთხიან პირობებში და იქ, სადაც არის რადიაცია და ელექტრული დაბრკოლება. განხილულია პნევმატური ექსტრემალური რეგულატორის მრკ-3 მუშაობის პრინციპი ძიების მუდმივი სიჩქარით, რომელიც გამოიყენება ექსტრემალური მასხა-სიათებლის მქონე ნაკლებად ინერციული ობიექტების ოპტიმიზაციისათვის.

ნაჩვენებია, რომ ობიექტის მახასიათებლის დრეიფის და დახრილობის ცვლილების შემთხვევაში განხილული რეგულატორით ექსტრემუმის ძიება ხორციელდება არასაკმარისი სიჩქარით. ასეთი ობიექტების ოპტიმიზაციისათვის განხილულია პნევმატური ექსტრემალური რეგულატორი მრპ-1 ძიების ცვლადი სიჩქარით. ნაჩვენებია მისი მუშაობის პრინციპი და განხილულია, თუ როგორ იცვლება რეგულატორის არამარტო პარამეტრები, არამედ სტრუქტურა ობიექტის ექსტრემალური მახასიათებლის დრეიფის და დახრილობის ცვლილებასთან დაკავშირებით. ხშირად ასეთი რეგულატორების გამოყენება უინერციო ობიექტების ოპტიმიზაციის დროს გაძნელებულია ძიების დროს მართვის სიგნალის გადართვის დიდი სიხშირის გამო, განსაკუთრებით ექსტრემუმის მიდამოში. ასეთი ობიექტებისათვის დამუშავებულია პნევმატური ავტომატური ოპტიმიზატორები პა(ო)-1 და პა(ო)-2. ნაჩვენებია, რომ ექსტრემუმის ძიების დროს თითქმის გადართვების გარეშე აღწევენ ექსტრემუმს ექსტრემალური მახასიათებლის როგორც მარცხენა, ისე მარჯვენა შტოზე, რაც მაქსიმალურად ამცირებს ძიების დროს.

განხილულია ექსტრემალური რეგულატორების გამოყენების მაგალითები ამიაკის გვარჯილის და ბისერის (სტიროლის სოპოლიმერის) წარმოების ტექნოლოგიური პროცესების მართვის ავტომატურ სისტემებში. ნაჩვენებია მათი მუშაობის უპირატესობა არსებული მართვის სისტემებთან შედარებით, მათი გამოყენების შესაძლებლობა არა მარტო ექსტრემალური მახასიათებლის მქონე ობიექტების მართვისას, არამედ ჩვეულებრივი სტაბილიზაციის ამოცანების გადასაწყვეტად რთული ტექნოლოგიური პროცესების მართვის დროს.

დასკვნა

შემოთავაზებულია უცნობნიშნისანი გაძლიერების კოეფიციენტის მქონე ობიექტის მართვის პრინციპი დამყარებული ცვლადი სტრუქტურის მიმდევრო სისტემის აგებაზე მოსრიალე რეჟიმებით.

ნაჩვენებია, რომ ერთგანზომილებიანი ექსტრემალური მახასიათებლის მქონე სტატიკური ობიექტის ოპტიმიზაციის ამოცანის გადაწყვეტისას ასეთი მიდგომა უზრუნველყოფს ობიექტის გამოსავალი სიდიდის მონოტონურ მიახლოებას ექსტრემუმთან, და მართვაზე შეზღუდვების შემთხვევაში შესაძლებელია ძიების მაქსიმალური სწრაფმოქმედების მიღწევა.

დამუშავებულია ოპტიმალური მართვის ალგორითმები, ექსტრემუმის ძიების მუდმივი და ცვლადი სინქარით, გამოკვლეულია მათი თვისებები, როდესაც მოსრიალე რეჟიმები გამოიყენება დამკვეთი ზემოქმედების კონტურში. დამუშავებულია ოპტიმიზაციის ალგორითმები მართვის საშუალო მნიშვნელობით და მართვადი დამკვეთი ზემოქმედებით. ნაჩვენებია შემოთავაზებული ალგორითმების გამოყენების შესაძლებლობა არასტაციონარული და მრავალექსტრემუმიანი ობიექტების ოპტიმიზაციის ამოცანის გადასაწყვეტად. გამოკვლეულია ობიექტის ოპტიმიზაციის გარდამავალი პროცესის თვისობრიობა მცირე პარამეტრის მეთოდის გამოყენებით.

გამოკვლეულია რეგულირების არხებში და გადამრთველ მოწყობილობებში არსებული არაიდეალურობების გავლენა ბინარული სისტემების მდგრადობაზე. შემოთავაზებულია ანალიზის მეთოდები გადამრთველ მოწყობილობებში დაგვიანების და ჰისტერეზისის ტიპის არაიდეალურობის არსებობისა და მიღებულია თანაფარდობები, რომლებიც უზრუნველყოფენ ჩაკეტილი სისტემის სინთეზის განხორციელებას რეგულირების მოცემულ არხებში.

შემოთავაზებულ ოპტიმალური მართვის ალგორითმებზე დამუშავებულია სხვადასხვა სახის ექსტრემალური რეგულატორების სტრუქტურული და პრინციპული სქემები და მათ ბაზაზე აგებულია ექსტრემალური რეგულატორები ძიების მუდმივი და ცვლადი სინქარით. ჩატარებულია მათი ექსპერიმენტული გამოკვლევა, ნაჩვენებია მათი მუშაობის დიაგრამები. მოცემულია გარკვეული რეკომენდაციები რეგულატორების პარამეტრების შერჩევისათვის და მათი გამოყენების პერსპექტივა სხვადასხვა ტექნოლოგიური პროცესების მართვის ოპტიმალური სისტემების აგებისას.

განვიხილოთ (2.2.3.) სისტემის მოძრაობა E გარემოში, განსაზღვრული უტოლობით $A \left| \frac{df}{dx} \right| < \rho$. ამ გარემოში მოძრაობისას მართებულია უტოლობა $\dot{\epsilon} = -\rho - A \frac{df}{dx} < 0$. ასე, რომ დამოუკიდებლად იმისა, რომელ სიდიდეთაგან (σ_1 ან σ_2) უტოლდებოდა ნულს მოსრიალე რეჟიმში მოძრაობისას, გამომსახველი წერტილი შემდგომი მოძრაობისას მიაღწევს $\sigma_2 = -\Delta$ წერტილს, ამ დროს თანახმად (2.2.7.) სიგნალი V_0 მყისიერად აღადგენს პირობას $\sigma_2 = +\Delta$ და შესაბამისად, აღიძვრება რხევები. ინტერვალში $0 \leq \sigma_2 \leq +\Delta$ მოძრაობისას ობიექტის გამოსავალი სიდიდე y იზრდება როცა $\frac{df}{dx} < 0$ და კლებულობს, როცა $\frac{df}{dx} > 0$ სიდიდით

$$\Delta y_1 = \int_0^{\tau_1} \left(-A \frac{df}{dx} \right) dt, \quad (\text{დ. 1})$$

$-\Delta \leq \sigma_2 \leq 0$ ინტერვალში მოძრაობისას კი y სიდიდე კლებულობს როცა $\frac{df}{dx} < 0$ და იზრდება, როცა $\frac{df}{dx} > 0$ სიდიდით

$$\Delta y_2 = \int_0^{\tau_2} \left(A \frac{df}{dx} \right) dt \quad (\text{დ. 2})$$

სადაც τ_1 და τ_2 ამ ინტერვალებში მოძრაობის დროებია, განსაზღვრული გამოსახულებით

$$\Delta = \int_0^{\tau_1} \left(\rho - A \frac{df}{dx} \right) dt, \quad (\text{დ. 3})$$

$$\Delta = \int_0^{\tau_2} \left(\rho + A \frac{df}{dx} \right) dt. \quad (\text{დ. 4})$$

(დ. 3) და (დ. 4) გამოსახულებები უშუალოდ ჩანს, რომ $\tau_1 < \tau_2$ როცა $\frac{df}{dx} < 0$ და $\tau_1 > \tau_2$ როცა $\frac{df}{dx} > 0$. ობიექტის გამოსავალი y სიდიდის ცვლილება $\tau_1 + \tau_2$ რხევის ცვლილების დროს გამოითვლება შესაბამისად გამოსახულებით:

$$\Delta y = -A \int_0^{\tau_2 - \tau_1} \left| \frac{df}{dx} \right| dt, \quad \text{როცა } \frac{df}{dx} < 0, \quad (\text{დ. 5})$$

$$\Delta y = -A \int_0^{\tau_1 - \tau_2} \left| \frac{df}{dx} \right| dt, \quad \text{როცა } \frac{df}{dx} > 0, \quad (\text{დ. 6})$$

როგორც ჩანს ობიექტის გამოსავალი კოორდინატი E გარემოში კლებულობს რხევით რეჟიმში. ექსტრემუმის მიღწევის შემდეგ სისტემაში შენარჩუნდება რხევები, სისტემის სიზუსტე ფასდება Δy სიდიდის ზრდით ამ რხევების დროს. თანახმად (დ. 3) ან (დ. 4)

გამოსახულებისა $\Delta y = \int_0^{\tau_1} \left(A \left| \frac{df}{dx} \right| \right) dt = \Delta - \rho \tau_1$, ან შესაბამისად

$\Delta y = \int_0^{\tau_2} \left(A \left| \frac{df}{dx} \right| \right) dt = \Delta - \rho \tau_2$, ე. ი. ძიების სიზუსტე აშკარად არ აღე-

მატება Δ სიდიდეს. მართებულია აღინიშნოს, რომ ძიების ცდომილება ახლოა ნულთან, თუ Δ ექსტრემუმის მიდამოში $\frac{df}{dx}$ სიდიდე შეიძლება მიახლოებით ჩაითვალოს ნულის ტოლად.

გამოვთვალოთ ობიექტის შესავალი კოორდინატის ექსტრემუმის წერტილთან მიახლოების საშუალო სიჩქარე. ამისათვის ჩათვალოთ, რომ სიდიდე Δ საკმარის პატარაა, ე. ი. $\frac{df}{dx}$ -ის ცვლილება $\tau_1 + \tau_2$ ციკლის რხევის დროს შეიძლება უგულებელვყოთ. მაშინ (დ. 3) და (დ. 4)-დან გამომდინარეობს, რომ $\tau_1 = \frac{\Delta}{\rho - A \frac{df}{dx}}$ და $\tau_2 = \frac{\Delta}{\rho + A \frac{df}{dx}}$. საშუალო

სიჩქარის მოდული განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$\left| \dot{x}_{\text{საშ}} \right| = A \frac{|\tau_1 - \tau_2|}{|\tau_1 + \tau_2|} = A \frac{A \frac{df}{dx}}{\rho} \quad (\text{დ. 7})$$

ღანართი II

განვიხილოთ (2.2.3), (2.2.7) სისტემის მოქმედება (2.3.6) დამკვეთი ზემოქმედებით. ასეთ სისტემაში მოსრიადე რეჟიმების არსებობის პირობების გამოსაყვანად, შეიძლება შემოვიფარგლოთ საწყისი პირობების განხილვით, რომლის დროსაც $\frac{df}{dx} < 0$, $\sigma_1 \sigma_2 < 0$ ინერციული რგოლის (2.3.6) გამოსავალი z უარყოფითია, ე. ი. ემთხვევა ნიშნით u მართვას. თანახმად (2.2.3), (2.2.7) და (2.3.6) ამ შემთხვევაში

$$\dot{\varepsilon} = \sigma_2 = -\rho_0 \left(1 - \frac{u}{V_0} \text{sign } z \right) - \frac{df}{dx} u = -\rho (1 + \text{sign } \sigma_2 \text{sign } z) - V_0 \left| \frac{df}{dx} \right| \text{sign } \sigma_2. \quad (\text{დ. 8})$$

ნახვენები საწყისი პირობებით სიდიდე σ_2 კლებულობს, z სიდიდე კი σ_2 -ის ნიშნის შეცვლამდე რჩება უარყოფითი, ვინაიდან z არის ინერციული რგოლის გამოსავალი უარყოფითი შესავლით. მას შემდეგ, რაც σ_2 შეიცვლის ნიშანს, $\dot{\sigma}_2$ განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$\dot{\sigma}_2 = -2\rho_0 + V_0 \left| \frac{df}{dx} \right|. \quad (\text{დ. 9})$$

როგორც ჩანს, როცა $2\rho_0 < V_0 \left| \frac{df}{dx} \right|$ $\sigma_2 = 0$ წერტილში წარმოიქმნება მოსრიადე რეჟიმი. წინააღმდეგ შემთხვევაში σ_2 გააგრძელებს

კლებას როცა $u = +V_0$ მანამდე, ვიდრე სიდიდე z , განსაზღვრული განტოლებით $\tau \dot{z} + z = +1$ არ გახდება დადებითი, რის შემდეგაც სისტემაში აღიძვრება მოსრიალე რეჟიმი. მოყვანილი განმარტებები, რა თქმა უნდა, მართებულია, თუ განხილული მოძრაობის დროს V სიდიდე ნულის ტოლია, ე. ი. $\sigma_2 = -\Delta$. σ_2 სიდიდე მიიღებს მინიმალურ მნიშვნელობას z ნიშნის ცვლილების დროს T მომენტში, რომელიც თანახმად (დ. 9) ფასდება უტოლობით:

$$\sigma_2 \min > -2\rho_0 T. \quad (\text{დ. 10})$$

განვსაზღვრავთ რა T -ს განტოლებიდან $0 = 1 - (1 - z_0)^{e^{\frac{T}{\tau}}}$, მივიღებთ, $T = \tau \ln(1 - z_0) \leq \tau \ln 2$,

ჩავსვათ ეს (დ. 10) უტოლობაში, მივიღებთ პირობას, რომლის დროსაც $\sigma_2 > -\Delta$:

$$2\rho_0 \tau \ln 2 < \Delta. \quad (\text{დ. 11})$$

ამრიგად, (დ. 11) პირობების შესრულების დროს (2.2.3.), (2.2.7.), (2.3.6.) სისტემაში ყოველთვის აღიძვრება მოსრიალე რეჟიმი. მოსრიალე რეჟიმში სისტემის მოძრაობის განტოლების მოსაძებნად ობიექტის გამოსავალი y სიდიდის შეფარდებით, გამოვიყენოთ მეთოდიკა, ჩამოყალიბებული [47]. ამისათვის აუცილებელია ამოიხსნას განტოლება $\dot{\sigma}_1 = 0$ (ან $\dot{\sigma}_2 = 0$) განტოლების შეფარდებით, რომელიც იწოდება ექვი-

ვალენტურად და ჩავსვათ იგი მოძრაობის განტოლებაში $\dot{y} = \frac{df}{dx} u$.

ამ პროცედურის გავლის შემდეგ, მივიღებთ:

$$\text{როცა } \sigma_1 = 0 \quad u_{\text{ექვი}} = -V_0 \frac{\rho_0}{\rho_0 + V_0 \left| \frac{df}{dx} \right|}, \quad (\text{დ. 12})$$

$$\text{როცა } \sigma_2 = 0 \quad u_{\text{ექვი}} = +V_0 \frac{\rho_0}{\rho_0 + V_0 \left| \frac{df}{dx} \right|} \quad (\text{დ. 13})$$

ორივე შემთხვევაში მოძრაობის განტოლებას მოსრიალე რეჟიმში აქვს შემდეგი სახე:

$$\dot{y} = \rho_0 \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_0 + V_0 \left| \frac{df}{dx} \right|} \right). \quad (\text{დ. 14})$$

მივიღებთ რა მხედველობაში იმას, რომ თანახმად (2.2.3.) $\dot{x} = u$, მივიღებთ

$$\dot{x} = -V_0 \frac{\rho_0}{\rho_0 + V_0 \left| \frac{df}{dx} \right|} \text{sign} \frac{df}{dx}. \quad (\text{დ. 15})$$

მიისწრაფის რა ρ_0 სიდიდე (დ. 15) გამოსახულებაში უსასრულობისაკენ, (დ. 11)-ის ერთდროულად შესრულების დროს მივიღებთ:

$$\text{Lim } \dot{x} = V_0 \text{sign} \frac{df}{dx}. \quad (\text{დ. 16})$$

(დ. 16) გამოსახულებიდან გამომდინარეობს, რომ ზღვრული მოძრაობა ხასიათდება ექსტრემუმთან მიახლოების მაქსიმალური სიჩქარით. ექსტრემუმის მიღწევის შემდეგ მოსრიალე რეჟიმი წყდება და გამომსახველი წერტილი გადავა $\sigma_1 = 0$ წერტილიდან $\sigma_2 = 0$ წერტილში (ან პირიქით). სიდიდე $\sigma_2 - \sigma_1 = \delta$ განსაზღვრავს ძიების ცდომილებას.

მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ z სიდიდეს მოსრიალე რეჟიმში ახასიათებს ექსტრემალური მახასიათებლის დახრილობა. ინერციული რგოლი, აღწერილი განტოლებით (2.3.6.) გაფილტრავს მართვის ფუნქციის მაღალსიხშირულ მდგენელს და ამიტომ მის გამოსავალ სიდიდეს z ბუნებრივად თვლიან მართვის საშუალო სიდიდედ. ნაშრომში [47] ნაჩვენებია, რომ როცა τ მიისწრაფის ნულისკენ, სიდიდე z უახლოვდება $\frac{u}{V_0}$, ან თანახმად (დ. 12), (დ. 13).

$$|z| = \frac{\rho_0}{\rho_0 + V_0 \frac{df}{dx}}. \quad (\text{დ. 17})$$

ლიტერატურა

1. Аттетков А. В., Галкин С. В., Зарубин В. С. Методы оптимизации. М., Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003, 440 с.
2. Лесин В. В. Лисовец Ю. П. Основы методов оптимизации. М., Изд-во МАИ, 2005.
3. Сухарев А. Г., Тимохов А. В., Федоров В. В. Курс методов оптимизации. 2-е изд. М., Физматлит, 2005, 368 с.
4. Sliding Mode Control. Edited By: Andrzej Bartoszewicz, Control Engineering, 2011, 544 p.
5. Банди Б. Методы оптимизации, Вводный курс. М., Радио и связь, 2004.
6. Красовский А. А. Динамика непрерывных самонастраивающихся систем. Физматгиз, 1963, 468 с.
7. Кунцевич В. М. Импульсные самонастраивающиеся и экстремальные системы автоматического управления, Изд-во "Техника", Киев, 1966
8. Медведев Г. А. Тарасенко В. П. Вероятностные методы исследования экстремальных систем. Изд-во "Наука", 1967
9. Моросанов И. С. Релейные экстремальные системы. Изд-во "Наука", 1964
10. Фельдбаум А. А. Вычислительные устройства в автоматических системах. Физматгиз, 1959
11. Цянь-Сюэ-Сэнь, Техническая кибернетика. Изд-во "Иностранная литература", 1956
12. Draper C. S. and Li Y. T. Principles of optimalizing Control system and an Application to Internal Combustion English. ASME publications, 1951
13. Бондаревский А. С. Некоторые вопросы разработки систем автоматической оптимизации. Автореферат диссертации, МЭН, 1965
14. Салуквадзе М, Е. Задача векторной оптимизации в теории управления, Тбилиси, Мецниереба, 1975, 201 с.
15. Гачинский Э. Е. Применение автоматических оптимизаторов для решения обратных краевых задач. Автореферат канд. диссертации, М., 1971
16. გუგუშვილი ა., სალუქვაძე მ., ჭიჭინაძე ვ. ოპტიმალური და ადაპტური სისტემები. თბილისი, 1997, ნაწ. 1, 290 გვ., ნაწ. 2 – 437 გვ; ნაწ 3 – 318 გვ.
17. Леонов Н. Н. Некоторые вопросы автоматического поиска на инерционных объектах. Известия Вузов, Радиофизика, т.XV, №7, 1972
18. Растрингин Л. А., Системы экстремального управления, Изд-во "Наука", 1974
19. Фицнер Л. Н. О принципах построения и методах анализа некоторых типов экстремальных систем. В кн. Теория и применение дискретных автоматических систем. Изд-во АН СССР, 1960
20. Фицнер Л. Н. Автоматическая оптимизация сложных систем пространственного распределения. Автоматика и телемеханика, том XXV, №5, 1964, стр. 631-640
21. Васильев В. И. Дифференциальные системы экстремального регулирования. Изд-во АН УССР, 1963
22. Васильев В. А. Беспойсковые дифференциальные системы экстремального управления. Сб. "Самонастраивающиеся автоматические системы", Изд-во "Наука", 1965
23. Казакевич В. В. Об экстремальном регулировании инерционных и неустойчивых объектов. Доклады АН СССР, том 133, №4, 1960, стр. 756-759

24. Перрре Р., Руксель Р. Теория и применение экстремального регулятора. Дискретные и самонастраивающиеся системы. Труды II конгресса УФАК, Базель (1963), том 3, Изд-во "Наука", 1965, стр. 282-296
25. Фицнер Л. Н. О двух видах оптимально-экстремальных систем. Автоматика и телемеханика, №8, 1960
26. Мандровский-Соколов Б. Ю., Туник А. А. Система экстремального управления при случайных возмущениях. Изд-во "Наукова думка", Киев, 1970
27. Бобров Ю. И., Корнилов Р. В., Пуцилло В. П., определение закона управления оптимизатора с учетом инерционности объекта. Автоматика и телемеханика, Том XXIV, №2, 1963, стр. 183-191
28. Броекстра Г., Верхаген С., Ван Аркел Д. Многомерная релейная система экстремального регулирования с независимым поиском. Труды II, симпозиума ИФАК. Теория самонастраивающихся систем управления. Изд-во "Наука", 1969, стр. 151-263
29. Казакевич В. В. О процессе экстремального регулирования инерционных объектов при наличии возмущений. Доклады АН СССР, том 126, №3, 1959, стр. 517-520
30. Казакевич В. В., Об алгоритме наиболее быстрого поиска в импульсной системе экстремального регулирования. Автом. и телемех., №2, 1966
31. Пуцилло В. П., Бобров Ю. И. Корнилов Р. В. Методы построения одноканальных автоматических оптимизаторов для инерционных процессов. В кн. "Самонастраивающиеся автоматические системы, Изд-во "Наука", 1965
32. Казакевич В. В., Островский Г. М. О повышении быстродействия непрерывных систем экстремального регулирования, включающих инерционные звенья. В кн. "Самонастраивающиеся автоматические системы". Изд-во "Наука", 1965
33. Казакевич В. В., Труды IV Всесоюзного совещания по автоматическому управлению. Теория автоматического управления, "Наука", 1972, стр. 430
34. Воронов А. А. Основы теории автоматического управления, часть III, Изд-во "Энергия", 1970
35. Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач. М., Наука, 2007
36. Евтушенко Ю. Г. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации. М., Наука, 2007
37. Пшеничный Б. И., Данилин Ю. М. Численные методы в экстремальных задачах. М., Наука, 2008
38. Либерзон Л. М., Родов А. Б. Системы экстремального регулирования. Изд-во "Энергия", 1965
39. Емельянов С. В. и др. Теория систем с переменной структурой. Изд-во "Наука", 1970
40. Уткин В. И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. Изд-во "Наука", 1974
41. Gurman E. A. Trishkova E. A., Ukhin M. Yu., "Improvement of the control realizing the sliding mode", Autom. Remote Control. 2008, №3, 497-507
42. Modern Sliding Mode Control Theory. Bartolini G., Fridman L., Pisano A., Usai E. 2008, 468 p.
43. Utkin V. I. Sliding Mode Control for Automobile applications. Proceedings of the III International Conference "System Identification and Control Problems". Sicpro'04. Institute of control Sciences. Moscow, January 28-30, 2004.

44. Уткин В. А., Уткин А. В., Идентификация нелинейных систем: применение скользящих режимов. Труды III международной конференции "Идентификация систем и задачи управления", Sipro'04 (Москва, 28-30 января, 2004), Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, М. 2004, 955-963 с.
45. Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. Издание второе, "Наука", 1959
46. Барбашин Е. А. Введение в теорию устойчивости. Изд-во "Наука", 1967
47. Уткин В. И. Об управлениях скользящего режима в разрывных системах I, II. Автоматика и телемеханика, №12, 1971 и №2, 1972
48. Коровин С. К., Уткин В. И., Применение скользящего режима в задачах статистической оптимизации, №4, 1972, стр. 50-60
49. Коровин С. К., Ригишвили Т. Р., Пневматический экстремальный регулятор. Приборы и системы управления, №1, М, 1980
50. Козубовский С. Ф., Корреляционные экстремальные системы. Справочник, Изд-во "Наукова думка", 1973
51. Ригишвили Т. Р., Круашвили З. Е., Юрин А. Н., Уткин В. И., Коровин С. К. Пневматический экстремальный регулятор.
52. Круашвили З. Е., Ригишвили Т. Р., Коровин С. К., Уткин В. И. Пневматический экстремальный регулятор, А. С. №591817, Б. И. №5, 1978
53. Ригишвили Т. Р., Круашвили З. Е., Уткин В. И., Коровин С. К. Пневматический экстремальный регулятор. А. С. №660019, Б. И. №16, 1979
54. Ригишвили Т. Р., Коровин С. К., Пневматический экстремальный регулятор, А. С. №811199, Б. И. №9, 1981
55. Деврисашвили В. А., Коровин С. К., Ригишвили Т. Р., Юрин А. Н. Оптимизатор, А. С. № 824132, Б. И. №15, 1981
56. Ригишвили Т. Р., Коровин С. К., Деврисашвили В. А., Капанадзе Г. В., Абрамия Р. Д., Оптимизатор, А. С. №890360, Б. И. №46, 1981
57. Коровин С. К., Ригишвили Т. Р., Нариманашвили Н. И., Применение скользящего режима в задачах нестационарной оптимизации. Техническая кибернетика, Труды ГПИ им. В. И. Ленина, №5, 1979, стр. 14-17
58. Rigishbili Temur, Shanshiashvili Besarion. Increase in the speed of automatic optimizers on sliding modes. The Third International Conference "Problems of Cybernetics and Informatics" PCI' 2010 (Baku, Azerbaijan, September 6-8, 2010). Volume III. Baki, "Elm", 2010, pp. 160-163.
59. Ригишвили Т. Р., Деврисашвили В. А. Некоторые вопросы увеличения быстродействия автоматических оптимизаторов. Республиканская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов. Тезисы докладов. Тбилиси, 1981
60. Александровский Н. М., Егоров С. В., Кузин Р. Е., Адаптивные системы автоматического управления сложными технологическими процессами. Изд-во "Энергия", 1973
61. Уайльд Д. Дж. Методы поиска экстремума, Изд-во "Наука", 1967
62. Бочаров И. Н., Фельдбаум А. А. Автоматический оптимизатор для поиска минимального из нескольких минимумов (глобальный оптимизатор). Автоматика и телемеханика, №3, 1962, стр. 289-301
63. Растрингин Л. А., Статистические методы поиска. Изд-во "Наука", 1968
64. Гельфанд И. М., Цетлин М. Л. Принципы нелокального поиска в системах автоматической оптимизации. ДАН СССР, т. 137, №2, 1971

65. Юдин Д. Б. Методы количественного анализа сложных систем 1, Известия АН СССР, Техническая кибернетика, №1, 1965, стр. 3-13
66. Поляков Б. Т. О некоторых способах ускорения сходимости итерационных методов. Журнал вычислительной математики и математической физики, том 4, №5, 1964, стр. 781-803
67. Inomata S., Kumada M. On the Golf Method. Bulletin of Electrical Laboratory, Vol. 25, №7, Tokyo, 1961, pp. 495-512
68. Коровин С. К., Ригишвили Т. Р., Нариманашвили Н. И. Об одном методе оптимизации многоэкстремальных объектов. Техническая кибернетика. Труды ГПИ им. В. И. Ленина, №5, 1979
69. Гурман В. И., Трушкова Е. А., Ухин М. Ю. "Улучшение управления, реализующего скользящий режим", Автомат. и телемех. 2008, №3, 161-171.
70. Гурман В. И., Ни Минь Кань, "Реализация скользящих режимов как обобщенных решений задач оптимального управления", Автомат. и телемех., 2008, №3, 51-59
71. Ригишвили Т. Исследования качества переходного процесса оптимизации методом малого параметра. Сборник трудов ИСУ им. А. Элиашвили, №12, 2008, стр. 51-54
72. Методы исследования нелинейных систем автоматического управления. Под ред. Р. А. Нелепина, М., "Наука", 1975
73. Алтуфов Н. А., Колесников К. С. Устойчивость движения и равновесия. М., Изд-во МГТУ им. Баумана, 2003
74. Емельянов С. В. Бинарные системы автоматического управления, М. МНИИ проблем управления, 1984, вып. I, 313 с. (Бинарные динамические системы)
75. Емельянов С. В., Коровин С. К., Сизиков В. И. Бинарные системы управления нестационарными процессами с применением аддитивных и мультипликативных обратных связей. М., МНИИ проблем управления, 1983, вып. 2., 61 с. (бинарные динамические системы)
76. Емельянов С. В., Коровин С. К., Сизиков В. И. Бинарные системы управления свободным движением динамических объектов. М., МНИИ проблем управления, 1983, вып. 3, 90 с. (бинарные динамические системы)
77. Емельянов С. В., Коровин С. К. Новые типы обратных связей и их применение в замкнутых динамических системах., В кн.: Итоги науки и техники (техническая кибернетика), ВИНТИ, 1982, т. 15, с. 145-216.
78. Емельянов С. В., Коровин С. К. Применение новых обратных связей в задачах управления нестационарными динамическими процессами. В кн.: Итоги науки и техники, В. ВИНТИ, 1983, т. 16, с. 70_155 (техническая кибернетика)
79. Ригишвили Т. Р., Шаншиашвили В. Г., Синтез бинарных систем управления при наличии неидеальностей в каналах регулирования сборник трудов ИСУ им. А. Элиашвили, №11, 2007, стр. 50-57
80. Филиппов А. Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью. Мат. сборник, 1960, т. 51 (93), с. 99-128
81. Емельянов С. В., Коровин С. К. Дискретные бинарные системы автоматического управления. В кн.: "Итоги науки и техники", 1984, т. 17, с. 73-167 (техническая кибернетика)
82. Ригишвили Т. Р. Анализ динамики бинарных систем управления нестационарными процессами при наличии запаздывания в каналах регулирования. Международная научная конференция "Проблемы управления и энергетики", сборник докладов ИСУ АН Грузии, Тбилиси, 2004, №8

83. Ригишвили Т., Шаншиашвили В. Синтез бинарных систем управления нестационарными линейными процессами в условиях помех. Международная научная конференция "Проблемы управления и энергетики", сборник докладов. ИСУ АН Грузии, Тбилиси, 2004, №8
84. Хейл Дж. Теория функционально-дифференциальных уравнений. М., "Мир", 1984, 422 с.
85. Ригишвили Т. Устойчивость бинарных систем управления при наличии неидеальности в каналах переключающих устройств. Сборник трудов ИСУ им. А. Элиашвили, №11, 2007, стр.
86. Емельянов С. В. Бинарные системы автоматического управления. М., МИР, 1987 (на англ. языке)
87. Емельянов С. В., Коровин С. К. Применение принципа регулирования по отклонению для расширения множества типов обратных связей. Докл. АН СССР, 1981, т. 258, №5, с. 1070-1074
88. Емельянов С. В., Коровин С. К. Принципы построения и основные свойства замкнутых динамических систем с различными типами обратных связей. В сб.: Динамика неоднородных систем. Труды семинара ВНИИСИ, 1982, с. 5-27
89. Берендс Т. К., Ефремова Т. К., Тагаевская А. А. Элементы и схемы пневмоавтоматики. М., "Машиностроение", 1968
90. Гиоргадзе Л. Д., Юрин А. Н., Ригишвили Т. Р., Федоров С. В., Жиравов Л. В., Слабов А. Ф. Способ регулирования работой реактора. А. С. №874161, Б. И. №39, 1981
91. Гиоргадзе Л. Д., Юрин А. Н., Ригишвили Т. Р., Киласония Т. Х., Жиравов Л. В., Слабов А. Ф. Устройство для регулирования работы реактора. А. С. №1118405, Б. И. №38, 1984
92. Деврисашвили В. А., Ригишвили Т. Р., Гиоргадзе Л. Д., Швелидзе Ж. А. Устройство для автоматического управления процессом нейтрализации в производстве аммиачной селитры. А. С. №1244137, Б. И. №26, 1986
93. Табидзе Д. Г., Гугушвили А. Ш., Деврисашвили В. А., Ригишвили Т. Р., Будницкий В. А. Устройство для автоматического управления процессом нейтрализации. А. С. №1439078, Б. И. №43, 1983
94. Ригишвили Т., Шаншиашвили В. Автоматический оптимизатор на скользящих режимах. Сборник трудов ИСУ им. А. Элиашвили, №12, 2008, с. 55-59
95. Basin M. V. Rodriguez Gonzalez J. G. Optimal Regulator for Linear Systems with Delayed Control input proceedings of the III international conference "System identification and control Problems", SICPRO'04 (Moscow, January 28-30, 2004). Institute of control Sciences. М., 2004, pp. 934-943
96. Гугушвили А. Ш., Арефьев Б. А., Эндаладзе Д. Л. Экспериментальный метод опознавания структуры одномерных нелинейных объектов управления с экстремальной характеристикой, Автоматика №2, 1970, стр. 43-47
97. Труды ЦНИИКА, вып. 1, стр. 85, 1960
98. Пневматический программный задатчик типа ПФ6.2, Техническое описание и инструкция по эксплуатации, 1981
99. Системы и устройства пневматически. Под ред. А. А. Таля, стр. 338, М., 1969
100. Гачинский Э. Е., Макаровский С. Н. Промышленные автоматические оптимизаторы ИАТа. В сб.: "Самонастраивающиеся автоматические системы". М., "Наука", 1965
101. Иванов М. Е. и др. Технология аммиачной селитры. М. "Химия", 1978, стр. 51-293

102. Обновленский П. А., Коротков П. А., Гуревич А. Л., Ильин Б. В. Основы автоматизации и автоматизации химических производств. Изд-во "Химия", 1965
103. Кафаров В. В., Ахназарова С. П., Анализ потерь NH_3 , NH_4O_3 , при нейтрализации в производстве аммиачной селитры. Химическая промышленность, 1965, №1, стр. 15-18
104. Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. Изд-во "Химия", 1971
105. Технологический регламент производства биссера — сополимера стирола, п/о "Карболит", 1976