



საქართველოს ტექნიკური
უნივერსიტეტი
1922 წლიდან

თორნიკე კაპანაძე

ამბრავთა მრავალკონტურიანი სისტემების
მოდელირება და დინამიკური სინთეზი მოცემული
გარდამავალი პროცესების მიხედვით

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა: მექანიკის ინჟინერია და ტექნოლოგია

შიფრი 0715

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი თბილისი, 0160, საქართველო

2022 წ

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ფაკულტეტი სატრანსპორტო სისტემებისა და მექანიკის ინჟინერია

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით თორნიკე კაპანაძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ამბრავთა მრავალკონტურიანი სისტემების მოდელირება და დინამიკური სინთეზი მოცემული გარდამავალი პროცესების მიხედვით“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის საინჟინრო ტექნოლოგიური და საბუნებისმეტყველო საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

-----, ----- 2022 წელი

სამეცნიერო ხელმძღვანელი:

ასოც. პროფესორი ხათუნი ამყოლაძე

რეცენზენტი: პროფესორი ვაჟა ქირია

რეცენზენტი: ტმკ ბელა ნავროზაშვილი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2022წ

ავტორი: თორნიკე კაპანაძე

დასახელება: ამბრავთა მრავალკონტურიანი სისტემების მოდელირება და დინამიკური სინთეზი მოცემული გარდამავალი პროცესების მიხედვით

სადოქტორო პროგრამა: მექანიკის ინჟინერია და ტექნოლოგია
მისანიჭებელი კვალიფიკაცია: მექანიკის ინჟინერიისა და ტექნოლოგიის

დოქტორი

სხდომა ჩატარდა _____

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

ავტორის ხელმოწერა _____

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

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

რეზიუმე

სამეცნიერო ტექნიკური პროგრესის დამახასიათებელი ტენდენციებია ეფექტური ტექნოლოგიების, ავტომატიზებული მანქანებისა და მანქანათა სისტემების დანერგვა. ეს ტენდენციები შესაბამისად ხასიათდებიან ავტომატიზებული (მათ შორის მაკოპირებელი და პროგრამული მართვის) ჩარხების, საჩარხო ხაზების და საჩარხო რობოტოტექნიკური სისტემების სატრანსპორტო მოწყობილობების და ა. შ. ფართო დანერგვით.

როგორც ცნობილია, საწარმოო და სატრანსპორტო მანქანების ძრითადი ფუნქციონალური ელემენტებია ავტომატიზებული ამძრავები.

მრავალკონტურიანმა, მრავალგანზომილებიანმა ავტომატიზებულმა ამძრავებმა ფართო გამოყენება ჰპოვეს რთულპროფილიანი დეტალების დამამუშავებელ ჩარხებში.

აქვე აღნიშნულია, რომ თუ რთულპროფილიანი საავიჯო დეტალების დასამუშავებელ მოწყობილობებში ფართო გამოყენება ჰპოვეს ჰიდრავლიკურმა და ჰიდრომექანიკურმა ამძრავებმა, ამასთან ერთად სხვადასხვა სახის საჩარხო ტექნოლოგიურ სისტემებში ფართოდ ინერგებიან ასევე ელექტრომექანიკური მოთვალთვალე ამძრავები, რომელთა მეშვეობითაც ეფექტურად ხორციელდება მათი ჩართულობა ტექნოლოგიური პროცესების პროგრამული მართვის სისტემებში.

ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს

თანამედროვე ავტომატიზებულ მანქანებში და მანქანათა კომპლექსებში ფართოდ გამოყენებული ამძრავთა, კერძოდ რთულპროფილიანი დეტალების დამამუშავებისათვის გამიზნული მრავალგანზომილებიანი, მრავალკონტურიანი მაკოპირებელი და პროგრამული მართვის ჩარხებში და რობოტოტექნიკურ სისტემებში მომუშავე მრავალკონტურიანი მოთვალთვალე სისტემების ახალი სქემების და მოდელების, დინამიკური ანალიზისა და სინთეზის მეთოდების შემუშავება, მიმართული განსახილველი კვლევის ეფექტურობისა და ხარისხის ამაღლებისაკენ.

აღნიშნული მიზნის მიმართულებით კვლევის ამოცანებში ჩართულია:

- ❖ ამძრავთა საკვლევი სისტემების ფუნქციონირების, სტრუქტურული და კინემატიკური აგების, მათი ანალიზის და სინთეზის, მეთოდების და მეთოდოლოგიის ანალიზი და კვლევის ამოცანების ფორმირება;
- ❖ რთულპროფილიანი ზედაპირების დამამუშავებისათვის გამიზნული პროცესების ფუნქციონალური ანალიზი და როგორც შედეგი სამკოორდინატიანი კოპირების როტორულ-სახეხი ჩარხის ჰიდრომექანიკური მოთვალთვალე ამძრავის ცალკეული ელემენტებისა და მთლიანობაში სისტემის მოძრაობათა სტრუქტურული მოდელის შემუშავება;
- ❖ საკვლევი ჩარხის მრავალგანზომილებიან მოთვალთვალე ამძრავში სახეხი პნევმოცილინდრების, ნამზადის ზედაპირთან კონტაქტის წერტილების, პნევმოცილინდრების ღერძების, საჩარხო როტორისა და მმართველი რგოლის ფარდობით მოძრაობათა ამსახველი კინემატიკური

დამოკიდებულებების შემუშავება ნამზადის გრძივი და როტორის ბრუნვითი მოძრაობების პროცესებთან ურთიერთკავშირში;

❖ ცალკეული ფუნქციონალური ელემენტებისა და ცალკეული კოორდინატების ჰიდრომექანიკური მექანიზმების მოდელის ანალიზისა და მათი შეთანწყობით მთლიანი მოთვალთვალე სამკოორდინატიანი კოპირების ჰიდრომექანიკური სისტემის დინამიკური მოდელის შემუშავება;

❖ რთული სტრუქტურის საკვლევი ელექტრომექანიკური ამძრავის დინამიკური მოდელირება რეგულირებისა და მართვის მაძლიერებელი და გარდამქმნელი ელემენტების ცალკეული მოდელის შერწყმით მექანიკური ნაწილის დრეკადრგოლებიანი აპროქსიმაციულ მოდელებთან;

❖ მიღებული მოდელის გამოყენებით განხილვადი მოთვალთვალე სისტემების გადამცემი ფუნქციების, დინამიკური სტრუქტურული სქემების ანალიზის დინამიკური სინთეზის ორიგინალური მეთოდების და მეთოდიკების შემუშავება.

ჩატარებულია განხილვადი საჩარხო მოთვალთვალე სისტემების დინამიკური მოდელირებისა და კვლევის საკითხების მიმოხილვა. გაანალიზებულია, როგორც მექანიკური ელემენტების, აგრეთვე მთლიანი დინამიკური სისტემების აგებისა და კვლევის ძირითადი მეთოდიკები და მეთოდები.

ნაშრომის ძირითად ნაწილში ჩატარებულია ჰიდრავლიკური მრავალგანზომილებიანი მრავალკონტურიანი ამძრავთა მოთვალთვალე სისტემებით აღჭურვილი მაკოპირებელი ჩარხების სტრუქტურული და კონსტრუქციული, გამოყენებული ჰიდრავლიკური ამძრავების მოდელის და გარდამავალი პროცესების ხარისხობრივი ანალიზი.

ჩატარებული ანალიზის საფუძველზე განხილვაში შემოტანილია სამკოორდინატიანი კოპირების ჰიდრომექანიკური ამძრავით აღჭურვილი საჩარხო სისტემა, რომელიც საშუალებას იძლევა რათა განხორციელებული იქნას რთული სივრცითი სახის მრუდწირულ-ფასონურ პროფილის მქონე დეტალების მაკოპირებელი დამუშავება.

კოპირების დინამიკურ პროცესში ცალკეული რგოლების ფარდობით მოძრაობათა ანალიზის შედეგად გამოვლენილია დინამიკური მოდელის აგებისათვის საჭირო განზოგადოებული კოორდინატები. შემუშავებულია პოტენციალური და კინემატიკური ენერგიების, დისიპაციური ფუნქციებისა და ძალთა განზოგადოებული გამოსახულებები და მათი ადრე გამოვლენილ მდებარეობათა ფუნქციების შეთანწყობით ლაგრანჟის მეორე რიგის განტოლებაში შემუშავებულია მმართველი რგოლის დინამიკის მათემატიკური მოდელი. შემუშავებული იქნა აგრეთვე საკვლევი სისტემის მოთვალთვალე ჰიდრავლიკური ელემენტების დინამიკის აღწერისათვის საჭირო კანონზომიერებები. მიღებული გამოსახულებების გამოყენებით შემუშავებული იქნა მთლიანი სამკოორდინატიანი კოპირების ჰიდრომექანიკური სისტემის დინამიკის მათემატიკური მოდელი.

საკვლევი მაკოპირებელი მოწყობილობის ფუნქციონალური ანალიზი გვიჩვენებს, რომ შემდგომი კვლევების თვალსაზრისით საქმე გვაქვს

რთული სამრეწომიან მოთვალთვალე სისტემასთან: დინამიკის შემუშავებული მოდელების ხარისხობრივი ანალიზის საფუძველზე შემუშავებულია საკვლევი დინამიკური სისტემების სინთეზის გამოყენებითი თეორია. კვლევის ჩამოყალიბებული მეთოდოლოგიის პრაქტიკული რეალიზაციის თვალსაზრისით ნაშრომში ჩანს გამოკვლევების გარკვეული წრე, რომლებმაც წარმოაჩინეს სინთეზის შემუშავებული მეთოდოლოგიის ეფექტურობა. თანამედროვე ჩარხებში და რობოტოტექნიკურ სისტემებში ფართოდ გამოყენებულ ამდრავთა ელექტრომექანიკურ სისტემებთან მიმართებაში არსებული კვლევების ხარისხობრივი და რაოდენობრივი ანალიზი მიგვითითებს იმაზე, რომ ამ სისტემათა ტექნიკური მაჩვენებლების ამადლების თვალსაზრისით მეტად აქტუალურია ამ სისტემათა მექანიკურ ნაწილში არსებული დრეკადი კავშირების გათვალისწინება და მათი ეფექტური შეთანწყობა მთლიანი სისტემის დინამიკური მოდელირებისა და დინამიკური კვლევის საკითხებთან.

შემუშავებულია რხევითი მდგენელის გამოყოფაზე აგებული მათემატიკური მოდელი, რომლის თანახმად სისტემას ვიხილავთ ორკონტურიანის სახით და რომელშიც შიგა კონტური წარმოადგენს ხისტი რგოლებიანი მექანიკური სისტემის სტრუქტურას.

ცნობილი დინამიკური კვლევების ანალიზის საფუძველზე ნაშრომში წარმოდგენილია საკვლევი ელექტრომექანიკური სისტემის დინამიკური კვლევის ორიგინალური მეთოდოლოგია, რომლის ძირითადი შემადგენელი ნაწილებია: შიგა კონტურის პარამეტრული ანალიზი და სინთეზი დაქვემდებარებული რეგულირების თეორიის და ასევე, მთლიანი სისტემის გარდამავალ პროცესებში აღძრული რხევით მოძრაობათა პარამეტრების კვლევა. აღნიშნულია შემუშავებული მეთოდოლოგიის მიზანშეწონილობა როგორც პარამეტრული ანალიზის, ასევე სინთეზის მიმართულებით.

Abstract

Modern tendencies in scientific technical progress are characterized by a wide implementation of effective technologies, automated machines and devices. Are implementing automated copying and program control machine tools, lines and robotic robotics systems, automated transport equipment, etc.

As is commonly known, the main functional elements of industrial and transport vehicles are automated drivers.

Multi-contour multidimensional automated drives have been widely used in complex shape detail's processing on machine tools.

It also states that in devices for processing of complex shape furniture details were widely used hydraulic and hydro-mechanical follow-up drive, in addition with a variety of technological systems has been widely implemented in follow-up and electromechanical drives that are carried out effectively through their involvement in programmed control systems.

The purpose of the paper is

The modern automated machines and machine complexes are widely used in the drive, in particular in complex shaped details intended for processing multidimensional multi-contour reproduction and control programs and the machine robotic systems operational multi-contour follow-up schemes and systems for new models, dynamic annals and synthesis methods, the research directed towards to improving the quality and efficiency.

In order to achieve the stated goal, the following research tasks are involved:

- Analysis of the functionality, structural and kinematic structure of the drive systems, their dynamic research methods and methodologies, and the formulation of the research tasks;
- Functional analysis of processes intended for the processing of complex-shaped surfaces and, as a result, the development of individual elements of the three-coordinate rotor-grinding rotary-machine hydraulic actuator drive and a structural model of whole system's movements;
- Development of kinematic dependencies of the longitudinal and rotational movements of the preprocessor in the multidimensional follow-up drive of grinding pneumatic cylinders, point of contact with the surface, pneumatic cylinders axes, anchor rotor and control inot relative rotational movements;
- Development of models of separate functional elements and separate coordinate hydromechanical mechanisms and their dynamic modeling of a fully integrated three-coordinate copy hydraulic system;
- Dynamic modeling of the electromechanical drive for studying the complex structure by combining separate models of regulation and control elements with approximation models with elastic links in mechanical part;
- Develop of original methods and techniques for analyzing the transmission functions of dynamic computational systems, dynamic structural circuits using the obtained models.

Issues related to modeling and research of dynamic quadratic systems are considered. The basic methods and methods of constructing and researching both the mechanical part and the whole dynamic systems are analyzed.

Structural and constructive analysis of copy machine tools with multidimensional multi-contour follow-up drive computing systems, applied hydraulic drive models and transient processes is carried out in the work.

Based on the carried out analysis, a three-coordinate copy drive system equipped with a hydraulic drive is introduced on consideration for the processing of details of a complex spatially curved profile.

By analyzing the relative motion of individual links in the dynamic process of copying, generalized coordinates is necessary to construct dynamic models are identified. Generalized images of potential and kinematic energies, dissipative functions, and forces are developed, and in accordance with the functions of their previously identified locations, a second-order Lagrangian equation mathematically models the dynamics of the control unit. The necessary rules for describing the dynamics of the hydraulic elements of the study system were also developed. Mathematical models of the dynamics of the whole three-coordinate copy hydraulic system were developed using the obtained images.

Functional analysis of the research copying device shows that for further research we are considering with a complex three-dimensional follow-up system: a qualitative analysis of the dynamics models developed provides a useful theory of the dynamics of the systems studied. In terms of the practical realization of the determined research methodology, a number of research studies have demonstrated the effectiveness of the developed synthesis methodology. Robotic systems and modern machine tools is widely used in electromechanical follow-up drive systems with regard to the qualitative and quantitative analysis of existing studies indicate that these systems improve the technical properties of this system is the most relevant part of the flexible mechanical connections into account and the layout of the entire system dynamic modeling and dynamic research issues.

A mathematical model is developed based on the construction of outlining the oscillator component, according to which the system will be viewed in two-contoured form and the inner contour represents the structure of a rigid link of mechanical system.

Based on the known dynamic analysis of the research work presents the study of the dynamic electromechanical system of the original methodology of the study, whose main components are: the inner contour parametric analysis and synthesis of theory and subject to the regulation of the entire system of transitional processes instituted by oscillating movements research settings a. The feasibility of the developed methodology in both parametric analysis and synthesis is indicated.

შინაარსი

შესავალი	11
1. ლიტერატურული მიმოხილვა	
1.1 ამძრავთა სისტემები მექანიკის ინჟინერიაში	16
1.2. მექანიზმების, ამძრავების და მანქანების პროექტირებისა და კვლევის საკითხები	23
2. შედეგები და მათი განსჯა	
2.1. ჰიდრავლიკური მრავალკონტურიან მრავალგანზომილებიანი ამძრავთა სისტემებით აღჭურვილი მაკოპირებელი ჩარხები	31
2.2. ჰიდრავლიკური და ელექტროჰიდრავლიკური ამძრავების მოდელის და გარდამავალი პროცესების ხარისხობრივი ანალიზი	38
2.3. მაკოპირებელი ჩარხის მრავალკონტურიანი მოთვალთვალე ამძრავის დინამიკური მოდელირება	51
2.3.1. მოთვალთვალე სისტემის დინამიკური მოდელირება სამკოორდინატიანი კოპირების რეჟიმში	51
2.3.2. მათემატიკური მოდელირება ორ- და ერთკოორდინატიანი კოპირების რეჟიმში	60
2.3.3. სამკოორდინატიანი კოპირების გაწრფივებული გასაშუალებებული მოდელის შემუშავება	73
2.4. ჰიდრომექანიკური მოთვალთვალე სისტემის დინამიკური კვლევა.....	73
2.4.1. დინამიკური სტრუქტურული სქემა და სისტემის გადამცემი ფუნქციები	78
2.4.2. საკვლევი სისტემის დინამიკური სინთეზი მოცემული გარდამავალი პროცესების მიხედვით	87
2.5. საჩარხო ელექტრომექანიკური ამძრავის დინამიკური კვლევა	98
2.5.1. დინამიკური მოდელის შემუშავება.....	98
2.5.2. დინამიკური კვლევა გარდაქმნილი მოდელის გამოყენებით.....	100
3. დასკვნები	119
გამოყენებული ლიტერატურა	123

ნახაზების ნუსხა

ნახ. 1. ორკოორდინატიანი კოპირების სახეები ჩარხი	22
ნახ. 2. მაკოპირებელი ჩარხის კინემატიკური სქემა	32
ნახ. 3. ჰიდრომოთვალთვალე მექანიზმის სქემა ბრტყელმრუდწირულ ფასონური დეტალებისათვის	33
ნახ. 4. სამკოორდინატიანი კოპირების საჩარხო სისტემის კინემატიკური სქემა	34
ნახ. 5. მაკოპირებელი ჩარხის სივრცითი კინემატიკური სქემა	37
ნახ. 6. დროსელური რეგულირების ჰიდროამძრავი	38
ნახ. 7. მუდმივი წნევის კვების წყაროიანი ჰიდროამძრავის სტატიკური მახასიათებლები	40
ნახ. 8. მარტივი ცილინდრის სქემა	41
ნახ. 9. ა) მკვეთარა გამანაწილებლიანი ჰიდროცილინდრი; ბ) ჰიდრავლიკური სიხისტის დამოკიდებულება დგუშის გადაადგილებასთან	42
ნახ. 10. ფარდობით მოძრაობათა კინემატიკის სქემა	52
ნახ. 11. ფარდობით მოძრაობათა კინემატიკის სქემა	61
ნახ. 12. ფარდობით მოძრაობათა კინემატიკა	69
ნახ. 13. გაწრფივებული სისტემის სტრუქტურული სქემა	80
ნახ. 14. გაწრფივებული სისტემის გარდაქმნილი სტრუქტურული სქემა	86
ნახ. 15. სინთეზის შედეგად მიღებული ფუნქციონალური დამოკიდებულებები: $1 - k_v(Z_m)$; $2 - k_{px}(Z_m)$; $3 - k_{vy}(Z_m)$	92
ნახ. 16. საგნობრივი სიხშირული მახასიათებლები	94
ნახ. 17. გარდამავალი პროცესების მრუდები	94
ნახ. 18. სისტემის სტრუქტურული სქემა	95
ნახ. 19. გარდაქმნილი სტრუქტურული სქემა	96
ნახ. 20. ელექტრომექანიკური სისტემის სტრუქტურული სქემა	106
ნახ. 21. სისტემის სტრუქტურული სქემა	110
ნახ. 22. გარდაქმნილი სტრუქტურული სქემა	111
ნახ. 23. გამსხვილებული სტრუქტურული სქემა	112

შესავალი

სამეცნიერო ტექნიკური პროგრესის თანამედროვე დამახასიათებელი ტენდენციებია ეფექტური ტექნოლოგიების, ავტომატიზებული მანქანების და მანქანათა სისტემების ფართო დანერგვა, ეს ტენდენციები ხასიათდებიან ავტომატიზებული (მაკოპირებელი და პროგრამული მართვის) ჩარხების, საჩარხო ხაზების და რობოტოტექნიკური სისტემების, სატრანსპორტო მოწყობილობების და ა.შ. ფართო დანერგვით.

როგორც ცნობილია მრავალწილად საწარმოო და სატრანსპორტო მანქანების ძირითადი ფუნქციონალური ელემენტებია ავტომატიზებული ელექტრომექანიკური, ჰიდრო, პნევმო, ელექტროჰიდრო და ელექტროპნევმო ამძრავები. აღნიშნული ამძრავები მრავალწილად მიეკუთვნებიან სტრუქტურულად რთულ ტექნიკურ სისტემებს. ამასთან დაკავშირებით მანქანა-დანადგარების სტრუქტურა და კონსტრუქცია მნიშვნელოვნად არის დაკავშირებული ამძრავთა სისტემების სტრუქტურასა და კონსტრუქციულ აგებულებასთან.

თავის მხრივ ამძრავთა სისტემები განისაზღვრებიან მანქანათა მიერ შესასრულებელი საწარმოო და სატრანსპორტო პროცესების სტრუქტურული და კინემატიკური სირთულით და მათი დინამიკური მაჩვენებლებით.

საწარმოო ტექნოლოგიურ მანქანების ამძრავთა სისტემების შემუშავება მჭიდრო კავშირშია საწარმოო პროცესების ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლების და მუშათა შრომითი პირობების გაუმჯობესებასთან, საწარმოო პროცესების მექანიზაციისა და ავტომატიზაციისათვის გამიზნული მაღალმწარმოებლური ტექნოლოგიური მოწყობილობებით აღჭურვასთან.

ტექნოლოგიურ პროცესებს, რომლებიც გარკვეულწილად ხასიათდებიან მნიშვნელოვანი სირთულებით, როგორც სტრუქტურის, ასევე კინემატიკის, მექანიზაციისა და ავტომატიზაციის ხარისხის ამაღლების თვალსაზრისით, განეკუთვნებიან თანამედროვე ტექნიკაში, კერძოდ კი - საავიჯო წარმოებაში ფართოდ გამოყენებული რთულპროფილიანი ზედაპირების დამუშავების პროცესები.

ცნობილია, რომ რთულპროფილიან ზედაპირების ფორმაწარმოქმნაში ძალიან დიდი ფართო ტექნოლოგიური გამოყენება ჰპოვა მექანიკურმა დამუშავებამ, რის მიხედვითაც საკოპირე მექანიზმების, მაკოპირებელი ჩარხებისა და საჩარხო სისტემების შექმნა და მათ შემდგომ სრულყოფას მიეკუთვნებენ საკმაოდ მნიშვნელოვან საინჟინრო-ტექნიკურ ამოცანებს.

მრავალკონტურიანმა, მრავალგანზომილებიანმა ამძრავებმა ფართო გამოყენება ჰპოვეს რთულპროფილიანი დეტალების დამამუშავებელ ჩარხებში.

შემუშავებული და შემუშავების პროცესში მყოფი საჩარხო მოწყობილობების და მათი ამძრავთა სისტემების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ არსებული მოთვალთვალე ამძრავების და საჩარხო სისტემების სტრუქტურული სქემები და კონსტრუქციები მიუხედავად მათი მრავალფეროვანებისა მოითხოვენ კონკრეტული სახის ზედაპირებისათვის უფრო ეფექტურ ფუნქციონალურ და სტრუქტურულ რეალიზაციებს.

აღსანიშნავია, რომ მაკოპირებელ საჩარხო სისტემებთან ერთად, პარალელურად ფართოდ ინერგება ციფრული პროგრამული მართვის ჩარხები და რობოტოტექნიკური სისტემები, რომლებიც ფართოდ გამოიყენებიან დეტალების დამამუშავების და ტექნოლოგიური პროცესების პრაქტიკული რეალიზაციისათვის.

ამძრავთა მრავალი სახის კონკრეტული საჩარხო მოთვალთვალე მაკოპირებელი სისტემების შემუშავებასთან და კვლევასთან დაკავშირებული ნაშრომების მიმოხილვა მიგვითითებს იმაზე, რომ თუ რთულპროფილიან საავეჯო დეტალების დასამუშავებელ მოწყობილობებში ფართო გამოყენება ჰპოვეს ჰიდრავლიკურმა და ჰიდრომექანიკურმა სისტემებმა. აღნიშნულთან ერთად სხვადასხვა სახის ტექნოლოგიურ სისტემებში ფართოდ ინერგებიან ამძრავთა ელექტრომექანიკური და ელექტროჰიდრომექანიკური მოთვალთვალე ამძრავები, რომლებიც ხასიათდებიან საკმაოდ მაღალი დინამიკური და საექსპლუატაციო მახასიათებლებით, ეფექტურად ხორციელდება მათი ჩართულობა ტექნოლოგიური პროცესების პროგრამული მართვის სისტემათა კონტურებში.

პროექტირებისა და კვლევის მიმართ ჩატარებულმა ანალიზმა გვიჩვენა, რომ განსახილველი მრავალკონტურიანი მრავალგანზომილებიანი მაკოპირებელი ამბრავები მიეკუთვნებიან სტრუქტურულად რთულ სისტემებს. პროგრამული მართვის საჩარხო და რობოტო-ტექნიკურ სისტემებში გამოყენებული ელექტრომექანიკური ამბრავების ტექნიკური მახასიათებლები უმეტესად განპირობებულნი არიან დრეკადი კავშირებით სისტემათა მექანიკურ ნაწილებში.

ამბრავთა განხილური სისტემების შემუშავებასა და კვლევასთან დაკავშირებული ნაშრომების მიმოხილვა მიგვითითებს შესაბამისად, მათში განხორციელებადი პროცესების კვლევის მეთოდებისა და მეთოდიკების ეფექტურობის შემდგომი ამაღლების, მათი ახალი სტრუქტურული და კონსტრუქციული სქემების შემუშავების სამეცნიერო-ტექნიკური ამოცანის აქტუალურობაზე.

ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს

თანამედროვე ავტომატიზებულ მანქანებში და მანქანათა კომპლექსებში ფართოდ გამოყენებული ამბრავთა, კერძოდ რთულპროფილიანი დეტალების დამუშავებისათვის გამიზნული მრავალგანზომილებიანი მრავალკონტურიანი მაკოპირებელი და პროგრამული მართვის ჩარხებში და რობოტოტექნიკურ სისტემებში მომუშავე მრავალკონტურიანი მოთვალთვალე სისტემების ახალი სქემების და მოდელების, დინამიკური ანალიზისა და სინთეზის მეთოდების შემუშავებას, მიმართული განსახილველი ამბრავების პროექტირების, კვლევის ხარისხისა და ეფექტურობის ამაღლებისაკენ.

აღნიშნული მიზნის მიმართულებით კვლევის ამოცანებში ჩართულია:

- საკვლევი ამბრავთა სისტემების ფუნქციონირების, სტრუქტურული და კინემატიკური აგების, დინამიკური მეთოდების და კვლევის მეთოდიკების ანალიზი და კვლევის ამოცანების ფორმირება;
- რთულპროფილიანი ზედაპირების დამუშავებისათვის გამიზნული პროცესების ფუნქციონალური ანალიზი და როგორც შედეგი

სამკოორდინაციანი კოპირების როტორულ-სახეხი ჩარხის ჰიდრომექანიკური მოთვალთვალე ამძრავის ცალკეული ელემენტებისა და მთლიანობაში სისტემის მოძრაობათა სტრუქტურული მოდელის შემუშავება;

- საკვლევი ჩარხის მრავალგანზომილებიანი მოთვალთვალე ამძრავში სახეხი პნევმოცილინდრების, ნამზადის ზედაპირთან კონტაქტის წერტილების, პნევმოცილინდრების ღერძების, საჩარხო როტორისა და მმართველი რგოლის ფარდობით მოძრაობათა ამსახველი კინემატიკური დამოკიდებულებების შემუშავება ნამზადის გრძივი და როტორის ბრუნვითი მოძრაობების პროცესებთან ურთიერთკავშირში;
- ცალკეული ფუნქციონალური ელემენტებისა და ცალკეული კოორდინატების ჰიდრომექანიკური მექანიზმების მოდელების ანალიზისა და მათი შეთანწყობით მთლიანი მოთვალთვალე სამკოორდინაციანი კოპირების ჰიდრომექანიკური სისტემის დინამიკური მოდელების შემუშავება და დინამიკური სინთეზის მეთოდოლოგიის ჩამოყალიბება;
- რთული სტრუქტურის საკვლევი ელექტრომექანიკური ამძრავის დინამიკური მოდელირება რეგულირებისა და მართვის მამლიერებელი და გარდამქმნელი ელემენტების ცალკეული მოდელების შერწყმით დრეკადრგოლებიანი მექანიკური ნაწილის აპროქსიმაციულ მოდელებთან;
- მიღებული მოდელების გამოყენებით განხილვადი მოთვალთვალე სისტემების გადამცემი ფუნქციების, დინამიკური სტრუქტურული სქემების ანალიზისა დინამიკური სინთეზის ორიგინალური მეთოდების და მეთოდიკების შემუშავება.

ნაშრომის სამეცნიერო სიახლე მდგომარეობს:

- საკვლევი მრავალკონტურიანი, მრავალგანზომილებიანი როტორულ-სახეხი ჩარხის სამკოორდინაციანი კოპირების ჰიდრომექანიკური მოთვალთვალე ამძრავის შემუშავებულ ორიგინალური სახის სტრუქტურულ სქემაში, მოთვალთვალე სისტემის ორიგინალურ მოდელებში და კვლევის მეთოდებში.

– რთული სტრუქტურის საჩარხო ელექტრომექანიკური ამძრავების დინამიკური მოდელირების, გარდამავალი პროცესების მიხედვით სინთეზის მეთოდში, სინთეზირებადი პარამეტრების ოპტიმიზაციური გაანგარიშების მეთოდიკების და მეთოდების ორიგინალურ მეთოდოლოგიურ მიდგომებში.

ნაშრომის პრაქტიკულ ღირებულებას წარმოადგენენ: მაკოპირებელი ჩარხის მრავალკონტურიანი, მრავალგანზომილებიანი მოთვალთვალე ამძრავის და საჩარხო მრავალკონტურიანი ელექტრომექანიკური ამძრავის კინემატიკური და დინამიკური მოდელირება, ორიგინალური კინემატიკური და სტრუქტურული სქემების დინამიკური სინთეზის ორიგინალური მეთოდები და მეთოდიკები, მიმართული ამ სისტემათა ხარისხისა და ეფექტურობის ამაღლებისკენ.

1. ლიტერატურის მიმოხილვა

1.1. ამპრაავთა სისტემები მექანიკის ინჟინერიაში

მანქანათა სისტემებში ფართოდ გამოიყენებიან სხვადასხვა სახის ამპრაავთა ელექტრომექანიკური, ელექტროჰიდრო, პნევმო და ელექტროპნევმო სისტემები. ხშირ შემთხვევებში აგრეთვე საქმე გვაქვს პირდაპირი მოქმედების მექანიკურ ამპრაავებთან [1-7]. მანქანისათვის, ამპრაავის შერჩევა დაკავშირებულია მისი ახალი სქემის და კონსტრუქციის შემუშავებასთან.

პირდაპირი მოქმედების ამპრაავებმა ფართო გამოყენება ჰპოვეს მაკოპირებელ ჩარხებში. მათი ღირსებებაა კონსტრუქციის სიმარტივე და დაბალი ღირებულება [7, 8].

გამოიყენება ელექტრომექანიკური ამპრაავები, რომლებიც აგებული არიან მუდმივი დენის და ასევე, სპეციალურ ასინქრონულ დაბალინერციულ, მაღალმომენტურ და ვენტილურ ძრავებზე [3, 9-11]. უნდა აღინიშნოს, რომ ელექტროძრავებში (ედ) სწრაფქმედება დაკავშირებულია ღუზის ინერციის მომენტის შემცირებასთან. ელექტროძრავების აგზნება ხორციელდება მუდმივი მაგნიტებისაგან. გავრცელებულია ძრავები, რომელთა დისკური ღუზის სიგრძე აღემატება დიამეტრს. ვენტილური ძრავები (ვძ) მიეკუთვნებიან ელექტროამპრაავებს სინქრონული ძრავით და ინვენტორით. უკანასკნელის მართვა დამოკიდებულია ძრავას ლილვის მობრუნების კუთხეზე. ვენტილურ ძრავებში ხორციელდება უმასო აგზნება [10, 12-14], რის გამოც, შესაბამისად ბრუნვის სიხშირე იზრდება 4500 - 6000 ბრ/წთ-მდე.

ელექტრომექანიკური მოთვალთვალე ამპრაავები წარმოადგენენ ჩაკეტილ დინამიკურ სისტემებს [13]. მათ მიერ ჩარხებში ხორციელდება მჭრელი იარაღების მოძრაობები, გლინების გადაადგილებები საგლინ ბლუმინგებში, ასევე ხორციელდება მანიპულატორების და რობოტების შემსრულებელი ორგანოების მართვა [1-6].

ელექტროამპრაავებმა ფართო გამოყენება ჰპოვეს სხვადასხვა სახის მოწყობილობათა ელემენტების მართვის პროცესების ავტომატიზაციისათვის.

მათი მაგალითებია: თვითმფრინავების საჭის მექანიზმების [4, 5] და რადიოსალაკაციო სადგურების მოთვალთვალე ამძრავები და ა.შ.

ასეთ ამძრავებში ფართოდ გამოყენება ჰპოვეს კუთხური კოორდინატის (სგ) და სიჩქარის ცვლილების გადამწოდებმა (კგ). მათი მახასიათებლები უნდა აკმაყოფილებდნენ დაბალი ინერციულობის, მაქსიმალური მგრძობიარობის, სტაბილურობის, წრფივობის და ერთმნიშვნელობის მოთხოვნებს.

ელექტრული გადამწოდები კლასიფიცირდებიან როგორც გენერატორულები და პარამეტრულები. სიგნალების ტიპების მიხედვით გადამწოდები მიეკუთვნებიან ანალოგურებს და ციფრულებს.

სიჩქარის რეგისტრაციისათვის როგორც წესი იყენებენ მბრუნავ ტრანსფორმატორებს, ტაქოგენერატორებს, კოდურ და ფოტოელექტრულ გადამწოდებს და სხვა.

გამაძლერებელი მოწყობილობების სახით გამოიყენებიან ინტეგრალურ მიკროსქემებზე აგებული, კერძოდ ტრანზიტორული და სიმძლავრის ტირისტორული მაძლერებლები [19-21]. ასეთი სისტემები მიეკუთვნებიან მრავალკონტურიანებს.

ცნობილია საჩარხო შპინდელის ბრუნვის რეგულირების მუდმივი დენის ანალოგური სისტემა. ეს სისტემა საკმაოდ კარგად პასუხობს წაყენებულ მოთხოვნებს ბრუნვის სიხშირის, მაჩვენებლების სტაბილურობის, გადაადგილებათა შეთანწყობის, გარდამავალი პროცესების დინამიკის და საიმედოობის მხრივ. სისტემა წარმოდგენილია ცდომილების კომპენსაციის მქონე მოთვალთვალე სისტემის სახით. აქ მიმწოდებელ და შემსრულებელ ორგანოებად გამოიყენებიან ტირისტორული გარდამქმნელით აღჭურვილი ელექტროძრავები და რეგულირებად ორგანოთა გაუთანხობის კუთხის რეგისტრაცია ხორციელდება ტრანსფორმატორებით.

ელექტრომექანიკურებთან ერთად ფართო გავრცელება ჰპოვეს ჰიდრავლიკურმა და ელექტროჰიდრავლიკურმა ამძრავებმა. ისინი ჩარხმშენებლობაში წარმატებით გამოიყენებიან აგრეგატულ ჩარხებში და

ავტომატურ ხაზებში, სხვადასხვა სახის ოპერაციების შემსრულებლად. წარმოადგენს მრავალი სახის პროგრამული მართვის სისტემებში [14-16].

აეროკოსმოსურ ტექნიკაში აღნიშნულმა სისტემებმა გამოყენება ჰპოვეს მართვის სისტემებში ავტოპილოტების, ბუსტერების, შემსრულებელი მოწყობილობების და დამიზნების სისტემების სახით [5].

ჰიდრავლიკურმა მოთვალთვალე ამძრავებმა ფართო გამოყენება ჰპოვა: დამამზადებელ-სამტამპავი და სამჭედლო-საწნეხი მოწყობილობების ავტომატიზაციისათვის [17], სპეციალურ სტენდებში და აგრეთვე სხვადასხვა სახის მანქანა-დანადგარებში.

ჰიდრო და ელექტროჰიდრო ამძრავები ფართოდ გამოიყენებიან გემებზე. აღჭურვილნი არიან ცვლადი მწარმოებლურობის ტუმბოებით, ელექტრული უკუკავშირიანი დგუშით და სხვა [6].

ჰიდრავლიკურმა ამძრავებმა დროსელური რეგულირებით (ჰმად) ფართო გამოყენება ჰპოვეს ტექნიკურ სისტემებში, სადაც საჭიროა მაღალი სწრაფქმედება, მცირე ზომები და მასები. მრავალ შემთხვევაში მათი ჰმად გამოყენება, განპირობებულია სტრუქტურული სიმარტივით და დაბალი თვითღირებულებით.

ჰიდრავლიკური ამძრავები მოცულობითი რეგულირებით - (ჰმამ) - აგრეთვე ფართოდ გამოიყენებიან თანამედროვე მოწყობილობებში. მათთვის დამახასიათებელია მარგი ქმედების მაღალი კოეფიციენტი და მუშა სითხის ნაკლები გაცხელება.

ტექნიკაში გარკვეული გავრცელება ჰპოვეს კომბინირებულმა ამძრავებმა [19].

ელექტროჰიდრავლიკურ კომბინირებულ ამძრავებში ელექტრული მართვა შეთანწყობილია ჰიდრავლიკურ შემსრულებელ მექანიზმებთან, რაც აადვილებს ამძრავთა საჭირო მახასიათებლების მიღებას. მაკორექტირებელი მოწყობილობების შემოტანას [14, 19]. განხილვადი სისტემები ელექტრო გადამწოდებთან, ელექტრომაკორექტირებელ და გამაძლიერებელ ელემენტებთან ერთად თავის სტრუქტურებში მოითხოვენ ელექტრო-

ჰიდრავლიკურ და ელექტრომექანიკურ გარდაქმნელებს ორკასკადიან და ერთკასკადიან მკვეთარულ სისტემებს, რომლებიც მოიცავენ საქშენ-საფარიან გაძლიერებას პირველ კასკადში [14]. ასეთი ამძრავების გამოყენება რიცხოვრივი პროგრამული მართვის ჩარხებში საშუალებას იძლევა, რათა მიღებულ იქნას მაღალი მახასიათებლები, მგრძობიარობის, გადაადგილების სიზუსტის და სიჩქარის თვალსაზრისით.

ამასთან ერთად ასეთი სისტემები აღიჭურვებიან უკუკავშირებით ჰიდროამძრავებში არეებათაშორის წნევათა სხვაობის ან და გამავალი რგოლის აჩქარების მიმართ. პირველ შემთხვევაში დამატებითი უკუკავშირი შემოაქვთ ძრავასთან დაკავშირებით ჰიდრომილისებში ჩართული დიფერენციალური გადამწოდებიდან, მეორე შემთხვევაში კიდევ სისტემაში შემოაქვთ ძრავას გამომავალ ლილვთან შეერთებული ტაქოგენერატორი და წარმოებულის გამომუშავებული მოწყობილობა. ეფექტი გამოისახება სისტემათა დემპფირებაში და შესაბამისად რხევადობის შემცირებაში.

ავტომატური მართვის თანამედროვე კონტროლისა და რეგისტრაციის სისტემებს ხშირად წარედგინებათ ამოცანები, რომელთა გადაჭრა მოითხოვს ანალოგურ და ციფრულ საშუალებათა ერთდროულ გამოყენებას. მათ მიეკუთვნებიან ანალოგურ-ციფრული სისტემები (აცს), ისინი იძლევიან საშუალებას, რათა განხორციელებული იყოს რთული რეგულირების კანონები და ინფორმაციათა წარმოდგენის ფორმები. შეუძლიათ აწარმოონ სიგნალების ფუნქციონალური და ინტეგრო-დიფერენციალური გარდაქმნები და ა.შ.

ანალოგური სისტემები ხასიათდებიან უწყვეტი მოქმედებით და განსხვავდებიან სიმარტივით, მაგრამ გააჩნიათ შედარებით დაბალი სიზუსტე. ციფრული მოწყობილობები მიეკუთვნებიან დისკრეტული მოქმედების ელემენტებს, მათთვის დამახასიათებელია მაღალი სიზუსტე, შეუძლიათ ანალოგური ტექნიკის მიერ შეუსრულებელი რთული ამოცანის ამოხსნა. უარყოფითი მხარეებია - მათი სირთულე და მაღალი ღირებულება. ამასთან ერთად ანალოგურ-ციფრული სისტემებია (აცს), კარგად ავლენენ

ცალკეულ დადებით მხარეებს. მოქმედების პრინციპის თანახმად ანალოგურ-ციფრული სისტემები შეიცავენ ინფორმაციის გარდამქმნელებს: ანალოგურს ციფრულში და ციფრულს ანალოგურში.

აგრეთვე საჭიროა განვიხილოთ მექანიკური სისტემები (მს), რომლებიც მიეკუთვნებიან ამძრავთა ნებისმიერი სისტემების მნიშვნელოვან ელემენტებს. მექანიკური სისტემები შეიცავენ ურთიერთდაკავშირებულ ძრავების, გადაცემების და მუშა ელემენტების ინერციულ მასებს [1]. ღია არაჩაკეტილ ამძრავებშიც კი, ენერგეტიკულ-გარდამქმნელ და მექანიკურ ნაწილს შორის, საქმე გვაქვს ძალოვან ჩაკეტილობასთან პირდაპირი და უკუკავშირების მეშვეობით. მოთვალთვალე სისტემაში კიდევ მექანიკური ნაწილი ნაწილობრივ ან/და მთლიანად შემოწდომილია უკუკავშირებით მდებარეობის მიხედვით. ეს კიდევ თავის მხრივ მნიშვნელოვნად აძლიერებს მის ზემოქმედებას მთლიან სისტემაზე [2].

ამძრავთა სისტემების დინამიკის ცნობილი აღწერები ხისტი რგოლებით მექანიზმებში იძლევიან საშუალებას მარტივი გზებით იქნას გათვალისწინებული მექანიკური ნაწილის ინერცია, შიგა და გარე მომენტები და ძალები, მაგრამ ისინი არ ითვალისწინებენ მექანიკური სისტემის მნიშვნელოვან ფიზიკურ თვისებებს. დრეკადი ელემენტების არსებობა მექანიზმებში მნიშვნელოვან ზემოქმედებას ახდენს მთლიანი სისტემის დინამიკაზე. გარდამავალი პროცესების კვლევებთან დაკავშირებული ვ. ვეიტცის, ა. გოლუბენცევის, ს. კაზაკის, ს. კოჟენიკოვის, ვ. კუდინოვის, მ. კოლოვსკის და სხვათა ნაშრომები მიგვითითებენ მექანიკურ მოძრაობათა რხევით ხასიათზე.

ელექტროჰიდრავლიკური ამძრავები ფართოდ გამოიყენებიან რობოტოტექნიკაში. მისი გავრცელება აისახება მაღალი სწრაფქმედებით და ენერგოტევადობით, დატვირთვის მახასიათებლების მნიშვნელოვანი სიხისტით, რაც გამოწვეულია მუშა სითხეების მცირე კუმშვადობით. ძრავების სახით ფართო გამოყენება ჰპოვეს წინსვლითი მოძრაობის მქონე წრფივმა ჰიდროცილინდრებმა და ასევე, ბრუნვითმა ჰიდროძრავებმა.

პოზიციურ და კონტურულ სისტემებში გამოიყენებიან ელექტრო-ჰიდრავლიკური მოთვალთვალე ამძრავები წრფივი ჰიდროცილინდრებით, ბრუნვითი ჰიდროძრავებით, ასევე წინსვლითი და ბრუნვითი მოძრაობის ელექტროჰიდრავლიკური ბიჯური ამძრავები [13, 15-17].

ავტომატიზირებულმა ამძრავებმა ფართო გამოყენება ჰპოვეს მაკოპირებელ ჩარხებში.

რთული ზედაპირის მქონე დეტალების დამუშავებისათვის უმეტეს შემთხვევაში გამოიყენება საკოპირე ჩარხები - მექანიკური და კიდევ ელექტრული და ჰიდრავლიკური მართვით; პროგრამული მართვის ჩარხები ბრტყელი და სივრცითი ზედაპირებისათვის [21-23].

საკოპირე ჩარხებთან მიმართებაში პროგრამული მართვის ჩარხებს გარკვეული უპირატესობები გააჩნია, კერძოდ: კოპირების დამზადებაზე ხარჯების არარსებობა, მათი რემონტი და შენახვა [24, 25]. მაგრამ, გარკვეულმა სირთულეებმა მართვის პროგრამის მომზადების თვალსაზრისით და ასევე მათ სპეციფიკასთან კავშირში მყოფი დამატებითი მოთხოვნების არსებობამ, განაპირობა საკოპირე ჩარხების ფართო გამოყენება. შეიძლება აღვნიშნოთ საფრეზავი-საკოპირე ჩარხები შტამპებისა და პრესფორმების, სანიჩბავი ხრახნების და ჰიდრავლიკური ტურბინების ფრთების დასამუშავებლად [4, 25-29].

საკოპირე-სახე ჩარხებს შორის აღსანიშნავია ნიჩბების დასამუშავებელი СИЛН, СИВК, УХОЛ მოდელები ლენტურ-სახე ჩარხები და დიდი დიამეტრის ფასონური სხეულების სახე ჩარხები, კერძოდ, ჩარხი XIII-152.

ხის დამუშავებაში გამოიყენება ჰპოვეს საკოპირე-საფრეზმა ჩარხებმა – „Reichenbacher“ (გფრ) და „Zucerman“ (ავსტრია) [28].

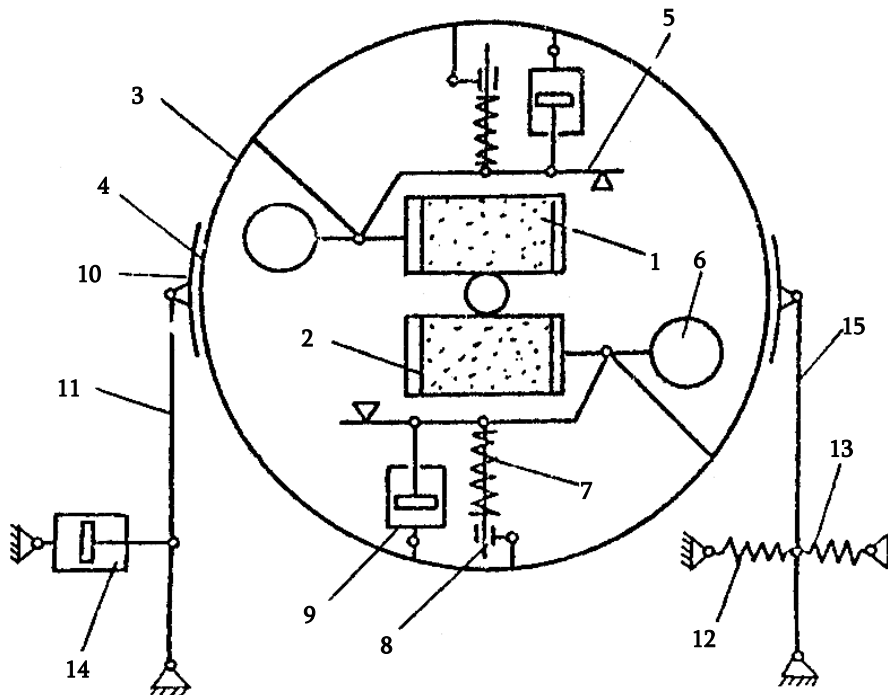
ფირმა „Zucerman“-ის ცნობილ ჩარხს წარმოადგენს მრავალშპინდელიანი საკოპირე-საფრეზავი ჩარხი.

ცნობილია აგრეთვე ШЛДБ-3 [29] მოდელის ჩარხი, რომელიც განკუთვნილია მცირე ზომის ცილინდრული და კონუსური ზედაპირების გასახეხად.

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის და თბილისის სამეცნიერო კვლევითი და საპროექტო საკონსტრუქტორო ინსტიტუტის შემოქმედებითი ჯგუფის მიერ შექმნილი და წარმოებაში დანერგილია ავეჯის დეტალების სახეები ნახევრადავტომატური ხაზი, რომლის კონსტრუქცია დაცულია რიგი საავტორო უფლებებით (№№ 730542, 806376, 865616, 1054027, 1060425, 1135616).

აღნიშნული საჩარხო სისტემების ფუნქციონალურ განვითარებას წარმოადგენს მრუდწირული ძელური ცვალებადკვეთიანი დეტალების ორკოორდინატიანი მაკოპირებელი ჩარხი, რომლის სქემა მოყვანილია ნახაზ 1-ზე.

ზამბარებით 7, 12 და 13 ჩარხის მუშაობის დროს ხორციელდება მოთვალთვალე მექანიზმების მოყვანა საწყის მდგომარეობაში, ხოლო დემპფერები 9 და 14 ემსახურებიან რხევების ჩახშობას.



ნახ. 1. ორკოორდინატიანი პირდაპირი კოპირების სახეები ჩარხი

ტექნოლოგიური პროცესის განხორციელების დროს რთულპროფილიანი დეტალის კონტურზე შეგუება ჩარხში განხორციელებულია, ერთის მხრივ ოთხრგოლა მექანიზმის (10, 11, 15) და მეორეს მხრივ ბარბაცაზე 10 დამონტაჟებული როტორის 3 ქანაობით

მხრეულებზე 11 და 15. ნამზადზე სახეხი ცილინდრების მიჭერის ძალა უზრუნველყოფილია ზამბარების 7 და ჰაერის წნევის რეგულირებით სახეხ ცილინდრებში.

ჩარხის კონსტრუქცია ითვალისწინებს მუშაობას, როგორც ორკოორდინატიან, აგრეთვე ერთკოორდინატიან რეჟიმებში.

აღწერილი მაკოპირებელი ჩარხის დამუშავების ხარისხის და მწარმოებლურობის შემდგომი ამაღლების თვალსაზრისით პრიორიტეტულ მიმართულებას წარმოადგენს საჩარხო სისტემის აღჭურვა პნევმო და ჰიდროსისტემებით [22, 30 - 35].

აღნიშნულის თანახმად აღსანიშნავია პნევმატიკური მიმჭერი მექანიზმების მქონე და კოპირების ჰიდრომექანიკური სისტემის შემცველი როტორულ-სახეხი ჩარხები [30]. აღნიშნულ სისტემათა სქემების აღწერა მოცემულია განხილვადი ნაშრომის შემდგომ თავებში.

1.2. მექანიზმების, ამძრავების და მანქანების პროექტირებისა და კვლევის საკითხები

ნებისმიერი მანქანისა და მოწყობილობების პროექტირება იწყება მექანიზმების სტრუქტურასთან დაკავშირებული საკითხების განხილვისაგან, რომლებიც განხილულია დიდი რაოდენობით ცნობილ ნაშრომებში და მათ შორის აღსანიშნავია ი. ი. არტობოლევსკის [36–38] ნაშრომებში. მექანიზმების სინთეზის საკითხები კარგად არიან წარმოდგენილი ნ.ი. ლევიტსკის და ს.ა. ჩერკუდინოვის და სხვათა შრომებში [39–41].

ვ. ა. აკუდინოვის ნაშრომში [42] განიხილება საჩარხო მოწყობილობების დინამიკური კვლევის საკითხები, ჩამოყალიბებულია ჩარხების დინამიკური ხარისხის მაჩვენებელთა სისტემა და დინამიკური სინთეზის ორიგინალური საკითხები.

მიწოდების რაციონალური ტექნოლოგიური პარამეტრების განსაზღვრა, მაღალი დამუშავების სიზუსტის უზრუნველყოფის თვალსაზრისით, ოპტიმალური წარმადობის და მართვის საკითხები მოცემულია ფ.მ. მანჟოსის ნაშრომებში [43].

ვ.ლ. ბიდერმანის და მ.ფ. დიმენტბერგის ნაშრომში [44, 45] გარჩეულია წრფივი და არაწრფივი რხევების თეორიის საკითხები, მოყვანილია სისტემების იდენტიფიკაციის მეთოდები რხევების სტატისტიკური ანალიზის საფუძველზე. საკითხების გადაწყვეტა ხორციელდება ანალიზურად და კომპიუტერული მოდელირების გზით.

ნაშრომში [46] ყურადღება ექცევა ჰიდრაულიკური დემპფერების შემოტანას და ბლანტი ხახუნის მქონე მექანიკური სისტემების რხევების თეორიულ და ექსპერიმენტულ საკითხებს, დემპფერების პროექტირებისათვის საჭირო მონაცემებს.

ვ. ა. ვალმოვის ნაშრომში [47] განხორციელებულია სასაზღვრო ამოცანის ამოხსნა გალერკინის მეთოდის გამოყენებით. გაანალიზებულია რხევების სიხშირული შემდგენები.

დინამიკის ამოცანის ამოხსნისას მივდივართ მიახლოებითი რიცხვით-ანალიტიკური და სიხშირული მეთოდების შემუშავების აუცილებლობასთან. პერსპექტიულს წარმოადგენს კომპიუტერებზე პრაქტიკულად რეალიზებადი ამოცანების შემცველი რიცხვით -ანალიზური მეთოდები.

ნაშრომებში [45-53] განხილულია ამბრავთა მექანიკურ სისტემებში, არსებული დინამიკური მოვლენების კვლევების ორიგინალური საკითხები, ჩატარებულია სხვადასხვასახის კლასიფიცირების მოვლენები.

დრეკად სისტემებში მანქანის ელემენტები, რომლებსაც მოძრაობაში მოჰყავთ ცალკეული ნაწილები, მიჩნეულია დრეკადებად, რა დროსაც მათი დეფორმაცია აღემატება სიხისტის ზღვარს. ერთი დრეკადი კავშირის მქონე სისტემას უწოდებენ ერთკავშირიანს, ორი კავშირის დროს - ორკავშირიანს და ა. შ. დრეკადი კავშირები შეიძლება ხასიათდებოდნენ მუდმივი და ცვლადი სიხისტეებით. პირველ შემთხვევაში რხევითი პროცესებისა და დრეკადობის კვლევისას, როგორც წესი დავდივართ მუდმივ კოეფიციენტიანი წრფივი განტოლების ამოხსნამდე. იმავე მოვლენების კვლევისას მეორე შემთხვევაში დავდივართ არაწრფივ განტოლებებზე.

სისტემების წარმოდგენა შეიძლება იქნას ხისტი ან დრეკადი რგოლებით დაკავშირებული შეყურსული მასების სახით ან/და ელემენტთა განაწილებული მასების სახით. პირველ შემთხვევაში დინამიკის მათემატიკური მოდელები შეიძლება გამოსახული იქნეს ნიუტონის დიფერენციალური (ხისტი კავშირების დროს) ან ლაგრანჟის განტოლებით (დრეკადი კავშირების დროს). შეყურსულ მასათა რაოდენობის შესაბამისად სისტემას ეწოდება ერთმასიანი, ორმასიანი, სამმასიანი და ა.შ.

განაწილებული მასების მქონე დრეკადი სისტემის განხილვისას დავდივართ ე. წ. ტალღურ განტოლებებამდე.

ხისტი სისტემების დინამიკური ამოცანების დანიშნულებაა რათა მოცემული მომენტებით ან ძალებით განსაზღვრული იქნას სისტემის მოძრაობის კანონი, სისტემის ყველა წერტილის სიჩქარე და აჩქარება ანდა მოძრაობის მაჩვენებლების კანონის გათვალისწინებით განისაზღვროს მოქმედი ძალები.

დაყვანილი ძალები შეიძლება დამოკიდებული იქნეს x კოორდინატებზე, v სიჩქარეზე და t დროზე. დაყვანილი მასის მნიშვნელობა კი შესაძლოა იყოს დამოკიდებული მდებარეობის x კოორდინატზე. თანახმად იმისა, რომ კინეტიკური ენერჯის ნამატი მოქმედი ძალების მუშაობის ტოლია

$$d\left[\frac{m(x)v^2}{2}\right] = P(x, v, t)dx \quad (1)$$

ან

$$\frac{d}{dx}\left[\frac{m(x)v^2}{2}\right] = P(x, v, t) . \quad (2)$$

დიფერენცირებისას ვიპოვიით

$$\frac{v^2}{2} \cdot \frac{d[m(x)]}{dx} \frac{dv}{dx} m(x) = P(x, v, t) . \quad (3)$$

ან კიდევ შეგვიძლია გარდაქმნილი სახით,

$$m(x) \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{1}{2} \frac{d[m(x)]}{dx} \cdot \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 = P(x, v, t) . \quad (4)$$

მიღებული განტოლება მათემატიკურ ფორმაში ასახავს ნიუტონის კანონს, როდესაც $m(x) = const$ და $P(x, v, t) = cons$, იგი მარტივად მიიღებს შემდეგ სახეს

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = p. \quad (5)$$

თუ დაყვანილი სისტემა შეიცავს მბრუნავი მასის ინერციის მომენტს $J(\varphi)$ და ძალთა მომენტს M დამოკიდებულებს φ კოორდინატზე, $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ კუთხურ სიჩქარეზე და t დროზე, მაშინ დიფერენციალური განტოლებას ჩავწერთ შემდეგნაირად:

$$J(\varphi) \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{d\varphi} [d(\varphi)] \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = M(\varphi, \omega, t) \dots \quad (6)$$

თუ $J(\varphi) = const$ და $M(\varphi, \omega, t) = const$ მივიღებთ

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = M. \quad (7)$$

გარდა აღნიშნული მეთოდისა, არსებობს აგრეთვე გრაფიანალიტიკური და გრაფიკული მეთოდები.

დრეკადკავშირებიანი სისტემების დინამიკის ამოცანები, როგორც წესი დაკავშირებულნი არიან თვისებათა ცვლილებების განსაზღვრასთან, ელემენტების დინამიკური დატვირთვების მაქსიმალურ მნიშვნელობების და სისტემათა რეზონანსული მდგომარეობების პირობებში.

თანამედროვე მანქანებში გამოყენებული ამძრავთა რეალური მოთვალთვალე სისტემები, ხშირ შემთხვევაში მიეკუთვნებიან რთულ არაწრფივებს, ზოგჯერ კი არასტაციონარულებს, რაც მნიშვნელოვნად ართულებს მათი დაპროექტების და კვლევის საკითხებს [14, 54-59].

თავისუფალი და იძულებითი რხევების კვლევის მეთოდოლოგიები, დაფუძნებულნი არიან ა. მ. ლიაპუნოვის მოძრაობათა მდგრადობის ფაზური სივრცეების გეომეტრიული აგების ტიპოლოგიურ, დიფერენციალურ განტოლებათა ხარისხობრივ ფუნდამენტურ თეორიებზე, გადამცემი ფუნქციების და სისტემების სიხშირულ მახასიათებლებზე აგებულ სხვაობათა მეთოდებზე და ა. შ. [63 - 65]. ისინი საშუალებას იძლევიან

მივიღოთ დასაბუთებული შედეგები, მაგრამ როგორც წესი ძალიან რთულია ინჟინრული გათვლების რეალიზაციის პროცესებისათვის. ამიტომ, ზუსტ მეთოდებთან ერთად ძალზედ მნიშვნელოვანია მიახლოებითი მეთოდების გამოყენება. ისინი ხასიათდებიან პრაქტიკული გამოთვლების სიმარტივით და გამოვლენილი მნიშვნელობების გარკვეულ არეში პარამეტრებისა და სტრუქტურის შემდგომი დაზუსტების საშუალებით. ძალიან ხშირად გამოყენების სიმარტივეს აქვს დიდი მნიშვნელობა, რაც აისახება იმით, რომ თანამედროვეობაში ნებისმიერი არაწრფივი პროცესების საკმარისად, დეტალური და ზუსტი დინამიკური კვლევა შეიძლება განხორციელდეს კომპიუტერული მოწყობილობების გამოყენებით.

არაწრფივი სისტემების მიახლოებითი კვლევისთვის ფართო გამოყენება ჰპოვეს ჰარმონიული გაწრფივების, ჰარმონიული ბალანსის და ა.შ. მეთოდებმა [60-65].

სხვადასხვა სახის მიახლოებითი გათვლის მეთოდები, განხილულია აგრეთვე ი. ა. ორურკის, ვ. ი. სტანკევიჩის, ი. ი. კრინეცკის და სხვათა ნაშრომებში [54, 63-65].

სტრუქტურულად რთული სისტემების კვლევის ეფექტურ მეთოდთა შორის, აგრეთვე აღსანიშნავია სინთეზის მეთოდები წინასწარ მოცემული გარდამავალი პროცესების მიხედვით, რომლებიც აგებულია სინთეზის გარდაქმნილი მახასიათებლების გამოყენებაზე [66-69].

ამის საფუძველს წარმოადგენს ის, რომ მახასიათებლების საკმაოდ ზუსტი დამთხვევა სიხშირების მნიშვნელოვან არეში პირდაპირაა დაკავშირებული ორიგინალების დამთხვევასთან [70-72].

ორიგინალის $f(t)$ წარმოსახვით სიხშირეთა მახასიათებელს მივიღებთ თუ $F(p) \doteq f(t)$ ფუნქციაში, სადაც p არის ლაპლასის ოპერატორი. შემოვიტანთ გარკვეულ რიგ საგნობრივ $p = \delta$ მნიშვნელობებს და δ -ს განვიხილავთ წარმოსახვით სიხშირის $\omega = -j\delta$ სახით.

ორიგინალებთან წარმოსახვით სიხშირეთა მახასიათებლების სიახლოვის პირობაზეა აგებული გარდამავალი პროცესების მიახლოებითი განსაზღვრის მეთოდი.

უფრო ზოგადი მიდგომით წარმოსახვით სიხშირეთა მაპროქსიმირებელი მახასიათებლები აგებულია საძიებელი a_i და b_i კოეფიციენტების შემცველი შემდეგი სახის

$$F^\circ(p) = \frac{b_0 + b_1 p + b_2 p^3}{a_0 + a_1 p + a_2 p^3 + p^3}; \quad (8)$$

$$F^\circ(p) = \frac{b_0 + b_1 p}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2}. \quad (9)$$

გამოსახულების გამოყენებაზე.

პირველ რიგში აღნიშნული მახასიათებლები ითვალისწინებენ ზღვრულ $F^\circ(o)$ და $F^\circ(\infty)$ მნიშვნელობებს.

სინთეზის პროცესში a_i და b_i სიდიდეები მოცემულია და საძიებლებს მიეკუთვნებიან $F(p)$ რეგულირებადი კოორდინატის გამოსახულებაში არსებული კოეფიციენტები. ზოგადი მიდგომით სინთეზირებადი და სასურველი კოორდინატების გამოსახულებები ჩაიწერებიან ასე:

$$F(p, \sigma_j) = \frac{M(p) + \sum_{j=1}^S \sigma_j M_j(p)}{N(p) + \sum_{j=1}^S \sigma_j N_j(p)} = x(t) \quad (10)$$

და

$$F^\circ(p) = \frac{M^\circ(p)}{N^\circ(p)} = x^\circ(t), \quad (11)$$

სადაც M° , M , N° და N – ცვლადის გარკვეული პოლინომები, σ_j – სინთეზისათვის გამიზნული კოეფიციენტები (პარამეტრები).

ვაწარმოებთ პროცესების ინტეგრალურ მიახლოებას

$$(p, \sigma_j) \cong F^\circ(p), \quad (12)$$

რომელიც გაშლილი სახით ჩაიწერება ასე:

$$M^\circ(p) \sum_{j=1}^n \sigma_j N_j(p) - N^\circ(p) \sum_{j=1}^n \sigma_j M_j(p) = N^\circ(p) M(p) M^\circ(p) N(p). \quad (13)$$

მიღებული გამოსახულების (13) თანახმად ვწერთ პირობით განტოლებებს $p = \delta$ აპროქსიმაციათა l კვანძებში.

ნაშრომში [63] რეკომენდირებულია წარმოსახვითი δ_v სიხშირეთა განთავსება გეომეტრიული პროგრესიის მიხედვით

$$\delta_v = \delta_0 q^{-v}, \quad v = 0, \dots, k-1,$$

რომლის მნიშვნელობა $q = 2$.

შემდგომ პირობითი განტოლებები მრავლდებიან $\lambda_v(\delta_v)$ ნამრავლზე, რომელთა განსაზღვრისათვის საჭირო მათემატიკური გამოსახულებები მოყვანილია ნაშრომში [73].

სინთეზის მეთოდის ერთ-ერთი ძირითადი ეტაპია დინამიკური მდგრადობის პირობის შემოტანა, ვარირებადი (ერთი ან ორი) პარამეტრის შერჩევის მეშვეობით.

ნაშრომებში [89-95] წარმოდგენილია არაწრფივი სისტემების სინთეზის მეთოდები მოცემულ გარდამავალ პროცესების მიხედვით. ამ ნაშრომებში არაწრფივი პროცესების სასურველებთან ინტეგრალური მიახლოებისათვის გამოყენებულია კვადრატული სახის Φ_g ფუნქციონალები, რომლებიც არიან აგებულნი არაწრფივი რგოლების ამონახსნებზე [72]

$$\Phi_g = \int_0^{\tau_g} \varphi_g^2[\bar{x}_i(t); \bar{\varepsilon}(t)] dt, \quad (14)$$

სადაც, $\bar{\varepsilon}_i(t)$ და $\bar{x}_i(t)$ – სასურველი გარდამავალი პროცესებია, $\varphi_g(t) = 0$ – არაწრფივი დიფერენციალური გამოსახულებაა, τ_g – ინტეგრალური მიახლოების პროცესებია დროის ინტერვალში.

აღნიშნულ ნაშრომებში განხილულია: სასურველი პროცესების შემოტანის კავშირი სასურველ და სითუზირებად პროცესებს შორის, როგორც ფუნქციონალური ურთიერთკავშირის განსაზღვრის და საკვლევ სისტემაში მდგრადობის პირობის შემოტანის ამოცანები.

სინთეზის განხილვად მეთოდში თანახმად ნაშრომისა [82] მდგრადობის პირობა ხორციელდება სასურველ პროცესების გამოსახულებებში შემოტანილი დროის მასშტაბური z_m – კოეფიციენტის

ვარიაციით. აღნიშნულთან დაკავშირებით ε და x კოორდინატები წარმოდგენენ z_m –ის ფუნქციებს:

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}_i \left(\frac{1}{z_m}, t \right) \\ \bar{\varepsilon}_i \left(\frac{1}{z_m}, t \right) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

წარმოდგენილი ხერხი საშუალებას იძლევა, რომ ჩატარებული იქნას სინთეზის პროცედურები გარდამავალი პროცესების მთელი რიგი ზემოქმედებების მიერ გამოწვეული გარკვეული მაჩვენებლების დაკმაყოფილების პირობიდან გამომდინარე.

არასტაციონარული სისტემების დინამიკური კვლევის საკითხები განხილულია შრომებში [83-87].

პროფესორ თ. თ. მჭედლიშვილისა და თანაავტორების მიერ შესრულებულ ნაშრომებში [68-102], სადაც მოცემულია სხვადასხვა სახის არაწრფივი სისტემების კვლევასთან დაკავშირებული სამეცნიერო საკითხები.

ამძრავთა რთული სისტემების გაანგარიშებისა და კონსტრუირების საკითხები აგრეთვე განხილულია აკადემიკოს რ.შ. ადამიასა და პროფესორ ა.ი. ბეროშვილის ნაშრომებში [103-105].

2. შედეგები და მათი განსჯა

2.1. ჰიდრავლიკური მრავალკონტურიან მრავალგანზომილებიანი ამძრავთა სისტემებით აღჭურვილი მაკოპირებელი ჩარხები

ჩატარებულმა გამოკვლევებმა აჩვენეს, რომ პირდაპირი კოპირების მიმყოლი სისტემებით აღჭურვილი როტორულ-სახეხი ჩარხები ახორციელებენ დეტალების დამუშავებას მიწოდების რეჟიმებით 0,1 მ/წმ-მდე. ასეთი შეზღუდვები გამოწვეულია მაღალი ძალური დინამიკური ზემოქმედებების გაჩენით მაღალი სიჩქარის რეჟიმებზე მუშაობისას, რაც განპირობებულია მოძრავი ელემენტების მაღალი ინერციული მახასიათებლების წარმოშობით.

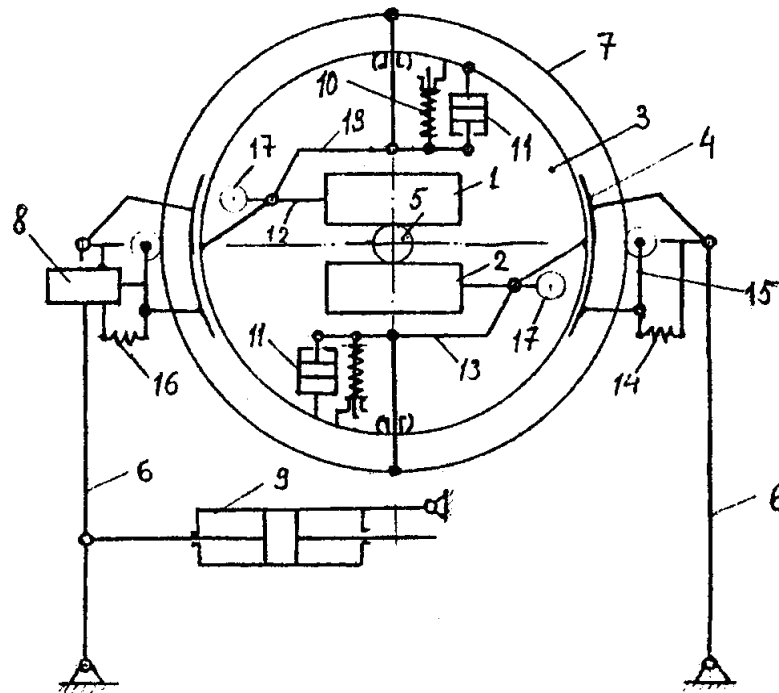
ზემოაღნიშნული მიგვითითებს მიმყოლი სისტემათა ჯაჭვებში ჰიდრავლიკური მოწყობილობების გამოყენების მიზანშეწონილობაზე. ამ მიმართულებით უკვე განხილული რთულპროფილიანი დეტალების დამამუშავებელი ჩარხების ბაზაზე შემუშავებულია ჰიდრავლიკური მოთვალთვალე ამძრავებით აღჭურვილი მაკოპირებელი ჩარხები [106, 110].

ჰიდროამძრავის გამოყენება განპირობებულია მაღალი საიმედოობითა და სწრაფქმედებით, შესაბამისად კომპონირებადი თვისებებით, გადაადგილებების განხორციელების სიმარტივით და ასევე ძალებისა და სიჩქარის რეგულირების სიმარტივით და ვრცელი დიაპაზონით, აუცილებელი გაჩერებების შესაძლებლობის სიმარტივით, სტანდარტული კვანძებისა და ელემენტების ანაწყობების გამოყენებით და მათი კომპანებისათვის გარდაუვალი ლოგიკური სქემების შემოტანის სიმარტივით [111-115].

ნახ. 2-ზე მოცემულია ჰიდრავლიკური ამძრავებით აღჭურვილი ჩარხის კინემატიკური სქემა.

ჩარხის ძირითადი ელემენტებია: სახეხი ცილინდრები 1 და 2, ბარბაცა 4 და მბრუნავი როტორი 3, რომლებიც ერთად წარმოადგენენ პარალელოგრამს:

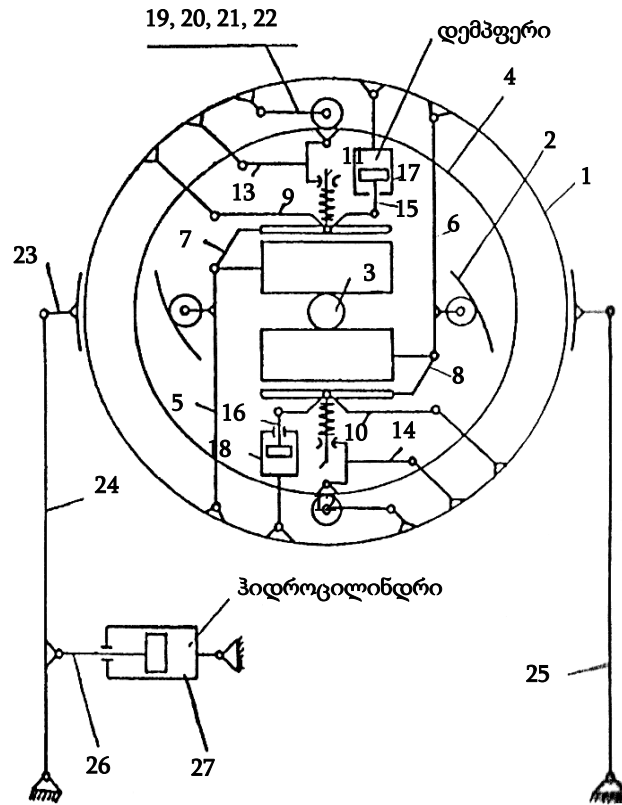
მოთვალთვალე რგოლი 7, ზეთის ხაზებით დაკავშირებული მმართველი ოთხხერელიანი მკვეთარა 8 და ძალოვანი ჰიდროცილინდრი.



ნახ. 2. მაკოპირებელი ჩარხის კინემატიკური სქემა

სახეხი პნევმოცილინდრები 1 და 2 მათ მხრეულებთან 13 ერთად გაწონასწორებულნი არიან საპირწონებით 17. მკვეთარა 8 დაყენებულია პარალელოგრამის ბარბაცზე. პნევმოცილინდრები სახსრულად არიან დამონტაჟებულნი ჩარხის როტორზე და დაზამბარებულნი შეკუმშვის ზამბარებით 10. დემპფერებით 11 ხორციელდება აღძრული რხევების ჩახშობა დამუშავების პროცესში. დეტალის 5 მრუდწირული ზედაპირის ხეხვა წარმოებს შემდეგნაირად: როტორის ბრუნვისას ნამზადის 5 მრუდწირული კონტური ზემოქმედებს სახეხ პნევმოცილინდრებზე. ისინი გადაადგილდებიან როტორის ღერძის მიმართ, გადაადგილებენ მხრეულებით 12, 13 ბერკეტებით, 14, 15 და 16 ზამბარების მეშვეობით და დაზამბარებულ რგოლს 7. მოთვალთვალე რგოლის 7 გადაადგილება გადაეცემა მკვეთარას 8, რომელიც მართავს ნამზადის გალუნული ღერძის მიმართულებით როტორის მიმყოლი მოძრაობების განმახორციელებელ ჰიდროცილინდრს 9 დგუმს.

აღწერილი ჩარხის შემდგომი ფუნქციონალური სრულყოფის თვალსაზრისით შემოთავაზებულია მრუდწირულ-ფასონური დეტალების დამუშავებული ჰიდროფიცირებული სახეები ჩარხი, რომლის კინემატიკური სქემა მოყვანილია ნახაზი 3 [116–117].



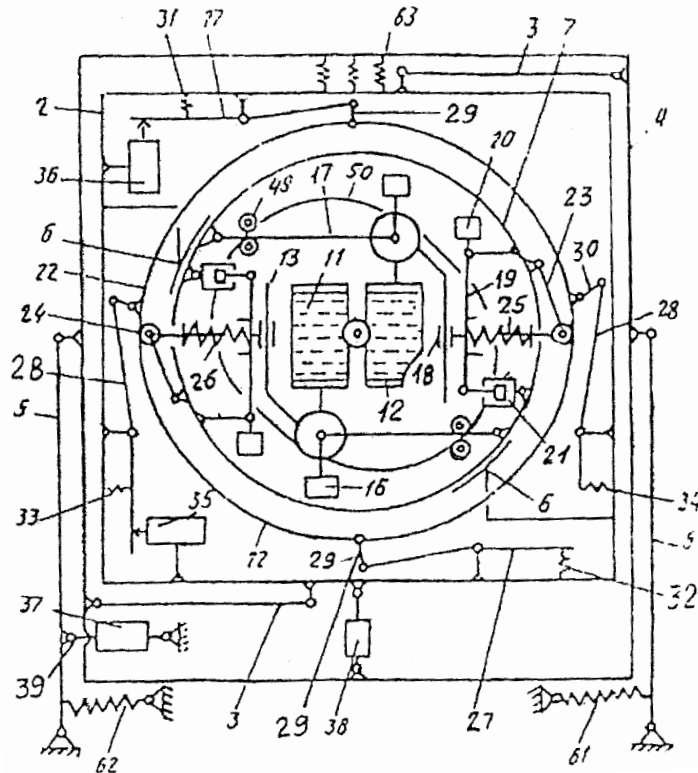
ნახ. 3. ჰიდრომთვალთვალე მექანიზმის სქემა ბრტყელმრუდწირულ ფასონური დეტალებისათვის

ნახ. 3: 1 – ჩარხის როტორი, 2 – სახეები პნევმოცილინდრების გადაადგილებების მუშტა მექანიზმი, 5 და 6 – სახეები ცილინდრების მხრეულები, 4 – სპეციალური რგოლი სახსრულად დაკიდულია ჩარხის როტორზე ბერკეტული მექანიზმების 13, 14, 19 - 22 მეშვეობით, 23, 24 და 25 – მქნევარები. რგოლი 4 ბერკეტული გადაცემის მეშვეობით ჰორიზონტალური მიმართულებით ზემოქმედებს მოთვალთვალე მკვეთარაზე. ეს მკვეთარები ზეთსადენებით დაკავშირებულია ჰიდრაულიკურ ცილინდრთან 27 და მხრეულთან 24. 17 და 18 კი სახეები ცილინდრების რხევების ჩასახშობი დემპფერებია.

განხილული მაკოპირებელი სისტემების შემდგომი განვითარების შესაბამისად შემუშავებულია სამკოორდინატიანი მაკოპირებელი სისტემა,

რომელიც გამიზნულია სიბრტყეში გაღუნული მრუდწირულ-ფასონური ზედაპირების ხეხვით დამუშავების განხორციელებისათვის [117].

ნახ. 4-ზე მოყვანილია ჩარხის სქემა აქსონომეტრიაში, ხოლო ნახ. 5-ზე – ჩარხის სქემა წინხედში.



ნახ. 4. სამკოორდინატიანი კოპირების საჩარხო სისტემის კინემატიკური სქემა

ჩარხი შემადგენელი ნაწილები შემდეგია: ტრანსპორტიორები 1, შიგა 2 და გარე 4 ჩაკეტილ ოთხრგოლები. შიგა ოთხრგოლა 3 მხრეულებით დაკავშირებულია სახრულად გარე ოთხრგოლასთან 4. უკანასკნელის მხრეულები 5 სახრულად უკავშირდებიან სადგარს. შიგა ოთხრგოლაზე მიმმართველებში 6 ჩამონტაჟებულია როტორი 7 და მასზედ თავისუფლად დასმული კბილა თვალი 8. თვალი 8 მოდებამია კბილა თვალთან 9. თვალი 9 დაყენებულია ლილვზე 10. როტორი ზიდავს ორ სახეხ 11 და 12 ცილინდრებს, მათი ღერძები დაყენებულია 13 შტანგების საკისრებში და ამოძრავებენ მათზე დამაგრებულ კბილანებს 14. 13 შტანგები მიერთებული

არიან ლილვების 15 ღერძებთან, 11 და 12 სახეხი ცილინდრების გასაწონასწორებლად გამოყენებულია ტვირთები 16. 15 ლილვები დამონტაჟებულია მოქანავე ჩარჩოებზე 17. 13 შტანგები შედიან მილისებში 18 და სახსრულად უერთდებიან ბერკეტებს 19, რომლებიც გაწონასწორებული არიან საპირწონეთი 20. ბერკეტები 19, დემფერების 21 საშუალებით, სახსრულად არის დაკავშირებული როტორთან.

მმართველი რგოლი 22 კონტაქტშია ორი ერთმანეთის მიმართულებით პერპენდიკულარულად დამონტაჟებულ მხრეულებზე 23 დაყენებულ გორგოლაჭებთან 24. მმართველ რგოლს 22 და გორგოლაჭებს 24 შორის კონტაქტი ხორციელდება 23 მხრეულებთან სახსრულად ჩამაგრებულ კოჭებზე 25 ჩამოცმული სარეგულირებელი 26 ზამბარების დახმარებით, რომლებიც თავის მხრივ ეყრდნობიან ბერკეტებს 19.

მმართველი რგოლი 22 დაკავშირებულია სახსრულად შიგა ოთხრგოლაზე დაყენებულ ჰორიზონტალურ და ვერტიკალურ 27, 28, 29 და 30 27 და 28 მხრეულები აღჭურვილი არიან ზამბარებით 31, 32, 33 და 34. ამასთან, ორი (27 და 28 ზამბარებით) კონტაქტშია შიგა ოთხრგოლაზე დამონტაჟებულ ჰიდრაულიკურ მკვეთარებთან 35 და 36 მანაწილებლებთან. მკვეთარებიანი მანაწილებლები 35 და 36 დაკავშირებულია ჰიდროცილინდრებთან 37 და 38. ეს ჰიდროცილინდრები კი სახსრულად არიან დაყენებულნი სადგარზე და გარე ოთხრგოლაზე, ჭოკები 39 და 40 სახსრულად უერთდებიან გარე და შიგა ოთხრგოლას 5 და 2 მხრეულებს.

სახეხი პნევმოცილინდრების ლილვებზე 11 და 12 დაყენებული კონუსური კბილანები 14 მოდებაში არიან ლილვზე 15 ხისტად დასმულ კბილანებთან 41. ამ ლილვებზე აგრეთვე, დასმულია კბილანები 42, რომლებიც მოდებაში არიან კონუსურ კბილანებთან 43. ეს უკანასკნელები კი ხისტად არიან დასმულნი ლილვებზე 44. ამავე ლილვებზე 44 ხისტად დასმულია აგრეთვე კონუსური კბილანები 45, რომლებიც მოდებაში არიან ლილვებზე 10 დასმულ კბილანებთან 46. მოქანავე ჩარჩოებს 17 აქვთ საბიძგებლები და 47, ორი გორგოლაჭი 49 შემოგორდება 50 მუშტას

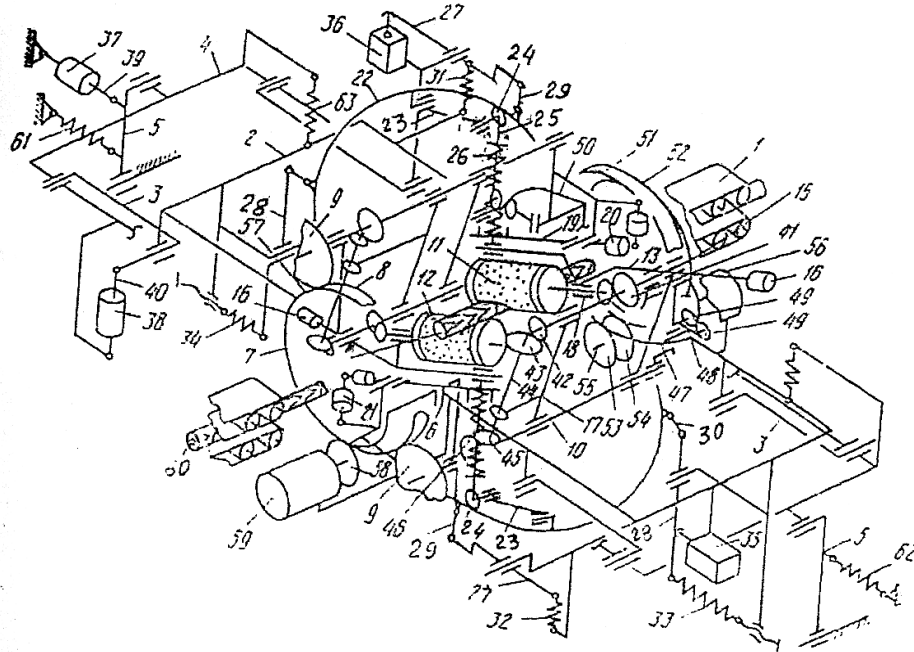
ფერსოზე. უკანასკნელი ხისტადაა მიერთებული როტორზე 7 დაყენებულ კბილათვალთან 51. უკანასკნელის კბილთა რიცხვი 1 ან 2 კბილით ნაკლებია 52 კბილთა რიცხვისა. კბილანა თვლები 51 და 52 მოდებაში არიან 53 და 54 კბილანებთან, რომლებიც ხისტადაა დასმული შიგა ოთხრგოლაზე 2 დაყენებულ ლილვზე 55. უკანასკნელი ბრუნვით მოძრაობას მიიღებს ჰიდროამძრავიდან 56. როტორზე დამაგრებული კბილანათვალი 57 მოდებაშია 58 კბილა თვალთან, რომელიც დასმულია 59 ლილვზე. დასამუშავებელი ნამზადი 60 მოთავსებულია 11 და 12 სახეხ ცილინდრებს შორის. გარდა ჰიდროცილინდრებისა 37 და 38 ურთიერთკავშირი ოთხრგოლებს 2, 4 შორის აგრეთვე ხორციელდება, მათზე მიერთებული ზამზარებით 63. ანალოგიურად ზამზარების 61 და 62 საშუალებით მხრეულები 5 ურთიერთდაკავშირებულნი არიან სადგართან.

ჩარხის მუშაობა ხორციელდება შემდეგნაირად: დასამუშავებელი ნამზადი 60 მიეწოდება ტრანსპორტიორებში 1, რომლებიც გადაადგილებენ მას სახეხ პნევმოცილინდრებს შორის ღრიჭოში. სახეხი პნევმოცილინდრები ბრუნავენ თავისი ღერძების გარშემო და ასევე როტორთან ერთად დეტალის გარშემო. სახეხი ცილინდრების ბრუნვითი მოძრაობა ხორციელდება ორი ჯაჭვის მიხედვით: ა) 59 ჰიდროამძრავიდან ჯაჭვით 58-57-8-9-46-45-43-42-41-14;

ბ) 56 ჰიდროამძრავიდან – გადაცემა 54 - 52, როტორი და კბილანები 9 ერთად შემოგორდებიან კბილა-კბილანაზე 8 და შემდეგ ბრუნვითი მოძრაობა ჯაჭვით 9-46-45-43-42-41-14. განხილულ სქემაში კბილანები 9 წარმოადგენენ დიფერენციალური მექანიზმის ნაწილებს, რომლებზედაც ცენტრალური თვალიდან 8 და როტორის სატარისაგან ხორციელდება – როტორზე დამაგრებული 52 კბილათვლით მიწოდებული მოძრაობების შეჯამება.

ბრუნვითი მოძრაობების გარდა სახეხი პნევმოცილინდრები, აგრეთვე ასრულებენ უკუქცევით-წინსვლით მოძრაობებს და სათანადოდ, ეს ხდება ჩარჩოების 17 ქანაობით სახეხ ცილინდრებთან ერთად. ქანაობა კი

ხორციელდება მუშტას 50-თან ერთად საბიძგებლების 47 საშუალებით. მუშტას პროფილი უზრუნველყოფს საბიძგებლებისა და სახეხი ცილინდრების თანაბარ ქანაობას. მუშტას ბრუნვას როტორის მიმართ ახორციელებს 51 და 52 კბილათვლები.



ნახ. 5. მაკოპირებელი ჩარხის სივრცითი კინემატიკური სქემა

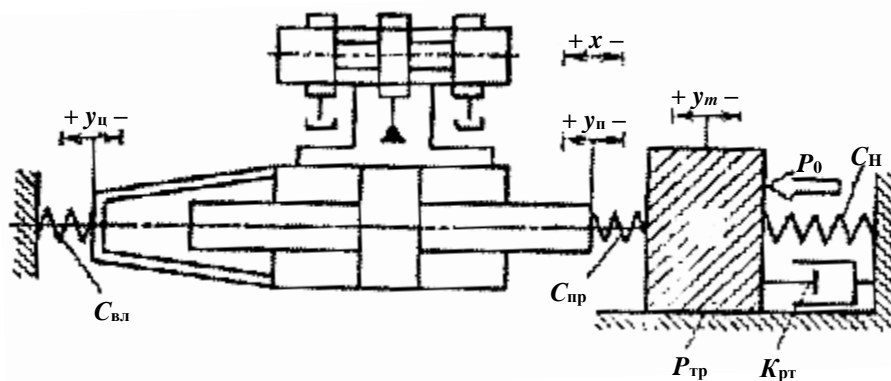
ნამზადზე სახეხი ცილინდრების საჭირო მიჭერის ძალა განხორციელებულია მათში დაჭირხნული ჰაერის წნევით და 26 სარეგულირებელი ზამბარების ძალით. ტვირთებით 16 და 20 ხორციელდება სახეხი ცილინდრების და ბერკეტების დაბალანსება. 21 დემპფერების სქემაში ჩართვა მიმართულია სახეხი ცილინდრების და მმართველი რგოლის 22 არსებული რხევების შემცირებისაკენ.

სწორხაზოვანი სიმეტრიული ცვლადი კვეთის მქონე დეტალის დამუშავებისას, მიწოდება ხდება სახეხ პნევმოცილინდრებს შორის ღრიჭოში და თანაბრად გადაადგილებს მათ როტორის ღერძის მიმართ. ტოლი სიდიდით გადაიხრებიან მილისები 18, ბერკეტები 19, რადგანაც ერთნაირი სიდიდით მოქმედებენ ზამბარებზე 26. თავის მხრივ, მხრეულები 27, 28 და მიმართველი რგოლი 22, როტორის ღერძის მიმართ რადიალური მიმართულებით რჩებიან უძრავ მდგომარეობაში.

ამასთან ერთად, განხილული ჩარხის გამოყენება საშუალებას იძლევა ხის სივრცითი მრუდწირული ღერძის მქონე, რთულპროფილიანი დეტალების ხეხვის დამუშავების დროს განხორციელდეს როტორის ღერძის ორკოორდინატიანი მიყოლა ნამზადების ღერძის მიმართ.

2.2. ჰიდრავლიკური და ელექტროჰიდრავლიკური ამძრავების მოდელების და გარდამავალი პროცესების ხარისხობრივი ანალიზი

როგორც ცნობილია ჰიდრავლიკური ამძრავის ძირითად ელემენტებს მიეკუთვნებიან ჰიდრავლიკური მკვეთარა და ჰიდროცილინდრი. წარმოდგენილი სისტემის ფუნქციონალური და სტრუქტურული მეთოდების შესაბამისი ანალიზის თვალსაზრისით. ნახ. 6-ზე მოყვანილია მუდმივი წნევის წყაროდან $p_{II} - p_H - p_{cII} = const$ მომუშავე დროსელური რეგულირების ჰიდროამძრავი [3, 83]. სქემაზე ნაჩვენებია p_n , p_H და p_{cII} - მკვებავი ტუმბოდან მიწოდებული სითხის წნევა, დატვირთვით გამოწვეული და ცილინდრიდან გამავალი სითხის წნევებია.



ნახ. 6. დროსელური რეგულირების ჰიდროამძრავი

ნახაზზე ნაჩვენებია არაა კვების სისტემა. ასეთი ჰიდროამძრავის მახასიათებლები განისაზღვრება ჰიდროგამანაწილებლისა და ჰიდროცილინდრის პარამეტრებით, დატვირთვის სახით, მილგაყვანილობის და საყრდენის სიხისტით. ჰიდროცილინდრზე მოქმედებენ: ძალა $P_m = m \frac{dy^2}{dt^2}$ -

გამოწვეული დატვირთვის მასის აჩქარებით. ძალა $P_y = k_{py} \frac{dy}{dt}$ - გამოწვეულია ბლანტი ხახუნით, დატვირთვის სიხისტით $P_c = c_n y$ - გამოწვეული ძალები; კონტაქტური ხახუნის ძალა $P_{TP} = |P_{TP}| \operatorname{sgn} \frac{dy}{dt}$ და მუდმივი ძალა P_0 .

ძალები P_y და P_{TP} მიმართულია ჭოკის მოძრაობის საწინააღმდეგოდ. P_c და P_0 ძალები ამავე სახით შესაძლოა მიმართულნი იყვნენ სხვადასხვა მიმართულებით და უკანასკნელნი მოცემულ განტოლებებში აღნიშნული არიან შესაბამისი ნიშნით.

ჰიდროამძრავის რომ შეირჩეს და შეფასდეს შესაბამისად განიხილება სტატიკური, ენერგეტიკული და დინამიკური მახასიათებლები.

თუ განხილვადი ჰიდროამძრავი შეიცავს ოთხხვრელიან იდეალურ მკვეთარას და ორმხრივ ჭოკიან ჰიდროცილინდრს, დგუშის თანატოლი ეფექტური ფართით f_n , მაშინ განხილვადი სისტემის სტატიკური მახასიათებლების განტოლება გამოისახება ასე [3, 74]:

$$v_y = \frac{\mu b x}{f_{\Pi}} \sqrt{\frac{P_{\Pi} - \operatorname{sgn} x \frac{P_y}{f_{\Pi}}}{\rho}} = x k_{v_x} \sqrt{1 - \operatorname{sgn} x \frac{P_y}{f_{\Pi}}}. \quad (15)$$

რომელშიც: v_y – ჭოკის სიჩქარე;

P_y – მოქმედი გარე ძალა.

განტოლებაში შეყვანილია სიჩქარის მახასიათებელის კოეფიციენტი:

$$k_{v_x} = \frac{\mu b}{f_{\Pi}} \sqrt{\frac{P_{\Pi}}{\rho}},$$

იგი უქმი სვლის რეჟიმში ახასიათებს დგუშის სიჩქარეს მკვეთარას გადაადგილებასთან.

განტოლება (15) შეიძლება წარმოდგენილი იყოს განზომილების გარეშე

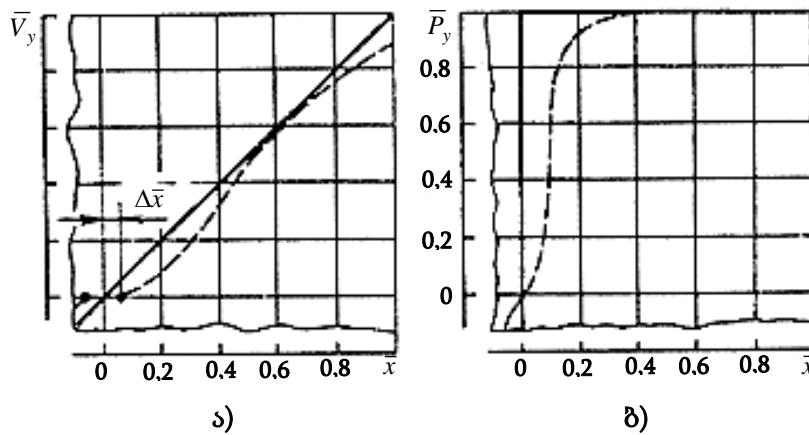
$$v_y = \bar{x} \sqrt{1 - \operatorname{sgn} \bar{x} \bar{P}_y}. \quad (16)$$

ჭოკზე მოქმედი განზომილის გარეშე ძალა, გამოითვლება ასე:

$$\bar{P}_y = \frac{\bar{P}_y}{f_{\Pi} P_{\Pi}}$$

ამრიგად, მახასიათებლის გადახრა დამოკიდებულია ჰიდროცილინდრის ჭოკზე მოქმედი ძალის სიდიდეზე და ნიშანზე.

ეს დამოკიდებულება ანალოგიურია იდეალური მკვეთარიანი დროსელირებადი ჰიდროგამანაწილებლის ნახ. 7 -ზე მოცემული განზოგადებული სტატიკური მახასიათებლისა.



ნახ. 7. მუდმივი წნევის კვების წყაროიანი ჰიდროამძრავის სტატიკური მახასიათებლები

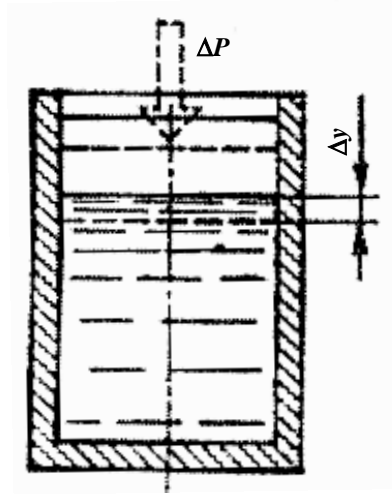
იდეალურ ჰიდროამძრავში (ჰიდროგამანაწილებელში და ჰიდროცილინდრში ხახუნის ძალა უდრის 0) სიჩქარის მახასიათებელი გამოსახულია (ნახ. 7, ა), უწყვეტი ხაზით. რეალურ ამძრავში (ნახ. 7, ა) წყვეტილი ხაზით გამოსახება კონტაქტური ხახუნი. მკვეთარასა და მისი მასრას შორის არსებული ღრეჩოს გამო სიჩქარითი მახასიათებელი გამოსახება მდორე მრუდის სახით. $\Delta \bar{x}$ სიდიდე განსაზღვრავს რეალური ჰიდროამძრავის სიჩქარითი მახასიათებლის არამგრძნობელობის ზონას. თუ მე-16-ე ფორმულაში \bar{v}_y სიჩქარეს გავუტოლებთ ნულს, მივიღებთ შესაბამის ამძრავის ძალოვანი მახასიათებლის იდეალურ განტოლებას

$$\operatorname{sgn} \bar{x} \bar{P}_y = 1.$$

იდეალური და რეალური ჰიდროამძრავების ძალოვანი მახასიათებლები (შესაბამისად უწყვეტი და წყვეტილი ხაზებით) ნაჩვენებია (ნახ. 7, ა, ბ). მახასიათებლის ძალოვანი დახრილობა განპირობებულია ვარდნილი

მახასიათებლის სახით ე. ი. მკვეთარას და მასრას შორისი ღრეჩოს სიდიდით. აღსანიშნავია, რომ სიჩქარის პროპორციული მართვის ამძრავებში გამოყენება ერთოჭიანი ჰიდროცილინდრები.

საკვლევი სისტემის დინამიკის განხილვა მოითხოვს მუშა სითხის კუმშვადობის გათვალისწინებას. კუმშვადობას განაპირობებს ჰიდრავლიკური სიხისტე. აღნიშნულის განსახორციელებლად ნახ. 8-ზე განხილულია მარტივი ჰიდროცილინდრის სქემა.



ნახ. 8. მარტივი ცილინდრის სქემა

ჰიდროცილინდრი შედგება აბსოლუტურად ხისტი V კედლიანი ცილინდრისა და მასზე მორგებული დგუმისაგან. ცილინდრის მუშა მოცულობა შევსებულია დრეკადი სითხით და აირით. მაშინ როდესაც დგუმზე იმოქმედებს ძალა ΔP , როცა სითხის და აირის დრეკადობის გამო დგუმში გადაადგილდება Δy სიდიდით, ამიტომაც დრეკადობის მოცულობითი მოდული განისაზღვრება ასე

$$E = \frac{V\Delta P}{\Delta V},$$

სადაც, f_n – დგუმის ფართია.

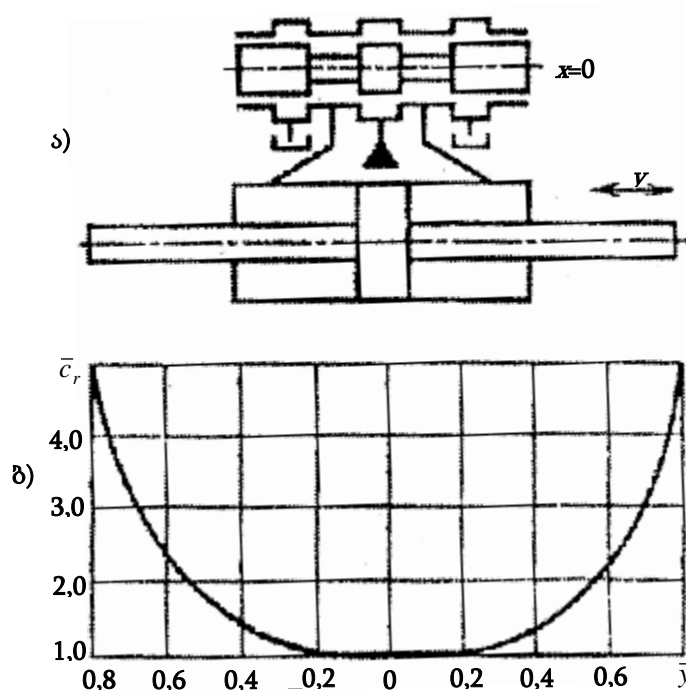
ამ შემთხვევაში, როდესაც $\Delta p = \frac{\Delta P}{f_n}$ და $\Delta V = f_n \Delta y$

$$E = \frac{V\Delta P}{f_n^2 \Delta y} \text{ ან } \frac{\Delta P}{\Delta y} = \frac{E f_n^2}{V}.$$

აღნიშნულთან დაკავშირებით მარტივი ჰიდროცილინდრის ჰიდრავლიკური სიხისტე განისაზღვრება ასეთნაირად:

$$C_3^1 = \frac{E f_{II}^2}{V} . \quad (17)$$

ვიხილავთ ორმხრივჭოკიან ჰიდროცილინდრს, რომელიც მიერთებულია (ნახ. 9) ოთხხვრელიან ჰიდროგამანაწილებელთან და მისი მკვეთარა შესაბამისად იმყოფება ნეიტრალურ მდგომარეობაში. იმ შემთხვევაში, როდესაც ღერძული გადახურვები და ოთხივე სარკმლის სიგანეები ერთნაირია, ჰიდროცილინდრის მუშა არეებში წნევა ტოლია P_0 -ის და მიახლოებით უდრის კვების წნევის ნახევარს. სითხე კი იმყოფება შეკუმშულ მდგომარეობაში.



ნახ. 9. ა) მკვეთარა გამანაწილებლიანი ჰიდროცილინდი;
ბ) ჰიდრავლიკური სიხისტის გამოკიდებულია დგუშის გადაადგილებასთან

ჰიდრავლიკური ცილინდრის მარცხენა მხარეს მდებარე კამერის სიხისტე ფორმულა (17)-ის თანახმად უდრის $C_{31} = \frac{E f_{II}^2}{V_1}$, მარჯვენა მუშა

კამერის კი გამოისახება ასე - $C_{32} = \frac{E f_{II}^2}{V_2}$.

ორმხრივკოჭიანი ჰიდროცილინდრის ჰიდრავლიკური სიხისტე იქნება მარცხენა და მარჯვენა კამერების სიხისტის ჯამის ტოლი

$$C_{\text{ჰ}} = C_{\text{ჰ1}} + C_{\text{ჰ2}} = \frac{Ef_{\text{II}}^2}{V_1} + \frac{Ef_{\text{II}}^2}{V_2} = Ef_{\text{II}}^2 \left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} \right).$$

გათვალისწინებით, იმისა, რომ მუშა კამერების მოცულობები შესაბამისად ჩაიწერება ასე და უდრის:

$$V_1 = (y_{\text{ბეჰ}} - y)f_{\text{II}}; \quad V_2 = (y_{\text{ბეჰ}} - y)f_{\text{II}}.$$

ჰიდროცილინდრის ჯამური სიხისტე გამოისახება ასე:

$$C_{\text{ჰ}} = Ef_{\text{II}}^2 \left[\frac{1}{(y_{\text{ბეჰ}} - y)f_{\text{II}}} + \frac{1}{(y_{\text{ბეჰ}} - y)f_{\text{II}}} \right]. \quad (18)$$

აღნიშნულის შესაბამისად, ჰიდროცილინდრის ჯამური სიხისტე დამოკიდებულია როგორც დრეკადობის მოდულზე E , ასევე დგუმის y -ის ადგილმდებარეობაზე. ჰიდრავლიკური სიხისტე მინიმალურია, მაშინ, როდესაც $y = 0$, ე. ი. დგუმი იმყოფება ნეიტრალურ მდგომარეობაში.

აღნიშნულ შემთხვევაში

$$V_1 = V_2 = C_0 = f_n y_{\text{ბეჰ}}.$$

ამიტომ ჰიდროცილინდრის უმცირესი ჰიდრავლიკური სიხისტე გამოისახება დამოკიდებულებით

$$C_{\text{ჰ}} = \frac{2Ef_{\text{II}}^2}{V_0}. \quad (19)$$

უგანზომილო ჰიდრავლიკური სიხისტის სიდიდე მიიღება (18)-ის გაყოფით (19)-ზე:

$$\bar{C}_{\text{ჰ}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1+\bar{y}} + \frac{1}{1-\bar{y}} \right). \quad (20)$$

უგანზომილებო სიხისტის დამოკიდებულება დგუმის უგანზომილებო გადაადგილებასთან მოცემულია (ნახ. 9, ბ).

ამძრავის მუშაობაზე გავლენას ახდენენ მართვის ობიექტზე, ამძრავისა და საყრდენების სიხისტეზე მოქმედი ძალები.

ჭოკზე მოქმედი ჯამური ძალა განისაზღვრება ფორმულით:

$$P_y = P_m + P_{\dot{y}} + P_c + P_{TP} + P_0 ,$$

რომლის გაშლილი სახე ასეა მოცემული:

$$P_y = m \frac{d^2 y}{dt^2} + k_{py} \frac{dy}{dt} + c_H y + |P_{TP}| \operatorname{sgn} \frac{dy}{dt} + P_0 . \quad (21)$$

ჰიდროამძრავის სითხის ხარჯის განტოლება (ნახ. 7) ჩაიწერება ასეთი სახით (თუ $C_{0II} \rightarrow$ და $C_{IP} \rightarrow 0$))

$$\mu b x \sqrt{\frac{p_H - \operatorname{sgn} x p}{\rho}} = f \frac{dy}{dt} + \frac{V dp}{2 E dt} . \quad (22)$$

ტოლობა (22)-ის მარჯვენა გამოსახულების პირველი წევრი ასახავს დღუმის გადასადგილებლად საჭირო ხარჯს, შესაბამისად მეორე წევრი კიდევ განსაზღვრავს ხარჯს, რომელიც განპირობებულია სითხის კუმშვადობით.

წნევების განტოლება განისაზღვრება ასე:

$$P = \frac{P_y}{f_{II}} . \quad (23)$$

ფორმულების (21), (22) და (23) ერთობლივი გათვალისწინებით (19)-ს მივიღებთ:

$$\frac{\mu b}{f_{II}} \sqrt{\frac{p_{II}}{f_{II}}} = k_{lx} \quad \text{და} \quad \frac{k_{pQ}}{f_{II}} = k_{pv} .$$

უკანასკნელის გათვალისწინებით დროსელური რეგულირების იდეალური ამძრავის დინამიკის განტოლება მიიღებს სახეს:

$$x k_{lx} c_{\beta} \sqrt{1 - \operatorname{sgn} x \frac{1}{f_{II} p_{II}}} \cdot \left(m \frac{d^2 y}{dt^2} + k_{py} \frac{dy}{dt} + c_H y + |P_{TP}| \operatorname{sgn} x \frac{dy}{dt} + P_0 \right) = \\ - m \frac{d^3 y}{dt^3} + k_{pv} \frac{d^2 y}{dt^2} + (C_{\beta} + C_H) \frac{dy}{dt} + \frac{d}{dt} \left(|P_{TP}| \operatorname{sgn} x \frac{dy}{dt} \right) + P_0 . \quad (24)$$

როგორც ეს უკვე ცნობილია, რეგულირების ჰიდრავლიკური და ელექტროჰიდრავლიკური სისტემები მიეკუთვნება რთულ არაწრფივებს. მრავალკასკადიანი ამძრავების ჰიდრო და ჰიდრომექანიკური ნაწილების არაწრფივობებთან ერთად, როგორც წესი მოიცავენ, აგრეთვე ელექტრომექანიკური მამლიერებლების და მაკორექტირებლის რგოლების

არაწრფივობებს. გარკვეული მიახლოებებით შეგვიძლია განვიხილოთ სისტემები, რომლებშიც მოიცავენ არაწრფივობებს მხოლოდ ძალოვანი კასკადის განტოლებებში.

ზემოაღნიშნულის გათვალისწინებით ძალოვანი ოთხხვერელიანი მკვეთარა მოთვალთვალე სისტემის დინამიკა შეიძლება განხილული იყოს შემდეგნაირად:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= h\dot{x} + k_{\text{sc}}\dot{x} + \frac{d}{dt} \left[P_{mp} \text{sign}\dot{x} \right] = k_{\text{sc}} F_f(p_n; F; x_{bx}; x; \dots); \\ T_i x_{1i} + x_{1i} &= f_{1i}(k_i; x; x_{1i}; x_{2i}; \dots); \\ T_1^2 \ddot{x}_{2j} + T_{2j} \dot{x}_{2j} &= f_{2j}(k_{1j}; x; x_{2j}; x_{1i} l \dots), \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

რომელშიდაც, $i = 1, 2, 3, \dots; j = 1, 2, 3, \dots;$

x_{sc} – შემავალი ზემოქმედებაა; x – ძალოვანი ჰიდროცილინდრის დეფორმაციის გადაადგილებებია; m – ჰიდროცილინდრის მოძრავ ელემენტზე დაყვანილი ამძრავის მოძრავი ნაწილების მასაა.

P – ტუმბოდან მკვეთარაში შემავალი სითხის წნევაა; p_{mp} – მშრალი ხახუნის ძალაა; F – ჰიდროცილინდრის დეფორმაციის ძალაა; k, k_{sc} ბლანტი ხახუნის და სიხისტის კოეფიციენტებია; k_v – ს გაძლიერების კოეფიციენტები სიჩქარის მიმართ: T_{1i}, T_{1j}, T_{2j} – დროის მუდმივები მმართველი კასკადების ელემენტებში; k_{1i}, k_{2j} – მმართველი რგოლების გაძლიერების კოეფიციენტები; x_{1j}, x_{2j} – გამომავალი კოორდინატები; f_{1i}, f_{2j} – წრფივი პოლინომები შესაბამისი არგუმენტების მიმართ:

$$k_{\text{sc}} = \frac{1}{\frac{H}{4E_y \cdot F} + \frac{K_{mp}}{4F^2} + \frac{K_{mp}}{4}}; \quad K_{mp} = \frac{f \cdot l_{mp}}{E_{mp}};$$

H – დეფორმაციის სვლის სიგრძე; E_y და E_{mp} – სითხისა და ჰიდროცილინდრის დრეკადობის მოდულები; f – მკვეთარის გავლით ჰიდროცილინდრში შემავალი მილსადენის მუშა კვეთის ფართი; l_{mp} – მილსადენის სიგრძე; $F_f(p_n; F; x_{bx}; x; \dots)$ ძალოვანი ნაწილის ოთხხვერელიანი მიმყოლი მკვეთარის ხარჯვითი მახასიათებლის არაწრფივი ფუნქცია.

აღვნიშნავთ, რომ სისტემა რომელიც გამოსახულია (25) -ის სახით, სამართლიანია

$$t > 0 \text{ და } \frac{\dot{x}_{n+\tau}}{\dot{x}_{i-\tau}} < 0$$

მნიშვნელობისას.

მაღალი სწრაფქმედებისა და მაღალმგრძნობელობის მიმყოლ ამძრავებში ძალოვანი ნაწილის მკვეთარები, როგორც წესი, ხასიათდებიან მცირე ღერძული გახსნილობებით. ასეთი მკვეთარებისათვის არაწრფივი ფუნქცია $F_f(p_n; F; x_{bx}; x; \dots)$ გამოსახება რთული დამოკიდებულებებით მკვეთარების პარამეტრებთან და სითხის მუშა წნევასთან მიმართებაში. მკვეთარების ასეთ შემთხვევაშიც კი, როდესაც მის საწყის მდებარეობაში ღერძული გახსნილობა უდრის ნულს, სითხის ხარჯი მაინც არ არის ნულოვანი. მცირე 150 მკმ ნაკლები გახსნილობის ზონა წარმოადგენს გარდამავალ არეს სითხის ლამინარულ და ტურბულენტურ მოძრაობათა რეჟიმებს შორის. მკვეთარებისათვის „ნულოვანი“ და მცირე გახსნილობითი სითხის ხარჯი ექვემდებარება ამ გარდამავალი არის კანონებს. შესაბამისად უფრო დიდი გახსნილობებისას ოთხხვერელიანი მკვეთარის ხარჯვითი მახასიათებელი გამოსახება კვადრატული ფუნქციონალური დამოკიდებულებით.

ამგვარად, მიღებული დაზუსტებული მიდგომით ფუნქცია $F_f(p_n; F; x_{bx}; x; \dots)$ გამოსახება განსხვავებული დამოკიდებულებებით $\varepsilon \leq 150$ მკმ და $\varepsilon > 150$ მკმ გახსნილობების შესაბამისად.

შემთხვევისათვის, როდესაც $\varepsilon < 0,15$ მმ და სითხის წნევის სხვაობა

$\frac{P}{P_n} \leq 60\%$. ნაშრომში [4] მიღებულია ემპირიული მახასიათებლები:

$$q = b \cdot 10^3 \cdot \left\{ \left[(4,6 + 0,044\varepsilon_0) - (1,15 + 0,0126\varepsilon_0) \frac{P}{P_n} - 1,2 \left(\frac{P}{P_n} \right)^2 \right] \varepsilon \sqrt{p_n} - (138,5 + 3,2\varepsilon_0) \frac{P}{\sqrt{P_n}} \right\}, \quad (26)$$

სადაც, ε_0 – საწყისი უარყოფითი გახსნილობაა; b – მუშა ხვერელის პერიმეტრია; p – წნევათა სხვაობაა ძალოვან ჰიდრომრავაში.

დამოკიდებულებაში (26) შემავალი სიდიდეების განზომილებებია:

b – სმ; q – ლ/წმ; და ε – მკმ; p და $p_n = \frac{\text{კმ}^d}{\text{სმ}^2}$.

წნევათა სხვაობა აღიწერება მარტივი ფორმით

$$q = b \cdot 10^3 \cdot \left\{ \left[(5,1 + 0,04\varepsilon_0) - (1,15 + 0,0126\varepsilon_0) \left| \frac{p}{p_n} \right| \sqrt{p_n} \cdot \varepsilon - (138,5 + 3,2\varepsilon_0) \frac{p}{\sqrt{p_n}} \right] \right\}. \quad (27)$$

შესაბამისად სიჩქარითი $F(p_n; \dots)$ მახასიათებლის გამოსახულებები გამოსახებიან ასეთნაირად:

$$F_f(p_n; \dots) = k'_1 \cdot k_v \cdot \varepsilon - k'_2 k_v \cdot \frac{p}{p_n} \varepsilon \cdot \text{sign} \varepsilon - \left(\frac{p}{p_n} \right)^2 \cdot \varepsilon - k'_3 \cdot k_v \cdot \frac{p}{p_n}, \quad (28)$$

$$F_f(p_n; \dots) = k'_{1n} \cdot k_v \varepsilon - k'_{2n} k_v \cdot \frac{p}{p_n} \varepsilon \cdot \text{sign} \varepsilon - k'_3 \cdot k_v \cdot \frac{p}{p_n}, \quad (29)$$

აქ $k_v = \frac{\mu_p \cdot b \sqrt{\frac{g}{\gamma}} \cdot p_n}{F}$ – ძალოვანი ნაწილის სიჩქარის გაძლიერების კოეფიციენტი; μ_p – ზეთის ხარჯის კოეფიციენტი მკვეთარის გამავალ კვეთში; g – დაჩქარება თავისუფალი ვარდნისა; γ – სითხის კვეთრი წონაა.

დამოკიდებულებებში (28) და (29) შემოტანილია შემდეგი აღნიშვნები:

$$\left. \begin{aligned} k'_1 &= \frac{(0,766 + 73,4 \cdot \varepsilon_0) \cdot 10^3}{\mu \sqrt{\frac{g}{\gamma}}}; \\ k'_2 &= \frac{(0,191 + 21 \cdot \varepsilon_0) \cdot 10^3}{\mu \sqrt{\frac{g}{\gamma}}}; \\ k'_{20} &= \frac{0,2 \cdot 10^3}{\mu_p \sqrt{\frac{g}{\gamma}}}; \\ k'_3 &= \frac{2,31 + 534 \cdot \varepsilon_0}{\mu_p \sqrt{\frac{g}{\gamma}}}; \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

$$\left. \begin{aligned} k'_{1n} &= \frac{(0,85 + 66,7 \cdot \varepsilon_0) \cdot 10^3}{\mu_p \sqrt{\frac{g}{\gamma}}}; \\ k'_{2n} &= \frac{(0,191 + 33,3 \cdot \varepsilon_0) \cdot 10^3}{\mu_p \sqrt{\frac{g}{\gamma}}}; \\ k'_3 &= \frac{2,31 + 534 \cdot \varepsilon_0}{\mu_p \sqrt{\frac{g}{\gamma}}}. \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

მცირე გადახრებისას ($\varepsilon < 0,03$ მმ) დამოკიდებულებაში (27) შეიძლება უგულვებელყოფილნი იქნან არაწრფივი წევრები. ამ შემთხვევაში:

$$F_f(p_n; x_{bx}; F; x; \dots) = k'_{1n} \cdot k_v \varepsilon - k'_3 k_v \cdot \frac{P}{p_n}. \quad (32)$$

ყველა ზემოთმოყვანილ გამოსახულებებში

$$F \cdot p = B_2 \ddot{x} + B_1 \dot{x} + |P_{mp}| \operatorname{sign} \dot{x} + R_H(t), \quad (33)$$

სადაც, გარე სასარგებლო დატვირთვის კოეფიციენტები B_1 და B_2 განისაზღვრებიან შესაბამისად ასე $B'_1 = h + B'_1 \cdot F$; $B'_2 = m + B'_2 \cdot F$; B'_1 – ითვალისწინებს სითხის სადენებში ხარჯის პროპორციულ ბლანტი ხახუნის დანაკარგებს; B'_2 – კი არის სითხის ინერციული დანაკარგების კოეფიციენტი მილსადენებში.

შემთხვევისათვის $\varepsilon > 0,15$ მმ სიჩქარითი მახასიათებლის განტოლება ჩაიწერება ასე:

$$F_f(p_n; \dots) = k_v \sqrt{1 - \frac{1}{p_n F} [B_2 \ddot{x} + B_1 \dot{x} + R(t) + |P_{mp}| \operatorname{sign} \dot{x}] \cdot \operatorname{sign} \varepsilon \cdot \varepsilon}. \quad (34)$$

მკვეთარებისათვის ოთხივე ღია ხვრელით, როდესაც $\varepsilon < \varepsilon_0$ სიჩქარით მახასიათებლის განტოლება ჩაიწერება ასე

$$\begin{aligned} F_f(p_n; \dots) &= k_v \sqrt{1 - \frac{1}{p_n F} [B_2 \ddot{x} + B_1 \dot{x} + R(t) + |P_{mp}| \operatorname{sign} \dot{x}] \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon) -} \\ &\quad - \sqrt{1 - \frac{1}{p_n F} [B_2 \ddot{x} + B_1 \dot{x} + R(t) + |P_{mp}| \operatorname{sign} \dot{x}] \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon)}. \end{aligned} \quad (35)$$

განტოლებათა სისტემის (24) ანალიზი გვიჩვენებს იმას, რომ სისტემის ძალოვანი ნაწილი შეიცავს რიგ არაწრფივობებს, რომლებიც მნიშვნელოვნად ართულებენ დინამიკური კვლევის საკითხებს.

იმპულსური ძალის $H(t) = \frac{d}{dt}[|P_{mp}| \cdot \text{sign}\dot{x}]$ მადემპფირებელი ზემოქმედება აღნიშნულია მრავალ ნაშრომში, კერძოდ [2, 4, 56] ნაშრომებში.

იმპულსური $H(t)$ ფუნქციის ანალიზი გვიჩვენებს [56] რომ, როდესაც $|P_{mp}| = \text{const}$ ფუნქცია ცალსახად არსებობს მარტოდმარტო რეგულირებადი კოორდინატის სიჩქარის $\dot{x}(t)$ ცვალებადობისა დროის მომენტებში $t_{0i} (i=1,2,3,\dots)$.

დროის ყველა განსხვავებულ მომენტებში, როცა $H(t) = 0$ -ს, შესაბამისად $H(t)$ ხასიათდება უბან-უბან უწყვეტი მახასიათებლით.

აღნიშნულიდან გამომდინარე $H(t)$ არაწრფივობასთან მიმართებით შემოგვაქვს განტოლებათა სისტემის ამოხსნის მეთოდოლოგია, რომელიც დაფუძნებულია გარკვეული საწყისი პირობების „შემოტანაზე“ დროის მომენტებში t_{0i} [2, 4, 56, 57].

ვითვალისწინებთ რა ხახუნის ძალის P_{mp} მოდულის მუდმივ მნიშვნელობას, შეგვიძლია ჩავწეროთ:

$$H(t) = \frac{d}{dt}[|P_{mp}| \text{sign}\dot{x}] = |P_{mp}| \cdot \text{sign}\dot{x} \cdot \frac{d}{dt}[1(t)] = \delta_*(t), \quad (36)$$

სადაც, $\delta(t)$ არის δ -ფუნქცია, რომელიც უდრის ნულს t_{0i} -ის ტოლ t დროის მომენტში და იღებს უსასრულების მნიშვნელობას $t = t_{0i}$ დროის მომენტებში. გასაგებია, რომ ასეთი ფორმით ფუნქცია $H(t)$ შეუძლებელია გათვალისწინებული იქნას განტოლებათა ინტეგრირების პროცესში. ამასთან დაკავშირებით δ -ფუნქციას უპირისპირებთ თანაბარი ფართის მართკუთხა ფუნქციას, რაც ეფუძნება δ -ფუნქციის ცნობილ თვისებას [2] თანახმად:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta_*(t) \cdot dt = 1.$$

მაშინ

$$\int \frac{d}{dt}[1(t)] \cdot dt = \psi(t) \cdot \Delta t_A = 1,$$

სადაც

$$\psi(t) = \psi, \quad t_a < t < t_\delta;$$

$$\psi(t) = 0, \quad t_a < t < t_\delta;$$

Δt_A – იმპულსის მოქმედების ხანგრძლივობის დრო; t_a – იმპულსის არსებობის დრო; t_δ – იმპულსის შეწყვეტის დროის მომენტი.

იმპულსის ხანგრძლივობას Δt_A ვირჩევთ მეტად უმნიშვნელო სიდიდით.

განხილვადი არაწრფივი ფუნქცია ჩაიწერება ასე [2]

$$\frac{d}{dt}[|P_{mp}| \operatorname{sign} \dot{x}] = 2|P_{mp}| \cdot \frac{d}{dt}[1(t)] = \psi(t) \cdot 2|P_{mp}|,$$

სადაც

$$\psi(t) = \frac{1}{\Delta t_A}. \quad (37)$$

ამის გათვალისწინებით უკანასკნელის ძალოვანი ნაწილის დინამიკის განტოლება ჩაიწერება ასე:

$$\ddot{x} + \frac{h}{m} \ddot{x} + \frac{k_{\text{жс}}}{m} \dot{x} - \frac{F_f(p_n; F; \dots)}{m} \varepsilon(t) = -\operatorname{sign} \dot{x} A, \quad (38)$$

რომელშიდაც

$$A = 2 \frac{|P_{mp}|}{m \cdot \Delta t_A}. \quad (39)$$

შესაბამისად, (38) განტოლების შედეგი დროის ინტერვალში $t_\delta < t_A < t$ დაიყვანება ამავე განტოლების მარჯვენა ნაწილის გარეშე ინტეგრირებაზე და Δt_A დროის ინტერვალში სრული განტოლების ინტეგრირებაზე. მოცემული მეთოდის ნაკლოვანებაა საკმარისი სირთულე, რომელიც გამოწვეულია იმით, რომ დროის ინტერვალში Δt_A ინტეგრირების ბიჯი საჭიროა იყოს რიგით ნაკლები Δt_A ინტერვალისა.

სტრუქტურის ანალიზიდან განტოლებათა სისტემა (25)-დან გამომდინარეობს, რომ $H(t)$ ფუნქცია ზემოქმედებს ძალოვანი ნაწილის

განტოლებაზე. გამომდინარე აღნიშნულიდან ძალოვანი ნაწილის გარეშე სხვა არაწრფივობების გათვალისწინების გარეშე მთლიანი სისტემის დინამიკა შეგვიძლია განვიხილოთ ასე:

$$\left. \begin{aligned} L_1(x) &= K_0 \cdot f_n(t) - |P_{mp}| \cdot \text{sign} \dot{x} \frac{d}{dt} 1(t) - K_T \cdot |P_{mp}| \cdot \text{sign} \dot{x}; \\ T_i \dot{x}_{1i} + x_{1i} &= f_{1i}; \\ T_{1j} \ddot{x}_{2j} + T_{2j} \dot{x}_{2j} + x_{2j} &= f_{2j}, \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

სადაც, $L_1(x)$ – წრფივი ოპერატორია და $f_n(t)$ – დროის τ მონაკვეთზე მიღებული წრფივი პოლინომი.

წრფივი სისტემის მიმართ ვახორციელებთ სუპერპოზიციის მეთოდს, ე.ი.

$$\left. \begin{aligned} L[x_r] &= K_T \cdot |P_{mp}| \cdot \text{sign} \dot{x} \\ L[x_\rho] &= K_n \cdot x_{bx}(t) \\ L[x_p] &= |P_{mp}| \cdot \text{sign} \dot{x} \cdot \frac{d}{dt} [1(t)], \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

აქ x_r , x_ρ და x_p – შესაბამისი ზემოქმედებების შესატყვისი ამონახსნებია.

თანახმად იმისა, რომ დროის მცირე მონაკვეთზე 2τ $f_{1i}(t) = const$ და $f_{2i}(t) = const$. ეს გვიჩვენებს, რომ კოორდინატები x_{1i} , x_{2j} , x და მათი წარმოებულები დროის τ მონაკვეთზე ფაქტობრივად არ განიცდიან არანაირი დონის ცვლილებებს. ასეთი მიდგომით განტოლებათა სისტემის (40) ანალიზი დროის τ მონაკვეთში შეიძლება შეიცვალოს ამძრავის ძალოვანი ნაწილის განტოლების შესაბამისი ანალიზით:

$$m\ddot{x} + d'_1 \dot{x} + d'_2 x - f_{n1}(t) = |P_{mp}| \cdot \text{sign} \frac{dx}{dt} \cdot \frac{d}{dt} [1(t)] \quad (42)$$

გვაქვს წრფივი განტოლება, რომლის მარჯვენა ნაწილი არის უბან-უბან უწყვეტი დროის ფუნქცია. ამ შემთხვევაში დგუშის ინტერვალების საზღვრებზე აჩქარებები არ ემთხვევიან ერთმანეთს. სხვაობის განსაზღვრისათვის ვახორციელებთ განტოლების (18) ინტეგრირებას საზღვრებში $(t_{0i} - \tau) \div (t_{0i} + \tau)$ [2]

$$m \left[\dot{x} \right]_{t_{0i}-\tau}^{t_{0i}} + d'_1 \left[x \right]_{t_{0i}-\tau}^{t_{0i}} + d'_2 \left[x \right]_{t_{0i}-\tau}^{t_{0i}} - \int_{t_{0i}-\tau}^{t_{0i}} f_{n1}(t) dt = |P_{mp}| \cdot \int_{t_{0i}-\tau}^{t_{0i}} \frac{d}{dt} [1(t)] dt; \quad (43)$$

$$m|\ddot{x}|_{t_{0i}}^{t_{0i+\tau}} + d'_1 \cdot \dot{x}|_{t_{0i}}^{t_{0i+\tau}} + d'_2 \cdot x|_{t_{0i}}^{t_{0i+\tau}} - \int_{t_{0i}}^{t_{0i+\tau}} f_{x1}(t) dt = dt = |P_{mp}| \cdot \int_{t_{0i}}^{t_{0i+\tau}} \frac{d}{dt} [1(t)] dt . \quad (44)$$

ინტეგრირების შედეგად ვიღებთ [56] აჩქარების ნახტომს

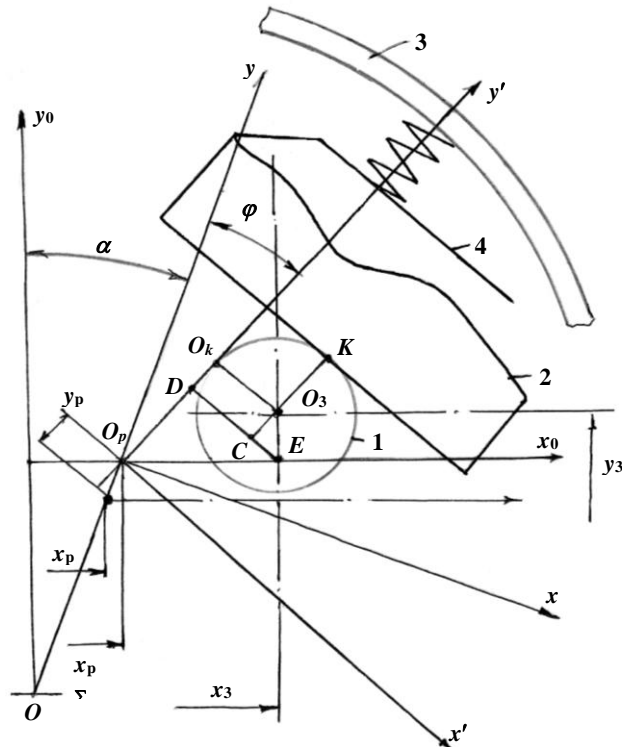
$$\Delta \ddot{x} = [\text{sign} \dot{x}]_{t_{0i+\tau}} \left[\int_{t_{0i-0}}^{t_{0i}} \delta_*(t - t_{0i}) dt + \int_{t_{0i}}^{t_{0i+0}} \delta_*(t - t_{0i}) dt \right] = 2 \frac{|P_{mp}|}{m} [\text{sign} \dot{x}]_{t_{0i+\tau}} . \quad (45)$$

2.3. მაკოპირებელი ჩარხის მრავალკონტურიანი მოთვალთვალე ამძრავის დინამიკური მოდელირება

2.3.1. მოთვალთვალე სისტემის დინამიკური მოდელირება სამკოორდინატო კოპირების რეჟიმში

განხილვადი მოთვალთვალე სისტემის დინამიკის მათემატიკური მოდელის აგებისათვის პირველ რიგში განვიხილავთ ჩარხის მუშა ორგანოების მოძრაობების ფარდობით მოძრაობათა კინემატიკას მაკოპირებელი მოძრაობების რეალიზაციის პროცესში.

აღნიშნულთან დაკავშირებით ნახ. 10-ზე წარმოდგენილია პნევმოცილინდრების, მმართველი რგოლისა და ჩარხის როტორის ფარდობითი მოძრაობის სქემა ნამზადის ღერძული გადაადგილების ვექტორის პერპენდიკულარულ სიბრტყეში [118].



ნახ. 10. ფარდობით მოძრაობათა კინემატიკის სქემა

ნახაზზე: 1 – დასამუშავებელი ნამზადი; 2 – სახეხი პნევმოცილინდრი; 3 – მოთვალთვალე რგოლი; O_p და O_3 – როტორის და ნამზადის ღერძების მიმდინარე მდებარეობა, რომლებიც შესაბამისად ხასიათდებიან კოორდინატებით O_p და O_3 უძრავ კოორდინატთა სისტემაში $O_0x_0y_0z_0$; O_k – რგოლის ღერძის მიმდინარე მდებარეობა; φ – როტორის ბრუნვითი მოძრაობის კუთხური კოორდინატი; α – კუთხური მოძრაობების კოორდინატი მხრეულისა, რომელიც ზიდავს გარე ბარბაცას მასზედ დამაგრებულ შიგა ბარბაცას და როტორს; 4 – მხრეული, კინემატიკურად დაკავშირებულია პნევმოცილინდრების რადიკალურ გადაადგილებებთან; 5 – ზამზარა კი დაყენებულია კინემატიკურ ჯაჭვში.

ნამზადის მიმდინარე ღერძი O_3 განისაზღვრება შესაბამისი კოორდინატებით x_3 და y_3 . როტორის ღერძის არსებული მდებარეობა კიდევ განისაზღვრება მიმდინარე კოორდინატით $x_{p\Sigma}$, რომელიც თავის მხრივ განისაზღვრება კუთხით α და მასთან შესაბამისი ხაზოვანი გადაადგილებით x_p გარე ბარბაცის საწყის ღერძული წერტილით O_{p1} და გადაადგილებით $y_p = O_p - O_{p1}$ შიგა ბარბაცას როტორთან ერთად.

მოცემულ შემთხვევაში მოთვალთვალე რგოლის გადაადგილება y' ღერძის მიმართ განისაზღვრება $O_k O_p$ მონაკვეთით (+) დამატებული ნამზადის რადიუსის მიმდინარე მნიშვნელობა.

პნევმოცილინდრის ნამზადთან კონტაქტის წერტილის მიმდინარე გადაადგილება y' კოორდინატთა ღერძის მიმართ განისაზღვრება დამოკიდებულებით

$$y_k = x_k |\sin \varphi| + r_3, \quad (46)$$

სადაც, $x_k - K$ წერტილის კოორდინატია და r_3 – ნამზადის კვეთის რადიუსია.

პნევმოცილინდრების ბრუნვის ცენტრების მდებარეობები განისაზღვრება დამოკიდებულებებით:

$$y_{ul} = x_{31} |\sin \varphi| - x_{p*} |\sin \varphi_*| + (y_{31} - y_{p*}) |\cos \varphi| (R - \delta_1) \cos \gamma_1 + r_{31} (x_{k1}); \quad (47)$$

$$y_{u2} = x_{32} |\sin \varphi| - x_{p^*} |\sin \varphi_*| - (y_{32} - y_{p^*}) \cos \varphi - (R - \delta_2) \cos \gamma_2 - r_3(x_{k2}), \quad (48)$$

სადაც, δ_1 და δ_2 – შესაბამისად პირველი და მეორე პნევმოცილინდრების მიმდინარე დეფორმაციებია; γ_1 და γ_2 – მხების დახრის კუთხეებია პირველი და მეორე პნევმოცილინდრების K_1 და K_2 კონტაქტის წერტილებში; x_{31} და x_{32} – ნამზადის ღერძის კოორდინატებია კონტაქტის წერტილებში; y_{u1} და y_{u2} – პნევმოცილინდრების ბრუნვის ცენტრების კოორდინატებია; R – პნევმოცილინდრის რადიუსია; $y_{p^*} = y_p \cos \alpha$; $\varphi_* = \alpha - \varphi$.

აქ x_{31} და x_{32} წარმოადგენენ ფუნქციებს

$$x_{31} = f(x_k) \quad \text{და} \quad x_{32} = f(x_k)$$

და თავის მხრივ ფუნქციით $r(x_k)$ განისაზღვრება ნამზადი კვეთის რადიუსი, რომელიც მრუდწირულ-ფასონური ზედაპირების შემთხვევაში არის ცვლადი ურთიერთკავშირში კონტაქტის წერტილების K_1 და K_2 ღერძულ მდებარეობებთან.

(47) და (48) განტოლებების თანახმად

$$\delta_1 \cos \gamma_1 = (x_{31} - x_{p^*}) |\sin \varphi_*| + (y_{31} - y_{p^*}) |\cos \varphi| R \cos \gamma_1 + r_3(x_{k1}) - y_{u1}; \quad (49)$$

$$-\delta_1 \cos \gamma_2 = (x_{32} - x_{p^*}) |\sin \varphi_1| - (y_{31} - y_{p^*}) |\cos \varphi| R \cos \gamma_2 + r_3(x_{k2}) - y_{u2}. \quad (50)$$

უკანასკნელიდან:

$$\delta_1 = \frac{1}{\cos \gamma_1} [(x_{31} - x_{p^*}) |\sin \varphi| - y_{u1} (y_{31} - y_{p^*}) |\cos \varphi| + R \cos \gamma_1 + r_3(x_{k1})]; \quad (51)$$

$$\delta_2 = \frac{1}{\cos \gamma_2} [-(x_{32} - x_{p^*}) |\sin \varphi| + y_{u2} (y_{31} - y_{p^*}) |\cos \varphi| + R \cos \gamma_2 + r_3(x_{k2})]. \quad (52)$$

$$\Pi_\delta = \Pi_{\delta_1} + \Pi_{\delta_2} = \frac{1}{2} C_\delta \delta_1^2 + \frac{1}{2} C_\delta \delta_2^2; \quad (53)$$

$$\frac{\partial \Pi_{\delta_1}}{\partial y_{u1}} = -\frac{C_\delta}{(\cos \gamma_1)^2} [(x_{31} - x_{p^*}) |\sin \varphi_*| + (y_{31} - y_{p^*}) |\cos \varphi| R \cos \gamma_1 + r_3(x_{k1}) - y_{u1}]; \quad (54)$$

$$\frac{\partial \Pi_{\delta_2}}{\partial y_{u2}} = \frac{C_\delta}{(\cos \gamma_2)^2} [-(x_{32} - x_{p^*}) |\sin \varphi_*| + (y_{31} - y_{p^*}) |\cos \varphi| R \cos \gamma_2 + r_3(x_{k2}) + y_{u2}]; \quad (55)$$

$$\frac{\partial \Pi_{\delta_1}}{\partial x_p} = \frac{C_\delta}{(\cos \gamma_1)^2} [(x_{31} - x_{p^*}) |\sin \varphi_*| + (y_{31} - y_{p^*}) |\cos \varphi| R \cos \gamma_1 + r_3(x_{k1}) - y_{u1}] \times$$

$$\times \left(-|\sin \varphi| - \sin \alpha \frac{1}{R_{ko}} \right); \quad (56)$$

$$\frac{\partial \Pi_{\delta 2}}{\partial x_p} = \frac{C_\delta}{(\cos \gamma_2)^2} \left[-(x_{32} - x_{p*}) |\sin \varphi_*| + (y_{31} - y_{p*}) |\cos \varphi| R \cos \gamma_2 + r_3 (x_{k2}) - y_{u2} \right] \times$$

$$\times \left(|\sin \varphi| + \sin \alpha \frac{1}{R_{ko}} \right); \quad (57)$$

$$\frac{\partial \Pi_{\delta 1}}{\partial y_p} = \frac{C_\delta}{(\cos \gamma_1)^2} \left[(x_{31} - x_{p*}) |\sin \varphi| + (y_{31} - y_p \cos \alpha) |\cos \varphi| + \right.$$

$$\left. + R \cos \gamma_1 + r(x_{k1}) + y_{u1} \right] (-\cos \alpha |\cos \varphi_*|), \quad (58)$$

$$\frac{\partial \Pi_{\delta 2}}{\partial y_p} = \frac{C_\delta}{(\cos \gamma_2)^2} \left[-(x_{32} - x_{p*}) |\sin \varphi_*| - (y_{31} - y_{p*} \cos \alpha) |\cos \varphi_*| + \right.$$

$$\left. + R \cos \gamma_2 + r_3 (x_{k2}) + y_{u2} \right] (\cos \alpha |\cos \varphi_*|); \quad (59)$$

$$\Pi_{C11} = \frac{1}{2} C_1 (y_{u1} - y_k)^2; \quad (60)$$

$$\Pi_{C12} = \frac{1}{2} C_1 (y_{u2} - y_k)^2; \quad (61)$$

$$\Pi_{c2} = \frac{1}{2} C_1 (y_k |\sin \varphi| - x_p)^2; \quad (62)$$

$$\frac{\partial \Pi_{c2}}{\partial y_p} = C_2 (y_k |\sin \varphi| - x_p) |\sin \varphi|; \quad (63)$$

$$\frac{\partial \Pi_{c2}}{\partial x_p} = -C_2 (y_k |\sin \varphi| - x_p) |\sin \varphi|; \quad (64)$$

$$\frac{\partial \Pi_{c11}}{\partial y_{u1}} = C_1 (y_{u1} - y_k); \quad (65)$$

$$\frac{\partial \Pi_{c12}}{\partial y_{u2}} = C_1 (y_{u2} - y_k); \quad (66)$$

$$\frac{\partial \Pi_{c11}}{\partial y_k} = -C_1 (y_{u1} - y_k); \quad (67)$$

$$\frac{\partial \Pi_{c12}}{\partial y_k} = -C_1 (y_{u3} - y_k), \quad (68)$$

$$\Pi_{c3} = \frac{1}{2} C_3 (y_k |\cos \varphi| - y_p)^2; \quad (69)$$

$$\frac{\partial \Pi_{c3}}{\partial y_k} = C_3(y_k |\cos \varphi| - y_{p*}) |\cos \varphi_*|; \quad (70)$$

$$\frac{\partial \Pi_{c3}}{\partial y_p} = C_3(y_k (\cos \varphi) - y_p), \quad (71)$$

სადაც: C_δ – პნევმოცილინდრების სიხისტე, C_1 – მოთვალთვალე რგოლისა და პნევმოცილინდრების მხრეულებს შორის დაყენებული ზამბარების სიხისტე; C_2 – გარე ოთხრგოლას მმართველი მოთვალთვალე სისტემის ჰიდრავლიკური მკვეთარის და მოთვალთვალე რგოლს შორის დაყენებული ზამბარების სიხისტეები; C_3 – შიგა ოთხრგოლას მმართველი მოთვალთვალე სისტემის ჰიდრავლიკური მკვეთარის და მოთვალთვალე რგოლს შორის დასმული ზამბარების სიხისტე; $\Pi_{\delta 1}$, $\Pi_{\delta 2}$, Π_{c11} , Π_{c12} , Π_{c12} და Π_{c3} – შესაბამისი დრეკადი ელემენტებით განსაზღვრული პოტენციურ ენერჯის მდგენელები.

ლაგრანჟის მეორე გვარი განტოლების გამოყენებით საერთო სახით რგოლის (ზემოქმედი მოწყობილობებთან ერთად) დინამიკა ჩაიწერება ასე:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_\kappa}{\partial \dot{y}_\kappa} \right) - \frac{\partial T_\kappa}{\partial y_\kappa} = - \frac{\partial \Pi}{\partial y_\kappa} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{y}_\kappa} + Q_1 + Q_2, \quad (72)$$

სადაც:

$$T_\kappa = \frac{1}{2} m_p (\dot{x}_p)^2 + \frac{1}{2} m_\kappa (\dot{y}_\kappa)^2 + \frac{1}{2} m_{u1} (\dot{y}_{u1})^2 + \frac{1}{2} m_{u2} (\dot{y}_{u2})^2;$$

$$\Phi_\kappa = \frac{1}{2} b_\kappa \left[\frac{d}{dt} (x_p |\sin \varphi| - y_\kappa) \right]^2 + \frac{1}{2} b_{u1} (\dot{y}_{u1} - \dot{y}_\kappa)^2 + \frac{1}{2} b_{u2} (\dot{y}_{u2} - \dot{y}_\kappa)^2; \quad (73)$$

T_κ , Π_κ და Φ_κ – შესაბამისად ანალიზირებადი სისტემის კინეტიკური და პოტენციური ენერჯიები და დისიპაციური ფუნქცია, m_1 – ბარბაცა 5-თან ერთად ჩარხის გადაადგილებადი ელემენტების დაყვანილი ჯამური მასა; m_2 – შიგა ოთხრგოლას ყველა გადაადგილებადი ელემენტების დაყვანილი მასა; b_{u1} და b_{u2} – დისიპაციური ფუნქციის კოეფიციენტები.

აქ:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_\kappa}{\partial \dot{y}_\kappa} \right) - \frac{\partial T_\kappa}{\partial y_\kappa} = - \frac{\partial \Pi_\kappa}{\partial y_\kappa} - \frac{\partial \Phi_\kappa}{\partial \dot{y}_\kappa}; \quad (74)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_{\kappa}}{\partial \dot{y}_{\kappa}} \right) - \frac{\partial T_{\kappa}}{\partial y_{u1}} = - \frac{\partial \Pi_{\kappa}}{\partial y_{u1}} - \frac{\partial \Phi_{\kappa}}{\partial \dot{y}_{u1}} + Q_{p1}; \quad (75)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_{\kappa}}{\partial \dot{y}_{u2}} \right) - \frac{\partial T_{\kappa}}{\partial y_{u2}} = - \frac{\partial \Pi_{\kappa}}{\partial y_{u2}} - \frac{\partial \Phi_{\kappa}}{\partial \dot{y}_{u2}} + Q_{p2}. \quad (76)$$

განზოგადოებულ ძალთა გამოსახულებები ჩაიწერებინ ასე:

$$Q_{p1} = f_p C_{\delta} \delta_1 \sin \gamma_1 |\sin \varphi_*|, \quad (77)$$

$$Q_{p2} = f_p C_{\delta} \delta_1 \sin \gamma_2 |\sin \varphi_*|, \quad (78)$$

სადაც:

$$\gamma_1 = \arctg \left(\frac{\partial f_{31}}{\partial z_k} |\sin \varphi_*| \right);$$

$$\gamma_2 = \arctg \left(\frac{\partial f_{32}}{\partial z_k} |\sin \varphi_*| \right);$$

f_{31} და f_{32} – პროფილური მრუდების პირობითი აღნიშვნები კონტაქტის K_1 და K_2 წერტილებში; z_k – ნამზადის გრძივი (ღერძული) მოძრაობების კოორდინატი; f_p – ჭრის ძალის კოეფიციენტი.

განხილვადი მაკოპირებელი ჩარხის საკვლევი ჰიდრომექანიკური სისტემის მთლიანი მათემატიკური მოდელის მიღებისათვის მიღებული კანონზომიერებები უნდა იქნან შევსებული საკვლევი სისტემის ჰიდრავლიკური ნაწილის მათემატიკური დამოკიდებულებებით.

შეგვიძლია გადავიდეთ განტოლებების გაშლილ ფორმაზე, რომელიც გამოსახება შემდეგი სისტემით [118–120]:

$$m_{u1} \ddot{y}_{u1} + b_{u1} (\dot{y}_{\kappa} - \dot{y}_{u1}) + C_{\delta} \frac{1}{\cos^2 \gamma_1^2} [(x_{31} - x_p) |\sin \varphi| + (y_{31} - y_{p*}) |\cos \varphi| + R \cos \gamma_1 + r(x_{\kappa 1}) - y_{u1}] + C_{11} (y_{u1} - y_{\kappa}) = Q_{p1}; \quad (79)$$

$$m_{u2} \ddot{y}_{u2} + b_{u2} (\dot{y}_{u2} - \dot{y}_{\kappa}) + C_{\delta} \frac{1}{\cos^2 \gamma_2} [(x_{32} - x_p) |\sin \varphi| - (y_{31} - y_{p*}) |\cos \varphi| + R \cos \gamma_2 + r(x_{\kappa 2}) - y_{u2}] + C_{12} (y_{u2} - y_{\kappa}) = Q_{p2}; \quad (80)$$

$$m_{\kappa} \ddot{y}_{\kappa} + b_{u1} (\dot{y}_{\kappa} - \dot{y}_{u1}) + b_{u2} (\dot{y}_{\kappa} - \dot{y}_{u2}) + C_{11} (y_{\kappa} - y_{u1}) + C_{12} (y_{\kappa} - y_{u2}) + C_2 (y_{\kappa} |\sin \varphi| - x_p) |\sin \varphi| + C_3 (y_{\kappa} |\cos \varphi| - y_p) |\cos \varphi| = 0. \quad (81)$$

ამ განტოლებებში, m_{u1} , m_{u2} – მასები, რომლებიც განსაზღვრულია სახეხი პნევმოცილინდრების მასებით და მათზე დაყვანილი ერთობლივად გადაადგილებადი მექანიკური რგოლების მასებით.

საკვლევი ამპრავი სისტემის ჰიდრავლიკური ნაწილების დინამიკის განტოლებები შეგვიძლია ჩავწეროთ ასე:

$$\frac{d}{dt} F_{zy} + k_{\text{жс}} \dot{x} = k_{\text{жс}} k_{v1} \sqrt{1 - \frac{1}{p_n F} (F_{zy} + B_2 \dot{x} + B_1 \dot{x}) \text{sign} \varepsilon \cdot \varepsilon}, \quad (82)$$

$$\frac{d}{dt} F_{zyB} + k_{\text{жс}} y_p = k_{\text{жс}} k_{vB} \sqrt{1 - \frac{1}{p_n F_e} (F_{zyB} + B_2 \dot{y}_p + B_1 \dot{y}_p) \text{sign} \varepsilon_e \cdot \varepsilon_e}, \quad (83)$$

რომელშიდაც, p_n – მმართველი ოთხხვრელიან მკვეთარასთან მოყვანილი სითხის წნევაა, $k_{\text{жс}}$ და k_{v1} , k_{vB} – შესაბამისად ჰიდრავლიკური სისტემების სიხისტისა და ჰიდრავლიკური სისტემების სიჩქარის მიმართ გაძლიერების კოეფიციენტებია; B_1 – კოეფიციენტია, რომელიც აღრიცხავს ბლანტი ხახუნის დანაკარგებს ზეთსადენებში; B_2 – კოეფიციენტია, რომელიც აღრიცხავს ზეთსადენებში სითხით შექმნილი ინერციულ დატვირთვებს; x და y_p – ჰიდროცილინდრების დგუშების გადაადგილებათა კოორდინატებია; F_{zy} , F_{zyB} – ჰიდროცილინდრთა ჭოკებზე მოდებული ძალებია.

თავის მხრივ:

$$F_{zy} = k_r \left(m_p \ddot{x}_p + b_p \dot{x}_p + \frac{\partial \Pi_{\Sigma c}}{\partial x_p} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_p} + Q_{mpx} \right) + F_{mpx} \text{sign} \dot{x}_p, \quad (84)$$

$$F_{zye} = k_{re} \left(m_y \ddot{y}_p + b_y \dot{y}_p + \frac{\partial \Pi_{\Sigma c}}{\partial y_p} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{y}_p} + Q_{mpy} \right) + F_{mpy} \text{sign} \dot{y}_p, \quad (85)$$

სადაც, k_r – როტორის ღერძზე და ძალოვანი ჰიდროცილინდრი დგუშზე მოდებული ძალების დაყვანის კოეფიციენტია;

$$Q_{mpx} = f_{mp} C_\delta (\delta_1 + \delta_2) |\cos \phi| \text{sign} \dot{x}_p; \quad (86)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi_{\Sigma c}}{\partial x_p} &= 2C_1 \sin^2 \phi x_p - 2C_1 |\sin \phi| y_\kappa + 2C_2 \sin^4 \phi x_p - \\ &- 2C_2 \sin^2 \phi |\sin \phi| y_\kappa = 2(C_1 \sin^2 \phi + C_2 \sin^4 \phi) x_p - \\ &- 2(C_1 |\sin \phi| + C_2 \sin^2 \phi |\sin \phi|) y_\kappa, \end{aligned} \quad (87)$$

f_{mp} – მშრალი ხახუნის ძალის კოეფიციენტი; m_p – გადაადგილებადი ნაწილების ჩარხის როტორის ღერძზე დაყვანილი მასა; b_p – დემპფირების კოეფიციენტი; F_{mpx} – გამომავალ კოორდინატებზე დაყვანილი ჰიდროცილინდრში და ჩარხის მექანიზმებში აღძრული ხახუნის ძალები; Φ – დისპაციური ფუნქციები.

გაშლილი სახით მივიღებთ:

$$\begin{aligned} & k_z(m_p\ddot{x} + b_p\dot{x}_p) + \frac{k_{\kappa c}}{k_z}\dot{x}_p + k_z\left(\frac{\partial\Pi_{\delta_1}}{\partial x_p} + \frac{\partial\Pi_{\delta_2}}{\partial x_p}\right) + k_z b_p \dot{x}_p + \frac{\partial\Pi_{c2}}{\partial x_p} = \\ & = k_{\kappa c} k_{v1} \sqrt{1 - \frac{1}{P_n F} (F_{2y} + B_2\ddot{x} + B_1\dot{x}) \text{sign}(y_{\kappa} - x_p |\sin\phi| \sin\phi)} \times \\ & \times (y_{\kappa} - x_p |\sin\phi|) |\sin\phi|, \end{aligned} \quad (88)$$

$$\begin{aligned} & k_6(m_y\ddot{y}_p + b_y\dot{y}_p) + \frac{k_{\kappa c}}{k_6}\dot{y}_p + k_z\left(\frac{\partial\Pi_{\delta_1}}{\partial y_p} + \frac{\partial\Pi_{\delta_2}}{\partial y_p}\right) + k_6 b_p \dot{y}_p + \frac{\partial\Pi_{c3}}{\partial y_p} = \\ & = k_{\kappa c} k_{v6} \sqrt{1 - \frac{1}{P_{n6} F_6} (F_{2y6} + B_{26}\ddot{y}_p + B_{16}\dot{y}_p) \text{sign}(y_{\kappa} |\cos\phi| - y_p)} \times \\ & \times [y_{\kappa} |\cos\phi| - y_p], \end{aligned} \quad (89)$$

გარკვეული გარდაქმნების შემდეგ განტოლება შეგვიძლია ჩავწეროთ:

$$\begin{aligned} & k_z m_p \ddot{x}_p + k_z b_p \dot{x}_p + k_{\kappa c} \dot{x}_p + k_z b_p \dot{x}_p + C_2 x_p |\sin\phi| + \\ & + k_z |\sin^2\phi| \left(\frac{1}{\cos^2\gamma_1} + \frac{1}{\cos^2\gamma_2} \right) x_p + k_z \Delta x_3 + k_z \Delta R_{\gamma} |\sin\phi| + \\ & + r_z \Delta x_{31} + r_z \Delta R_{\gamma} |\sin\phi| + k_z \Delta \tau_{3\kappa} |\sin\phi| - k_z \frac{|\sin\phi|}{\cos^2\gamma_1} y_{u1} + k_z \frac{|\sin\phi|}{\cos^2\gamma_2} y_{u2} = \\ & = k_{\kappa c} k_{v1} \sqrt{1 - \frac{1}{P_n F} (F_{2y} + B_2\ddot{x} + B_1\dot{x}) \text{sign}(y_{\kappa} - x_p |\sin\phi| \sin\phi)} \times \\ & \times (y_{\kappa} - x_p |\sin\phi|) |\sin\phi|, \end{aligned} \quad (90)$$

$$\begin{aligned} & k_6 m_y \ddot{y}_p + k_6 b_y \dot{y}_p + k_6 b_y \dot{y}_p + C_3 y_p |\cos\phi| + \\ & + k_6 |\cos^2\phi| \left(\frac{1}{\cos^2\gamma_1} + \frac{1}{\cos^2\gamma_2} \right) y_p + k_6 \Delta x_3 + k_6 \Delta R_{\gamma} |\cos\phi| + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + r_6 \Delta y_{31} + k_6 \Delta \tau_{3\kappa} |\cos \varphi| - k_6 \frac{|\cos \varphi|}{\cos^2 \gamma_1} y_{u1} + k_6 \frac{|\cos \varphi|}{\cos^2 \gamma_2} y_{u2} = \\
& = k_{\kappa} k_6 \sqrt{1 - \frac{1}{p_n F_6} (F_{246} + B_2 \ddot{y}_p + B_1 \dot{y}_p)} \operatorname{sign}(y_{\kappa} |\cos \varphi| - y_p) \cdot (y_{\kappa} |\cos \varphi| - y_p), \quad (91)
\end{aligned}$$

სადაც:

$$\Delta x_3 = \frac{|\sin^2 \varphi|}{\cos^2 \gamma_1} x_{31} - \frac{|\sin^2 \varphi|}{\cos^2 \gamma_2} x_{32}; \quad (92)$$

$$\Delta R_\gamma = R \left(\frac{1}{\cos \gamma_1} - \frac{1}{\cos \gamma_2} \right); \quad (93)$$

$$\Delta r_{3\kappa}(x_\kappa) = \frac{r_3(x_{\kappa 1})}{\cos^2 \gamma_1} - \frac{r_3(x_{\kappa 2})}{\cos^2 \gamma_2}, \quad (94)$$

$$\Delta y_3 = \frac{|\cos^2 \varphi|}{\cos^2 \gamma_1} y_{31} - \frac{|\cos^2 \varphi|}{\cos^2 \gamma_2} y_{32}; \quad (95)$$

$$\Delta R_\gamma = R \left(\frac{1}{\cos \gamma_1} - \frac{1}{\cos \gamma_2} \right); \quad (96)$$

$$\Delta r_{3\kappa} = \frac{r_3(x_{\kappa 1})}{\cos^2 \gamma_1} - \frac{r_3(x_{\kappa 2})}{\cos^2 \gamma_2}. \quad (97)$$

შეგვიძლია აღვნიშნავთ, რომ მიღებული არაწრფივი არასტაციონარული სისტემის მათემატიკური მოდელი უნდა იყოს შევსებული ტრანსცენდენტური ალგებრული განტოლებებით.

$$z_{\kappa 1} = z_{u01} + (R - \delta_1) \sin \gamma_1; \quad (98)$$

$$z_{\kappa 2} = z_{u02} + (R - \delta_2) \sin \gamma_2, \quad (99)$$

სადაც,

δ_1 და δ_2 – სახეხი პნევმოცილინდრების მიმდინარე დეფორმაციებია.

2.3.2. მათემატიკური მოდელირება ორ და ერთკოორდინატიანი კოპირების რეჟიმებში

იმ შემთხვევაში, როდესაც საქმე გვაქვს ბრტყლად გაღუნული მრუდწირულფასონური (ბრტყლადმრუდწირული) დეტალების დამუშავებასთან საკვლევი სამკოორდინატიანი კოპირების სისტემა

გარდაიქმნება ორკოორდინატულ კოპირების სისტემად: კოპირება ხდება ნამზადის დიამეტრებისა და მისი ღერძის x კოორდინატის ცვლადობის შესაბამისად.

აღნიშნულ შემთხვევაში ჩარხის შიგა და გარე ოთხგოლები შეერთებულნი არიან ხისტად, ე.ი. გამორიცხულია გადაადგილებები y_p კოორდინატის. ჩარხის ხეხვის სქემა მოყვანილია ნახ. 11.

აღნიშნულ შემთხვევაში პნევმოცილინდრების ბრუნვის ცენტრების მდებარეობა გამოისახება შემდეგნაირად [122; 123]

$$y_{u1} = x_{s1}|\sin \varphi| - x_p|\sin \varphi| + (R - \delta_1) \cos \gamma_1 + r_3(x_{k1}); \quad (100)$$

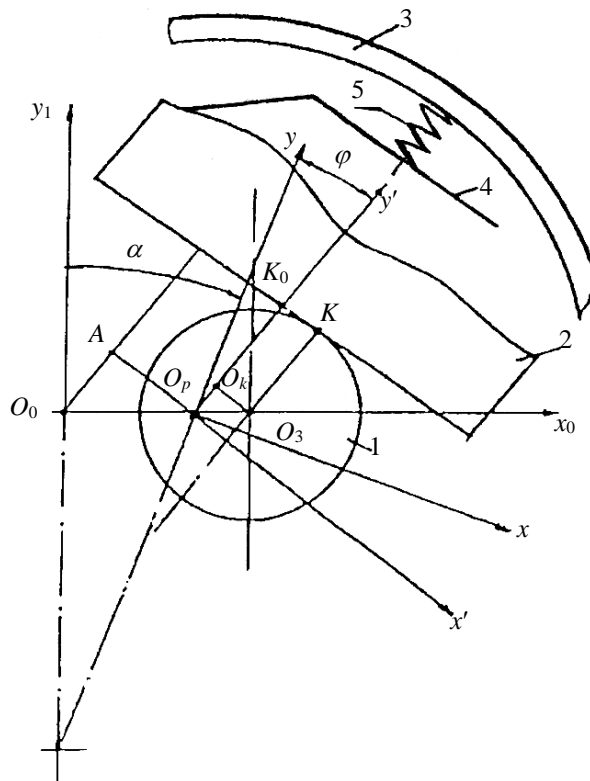
$$y_{u2} = x_{s2}|\sin \varphi| - x_p|\sin \varphi| - (R - \delta_2) \cos \gamma_2 - r_3(x_{k2}). \quad (101)$$

$$\delta_1 \cos \gamma_1 = (x_{s1} - x_p)|\sin \varphi| + R \cos \gamma_1 + r_3(x_{k1}) - y_{u1}; \quad (102)$$

$$-\delta_1 \cos \gamma_2 = (x_{s2} - x_p)|\sin \varphi| - R \cos \gamma_2 + r_3(x_{k2}) - y_{u2}. \quad (103)$$

უკანასკნელიდან

$$\delta_1 = \frac{1}{\cos \gamma_1} [(x_{s1} - x_p)|\sin \varphi| - y_{u1} + R \cos \gamma_1 + r_3(x_{k1})]; \quad (104)$$



ნახ. 11. ფარდობით მოძრაობათა კინემატიკის სქემა

$$\delta_2 = \frac{1}{\cos \gamma_2} \left[-(x_{32} - x_p) |\sin \phi| + y_{u2} + R \cos \gamma_2 + r_3(x_{k2}) \right]; \quad (105)$$

$$\Pi_\delta = \Pi_{\delta 1} + \Pi_{\delta 2} = \frac{1}{2} C_\delta \delta_1^2 + \frac{1}{2} C_\delta \delta_2^2; \quad (106)$$

$$\frac{\partial \Pi_{\delta 1}}{\partial y_{u1}} = -\frac{C_\delta}{(\cos \gamma_1)^2} \left[(x_{31} - x_p) |\sin \phi| + R \cos \gamma_1 + r_3(x_{k1}) - y_{u1} \right]; \quad (107)$$

$$\frac{\partial \Pi_{\delta 2}}{\partial y_{u2}} = \frac{C_\delta}{(\cos \gamma_2)^2} \left[-(x_{32} - x_p) |\sin \phi| + R \cos \gamma_2 + r_3(x_{k2}) + y_{u2} \right]; \quad (108)$$

$$\frac{\partial \Pi_{\delta 1}}{\partial x_p} = \frac{C_\delta}{(\cos \gamma_1)^2} \left[(x_{31} - x_p) |\sin \phi| + R \cos \gamma_1 + r_3(x_{k1}) - y_{u1} \right] (-|\sin \phi|); \quad (109)$$

$$\frac{\partial \Pi_{\delta 2}}{\partial x_p} = \frac{C_\delta}{(\cos \gamma_2)^2} \left[-(x_{32} - x_p) |\sin \phi| + R \cos \gamma_2 + r_3(x_{k2}) - y_{u2} \right] |\sin \phi|; \quad (110)$$

$$\Pi_{c11} = \frac{1}{2} C_1 (y_{u1} - y_k)^2; \quad (111)$$

$$\Pi_{c12} = \frac{1}{2} C_1 (y_{u2} - y_k)^2; \quad (112)$$

$$\Pi_{c2} = \frac{1}{2} C_1 (y_k |\sin \phi| - x_p)^2; \quad (113)$$

$$\frac{\partial \Pi_{c2}}{\partial x_p} = C_2 (y_k |\sin \phi| - x_p) |\sin \phi|; \quad (114)$$

$$\frac{\partial \Pi_{c2}}{\partial x_p} = -C_2 (y_k |\sin \phi| - x_p) |\sin \phi|; \quad (115)$$

$$\frac{\partial \Pi_{c11}}{\partial y_{u1}} = C_1 (y_{u1} - y_k); \quad (116)$$

$$\frac{\partial \Pi_{c12}}{\partial y_{u2}} = C_1 (y_{u2} - y_k); \quad (117)$$

$$\frac{\partial \Pi_{c11}}{\partial y_k} = -C_1 (y_{u1} - y_k); \quad (118)$$

$$\frac{\partial \Pi_{c12}}{\partial y_k} = -C_1 (y_{u3} - y_k); \quad (119)$$

სადაც, $\Pi_{\delta 1}$, $\Pi_{\delta 2}$, Π_{c11} , Π_{c12} და Π_{c2} – პოტენციური ენერჯის მდგენელებია.

ზოგადი მიდგომით რგოლის დინამიკის განტოლება მიიღებს სახეს:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_{\kappa}}{\partial \dot{y}_{\kappa}} \right) - \frac{\partial T_{\kappa}}{\partial y_{\kappa}} = -\frac{\partial \Pi}{\partial y_{\kappa}} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{y}_{\kappa}} + Q_1 + Q_2; \quad (120)$$

$$T_{\kappa} = \frac{1}{2} m_p (\dot{x}_p)^2 + \frac{1}{2} m_{\kappa} (\dot{y}_{\kappa})^2 + \frac{1}{2} m_{u1} (\dot{y}_{u1})^2 + \frac{1}{2} m_{u2} (\dot{y}_{u2})^2, \quad (121)$$

$$\Phi_{\kappa} = \frac{1}{2} b_{\kappa} \left[\frac{d}{dt} (x_p |\sin \phi| - y_{\kappa}) \right]^2 + \frac{1}{2} b_{u1} (\dot{y}_{u1} - \dot{y}_{\kappa})^2 + \frac{1}{2} m_{u2} (\dot{y}_{u2} - \dot{y}_{\kappa})^2. \quad (122)$$

აქ

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_{\kappa}}{\partial \dot{y}_{\kappa}} \right) - \frac{\partial T_{\kappa}}{\partial y_{\kappa}} = -\frac{\partial \Pi_{\kappa}}{\partial y_{\kappa}} - \frac{\partial \Phi_{\kappa}}{\partial \dot{y}_{\kappa}}; \quad (123)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_{\kappa}}{\partial \dot{y}_{\kappa}} \right) - \frac{\partial T_{\kappa}}{\partial y_{u1}} = -\frac{\partial \Pi_{\kappa}}{\partial y_{u1}} - \frac{\partial \Phi_{\kappa}}{\partial \dot{y}_{u1}} + Q_{p1}; \quad (124)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_{\kappa}}{\partial \dot{y}_{u2}} \right) - \frac{\partial T_{\kappa}}{\partial y_{u2}} = -\frac{\partial \Pi_{\kappa}}{\partial y_{u2}} - \frac{\partial \Phi_{\kappa}}{\partial \dot{y}_{u2}} + Q_{p2}, \quad (125)$$

$$Q_{p1} = f_p C_{\delta} \delta_1 \sin \gamma_1 |\sin \phi|; \quad (126)$$

$$Q_{p2} = f_p C_{\delta} \delta_1 \sin \gamma_2 |\sin \phi|, \quad (127)$$

$$\gamma_1 = \arctg \left(\frac{\partial f_{31}}{\partial z_k} |\sin \phi| \right),$$

$$\gamma_2 = \arctg \left(\frac{\partial f_{32}}{\partial z_k} |\sin \phi| \right).$$

გადავდივართ გაშლილ ფორმაზე:

$$m_{u1} \ddot{y}_{u1} + b_{u1} (\dot{y}_{\kappa} - \dot{y}_{u1}) + C_{\delta} \frac{1}{\cos^2 \gamma_1} [(x_{31} - x_p) |\sin \phi| + R \cos \gamma_1 + r(x_{\kappa 1}) - y_{u1}] + C_{11} (y_{u1} - y_{\kappa}) = Q_{p1}; \quad (128)$$

$$m_{u2} \ddot{y}_{u2} + b_{u2} (\dot{y}_{u2} - \dot{y}_{\kappa}) + C_{\delta} \frac{1}{\cos^2 \gamma_2} [(x_{32} - x_p) |\sin \phi| + R \cos \gamma_2 + r(x_{\kappa 2}) - y_{u2}] + C_{12} (y_{u2} - y_{\kappa}) = Q_{p2}; \quad (129)$$

$$m_{\kappa} \ddot{y}_{\kappa} + b_{u1} (\dot{y}_{\kappa} - \dot{y}_{u1}) + b_{u2} (\dot{y}_{\kappa} - \dot{y}_{u2}) + C_{11} (y_{\kappa} - y_{u1}) + C_{12} (y_{\kappa} - y_{u2}) + C_2 (y_{\kappa} |\sin \phi| - x_p) |\sin \phi| = 0. \quad (130)$$

ჰიდრავლიკური ნაწილის დინამიკის განტოლება [24, 124] ჩაიწერება

ასე:

$$\frac{d}{dt} F_{zy} + k_{\omega c} \dot{x} = k_{\omega c} k_{v1} \sqrt{1 - \frac{1}{p_n F} (F_{zy} + B_2 \ddot{x} + B_1 \dot{x}) \text{sign} \varepsilon \cdot \varepsilon}, \quad (131)$$

თავის მხრივ:

$$F_{zy} = k_r \left(m_p \ddot{x}_p + b_p \dot{x}_p + \frac{\partial \Pi_{\Sigma c}}{\partial x_p} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_p} + Q_{mpx} \right) + F_{mpx} \text{sign} \dot{x}_p, \quad (132)$$

$$Q_{mpx} = f_{mp} C_\delta (\delta_1 + \delta_2) |\cos \phi| \text{sign} \dot{x}_p; \quad (133)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi_{\Sigma c}}{\partial x_p} &= 2C_1 \sin^2 \phi x_p - 2C_1 |\sin \phi| y_\kappa + 2C_2 \sin^4 \phi x_p - \\ &- 2C_2 \sin^2 \phi |\sin \phi| y_\kappa = 2(C_1 \sin^2 \phi + C_2 \sin^4 \phi) x_p - \\ &- 2(C_1 |\sin \phi| + C_2 \sin^2 \phi |\sin \phi|) y_\kappa, \end{aligned} \quad (134)$$

გამოიღო სხვით გვექნება:

$$\begin{aligned} k_z (m_p \ddot{x}_p + b_p \dot{x}_p) + \frac{k_{\omega c}}{k_z} \dot{x}_p + k_z \left(\frac{\partial \Pi_{\delta_1}}{\partial x_p} + \frac{\partial \Pi_{\delta_2}}{\partial x_p} \right) + k_z b_p \dot{x}_p + \frac{\partial \Pi_{c_2}}{\partial x_p} = \\ = k_{\omega c} k_{v1} \sqrt{1 - \frac{1}{p_n F} (F_{zy} + B_2 \ddot{x} + B_1 \dot{x}) \text{sign} (y_\kappa - x_p |\sin \phi| \sin \phi)} \times \\ \times (y_\kappa - x_p |\sin \phi|) |\sin \phi|, \end{aligned} \quad (135)$$

სადაც:

$$\begin{aligned} F_{zy} &= k_r [(m_p \ddot{x}_p + b_p \dot{x}_p) 2C_1 \sin^2 \phi x_p + 2C_2 |\sin^3 \phi| x_p + b_\kappa |\sin \phi| \dot{x}_p + \\ &+ f_{mp} C_\delta (\delta_1 + \delta_2) |\cos \phi| \cdot \text{sign} \dot{x}_p - 2C_1 |\sin \phi| y_\kappa - 2C_2 \sin^2 \phi y_\kappa - b_\kappa \dot{y}_\kappa] = \\ &= k_r [(m_p \ddot{x}_p + b_p \dot{x}_p) 2(C_2 \sin^2 \phi x + c_2 |\sin^3 \phi| x_p + b_\kappa |\sin \phi| \dot{x}_p - \\ &= -2(C_1 |\sin \phi| - C_2 \sin^2 \phi) y_\kappa - b_\kappa \dot{y}_\kappa + f_{mp} C_\delta (\delta_1 + \delta_2) |\cos \phi| \cdot \text{sign} \dot{x}_p + \\ &+ m_p \ddot{x}_p + b_p \dot{x}_p] k_r, \end{aligned} \quad (136)$$

გარდაქმნილი ფორმით გვექნება:

$$\begin{aligned} k_z m_p \ddot{x}_p + k_z b_p \dot{x}_p + \frac{k_{\omega c}}{k_z} \dot{x}_p + k_z \left\{ \frac{1}{\cos^2 \gamma_2} [(x_{31} - x_p) |\sin \phi| + R \cos \gamma_1 + \right. \\ \left. + r_3 (x_{\kappa 1}) - y_{u1}] (-|\sin \phi|) + \frac{1}{(\cos^2 \gamma_2)^2} [(x_{31} - x_p) |\sin \phi| + \right. \\ \left. + R \cos \gamma_2 + r_3 (x_{\kappa 2}) + y_{u2}] |\sin \phi| + k_z b_p \dot{x}_p - c_2 (y_\kappa |\sin \phi|) |\sin \phi| = \right. \end{aligned}$$

$$= k_{\text{жс}} k_v \sqrt{1 - \frac{1}{p_n F} (F_{z_u} + B_2 \ddot{x} + B_1 \dot{x}) \text{sign}(y_\kappa - x_p |\sin \phi| \sin \phi)} \times \\ \times (y_\kappa - x_p |\sin \phi|) |\sin \phi|. \quad (137)$$

ასევე აღსანიშნავია, რომ

$$z_{\kappa 1} = z_{u01} + (R - \delta_1) \sin \gamma_1; \quad (138)$$

$$z_{\kappa 2} = z_{u02} + (R - \delta_2) \sin \gamma_2. \quad (139)$$

საბოლოოდ ვწერთ:

$$k_z m_p \ddot{x}_p + k_z b_p \ddot{x}_p + k_{\text{жс}p} \dot{x}_p + k_z b_p \dot{x}_p + C_2 x_p |\sin \phi| + \\ + k_z |\sin^2 \phi| \left(\frac{1}{\cos^2 \gamma_1} + \frac{1}{\cos^2 \gamma_2} \right) x_p + k_z \Delta x_3 + k_z \Delta R_\gamma |\sin \phi| + \\ + r_z \Delta x_{31} + r_z \Delta R_\gamma |\sin \phi| + k_z \Delta \tau_{3\kappa} |\sin \phi| - k_z \frac{|\sin \phi|}{\cos^2 \gamma_1} y_{u1} + k_z \frac{|\sin \phi|}{\cos^2 \gamma_2} y_{u2} = \\ = k_{\text{жс}} k_v \sqrt{1 - \frac{1}{p_n F} (F_{z_u} + B_2 \ddot{x} + B_1 \dot{x}) \text{sign}(y_\kappa - x_p |\sin \phi| \sin \phi)} \times \\ \times (y_\kappa - x_p |\sin \phi|) |\sin \phi|, \quad (140)$$

$$\Delta x_3 = \frac{|\sin^2 \phi|}{\cos^2 \gamma_1} x_{31} - \frac{|\sin^2 \phi|}{\cos^2 \gamma_2} x_{32}; \quad (141)$$

$$\Delta R_\gamma = R \left(\frac{1}{\cos \gamma_1} - \frac{1}{\cos \gamma_2} \right); \quad (142)$$

$$\Delta r_{3\kappa}(x_\kappa) = \frac{r_3(x_{\kappa 1})}{\cos^2 \gamma_1} - \frac{r_3(x_{\kappa 2})}{\cos^2 \gamma_2}. \quad (143)$$

გადავდივართ გაწრფივებულ მოდელეებზე:

$$m_{u1} \ddot{y}_{u1} + b_{u1} \dot{y}_{u1} + (C_{\delta 1}^* + C_{11}) y_{u1} = C_{\delta 1}^* (x_{31} - x_p) |\sin \phi| + C_{\delta 1}^* \cos \gamma_1 R + \\ + r(x_{\kappa 1}) + C_{11} y_\kappa + b_{u1} \dot{y}_\kappa + Q_{p1}; \quad (144)$$

$$m_{u2} \ddot{y}_{u2} + b_{u2} \dot{y}_{u2} + (C_{\delta 2}^* + C_{12}) y_{u2} = C_{\delta 2}^* (x_{32} - x_p) |\sin \phi| - C_{\delta 2}^* \cos \gamma_2 R - \\ - r(x_{\kappa 2}) + C_{12} y_\kappa + b_{u2} \dot{y}_\kappa - Q_{p2}; \quad (145)$$

$$m_\kappa \ddot{y}_\kappa + (b_{u1} + b_{u2}) \dot{y}_\kappa + (C_{11} + C_{12}) y_\kappa + C_2 y_\kappa |\sin^2 \phi| y_\kappa = \\ = C_{11} y_{u1} - C_{12} y_{u2} + C_2 x_p |\sin \phi|; \quad (146)$$

$$\begin{aligned}
& k_r m_p \ddot{x}_p + k_r b_p \ddot{x}_p + \frac{k_{\text{жс}}}{k_r} \dot{x}_p + b_x(t) \dot{x}_p + C_x(t) x_p + b_{m\ddot{x}}(t) \ddot{x}_p + b_{x\varepsilon}(t) x_p + \\
& + C_{x\varepsilon}(t) x_p + k_{\text{жс}} k_{v1} \sin^2 \varphi x_p + [k_r f_{mp1} C_\delta |\cos \varphi| + F_{mpx}] \frac{d}{dt} (\text{sign} \dot{x}_p) = \\
& = k_{\text{жс}} k_{v1} |\sin \varphi| y_\kappa + b_{xy}(t) \dot{y}_\kappa + C_{xy}(t) y_\kappa - C_{mp\varepsilon}(t) \text{sign} \dot{x}_p + C_y(t) \dot{y}_\kappa + b_\kappa \ddot{y}_\kappa + \\
& + k_r \Delta x_3 + k_r \Delta r_3(x_\kappa) |\sin \varphi| + k_r \Delta R_\gamma |\sin \varphi|, \tag{147}
\end{aligned}$$

სადაც,

$$b_x(t) = 2C_1 \sin^2 \varphi + 2C_2 |\sin^3 \varphi| + b_\kappa |\cos \varphi| \dot{\varphi};$$

$$C_x(t) = 2C_1 \sin^2 \varphi + 6C_2 |\sin^3 \varphi| \dot{\varphi};$$

$$C_y(t) = 2(C_2 \sin^2 \varphi + C_1 |\sin \varphi|);$$

$$b_{m\ddot{x}}(t) = A_{m\ddot{x}} \varepsilon(t);$$

$$b_{x\varepsilon}(t) = A_{Bx} \varepsilon(t);$$

$$C_{x\varepsilon}(t) = A_{cx} (C_1 \sin^2 \varphi + C_2 |\sin^3 \varphi|) \varepsilon(t);$$

$$b_{xy}(t) = K_b \varepsilon(t);$$

$$C_{xy}(t) = 2K_b b_\kappa (C_1 \sin^2 \varphi + C_2 |\sin^2 \varphi|) \varepsilon(t);$$

$$C_{mp\varepsilon}(t) = \frac{k_r k_{\text{жс}} k_v}{2 p_n F} [f_{mp} C_\delta (\delta_1 + \delta_2) |\cos \varphi| + F_{mpx}] \varepsilon(t);$$

$$A_{m\ddot{x}} = K_b (m_p + B_2);$$

$$A_{Bx} = K_b (B_1 + b_p);$$

$$K_b = \frac{k_r k_{\text{жс}} k_v}{2 p_n F};$$

$$\varepsilon(t) = (y |\sin \varphi| - \sin^2 \varphi x_p);$$

$$C_y(t) = 2(C_2 \sin^2 \varphi + C_1 |\sin \varphi|);$$

$$C_\varphi(t) = f_p C_\delta (\delta_{1\Delta} \sin \gamma_1 + \delta_{2\Delta} \sin \gamma_2) |\sin \varphi| = f_p C_\delta \delta_{\Delta\gamma} |\sin \varphi|.$$

გასაშუალებებული მოდელის მიღებისათვის ვიყენებთ დამოკიდებულებებს:

$$\cos^2 = 0,5 + 0,5 \cos 2\varphi;$$

$$|\sin \varphi| \approx a_{\varphi 8} - a_{\varphi 81} \cos 2\varphi;$$

$$|\cos \varphi| \approx a_{\varphi c} + a_{\varphi c1} \cos 2\varphi ;$$

$$|\sin^3 \varphi| \approx a_{\varphi s0} - a_{\varphi s1} \cos 2\varphi a_{\varphi s2} - \cos 4\varphi ;$$

$$|\sin^3 \varphi| |\sin \varphi| = 0,375 - 0,5 \cos 2\varphi + 0,125 \cos 4\varphi ;$$

$$|\sin^3 \varphi| \sin^2 \varphi = (0,5a_{\varphi s1}^2 + 0,5a_{\varphi s0}^2) - (0,5a_{\varphi s1} + 0,5a_{\varphi s0} + 0,25a_{\varphi s2}) \cos 2\varphi - \\ - (0,5a_{\varphi s2} - 0,5a_{\varphi s1}^2) \cos 4\varphi + 0,25a_{\varphi s2} \cos 6\varphi,$$

სადაც

$$0a_{\varphi s0} = 0,5a_{\varphi s} + 0,25a_{\varphi s1};$$

$$a_{\varphi s1} = 0,5(a_{\varphi s} + a_{\varphi s1});$$

$$a_{\varphi s2} = 0,5a_{\varphi s1}.$$

გარდაქმნების შედეგად ვიღებთ:

$$b_{m\ddot{x}}(t) = A_{m\ddot{x}} a_{\varphi s} y_{\kappa} - 0,5A_{m\ddot{x}} x_p - A_{m\ddot{x}} a_{\varphi s1} \cos 2\varphi y_{\kappa} + 0,5A_{m\ddot{x}} \cos 2\varphi x_p ; \quad (148)$$

$$b_{\dot{x}\varepsilon}(t) = A_{\dot{x}\varepsilon} a_{\varphi s} y_{\kappa} - 0,5A_{\dot{x}\varepsilon} x_p - A_{\dot{x}\varepsilon} a_{\varphi s1} \cos 2\varphi + 0,5A_{\dot{x}\varepsilon} \cos 2\varphi ; \quad (149)$$

$$C_{x\varepsilon}(t) = A_{cxy0} y_{\kappa} - A_{cxy1} \cos 2\varphi y_{\kappa} - A_{cxy2} \cos 4\varphi y_{\kappa} - A_{cxc0} x_p + \\ + A_{cxc1} \cos 2\varphi x_p - A_{cxc2} \cos 4\varphi x_p - A_{cxc3} \cos 6\varphi x_p \quad (150)$$

$$b_{\dot{x}}(t) = a_{bx0} - a_{bx1} \cos 2\varphi - a_{bx2} \cos 4\varphi ; \quad (151)$$

$$C_y(t) = C_{y0} - C_{y1} \cos 2\varphi ; \quad (152)$$

$$C_x(t) = C_{x0} - C_{x2} \cos 2\varphi - C_{x2} \cos 4\varphi ; \quad (153)$$

$$b_{xy}(t) = K_{\varepsilon} b_{\kappa} (y_{\kappa} |\sin \varphi| - \sin^2 \varphi x_p) \approx K_{\varepsilon} b_{\kappa} \varepsilon_{cp} ; \quad (154)$$

$$C_{xy}(t) \approx K_{\varepsilon} \varepsilon_{cp} (2C_1 a_{\varphi s} - C_2) + K_{\varepsilon} \varepsilon_{cp} (C_2 - 2C_1) \cos 2\varphi ; \quad (155)$$

$$C_{mp\varepsilon}(t) \approx \frac{1}{2} K_{\varepsilon} [f_{mp} C_{\delta} \delta_{\Sigma} a_{\varphi s} + F_{mpx}] \varepsilon_{cp} ; \quad (156)$$

$$C_y(t) = C_{y0} - C_{y1} \cos 2\varphi ; \quad (157)$$

$$C_{\varphi}(t) = C_{\varphi0} - C_{\varphi1} \cos 2\varphi , \quad (158)$$

სადაც:

$$C_{y0} = 2(0,5C_2 + a_{\varphi c} C_1);$$

$$b_{x0} = C_1 + C_2 a_{\varphi s} + 0,5C_2 a_{\varphi s1};$$

$$b_{x2} = 0,5C_2 a_{\varphi s1};$$

$$\begin{aligned}
A_{cx0} &= A_{cx}(C_1 a_{\varphi 0} + 0,375C_2); \\
A_{cx1} &= A_{cx}(C_1 a_{\varphi 1} - 0,5C_2); \\
A_{cx2} &= A_{cx}[0,375C_1 + C_2(0,5a_{\varphi 1}^2 + 0,5a_{\varphi 0})]; \\
a_{bx0} &= C_1 + C_2 a_{\varphi 0} + 0,5C_2 a_{\varphi 1} + b_{\kappa} a_{\varphi 0} \dot{\varphi}; \\
a_{bx1} &= C_1 + C_2(a_{\varphi 0} + a_{\varphi 1}) - b_{\kappa} a_{\varphi 1} \dot{\varphi}; \\
a_{bx2} &= 0,5C_2 a_{\varphi 1}; \\
C_{y1} &= 2(0,5C_2 + a_{\varphi 1} C_1); \\
C_{x0} &= C_1 + 3b_{\kappa}(a_{\varphi 0} + 0,5a_{\varphi 1})\dot{\varphi}; \\
C_{x1} &= C_1 - [3a_{\varphi 0} + 3a_{\varphi 1}]b_{\kappa}\dot{\varphi}; \\
C_{x2} &= 1,5a_{\varphi 1} b_{\kappa} \dot{\varphi}; \\
A_{cx1} &= A_{cx}[0,5C_1 + C_2(0,5a_{\varphi 1} + 0,5a_{\varphi 0} + 0,25a_{\varphi 2})]; \\
A_{cx2} &= A_{cx} C_1 [0,125 - (0,5a_{\varphi 1} - 0,5a_{\varphi 0}^2)]; \\
A_{cx3} &= 0,25A_{cx} C_2 a_{\varphi 2}.
\end{aligned}$$

ვახორციელებთ დამატებით გამარტივებას და ვწერთ:

$$b_{m\ddot{x}}(t) \approx b_{m\ddot{x}0} = A_{m\ddot{x}} \varepsilon_{cp}; \quad (160)$$

$$b_{\dot{x}}(t) \approx b_{\dot{x}0} = A_{b\dot{x}} \varepsilon_{cp}; \quad (161)$$

$$C_{x\varepsilon}(t) \approx C_{\varepsilon 0} - C_{\varepsilon 1} - C_{\varepsilon 0} \cos 2\varphi + C_{\varepsilon 2} \cos 4\varphi, \quad (162)$$

სადაც

$$C_{\varepsilon 0} = A_{cx} \varepsilon_{cp} (0,5C_1 - a_{\varphi 0} C_2);$$

$$C_{\varepsilon 1} = A_{cx} \varepsilon_{cp} (0,5C_1 - a_{\varphi 1} C_2);$$

$$C_{\varepsilon 3} = A_{cx} \varepsilon_{cp} C_2 a_{\varphi 2}.$$

გასაზრუნავი სისტემა იღებს სახეს:

$$\begin{aligned}
m_{u1} \ddot{y}_{u1} + b_{u1} \dot{y}_{u1} + C_{*1} y_{u1} &= C_{\delta 1}^* x_{31} |\sin \varphi| - C_{y1} x_p + C_{p1}(x_{\kappa 1}) + \\
&+ r_3(x_{\kappa 1}) + C_{11} y_{\kappa} + b_{u1} \dot{y}_{\kappa} + f_p C_{\delta} \delta_{1*} |\sin \varphi|; \quad (163)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m_{u2} \ddot{y}_{u2} + b_{u2} \dot{y}_{u2} + C_{*2} y_{u2} &= C_{\delta 1}^* x_{32} |\sin \varphi| - C_{y1}^* x_p - C_{p2}(x_{\kappa 2}) - \\
&- r_3(x_{\kappa 2}) + C_{11} y_{\kappa} + b_{u1} \dot{y}_{\kappa} - f_p C_{\delta} \delta_{2*} |\sin \varphi|; \quad (164)
\end{aligned}$$

$$m_{\kappa} \ddot{y}_{\kappa} + b_{\kappa} \dot{y}_{\kappa} + C_{\kappa} y_{\kappa} = C_{\delta} (f_{\kappa} + f_{\kappa}) |\sin \varphi| - C_{y0} x_p; \quad (165)$$

$$\begin{aligned}
& m_p \ddot{x}_p + b_{px} \dot{x}_p + k_{no} \dot{x}_p + (C_{x0} + 0,5k_{\omega c} k_{v1} - C_{\varepsilon 0}) x_p + \\
& + (k_r f_{mp} C_\delta \delta_{\Delta \Sigma} a_{\varphi c} + F_{mpx}) \frac{d}{dt} (\text{sign} \dot{x}_p) + \frac{1}{2} K_b (f_{mp} C_\delta \delta_{\Delta \Sigma} a_{\varphi c} + F_{mpx}) \varepsilon_{cp} \text{sign} \dot{x}_p = \\
& = k_{\omega c} k_{v1} a_{\varphi c} y_k + C_{y0} \dot{y}_k + b_k \ddot{y}_k,
\end{aligned} \tag{166}$$

სადაც,

$$C_k = 2(C_\delta + C_1) + 2C_2 a_{\varphi 3};$$

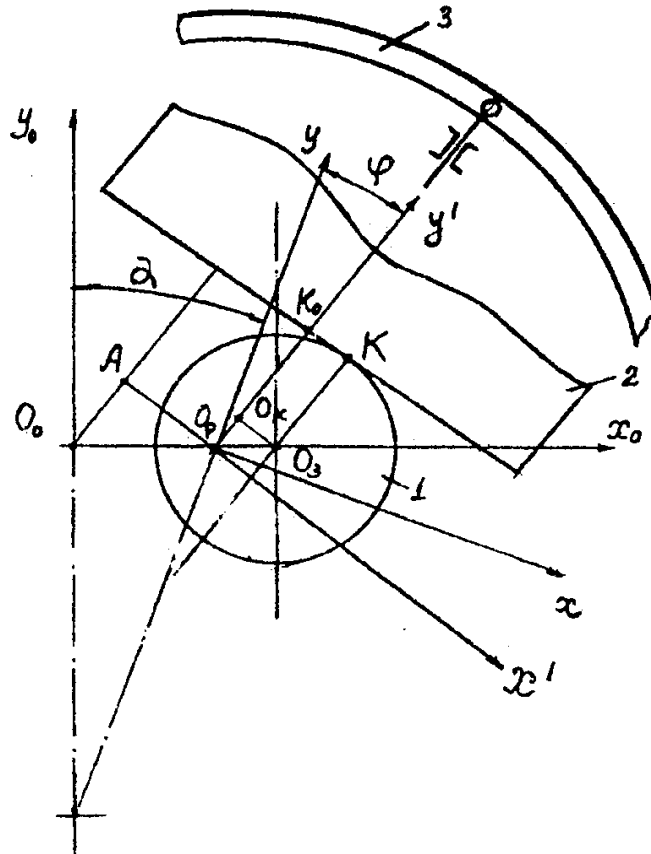
$$k_{no} = \frac{k_{\omega c}}{k_r} + a_{bx}.$$

თავის მხრივ:

$$z_{k1} = z_{u0} + (R - \delta_1) \sin \gamma_1; \tag{167}$$

$$z_{k2} = z_{u0} + (R - \delta_2) \sin \gamma_2. \tag{168}$$

იმ შემთხვევაში, როდესაც ჩარხზე ხორციელდება ერთკოორდინატიანი კოპირების სისტემა – ვამუშავებთ მრუდწირულ ბრტყალად გაღუნულ დეტალებს. ფარდობითი მოძრაობის კინემატიკის სქემა მიიღებს შემდეგ სახეს, რომელიც მოყვანილია ნახ. 12.



ნახ. 12. ფარდობითი მოძრაობათა კინემატიკის სქემა

აღნიშნულ შემთხვევაში პნევმოცილინდრების ბრუნვის ცენტრების კოორდინატები განისაზღვრებიან ასე [110, 125]:

$$y_{u1} = x_{31}|\sin \varphi| + (R - \delta_1) \cos \gamma_1 + r_3;$$

$$- y_{u2} = x_{32}|\sin \varphi| - (R - \delta_2) \cos \gamma_2 - r_3,$$

რომელთა საწყისი მნიშვნელობები აღიწერებიან ასე:

$$y_{u1n} = R + r_3 - \Delta_0 + y_k; \quad (169)$$

$$y_{u2n} = R + r_3 - \Delta_0 - y_k; \quad (170)$$

(169) და (170)-ის თანახმად

$$R - \Delta_0 + y_k = x_{31}|\sin \varphi| + (R - \delta_1) \cos \gamma_1; \quad (171)$$

$$-R + \Delta_0 + y_k = x_{32}|\sin \varphi| - (R - \delta_2) \cos \gamma_2, \quad (172)$$

სადაც, Δ_0 – განსაზღვრავს პნევმოცილინდრების წინასწარი დეფორმაციის სიდიდეს:

შეგვიძლია ჩავწეროთ:

$$\delta_1 \cos \gamma_1 = x_{31}|\sin \varphi| + \Delta_0 - y_k - (R - \cos \gamma_1)$$

$$\delta_2 \cos \gamma_2 = x_{32}|\sin \varphi| - \Delta_0 - y_k + R(1 - \cos \gamma_2).$$

და აქედან:

$$\delta_1 = \frac{1}{\cos \gamma_1} [x_{31}|\sin \varphi| - y_k + \Delta_0 - R(1 - \cos \gamma_1)];$$

$$\delta_2 = \frac{1}{\cos \gamma_2} [x_{32}|\sin \varphi| - y_k - \Delta_0 + R(1 - \cos \gamma_2)];$$

$$\Pi_\delta = \Pi_{\delta_1} + \Pi_{\delta_2} = \frac{1}{2} C_\delta \delta_1^2 + \frac{1}{2} C_\delta \delta_2^2;$$

$$\frac{\partial \Pi_{\delta_2}}{\partial y_k} = C_\delta \frac{1}{\cos^2 \gamma_2} [x_{32}|\sin \varphi| - y_k - \Delta_0 + R(1 - \cos \gamma_2)];$$

$$\Pi_{c1} = C_1 (x_p |\sin \varphi| - y_k)^2;$$

$$\frac{\partial \Pi_{c1}}{\partial x_p} = 2C_1 (x_p |\sin \varphi| - y_k) \sin \varphi;$$

$$\Pi_{c2} = C_2 [(x_p |\sin \varphi| - y_k) \sin \varphi]^2;$$

$$\frac{\partial \Pi_{c2}}{\partial x_p} = 2C_2 (x_p \sin^2 \varphi + y_k |\sin \varphi|) \sin^2 \varphi;$$

$$Q_y = Q_{p1} + Q_{p2};$$

$$Q_{p1} = f_p C_\delta \delta_1 \sin \gamma_1 |\sin \gamma|;$$

$$Q_{p2} = f_p C_\delta \delta_2 \sin \gamma_2 |\sin \gamma|;$$

$$\gamma_1 = \arctg \left(\frac{\partial f_{31}}{\partial z_k} |\sin \phi| \right);$$

$$\gamma_2 = \arctg \left(\frac{\partial f_{32}}{\partial z_k} |\sin \phi| \right),$$

სადაც C_1 და C_2 – ზამზარების სიხისტეებია.

ანალოგიურად,

$$\frac{\partial \Pi_{c1}}{\partial x_p} = 2C_1 (x_p |\sin \phi| - y_k) = 2C_1 |\sin \phi| x_p - 2C_1 y_k ; \quad (173)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi_{c2}}{\partial x_p} &= 2C_2 (x_p \sin^2 \phi - y_k |\sin \phi|) \sin \phi = \\ &= 2C_2 x_p \sin^2 \phi |\sin \phi| - 2C_2 \sin^2 \phi y_k . \end{aligned} \quad (174)$$

საბოლოოდ მივიღებთ:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi}{\partial y_k} &= C_\delta \left(\frac{x_{31}}{\cos^2 \gamma_1} + \frac{x_{32}}{\cos^2 \gamma_2} \right) |\sin \gamma| + C_\delta \Delta_0 \left(\frac{1}{\cos^2 \gamma_1} - \frac{1}{\cos^2 \gamma_2} \right) - \\ &- R \left[\frac{(1 - \cos \gamma_1)}{\cos^2 \gamma_1} - \frac{(1 - \cos \gamma_2)}{\cos^2 \gamma_2} \right] - C_\delta \left(\frac{1}{\cos^2 \gamma_1} + \frac{1}{\cos^2 \gamma_2} \right) y_k + \\ &+ 2C_1 |\sin \phi| x_p - 2C_1 y_k + 2C_2 \sin^2 \phi |\sin \phi| x_p - 2C_2 \sin^2 \phi y_k . \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{p1} &= f_p C_\delta \delta_1 \sin \gamma_1 |\sin \phi| = f_p C_\delta \frac{1}{\cos \gamma_1} |\sin \phi| x_3 + f_p C_\delta \frac{\Delta_0}{\cos \gamma_1} - \\ &- f_p C_\delta \frac{R(1 - \cos \gamma_1)}{\cos \gamma_1} - f_p C_\delta \frac{1}{\cos \gamma_1} y_k ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{p2} &= f_p C_\delta \delta_2 \sin \gamma_2 |\sin \phi| = f_p C_\delta \frac{1}{\cos \gamma_2} |\sin \phi| x_3 + f_p C_\delta \frac{\Delta_0}{\cos \gamma_2} + \\ &+ f_p C_\delta \frac{R(1 - \cos \gamma_2)}{\cos \gamma_2} - f_p C_\delta \frac{1}{\cos \gamma_2} y_k , \end{aligned}$$

სადაც, f_p – ჭრის ძალის კოეფიციენტი.

ლაგრანჟის განტოლების გამოყენებით ვწერთ:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_{\kappa}}{\partial \dot{y}_{\kappa}} \right) - \frac{\partial T_{\kappa}}{\partial y_{\kappa}} = -\frac{\partial \Pi}{\partial y_{\kappa}} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{y}_{\kappa}} + Q_{p1} + Q_{p2}. \quad (175)$$

რომელშიდაც:

$$T = \frac{1}{2} m_p (\dot{x}_p)^2 + \frac{1}{2} m_{\kappa} (\dot{y}_{\kappa})^2 ;$$

$$\Phi_{\kappa} = \frac{1}{2} b_{\kappa} \left[\frac{d}{dt} (x_p |\sin \phi| - y_{\kappa}) \right]^2 .$$

$$\frac{d}{dt} F_{z_u} + k_{\omega c} \dot{x} = k_{\omega c} k_v \sqrt{1 - \frac{1}{P_m F} (F_{z_u} + B_2 \ddot{x} + B_1 \dot{x}) \text{sign} \varepsilon \cdot \varepsilon},$$

სადაც,

$$F_{z_u} = k_r \left(m_p \ddot{x}_p + b_p \dot{x}_p + \frac{\partial \Pi}{\partial x_p} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_p} + Q_{mpx} \right) + F_{mpx} \text{sign} \dot{x}_p ,$$

$$Q_{mpx} = f_{mp} C_{\delta} (\delta_1 + \delta_2) |\cos \phi| \text{sign} \dot{x}_p ;$$

$$\frac{\partial \Pi_{\Sigma c}}{\partial x_p} = 2C_1 \sin^2 \phi x_p - 2C_1 |\sin \phi| y_{\kappa} + 2C_2 \sin^4 \phi x_p -$$

$$- 2C_2 \sin^2 \phi |\sin \phi| y_{\kappa} = 2(C_1 \sin^2 \phi + C_2 \sin^4 \phi) x_p -$$

$$- 2(C_1 |\sin \phi| + C_2 \sin^2 \phi |\sin \phi|) y_{\kappa} ,$$

გამოიღო სხვით ვწერთ:

$$m_{\kappa} \ddot{y}_{\kappa} + b_{\kappa} \dot{y}_{\kappa} + 2(C_{\delta} + C_1) y_{\kappa} + 2C_2 |\sin \phi| y_{\kappa} = C_{\delta} (f_{31} + f_{32}) |\sin \phi| -$$

$$- 2C_2 \sin^2 \phi x_p - 2C_1 |\sin \phi| x_p - f_p C_{\delta} \delta_1 \sin \gamma_1 |\sin \phi| + f_p C_{\delta} \delta_2 \sin \gamma_2 |\sin \phi| , \quad (176)$$

$$k_r (m_p \ddot{x}_p + b_p \dot{x}_p) + \frac{k_{\omega c}}{k_r} \dot{x}_p + k_r (2C_1 \sin^2 \phi + 2C_2 |\sin^3 \phi| + b_{\kappa} |\cos \phi| \dot{\phi}) x_p +$$

$$+ k_r (2C_1 \sin 2\phi \dot{\phi} + 6C_2 \sin^3 \phi \dot{\phi}) x_p + \left[k_r f_{mp} C_{\delta} \delta_{\Delta \Sigma} (\cos \phi) \frac{d}{dt} (\text{sign} \dot{x}_p) + \right.$$

$$\left. + \frac{d}{dt} (F_{mpx} \text{sign} \dot{x}_p) \right] - 2k(C_1 |\sin \phi| + C_2 \sin^2 \phi |\sin \phi|) \dot{y}_{\kappa} -$$

$$- 2k_2 (C_1 |\cos \phi| \dot{\phi} + C_2 \sin 2\phi |\sin \phi| \dot{\phi} + C_2 \sin^2 \phi |\cos \phi|) \dot{y}_{\kappa} =$$

$$= k_{\omega c} k_v \sqrt{1 - \frac{1}{P_n F} (F_{z_u} + B_2 \ddot{x} + B_1 \dot{x}) \text{sign} (y_{\kappa} - x_p |\sin \phi| |\sin \phi|) \times}$$

$$\times (y_{\kappa} - x_p |\sin \phi|) |\sin \phi| , \quad (177)$$

სადაც

$$\begin{aligned}
F_{zy} &= k_r \left[(m_p \ddot{x}_p + b_p \dot{x}_p) 2C_1 \sin^2 x_p + 2C_2 |\sin^3 \phi| x_p + b_\kappa |\sin \phi| \dot{x}_p + \right. \\
&+ f_{mp} C_\delta (\delta_1 + \delta_2) |\cos \phi| \cdot \text{sign} \dot{x}_p - 2C_1 |\sin \phi| y_\kappa - 2C_2 \sin^2 \phi y_\kappa - b_\kappa \dot{y}_\kappa \left. \right] = \\
&= k_r \left[(m_p \ddot{x}_p + b_p \dot{x}_p) 2(C_2 \sin^2 x + C_2 |\sin^3 \phi| x_p + b_\kappa |\sin \phi| \dot{x}_p - \right. \\
&- 2(C_1 |\sin \phi| - C_2 \sin^2 \phi) y_\kappa - b_\kappa \dot{y}_\kappa + f_{mp} C_\delta (\delta_1 + \delta_2) |\cos \phi| \cdot \text{sign} \dot{x}_p + \\
&\left. + m_p \ddot{x}_p + b_p \dot{x}_p \right] k_r, \tag{178}
\end{aligned}$$

p_n – ოთხთვალა მმართველ მკვეთარასთან მოყვანილი სითხის წნევა.

2.3.3. სამკოორდინატო კოპირების გაწრფივებული გასაშუალებელი მოდელების შემუშავება

პირველ რიგში ვახორციელებთ გამოსაკვლევ სისტემის ჰიდრავლიკური ნაწილების დინამიკის არაწრფივი მოდელი გაწრფივებულ მოიდელებზე გადაყვანას.

საკვლევი სისტემის ჰიდრავლიკური ნაწილების დინამიკის განტოლებების მარჯვენა ნაწილები, რომლებიც ხასიათდებიან რთული ფუნქციონალური დამოკიდებულებებით მათი მწკრივად დაშლისა და პირველი ორი წევრის შენარჩუნების შემდეგ, ვიღებთ მათ გაწრფივებულ გამოსახულებებს და ამის შემდეგ განხილული დინამიკური მოთვალთვალე სისტემის მთლიანი მათემატიკური მოდელი ჩაიწერება შემდეგი ფორმით:

$$\begin{aligned}
m_{u1} \ddot{y}_{u1} + b_{u1} \dot{y}_{u1} + (C_{\delta 1}^* + C_{11}) y_{u1} &= C_{\delta 1}^* (x_{31} - x_p) |\sin \phi| + C_{\delta 1}^* (y_{31} - y_{p\kappa}) |\cos \phi| + \\
&+ C_{\delta 1}^* \cos \gamma_1 R + r(x_{\kappa 1}) + C_{11} y_\kappa + b_{u1} \dot{y}_\kappa + Q_{p1}; \tag{179}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m_{u2} \ddot{y}_{u2} + b_{u2} \dot{y}_{u2} + (C_{\delta 2}^* + C_{12}) y_{u2} &= C_{\delta 2}^* (x_{32} - x_p) |\sin \phi| - C_{\delta 2}^* (y_{31} - y_{p\kappa}) |\cos \phi| - \\
&- C_{\delta 2}^* \cos \gamma_2 R - r(x_{\kappa 2}) + C_{12} y_\kappa + b_{u2} \dot{y}_\kappa - Q_{p2}; \tag{180}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m_\kappa \ddot{y}_\kappa + (b_{u1} + b_{u2}) \dot{y}_\kappa + (C_{11} + C_{12}) y_\kappa + C_2 y_\kappa |\sin^2 \phi| y_\kappa &= \\
= C_{11} y_{u1} - C_{12} y_{u2} + C_2 x_p |\sin \phi| + C_3 (y_\kappa (\cos \phi) - y_p) \cos \phi; \tag{181}
\end{aligned}$$

$$k_r m_p \ddot{x}_p + k_r b_p \dot{x}_p + \frac{k_{\text{жс}}}{k_r} \dot{x}_p + b_{\dot{x}}(t) \dot{x}_p + C_x(t) x_p + b_{\ddot{x}}(t) \ddot{x}_p + b_{x\varepsilon}(t) x_p +$$

$$\begin{aligned}
& + C_{x\varepsilon}(t)x_p + k_{\omega c}k_{v1} \sin^2 \varphi x_p + [k_r f_{mp1} C_\delta |\cos \varphi| + F_{mpx}] \frac{d}{dt} (\text{sign} \dot{x}_p) = \\
& = k_{\omega c}k_{v1} |\sin \varphi| y_\kappa + b_{xy}(t) \dot{y}_\kappa + C_{xy}(t) y_\kappa - C_{mp\varepsilon}(t) \text{sign} \dot{x}_p + C_y(t) \dot{y}_\kappa + b_\kappa \ddot{y}_\kappa + \\
& + k_r \Delta x_3 + k_r \Delta r_3(x_\kappa) |\sin \varphi| + k_r \Delta R_\gamma |\sin \varphi|, \tag{182}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& k_b m_y \ddot{y}_p + k_b b_b \ddot{y}_p + \frac{k_{\omega c}}{k_b} \dot{y}_p + b_y(t) \dot{y}_p + C_y(t) y_p + b_{m\ddot{y}}(t) \ddot{y}_p + b_{y\varepsilon}(t) y_p + \\
& + C_{y\varepsilon}(t) y_p + k_{\omega c} k_{vb} \cos^2 \varphi y_p + [k_b f_{mp1} C_\delta |\sin \varphi| + F_{mpy}] \frac{d}{dt} (\text{sign} \dot{y}_p) = \\
& = k_{\omega c} k_{vb} |\cos \varphi| y_\kappa + b_{y\dot{y}}(t) \dot{y}_\kappa + C_{yy}(t) y_\kappa - C_{mp\varepsilon}(t) \text{sign} \dot{\varepsilon}_y + C_{y\dot{y}}(t) \dot{y}_\kappa + b_\kappa \dot{y}_\kappa + \\
& + k_r \Delta y_3 + k_r \Delta x_3(x_\kappa) \cos \varphi + k_b \Delta R_\gamma |\cos \varphi|. \tag{183}
\end{aligned}$$

სადაც

$$b_x(t) = 2C_1 \sin^2 \varphi + 2C_2 |\sin^3 \varphi| + b_\kappa |\cos \varphi| \dot{\varphi};$$

$$C_x(t) = 2C_1 \sin^2 \varphi + 6C_2 |\sin^3 \varphi| \dot{\varphi};$$

$$C_y(t) = 2(C_2 \sin^2 \varphi + C_1 |\sin \varphi|);$$

$$b_{m\ddot{y}}(t) = A_{m\ddot{y}} \varepsilon(t);$$

$$b_{x\varepsilon}(t) = A_{bx} \varepsilon(t);$$

$$C_{x\varepsilon}(t) = A_{cx} (C_1 \sin^2 \varphi + C_2 |\sin^3 \varphi|) \varepsilon(t);$$

$$b_{xy}(t) = K_b \varepsilon(t);$$

$$C_{xy}(t) = 2K_b b_\kappa (C_1 \sin^2 \varphi + C_2 |\sin^2 \varphi|) \varepsilon(t);$$

$$C_{mp\varepsilon}(t) = \frac{k_r k_{\omega c} k_v}{2 p_n F} [f_{mp} C_\delta (\delta_1 + \delta_2) |\cos \varphi| + F_{mpx}] \varepsilon(t);$$

$$A_{m\ddot{y}} = K_b (m_p + B_2);$$

$$A_{B\dot{x}} = K_b (B_1 + b_p);$$

$$K_b = \frac{k_r k_{\omega c} k_v}{2 p_n F};$$

$$\varepsilon(t) = (y |\sin \varphi| - \sin^2 \varphi x_p);$$

$$C_y(t) = 2(C_2 \sin^2 \varphi + C_1 |\sin \varphi|);$$

$$C_\varphi(t) = f_p C_\delta (\delta_{1\Delta} \sin \gamma_1 + \delta_{2\Delta} \sin \gamma_2) |\sin \varphi| = f_p C_\delta \delta_{\Delta\gamma} |\sin \varphi|.$$

$$\begin{aligned}
b_y(t) &= 2C_1 \cos^2 \varphi + 2C_2 |\cos^3 \varphi| + b_\kappa |\sin \varphi| \varphi; \\
C_y(t) &= 2C_1 \cos^2 \varphi + 6C_2 |\cos^3 \varphi| \varphi; \\
C_{y\varepsilon}(t) &= A_{cy} (C_1 \cos^2 \varphi + C_3 |\cos \varphi|) \varepsilon_y(t); \\
b_{my}(t) &= A_{my} \varepsilon_y(t); \\
b_{y\varepsilon}(t) &= A_{by} \varepsilon_y(t); \\
C_{yy}(t) &= 2K_b b (C_1 \cos^2 \varphi + C_3 |\cos^3 \varphi|) \varepsilon_y(t); \\
C_{mpy}(t) &= \frac{k_b k_{\text{жс}} k_{yb}}{2 p_n F_b} [f_{mp} C_\delta (\delta_1 + \delta_2) |\cos \varphi| + F_{mpy}] \varepsilon_y(t); \\
A_{my} &= K_b (m_y + B_2); \\
A_{By} &= K_b (B_1 + b_{py}); \\
\varepsilon_y(t) &= (y_\kappa |\cos \varphi| - y_p).
\end{aligned}$$

ცნობილი მეთოდოლოგიების თანახმად საჭიროა გასაშუალებებულ დინამიკურ მოდელებზე გადასვლა, გამოვიყენოთ აღნიშნული რეალიზაციისათვის დამოკიდებულებები.

$$\begin{aligned}
\cos^2 &= 0,5 + 0,5 \cos 2\varphi; \\
|\sin \varphi| &\approx a_{\varphi\kappa} - a_{\varphi\kappa 1} \cos 2\varphi; \\
|\cos \varphi| &\approx a_{\varphi\kappa} + a_{\varphi\kappa 1} \cos 2\varphi; \\
|\sin^3 \varphi| &\approx a_{\varphi\kappa 0} - a_{\varphi\kappa 1} \cos 2\varphi a_{\varphi\kappa 2} - \cos 4\varphi; \\
|\sin^3 \varphi| |\sin \varphi| &= 0,375 - 0,5 \cos 2\varphi + 0,125 \cos 4\varphi; \\
|\sin^3 \varphi| \sin^2 \varphi &= (0,5a_{\varphi\kappa 1}^2 + 0,5a_{\varphi\kappa 0}) - (0,5a_{\varphi\kappa 1} + 0,5a_{\varphi\kappa 0} + 0,25a_{\varphi\kappa 2}) \cos 2\varphi - \\
&\quad - (0,5a_{\varphi\kappa 2} - 0,5a_{\varphi\kappa 1}^2) \cos 4\varphi + 0,25a_{\varphi\kappa 2} \cos 6\varphi,
\end{aligned}$$

სადაც

$$\begin{aligned}
0a_{\varphi\kappa 0} &= 0,5a_{\varphi\kappa} + 0,25a_{\varphi\kappa 1}; \\
a_{\varphi\kappa 1} &= 0,5(a_{\varphi\kappa} + a_{\varphi\kappa 1}); \\
a_{\varphi\kappa 2} &= 0,5a_{\varphi\kappa 1}.
\end{aligned}$$

გარდაქმნების საფუძველზე მივიღებთ:

$$b_{m\ddot{x}}(t) = A_{m\ddot{x}} a_{\varphi s} y_{\kappa} - 0,5A_{m\ddot{x}} x_p - A_{m\ddot{x}} a_{\varphi s1} \cos 2\varphi y_{\kappa} + 0,5A_{m\ddot{x}} \cos 2\varphi x_p; \quad (184)$$

$$b_{\dot{x}\varepsilon}(t) = A_{b\dot{x}\varepsilon} a_{\varphi s} y_{\kappa} - 0,5A_{b\dot{x}\varepsilon} x_p - A_{\varphi\ddot{x}} a_{\varphi s1} \cos 2\varphi + 0,5A_{b\dot{x}\varepsilon} \cos 2\varphi; \quad (185)$$

$$C_{x\varepsilon}(t) = A_{c_{xy}0} y_{\kappa} - A_{c_{xy}1} \cos 2\varphi y_{\kappa} - A_{c_{xy}2} \cos 4\varphi y_{\kappa} - A_{c_{xx}0} x_p + \\ + A_{c_{xx}1} \cos 2\varphi x_p - A_{c_{xx}2} \cos 4\varphi x_p - A_{c_{xx}3} \cos 6\varphi x_p; \quad (186)$$

$$b_{\ddot{x}}(t) = a_{b_{x0}} - a_{b_{x1}} \cos 2\varphi - a_{b_{x2}} \cos 4\varphi; \quad (187)$$

$$C_y(t) = C_{y0} - C_{y1} \cos 2\varphi; \quad (188)$$

$$C_x(t) = C_{x0} - C_{x2} \cos 2\varphi - C_{x2} \cos 4\varphi; \quad (189)$$

$$b_{x\dot{y}}(t) = K_{\varepsilon} b_{\kappa} (y_{\kappa} |\sin \varphi| - \sin^2 \varphi x_p) \approx K_{\varepsilon} b_{\kappa} \varepsilon_{cp}; \quad (190)$$

$$C_{xy}(t) \approx K_{\varepsilon} \varepsilon_{cp} (2C_1 a_{\varphi s} - C_2) + K_{\varepsilon} \varepsilon_{cp} (C_2 - 2C_1) \cos 2\varphi; \quad (191)$$

$$C_{mp\varepsilon}(t) \approx \frac{1}{2} K_{\varepsilon} [f_{mp} C_{\delta} \delta_{\Sigma} a_{\varphi s} + F_{mpx}] \varepsilon_{cp}; \quad (192)$$

$$C_y(t) = C_{y0} - C_{y1} \cos 2\varphi; \quad (193)$$

$$C_{\varphi}(t) = C_{\varphi0} - C_{\varphi1} \cos 2\varphi; \quad (194)$$

$$C_{y0} = 2(0,5C_2 + a_{\varphi c} C_1);$$

$$b_{x0} = C_1 + C_2 a_{\varphi s} + 0,5C_2 a_{\varphi s1};$$

$$b_{x2} = 0,5C_2 a_{\varphi s1};$$

$$A_{c_{xy}0} = A_{cx} (C_1 a_{\varphi s0} + 0,375C_2);$$

$$A_{c_{xy}1} = A_{cx} (C_1 a_{\varphi s1} - 0,5C_2);$$

$$A_{c_{xx}0} = A_{cx} [0,375C_1 + C_2 (0,5a_{\varphi s1}^2 + 0,5a_{\varphi s0})];$$

$$a_{b_{x0}} = C_1 + C_2 a_{\varphi s} + 0,5C_2 a_{\varphi s1} + b_{\kappa} a_{\varphi c} \dot{\varphi};$$

$$a_{b_{x1}} = C_1 + C_2 (a_{\varphi s} + a_{\varphi s1}) - b_{\kappa} a_{\varphi c1} \dot{\varphi};$$

$$a_{b_{x2}} = 0,5C_2 a_{\varphi s1};$$

$$C_{y1} = 2(0,5C_2 + a_{\varphi s1} C_1);$$

$$C_{x0} = C_1 + 3b_{\kappa} (a_{\varphi s} + 0,5a_{\varphi s1}) \dot{\varphi};$$

$$C_{x1} = C_1 - [3a_{\varphi s} + 3a_{\varphi s1}] b_{\kappa} \dot{\varphi};$$

$$C_{x2} = 1,5a_{\varphi s1} b_{\kappa} \dot{\varphi};$$

$$A_{c_{xx}1} = A_{cx} [0,5C_1 + C_2 (0,5a_{\varphi s1} + 0,5a_{\varphi s0} + 0,25a_{\varphi s2})];$$

$$A_{cx2} = A_{cx} C_1 [0,125 - (0,5a_{\varphi s1} - 0,5a_{\varphi s q}^2)];$$

$$A_{cx3} = 0,25 A_{cx} C_2 a_{\varphi s2}.$$

დამატებითი გამარტივებების შედეგად შეგვიძლია ჩავწერთ:

$$b_{m\ddot{x}}(t) \approx b_{m\ddot{x}0} = A_{m\ddot{x}} \varepsilon_{cp}; \quad (195)$$

$$b_{\dot{x}}(t) \approx b_{\dot{x}0} = A_{b\dot{x}} \varepsilon_{cp}; \quad (196)$$

$$C_{x\varepsilon}(t) \approx C_{\varepsilon 0} - C_{\varepsilon 1} - C_{\varepsilon 0} \cos 2\varphi + C_{\varepsilon 2} \cos 4\varphi, \quad (197)$$

სადაც,

$$C_{\varepsilon 0} = A_{cx} \varepsilon_{cp} (0,5C_1 - a_{\varphi s0} C_2);$$

$$C_{\varepsilon 1} = A_{cx} \varepsilon_{cp} (0,5C_1 - a_{\varphi s1} C_2);$$

$$C_{\varepsilon 3} = A_{cx} \varepsilon_{cp} C_2 a_{\varphi s2}.$$

საბოლოო სახით გასაშუალებებული სისტემა ჩაიწერება ასე:

$$m_{u1} \ddot{y}_{u1} + b_{u1} \dot{y}_{u1} + C_{*1} y_{u1} = C_{\delta 1}^* x_{s1} |\sin \varphi| - C_{y1} x_p + C_{p1}(x_{k1}) + r_3(x_{k1}) + C_{11} y_k + b_{u1} \dot{y}_k + f_p C_{\delta} \delta_{1*} |\sin \varphi|; \quad (198)$$

$$m_{u2} \ddot{y}_{u2} + b_{u2} \dot{y}_{u2} + C_{*2} y_{u2} = C_{\delta 1}^* x_{s2} |\sin \varphi| - C_{y1}^* x_p - C_{p2}(x_{k2}) - r_3(x_{k2}) + C_{11} y_k + b_{u1} \dot{y}_k - f_p C_{\delta} \delta_{2*} |\sin \varphi|; \quad (199)$$

$$m_{\kappa} \ddot{y}_{\kappa} + b_{\kappa} \dot{y}_{\kappa} + C_{\kappa} y_{\kappa} = C_{\delta} (f_{\kappa} + f_{\kappa}) |\sin \varphi| - C_{y0} x_p; \quad (200)$$

$$m_p \ddot{x}_p + b_{px} \dot{x}_p + k_{no} \dot{x}_p + (C_{x0} + 0,5k_{\omega} k_{v1} - C_{\varepsilon 0}) x_p + (k_r f_{mp} C_{\delta} \delta_{\Delta \Sigma} a_{\varphi c} + F_{mpx}) \frac{d}{dt} (\text{sign} \dot{x}_p) + \frac{1}{2} K_b (f_{mp} C_{\delta} \delta_{\Delta \Sigma} a_{\varphi c} + F_{mpx}) \varepsilon_{cp} \text{sign} \dot{x}_p = k_{\omega} k_{v1} a_{\varphi s} y_{\kappa} + C_{y0} \dot{y}_{\kappa} + b_{\kappa} \ddot{y}_{\kappa}, \quad (201)$$

$$m_y \ddot{y}_p + b_{py} \dot{y}_p + k_{no\phi} + (C_{y0}^y + 0,5k_{u1} k_{v\phi} - d_s - C_{\varepsilon y0}) y_p + (k_r f_{mp} C_{\delta} \delta_{\Delta \Sigma} a_{\varphi c} + F_{mpx}) \frac{d}{dt} (\text{sign} \dot{x}_p) + \frac{1}{2} K_b (f_{mp} C_{\delta} \delta_{\Delta \Sigma} a_{\varphi c} + F_{mpx}) \varepsilon_{cp} \text{sign} \dot{x}_p = k_{\omega} k_{v1} a_{\varphi s} y_{\kappa} + C_{y0} \dot{y}_{\kappa} + b_{\kappa} \ddot{y}_{\kappa}, \quad (202)$$

სადაც

$$C_{y0}^{\phi} = 2(0,5C_3 - a_{\varphi 0} C_3);$$

$$C_{\varepsilon y0} = A_{cy} (0,5C_1 - a_{\varphi \varepsilon 0} C_3);$$

$$C_k = 2(C_\delta + C_1) + 2C_2 a_{\varphi_3};$$

$$k_{n0} = \frac{k_{\omega c}}{k_r} + a_{bx};$$

$$k_{n0B} = \frac{k_{\omega c}}{k_r} + a_{by}.$$

შეგვიძლია აღვნიშნავთ, რომ გასაშუალებებული, სისტემის ამოხსნისათვის საჭიროა აგრეთვე გათვალისწინებული იქნეს შემდეგი ალგებრული ტრანსცენდენტური განტოლებების განხილვა:

$$z_{\kappa 1} = z_{u0} + (R - \delta_1) \sin \gamma_1; \quad (203)$$

$$z_{\kappa 2} = z_{u0} + (R - \delta_2) \sin \gamma_2. \quad (204)$$

2.4. ჰიდრომექანიკური მოთვალთვალე სისტემის დინამიკური კვლევა

2.4.1. დინამიკური სტრუქტურული სქემა და სისტემის გადამცემი ფუნქციები

იმ შემთხვევაში, როდესაც საქმე გვაქვს რეგულირების სტაციონარულ (გასაშუალებებულ) სისტემასთან ნაცვლად ზემოთმოყვანილი დამოკიდებულებებისა შეიძლება გამოყენებულნი იქნან შემდეგი საწყისი დამოკიდებულებები:

$$\frac{\partial \Pi_{\delta 1}}{\partial y_{u1}} = -\frac{1}{\cos^2 \gamma_1} \left[(x_3 - x_p) \sin \varphi_c + (y_3 - y_{px}) \cos \varphi_c + R \cos \gamma_1 + r_3 - y_{u1} \right] C_\delta, \quad (205)$$

$$\frac{\partial \Pi_{\delta 2}}{\partial y_{u2}} = -\frac{1}{\cos^2 \gamma_2} \left[(x_3 - x_p) \sin \varphi_c + (y_3 - y_{px}) \cos \varphi_c - R \cos \gamma_2 - r_3 - y_{u2} \right] C_\delta. \quad (206)$$

აქ და ყველა შემდგომ დამოკიდებულებებში $\varphi(t)$ -ს ნაცვლად შემოგვაქვს φ_c აღინიშნება, სადაც φ_c - წარმოადგენს $\varphi(t)$ -ს გარკვეულ ფიქსირებულ მნიშვნელობას. ამასთან ერთად შეგვიძლია ჩავწეროთ

$$R \cos \gamma_1 = R \cos \gamma_2 = R.$$

აღნიშნულის თანახმად საკვლევი სისტემის მათემატიკური მოდელი მიიღებს სახეს:

$$m_{u1} \ddot{y}_{u1} + b_{u1} \dot{y}_{u1} + (C_{\delta 1} + C_{11}) y_{u1} = C_{\delta 1} (x_{31} - x_p) \sin \varphi_c +$$

$$+C_{\delta 1}(y_{31}-y_{px})\cos \varphi_c+C_{11}y_k+b_{u1}\dot{y}_k+Q_{p1}; \quad (207)$$

$$m_{u2}\ddot{y}_{u2}+b_{u2}\dot{y}_{u2}+(C_{\delta 2}+C_{12})y_{u2}=C_{\delta 2}(x_{32}-x_p)\sin \varphi_c+ \\ +C_{\delta 2}^*(y_{32}-y_{px})\cos \varphi_c+C_{12}y_k+b_{u2}\dot{y}_k+Q_{p2}; \quad (208)$$

$$m_{\kappa}\ddot{y}_{\kappa}+(b_{u1}+b_{u2})\dot{y}_{\kappa}+(C_{11}+C_{12})y_{\kappa}+C_2y_{\kappa}\sin^2 \varphi_c= \\ =C_{11}y_{u1}-C_{12}y_{u2}+C_2x_p\sin \varphi_c+C_3y_p\cos \varphi_c; \quad (209)$$

$$m_{px}\ddot{x}_p+(b_{px}+2b_k\sin \varphi_c)\ddot{x}_p+2(C_1\sin \varphi_c+C_2)\dot{x}_p+ \\ +k_{\omega c}(\dot{x}_p)+2(C_1\sin \varphi_c+C_2)\dot{x}_p\frac{k_{\omega c}k_v}{P_n F}B_1\varepsilon\dot{x}_p+k_{\omega c}k_vx_p+ \\ +\frac{k_{\omega c}k_v}{P_n F}(C_1\sin \varphi_c+C_2)y_{\kappa}x_p+F_{mpx}\frac{d}{dt}\operatorname{sign}\dot{x}_p+\frac{F_{mpx}k_{\omega c}k_v}{P_n F}\operatorname{sign}\dot{x}_p= \\ =k_{\omega c}k_vy_{\kappa}\sin \varphi_c+\frac{k_{\omega c}k_v}{P_n F}(C_1\sin \varphi_c+C_2)x_py_{\kappa}+\frac{k_{\omega c}k_v}{P_n F}(C_1\sin \varphi_c-C_2)\dot{y}_{\kappa}^2+ \\ +2(C_1\sin \varphi_c+C_2)\dot{y}_{\kappa}\sin \varphi+2b_{\kappa}\ddot{y}_{\kappa}\sin \varphi_c. \quad (210)$$

$$m_{py}\ddot{y}_p+(b_y+2b_k\cos \varphi_c)\ddot{y}_p+2(C_1\cos \varphi_c+C_3)\dot{y}_p+ \\ +k_{\omega cy}\dot{y}_p+2(C_1\cos \varphi_c+C_3)\dot{y}_p\frac{k_{\omega cy}k_{vy}}{P_n F}B_1\varepsilon_y\dot{y}_p+k_{\omega cy}k_{vy}x_p+ \\ +\frac{k_{\omega cy}k_{vy}}{P_{ny} F_y}(C_1\cos \varphi_c+C_3)y_{\kappa}x_p+F_{mpy}\frac{d}{dt}\operatorname{sign}\dot{y}_p+\frac{F_{mpy}k_{\omega cy}k_{vy}}{P_{ny} F_y}\operatorname{sign}\dot{y}_p= \\ =k_{\omega cy}k_{vy}y_{\kappa}\cos \varphi_c+\frac{k_{\omega cy}k_{vy}}{P_{ny} F_y}(C_1\cos \varphi_c+C_3)y_p y_{\kappa}+\frac{k_{\omega cy}k_{vy}}{P_{ny} F_y}(C_1\cos \varphi_c-C_3)\dot{y}_{\kappa}^2+ \\ +2(C_1\cos \varphi_c+C_2)\dot{y}_{\kappa}\sin \varphi+2b_{\kappa}\ddot{y}_{\kappa}\cos \varphi_c. \quad (211)$$

განხილული განტოლებების გაწრფივებულ სტაციონარულ ფორმას აქვს შემდეგი სახე

$$m_{u1}\ddot{y}_{u1}+b_{u1}\dot{y}_{u1}+(C_{\delta 1}+C_{11})y_{u1}=C_{\delta 1}(x_{31}-x_p)\sin \varphi_c+ \\ +C_{\delta 1}(y_{31}-y_{px})\cos \varphi_c+C_{11}y_k+b_{u1}\dot{y}_k; \quad (212)$$

$$m_{u2}\ddot{y}_{u2}+b_{u2}\dot{y}_{u2}+(C_{\delta 2}+C_{12})y_{u2}=C_{\delta 2}(x_{32}-x_p)\sin \varphi_c+ \\ +C_{\delta 1}(y_{31}-y_{px})\cos \varphi_c+C_{11}y_k+b_{u2}\dot{y}_k; \quad (213)$$

$$m_{\kappa}\ddot{y}_{\kappa}+b_{u\varepsilon}\dot{y}_{\kappa}+2C_1y_{\kappa}=C_{\varepsilon}y_{u1}+C_2x_p\sin \varphi_c+C_3y_p\cos \varphi_c; \quad (214)$$

$$m_{px}\ddot{x}_p+(b_{px}+2b_x\sin \varphi_c)\ddot{x}_p+[k_{\omega c}+2(C_1\sin \varphi_c+C_2)]\dot{x}_p+$$

$$\begin{aligned}
+k_{\kappa c} k_{\nu} x_p &= k_{\kappa c} k_{\nu} y_{\kappa} \sin \varphi_c + 2(C_1 \sin \varphi_c + C_2) \sin \varphi_c \dot{y}_{\kappa} + 2b_{\kappa} \sin \varphi_c \ddot{y}_{\kappa} . \\
m_y \ddot{y}_p + (b_{yp} + 2b_{\kappa} \sin \varphi_c) \dot{y}_p + [k_{\kappa cy} + 2(C_1 \cos \varphi_c + C_3)] y_p + \\
+k_{\kappa cy} k_{\nu y} y_p &= k_{\kappa cy} k_{\nu y} y_{\kappa} \cos \varphi_c + 2(C_1 \cos \varphi_c + C_3) \cos \varphi_c \dot{y}_{\kappa} + 2b_{\kappa} \cos \varphi_c \ddot{y}_{\kappa} . \quad (215)
\end{aligned}$$

უფრო გაერთიანებული სახით შემდგომ კვლევებში თუ დავუშვებთ, რომ საქმე გვაქვს მუდმივი კვეთის მქონე დეტალის გადაადგილებასთან φ_c კუთხის მიმართულებით O_0x_0 ღერძის მიმართ, შეგვიძლია შემოვიტანოთ შემდეგი ტოლობები:

$$C_{11} = C_{12} = C, \quad m_{u1} = m_{u2} = m_u \quad \text{და} \quad y_{u1} = y_{u2} = y_u$$

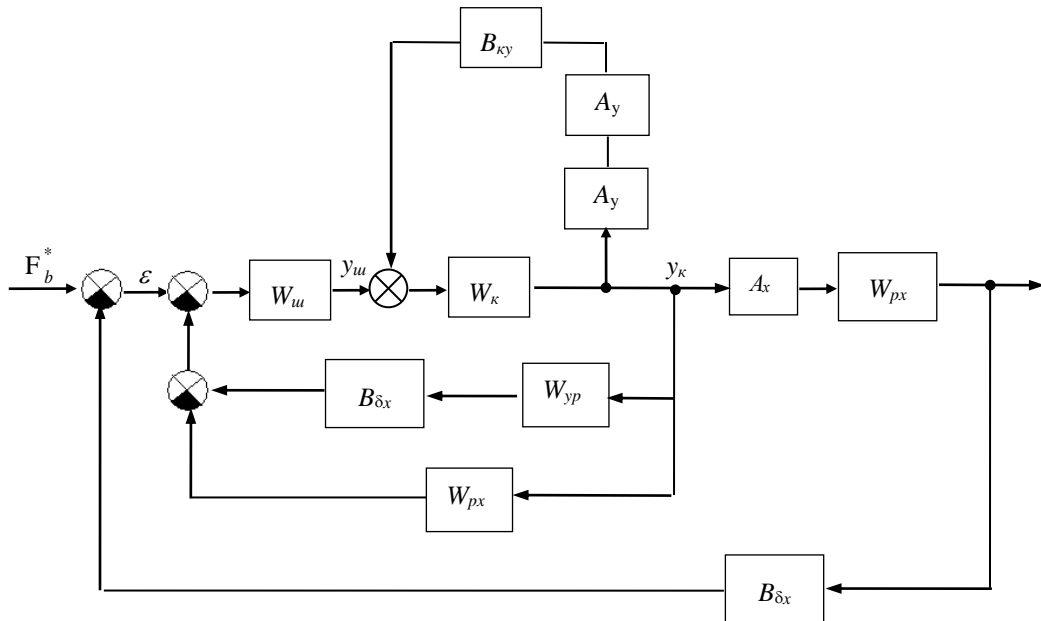
და განტოლებები (212) და (213) უმჯობესია ჩავანაცვლოთ ერთი განტოლებით:

$$\begin{aligned}
m_{\varepsilon u} \ddot{y}_u + b_{\varepsilon u} \dot{y}_u + C_{u\varepsilon} y_u &= 2C_{\delta} F_{bx} - 2C_{\delta} x_p \sin \varphi_0 - \\
-2C_{\delta} y_{p^*} \cos \varphi_c + 2C_1 y_{\kappa} + 2b_{u\kappa} y_{\kappa} , \quad (216)
\end{aligned}$$

სადაც

$$F_{bx} = C_{\delta} F_{bx0} (\sin^2 \varphi_c + \cos^2 \varphi_c) .$$

აღნიშნულთან დაკავშირებით ზემოთ მოყვანილი გაწორფიებული სისტემის სტრუქტურული სქემა შეგვიძლია წარმოვიადგინოთ ნახ. 13 მოყვანილი სახით



ნახ. 13. გაწორფიებული სისტემის სტრუქტურული სქემა

სადაც:

$$W_{uu} = \frac{1}{m_{\varepsilon u} s^2 + b_{\varepsilon u} s + C_{\varepsilon u}} ; \quad (217)$$

$$W_{\kappa} = \frac{1}{m_{\varepsilon u} s^2 + b_{u\varepsilon} s + 2C_1} ; \quad (218)$$

$$W_{puu} = 2v_{uu} s + 2C_1 ; \quad (219)$$

$$F_b^* = 2C_{\delta} F_{bx} ;$$

$$B_{\delta x} = 2C_{\delta} \sin \varphi_c ;$$

$$B_{\delta y} = 2C_{\delta} \cos \varphi_c ;$$

$$A_y = k_{\varkappa y} k_{\nu y} \cos \varphi_c$$

$$A_x = k_{\varkappa x} k_{\nu x} \sin \varphi_c ;$$

$$B_{\varkappa y} = \frac{C_3}{C_{\varepsilon}} \cos \varphi_c ;$$

$$B_{\varkappa x} = \frac{C_2}{C_{\varepsilon}} \sin \varphi_c .$$

თავის მხრივ

$$W_{xp} = \frac{1}{m_{pc} s^3 + a_{pc} s^2 + b_{cx} s + k_{\varkappa x} k_{\nu x}} ; \quad (220)$$

$$W_{yp} = \frac{1}{m_{py} s^3 + a_{py} s^2 + b_{cy} s + k_{\varkappa y} k_{\nu y}} ; \quad (221)$$

სადაც:

$$a_{px} = b_{px} + 2b_{\kappa} \sin \varphi_c ;$$

$$b_{cx} = k_{\varkappa x} + 2(C_1 \sin \varphi_c + C_2) ;$$

$$a_{py} = b_{py} + 2b_{\kappa} \sin \varphi_c ;$$

$$b_{cy} = k_{\varkappa y} + 2(C_1 \cos \varphi_c + C_3) ;$$

$$d_{px} = 2(C_1 \sin \varphi_c + C_2) \sin \varphi_c ;$$

$$d_{py} = 2(C_1 \cos \varphi_c + C_3) \cos \varphi_c .$$

გადავდივართ საკვლევი სისტემის მთლიანი გადამცემი ფუნქციის აგებაზე. ამისათვის თავდაპირველად ვსაზღვრავთ შუალედურ გადამცემ ფუნქციებს:

$$W_I = \frac{W_{\kappa}}{1 - W_{\kappa} W_{yp} B_{\kappa y} A_y};$$

$$W_{II} = B_{\delta y} W_{yp} - W_{pu};$$

$$W_{III} = \frac{W_I W_{uu}}{1 + W_I W_{uu} W_{II}}.$$

ამიტომ საერთო გადამცემი ფუნქცია ჩაიწერება ასე:

$$W_{ob} = \frac{W_{III} A_x W_{px}}{1 + W_{III} A_x W_{px} B_{\delta x}}. \quad (222)$$

გამოიღო სახით ვწერთ:

$$W_I(s) = \frac{C_{\Sigma} (m_{py} s^3 + a_{py} s^2 + b_{cy} s + b_{uu} k_{oy})}{a_{15} s^5 + a_{14} s^4 + a_{13} s^3 + a_{12} s^2 + a_{11} s + a_{10*}}, \quad (223)$$

სადაც

$$a_{15} = m_{\kappa} m_{py};$$

$$a_{14} = m_{\kappa} a_{py} + b_{uu} m_{py};$$

$$a_{13} = m_{\kappa} a_{cy} + b_{uu} a_{py} + 2C_1 m_{py};$$

$$a_{12} = m_{\kappa} k_{\kappa c} k_{vy} + b_{uu} a_{cp} + 2C_1 a_{py};$$

$$a_{11} = b_{uu} k_{\kappa c} k_{vy} + 2C_1 b_{cy};$$

$$a_{10*} = 2C_1 k_{\kappa c} a_{vy} - B_{\kappa y} A_y C_{\Sigma}.$$

რომელიც თავის მხრივ ჩაიწერება ასე

$$W_{II} = B_{\delta y} W_{yp} - W_{pu} = \frac{a_{24} s^4 + a_{23} s^3 + a_{21} s^2 + a_{21} s + a_{20*}}{m_{py} s^3 + a_{py} s^2 + ab_{vy} s^3 + b_{uy} k_{vy}}, \quad (224)$$

რომელშიდაც

$$a_{24} = 2b_{uu} m_y;$$

$$a_{23} = 2b_{uu} a_{py} + 2C_1 m_{py};$$

$$a_{22} = 2b_{uu} b_{cy} + 2C_1 a_{py};$$

$$a_{21} = 2b_{uu} b_{\kappa cy} + 2C_1 b_{c1};$$

$$a_{20} = 2C_1 k_{\kappa cy} k_{vy} - 2b_{\delta y}.$$

გადავდივართ გადამცემ ფუნქციაზე:

$$W_{III} = \frac{W_I W_{II}}{1 + W_I W_{II}} = \frac{C_{\Sigma}(m_{py}s^3 + a_{py}s^2 + b_{cy}s + b_{uy}k_{oy})}{A_7s^7 + A_6s^6 + A_5s^5 + A_{4*}s^4 + A_{3*}s^3 + A_{2*}s^2 + A_{1*}s + A_{0*}}, \quad (225)$$

სადაც

$$A_7 = m_{\Sigma u} a_{15};$$

$$A_6 = a_{14} m_{\varepsilon u} + a_{15} b_{\varepsilon u};$$

$$A_5 = a_{13} m_{\varepsilon u} + a_{14} b_{\varepsilon u} + a_{15} C_{\varepsilon u};$$

$$A_4 = a_{12} m_{\varepsilon u} + a_{13} b_{\varepsilon u} + a_{14} C_{\varepsilon u};$$

$$A_3 = a_{11} m_{\varepsilon u} + a_{12} b_{\varepsilon u} + a_{13} C_{\varepsilon u};$$

$$A_{4*} = A_4 - a_{24};$$

$$A_{3*} = A_3 - a_{23};$$

$$A_{2*} = A_2 - a_{22};$$

$$A_{1*} = A_1 - a_{11};$$

$$A_{0*} = A_0 - a_{20}.$$

ზემოთ მოყვანილების თანახმად:

$$W_{ob}(s) = \frac{W_{III} A_* W_{pc}}{1 + W_{III} A_x W_{pc} B_{\delta*}} = \frac{B_{0b}(s)}{A_{0b}(s)}. \quad (226)$$

გაშლილი სახით გვექნება:

$$W_{od} = \frac{C_{\varepsilon} A_* (m_{py}s^3 + a_{py}s^2 + b_{cy}s + b_{uy}k_{oy})}{(D_{10}s^{10} + D_9s^9 + D_8s^8 + D_7s^7 + D_6s^6 + D_5s^5 + D_4s^4 + D_3s^3 + D_2s^2 + D_1s + D_0) + \frac{B_{op}(s)}{A_{ob}(s)}}, \quad (227)$$

სადაც:

$$D_{10} = A_7 m_{px};$$

$$D_9 = A_6 m_{px} + A_7 a_{px};$$

$$D_8 = A_5 m_{px} + A_6 a_{px} + A_7 b_{cx};$$

$$D_7 = A_{4*} m_{px} + A_5 a_{px} + A_6 b_{c1} + A_7 k_{\varkappa} k_v;$$

$$D_6 = A_{3*} m_{px} + A_{4*} a_{px} + A_5 b_{cx} + A_6 k_{\varkappa} k_v;$$

$$D_5 = A_{2*}m_{px} + A_{3*}a_{px} + A_{4*}b_{cx} + A_{5*}k_{\text{მკ}}k_v;$$

$$D_4 = A_{1*}m_{px} + A_{2*}a_{px} + A_{3*}b_{cx} + A_{4*}k_{\text{მკ}}k_v;$$

$$D_2 = A_{0*}m_{px} + A_{1*}a_{px} + A_{2*}b_{cx} + A_{3*}k_{\text{მკ}}k_v;$$

$$D_1 = A_{0*}b_{2*} + A_{1*}k_{\text{მკ}}k_v$$

$$D_0 = A_{0*}k_{\text{მკ}}k_v.$$

თავის მხრივ:

$$B_{ob}(s) = C_{\varepsilon}A_x(m_{py}s^3 + a_{py}s^2 + b_{cy}s + k_{\text{მკ}}k_{vy});$$

$$A_{ob}(s) = D_{10}s^{10} + D_9s^3 + D_8s^8 + D_7s^7 + D_6s^6 + D_5s^5 + D_4s^4 + \\ + D_{3*}s^3 + D_{2*}s^2 + D_{1*}s + D_{0*},$$

სადაც:

$$D_{3*} = D_3 + A_{*}B_{\delta*}C_{\varepsilon}m_{py};$$

$$D_{2*} = D_2 + A_{*}B_{\delta*}C_{\varepsilon}a_{py};$$

$$D_{1*} = D_1 + A_{*}B_{\delta*}C_{\varepsilon}b_{cy};$$

$$D_{0*} = A_{0*}k_{\text{მკ}}k_v + A_{*}B_{\delta*}C_{\varepsilon}k_{\text{მკ}}k_{vy}.$$

პოლინომის $A_{ob}(s)$ კვლევის შედეგად შეგვიძლია ჩავატაროთ დინამიკური მდგრადობის ანალიზი.

თუ განვიხილავთ წარმოდგენილი სამკოორდინატიან კოპირებას სისტემის კვლევის საკითხებს მისი ფუნქციონირებისას ორკოორდინატიანი კოპირების პროცესში სისტემის სტაციონარიზებული მოდელის საწყისი დამოკიდებულები გამოისახებიან ასე:

$$\frac{\partial \Pi_{\delta_1}}{\partial y_{u1}} = \frac{1}{\cos^2 \gamma_1} [(x_3 - x_p) + R \cos \gamma_1 - r_3 - y_{u1}] C_{\delta}; \quad (228)$$

$$\frac{\partial \Pi_{\delta_2}}{\partial y_{u2}} = \frac{1}{\cos^2 \gamma_2} [-(x_3 - x_p) + R \cos \gamma_2 - r_3 - y_{u1}] C_{\delta}; \quad (229)$$

$$\frac{\partial \Pi_{c_2}}{\partial y_k} = C_2 (x_k - x_p); \quad (230)$$

$$\frac{\partial \Pi_{c_2}}{\partial x_p} = -C_2 (x_k - x_p);$$

$$\frac{\partial \Pi_{c_{11}}}{\partial y_{u1}} = C_1 (y_{u1} - y_k);$$

$$\frac{\partial \Pi_{c_{12}}}{\partial y_{u1}} = C_1 (y_{u2} - y_k).$$

აქვე გვექნება

$$2(C_1 + C_2)\dot{x}_p - 2(C_1 + C_2)\dot{y}_k;$$

$$2b_k\ddot{x}_p - 2b_k\ddot{y}_k;$$

$$\frac{k_{\omega}k_{v1}}{p_n F} \varepsilon(C_1 + C_2)x_p; \quad \frac{k_{\omega}k_{v1}}{p_n F} (C_1 + C_2)\varepsilon y_k.$$

$$\frac{k_{\omega}k_{v1}}{2p_n F} (m_p + B_2)\varepsilon \ddot{x}_p \quad \text{და} \quad \frac{k_{\omega}k_{v1}}{2p_n F} B_1\varepsilon \dot{x}_p.$$

აღნიშნულების თანახმად ვიღებთ დინამიკის განტოლებებს:

$$m_{u1}\ddot{y}_{u1} + b_{u1}\dot{y}_{u1} + C_{u2}y_{u2} = C_{\delta 2}^*x_3 - C_{\delta 1}^*x_p + C_{\delta} + C_1y_k + b_{u1}\dot{y}_k + f_p C_{\delta}\delta_{1*}; \quad (231)$$

$$m_{u2}\ddot{y}_{u2} + b_{u2}\dot{y}_{u2} + C_2y_{u2} = C_{\delta 2}^*x_3 - C_{\delta 2}^*x_p + (C_{\kappa} - r_{32})C_{\delta} + C_1y_k + b_{u1}\dot{y}_k + f_p C_{\delta}\delta_{1*}; \quad (232)$$

$$m_{px}\ddot{x}_p + (b_{px} + 2b_{\kappa})\ddot{x}_p + [k_{\omega cx} + 2(C_1 + C_2)]\dot{x}_p + \frac{k_{\omega}k_{v1}}{p_n F} (m_p + B_2)\varepsilon\ddot{x}_p + \frac{k_{\omega}k_{v1}}{p_n F} B_1\varepsilon\dot{x}_p + k_{\omega}k_{v1}x_p + \frac{k_{\omega}k_{v1}}{p_n F} (C_1 + C_2)x_p^2 + \frac{k_{\omega}k_{v1}}{p_n F} (C_1 + C_2)y_kx_p + F_{mpx} \frac{d}{dt} (\text{sign}\dot{x}_p) + \frac{F_{mpx}k_{\omega}k_{v1}}{p_n F} \text{sign}\dot{x}_p = k_{\omega}k_{v1}y_k + \frac{k_{\omega}k_{v1}}{p_n F} (C_1 + C_2)x_p y_k + \frac{k_{\omega}k_{v1}}{p_n F} (C_1 + C_2)y_k^2 + 2(C_1 + C_2)\dot{y}_k + 2b_{\kappa}\ddot{y}_k. \quad (233)$$

გაწრფივების პროცესის ჩატარების შემდეგ გვექნება:

$$m_{u1}\ddot{y}_{u1} + b_{u1}\dot{y}_{u1} + C_{*1}y_{u1} = C_{\delta}^*x_{g1} - C_{\delta}^*x_p + (C_{R1} + r_{31})C_{\delta} - C_1y_k - b_{u1}\dot{y}_k; \quad (234)$$

$$m_{u2}\ddot{y}_{u2} + b_{u1}\dot{y}_{u2} + C_{*1}y_{u2} = C_{\delta}^*x_3 - C_{\delta}^*x_p + (C_{R2} + r_{32})C_{\delta} - C_3y_k - b_{u3}\dot{y}_k; \quad (235)$$

$$m_{\kappa}\ddot{y}_{\kappa} + b_{\kappa}\dot{y}_{\kappa} + C_{\kappa}y_{\kappa} = C_{u1}y_{u1} - C_{u2}y_{u2} - C_2\dot{x}_p - C_2y_k; \quad (236)$$

$$m_{px}\ddot{x}_p + (b_{px} + 2b_{\kappa})\ddot{x}_p + [k_{\omega cx} + 2(C_1 + C_2)]\dot{x}_p + k_{\omega}k_{v1}x_p = k_{\omega}k_{v1}y_k + 2(C_1 + C_2)\dot{y}_k + 2b_{\kappa}\ddot{y}_k. \quad (237)$$

რაც გამსხვილებული სახით შეიძლება წარმოვიდგინოთ ასე:

$$m_{px}\ddot{x}_p + b_{px}\ddot{x}_p + k_{px}\dot{x}_p + k_{\omega}k_{v1}x_p = k_{\omega}k_{v1}y_k + C_{\kappa 1}\dot{y}_{\kappa} + 2b_{\kappa}\ddot{y}_{\kappa},$$

სადაც

$$C_{\kappa 1} = (2C_1 + C_2);$$

$$b_{p\kappa} = b_{px} + 2b_{\kappa};$$

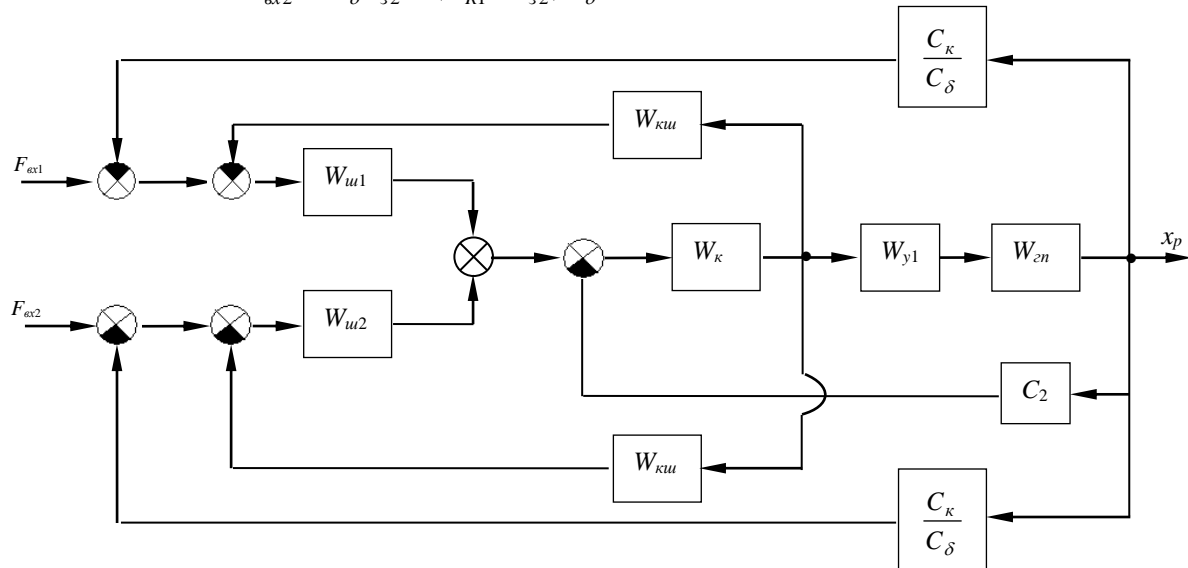
$$k_{px} = k_{\text{жс}} + 2(C_1 + C_2).$$

მიღებული სისტემის სტრუქტურული სქემა მოყვანილია ნახ. 14-ზე.

სადაც:

$$F_{ax1} = C_{\delta}^* x_{31} + (C_{R1} + r_{31}) C_{\delta};$$

$$F_{ax2} = C_{\delta}^* x_{32} - (C_{R1} + r_{32}) C_{\delta};$$



ნახ. 14. გაწვრივებული სისტემის გარდაქმნილი სტრუქტურული სქემა

$$W_{u1}(s) = \frac{1}{m_{u1}s^2 + b_{u1}s + C_{*1}};$$

$$W_{u2}(s) = \frac{1}{m_{u2}s^2 + b_{u2}s + C_{*}};$$

$$W_{ku}(s) = b_{u}s + C_1.$$

$$W_{\kappa}(s) = \frac{C_{u}}{m_{\kappa}s^2 + b_{u}s + C_{\kappa}};$$

$$W_{y1}(s) = k_{\text{жс}}k_{v1} + C_{\kappa 1}s + 2b_{\kappa}s^2;$$

$$W_{\Gamma c}(s) = \frac{1}{m_{px}s^3 + b_{p\kappa}s^3 + k_{px}s + k_{\text{жс}}k_{v1}};$$

$$W_{y1}^*(s) = K^* + C_{\kappa 1} + 2b_{\kappa}s;$$

$$K^* = k_{\text{жс}}k_{v1} + \frac{2k_{\text{жс}}k_{v1}\epsilon_0}{p_n F} (C_1 + C_2).$$

2.4.2. საკვლევი სისტემის დინამიკური სინთეზი მოცემული გარდამავალი პროცესების მიხედვით

პარამეტრული სინთეზის ამოცანის გადაჭრისათვის სამკოორდინატო სისტემაში W_{ob} -ის გამოსახულების ვიყენებთ შემდეგი სახით:

$$W_{ob}(s) = \frac{B_{ob}(s)}{E_{ob}(s) + E_{ob1}(s)b_{cx} + E_{ob2}(s)k_v}, \quad (238)$$

სადაც:

$$E_{ob}(s) = D_{10}s^{10} + D_9s^9 + D_8^0s^8 + D_7^0s^7 + D_6^0s^6 + D_5^0s^5 + D_4^0s^4 + D_3^0s^3 + D_2^0s^2 + D_1^0,$$

$$E_{ob1}(s) = A_7s^6 + A_6s^7 + A_5s^6 + A_4^*s^5A_3^*s^4 + A_2^*s^3 + A_1^*s^2$$

$$E_{ob2}(s) = A_7k_{\gamma c}s^7 + A_6k_{\gamma c}s^6 + A_5k_{\gamma c}s^5 + A_4^*k_{\gamma c}s^4 + A_3^*k_{\gamma c}s^3 + A_2^*k_{\gamma c}s^3 + A_1^*k_{\gamma c}s + A_0^*k_{\gamma c}.$$

სასურველი პროცესის სახით ვიხილავთ ფუნქციას

$$x_{p\gamma c}(p) = \frac{A_0 \left(\frac{a_{x1}}{2} z_m p + 1 \right)}{a_{x0} z_m^2 p^2 + a_{x1} z_m + 1} = \frac{A_0 M^0(p)}{N^0(p)}, \quad (239)$$

სადაც $A_1 = 0,5A_0$ – კარსონის ოპერატორია და z_m – დროის მასშტაბური კოეფიციენტი.

დასმული ამოცანის ამოსახსნელად მოცემული გარდამავალი პროცესების სინთეზის თანახმად, ვწერთ კოორდინატა შემდეგ საწყის ტოლობას

$$x_p(p) \approx x_{p\gamma c}(p),$$

რომელიც გაშლილი სახით გამოისახება ასე:

$$\frac{B_{ob}(s)}{E_{ob}(s) + E_{ob1}(s)b_{cx} + E_{ob2}(s)k_v} = A_0 \frac{M^0(s)}{N^0(s)}, \quad (240)$$

სადაც

$$A_0 = \frac{L_0}{B_{\delta x} L + A_0^* k_{\gamma c} k_v};$$

$$L = A^* C_{\varepsilon} k_{\gamma c} k_{\gamma y}.$$

შეგვიძლია ჩავწეროთ:

$$B_{ob}B_{\delta^*}LN^0(s) + B_{ob}A_0^*k_{\gamma c}k_{\nu}N_0 = LM^0(s)[E_{ob}(s) + E_{ob1}(s)b_{cx} + E_{ob2}(s)k_{\nu}]. \quad (241)$$

გამსხვილებული სახით ვწერთ

$$\Phi_1(s)k_{\nu} + \Phi_2(s)b_{cx} + \Phi_3(s)k_{\nu\gamma} = \Phi_0(s), \quad (242)$$

სადაც:

$$\Phi_1(s) = A_L M^0(s)E_{ob1}(s) - B_{ob}A_0^*N^0(s)k_{\gamma c};$$

$$\Phi_2(s) = A_L M^0(s)E_{ob1}(s);$$

$$\Phi_3(s) = A_* C_{\varepsilon} k_{\gamma c} M^0(s);$$

$$\Phi_0(s) = E_{ob}B_{\delta^*}A_L N^0(s)A_L M^0(s)E_{ob}(s).$$

განხილვაში შემოგვაქვს წარმოსახვითი სიხშირეები $\delta = j\omega$, წონითი კოეფიციენტები λ_m და ვწერთ პირობით განტოლებათა სისტემას [82, 136].

$$\lambda_{mv}\Phi_1(\delta_v, z_m)k_{\nu 1} + \lambda_{mv}\Phi_2(\delta_v, z_m)b_{cx} + \lambda_{mv}\Phi_3k_{\nu\gamma} = \lambda_{mv}\Phi_0(\delta_v, z_m), \quad (243)$$

$$\nu = 1, 2, 3, \dots, \ell.$$

მნიშვნელობებს δ_v და λ_m -თვის ვსაზღვრავთ თანახმად [126, 127] და [68, 69] სამუშაოებში მოყვანილი დამოკიდებულებებისა.

მიღებული პირობით განტოლებებს ვამუშავებთ უმცირეს კვადრატთა მეთოდით და ვიღებთ:

$$D_1^{(1)}k_{\nu x} + D_2^{(1)}b_{cx} + D_3^{(1)}k_{\nu\gamma} = D_0^{(1)}; \quad (244)$$

$$D_1^{(2)}k_{\nu x} + D_2^{(2)}b_{cx} + D_3^{(2)}k_{\nu\gamma} = D_0^{(2)}, \quad (245)$$

$$D_1^{(3)}k_{\nu x} + D_2^{(3)}b_{cx} + D_3^{(3)}k_{\nu\gamma} = D_0^{(3)}, \quad (245)$$

სადაც

$$D_1^{(1)} = \sum_{i=1}^{\ell} (\lambda_{mv}\Phi_1)^2;$$

$$D_3^{(1)} = \sum_{i=1}^{\ell} (\lambda_{mv}^2 \Phi_3 \Phi_1);$$

$$D_0^{(1)} = \sum_{i=1}^{\ell} (\lambda_{mv}^2 \Phi_0 \Phi_1);$$

$$D_1^{(2)} = \sum_{i=1}^{\ell} (\lambda_{mv}^2 \Phi_1 \Phi_2) = D_2^{(1)};$$

$$D_2^{(2)} = \sum_{i=1}^{\ell} (\lambda_{mv} \Phi_2)^2;$$

$$D_3^{(2)} = \sum_{i=1}^{\ell} (\lambda_{mv}^2 \Phi_3 \Phi_2);$$

$$D_0^{(2)} = \sum_{i=1}^{\ell} (\lambda_{mv}^2 \Phi_0 \Phi_2);$$

$$D_1^{(3)} = \sum_{i=1}^{\ell} (\lambda_{mv}^2 \Phi_1 \Phi_3);$$

$$D_2^{(3)} = \sum_{i=1}^{\ell} (\lambda_{mv}^2 \Phi_2 \Phi_3) = D_3^{(2)};$$

$$D_3^{(3)} = \sum_{i=1}^{\ell} (\lambda_{mv}^2 \Phi_3)^2;$$

$$D_0^{(3)} = \sum_{i=1}^{\ell} (\lambda_{mv}^2 \Phi_0 \Phi_3).$$

ვიღებთ ნორმალურ განტოლებათა საანგარიშო სისტემას, რომლის თანახმად ვსაზღვრავთ საძიებელ პარამეტრებს b_{cx} , k_v და k_{vy} -ს.

მდგრადობის პირობების შემოტანის პროცედურის რეალიზაციისათვის ვიხილავთ სისტემის მახასიათებელ განტოლებებს.

გამოილი სახით გვექნება:

$$x_p(s) = \frac{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_{10} s^{10} + a_9 s^9 + a_8 s^8 + a_7 s^7 + a_6 s^6 + a_5 s^5 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1} = \frac{A_L(s)}{B_L(s)}, \quad (247)$$

სადაც

$$b_3 = \frac{C_\varepsilon A_*}{D_{0*}} m_{py};$$

$$b_2 = \frac{C_\varepsilon A_*}{D_{0*}} a_{py};$$

$$b_1 = \frac{C_\varepsilon A_*}{D_{0*}} b_{cy};$$

$$b_0 = \frac{C_\varepsilon A_*}{D_{0*}} k_{xc} k_{py}.$$

საქმე გვაქვს მე-10 ხარისხის მახასიათებელ განტოლებასთან და ამიტომ, მდგრადობის სინთეზისათვის ვსარგებლოთ სტაციონარული სისტემის მდგრადობის ანალიზის ცნობილი მეთოდით, რომელიც მოყვანილია შემდეგ სამუშაოში [126].

აღნიშნული მეთოდის თანახმად ვიხილავთ დამხმარე პარამეტრებს λ_i . ესენი გამოისახებიან დამოკიდებულებებით:

$$\lambda_i = a_{i-1}a_{i+2}/a_i a_{i+1}, \quad i = \overline{1, n-2}. \quad (248)$$

ჩვენს შემთხვევაში გვექნება:

$$\lambda_1 = a_{20}a_{23}/a_{21}a_{22}; \quad \lambda_2 = a_{21}a_{24}/a_{22}a_{23};$$

$$\lambda_3 = a_{22}a_{25}/a_{23}a_{24}; \quad \lambda_4 = a_{23}a_{26}/a_{24}a_{25};$$

$$\lambda_5 = a_{24}a_{27}/a_{25}a_{26}; \quad \lambda_6 = a_{25}a_{28}/a_{26}a_{27};$$

$$\lambda_7 = a_{26}a_{29}/a_{27}a_{28}, \quad \lambda_8 = a_7 a_{10}/a_8 a_9.$$

სისტემის მდგრადობისათვის საჭიროა, რომ სრულდებოდეს ტოლობა:

$$\lambda_i < \lambda^* \approx 0,465, \quad \forall i = \overline{1, n-2}; \quad (249)$$

$$\lambda_i + \lambda_{i+1} < \lambda^{**} \approx 0,89, \quad \forall i = \overline{1, n-3}; \quad (250)$$

$$\lambda_i + \lambda_{i+1} + \lambda_{i+2} < 1, \quad \forall i = \overline{1, n-4}; \quad (251)$$

$$\lambda_i < (1 - \lambda_{i-1})(1 - \lambda_{i+1}), \quad \forall i = \overline{2, n-3}. \quad (252)$$

გარდამავალი პროცესების აგებისათვის ვიყენებთ $x(t)$ კოორდინატის მიღებულ გამოსახულებას (247).

გადავიდეთ ამპლიტუდურ - ფაზურ მახასიათებელზე, გამოსახულებაში (247) შემოგვაქვს არგუმენტი $j\omega$, სადაც j - წარმოსახვითი ერთიანია; ω - წრიული სიხშირე.

ვიღებთ ამპლიტუდურ-ფაზურ მახასიათებელს

$$x(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{B(j\omega)}.$$

ვაგებთ სისტემის საგნობრივ-სიხშირულ მახასიათებელს

$$P(\omega) = \operatorname{Re}[x(j\omega)] = \frac{R_A(\omega)R_B(\omega) - I_A(\omega)I_B(\omega)}{R_B^2(\omega) + R_A^2(\omega)}, \quad (253)$$

სადაც,

$$R_A(\omega) = 1 - b_2\omega^2;$$

$$I_A(\omega) = b_1\omega + b_3\omega^3;$$

$$R_B(\omega) = 1 - a_2\omega^2 + a_4\omega^4 + a_6\omega^6 + a_8\omega^8 + a_{10}\omega^{10};$$

$$I_B(\omega) = a_1\omega + a_3\omega^3 + a_5\omega^5 + a_7\omega^7 + a_9\omega^9$$

$R_A(\omega)$ და $R_B(\omega)$ – წარმოსახვითი ნაწილები.

შემდგომი ამოცანა – პროცესების ინტეგრალური მიახლოება არაწრფივ და გაწრფივებულ სისტემებში, რაც მოყვანილია ნაშრომებში [78, 110, 142].

რაც შეეხება არასტაციონარული მოდელის დინამიკური კვლევის საკითხებს ჩვენის აზრით ყველაზე მიზანშეწონილია ანალიზი ბონჯიორნოს კრიტერიუმის გამოყენებით [128]. იგი საშუალებას გვაძლევს სისტემისათვის

$$\frac{dy}{dt} \{y\} = A(t)y,$$

სადაც $A(t)$ არის პერიოდული კოეფიციენტების მატრიცა;

y – მდგომარეობის ვექტორი, მივიღოთ მდგრადობის საკმარისი პირობები.

აღნიშნული კრიტერიუმის გამოყენებისათვის $A(t)$ პერიოდულ მატრიცას წარმოადგენენ შემდეგი სახით

$$A(t) = A_0 + \tilde{A}(t).$$

ზემოთმოყვანილი მატრიცული დამოკიდებულებების გამოყენებით მდგრადობის ანალიზი შეიძლება ავსაგოთ გასაშუალებული მოდელების გამოყენებაზე მ.ზ.კოლოვსკის ვიბრომდგრადობასთან შეთავსებით, ანალოგიურად, როგორც ეს მოყვანილია ნაშრომში [108, 110].

სინთეზის მეთოდის აპრობაციისათვის ვატარებთ საანგარიშო გამოკვლევებს. სასურველი პროცესის საწყის პარამეტრებად არჩეული იქნა $u_1 = 35 \frac{1}{\sqrt{g}}$ და $u_2 = 50 \frac{1}{\sqrt{g}}$. თვით საკვლევი სისტემის არარეგულირებადი

პარამეტრების მნიშვნელობებად შერჩეული იქნენ:

$$C_\delta = 4200 \frac{6}{g}, \quad C_1 = 2100 \frac{6}{g}, \quad C_2 = 2100 \frac{6}{g}; \quad b_\kappa = 510 \frac{6s}{g}, \quad k_{\kappa c} = 10^8 \frac{6}{g}, \quad m_\kappa = 12 \text{ კგ},$$

$$m_p = 200 \text{ კგ}, \quad C_3 = 2100 \frac{6}{g}, \quad m_4 = 170 \text{ კგ}, \quad k_{vy} = 80 \frac{1}{\sqrt{g}}.$$

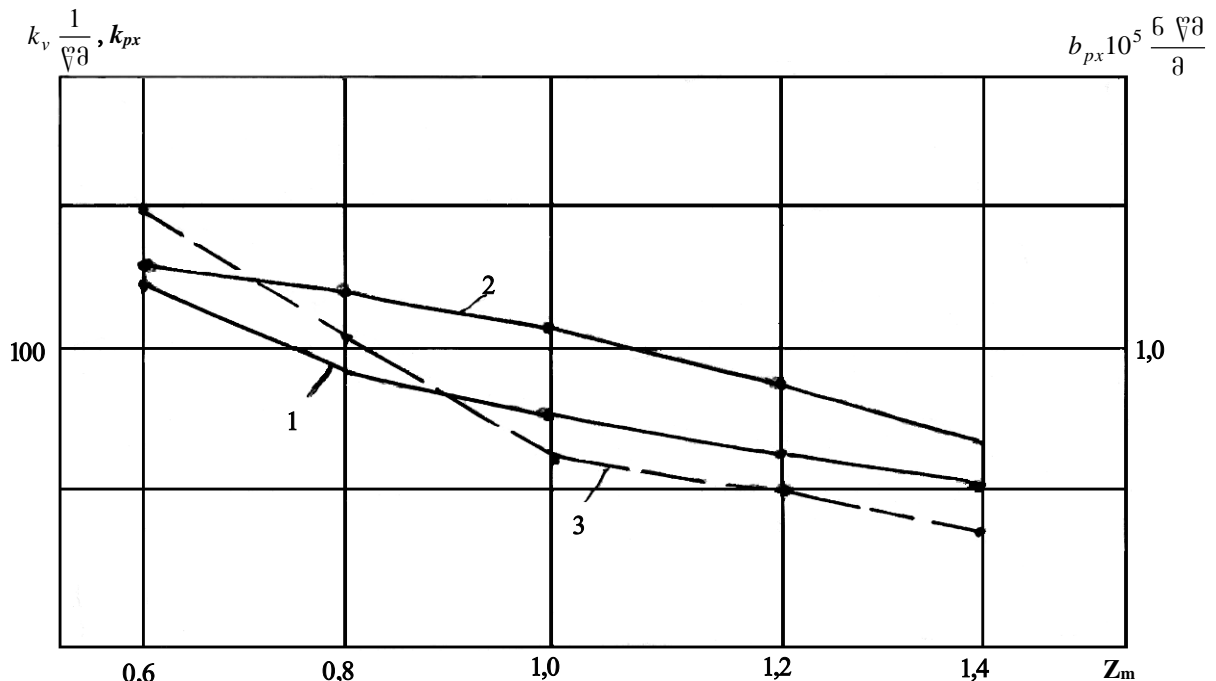
აღნიშნულთან დაკავშირებით რეგულირებადი კოორდინატის გამოსახულება იღებს სახეს

$$X(s) = \frac{0,916 \cdot 10^{-3} s^3 + 11,5 \cdot 10^{-3} s^2 + 2,01 \cdot 10^{-3} s + 1,2}{0,0003 \cdot 10^{-3} s^{10} + 0,001 \cdot 10^{-3} s^9 + 0,08 \cdot 10^{-3} s^8 + \cdot 10^{-3} s^7 + 1,76 \cdot 10^{-3} s^6 + 2,07 \cdot 10^{-3} s^5 + 55,6 \cdot 10^{-3} s^4 + 48,6 \cdot 10^{-3} s^3 + 21,7 \cdot 10^{-3} s^2 + 2,47 \cdot 10^{-3} s + 1.} \quad (254)$$

გაწრფივებული „სასურველი პროცესის სისტემის“ სინთეზის საფუძველზე მიღებული იქნა b_{cx} , k_v , k_{vy} პარამეტრების მნიშვნელობები ურთიერთკავშირში კომპლექსურ z_m პარამეტრთან.

აღნიშნული დამოკიდებულებები მოყვანილია ნახ. 15.

სადაც: 1 – $k_v(z_m)$ ფუნქციის, 2 – $b_{px}(z_m)$ და 3 – კიდევ k_{vy} ფუნქციის ამსახველი მრუდებია.



ნახ. 15. სინთეზის შედეგად მიღებული ფუნქციონალური დამოკიდებულებები:

$$1 - k_v(z_m); 2 - k_{px}(z_m); 3 - k_{vy}(z_m)$$

გაწრფივებული სისტემის დინამიკური მდგრადობის ანალიზისათვის ვიყენებთ λ_i კოეფიციენტებს [108].

ფარდობა თანამიმდევრობას

$$a_{n-2}/a_n, a_{n-3}/a_{n-1}, a_{n-4}/a_{n-2}, \dots, a_1/a_3, a_0, a_2. \quad (255)$$

ჩვენს სისტემასთან მიმართებაში, როდესაც $z_m=1,4$ თანამიმდევრობა (248–250) აისახება ციფრებით 710; 252; 99; 34; 18; 0,5; 0,15. რადგანაც ეს

თანამიმდევრობა კლებადია ციფრი 2-ზე მეტჯერ არის ნაკლები სისტემა მდგრადი.

როდესაც $z_m=0,8$ თანამიმდევრობა (253) იღებს სახეს

$$312, 210, 115, 32, 18, 0,7, 0,49, 0,09.$$

λ_i -ს ზუსტი მნიშვნელობებია $\lambda_i=0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 0,04, 0,8, 0,046$. ყველა წევრი არ არის 0,465 ნაკლები, ამიტომ უნდა გამოვთვალოთ λ_i -ს ორი მეზობელი წევრების ჯამი.

ვიღებთ თანამიმდევრობას: 0,82; 0,78; 0,74; 0,54; 0,88, 0,246. ყველა ჯამი არის 0,89-ზე ნაკლები, ე.ი. სისტემა მდგრადია.

გადავივართ გარდამავალი მრუდების აგებაზე, საფუძვლად ვიღებთ ამპლიტუდურ-ფაზურ მახასიათებელს

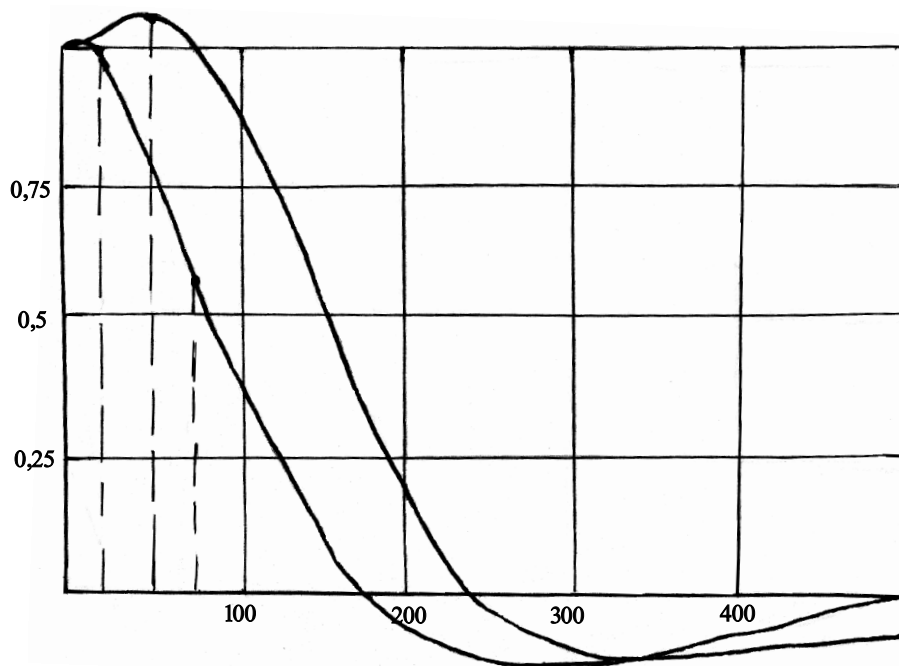
$$X(u\omega) = \frac{0,916 \cdot 10^{-3}}{0,0003 \cdot 10^{-3} s^{10} + 0,001 \cdot 10^{-3} j\omega^9 + 0,03 \cdot 10^{-3} j\omega^8 - 0,3 \cdot 10^{-3} j\omega^7 - 1,76 \cdot 10^{-3} j\omega^6 + 2,07 \cdot 10^{-3} j\omega^5 + 55,6 \cdot 10^{-3} j\omega^4 - 48,6 \cdot 10^{-3} j\omega^3 - 21,7 \cdot 10^{-3} j\omega^2 + 2,47 \cdot 10^{-3} j\omega + 1.} \quad (256)$$

საგნობრივი მახასიათებლის გამოყენებით ვაგებთ გარდამავალი პროცესების მრუდებს [64, 65, 129].

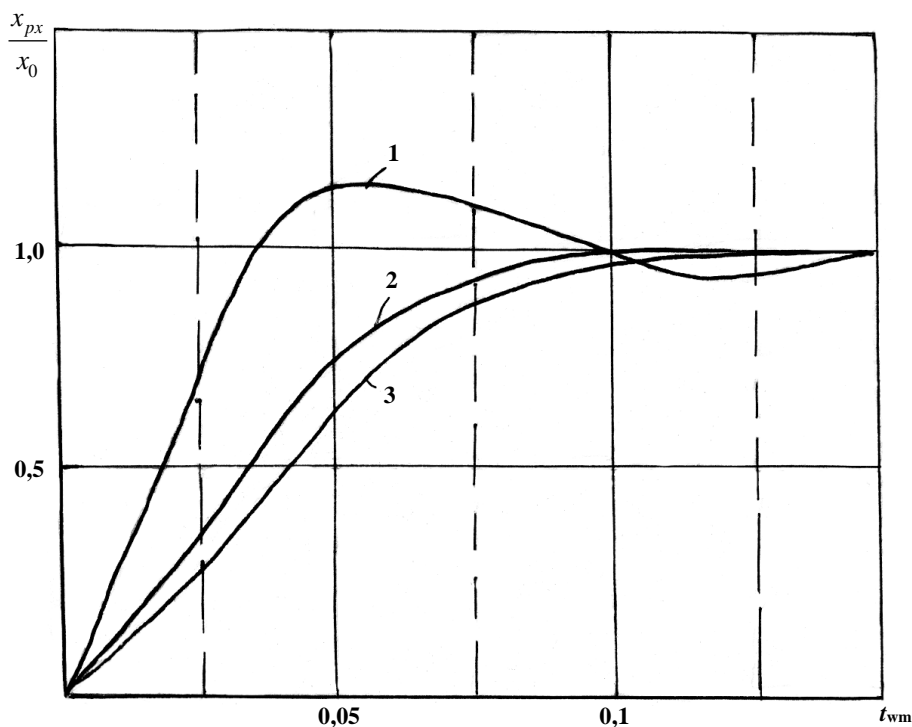
ნახ. 16-ზე მოყვანილია საგნობრივი სიხშირულ მახასიათებლების მრუდები (მრუდები 1 და 2), რომლებიც შეესაბამებიან z_m -ის მნიშვნელობებს 0,6 და 1,0.

გარდამავალი პროცესების მრუდები კიდევ მოყვანილია ნახ. 17 მრუდები 1 და 2 შეესაბამებიან მასშტაბური კოეფიციენტების $z_m=0,6$ და $z_m=1,0, 3$ - სასურველი პროცესის მრუდს.

მოყვანილი მრუდები, გვიჩვენებენ როგორც მათ სიახლოვეს სასურველთან, ასევე იმას, რომ სინთეზის შემუშავებული მეთოდოლოგია იძლევა პარამეტრების მიზანდასახული შერჩევის საშუალებას დინამიკური პროცესების საჭირო მაჩვენებლების მიღების მიმართულებით.



ნახ. 16. საგნობრივი სიხშირული მახასიათებლები



ნახ. 17. გარდამავალი პროცესების მრუდები

ზემოთ მოყვანილი იქნა სინთეზის თეორია x_p კოორდინატის მიმართ, რომელიც თავის მხრივ გარკვეულ წილად მეტყველებს აგრეთვე $y_p(t)$ კოორდინატის გარდამავალი პროცესის ხარისხობრივ მაჩვენებელზე. ამასთან ერთად მეორე მიდგომით შეგვიძლია სინთეზის მეთოდოლოგია ინტეგრალურ მიახლოვებით სასურველ როგორც x_{p*} , აგრეთვე y_{p*}

კოორდინატებთან. ამ შემთხვევაში ვწერთ კოორდინატა საწყის ტოლობებს

$$x_p(p) \approx x_{p\text{ж}}(p)$$

და

$$y_p(p) \approx y_{p\text{ж}}(p).$$

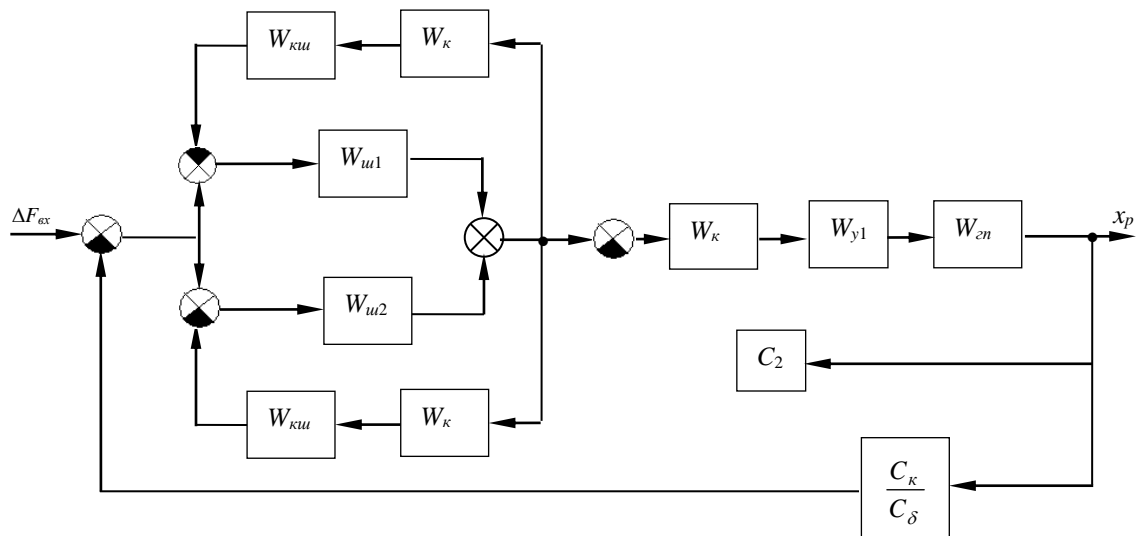
პირველი გამოსახულების მიღწევით ვახორციელებთ b_{cp} და k_{vx} პარამეტრების, მეორისას კიდევ k_{cy} და k_{vy} პარამეტრებით.

შემდგომ გადავდივართ სინთეზის მათემატიკურ პროცედურებზე ზემოთ მოტვანილი მეთოდოლოგიის თანახმად და ვიღებთ ოთხი განტოლებიდან შემდგარ ალგებრულ განტოლებათა სისტემაზე, რომელიც ჩაწერილია ოთხი სამიებული პარამეტრის მიმართ.

ორკოორდინატიანი რეჟიმისათვის სისტემის შემავალ ნაწილში საფეხუროვანი ΔF ზემოქმედებისას შემოგვაქვს დაშვება:

$$|\Delta F_{ex1}| = |\Delta F_{ex2}|,$$

რომლის თანახმად სისტემის სტრუქტურული სქემა მიიღებს სახეს, მოცემულ ნახ. 18-ზე.



ნახ. 18. სისტემის სტრუქტურული სქემა

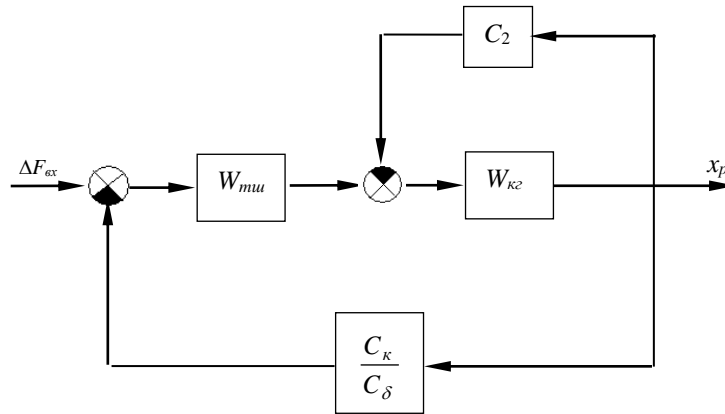
განხილვაში შემოგვაქვს გადაცემის ფუნქციები:

$$W_{uu}(s) = \frac{C_u}{ms^2 + B_{uu}s + C_{uu}^*}; \quad (257)$$

$$W_{\kappa u}(s) = B_{u\kappa}s + C_{u\kappa 1}; \quad (258)$$

$$W_{\kappa}(s) = \frac{C_{\kappa u}}{m_{\kappa}s^2 + b_{\kappa}s + C_{\kappa}}. \quad (259)$$

გადავდივართ გარდაქმნილ სქემაზე (ნახ. 19) და მისი გამოყენებით ვიღებთ გადაცემის ფუნქციებს



ნახ. 19. გარდაქმნილი სტრუქტურული სქემა

$$W_{\kappa 2}(s) = \frac{C_{\kappa u}(C_{\kappa 1} + k_v K_{1*}) + 2C_{\kappa u} b_{\kappa} s}{a_{5\kappa 2} s^5 + a_{4\kappa 2} s^4 + a_{3\kappa 2} s^3 + a_{2\kappa 2} s^2 + a_{1\kappa 2} s + a_{0\kappa 2}} = \frac{A_{\kappa 2}(s)}{B_{\kappa 2}(s)}; \quad (260)$$

$$W_{\mu u}(s) = \frac{C_B}{a_{4\mu u} s^4 + a_{3\mu u} s^3 + a_{2\mu u} s^2 + a_{1\mu u} s + a_{0\mu u}} = \frac{C_B}{B_{\mu u}(s)}. \quad (261)$$

სადაც

$$a_{5\kappa 2} = m_{pc} m_{\kappa};$$

$$a_{4\kappa 2} = b_{px} m_{\kappa} + m_{px} b_{\kappa};$$

$$a_{3\kappa 2} = b_{px} m_{\kappa} + b_{px} b_{\kappa} + m_{px} C_{\kappa};$$

$$a_{2\kappa 2} = (k_{\text{жс}} k_v m_{\kappa} + k_{px} b_{\kappa} + b_{px} C_{\kappa});$$

$$a_{1\kappa 2} = (k_{\text{жс}} k_v b_{\kappa} + b_{px} C_{\kappa});$$

$$a_{0\kappa 2} = k_{\text{жс}} k_v C_{\kappa};$$

$$b_{\kappa 2 1} = 2C_{\kappa u}(C_{\kappa 1} + k_v K_{1*});$$

$$a_{4\mu u} = m_{\Sigma} m_{\kappa};$$

$$a_{3\mu u} = B_{u\kappa} m_{\kappa} + m_{\Sigma} m_{\kappa};$$

$$a_{2\mu u} = C_{u\kappa} m_{\kappa} + B_{u\kappa} m_{\kappa} + m_{\Sigma} C_{\kappa};$$

$$a_{1mu} = C_{u^*} b_{\kappa} + B_{u} C_{\kappa} + C_{ku} B_{u};$$

$$a_{0mu} = C_{u^*} C_{\kappa} + C_{ku} C_{u^*}.$$

ჩაკეტილი კონტურის მიმართ გვექნება გადამცემი ფუნქცია:

$$\begin{aligned} W_{\kappa}(s)_0 &= \frac{W_{\kappa}(s)}{1 + C_2 W_{\kappa}(s)} = \\ &= \frac{B_{\kappa 1} s + b_{\kappa 0}}{a_{5\kappa} s^5 + a_{4\kappa} s^4 + a_{3\kappa} s^3 + a_{2\kappa} s^2 + a_{1\kappa} s + a_{0\kappa} + C_2 b_{\kappa 1} s + C_2 b_{\kappa 0}} = \\ &= \frac{b_{\kappa 1} s + b_{\kappa 0}}{a_{5\kappa} s^5 + a_{4\kappa} s^4 + a_{3\kappa} s^3 + a_{2\kappa} s^2 + (a_{1\kappa} s + C_2 b_{\kappa 1} s) + (a_{0\kappa} + C_2 b_{\kappa 0})}; \end{aligned} \quad (262)$$

მთლიანი სისტემის გადამცემი ფუნქცია მიიღებს სახეს:

$$W_0(s) = \frac{W_{mu}(s) W_{\kappa}(s) W_{\kappa}(s)_0}{1 + C_{\kappa\delta} W_{mu}(s) W_{\kappa}(s)_0} \quad (263)$$

სახით გვექნება:

$$\begin{aligned} W_o(s) &= \frac{x_p(s)}{F_{ex}} = \frac{W_{mu}(s) \cdot W_{\kappa}(s) \cdot W_{\kappa}(s)}{1 + C_{\kappa\delta} \cdot W_{mu}(s) \cdot W_{\kappa}(s) \cdot W_{\kappa}(s)} = \\ &= \frac{B_2 s + B_1 s + B_0}{(a_{5\kappa} s^5 + a_{4\kappa} s^4 + a_{3\kappa} s^3 + a_{2\kappa} s^2 + a_{1\kappa} s + a_{0\kappa}) (a_{4mu} s^4 + a_{3mu} s^3 + a_{2mu} s^2 + a_{1mu} s + a_{0mu}) + \\ &\quad + C_{\kappa\delta} C_B b_{\kappa} s + C_{\kappa\delta} C_B b_{\kappa 0}}, \end{aligned} \quad (264)$$

სადაც $C_{\kappa\delta} = \frac{C_{\kappa}}{C_{\delta}}$.

მოცემული გადამცემი ფუნქციის მნიშვნელი ჩაიწერება ასე:

$$a_{29} s^9 + a_{28} s^8 + a_{27} s^7 + a_{26} s^6 + a_{25} s^5 + a_{24} s^4 + a_{23} s^3 + a_{22} s^2 + a_{22} s + 1 = B(s), \quad (265)$$

სადაც

$$a_{29} = \frac{a_{29}^*}{a_{20}^*};$$

$$a_{28} = \frac{a_{28}^*}{a_{20}^*};$$

$$a_{27} = \frac{a_{27}^*}{a_{20}^*};$$

$$a_{26} = \frac{a_{26}^*}{a_{20}^*};$$

$$a_{25}^* = \frac{a_{25}^*}{a_{20}^*};$$

$$a_{24}^* = \frac{a_{24}^*}{a_{20}^*};$$

$$a_{23}^* = \frac{a_{23}^*}{a_{20}^*};$$

$$a_{22}^* = \frac{a_{22}^*}{a_{20}^*};$$

$$a_{21}^* = \frac{a_{21}^*}{a_{20}^*};$$

$$a_{29}^* = a_{5\kappa 2} a_{4mu};$$

$$a_{28}^* = a_{4\kappa 2} a_{4mu} + a_{5\kappa 2} a_{3mu};$$

$$a_{27}^* = a_{3\kappa 2} a_{4mu} + a_{4\kappa 2} a_{3mu} + a_{5\kappa 2} a_{2mu};$$

$$a_{26}^* = a_{2\kappa 2} a_{4mu} + a_{3\kappa 2} a_{3mu} + a_{4\kappa 2} a_{2mu} + a_{5\kappa 2} a_{1mu};$$

$$a_{25}^* = a_{1\kappa 2} a_{4mu} + a_{2\kappa 2} a_{3mu} + a_{3\kappa 2} a_{2mu} + a_{4\kappa 2} a_{1mu} + a_{5\kappa 2} a_{0mu};$$

$$a_{24}^* = a_{0\kappa 2} a_{4mu} + a_{1\kappa 2} a_{3mu} + a_{2\kappa 2} a_{2mu} + a_{3\kappa 2} a_{1mu} + a_{4\kappa 2} a_{0mu};$$

$$a_{23}^* = a_{0\kappa 2} a_{3mu} + a_{1\kappa 2} a_{2mu} + a_{2\kappa 2} a_{1mu} + a_{3\kappa 2} a_{0mu};$$

$$a_{22}^* = a_{0\kappa 2} a_{2mu} + a_{1\kappa 2} a_{1mu} + a_{2\kappa 2} a_{0mu};$$

$$a_{21}^* = a_{0\kappa 2} a_{1mu} + a_{1\kappa 2} a_{0mu} + a_{0\kappa 2} a_{0mu};$$

$$a_{20}^* = a_{\kappa 2} a_{0mu} + C_{\kappa 0} C_B b_{\kappa 20}.$$

2.5. საჩარხო ელექტრომექანიკური ამძრავის დინამიკური კვლევა

2.5.1. დინამიკური მოდელების შემუშავება

როგორც ეს იყო აღნიშნული ჩვენი ნაშრომის შესავალ ნაწილში მაკოპირებელ საჩარხო სისტემების პარალელურად თანამედროვე ტექნიკაში სხვადასხვა სახის ტექნოლოგიური პროცესების რეალიზაციისათვის ფართოდ ინერგებიან პროგრამული მართვის ჩარხები, რომლებშიც ფართოდ გამოყენება ჰპოვეს ამძრავთა მოთვალთვალე ელექტრომექანიკურმა

სისტემებმა, რომლებიც თავის სტრუქტურაში ფართოდ მოიცავენ მექანიკური სახის გადამცემ მექანიზმებს, კერძოდ მექანიკურ რედუქტორებს და გადაცემებს ხრახნი-ჭანჭიკი.

ასეთი სისტემების ოპტიმიზაციური აგების ამოცანები ეფექტური გადაჭრის ხარისხის დონე, როგორც ეს ცნობილია, მრავალწილად დაკავშირებულია მექანიკური ნაწილის მოდელელებში დრეკადი კავშირების მახასიათებლების ადეკვატურ ასახვასთან.

მეორეს მხრივ ასეთი სისტემების ოპტიმიზაციური გაანგარიშებები თავის მხრივ პირდაპირ კავშირში არიან მრავალმასიანი მექანიკური ტრანსმისიების გამარტივებული ორ და სამმასიანი აპროქსიმაციული მოდელეების შემუშავების საკითხებთან. ამ მიმართულებით საჭიროა აღინიშნოს აპროქსიმაციული მოდელირების მეთოდები, რომელთა შორის აღსანიშნავია ე.ი. რიკინის, ა.პ. ჩერევეკოვის, ს.ა. კაზაკის [130-133] და ბანახის მიერ და აგრეთვე № 501 დეპარტამენტში შემუშავებული მეთოდი, რომელიც აგებულია წარმოსახვით სიხშირეთა მათემატიკური აპარატის გამოყენებაზე [131-137].

აღნიშნული მეთოდი საშუალებას იძლევა ანალიზური მიდგომით გადავიდეთ მრავალმასიანი სისტემიდან გამარტივებულ მოდელელებზე, რომლებიც მაღალი სიხლოვით აღწერენ სისტემათა დაბალი სიხშირის რხევებით წარმოშობილ მდგენელებს მთლიანი სისტემის გარდამავალ პროცესებში.

ნაშრომებში [135-137] განხილვაში შემოტანილია არადემფირებადი სისტემების გადამცემი ფუნქციები, რომლებიც აღიწერებიან ჩანაწერით

$$W_k(s) = \frac{A_k(s)}{B_k(s)}, \quad (266)$$

სადაც

$$B_k(s) = b_{2m}s^{2m} + b_{2m-2}s^{2m-2} + \dots + b_2s^2 + b_0; \quad (267)$$

$$A_k(s) = a_{2n}s^{2n} + a_{2n-2}s^{2n-2} + \dots + a_2s^2 + a_0. \quad (268)$$

s – ლაპლასის გარდაქმნის ცვლადი.

შემდეგ გადავდივართ გამოსახულებებზე

$$\varphi_{k^*}(s_*) = \frac{B(s_*)}{A(s_*)}, \quad (269)$$

რომლებშიც შემოტანილია ახალი ოპერატორი

$$S^* = s^2$$

და წარმოადგენენ s^* მიმართ ექსპონენციალურ მდგენელთა ჯამს.

გამოსახულების (269) გადავდივართ წარმოსახვით სიხშირეთა მოდიფიცირებულ მახასიათებლებზე

$$\varphi_k(\delta) = \frac{B(\delta)}{A(\delta)},$$

სადაც δ – წარმოსახვითი სიხშირის აღნიშვნაა [68, 69].

საკვლევი მექანიზმის გამომავალი კოორდინატისა და სააპროქსიმაციო მოდიფიცირებული მახასიათებლების ინტეგრალური მიახლოებით $S^* = \delta$ არგუმენტების არეალში $\delta = 0$ და $\delta \rightarrow \infty$ ვაწარმოებთ აპროქსიმაციული მოდელების პარამეტრების შერჩევას.

შემდგომი ამოცანა მთლიანი ელექტრომექანიკური სისტემის დინამიკური კვლევა და მისი ოპტიმალური პარამეტრების შერჩევა, სისტემათა ოპტიმიზაციის თვალსაზრისით, როგორც ცნობილია საჭიროა არა მარტო ძირითადი სტრუქტურის პარამეტრების შერჩევა, არამედ დამატებითი უკუკავშირების შემოტანა, რაც თავის მხრივ მოითხოვს უკუკავშირთა სიგნალების შეჯამებას შემაჯამებელ მაძლიერებლებზე.

2.5.2. დინამიკური კვლევა გარდაქმნილი მოდელები გამოყენებით

მაჯამებელი მაძლიერებლიანი ელექტროამპრავის ძირითადი უარყოფითი მხარეა უკუკავშირების ჯაჭვების პარამეტრების გაწყობის სირთულე. ერთიანი მაძლიერებლის (რეგულატორის) მეშვეობით. აღნიშნული გაწყობა ხასიათდება კომპრომისული ხასიათით ყველა გასაწყობი პარამეტრის მიმართ და არ მიეკუთვნება ოპტიმალურს. ეს უარყოფითი მხარე აღმოფხვრილია დაქვემდებარებული რეგულირების

სისტემაში და მან დიდი გავრცელება ჰპოვა ჩარხების რეგულირებად ამპრავებში [3, 72].

მიკროელექტრონიკის მიღწევებმა საშუალება მოგვცა უარი გვეთქვა ერთიან მაძლიერებელზე და სისტემაში შემოვიტანოთ რამდენიმე დამოუკიდებელი რეგულატორი, ესენი ცალ-ცალკე უტარებენ ოპტიმიზაციას უკუკავშირთა პარამეტრებს.

დაქვემდებარებული რეგულირების სისტემა წარმოადგენენ მრავალკონტურიან სისტემას რეგულატორების კასკადური ჩართვებით. ამ შემთხვევაში რეგულატორების და რეგულირების კონტურთა რიცხვი ტოლია რეგულირებადი პარამეტრების რიცხვისა. დასახელება აიხსნება იმით, რომ გარე კონტურში ჩართული რეგულატორის გამომავალი სიგნალი წარმოადგენს მოცემულს შიგა კონტურში ჩართულ რეგულატორისათვის, ე.ი. ერთი რეგულატორი ემორჩილება მეორეს.

სისტემის უპირატესობა მდგომარეობს იმაში, რომ რეგულატორის გაწყობა ხორციელდება დამოუკიდებლად და თანმიმდევრულად შიგა კონტურიდან გარესაკენ.

დაქვემდებარებული რეგულირების სისტემა აკმაყოფილებს მაღალ სტატიკურ და დინამიკურ მახასიათებლების მიღწევას. ხასიათდება სტანდარტიზაციის მაღალი ხარისხით და ამპრავეის ელემენტებისა და სტრუქტურის უნიფიკაციით, რაც აადვილებს მის დამზადებას და რემონტს.

დაქვემდებარებული სისტემის სტრუქტურული სქემა წარმოდგენილია ნაშრომში 3 ნახაზზე წარმოდგენილია რეგულირების ორი კონტური, რომლებიც ჩაკეტილნი არიან უკუკავშირებით. დენის კონტური შედგება რეგულირების ობიექტიდან – ძრავას ღუზის ჯაჭვი, ძალოვანი გარდამქმნელიდან და დენის რეგულატორიდან. კონტური იკეტება ძაბვის ღუზის ჯაჭვში ჩართული გადამწოდიდან. დენის მიმართ უკუკავშირის ჯაჭვის გარდაქმნის კოეფიციენტი უდრის K_m -ის. დენის კონტურის უკუკავშირის სტრუქტურული გართულება დაკავშირებულია ელექტრომაგნიტური ძაბვის უკუკავშირის გამოვლენით. რომელიც

ნახაზზე აღნიშნულია წყვეტილი ხაზით. მრავალ შემთხვევაში ამ უკუკავშირს უგულვებელყოფენ და განიხილავენ დენის კონტურის გამარტივებულ სტრუქტურას.

სიჩქარის გარე კონტურის რეგულირების ობიექტს წარმოადგენს დენის ჩაკეტილი კონტური და რგოლი, რომელიც აღწერს ძრავას მექანიკურ წინაღობას. კონტურის ჩაკეტვა ხორციელდება უინერციო უკუკავშირით სიჩქარის მიმართ, რომლის გარდაქმნის კოეფიციენტია K_v . დაქვემდებარებული რეგულირების სისტემაში არამართო იყენებენ სტანდარტულ რეგულატორებს, არამედ ასევე იყენებენ ამ რეგულატორების სტანდარტულ გაწყობებს.

მრავალ შემთხვევაში დენისა და სიჩქარის კონტურებში იყენებენ ПИ-რეგულატორებს. ასეთი სისტემები იწოდებიან ორკონტურებიანებად. ისინი ახორციელებენ რეგულირების ფართო დიაპაზონს და პრაქტიკულად ნულოვან ცდომილებას აგზნებისა წინააღობის მომენტის მიერ. მათ გააჩნიათ საკმაოდ მაღალი სწრაფქმედება და გარდამავალი პროცესების მცირე გადარეგულირება, მაგრამ ხასიათდებიან მაღალი სტატიზმით, ამძრავთა ასეთი სისტემები არ ახორციელებენ სიჩქარის რეგულირების დიდ დიაპაზონს.

განვიხილოთ ПИ-რეგულატორის გაწყობა ტექნიკურ ოპტიმუმზე. სტანდარტული გაწყობისას, როგორც წესი უგულვებელყოფენ შიგა უკუკავშირის ელექტრომომძრავებელი ძალის მიმართ, რაც სამართლიანია, თუ ძრავას ელექტრომაგნიტური და ელექტრომექანიკური დროის მუდმივები მნიშვნელოვნად აღემატებიან ძალოვანი გარდამქმნელის დროის მუდმივას და სრულდება პირობა

$$T_m + \frac{T_a}{5} \geq 5\tau .$$

ამ შემთხვევაში დენის კონტურის რეგულირებას წარმოადგენს ტირისტორულ გარდამქმნელს და ღუზას ჯაჭვი აღიწერება ფუნქციით

$$W_0(s) = \frac{K_n}{1 + \tau p} \frac{1/R_a}{1 + T_a p}; \quad (270)$$

რეგულირების ობიექტი შედგება ორი მიმდევრობით შეერთებული აპერიოდული რგოლიდან დროის მუდმივებით τ და T_g . ამავე დროს ითვლება, რომ $T_g > \tau$, ე.ი. რეგულირების ობიექტი შეიცავს ერთ დიდ T_g და ერთ მცირე დროის მუდმივას, რომელსაც მრავალ შემთხვევაში თვლიან, როგორც არაკომპენსირებულ მცირე სიდიდეს.

დონის ПИ-რეგულატორის გადამცემი ფუნქცია გამოისახება ასე

$$W_{pr}(p) = K_{pm} \frac{1 + T_{pm}p}{T_{pm}p}. \quad (271)$$

რეგულირების ამოცანა დაკავშირებულია რეგულირების ობიექტის დიდი დროის მუდმივას კომპენსაციასთან. ამიტომ ვუშვებთ, რომ დენის რეგულატორის ინტეგრირების დროის მუდმივა T_{pr} უდრის ლუზის ჯაჭვის დროის მუდმივას

$$T_{pr} = T_g. \quad (272)$$

ამ შემთხვევაში დენის კონტურის გახსნილი ჯაჭვის გადამცემი ფუნქცია

$$W_p(p) = W_{pm} W_0 = K_{pm} \frac{K_n 1/R_g}{T_g p(1 + \tau p)} = \frac{K_1}{p(1 + \tau p)}.$$

სადაც $K_T = K_{pr} K / (R_g T_g)$.

დენის ჩაკეტილი კონტურისათვის

$$W_{kr}(p) = [K_m + W_p^{-1}] = K_1 / (\tau p^2 + p + K_m K_i).$$

ამ ფორმულას ვანიჭებთ რა მეორე რიგის რგოლის კანონიკურ ფორმას

$$W_{km}(p) = \frac{1}{K_m} \frac{\omega_{km}^2}{p^2 + 2\varepsilon_{km} \omega_{km} p + \omega_{km}^2},$$

სადაც $\omega_{pr} = \sqrt{K_1 K_m / \tau}$, $\varepsilon_{kr} = 1 / (2\sqrt{K_1 K_m \tau})$.

გარდამავალი პროცესების ხასიათი დამოკიდებულია დემპფირების ε_{kr} კოეფიციენტთან. ფიზიკურ ექსპერიმენტში ზოგადად ირჩევენ დემპფირების კოეფიციენტ ერთზე მეტის ან ტოლის მნიშვნელობით. ამ შემთხვევაში გარდამავალი პროცესები. პროცესების ხასიათი აპერიოდულია. ტექნიკურ სისტემაში დასაშვებია მცირე გადარეგულირების მქონე რხევადი

გარდამავალი პროცესიც. ამისათვის დემპფირების კოეფიციენტს ირჩევენ ერთზე ნაკლებს, რითიც მიიღწევა ამპრავის მნიშვნელოვანი გაუმჯობესება.

ტექნიკური ოპტიუმით გაწყობისას ირჩევენ $\varepsilon_{\text{კრ}} = 1/\sqrt{2}$ და ამ შემთხვევაში

$$K_{pm} = T_n R_n / (2\tau K_n K_m). \quad (273)$$

უკანასკნელი ფორმულები თავის წარმოადგენენ დენის რეგულატორის პარამეტრების გაწყობას ტექნიკურ ოპტიუმზე. K_i კოეფიციენტის ოპტიმიზირებული მნიშვნელობის ჩასმის (273) ფორმულაში ვიღებთ

$$K_{\text{კრ}}(p) = 1. \quad (274)$$

უკანასკნელიდან გამომდინარეობს, რომ რეგულატორი ახორციელებს დიდი მნიშვნელობის დროის მუდმივას კომპენსაციას და დენის ოპტიმიზირებული კონტურის გადამცემი ფუნქცია შეიცავს მარტო ერთ პარამეტრს: ძალოვანი გარდამქმნელის მცირე მნიშვნელობის დროის მუდმივას, რომელიც გამსაზღვრავს ამპრავის სწრაფქმედებას. დენის ოპტიმიზირებული კონტურის რეზონანსული სიხშირე, რომელიც განსაზღვრავს ამპრავის სწრაფქმედებას აგრეთვე დამოკიდებულია დროის ამ მუდმივაზე $\omega_{\text{კრ}} = 1/(\sqrt{2}\tau)$.

ფორმულაში (274) შეტანით $p = j\omega$ ვიღებთ დენის ოპტიმიზირებული სიხშირულ მახასიათებელს

$$W_{\text{კრ}}(j\omega) = \frac{1}{K_m} \frac{1}{1 - 2\tau^2\omega^2 + j2\tau\omega}, \quad (275)$$

რადგანაც გარდამავალი პროცესი ახლოსაა აპერიოდულთა დამოკიდებულება (274) შეგვიძლია შევცვალოთ აპერიოდული რგოლის გადამცემი ფუნქციით

$$W_{\text{კრ}}(p) \approx \frac{1}{K_m} \frac{1}{1 + 2\tau p}. \quad (276)$$

ასეთი მიდგომით, გაწყობა ტექნიკურ ოპტიუმზე ათვისებას დენის კონტურს პირველი რიგის ორმაგი მნიშვნელობის დროის მუდმივას აპერიოდული რგოლის თვისებებს.

სიჩქარის ПИ–რეგულატორის გაწყობა სიმეტრიულ ოპტიმუმზე. დავუშვათ, რომ შესრულებულია დენის ПИ–რეგულატორის გაწყობა და დენის ოპტიმიზირებული კონტურის გადამცემი ფუნქცია განისაზღვრება ფორმულით (276). ამ შემთხვევაში სიჩქარის გახსნილი გადამცემი ფუნქცია

$$W_{pa3}(p) = K_{pc} \frac{1+T_{pcp}}{T_{pcp}} \frac{1}{K_m} \frac{1}{1+2\tau p} \frac{K_{m1}}{T_{m1}p}.$$

სტანდარტული გაწყობისას ტექნიკური ოპტიმუმით სიჩქარის რეგულატორის პარამეტრები შეირჩევიან ასე:

$$T_{pc} = 8\tau; \quad K_{pc} = \frac{cK_m T_m}{T_m p}. \quad (277)$$

ამ მნიშვნელობების ჩასმით

$$W_{ppa}(p) = \frac{1}{K_c} \frac{1+8\tau p}{32\tau^2 p^2 (1+2\tau p)}.$$

რეგულატორმა განახორციელა დიდი მნიშვნელობის T_m დროის მუდმივას კომპენსაცია და სიჩქარის კონტურის დინამიკური თვისებები აგრეთვე განისაზღვრებიან მარტო მცირე τ დროის მუდმივით

$$W_{kc}(p) = \frac{1}{K_c} \frac{1+8\tau p}{64\tau^3 p^3 + 32\tau^2 p^2 + 8\tau p + 1}. \quad (278)$$

შემოგვაქვს დიფერენცირების უგანზომილებო ოპერატორი $d = 4\tau p$ და

$$W_{rc}(d) = \frac{1}{K_c} \frac{12d+2d}{1+d} \frac{1}{d^2+d+1}. \quad (279)$$

უკანასკნელიდან გამომდინარეობს, რომ სიჩქარის ოპტიმიზირებული კონტური წარმოადგენს მიმდევრობითად შეერთებული ინერციულ-ფორსირებულ და მეორე რიგის რხევით სახის რგოლებს.

ფორსირებული წევრის არსებობა ახორციელებს სიხშირით მახასიათებელში პიკის წარმოშობას.

დაბალ სიხშირეთა არეში ფუნქციის (279) შესაძლოა იქნას გამარტივებული

$$(1+2d)/(1+d) \approx 1.$$

მაშინ

$$W_{kc}(a) \approx \frac{1}{K_c} \frac{1}{d^2 + d + 1},$$

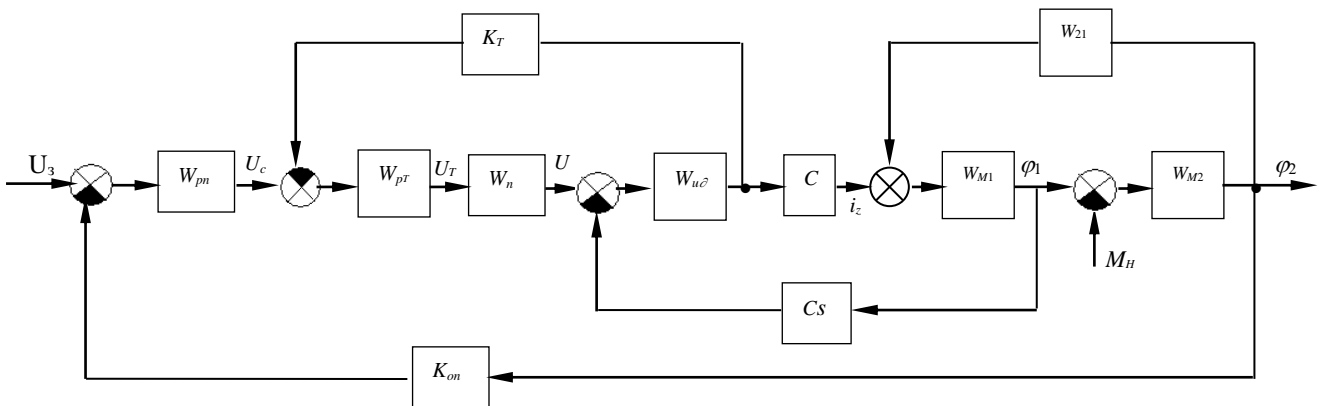
აწ

$$W_{kc}(p) \approx \frac{1}{K_c} \frac{1}{16\tau^2 p^2 + 4\tau p + 1}.$$

სიჩქარის ოპტიმიზირებული კონტური მიახლოებით შეგვიძლია წარმოვიდგინოთ რხევით რგოლად დროის მუდმივათი $T = 4\zeta$ ($\omega_0 = 1/4\tau$) და დემპფირების კოეფიციენტით $\varepsilon = 0,5$.

ყოველივე ზემოაღნიშნული შეეხება აბსოლუტურ ხისტი რგოლებიანი სისტემების გაწყობას. რეგულატორების პარამეტრების გაწყობა დრეკადრგოლებიანი მექანიკური სისტემის გათვალისწინებით მოითხოვს ორიგინალურ მიდგომებს [3, 72].

ნახ. 20 მოყვანილია მექანიკურ ნაწილში დრეკადრგოლებიანი ელექტრომექანიკური სისტემის სტრუქტურული სქემა, რომელიც ხასიათდება იმით, რომ სისტემაში წარმოდგენილია მიმდევრობით მაკორექტირებელი რგოლები: მდებარეობის II - რეგულატორი და დენის და სიჩქარის კონტურების III – რეგულატორები.



ნახ. 20. ელექტრომექანიკური სისტემის სტრუქტურული სქემა

ნახ. 20-ზე ნაჩვენებია შემდეგი აღნიშვნები:

W_{pn} – მდებარეობის W_{pc} – სიჩქარის და W_{pr} – დენის კონტურთა რეგულატორების გადამცემი ფუნქციები; W_{ob} – ელექტროძრავას, W_{κ} –

ტირისტორული გარდამქმნელის და W_{m1} , W_{m2} , W_{21} – მექანიკური გადაცემის გადამცემი ფუნქციები.

C – მუდმივი დენის ძრავას მუდმივა;

K_c და K_T – სიჩქარისა და დენის ჩაკეტილი კონტურების უკუკავშირთა კოეფიციენტები; k_{on} – მდებარეობის უკუკავშირის კოეფიციენტი;

ϕ_1 და ϕ_2 – ორმასიანი მექანიკური სისტემის რეგულირებადი კოორდინატები; M_n – გარე დატვირთვის მომენტი.

მათი გადამცემი ფუნქციები აღნიშნულნი არიან სიმბოლოებით W_{pn} , W_{pr} და W_{pc} [72, 138, 142].

განხილვადი სისტემის დინამიკა ჩაიწერება შემდეგი განტოლებებით

$$u_1 = K_{pn} \varepsilon_{np}; \quad (280)$$

$$\varepsilon_{np} = u_3 - K_{on} \phi_2 - g(t); \quad (281)$$

$$T_{pc} u_{pc} = K_{pc} T_{pc} \dot{\varepsilon}_c - K_{pc} \varepsilon_c; \quad (282)$$

$$\varepsilon_c = u_1 - K_c \omega;$$

$$T_{pc} \dot{u}_T = K_{pr} T_{pr} \dot{\varepsilon}_T - K_{pr} \varepsilon_T; \quad (283)$$

$$\varepsilon_T = u_c - K_T i_a;$$

$$T_n \dot{u} + u = K_c u_T; \quad (284)$$

$$T_a \frac{di_a}{dt} + i_a = \frac{1}{R_a} u - \frac{c}{R_a} \dot{\phi} = K_a u - K_a c \dot{\phi}; \quad (285)$$

$$I_1 \ddot{\phi}_1 + b_{\phi 1} \dot{\phi}_1 + c_{12} \phi_1 = C i_a + b_{12} \dot{\phi}_2 + c_{12} \phi_2; \quad (286)$$

$$I_2 \ddot{\phi} + b_{\phi 2} \dot{\phi}_2 + c_{12} \phi_2 = -M_n + b_{12} \dot{\phi}_1 + c_{12} \phi_1, \quad (287)$$

ნაშრომებიდან ვიხილავთ მოცემული სისტემის დინამიკური კვლევის ამოცანას მოცემული გარდამავალი პროცესების მიხედვით [3, 72].

დინამიკური სისტემის ანალიზის საფუძველზე მიზანშეწონილად მიგვაჩნია საკვლევი სისტემის სინთეზირებადი შერჩევის მეთოდოლოგიის ჩამოყალიბება რხევითი მდგენელის გამოყენებით [141–143].

როგორც ეს უკვე იყო მოყვანილი ზემოთ ორმასიანი მექანიკური ნაწილის განტოლებათა სისტემა შემსრულებელ ძრავასთან ერთად აღიწერება ასე:

$$I_1\ddot{\phi}_1 + b_1\dot{\phi}_1 + b_{12}(\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2) + c_{12}(\phi_1 - \phi_2) = C_{ia} - M_{H1}; \quad (288)$$

$$I_2\ddot{\phi}_2 + b_2\dot{\phi}_2 + b_{12}(\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2) - c_{12}(\phi_1 - \phi_2) = -M_{H2}; \quad (289)$$

$$L_{\pi} \frac{d_{ia}}{at} + R_{ia} = U_{\pi} - C\dot{\phi}_1. \quad (290)$$

გარდაქმნილი სახით შეგვიძლია ჩავწეროთ:

$$I_1\ddot{\phi}_1 + b_1\dot{\phi}_1 + b_{12}\Delta\dot{\phi} + c_{12}\Delta\phi = C_{ia} - M_{H1}, \quad (291)$$

$$I_2\ddot{\phi}_2 - I_2\Delta\ddot{\phi}_1 + b_2\dot{\phi}_2 - b_2\Delta\dot{\phi} - b_{12}\Delta\dot{\phi} - c_{12}\Delta\phi = M_{H2}. \quad (292)$$

სადაც $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$.

ამის შემდეგ გადავდივართ დამოკიდებულებებზე

$$(I_1 + I_2)\ddot{\phi}_1 + (b_1 + b_2)\dot{\phi}_1 = C_{ia} + I_2\Delta\ddot{\phi} + b_2\Delta\dot{\phi} - M_{H1} - M_{H2}; \quad (293)$$

$$I_2\Delta\ddot{\phi} + (b_1 + b_2)\Delta\dot{\phi} + c_{12}\Delta\phi = I_2\ddot{\phi}_1 + (b_1 + b_2)\Delta\dot{\phi} + M_{H0}, \quad (294)$$

რომელთა გამოყენებით სისტემის სტრუქტურული სქემა შეგვიძლია წარმოვიდგინოთ სახით, რომელიც მოყვანილია (ნახ. 21).

აქ

$$W_I(s) = \frac{1}{I_{\Sigma}s^2 + b_{\Sigma1}s};$$

$$W_{I\phi} = I_2s^2 + b_2s;$$

$$W_{I\phi}(s) = I_2s^2 + c_{2\Sigma}s;$$

$$W_{\Delta\phi} = \frac{1}{I_2s^2 + b_{2\Sigma}s + c_{12}};$$

$$b_{\Sigma1} = b_1 + b_{12};$$

$$b_{\Sigma2} = b_2 + b_{12}.$$

ნახ. 22-ზე ნაჩვენებია გარდაქმნილი სტრუქტურული სქემა.

აქ ნაშრომი (78)-ის თანახმად შემოტანილი დენის კონტური გადამცემი ფუნქციის სახით

$$W_{km}(s) = \frac{1}{K_m} \frac{1}{1 + 2\tau s}.$$

სტრუქტურული სქემების ანალიზის საფუძველზე მივდივართ დასკვნამდე, რომ შიგა კონტურის სახით საქმე გვაქვს ხისტი რგოლების

მქონე სისტემასთან. გამომდინარე უკანასკნელიდან შიგა კონტურის პარამეტრების შერჩევისათვის შეგვიძლია ვიხელმძღვანელოთ ჩვენს მიერ ზემოთ [3] მოყვანილი დაქვემდებარებული რეგულირების ცნობილი თეორიით, უკანასკნელიდან გამომდინარე დენის ჩაკეტილი კონტურის გადამცემ ფუნქციას წარმოვადგენთ შემდეგი სახით:

$$W_{km} = \frac{1}{K_m} \frac{1}{2\tau s + 1},$$

სადაც: τ – ტირისტორული გარდამქმნელი დროის მუდმივაა და $\frac{1}{K_m}$ –

ჩაკეტილი კონტურის გადამცემი კოეფიციენტია [3].

შემდგომი ეტაპია ნახ. 23-ზე მოყვანილი სიჩქარის ჩაკეტილი კონტურის პარამეტრების შერჩევა

სადაც

$$W_{I^*} = \frac{1}{I_\Sigma s + b_{\Sigma 1}}. \quad (295)$$

თუ ვუგულვებელყოფთ წევრით $b_{\Sigma 1}$, ამ შემთხვევაში შეგვიძლია ვიხელმძღვანელოთ სიჩქარის ПИ-რეგულატორის პარამეტრების გაწყობით სიმეტრიულ ოპტიმუმზე, რაც საშუალებას გვაძლევს დენის ჩაკეტილი კონტურის გადამცემი ფუნქცია განვიხილოთ დამოკიდებულებით

$$W_{K_c}(s) \approx \frac{1}{K_c} \frac{1}{16\tau^2 s^2 + 4\tau s + 1},$$

რომელიც შეესაბამება ПИ რეგულატორის პარამეტრებს. ისინი ხასიათდებიან შემდეგი მნიშვნელობებით

$$T_{pc} = 8r,$$

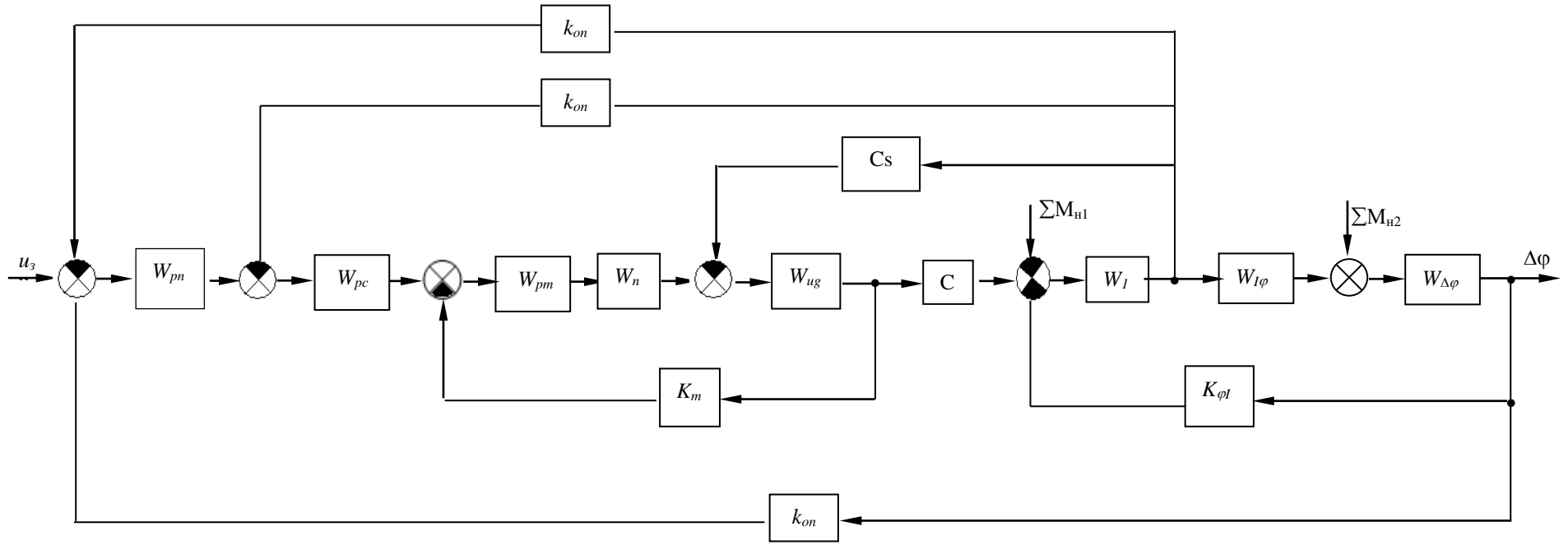
$$K_{pc} = \frac{cK_m T_M}{4\tau K_c R_A}.$$

ჩვენ შემთხვევაში

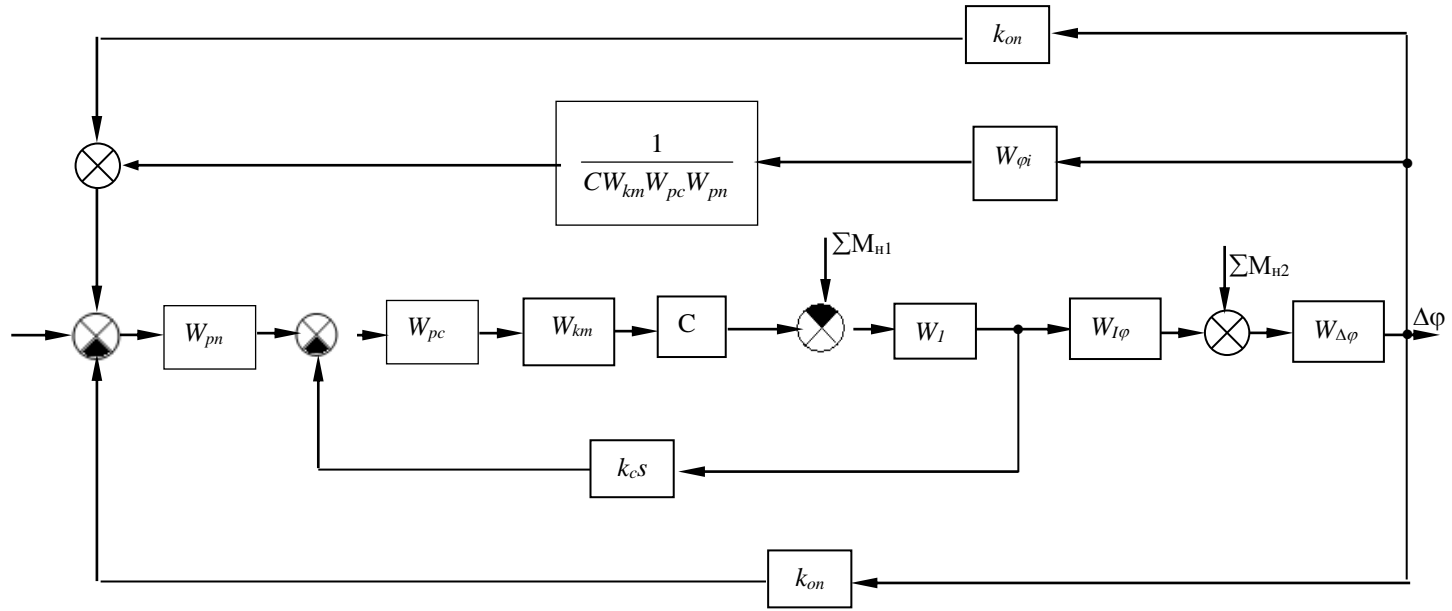
$$T_M = I_\Sigma \frac{R_A}{c^2}$$

და

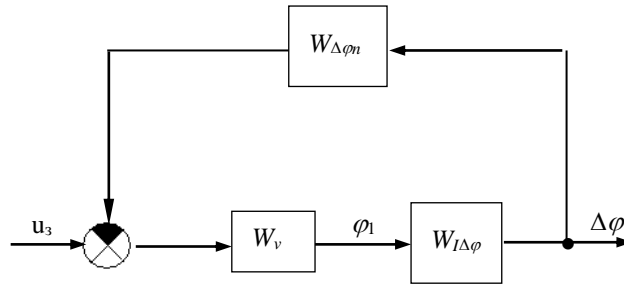
$$K_M = \frac{R_A}{c^2},$$



ნახ. 21. სისტემის სტრუქტურული სქემა



ნახ. 22. გარდაქმნილი სტრუქტურული სქემა



ნახ.23. გამსხვილებული სტრუქტურული სქემა

რის შედეგადაც

$$K_{pc} = \frac{K_m I_\Sigma}{4\tau K_c c}.$$

ასეთი მიდგომით შიგა ჩაკეტილი კონტურის გადამცემი ფუნქცია მიიღებს სახეს [142, 143]:

$$W_{BK} = \frac{W_{pn} W_{kc} \frac{1}{s}}{1 + k_{on} W_{pn} W_{kc} \frac{1}{s}} = \frac{K_n}{a_{B3}s^3 + a_{B2}s^2 + a_{B1}s + k_{on} K_n}, \quad (296)$$

სადაც,

$$a_{B3} = 16 \frac{\tau^2}{K_c};$$

$$a_{B2} = 4 \frac{\tau}{K_c};$$

$$a_{B1} = 1/K_c.$$

გადავდივართ მთლიანი სისტემის გადამცემ ფუნქციაზე

$$W_0(s) = \frac{M_{o\Delta\phi}}{N_{o\Delta\phi}} = \frac{W_{BK} W_{\Delta\phi} W_{I\phi}}{1 - W_{BK} W_{\Delta\phi} W_{on}}, \quad (297)$$

სადაც W_{on} – კონტურული უკუკავშირის გადამცემი ფუნქცია, რომლის გამოსახულებაა

$$W_{on}(s) = k_{on} + \frac{K_m (2\tau s + 1)(I_2 s^2 + b_2 s) T_{Rc} s}{CK_n (T_{kc} s + K_{Rc})}. \quad (298)$$

შემოგვაქვს აღნიშვნები

$$W_{nuc} = \frac{T_{kc} p + K_{pc}}{T_{pc} p}, \quad (299)$$

სადაც W_{nuc} – გადაცემა ფუნქციაა,

$$T_{kc} = K_{pc} T_{pc} .$$

შეგვიძლია ჩავწეროთ

$$N'_{0\Delta\phi} = (I_2 s^2 + b_{2\Sigma} + c_{12})(a_{B3} s^3 + a_{B2} s^2 + a_{B1} s + k_{on} K_n) - K_n \left[k_{on} + \frac{K_m (2\tau s + 1)(I_2 s^2 + b_2 s T_{pc} s)}{CK_n (T_{pc} + K_n)} \right] (I_2 s^2 + b_2 s) . \quad (300)$$

აქ:

$$T_{kc} = K_{pc} T_{pc} \\ (a_{B3} s^3 + a_{B2} s^2 + a_{B1} s + k_{on} K_n)(I_2 s^2 + b_{2\Sigma} s + c_{12}) = \\ = A_{B5} s^5 + A_{B4} s^4 + A_{B3} s^3 + A_{B2} s^2 + A_{B1} s + A_{B0} , \quad (301)$$

სადაც

$$A_{B5} = a_{B3} I_2 ; \\ A_{B4} = a_{B2} I_2 + a_{B3} b_{2\Sigma} ; \\ A_{B3} = a_{B1} I_2 + a_{B2} b_{2\Sigma} + a_{B3} c_{12} ; \\ A_{B2} = k_{on} K_n I_2 + a_{B1} b_2 + a_{B2} c_{12} ; \\ A_{B1} = k_{on} K_n I_{2\Sigma} + a_{B1} c_{12} , \\ A_{B0} = k_{on} K_n c_{12} .$$

გადავდივართ მახასიათებელი განტოლების გამოსახულებაზე:

$$N_{0\Delta\phi} = \left[(A_{B5} s^5 + A_{B4} s^4 + A_{B3} s^3 + A_{B2} s^2 + A_{B1} s + k_{on} K_n c_{12})(T_{kc} s + K_{pc}) \right] = \\ - (K_n k_{on}) (I_2 s^2 + b_2 s) (T_{kc} s + K_{pc}) - \frac{K_m}{C} (2\tau s + 1)(I_2 s^2 + b_2 s)^2 T_{pc} s . \quad (302)$$

გაშლილი სახით გვექნება:

$$(A_{B5} s^5 + A_{B4} s^4 + A_{B3} s^3 + A_{B2} s^2 + A_{B1} s + k_{on} K_n c_{12})(T_{kc} s + K_{pc}) = \\ = A_{C6} s^6 + A_{C5} s^5 + A_{C4} s^4 + A_{C3} s^3 + A_{C2} s^2 + A_{C1} s + A_{C0} , \quad (303)$$

სადაც:

$$A_{C6} = A_{B5} T_{kc} ; \\ A_{C5} = A_{B4} T_{kc} + A_{B5} K_{pc} ;$$

$$A_{c4} = A_{B3}T_{kc} + A_{B4}K_{pc};$$

$$A_{c3} = A_{B2}T_{kc} + A_{B3}K_{pc};$$

$$A_{c2} = A_{B1}T_{kc} + A_{B2}K_{pc};$$

$$A_{c1} = A_{B0}T_{kc} + A_{B1}K_{pc};$$

$$A_{c0} = A_{B0}K_{pc}.$$

ანალოგიურად:

$$\begin{aligned} & \left[(K_n k_{on} I_2) s^2 + (K_n k_{on} b_2) s \right] (T_{kc} s + K_{pc}) = (K_n k_{on} I_2 K_{pc}) s^2 + \\ & + (K_n k_{on} I_2 K_{pc}) s = \frac{B_3}{(K_n k_{on} I_2 T_{kc}) s^3} + \frac{B_2}{\left[K_n k_{on} b_2 T_{kc} + K_n k_{on} I_2 K_{pc} \right] s^2} + \\ & + \frac{B_1}{(K_n k_{on} b_2 K_{pc}) s} = B_2 s^3 + B_2 s^2 + B_1 s \end{aligned}$$

და

$$\begin{aligned} F_m &= \frac{K_m}{CK_n} (2\tau s + 1) (I_2 s^2 + b_2 s)^2 T_{pc} s = \frac{K_m}{C} (d_5 s^5 + d_4 s^4 + d_3 s^3 + d_2 s^2) T_{pc} s = \\ &= \frac{K_m}{C} (d'_6 s^6 + d'_5 s^5 + d'_4 s^4 + d'_3 s^3), \end{aligned} \quad (304)$$

სადაც:

$$d'_6 = d_5 T_{pc};$$

$$d'_5 = d_4 T_{pc};$$

$$d'_4 = d_3 T_{pc};$$

$$d'_3 = d_2 T_{pc};$$

$$d_5 = 2\tau I_2^2;$$

$$d_4 = I_2 + 3\tau b_2 I_2;$$

$$d_3 = I_2 b_1 + 2\tau b_2^2 + b_2 I_2;$$

$$d_2 = b_2^2.$$

საბოლოოდ მთლიანი მახასიათებელი განტოლება მიიღებს სახეს:

$$N_{0\Delta\phi} + A_{x6} s^6 + A_{x5} s^5 + A_{x4} s^4 + A_{x3} s^3 + A_{x2} s^2 + A_{x1} s + A_{x0}, \quad (305)$$

სადაც:

$$A_{x6} = A_{B5}T_{kc} - \frac{K_m}{c}d'_6;$$

$$A_{x5} = A_{B4}T_{kc} + A_{B5}K_{pc} - \frac{K_m}{c}d'_5;$$

$$A_{x4} = A_{B3}T_{kc} + A_{B4}K_{pc} - \frac{K_m}{c}d'_4;$$

$$A_{x3} = A_{B2}T_{kc} + A_{B3}K_{pc} - \frac{K_m}{c}d'_3 - B_3;$$

$$A_{x2} = A_{B1}T_{pc} + A_{B2}K_{pc} - B_2;$$

$$A_{x1} = A_{B0}T_{pc} + A_{B1}K_{pc} - B_1;$$

$$A_{x0} = A_{c0}.$$

ან და უფრო გაშლილი სახით:

$$A_{x3} = A_{c3} - \frac{K_m}{c}d'_3 - B_s = A_{c3} - \frac{K_m}{c}d' - (k_{on}I_2T_{kc})K_n;$$

$$\begin{aligned} A_{x3} &= A_{B2}T_{kc} + A_{B3}K_{pc} - \frac{K_m}{c}d'_3 - (k_{on}I_2T_{kc})K_n = \\ &= (k_{on}K_nI_2 + a_{B1}b_2 + a_{B6}c_{12})T_{kc} - \frac{K_m}{c}d'_3 - (k_{on}I_2T_{kc})K_n. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{x2} &= A_{c2} - (b_2T_{kc} + I_2K_{pc})k_{on}K_n = A_{B1}T_{pc} + A_{B2}K_{pc} - (b_2T_{kc} + I_2K_{pc})k_{on}K_n = \\ &= (k_{on}b_{2\Sigma}K_n + a_{B1}c_{12})T_{pc} + (k_{on}I_2K_n + a_{B1}b_2 + a_{B0}c_{12})K_{pc} - \\ &- (b_2T_{kc} + I_2K_{pc})k_{on}K_n. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{x1} &= A_{c1} - (k_{on}b_2K_{pc})K_n = (A_{B0}T_{kc} + A_{B1}K_{pc}) + (k_{on}b_2K_{pc})K_n = \\ &= (k_{on}T_{kc}c_{12})K_n + (k_{on}K_nb_{2\Sigma} + a_{B1}c_{12})K_{pc} - (k_{on}b_2K_{pc})K_n = \\ &= (k_{on}T_{kc}c_{12} + k_{on}b_{2\Sigma}K_{pc} - k_{on}b_2K_{pc})K_n - (a_{B1}c_{12}K_{pc}); \end{aligned}$$

$$A_{x0} = A_{c0} = A_{B0}K_{pc} = (k_{on}K_{pc}c_{12})K_n.$$

ანდა გამსხვილებულად

$$A_{x0} = B_{x0}K_n;$$

$$A_{x1} = B_{x1}K_n - C_{x1};$$

$$A_{x2} = B_{x2}K_n + C_{x2};$$

$$A_{x3} = C_{x3} - B_{x3}K_n,$$

სადაც

$$\begin{aligned}
 B_{x0} &= k_{on} K_{pc} c_{12}; \\
 B_{x1} &= k_{on} T_{kc} c_{12} + k_{on} b_{2\Sigma} K_{pc} - k_{on} b_2 K_{pc}; \\
 B_{x2} &= k_{on} b_{2\Sigma} + k_{on} I_1 - b_1 T_{kc} k_{on} - I_2 k_{on}; \\
 C_{x2} &= a_{B1} c_{12} T_{pc} + a_{b1} b_2 K_{pc} + a_{B0} c_{12} K_{pc}; \\
 C_{x3} &= a_{B1} b_2 T_{kc} + a_{B0} c_{12} K_{kc} - \frac{K_m}{c} d'_3; \\
 B_{x3} &= k_{on} I_2 T_{kc}.
 \end{aligned}$$

გადავდივართ სიხშირით განტოლებაზე და ვწერთ:

$$\begin{aligned}
 A_{x6}(a_{s6} + jb_{s6}) + A_{x5}(a_{s5} + jb_{s5}) + A_{x4}(a_{s4} + jb_{s4}) + A_{x3}(a_{s3} + jb_{s3}) + \\
 + A_{x2}(a_{s2} + jb_{s2}) + A_{x1}(\varepsilon + j\omega) + A_{x0} = 0.
 \end{aligned} \tag{306}$$

აქ:

$$\begin{aligned}
 a_{s2} &= \varepsilon^2 - \omega^2; \\
 b_{s2} &= 2\varepsilon\omega; \\
 a_{s3} &= \varepsilon^3 - 3\varepsilon\omega^2; \\
 b_{s3} &= 3\varepsilon^2\omega - \omega^2; \\
 a_{s4} &= \varepsilon^4 - 3\varepsilon^2\omega^2 - 3\varepsilon^3\omega + \omega^3; \\
 b_{s4} &= 4\varepsilon^3\omega - \varepsilon\omega^2 - 3\varepsilon\omega^3; \\
 a_{s5} &= \varepsilon^5 - 7\varepsilon^3\omega^2 - 3\varepsilon^4\omega + 3\varepsilon\omega^4; \\
 b_{s5} &= -3\varepsilon^3\omega^4 + \omega^4 + \varepsilon^2\omega^2 - \varepsilon^4\omega; \\
 a_{s6} &= (\varepsilon^5 - 7\varepsilon^3\omega^2 - 3\varepsilon^4\omega + 3\varepsilon\omega^4)\varepsilon - (-3\varepsilon^3\omega^4 + \omega^4 + \varepsilon^2\omega^2 - \varepsilon^4\omega)\omega; \\
 a_{s6} &= \varepsilon^6 - 7\varepsilon^4\omega^2 - 3\varepsilon^4\omega + 3\varepsilon^2\omega^4 + 3\varepsilon^3\omega^5 - \omega^5 - \varepsilon^2\omega^3 + \varepsilon^4\omega; \\
 b_{s6} &= (\varepsilon^5 - 7\varepsilon^3\omega^2 - 3\varepsilon^4\omega + 3\varepsilon\omega^4)\omega - (-3\varepsilon^3\omega^4 + \omega^4 + \varepsilon^2\omega^2 - \varepsilon^4\omega)\omega = \\
 &= -7\varepsilon^3\omega^3 - 3\varepsilon^4\omega^2 + 3\varepsilon\omega^5 - 3\varepsilon^3\omega^4 - \omega^4\varepsilon - \varepsilon^3\omega^2.
 \end{aligned}$$

ნამდვილი და წარმოსახვითი ნაწილების გამოყოფით შეგვიძლია

ჩავწეროთ:

$$A_{x6}a_{s6} + A_{x5}a_{s5} + A_{x4}a_{s4} + A_{x3}a_{s3} + A_{x2}a_{s2} + A_{x1}\varepsilon + A_{x0} = 0; \tag{307}$$

$$A_{x6}b_{s6} + A_{x5}b_{s5} + A_{x4}b_{s4} + A_{x3}b_{s3} + A_{x2}b_{s2} + A_{x1}\omega = 0. \tag{308}$$

შემდგომი ამოცანაა სიხშირით განტოლებათა სისტემის ამოხსნა ε და ω პარამეტრების მიმართ.

ამ ამოცანის ამოხსნის მიმართულებით შემოგვაქვს გამარტივებული მიდგომები აგებული მიმდევრობითი სახის მიახლოებათა გამოყენებაზე.

პირველი მიდგომის თანახმად ε -ისა და ω -ს პირველად მიახლოებებად ε_* და ω_* ვიღებთ მათ მნიშვნელობებს, რომლებიც გაითვლებიან $W_{\Delta\varphi}$ გადამცემი ფუნქციის მახასიათებელ ნაწილიდან;

მეორე მიდგომის თანახმად სისტემის $\Delta\varphi$ მიმართ შედგენილი სტრუქტურული სქემის $W_{\Delta\varphi}$ გადამცემი ფუნქციის შემავალ და გამავალ კოორდინატთა შემაერთებელ გადამცემ ფუნქციას ინტეგრალურად (წარმოსახვით სიხშირეთა მახასიათებელთა აპარატის გამოყენებით) აპროქსიმაციულად ვცვლით მეორე ხარისხის მქონე მახასიათებელი ნაწილის მქონე გადამცემი ფუნქციით. უკანასკნელის გამოყენებით, რის შედეგადაც საკვლევი სისტემის მახასიათებელი განტოლება დაიყვანება მე-4-ე ხარისხის ალგებრულ განტოლებაზე.

შემდგომ კი ნაშრომში [72] მოცემული დამოკიდებულებების თანახმად ვსაზღვრავთ ε_* და ω_* -ის მნიშვნელობებს.

შემდგომ განტოლებებს (307) და (308) ვწერთ $\Delta\varepsilon$ და $\Delta\omega$ ნამატების მიმართ არაწრფივი წევრების ტეილორის რიგში განშლით და პირველი წევრების შენარჩუნებით [143-145]

$$A_{x6}a_{s60} + A_{x5}a_{s50} + A_{x4}a_{s40} + A_{x3}a_{s30} + A_{x2}a_{s20} + A_{x1}\varepsilon_* + A_{x0} +$$

$$+ \left[A_{x6} \left(\frac{\partial a_{s6}}{\partial \varepsilon} \right)_* + A_{x5} \left(\frac{\partial a_{s5}}{\partial \varepsilon} \right)_* + A_{x4} \left(\frac{\partial a_{s4}}{\partial \varepsilon} \right)_* + A_{x3} \left(\frac{\partial a_{s3}}{\partial \varepsilon} \right)_* + \right.$$

$$\left. + A_{x2} \left(\frac{\partial a_{s2}}{\partial \varepsilon} \right)_* + A_{x1} \right] \Delta\varepsilon. \quad (309)$$

$$\left[A_{x6} \frac{\partial a_{s6}}{\partial \omega_*} + A_{x5} \frac{\partial a_{s5}}{\partial \omega_*} + A_{x4} \frac{\partial a_{s4}}{\partial \omega_*} + A_{x3} \frac{\partial a_{s3}}{\partial \omega_*} + A_{x2} \frac{\partial a_{s2}}{\partial \omega_*} \right] = 0. \quad (310)$$

$$A_{x6}b_{s60} + A_{x5}b_{s50} + A_{x4}b_{s40} + A_{x3}b_{s30} + A_{x2}b_{s20} + A_{x1}\omega_* =$$

$$+ \left[A_{x6} \frac{\partial b_{s6}}{\partial \varepsilon_*} + A_{x5} \frac{\partial b_{s5}}{\partial \varepsilon_*} + A_{x4} \frac{\partial b_{s4}}{\partial \varepsilon_*} + A_{x3} \frac{\partial b_{s3}}{\partial \varepsilon_*} + A_{x2} \frac{\partial b_{s2}}{\partial \varepsilon_*} - A_{x1} \right] \Delta\varepsilon +$$

$$+ \left[A_{x6} \frac{\partial b_{s6}}{\partial \omega_*} + A_{x5} \frac{\partial b_{s5}}{\partial \omega_*} + A_{x4} \frac{\partial b_{s4}}{\partial \omega_*} + A_{x3} \frac{\partial b_{s3}}{\partial \omega_*} + A_{x2} \frac{\partial b_{s2}}{\partial \omega_*} + A_{x1} \right] = 0, \quad (311)$$

სადაც

$$\frac{\partial b_{s2}}{\partial \omega} = 2\varepsilon;$$

$$\frac{\partial b_{s3}}{\partial \omega} = 3\varepsilon^2 - 2\omega;$$

$$\frac{\partial b_{s4}}{\partial \omega} = 4\varepsilon^3 - 2\varepsilon\omega - 9\varepsilon\omega^2;$$

$$\frac{\partial b_{s5}}{\partial \omega} = -14\varepsilon^4\omega - 3\varepsilon^4 + 12\varepsilon\omega^3;$$

$$\frac{\partial b_{s6}}{\partial \omega} = -21\varepsilon^3\omega^2 - 6\varepsilon^4\omega + 14\varepsilon\omega^4 + 12\varepsilon^3\omega^3 - 4\varepsilon\omega^3 - 2\varepsilon^3\omega;$$

$$\frac{\partial a_{s2}}{\partial \varepsilon} = 2\varepsilon;$$

$$\frac{\partial a_{s3}}{\partial \varepsilon} = 3\varepsilon^2 - 3\omega^2;$$

$$\frac{\partial a_{s4}}{\partial \varepsilon} = 4\varepsilon^3 - 3\varepsilon\omega^2 - 3\varepsilon^2\omega;$$

$$\frac{\partial a_{s5}}{\partial \varepsilon} = 5\varepsilon^4 - \varepsilon^2\omega^2 - 3\varepsilon^3\omega + 3\omega^4;$$

$$\frac{\partial a_{s2}}{\partial \omega} = -2\omega;$$

$$\frac{\partial a_{s3}}{\partial \omega} = 2\varepsilon;$$

$$\frac{\partial a_{s4}}{\partial \omega} = -6\varepsilon^2\omega - 3\varepsilon^3 + 3\omega^2;$$

$$\frac{\partial a_{s5}}{\partial \omega} = -14\varepsilon^3\omega - 3\varepsilon^4 + 12\varepsilon\omega^3;$$

$$\frac{\partial b_{s2}}{\partial \varepsilon} = 2\omega;$$

$$\frac{\partial b_{s3}}{\partial \varepsilon} = 6\varepsilon\omega;$$

$$\frac{\partial b_{s4}}{\partial \varepsilon} = 12\varepsilon^2\omega - \omega^2 - 3\omega^3;$$

$$\frac{\partial b_{s5}}{\partial \varepsilon} = 5\varepsilon^4 - 21\varepsilon^2\omega^2 - 12\varepsilon^3\omega + 3\omega^4.$$

3. დასკვნა

1. სამეცნიერო ტექნიკური პროგრესის თანამედროვე ტენდენციები ხასიათდებიან ეფექტური ტექნოლოგიების, ავტომატიზებული მანქანების და მოწყობილობების ფართო დანერგვით. ინერგებიან ავტომატიზებული მაკოპირებული და პროგრამული მართვის ჩარხები, საჩარხო ხაზები და საჩარხო რობოტოტექნიკური სისტემები, ავტომატიზებული სატრანსპორტო მოწყობილობები და ა.შ., რომელთა ძირითად ფუნქციონალურ ელემენტებს წარმოადგენენ ამძრავთა ავტომატიზებული, მათ შორის ჰიდრომექანიკური, ჰიდრომექანიკური და ელექტრომექანიკური სისტემები.

აღნიშნულია, რომ მრავალ შემთხვევაში ეს ამძრავები წარმოადგენენ რთულ ტექნიკურ სისტემებს, რაც განპირობებულია მანქანათა მიერ შესასრულებელი საწარმოო და სატრანსპორტო პროცესების სტრუქტურული და კინემატიკური სირთულეები და მათი საექსპლუატაციო ნახასიათებლებით.

2. რთულპროფილიანი დეტალების დამუშავებისათვის გამიზნული მაკოპირებელი და პირველ რიგში როტორულ-სახეხი მაკოპირებელი ჩარხების ფუნქციონალური შესაძლებლობების და მათი მექანიკური მაჩვენებლების ანალიზიდან გამომდინარე განხილვაში შემოტანილია სამკოორდინატო კოპირების ჰიდრომექანიკური ამძრავით ათჭურვილი საჩარხო სისტემა, რომელიც საშუალებას იძლევა რათა განხორციელებული იქნას რთული სივრცითი სახის მრუდწირულ-ფასონურ პროფილის მქონე დეტალების მაკოპირებელი დამუშავება.

3. სახეხი პნევმოცილინდრების ღერძების, მმართველი რგოლის და მაკოპირებელი როტორის ნამზადის გრძივი მოძრაობით გამოწვეული განივი და მართობული სიბრტყეების მიმართულებით აღძრულ ფარდობით მოძრაობათა კინემატიკური ანალიზის საფუძველზე შემუშავებულია სახეხი ცილინდრების ღერძების გადაადგილებათა ამსახველი არაწრფივი ფუნქციები, საჩარხო როტორისა და მოთვალთვალე

რგოლის ფარდობით მოძრაობათა კანონზომიერებები ფუნქციონალურ კავშირში ნამზადის მიწოდებასთან გრძივი მიმართულებით და ჩარხის როტორის კუთხურ მოძრაობასთან.

4. კოპირების დინამიკურ პროცესში ცალკეული რგოლების ფარდობით მოძრაობათა ანალიზის შედეგად გამოვლენილია დინამიკური მოდელების აგებისათვის საჭირო განზოგადოებული კოორდინატები. შემუშავებულია პოტენციალური და კინეტიკური ენერგიების, დისიპაციური ფუნქციებისა და ძალთა განზოგადოებული გამოსახულებები და მათი ადრე გამოვლენილ მდებარეობათა შეთანწყობით ლაგრანჟის მეორე რიგის განტოლებაში შემუშავებულია მმართველი რგოლის დინამიკის მათემატიკური მოდელი.

შემუშავებული იქნა აგრეთვე საკვლევი სისტემის მოთვალთვალე ჰიდრავლიკური ელემენტების დინამიკის აღწერისათვის საჭირო კანონზომიერებები, რომლებიც ეფუძნებიან ძალთა ბალანსისა და სითხის ხარჯების ცნობილ განტოლებებს.

ცალკეული ფუნქციონალური ელემენტებისა და ცალკეული კოორდინატების ჰიდრომექანიკური მოთვალთვალე მექანიზმების მოდელების ანალიზისა და მათი შეთანწყობით შემუშავებული იქნა მთლიანი სამკოორდინატიანი კოპირების ჰიდრომექანიკური სისტემის დინამიკის მათემატიკური მოდელები.

5. საკვლევი მაკოპირებელი მოწყობილობის ფუნქციონალური ანალიზის გვიჩვენებს, რომ შემდგომი კვლევების თვალსაზრისით საქმე გვაქვს რთული სამრეჟიმიან მოთვალთვალე სისტემასთან: პირველ რეჟიმში გამორიცხულია ვერტიკალური მაკოპირებელი და ჩარხის როტორის ბრუნვითი მოძრაობები; მეორე რეჟიმში დაფიქსირებულია ვერტიკალური მაკოპირებელი მოძრაობა; მესამე რეჟიმში საქმე გვაქვს მოძრაობებთან სამივე აღწერილი მიმართულებებით.
6. დინამიკის შემუშავებული მოდელების ხარისხობრივი ანალიზის საფუძველზე შემუშავებულია საკვლევი სისტემის სინთეზის

გამოყენებითი თეორია, რომელიც აგებულია სტაციონარიზებული სისტემების მოცემული გარდამავალი პროცესების მიხედვით სინთეზის და ვიბრომდგრადობის ანალიზზე არასტაციონარულ მოდელებში.

სტაციონარიზებული სისტემების სინთეზის ძირითადი პროცედურებია: სასურველი პროცესების ჩამოყალიბება, ინტეგრალური მიახლოება გაწრფივებულ და არაწრფივ მოდელებში და მდგრადობის პირობის უზრუნველყოფა.

7. გამოსაკვლევი მრავალრეჟიმიანი ჰიდრომექანიკური სისტემების კვლევის ჩამოყალიბებული მეთოდოლოგიის პრაქტიკული რეალიზაციის თვალსაზრისით, ნაშრომში ჩატარებულია საანგარიშო გამოკვლევების გარკვეული წრფე, რომლებმაც გვიჩვენა სინთეზის შემუშავებული მეთოდოლოგიის საშუალება. რომელიც პირველ რიგში იძლევა ჩავატაროთ საკვლევი სისტემის შესარჩევი პარამეტრების მიზანდასახული შერჩევა, ხოლო მეორეს მხრივ კიდევ ნაჩვენებია, რომ სინთეზის შედეგად მიღებული გარდამავალი პროცესები საკმაოდ ახლოს არიან სასურველ პროცესებთან.
8. თანამედროვე ჩარხებში და რობოტოტექნიკურ სისტემებში ფართოდ გამოყენებული ამძრავთა ელექტრომექანიკურ სისტემებთან მიმართებაში არსებული კვლევების ხარისხობრივი და რაოდენობრივი ანალიზი მიგვანიშნებს იმაზე, რომ ეს სისტემები ტექნიკური მაჩვენებლების ამაღლების თვალსაზრისით მეტად აქტუალურია, შესაბამისად მექანიკურ ნაწილში არსებული დრეკადი კავშირების გათვალისწინება და მათი ეფექტური შეთანწყობა მთლიანი სისტემის დინამიკური მოდელირებისა და დინამიკური კვლევის საკითხებთა.
9. შემუშავებული რხევითი მდგენელის გამოყოფაზე აგებული მათემატიკური მოდელი, რომლის თანახმად სისტემას ვიხილავთ ორკონტურიანი სახით და რომელშიც შიგა კონტური წარმოადგენს ხისტი რგოლებიანი მექანიკური სისტემის სტრუქტურას. ცნობილია დინამიკური კვლევების ანალიზის საფუძველზე ნაშრომში წარმოდგენილია საკვლევი ელექტრომექანიკური სისტემის დინამიკური კვლევის ორიგინალური

მეთოდოლოგია, რომლის ძირითადი შემადგენელი ნაწილებია: შიგა კონტურის პარამეტრული ანალიზი და სინთეზი დაქვემდებარებული რეგულირების თეორიის და მთლიანი სისტემის გარდამავალ პროცესებში აღძრული რხევით მოძრაობათა პარამეტრების კვლევა. აღნიშნულია შემუშავებული მეთოდოლოგიის მიზანშეწონილობა, როგორც პარამეტრული ანალიზის, ასევე სინთეზის მიმართულებით.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Чупраков Ю. И. Гидропривод и средства гидроавтоматики.- М.: Машиностроение, 1979. – 232с.
2. Хохлов В. А. „Электрогидравлический следящий привод“. М.: Наука. 1966. – 240 с.
3. Михайлов О. П. „Автоматизированный электропривод промышленных роботов и станков“. М.: Машиностроение, 1990. -304 с.
4. Лещенко В.А. Гидравлические следящие приводы. М.: Машиностроение, 1975. – 288с
5. Проектирование гидравлических приводов летательных аппаратов / А. И. Баженов, Н. С. Гамынин и др.; Под ред. Н. С. Гамынина. М.: Машиностроение, 1981. – 312 с.
6. Крытов Б. Г., Стеблецов В. Г., Рабинович Л. В. :Исполнительные устройства систем управления летательными аппаратами“. М.: Маш-е. 1987. -264 с.
7. Фрейдзон И. Р. Судовые автоматизированные электроприводы и системы Л.: 1988. – 472 с.
8. Вейц В. Л., Кочура А. Е. Динамика машинных агрегатов. М.: Наука, 1984. – 352 с.
9. Дружинский И. А. Сложные поверхности: Справочник. Л.: Маш-е, 1985.-263 с.
10. Справочник по проектированию автоматизированных приводов и систем управления.Под ред. В.И. Круповича и др. М.: Энергопривод, 1962.
11. Лебедев А. М., Орлоа Р.Т. Следящие электроприводы станков с ЧПУ. М.: Энергоатомиздат, 1988, 223 с.
12. Терехов В.М. . Элементыэлектропривода. М.: Энергоатомиздат, 1987.
13. Михайлов О. П. Высокомоментные двигатели для приводов подачи. М.: НИИмаш, 1979.
14. Под ред. Б. К. Чемоданова. Следящие приводы. М.: Энергия, 1976, 256 с.
15. Алексеева Т. В. Гидропривод землеройно-транспортных машин. М.: Машиностроение, 1960. – 128 с.
16. Кузнечно-штамповочное-оборудование / /А. Н. Банкетов, Ю.А. Бочаров и др. М.: Маш-е, 1982. – 576 с.
17. Барнов В. Н. „Электрогидравлические приводы вибрационных машин“. М.: Машин-ние, 1988. – 264 с.
18. Гамынин Н. С., и др. Гидравлический следящий привод /Под ред. В.А. Лещенко. М.: Машино-ние,1968. – 564 с.
19. Дружинский И. А. Методы обработки сложных поверхностей на металлорежущих станках. М.-Л.: Машгиз,1955
20. Гребер Е. Е. и др. Деревообрабатывающее оборудование. М.: Лесная промышленность, 1966. 500 с.
21. Вавилов А. А., Верхолат М. Е. Силовые электромеханические системы копирально-фрезерных станков. М.-Л.: Машино-ние, 1964. 407 с.

22. „Гидравлические следящие системы станков и основы их проектирования“ / Б. Л. Коробочкин. – В кн.: Автоматизация в машиностроении. М.: Машгиз, 1957. С. 65-87.
23. Мchedlishvili Т. Ф., Мартыненко В. А. Специальная трехкоординатная система управления процессом копирования. В кн.: Труды вузов Уральского зоны. Сб. 206. Свердловск, 1972. С. 97-102.
24. Лещенко В.А. Гидравлические следящие приводы. М.: Машино-ние, 1976, 288 с.
25. Новая гамма станков для обработки судовых гребных винтов / Н. И. Иванов, Н. М. Сундюков, Н. Н. Соловьев. – Станки и инструмент, 1980, №5, С. 9-10.
26. Юнусов Ф. С. Формообразование сложнопрофильных поверхностей шлифованием. М.: Машино-ние, 1987, 248 с.
27. Новая гамма горизонтальных фрезерных станков / С. Г. Жуковская, М. Г. Имянитов. В кн.: Исследования и конструирование тяжелых металлорежущих станков. М.: НИИмаш, 1970. С.5-24.
28. Обработка лопаток турбин абразивными лентами // Е.И. Алексенцев, Е. В. Богомолов, М. А. Зенин. – Станки и инструмент, 1979, № 10, с.18-19.
29. Афанасьев П. С. “Деревообрабатывающие машины” . М.: Машгиз, 1965. 375 с.
30. Шамилов Г. Л. Оборудование для копировально-фрезерных работ по дереву фирмы «Reichenbacher» Экспресс-информация «Деревообрабаты-вающее оборудование», Минстанкопром, ИИМаш 5 вып. М.: 1983. 24с.
31. Станок для шлифования деталей. // Л. С. Иванов, Ю. Г. Крюк, А. И. Брюханов. №644860/25. Оpubл. в Б.И. 1960, № 3.
32. Станок для шлифования круглых прямолинейных криволинейных деталей из древесины. Оpubл. в Б.И. 1962. № 18.
33. 2114843. -6.4.76.-6.10.77. Kopierschleifmaschine Maschinfabrik Sucherman KG Wien VTR: Ctunecker A., Kinkeldey H., Stakmair W., Schenmann K., Jakob P., Bexold G.P. an walte, 8000 Munechen E. Schmidt, Erich Maverbach (Osterreich).
34. Зубиашвили Г.М., Амколадзе Х.М. К исследованию динамики следящей системы // Транспорт и маш-ние, № 3(35), Тбилиси, 2011, с. 22-27.
35. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. М.: Машиностроение. 1987. – 464 с.
36. Артоболевский И.И. Теория механизмов. – М.: 1967. – 720 с. С ил.
37. Артоболевский И.И. Курс теории мезанизмов и машин. – М.: Высшая школа, 1975. – 320 с.
38. Артоболевский И.И. Сборник задач по теории машин. – М.: наука, 1975. -156 с.
39. Левитский И. Теория механизмов и машин.– М.: Машино-ние,1979,252 с.
40. Левитский И. Колебания в механизмах. – М.: 1981. – 276 с.
41. Черкудинов С.А. Синтез плоских рычажных механизмов. Изд. А СССР. - 1959.
42. Кудинов В.А. Динамика станков. – М.:1967. – 356 с.
43. Манжос Ф.М. Деревообрабатывающее оборудование. Машгиз, 1962 – 575 с
44. Бидерман В.Л. Прикладная теория колебаний. – М.: Наука, 1980. – 368 с.

45. Диментберг М.Ф. Нелинейные задачи механических колебаний. – М.: Наука, 1980. – 368 с.
46. Сергеев С.И. Демпфирование механических колебаний. – М.: 1959.-407с.
47. Палмов В.А. Колебания упруго-пластических тел. – М.: Наука, 1976. – 327 с.
48. Коловский М.З. Динамика машин. Л.: Машино-ние, 1989. – 263 с.
49. Тавхелидзе Д.Д., Кобалава Б.Г. Исследование приводного механизма с учетом влияния динамических характеристик. Сб. трудов ГПИ им.В.И. ленина, 1989. С.5-7
50. Казак С.А. Динамика мостовых кранов. М.: Машино-ние, 1968,332 с.
51. Комаров М.С. Динамика механизмов и машин. – М.: Машино-ние, 1968. 332 с.
52. Адамия Р.Ш. Оптимизация нагрузок прокатных станов. М.: Металлургия, 1978. – 232 с.
53. Голубенцев А.Н. Интегральные методы в динамике. Киев.: Техника, 1967.- 350 с.
54. Вейц В.Л., Дондошанский В.К. Вынужденные колебания металлорежущих станков. – М.-Л. 1959. – 285 с.
55. Красников Ю.Д., и др. Оптимизация привода выемочных и проходческих машин. М.: Недра, 1983. 264 с.
56. Грец Е.В., Кребник Г.В. Расчет пневмоцилиндров. М.: Машино-ние, 1975. – 272 с., с ил.
57. Мchedlishvili T., Kapanaidze T., Tediashvili L., Marsagishvili L. К вопросу динамики переходных процессов в гидравлических и электрогидравлических следящих приводах // Транспорт, № 1-2 (65-66). Тбилиси, 2017, с. 3-6.
58. Хлыпало Е.И. Нелинейные системы автоматического регулирования / Под общ. Ред. Е.П. Попова. – Л.: Энергия, 1967. – 452., ил.
59. Вульфсон И.И., Коловский М.З. нелинейные задачи динамики машин. – Л.: Машино-ние, 1968. – 284 с., ил.
60. Вульфсон И.И. Колебания машин с механизмами циклового действия. – Л.: Машино-ние, 1990. – 309 с.
61. Островский М.Я., Чечурин С.Л. Стационарные модели системы автоматического управления. – Л.: Энерго-издат, 1989. – 208 с., ил
62. Виноградов Е.Е., Островский М.Я. Расчет периодических нестационарных систем. В кн: Сложные системы управления. Л. – Изд-во ЛГУ. 1985. С. 122-129.
63. Воронов А.А. Основы теории автоматического регулирования. Часть II. – Л.: Энергия, 1965. – 208 с., ил.
64. Красовский А.А., Пospelov Г.С. Основы автоматики и технической кибернетики. – М.-Д.: 1962. – 600 с., ил
65. Биссекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975. – 768 с., ил.
66. Нелинейные системы автоматического управления. / М.: Машиностроение, 1979. – 568 с., ил

67. Кринецкий И.И. Расчет нелинейных автоматических систем. – киев: 1968. – 312 с.
68. Орурк И.А. Новые методы синтеза линейных и некоторых нелинейных динамических систем. – М. -Л: Наука, 1965. – 208 с., ил
69. Анализ и оптимальный синтез систем управления // Под ред. А.А Воронова и И.А. Орурка. М.: Наука, 1984. – 344 с.
70. Орурк И.А. Синтез элементов систем АР. Автоматика и телемеханика. №12, 1959. – 162-175 с.
71. Орурк И.А. Характеристики- мнимых частот и их применение для велинейных систем. Ж.Автоматика и телемеханика,№7, 1962. С. 215-264.
72. Белов Д.А., Кузин Р.Е Применение ЭВМ для синтеза автоматических систем. / Под ред. А.В Етушина. – М.: Энергия, 1979. – 264 с.
73. Мchedlishvili Т.Ф. К вопросу линеаризации нелинейных динамических звеньев при синтезе с наперед заданными характеристиками переходного процесса. Сообщ. // АН ГССР, 1981, т.101, №2. – С. 389-392.
74. Мchedlishvili Т.Ф. К вопросу синтеза нелинейных динамических систем. // Сообщ. А ГССР, т.99, №3. – С.61-65.
75. Мchedlishvili Т.Ф. О синтезе систем с нелинейными законами регулирования. // Сообщ. АН ГССР, 1977, т.86, №3. – С.669-672.
76. Мchedlishvili Т.Ф. Синтез параметров гидравлических и электрогидравлических систем приводов // Гидравлические системы. Межвуз. Сб. Москва, 1984. С. 150-158.
77. Соколов Н.И. Аналитический метод синтеза линеаризованных систем регулирования. М.: Машино-ние, 1969.328 с.
78. Мchedlishvili Т.Ф. К синтезу сложных нелинейных систем регулирования. // металлорежущие станки. Респ. Межведоственный сборник, вип. 10, Киев.: Техника, 1982. – С.15-19.
79. Mchedlishvili T., Iobadze V., On ussue of optimization electromechanical systems / Problems of Mechanics, Tbilisi, N 55, 2011, p.p. 101-116.
80. Мchedlishvili Т.Ф., Тавхелидзе Д.Д. Оценка устойчивости систем регулирования при синтезе с заданными характеристиками переходного процесса. // Теория машинн.... Межвузовский сборник. Вып. 5. Сердловск: Изд. УПИ, 1981.С. 144-148.
81. Мchedlishvili Т.Ф. Некоторые вопроы синтеза многосвязной системы привода манипуляционного робота. // Гидравлические системы металлорежущих станков и промышленных роботов. Межвузовский сборник научных трудов. Изд-во Мосстанкина,М.: 1985. С. 157-178.
82. Мchedlishvili Т.Ф. Синтез нелинейных систем приводов. // Сообщ. АН ГССР, 1985, т.118,№ 3. С.325-329.
83. Нелинейные нестационарные системы / Г.Л. Выщковский и др. Под ред. Ю.И. Топчиева. – М.: Машино-ние, 1986.- 284 с.
84. Вульфсон И.И. Колебания машин. – Л.: Машиностроение, 1990. – 309 с.

85. თ. მჭედლიშვილი, ი. ელერდაშვილი, და სხვა. ჰიდრავლიკური და ელექტროჰიდრავლიკური მაძლიერებლები და ამძრავები. „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, თბილისი, 2008. – 173 გვ
86. Михайлов О.П. Динамика электромеханического привода металлорежущих станков. М.: Маш-ие, 1989. 224 с.
87. Воронов А.А Основы теории регулирования. Часть II. – Л.: Энергия, Ленинград. Отделение, 1965. – 208 с., ил.
88. Мchedlishvili T.Φ. и др. К вопросу синтеза электромеханических систем // Транспорт и машиностроение № 1(26), Тбилиси, 2013. – С. 84-89.
89. Мchedlishvili T.Φ. и др. К вопросу синтеза сложных систем регулирования // Транспорт и машиностроение № 1 (28), Тбилиси, 2012. – С.61-65.
90. Мchedlishvili T.Φ. Некоторые вопросы расчета станочных гидравлических систем. Труды УПИ, ст.214, Свердловск, 1974-152.
91. Мchedlishvili T.Φ. О синтезе систем с нелинейными законами регулирования . – Сообщения А ГССР, 1977. Т.86, №3. – С. 669-772.
92. Мchedlishvili T.Φ. К параметрическому синтезу следящих приводов. // Транспорт и машиностроение № 1 (26), Тбилиси, 2013. – с. 207-211.
93. Мchedlishvili T.Φ. Синтез нелинейных систем. – В кн.: Теория машин.: Межвузовский сборник. Вып. 5. Свердловск: Изд.УПИ, 1981. – С.131-134.
94. Мchedlishvili T.Φ. К вопросу переходных процессов в следящих системах. – В кн.: Повышение производительности обработки. Труды УПИ, сб. 214, Свердловск, 1974. – С.144-148.
95. Мchedlishvili T.Φ., Бокерия Р.А. К синтезу сложных нелинейных систем. В кн.: металлорежущие станки. Респ. Межведоств. Сборник, Вып. 10, Киев.: Техника, 1982. – С. 15-19
96. Мchedlishvili T.Φ., „Синтез пневматических механизмов формирования ударных“. Сборник научных трудов Груз. Технич. Университета. 1990. №4(360). – С.21-25.
97. Мchedlishvili T.Φ., Кирия В.И. „Синтез параметров приводов ударного стенда с пневматическим демпфирующим устройством“.Деп. в груз. НИИНТИ, 10.01.91. № 721-791.
98. Мchedlishvili T.Φ., Кирия В.И. К вопросу синтеза параметров ударного стенда. Сборник научник трудов Груз. Тенич. Университета. 1993.
99. Мchedlishvili T.Φ., „Методика анализа процессов в электрогидравлических следящих системах.“ - В кн.: Повышение производительности. Труды УПИ, сб. 238, Свердловск, 1975. – С. 17 – 21.
100. Мchedlishvili T.Φ., Парцхаладзе Б.И. и др. К динамическому синтезу машинных агрегатов. Сборник научных трудов Груз. Технич. Университета. 1989. № 7(349). – С.19-23.
101. Мchedlishvili T.Φ., Мchedlishvili Н.П. „К вопросу оптимизационного синтеза систем регулирования“ // Транспорт и машиностроение № 1 (23), Тбилиси, 2012. – с. 22-28.

102. Мchedlishvili T.Ф. Анализ переходных процессов в электрогидравлических след. системах. – В кн.: Повышение производительности обработки. Труды УПИ, сб. 238, Свердловск, 1975. – С. 22-25.
103. Адамия Р.Ш. Динамика машин. Тбилиси. 1999. – 360 с.
104. Берошвили А.И., и др. „К расчету на прочность и долговечность деталей привода комплекссора с кривошипно-ползунковым механизмом“. В кн.: Кинематика и динамика механизмов. Труды ГТУ, № 4(380), 1990.
105. Берошвили А.И. „Поршневые быстроходные комплексоры“. – В ст.: Тезисы докладов международной конференции по технике низких температур. 1971. – С. 90-91.
106. Амколадзе Х.М., „К динамическому анализу процесса копировального шлифования“ // Тезисы докладов международной конференции «Проблемы технологических процессов и оборудования». Тбилиси, 2000. – 42 с.
107. Мchedlishvili T.Т. „Разработка моделей и динамические исследования пневмомеханических и гидромеханических приводов копировально-шлифовальных станков“. Диссертация на соискание ученой степени к.т.г. Тбилиси, 2006, 133 с.
108. Амколадзе Х.М. К анализу динамики копировально-фрезерного станка с пневматическим устройством // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Технологические процессы и оборудование». Тбилиси, 2001, 24 с.
109. Баламцарашвили З.Г., Мchedlishvili T.Ф., „Динамические исследования станочных систем для шлифования сложнопрофильных поверхностей“. Тбилиси, Технический университет, 2008. – 448 с.
110. გ. ზუბიაშვილი. „მაკოპირებელი ჩარხის მოთვალთვალე ამძრავი ჰიდრომექანიკური სისტემის მოდელირება და დინამიკური კვლევები“. დისერტაცია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად. თბილისი, 2013, 126 გვ.
111. Чупраков Ю.И. Гидропривод и гидроавтоматика. М.: Машиностроение, 1979. – 232 с.
112. Лещенко В.А. Актуальные задачи развития следящих приводов. В кн: Пневматика и гидравлика. Вып. 1. М.: Машиностроение, 1973, с. 71-84.
113. Хохлов В.А. Гидравлические усилители мощности. М.: Машино-ние, 1966. 102 с.
114. Башта Т.М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика. М.: Машиностроение, 1972. – 320 с.
115. Зубиашвили Г.М., Марсагишвили Л.Г., К моделированию динамики станка // Транспорт и маш-ние, Тбилиси 4(23), 2011, с.44-49.
116. მრუდწირული რთულპროფილიანი ხის დეტალების სახეხი ჩარხი / ზ. ბალამწარაშვილი, მ. ტეფნაძე, მ. ლობჯანიძე, გ. ზუბიაშვილი, მ. ნარიმანიშვილი. გამოგონებაზე პატენტის აღწერილობა. Р 5443, 2009, 12.24.

117. Зубиашвили Г.М., Марсагишвили Л.Г. „К построению математической модели гидрокопировальной системы роторно-шлифовального станка“ // Транспорт и машиностроение, № 1(23), Тбилиси, 2012, с. 164-168.
118. T. Mhedlishvili, M. Kashibadze. To optimizarion synthesic of Follow-up Drive with elastics in Mechanical Part // Конф. 2016.
119. Капанадзе Т.В., Амколадзе Х.М., Никвашвили Н.К. „К моделированию динамики станка для трехкоординатного копировального шлифования сложнопрофильных поверхностей“ // Транспорт и машиностроение, № 2(39), Тбилиси, 2017, с. 22-30.
120. Дружинский И.А. Методы фрезерования сложных поверхностей. М.-Л.: Машгиз, 1950. 128 с.
121. T.Mchedlishvili, T.Kapanadze, Z. Balamtsarashvili, Kh. Amkoladze, N. Nikvashvili, on construction of potov-Grinding Machines three condinate systems//”problems of Mechanics”, N 4(69), Tbilisi, 2017, pp.43-46.
122. Дружинский И.А. Сложные поверхности: Справочник. Л.: Машино-ние, 1985, 263 с.
123. Зубиашвили Г.М., Амколадзе Х.М., Анджапаридзе Т.Н. К динамическому анализу двухкоординатного следящего привода копировального станка // Транспорт и машиностроение, № 2(24), Тбилиси, 2012, с. 46-52.
124. Амколадзе Х.М., Зубиашвили Г.М., Мchedlishvili З.Т., „К вопросу анализа динамики двухкоординатной следящей системы для обработки сложнопрофильных поверхностей“ // Транспорт и машиностроение, № 3(25), Тбилиси, 2012. с. 83-87.
125. Наврозашвили Б.Г., Вашаломидзе А.Ю и др. К моделированию динамики следящей системы гидрофицированного копировального станка // «Проблемы механики», №3(20/1), Тбилиси, 2005, С. 96-101.
126. Наврозашвили Б.Г., Мchedlishvili Т.Т., Гвазава К.Б., Мchedlishvili Т.Ф. К построению моделей динамики следящего мезанизма копировального роторно-шлифовального станка. // Проблемы прикладной механики. Тбилиси, № 1 (18). 2005. С.62-66.
127. Петров Б.Н., Соколов Н.И. и др. Системы автоматического управления объектами с переменными параметрами. М.: Машино-ние, 1986. – 256 с.
128. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. М.: Мфш-ние, 1973. 606с.
129. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. М.: Маш-ние, 1966. 508с.
130. Коловский М.З. Теории виброзащитных систем. М.: Наука, 1966. – 317 с.
131. Иванов В.А., Медведев В.С. и др. Математические основы теории автоматического регулирования. М.: Высшая школа. 1977. – 516.
132. Банах Л.Я. Упрощение расченок схем динамических систем. М.: Наука, 1976. 106 с.
133. Динамика машин и управление машинами / В.К. Асташев, И.И Вульфсон и др. М.: Машино-ние, 1988. 240- с.
134. Изе Ф.С. Механические колебания. М.: Маш-ние, 1966, 508 с.
135. Мchedlishvili Т.Ф., Гратиашвили Г.С. К определению параметров аппроксимационных моделей // Транспорт и машиностроение Тбилиси, 2009,N 1, с 138-145.

136. Мchedlishvili Т.Ф. К вопросу оптимизационных синтеза систем приводов с упругими связями в механической части // Транспорт и машиностроение, Тбилисиб 2007, N 2, с. 3-10.
137. T. Mchedlishvili, B. Navrozashvili, G. Goletiani, „To question of construction of approximating models for mechanical systems of drives with elastic joint“ // Problems of Mechanics. Tbilisi. 2008. N 1 (30), pp.62-66.
138. Мchedlishvili Т.ф., Марсагишвили Г.Р. К определению параметров аппроксимационных моделей для сложных систем // Транспорт и машиностроение, Тбилиси, 2009, N 1, с. 138-145.
139. T.Mchedlishvili, M. Kashibadze, T. Kapanadze, L. Marsgishvili, Kh. Amkoladze. To optimization synthesic of Follow-UP Drive with elastic in Mechanical Part// Procedings Mechanics 2016. The International Scientific Conference on Mechanics 2916, Tbilisi, 2016, pp.105-110.
140. Мchedlishvili Т.Ф., Мchedlishvili Н.П. К вопросу оптимизационного синтеза сложных систем регулирования по заданным переходным процессам // Транспорт и машиностроение, N 1(23), Тбилиси, 2012, с. 22-28
141. T.Mchedlishvili, Z. Surmava, V. iobadze, T. kapanadze. To issue of optimization of dynamic leads in multimes mechanical Drive System // problems of Mechanics, N 1(66), Tbilisi, 2017, pp. 33-38.
142. Мchedlishvili Т.Ф., Кирия В.И., Голетиани Г.Н. К вопросу динамики электромеханической системы привода с упругими звеньями в механической части \ Сборник научных трудов конференции. «Иновационные технолгии и материалы». Тбилиси «Технический университет» 2011. с. 81-86.
143. Мchedlishvili Т.Ф. Научные основы и прикладные задачи теории синтеза нелинейных систем приводов по заданным переходным процессамю Тбилиси, «Технический университет» 2008ю 270 с.
144. T. Mchedlishvili, Z. Chitaishvili, V. Lovadze, T. Kapanadze. To modeling of dynamics Electromechanical Follow-up Systems // Problems of Mechanics, № 1 (74), Tbilisi 2019, pp 73-48.