

საქართველოს თავდაცვის სამინისტრო

სსიპ რაფიელ დვალის მანქანათა მექანიკის ინსტიტუტი

უკ „ვამტკიცებ“

ინვენტარიზაციის #

ინსტიტუტის დირექტორი

ტმდ., პროფესორი, აკადემიკოსი _____ თ.ნატრიაშვილი

_____ დეკემბერი 2020 წ

სამეცნიერო კვლევითი სამუშაოს ანგარიში

დიდ ამპლიტუდურ გრეხვით რხევებზე მომუშავე ელექტრო-მაგნიტური
ვიბრატორის ციფრული მოდელირება და კვლევა

მანქანათა დინამიკისა და თბოენერგეტიკული დანადგარების
განყოფილება

მანქანათა დინამიკის

განყოფილების ხელმძღვანელი

ვიქტორ ზვიადაური

თბოენერგეტიკული დანადგარების

განყოფილების ხელმძღვანელი

რომან კენკიშვილი

პროექტის ხელმძღვანელი

მერაბ ჭელიძე

თბილისი 2020

თემის შემსრულებლები

დინამიკის სპეციალისტი

მერაბ ჭელიძე

უფროსი მეცნიერ თანამშრომელი

დოქტორი დავით ნიჟარაძე

უფროსი მეცნიერ თანამშრომელი

დოქტორი ჯემალ ჯავახიშვილი

უფროსი მეცნიერ თანამშრომელი

დოქტორი მერაბ თედოშვილი

რეფერატი

ანგარიში 66 გვერდი; ნახაზი 54; ფორმულა 78; გამოყენებული ლიტერატურის დასახელება 36.

ძირითადი სიტყვები: მოდელირება, მათემატიკური სიმულაცია, ციფრული ექსპერიმენტი, ვიბრაციული მანქანები, ელექტრომაგნიტური ვიბრატორი, დრეკადი სისტემა, წრფივი და არაწრფივი სისტემა, რბილი და ხისტი მახასიათებელი, სიხშირე, საკუთარი სიხშირე, იძულებითი ძალა, რეზონანსი, სიმძლავრე, საჰაერო ღრეჩო, მაგნიტური ძალხაზები.

ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების რხევის ამპლიტუდის სიდიდე და სიმძლავრე პრაქტიკულად განპიროვნებულია საჰაერო ღრეჩოს სიდიდით. აღსანიშნავია რომ ელექტრომაგნიტის სიმძლავრე კვადრატულად უკუპროპორციულია საჰაერო ღრეჩოს სიდიდეზე. აღნიშნულის გამო, დიდი დანაკარგების თავიდან აცილების მიზნით, 1.5 მმ-მდეა შეზღუდულია ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების ამპლიტუდების რხევის სიდიდე. აღნიშნული პრობლემა შესაძლებელია გადაჭრილი იქნას, ცვლად ღრეჩოიანი ელექტრომაგნიტური სისტემის, მუდმივ ღრეჩოიანი ელექტრომაგნიტური სისტემით ჩანაცვლებით, ანუ ელექტრომაგნიტური გამტარების მიზიდვა განზიდვაზე მომუშავე სტატორისა და ღუზის, ბრუნვით რხევებზე მერხვე ელ. ძრავას პრინციპზე მომუშავე მუდმივ ღრეჩოიანი ღუზსა და სტატორის ჩანაცვლებით. ბრუნვით რხევებზე მომუშავე ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების რხევის ამპლიტუდების სიდიდის შეზღუდვა დამოკიდებულია მხოლოდ და მხოლოდ დრეკადი სისტემის უნარიანობაზე და ციკლურ ხანგამძლეობაზე. ელ.ძრავას პრინციპზე აწყობილი ვიბრატორების მექანიკური რხევის ამპლიტუდები შესაძლებელია მინიმალური ელექტრომაგნიტური სიმძლავრის დანაკარგების პირობებში 10-15 მმ-საც კი აჭარბებდეს. როგორც პრაქტიკა აჩვენებს მთელი რიგი ტექნოლოგიური ოპერაციების წარმატებით შესრულება მოითხოვს დაბალ სიხშირის და დიდი სიდიდის 3-7 მმ სიდიდის რხევით ამპლიტუდებს.

დღევანდელ დღეს ბრუნვითი მექანიკური რხევები დიდი წარმატებით გამოიყენება ამწე ელევატორებში და ავტომატურ სისტემებში სადაც აუცილებელია დოზირებული და ორიენტირებული მიწოდები. ბრუნვითი რხევების (ვიბრაციის) პირობებში მასალების სწორხაზოვნად გადაადგილება შესაძლებელია განხორციელდეს ტორსიონულ-ბერკეტული სივრცითი დაკიდების სისტემის მეშვეობით.

ვიზრაციულ მანქანებთან დაკავშირებით ინტერნეტის მეშვეობით მოძებნილი და დამუშავებული იქნა 100-ზე მეტი უახლოესი სამეცნიერო ნაშრომი და სპეციალური ლიტერატურა. გაანალიზებული იქნა სხვადასხვა ტიპის ვიზრაციული მანქანები და მათ მიერ შესრულებული სხვადასხვა სახის ტექნოლოგიური ოპერაციები. სამეცნიერო ლიტერატურის კვლევამ აჩვენა, რომ ელექტრომაგნიტური ვიზრატორები თავიანთი კონსტრუქციის სიმარტივის, ექსპლუატაციაში საიმედოობის, ხანგამძლეობის, მომსახურების სიმარტივის, ენერჯის მიწოდების უნივერსალობით და დამზადების სიიაფის გამო გამოიყენებიან ფართოდ სახალხო მეურნეობის ყველა დარგში და გააჩნიათ დიდი პერსპექტივა.

აღსანიშნავია, რომ, ჩვენ ბიბლიოთეკებში და ინტერნეტში არსებული სამეცნიერო ლიტერატურის მიხედვით, ერთტაქტიანი ელექტრომაგნიტური ვიზრატორებისათვის პირველად იქნა შედგენილი და დაზუსტებული მათემატიკური მოდელი, რომელიც ითვალისწინებს ელექტროწრედში მიმდევრობით ჩართული ნახევარპერიოდული დიოდის გახსნის და ჩაკეტვის შედეგად განვითარებული ელექტრომაგნიტური ველის აღმწერ დიფერენციალურ განტოლებებს და მათ ურთიერთმონაცვლეობის პირობებს. ასევე პირვად იქნა ნაჩვენები, რომ შესაძლებელია ელექტრომაგნიტური ვიზრატორების მუშაობის აღმწერი ორი დიფერენციალური (მექანიკური და ელექტრული) განტოლების მაგივრად გამოყენებული იქნას ერთი განტოლება, რომელიც დიდად ამარტივებს მათემატიკურ მოდელირებას და შესაბამის მათემატიკურ ექსპერიმენტებს.

ასევე პირველად იქნა მიღებული მათემატიკური მოდელირებით (რიცხვითი მეთოდის გზით) არაწრფივი სისტემებისათვის დამახასიათებელი ამპლიტუდურ-სიხშირული დიაგრამა. აღსანიშნავია რომ ამპლიტუდურ-სიხშირული დიაგრამის მიღებას, რიცხვითი მეთოდებით, ხელს უშლის აგზნების სიხშირის დისკრეტული ცვლილება. აგზნების სიხშირის დისკრეტული ცვლილება იწვევს აგზნების და მექანიკური რხევების შორის დამყარებულ ფაზათა დისბალანსს, რის შედეგადაც წარმოიქმნება არამდგრადი რხევითი რეჟიმი. ფაზათა დისბალანსის დაძლევას თან სდევს მექანიკური რხევის ამპლიტუდების ძლიერი ცვლილება და როგორც წესი მყარდება მინიმალური ამპლიტუდები. ამგვარად არაწრფივი სისტემებისათვის დამახასიათებელი ორი მდგრადი უბანი არ მიიღება. დისბალანსის თავიდან აცილების (შეზღუდვის) მიზნით, აგზნების ძალის სიხშირის დისკრეტულად ცვლლების მომენტში, ბიჯური მიმდინარე დრო კორექტირდება იმდაგვარად, რომ აგზნების ახალი ფაზა უცვლელი რჩება მექანიკური რხევის, მიმდინარე ამპლიტუდის ფაზის მიმართ, ხოლო რხევის პროცესი კი გრძელდება ახალი სიხშირით. აღნიშნულის გამო

სიხშირის გადართვის (ცვლილების) მომენტში ამპლიტუდების რყევას ადგილი აღარ აქვს და მიიღება როგორც მაღალი ისე დაბალი სიდიდის რხევის ამპლიტუდები. მაღალი და დაბალი დონის რხევითი მდგრადი ამპლიტუდების დამყარება, არაწრფივ ხისტ და რბილ მახასიათებლიან სისტემებში, დამოკიდებულია საწყისი ამპლიტუდის სიდიდეზე და აგზნების სიხშირის ცვლილების მიმართულებაზე.

თეორიული და მათემატიკური ექსპერიმენტული კვლევის საფუძველზე დამუშავებული იქნა უნივერსალური მათემატიკური მოდელი, რომლის მეშვეობითაც შესაძლებელია სხვადასხვ რხევადი სისტემებისათვის პროექტირების ადრეულ პერიოდზე გამოვლინდეს პროექტირებადი ვიბრატორის (რხევადი სისტემის) მდგრადობის პირობები სხვადასხვა აგზნების სიხშირეებზე და ასევე მიღებული იქნას შესაბამისი როგორც წრფივი ისე არაწრფივი სისტემებისათვის დამახასიათებელი ამპლიტუდურ-სიხშირული დიაგრამა.

დამუშავებული ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების მათემატიკური მოდელი საშუალებას იძლევა სურვილისამებრ განხორციელდეს პრაქტიკულად ყველა მექანიკური და ელექტრული პარამეტრების ცვლილება და შესაბამისი პარამეტრების მიხედვით იქნას გამოკვლეული სასურველი რეჟიმების დინამიკური მახასიათებლები.

აღსანიხნავია რომ შემუშავებული მათემატიკური მოდელი და მისი ლოგიკური სქემა (გარსაცმი) გამოყენებადია არა მარტო ვიბრაციული ტექნიკისათვის, არამედ მცირე კორექტირების შედეგად გამოყენებადი ხდება ნებისმიერ ვიბრაციას დაქვემდებარებულ სისტემებისათვის. ასე მაგალითად: ელ. ძრავების როტორის დისბალანსის შედეგად გამოწვეული ვიბრაციის პარამეტრების დასადგენად დამაგრების და გადაცემის სისტემებში; საბურავის დისბალანსის, ან გზის პროფილის მიერ გამოწვეული რხევითი ამპლიტუდების დასადგენად ავტომობილის დაკიდების სისტემაში, ძარას დინამიკური მდგრადობის კვლევისათვის და ა.შ.

სამუშაოს მიზანია:

- ელექტრომაგნიტური ვიბრატორებისათვის დამუშავდეს და დაზუსტდეს მათემატიკური მოდელი, რომელშიც გათვალისწინებული იქნება ელექტრომაგნიტური აგზნების ძალის არწრფიობა;
- დაზუსტდეს ელექტრომაგნიტურ წრედში ჩართული ნახევარგამტარული დიოდის გახსნა-ჩაკეტვის რეჟიმის აღწერა მათემატიკური მოდელირების დროს;
- შეიმნას ვიბრაციის პრინციპზე მომუშავე მექანიკური სისტემისათვის უნივერსალური მათემატიკური მოდელი, რომლის მეშვეობითაც შესაძლებელი იქნება გარდამავალი და დამყარებული რეჟიმების კვლევა სხვადასხვა სახის არაწრფიობების გათვალისწინებით;
- დამუშავდეს მათემატიკური მოდელი, რომლის მეშვეობითაც, რიცხვითი ექსპერიმენტების გზით, შესაძლებელი იქნება ამპლიტუდურ სიხშირული დიაგრამის მიღება;
- შეიქმნას ახალი ბრუნვით რხევებზე ვიბრირებადი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორი, რომელიც უზრუნველყოფს $10 \div 15$ მმ ამპლიტუდების მიღებას.

სამუშაოს შესრულებისას გადაწყვეტილია შემდეგი ამოცანები:

- 1) ჩატარებული თეორიული სამუშაოების მიხედვით დადგენილი იქნა ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების ელექტრულ წრედში ჩართული ნახევარგამტარული დიოდის გახსნა-ჩაკეტვის აღმწერი აღზნების ძალის შესაბამისი დიფერენციალური განტოლებები და მათი ურთიერთმონაცვლეობის პრინციპი.
- 2) შეიქმნა მათემატიკური მოდელი როგორც ორტაქტიანი ისე ერთტაქტიანი (ნახევარპერიოდული გამართვით მომუშავე) ელექტრომაგნიტური ვიბრატორებისათვის.
- 3) ჩატარებული თეორიული სამუშაოების საფუძველზე დადგენილი იქნა, რომ შესაძლებელია დიდი სიზუსტით ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების აგზნების ძალა ჩანაცვლებული იქნას მექანიკური სისტემის რხევების აღმწერი დიფერენციალური განტოლების მარჯვენა ნაწილში არსებული იძულებითი

ძალის მცირეოდენი კორექციით, რაც მნიშვნელოვნად ამარტივებს გამოთვლებს.

- 4) სხვადასხვა სახის არაწრფიოების გათვალისწინებით, შედგენილი იქნა გამოყენებით რიცხვით მეთოდზე აწყობილ მათემატიკურ მოდელირება, რომლის მეშვეობით მიღებული იქნა არაწრფივი ამპლიტუდურ სიხშირული დიაგრამა
- 5) შეიქმნა უნივერსალური მათემატიკური მოდელი რომლის მეშვეობითაც შესაძლებელია ჩატარდეს მათემატიკური ექსპერიმენტები სხვადასხვა სახის რხევით სისტემებზე ნებისმიერ სასურველ რეჟიმებზე და აგებული იქნას ამპლიტუდურ-სიხშირული დიაგრამა შესაბამისი რხევადი სისტემებისათვის.
- 6) შეიქმნა და მიღებულია პატენტი ახალი ელექტრომაგნიტურ ბუნკერულ მკვებავზე, რომელიც მუშაობს ბრუნვით რხევებზე და უზრუნველყოფს გაზრდილი ამპლიტუდების მწარმოებლობის მიღებას

შინაარსი

1	ზოგადი მიმოხილვა	9
2	ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების (ვიბრაციული მანქანების) ელექტრული სქემები.	10
3	ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების მექანიკური და ელექტონაწილების რხევის აღმწერი დიფერენციალური განტოლებები და მათი მათემატიკური მოდელირების პრობლემები.	12
4	მექანიკური სქემები	17
5	ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების მექანიკური და ელექტრული ნაწილების რხევის აღმწერი დიფერენციალური განტოლებები და მათი მათემატიკური მოდელირების პრობლემები.	22
6	ერთტაქტა და ორტაქტა ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების ელექტრო-მაგნიტური იძულებითი ძალის აღმწერი დიფერენციალური განტოლებების მათემატიკური ანალიზი.	26
7	ერთტაქტა ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების მათემატიკური მოდელირება ჰარმონიული ამგზნები ძალის მეშვეობით	32
8	გამარტივებული (ერთ განტოლებაზე დაყვანილი) ელექტრომაგნიტური მოდელი და შესაბამისი მათემატიკური ექსპერიენტები	36
9	არაწრფივი მახასიათებლების მქონე რხევითი სისტემებისათვის დამახასიათებელი ამპლიტუდურ სიხშირული დიაგრამის აგების პრობლემები	38
10	წრფივი, რბილი და ხისტ მახასიათებლებიანი სისტემების მათემატიკურ მოდელები და მათზე ჩატარებული მათემატიკური (ციფრული) ექსპერიმენტები	40
11	სუბჰარმონიული რეზონანსი	46
12	დისიპატიური ძალების გავლენა ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების დინამიკაზე.	50
13	ბრუნვით რხევებზე რხევადი დიდი ამპლიტუდების მქონე ელექტრო-მაგნიტური ვიბრატორის დიმამიკის კვლევა	53
13	დასკვნა	57
14	ლიტერატურა	59
15	დანართი 1	61
16	დანართი 2	66

1. ზოგადი მიმოხილვა

დღევანდელ დღეს ძნელად მოინახება კაცობრიობის შეოქმედების სფერო, სადაც არ გამოიყენება მოდელირება. მაგალითისათვის, ავტომობილების წარმოების, ხორბლის მოყვანის, ადამიანის ცალკეული ორგანოების ფუნქციონირების, ატომური ომის შედეგების, სხვადასხვა ვირუსებისგან თავის დაცვის და მკუნალობის მოდელები და ა.შ. ზოგადად, მოდელირება გამოიყენება მაშინ, როდესაც შეუძლებელია, ან არაპრაქტიკულია ექსპერიმენტული პირობების შექმნა. ცხადია რეალურ პირობებში გაზომვით მიღებული შედეგები უფრო საიმედოა, ვიდრე მოდელირების გზით მიღებული შედეგები. მოდელი, რომელიც გამიზნულია მოდელირების და სიმულაციის შესრულებისათვის, წარმოადგენს მიზანდასახულ რეალობის აბსტრაგირებულ გამარტივებულ წარმოდგენას, რომელიც განპიროვნებულია ფიზიკური და კოგნიტური შეზღუდვებით. მოდელირებისას გამარტივებები გამიზნულნი არიან ყველა ცნობილი მოვლენების გამოტოვებისათვის (იგნორირებისათვის), რომელთა ფარდობითი მნიშვნელობა არ არის მნიშვნელოვანი განსახილველი ამოცანისათვის. აბსტრაქცია აერთიანებს (აგრეგირებს) ინფორმაციას, რომელიც მნიშვნელოვანია, მაგრამ არ საჭიროებს ისეთივე დეტალიზაციას, რაც სჭირთა კვლევის ობიექტისათვის. ორივე ქმედება გამარტივება და აბსტრაქცია სრულდება მიზანდასახულად, თუმცა ორივე რეალობის გათვალისწინებით უნდა კეთდებოდეს. დინამიკური სიმულაციის დროს, პროცესის მიმდინარეობის კვალდაკვალ ვლელულობთ ინფორმაციას, თუ როგორ განვითარდება და მოიქცევა კონკრეტული მოვლენა და ობიექტი. მოდელირება ციკლური პროცესია და შეიძლება რამოდენიმე (ოთხ) ეტაპად დაიყოს. მოდელირების პირველ ეტაპზე, გამოვლენილი შეცდომები, რომლებიც გამოწვეულნი არიან კვლევის ობიექტის არასაკმარისი ცოდნით, შესაძლებელია გასწორებულნი იქნან მომდევნო ციკლებზე [1].

ტექნიკაში მოდელირებისათვის გამოიყენება რეალური, ან (შემცირებული ზომის) მაკეტები, ხოლო მათემატიკური მოდელირებისას - ანალოგიური და ციფრული მეთოდები. ანალოგიური მოდელირება დაფუძნებულია ტექნიკის სხვადასხვა სფეროში მიმდინარე მოვლენების აღწერის ანალოგიურ დიფერენციალურ განტოლებების იდენტურობაზე. მაგალითად, მექანიკური რხევები შესალებელია აღწერილი იქნას, გადამყვანი კოეფიციენტების გათვალისწინებით, ელექტრომაგნიტური რხევების მეშვეობით, რადგან ორივე პროცესი აღიწერება მეორე რიგის დიფერენციალური განტოლებების მეხედვით.

ციფრული ტექნიკის განვითარების კვალდაკვალ, მათემატიკურმა ციფრულმა მოდელირებამ, რომელიც დაფუძნებულია რიცხვით გამოთვლების მეთოდებზე, არა მარტო ტექნიკის მიმართულებით, არმედ კაცობრიობის შემოქმედების ყველა სფეროში დაიკავა უპირველესი ადგილი [2]. სხვადასხვა ტექნიკური სკითხების პროექტირების პროცესში განსაკუთრებით აღსანიშნავია ისეთი პროექტები როგორებიც არიან (Matlab, Maple, MathCAD, Maxima) და ა.შ. აღნიშნული პროექტები განკუთვნილია ისეთი ტექნიკური პერსონალისათვის, რომელთაც არ მოითხოვება მაღალ დონეზე მათემატიკის და პროგრამირების ცოდნა. თუმცა როგორც პრაქტიკა აჩვენებს ფართო

მომხმარებლებისათვის აღნიშნული პროგრამების გამოყენება, მათი უნივერსალობიდან გამომდინარე, მაინც სკმაოდ გაძნელებულია, რადგან მათემატიკის და პროგრამირების მეტნაკლებად ცოდნასთან ერთად ისინი ასევე მოითხოვენ აღნიშნული პროექტების საფუძვლიან ცოდნას.

წარმოდგენილი მათემატიკური მოდელი კონკრეტულად ვიბრაციული სისტემებისათვის არის განკუთვნილი და მომხმარებლის მიერ მისი გამოყენება პრაქტიკულად არ მოითხოვს მათემატიკის და პროგრამირების ცოდნას, თუმცა მისი ეფექტური გამოყენებისათვის საჭიროა ფიზიკის და გამოყენებითი მათემატიკის საფუძვლების მინიმალურ დონეზე ცოდნა.

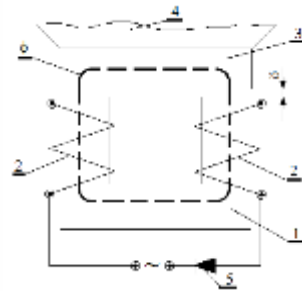
ვიბრაციულმა ტექნიკამ მოიპოვა ფართო გამოყენება სახალხო მეურნეობის ყველა სფეროში. ვიბრაციული მანქანების მეშვეობით შესაძლებელი ხდება ისეთი ტექნოლოგიური ოპერაციების შესრულება, რომლებიც ადრე შეუძლებელი იყო. ფართოა მათი გამოყენების დიაპაზონი - მძლავრი ვიბრომტვირთავი ტექნოლოგიური მანქანებიდან მინიატურულ სამედიცინო ხელსაწყოებამდე. ვიბრაციული ტექნიკის განვითარება აიხსნება ასევე დიდი უსაფრთხოების და მომსახურე პერსონალის შრომის პირობების კეთილსაიმედობით ისეთ წარმოებებში, როგორებიც არიან ატომური, ქიმიური, ცემენტის, მეტალურგიის და სხვა წარმოების სფეროები სადც ადგილი აქვს მავნე ნივთიერებების დოზირებას და ტრანსპორტირებას [3,4].

სხვადასხვა ტიპის (პნევმატიკური, გიდრავლიკური, დებალანსური და ა.შ.) ვიბრაციული მანქანების ფონზე ფართო გამოყენება მოიპოვა რეზონანსულმა ელექტრომაგნიტურმა ვიბრაციულმა მანქანებმა. ასეთი მანქანების უპირატესობანია: კონსტრუქციის სიმარტივე, მბრუნავი და მოხახუნე ზედაპირების არ არსებობა, ხანგამძლეობა, შედარებით დაბალი ენერგიის მოხმარება, გაშვების საიმედობა, რხევის ამპლიტუდების, ნულიდან მაქსიმალურ სიდიდემდე, თანაბარად და მარტივად რეგულირების საშუალება და მათი გამოყენებისა დიდი შესაძლებლობები თანამედროვე ავტომატიზირებულ სისტემებში.

2. ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების (ვიბრაციული მანქანების) ელექტრული სქემები.

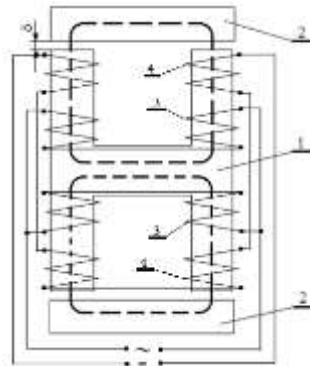
ელექტრომაგნიტის კონსტრუქციის სიმარტივისა და ძვირადღირებული სპილენძის მასალის დაზოგვის თვალსაზრისით პრაქტიკაში ფართოდაა გავრცელებული ერთტაქტა ელექტრომაგნიტური ვიბრაციული მანქანები, რომლთა ელექტროსქემა ნაჩვენებია ნახ.1-ზე [5]. U-ს ტიპის სტატორზე (რეაქტიული მასა) 1-ზე დამაგრებულია ცვლადი (ნახევარპერიოდულად გამართული) დენით კვებადი

ელექტრო კოჭები 2. მაგნიტოგამტარი 3 კი ხისტადაა მიერთებული მუშა ორგანოზე (აქტიური მასა) 4-ზე.



ნახ.1 ერთტაქტიანი ელექტრომაგნიტური ვიბრომანქანას ელექტრული სქემა

რადგან ელექტრომაგნიტი მიზიდვას ახორციელებს ქსელის ძაბვის ორივე ნახევარპერიოდის შესაბამისად, ამდენად ელექტრომაგნიტისაგან მიღებული მიზიდვის ძალის იმპულსების სიხშირე გაორმაგებულია ქსელის სიხშირესთან მიმართებით. მაგალითად თუ ქსელის სიხშირე არის 50 ჰც, მაშინ ასეთ მაგნიტურ სისტემისაგან წარმოქმნილი ძალის იმპულსების სიხშირე იქნება 100 ჰც. სიხსირის დასაწევად საბჭოთა კავშირში, როგორც წესი, გამოყენებული იყო ნახევარპერიოდული გამართვა, ანუ ადგილი ქონდა ელექტროქსელში დიოდის მიმდევრობით ჩართვას. საზღვარგარეთ კი უმეტეს შემთხვევაში სიხშირულ გარდამქმნელი გამოყენება, რაც დიოდთან შედარებით საკმაოდ ძვირადრიცხვადი მოწყობილობაა, მაგრამ არ იწვევს ქსელის ასიმეტრიულ დატვირთვას, ანუ არ აუარესებს ქსელურ მარგი ქმედების კოეფიციენტს.

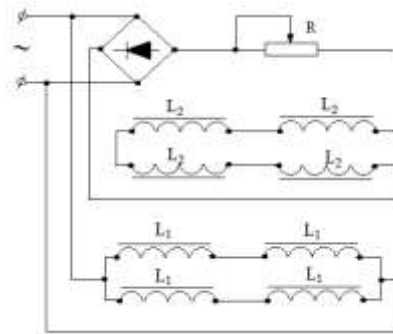


ნახ.2. ორტაქტა ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის ელექტრული სქემა

პრაქტიკაში მძლავრი ელექტრომაგნიტური ვიბრომანქაბებისათვის გამოიყენება ორტაქტა ვიბრატორები. სერიულ ორტაქტან ვიბრატორებში გამოიყენება ორტაქტა ელექტრომაგნიტი (ნახ.2), რომლის H სახის სტატორის 1 (რეაქტიული მასის) ორივე მხარეზე პარარელურად წყვილ-წყვილად მაგრდება ცვლადი 3 და მუდმივი 4 (გამართული) დენით კვებადი კოჭები. იაკორი 2 (მუშა ორგანო, ანუ აქტიური მასა) კი წარმოდგება ერთმანეთთან ორი ხისტად შეერთებული მაგნიტოგამტარებისაგან [6].

მუდმივი და ცვლადი მაგნიტური ნაკადების შეჯამებისას სტატორის ორივე მხარეზე წარმოიქმნება ნიშანცვლადი ჰარმონიული პულსირებული ელექტრომაგნიტური ძალები, რომლებიც ერთმანეთისაგან დაძრულნი არიან 180° გრადუსით. ამგვარად იაკორის და სტატორის მიზიდვა წარმოებს ორივე ნახევარპერიოდის განმავლობაში სტატორის ხან ერთი ხან მეორე მხარეს. ორტაქტა ვიბრატორის სიმძლავრე გაზრდილია ერთტაქტა ვიბრატორებთან შედარებით.

ნახ.3-ზე მოცემულია ორტაქტა ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის საანგარიშო სქემა, რომლის ელექტრული წრედი შედგება ცვლადი დენით კვებადი პარალელურად შეერთებული ორ ორი წყვილი კოჭებისაგან და მუდმივი დენით კვებადი ოთხი მიმდევრობით შეერთებული კოჭებისაგან.



ნახ.3 ორტაქტა ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის ელექტრული სისტემის საანგარიშო სქემა კოჭების პარამეტრები დამოკიდებულია სტატორისა და იაკორის შორის არსებულ საჰაერო ღეჩოზე, მოთხოვნილ ამპლიტუდის სიდიდეზე, სიხშირეზე და ვიბრო მანქანის სიმძლავრეზე კონსტრუქციული დემფირების კოეფიციენტის გათვალისწინებით.

3. ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების მექანიკური და ელექტონაწილების რხევის აღმწერი დიფერენციალური განტოლებები და მათი მათემატიკური მოდელირების პრობლემები

მუდმივი და ცვლადი კოჭებზე მოსული ელექტრული წრედის ძაბვების ბალანსს აქვს შემდეგი სახე [7]

$$i_1 r_1 = u_1 \sin \omega t - W_1 \frac{d\phi}{dt}, \quad (1)$$

$$i_2 r_2 = u_2 - W_2 \frac{d\phi}{dt}. \quad (2)$$

სადაც i_1 და i_2 ცვლადი და მუდმივი (გამართული) დენის ამპლიტუდური სიდიდეებია, u_1 და u_2 შესაბამისად ცვლადი და მუდმივი კოჭების ძაბვების ამპლიტუდური

მნიშვნელობებია, r_1 ცვლადი დენის ორი კოჭას ჯამური აქტიური წინააღმდეგობაა, r_2 - მუდმივი დენის ოთხი კოჭას ჯამური აქტიური წინააღმდეგობაა. ω - აგზნების ძალის წრიული სიხშირეა, W_1 და W_2 -შესაბამისად ცვლადი და მუდმივი კოჭების ხვეების რაოდენობაა, Φ - მაგნიტური ნაკადის ცვლილებაა.

მაგნიტური ნაკადის ცვლილება ტოლია

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\mu_0 s(2W_1 i_1 + 2W_2 i_2)}{\delta - x} \quad (3)$$

სადაც μ_0 მაგნიტური განჭოლვადობაა, s - მაგნიტის ზედაპირის ფართობია, δ - საწყისი საჰაერო ღრეჩოა

(1),(2) და (3) განტოლებებიდან ელექტრულ წრედში i_1 და i_2 დენის გამორიცხვის შემთხვევაში მიიღება მაგნიტური ნაკადის ცვლილების დიფერენციალური განტოლება ძაბვების მიმართ [7,8].

$$\frac{d\Phi}{dt} = a_{ed} u_2 + c_{ed} u_1 \sin \omega t - (\delta - x) b_{ed} \Phi, \quad (4)$$

სადაც $a_{ed} = w_2 u_2 r_1 / (W_1^2 r_2 + W_2^2 r_1)$ - კოეფიციენტია რომელიც ითვალისწინებს მუდმივი დენით გამოწვეულ დამაგნიტებას (მაგნიტური ნაკადის ზრდას),

$c_{ed} = w_1 u_1 r_2 / (W_1^2 r_2 + W_2^2 r_1)$ - კოეფიციენტია, რომელიც ითვალისწინებს მაგნიტური ნაკადი ცვლად მდგენელს

$b_{ed} = r_1 r_2 / (W_1^2 r_2 + W_2^2 r_1) \mu_0 s$ - კოეფიციენტია რომელიც ითვალისწინებს საჰაერო ღრეჩოს ცვლილებას.

ფაზების 180° ძვრის გამო მაგნიტის მეორე მხარეს განვითარებული ძალის იმპულსის დიფერენციალურ განტოლებას ექნება მხოლოდ ცვლად მდგენელზე განსხვავებული ნიშანი მე- (4)-გან და ტოლია

$$\frac{d\Phi}{dt} = a_{ed} u_2 - c_{ed} u_1 \sin \omega t - (\delta - x) b_{ed} \Phi, \quad (5)$$

ამგვარად ძირითადი მაგნიტური ნაკადი ფორმირდება მე (4) და (5) განტოლებებიდან მიღებული მაგნიტური ნაკადების შეჯამებით. აღნიშნული დიფერენციალური განტოლებები მართლზომიერია იმ პირობით, რომ ჰისტერეზისული გაჯერება და ფუკოს მაგნიტურ ველი მცირეა [7].

მაგნიტების მიზიდულობით გამოწვეული მაგნიტური აგზნების F ძალა ტოლია

$$F = \frac{0.5}{\mu_0 s} \Phi^2 \text{sign } \Phi, \quad (6)$$

მე-(6) განტოლებაში დამატებითი პირობა $\text{sign } \Phi$ შემოღებულია, იმ მიზნით რომ სტატორის მიმართ 180° ფაზით დაძრული საწინააღმდეგო მხრებიდან მოქმედი საჰაერო δ ღრეჩოში გამავალი მაგნიტური ნაკადის იმპულსური ძალის ნიშანცვლადი ფუნქცია Φ , რომელიც Φ^2 -ის სახით არის წარმოდგენილი ვერ უზრუნველყოფს H ტიპის ელექტრომაგნიტის ნიშანცვლად წევის ძალას

$$\text{sign } \Phi = \begin{cases} 1 & \text{როდესაც } \Phi > 0 \\ -1 & \text{როდესაც } \Phi < 0 \end{cases} \quad (7)$$

ერთტაქტიანი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორისათვის, სადაც მუდმივი დენით გამოწვეულ შემაგნიტებას არა აქვს ადგილი, ზემოდმოყვანილი ორტაქტიანი ელექტრომაგნიტური დიფერენციალური განტოლებები შესაბამისად ლებულობენ შემდეგ სახეს.

ძაბვის ბალანსი

$$ir = u \sin \omega t - W \frac{d\Phi}{dt} \quad (8)$$

მაგნიტური ნაკადის ცვლილება

$$\Phi = \frac{\mu_0 s W i}{\delta - x} \quad (9)$$

მაგნიტური ნაკადის ცვლილება ძაბვის მიმართ

$$\frac{d\Phi}{dt} = c_e \sin \omega t - (\delta - x) b_e \Phi, \quad (10)$$

$$\text{სადაც } c_e = \frac{u}{W} \quad b_e = \frac{r}{\mu_0 s W^2}$$

აღსანიშნავია, რომ (10) განტოლება შესაძლებელია დაწერილი იქნას დენის ცვლილების მიმართ.

$$ir = u \sin \omega t + e_L \quad \text{სადაც } e_L = -\frac{di}{dt} \quad e_L \text{-მაგნიტური ინდუქციაა}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{u \sin \omega t}{L} - \frac{r}{L} i \quad (11)$$

$$\frac{di}{dt} = a_e \sin \omega t - b_e i \quad (12)$$

$$\text{სადაც } a_e = \frac{u}{L} \quad b_e = \frac{r}{L}$$

მაგნიტური აგზნების ძალა მაგნიტური ნაკადის მიმართ

$$F = \frac{0.5}{\mu_0 s} \Phi^2 \quad (13)$$

ან დენის ძალის მიმართ

$$F = \frac{0.5 \mu_0 s W^2}{(\delta - x)^2} i^2 \quad (14)$$

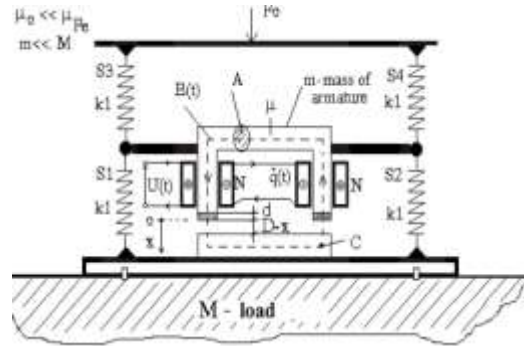
ზემოდ მოყვანილი ელექტრომაგნიტური სქემების აღმწერი დიფერენციალური განტოლებების ფონზე ასევე აღსანიშნავია ბოლო წლებში კერძოდ 2017 წელს ზელკოსა და დესპოტოვიჩის მიერ წარმოდგენილი ერთტაქტიანი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის აღმწერი დიფერენციალური განტოლებები [9], რომლებშიც, მსგავსად (12), (14) განტოლებებისა, საბაზო პარამეტრად გვევლინება ცვლადი ელექტროდენი.

ამპერის კანონის თანახმად ამპერხვიების iW -გან გამოწვეული მაგნიტური სიმკვრივე H_x საჰაერო ღრეჩოში და ბრონზაში ნაწილდება შემდეგნაირად.

$$iW = H_x (\delta - x) + H_b d \quad (15)$$

მაგნიტური გამტარების წინაღობა სიმცირის გამო იგნორირებულია.

გადაჭარბებული სიდიდის რხევის დროს ელექტრომაგნიტებმა ერთმანეთს უშუალოდ რომ არ დაარტყას მაგნიტებს შორის მოთავსებულია ბრონზას სადები, ანუ საჭაერო ღრეჩო D გაზრდილია d სისქის ბრინჯაოს სადებით ნახ.4



ნახ.4. ერთტაქტა ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის განივი კვეთი მაგნიტური ნაკადის სიმკვრივე ტოლია

$$b = \frac{\mu_0 W i}{D+d-x} \quad (16)$$

შესაბამისად მაგნიტური ნაკადი იქნება

$$\Phi = B S = \frac{\mu_0 W s i}{D+d-x} \quad (17)$$

ორივე საჭაერო ღრეჩოსი გამავალი მაგნიტური ნაკადი ტოლი იქნება

$$\lambda(i, x) = 2W \Phi = \frac{2\mu_0 W^2 s i}{D+d-x} \quad (18)$$

შესაბამისად ელექტრომაგნიტის წევის ძალა ტოლია

$$F = \int_0^i \lambda(i, x) di = \frac{\mu_0 W^2 s i^2}{D+d-x} = a_e \frac{i^2}{D+d-x} \quad (19)$$

სადაც $a_e = \mu_0 W^2 s$

მექანიკური და ელექტრული რხევადი სისტემის ერთიანი ენერგია ტოლია

$$\frac{1}{2} m x^2 + a_e \frac{i^2}{D+d-x} \quad (20)$$

მექანიკური სისტემის სტატიკური წონასწორობის პირობა

$$m g = k(x_a - x_b) \quad (21)$$

ზამბარების პოტენციალური ენერგია ტოლია

$$A_p = 0.5k(x + x_a)^2 + 0.5k(x + x_b)^2 \quad (22)$$

ამგვარად ზემდ განხილული მსჯელობების საფუძველზე მთელი სისტემის ლაგრანჟიანი ასე შეიძლება გამოისახოს

$$L(\dot{x}, x, i) = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{a_e i^2}{D+d-x} - A_p \quad (23)$$

მექანიკური და ელექტრული ნაწილებისათვის რელეის დისიპაციურ ფუნქციას შემდეგი სახე აქვს [10]

$$R(\dot{x}, i) = 0.5\beta\dot{x}^2 + 0.5(R_s + R_c)i^2 \quad (24)$$

მექანიკური სისტემის მოძრაობის (რხევის) განტოლებას ლაგრანჟეს მიხედვით ამგვარი სახე აქვს

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(\dot{x}, x, i)}{\partial \dot{x}} \right] + \frac{\partial L(\dot{x}, x, i)}{\partial x} + \frac{\partial R(\dot{x}, i)}{\partial x} = F_x \quad (25)$$

(21), (22), (24) და (25) განტოლებების გათვალისწინებით მექანიკური სისტემის მოძრაობის განტოლება ლებულობს შემდეგ სახეს

$$m\ddot{x} + \beta\dot{x} + 2kx + \frac{aei^2}{(D+d-x)^2} \quad (26)$$

ლაგრანჟეს განტოლების მიხედვით ელექტრონაწილის რხევის სიდიდე შემდეგნაირად გამოისახება

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(\dot{x}, x, i)}{\partial i} \right] + \frac{\partial R(\dot{x}, i)}{\partial i} = F_q \quad (27)$$

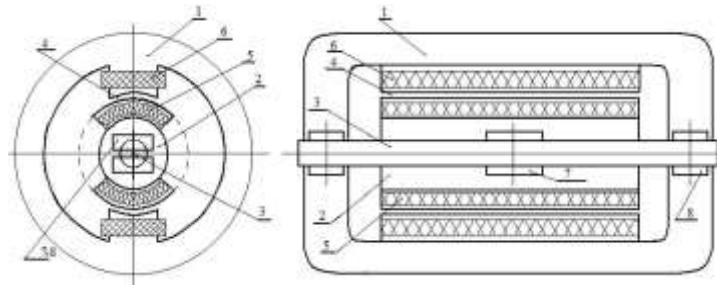
საიდანაც ვღებულობთ

$$\frac{2a}{D+d-x} i + (R_s + R_c)i + \frac{2aix}{(D+d-x)^2} = u(t) \quad (28)$$

(28)-ე განტოლების პირველი წევრი წარმოადგენს ძაბვას რომელიც ინდუცირდება ელექტრო მაგნიტის კოჭაზე. მეორე წევრი წარმოადგენს ძაბვის ვარდნას წყაროს R_s და კოჭას R_c აქტიურ წინააღმდეგობებზე. მესამე წევრი კი წარმოადგენს რეალურ ელექტრომაგნიტის წევის ძალას, რომელიც მოდებულია მექანიკურ სისტემაზე. მეოთხე წევრი კი ქსელის ძაბვაა.

ერთტაქტიანი ვიბრატორებში გენერირდება იძულებითი (მართველი) ძაბვის სიხშირის გაორმაგებულ ძალის იმპულსები. ამგვარად, მაგალითად რომ მივიღოთ 50 ჰც-ის სიხშირეზე მომუშავე ვიბრატორი, მას უნდა მივაწოდოთ 25 ჰც-ის სიხშირის ძაბვა, რისთვისაც საჭიროა ძვირადღირებული სიხშირული გარდამქმნელი, ან ვიბრატორის წრედში კოჭების მიმდევრობით ელექტრო წრედში ჩართული უნდა იქნას ნახევარგამტარული დიოდი, რასაც ადგილი აქვს უმეტეს შემთხვევებში ამგვარი ვიბრატორების გამოყენებისას [5,7].

ზემოდ მოყვანილ ელექტრომექანიკური სისტემები მუშაობენ მაგნიტოგამტარების მიზიდვაზე, რის გამოც მექანიკური რხევის ამპლიტუდების მისაღებად მაგნიტებს შორის აიღება 1,4 მმ სიდიდის საჰაერო ღრეჩო, რაც აუარესებს ამგვარი მაგნიტური სისტემის მარგი ქმედების კოეფიციენტს. ნახ. 5.ზე წარმოდგენილია ახალი კონსტრუქციის გრეხვით რხევებზე მომუშავე ელექტრომაგნიტური ვიბრატორი, რომლის სტატორის და ლუზას მაგნიტოგამტარები ერთმანეთის მიმართ არა მიზიდვის, არამედ შემობრუნებით (ბრუნვით) ძალებს წარმოქმნიან. იხ. დანართი 1.



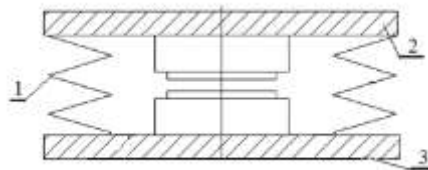
ნახ.5. მუდმივი საჰაერო ღრეხოს პირობებში გეხვით რხევებზე მომუშავე დიდი ამპლიტუდების გენერირებადი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორი

რადგან ასეთ ვიბრატორებში მინიმალური საჰაერო ღრეხოს პირობებში (საჰაერო ღრეხოს სიდიდე მაგნიტოგამტარების შემობრუნებით არ იცვლება, შესაბამისად შესაძლებელია, მაგნიტური ნაკადის მინიმალური დანაკარგებით, მიღებული იქნას აგაზრდილი რხევის ამპლიტუდების, რაც უზრუნველყოფს ვიბრომანქანის მარგი ქმედების კოეფიციენტის გაზრდას. წარმოდგენილი ვიბრატორი განეკუთნება ორტაქტა ვიბრატორების ჯგუფს და უზრუნველყოფს ცვლადი დენის ნახევარპერიოდების შესაბამისად საწინააღმდეგო მიმართულებების ძალურ იმპულსებს. ვიბრატორის მაგნიტური სისტემა ერთმანეთის მიმართ განივ (შემობრუნებით) რხევით მოძრაობებს ასრულებს და მსგავსად ორტაქტა ვიბრატორებისა ორმხრივ ძალურ იმპულსებს ქმნის, რომელთა სიხშირე ემთხვევა მკვებავი ქსელის სიხშირეს.

4 მექანიკური სქემები

ზოგადად ვიბრაციული მანქანებისათვის და მათ შორის ელექტრომაგნიტური ვიბრატორებისათვის ერთ-ერთ ძირითად და უმნიშვნელოვანეს ნაწილს წარმოადგენს დრეკადი სისტემა, რომლის გამართულ მუშაობაზე მთელი ექსპლოატაციის პერიოდში დიდად არის დამოკიდებული მთლიანად ვიბრომანქანის გამართული და საიმედო მუშაობა [5,6].

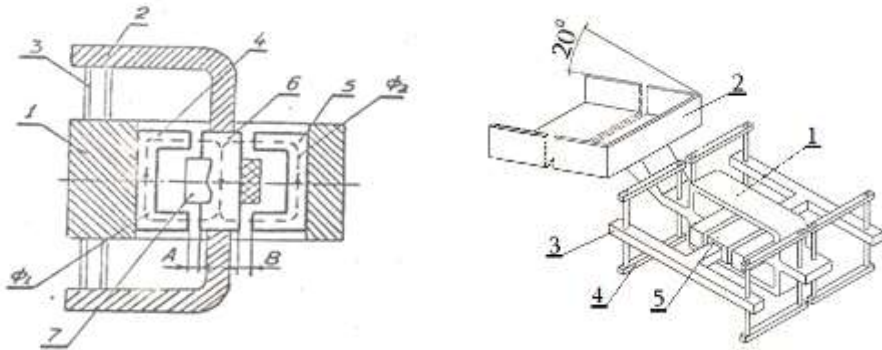
ნახ.6-ზე წარმოდგენილია ვიბრატორის ცილინდრულ ზამზარებიანი დრეკადი სისტემა, რომელსაც პრაქტიკულად წრფივი მახასიათებელი აქვს.



ნახ.6. ცილინდრულ ზამზარებიანი ვიბრატორი. სადაც 1 ცილინტრული ზამზარაა, 2 აქტიური მასაა, 3 რეაქტიული მასაა

თუმცა პრაქტიკაში როგორც წესი დიდი სიმძლავრის ელექტრომაგნიტური ვიბრატორები შესრულებულია რესორულ (ნახ.7) და ტორსიონულ (ნახ.8) დრეკად

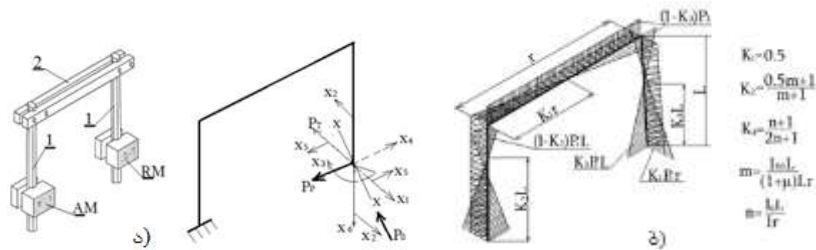
სისტემებზე, რომელთა ჩამაგრების ადგილების გახსნის გამო ადგილი აქვს სიხისტის დაცემას, რის გამოც დრეკადი სისტემა ავლენს რბილ მახასიათებლიან თვისებას.



ნახ.7 რესორულ დრეკად სისტემიანი ვიბრატორი. ნახ.8 ტორსიონულ დრეკად სისტემიანი 1აქტიური მას, 2 რეაქტიური მასა, 3 რესორები ვიბრომანქანა

დრეკადი სისტემების ჩამაგრებების გახსნა თავის მხრივ იწვევს დისიპაციური ძალების ზრდას. კონსტრუქციული დემფირების კოეფიციენტის სიდიდე ფუნქციონურ დამოკიდებულებაშია მექანიკური რხევის ამპლიტუდის სიდიდესთან. ხისტ მახასიათებლიან დრეკად სისტემას ქმნის კონუსური ზამბარები და კუმშვავე მომუშავე რეზინის ამორტიზატორები.

ნახ.9ა-ზე ნაჩვენებია ტორსიონული დრეკადი სისტემა, ხოლო 9ბ-ზე კი ტორსიონული დრეკადი სისტემის დატვირთვის შედეგად გამოწვეული გრეხვალუნვის სივრცითი ეპიურები [11,12].



ნახ.9. ტორსიონული დრეკადი სისტემა. 1ტორსიონი, 2 მხარი (ბერკეტი)

ტორსიონული ჩარჩოს წრფივი სიხისტე გრეხვავზე ტოლია [11,14]

$$k_t = \frac{GI_k}{k_1 r^2 l (1+z_1+z_2+z_3)} \quad \text{ან} \quad K_t = 4nm_b \pi^2 f_1^2 r^2 (1+z_1+z_2+z_3); \quad (29)$$

სადაც m_b -ვიბრომანქანის დაყვანილი მასაა; f_1 -საკუთარი სიხშირე ჰერცებში; n -ტორსიონების რაოდენობაა დრეკად ჩარჩოში; z_1, z_2 და z_3 კოეფიციენტები შესაბამისად გამოხატავენ ტორსიონის ღუნვის, ბერკეტის ღუნვის და გრეხვის გავლენებს ტორსიონული ჩარჩოს სართო სიხისტეზე.

$$Z_1 = \frac{2-3K_2+2k_2^3}{3} \frac{GI_k l^2}{EI r^2} \quad Z_2 = \frac{k_1^2+2k_1^3}{3} \frac{GI_k r}{EI_0 l} \quad Z_3 = + \frac{(1+k_2)}{k_1} \frac{I_k l}{I_{ko} r} \quad (30)$$

რხევის დროს მგრეხავი მომენტის ციკლური ცვალებადობა იწვევს ტორსიონის დამაგრების ადგილებში (ლილვი მილისა) ტორსიონის დამაგრებული ნაწილის მილისას მიმართ ციკლურ გასრიალებებს. ამგვარად ტორსიონის სიგრძის ციკლური ცვალებადობა მიზეზი ხდება როგორც დრეკადი ჩარჩოს სიხისტის არაწრფივი ციკლური ცვალებადობის, ისე ციკლური დისიპაციური ძალების წარმოქმნის, ანუ ადგილი აქვს კონსტრუქციული დემფირების აღმოცენებას [13,14].

დატვირთვის პირველ ეტაპზე, როდესაც მგრეხავი მომენტი M_k იცვლება ნულიდან მაქსიმუმამდე $0 \leq \alpha \leq 1$ ტორციონის ჩამაგრებულ (ლილვი-მილისა) ნაწილში ტორსიონის გრეხვის სიდიდე ტოლია

$$\varphi_{k1} = \frac{\alpha^2 M_k^2}{2qGI_p} \quad (31)$$

შესაბამისად ჩამაგრების ადგილში ტორსიონის გასრიალების სიგრძე ტოლია

$$a_{k1} = \frac{\alpha M_k}{q}. \quad (32)$$

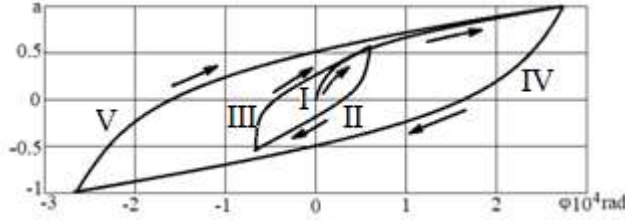
ციკლური დატვირთვების გათვალისწინებით კი ზემოდმოყვანილი ფორმულები შემდეგ სახეს ღებულობენ

$$\varphi_{k1} = \frac{M_k}{GI_k \beta} \sqrt{\alpha^2 + \left(\frac{q_1}{\beta M_k}\right)^2} - \frac{q_1}{GI_k \beta^2} \quad (33)$$

შესაბამისად ჩამაგრების ნაწილში (ლილვი-მილისა) ტორსიონის გასრიალების, შედეგად წარმოქმნილი ტორსიონის სიგრძის ნაზრდი ტოლია

$$a_{k1} = \frac{1}{\beta} \ln \left[\frac{\beta M_k}{q_1} \left(\sqrt{\alpha^2 + \left(\frac{q_1}{\beta M_k}\right)^2} + \alpha \right) \right]. \quad (34)$$

რხევის ამპლიტუდის ერთი სრული ციკლისათვის, ანუ ოთხი სხვადასხვა მიმართულებით ტორსიონის მილისაში გასრიალების შედეგად მიიღება ჰისტერეზისული მარყუჟი ნახ.9, რომლის ფართის მიხედვით იანგარიშება კონსტრუქციული დემფირების კოეფიციენტი [15,16].



ნახ.10 გარდამავალი ჰისტერეზისის მარყუქი

ტორსიონის სუფთა ფრიქციული ჩამაგრებისას ერთ ციკლზე მოსული ჰისტერეზისის მარყუქის ფართი ტოლია

$$S_k = \int_{-1}^1 \varphi_{k2} d\alpha - \int_{-1}^1 \varphi_{k3} d\alpha = \frac{2M_k^2}{3qGI_p} \quad (35)$$

შესაბამისი ტორსიონის ჩამაგრების პოტენციალური ენერგია გრეხვაზე ტოლია

$$S_{pk} = \int_{-1}^0 a_{k1max} d\alpha - \int_{-1}^0 \varphi_{k1} d\alpha = \frac{M_k^2}{3qGI_p}. \quad (36)$$

ამრიგად კონსტრუქციული დემფირების კოეფიციენტი ტოლია ტორსიონის ჩამაგრებაში აღმოცენებული დისიპაციური ძალების მუშაობის შესაბამისი ჰისტერეზისის ფართის ფარდობისა დრეკადი სისტემის მთელი პოტენციალურ ენერგიაზე [15]

$$\psi_k = \frac{S_k}{U_k + S_{pk}} \quad (37)$$

სადაც

$$U_k = \frac{p^2}{2} \left(\frac{k_1 r^2 l}{GI_k} \right) \quad (38)$$

რადგან მგრეხავი მომენტის გამო ადგილი აქვს ტორსიონის გრეხვას როგორც ტორსიონის სიგრძის თავისუფალ ისე ჩამაგრების ბოლოებში, ამდენად ტორსიონის ჯამური გრეხვის სიდიდე ტოლია

$$\varphi = \varphi_k + \varphi_{ko} \quad (39)$$

სადაც φ_k - ტორსიონის გრეხვის კუთხეა თავისუფალ ნაწილზე, φ_{ko} - ტორსიონის გრეხვის კუთხეა ჩამაგრებულ ნაწილზე

შესაბამისად ტორსიონის სიხისტე ტოლია [12]

$$\frac{M_k}{c} = \frac{M_k}{c_k} + \frac{M_k}{c_{ko}} \quad \text{ანუ} \quad \frac{1}{c} = \frac{1}{c_k} + \frac{1}{c_{ko}} \quad (40)$$

ამრიგად

$$c = \frac{c_k c_{ko}}{c_k + c_{ko}} \quad (41)$$

$$\text{რადგან } c_k = \frac{M_k}{\varphi_k} = \frac{M_k}{\frac{M_k l}{GI_k}} = \frac{GI_k}{l} \quad \text{და} \quad c_{ko} = \frac{M_k}{\varphi_{ko}} = \frac{M_k}{\frac{\alpha^2 M_k^2}{2qGI_k}} = \frac{2qGI_k}{\alpha^2 M_k} \quad (42)$$

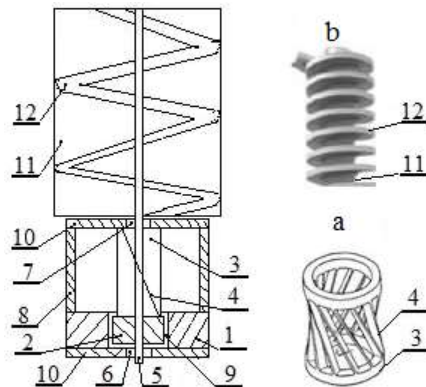
ამგვარად $c = \frac{2qGI_k}{\alpha^2 M_k + 2ql}$ რადგან $M_k = I_m \omega^2 \varphi$
ამდენად $c = \frac{2qGI_k}{\alpha^2 I_m \omega^2 \varphi + 2ql}$ (43)

მე-(43) განტოლების φ -ის მიხედვით მაკლორენის მწკრივად გაშლის შედეგად ვღებულობთ

$$c = \frac{GI_k}{l} - \frac{2qGI_k \alpha^2 I_m \omega^2}{4q^2 l^2} \varphi + \dots = \frac{GI_k}{l} - \frac{GI_k \alpha^2 I_m \omega^2}{2ql^2} \varphi$$
 (44)

დანარჩენი წევრები φ -ის სიმცირისა და იმავდროულად φ^n -ის მაღალი ხარისხის გამო მხედველობაში არ მიიღება. (44) განტოლებით ვასკვნით რომ ტორსიონულ დრეკად სისტემას ტორსიონის ჩამაგრებების გათვალისწინებით აქვს არაწრფივი რბილი მახასიათებელი.

ნახ. 11-ზე წარმოდგენილია გრეხვით რხევებზე მომუშავე ვიბრაციული ელევატორი, რომლის ვიბრატორის მაგნიტური გამტარები (ნახ.5-ის ბაზაზე აწყობილი) ასრულებენ, არა წინსვლა უკუსვლით მოძრაობებს, არამედ ბრუნვით რხევით მოძრაობებს, რის გამოც შესაძლებელი ხდება რემდენჯერმე გაზრდილი მექანიკური ამპლიტუდების მიღება და მათი გამოყენება სხვადასხვა ავტომატურ სისტემებში, სხვადასხვა სახის დეტალების ორიენტირებული მიწოდებებისათვის და სხვა სხის ტექნოლოგიური ოპერაციების განსახორციელებლად.

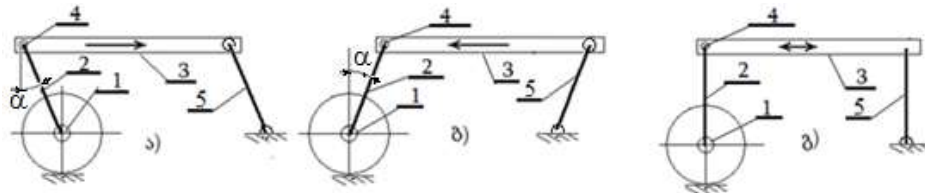


ნახ.11. ელექტრომაგნიტური ვიბრატორი (ელევატორი)

წარმოდგენილ ვიბრატორში დრეკად სისტემად (მსგავსად პოვიდაილოს ელექტრომაგნიტური ვიბრატორისა) გამოყენებულია ჰიპერბოლოიდური ტორსიონი 4, რომელიც უზრუნველყოფს, როგორც ბრუნვითი ვიბრაციული ამპლიტუდების მდგნელების, ისე ვერტიკალური მდგნელების წარმოქმნას, რაც საჭიროა ტრანსპორტირებადი მასალის მუშა ორგანოზე (დახრილ სპირალურ ზედაპირზე) გადაადგილებისათვის.

აღნიშნულ კონსტრუქციაზე მიღებულია პატენტი იხ. დანართი 1 და 2.

გრეხვით რხევებზე (ბრუნვითი მოძრაობების) მომუშავე ვიბრატორის (ნახ.5) მეშვეობით ასევე შესაძლებელია განხორციელდეს ვიბრომანქანის მუშა ორგანოზე მოთავსებული მასალის სწორხაზოვანი წინსვლითი, ან უკუსვლითი მოძრაობები (გადაადგილებები). რხევად მუშა ორგანოზე სწორხაზოვანი მოძრაობების მისაღწევად საჭიროა სპეციალური დაკიდების (დამაგრების) მექანიზმები. ნახ.12-ზე წარმოდგენილია ამგვარი დაკიდების მექანიზმები. წარმოდგენილი სქემების მიხედვით, ბერკეტი 2 (5) დახრის კუთხის ცვლილებით შესაძლებელია ვიბრომანქანის მუშა ორგანო 3-ზე მოთავსებული ტრანსპორტირებადი მასალის, როგორც სიჩქარის, ისე მიმართულების ცვლა მეტად მარტივად, რაც გამომდინარეობს გადაადგილებისათვის საჭირო ვერტიკალური და ჰორიზონტალური რხევის ამპლიტუდების ცვლილებით. ვიბრაციის ამპლიტუდების ვერტიკალური მდგენელის სიდიდე ფუნქციონალურ დამოკიდებულებაშია α კუთხის სიდიდეზე, რომელიც წარმოიქმნება დაკიდების ბერკეტების 2-ის და ვერტიკალური სიბრტყის შორის. აღსაბიშნავია, რომ გრეხვით რხევებზე მომუშავე ვიბრატორის ამპლიტუდის x -ის სიდიდე ასევე ფუნქციონალურ დამოკიდებულებაშია ვიბრატორის ბერკეტების L სიგრძეზე, რადგან $x=L\varphi$. სადაც φ ტორსიონის გრეხვის კუთხეა.



ნახ.12. გრეხვით რხევებზე მომუშავე ვიბრატორის დამაგრების სქემები, რომლებიც უზრუნველყოფენ მასალის გადაადგილებას: ა) ვიბრატორიდან, ბ) ვიბრატორისკენ და გ) ადგილზე სრიალს (გაცრას)

ტორსიონული დრეკადი სისტემა შესაძლებელია განხორციელდეს, როგორც სტატორის და იაკორის დამაფიქსირებელი გრეხვადი ღერძის (ლილვის) სახით, ისე ბერკეტი 5-ის დამაგრების სახსრების შემაერთებელი ღერძის სახით. აღსანიშნავია რომ ამგვარი დაკიდებისას შესაძლებელია ბერკეტი 5-ის როგორც რესორული სისტემად გამოყენება, რაც დამატებით, საჭიროებისამებრ, დრეკადი სისტემის სიხისტის ვარირების საშუალებას მოგვცემს.

5. ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების მექანიკური და ელექტრული ნაწილების რხევის აღმწერი დიფერენციალური განტოლებები და მათი მათემატიკური მოდელირების პრობლემები.

დაახლოებით 20 წლის განმავლობაში (74÷97 წლებში) ერთტაქტა ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების, რომელთა ელექტრულ წრედში აგზნების

სიხშირის დაწვევის (განახევრების) მიზნით ჩართული იყო ნახევარგამტარული დიოდი, მე-10, 12, და 28-ეს მსგავს დიფერენციალურ განტოლებების ბაზაზე შექმნილი მათემატიკური მოდელირება გადაუჭრელ პრობლემად რჩებოდა. მიუხედავად იმისა რომ აღნიშნულ საკითხზე შესრულებული იყო მრავალი ათეულობით სამეცნიერო ნაშრომი, პრობლემა მაინც ბუნდოვნად რჩებოდა. უფრო მეტიც დღევანდელ დღემდე აღნიშნულ პრობლემაზე ტექნიკურ სამეცნიერო ლიტერატურაში რაიმე ნაშრომი არ გვხვდება, რის დამადასტურებლად შეიძლება ჩაითვალოს ბოლო 2015-2018 წლებში გამოქვეყნებული ზელკოსა და დესპოტოვიჩის ნაშრომები ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების კვლევასთან დაკავშირებით, სადაც გამოყენებულია არა ციფრული, არამედ ანალოგიური მოდელირება (მექანიკური რხევების ელექტროწრედების აღწერის დიფერენციალურ განტოლებათა მსგავსების ანალოგიაზე დაფუძნებული მათემატიკური მოდელირება) [9].

ასევე გარკვეულ პრობლემად რჩებოდა ორტაქტა ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების მათემატიკური მოდელირება, როდესაც აგზნების ელექტრომაგნიტურ დიფერენციალურ განტოლებებში (4) და (5), მუდმივი დენის მაგივრად, რეალურად პრაქტიკაში გამოყენებული პულსირებულად გამართული დენის იმიტაციის გამოყენება ხდება. თუმცა უკანასკნლი განტოლებების ბაზაზე აწყობილი მათემატიკური მოდელირება ე.ი. ბალანსირებულად (გასწორებულ) დენის პიკებისას გაცილებით სტაბილურად მუშაობდა და მისი გამოყენებით მიღებული შედეგები საკმაოდ ახლოს იყო რეალურობასთან.

ერთტაქტა ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების (ნახ.13ა) მექანიკური რხევების ამღწერ (45) და ელექტრული აღზნების (46) დიფერენციალურ განტოლებებს ზოგადად აქვთ შემდეგი სახე [7,8,17]

$$\ddot{x} + 2h\dot{x} + \omega_0^2 x = a\Phi^2 \quad (45)$$

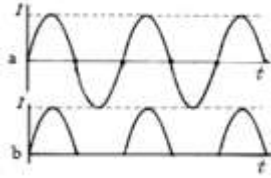
$$\dot{\Phi} = c_e \sin(\omega t) - \delta_b \Phi \quad (46)$$

$$\text{სადაც } \delta_b = b_e(\delta - x)$$

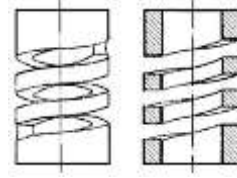
(46) განტოლებაში $c_e \sin(\omega t)$ წევრი წარმოადგენს ქსელიდან ელექტრომაგნიტის კოჭებზე მიწოდებულ ცვლადი (50) ჰვ-ის სიხშირის ძაბვას. რადგან ელექტრომაგნიტი ქსელის ძაბვის ორივე ნახევარპერიოდზე ახორციელებს მიზიდვას, ამდენად ძალური იმპულსების 100 ჰვ-იდან 50 ჰვ-ამდე დასაწევად ელექტროწრედში მიმდევრობით ხდება ნახევარგამტარული დიოდის ჩართვა (ნახ.1) ნახევარპერიოდულად გამართული ძაბვის მისაღებად ნახ.13ბ. მცირე და საშუალო სიმძლავრის ვიბრატორებში დემფირების კოეფიციენტის შესამცირებლად გამოიყენება ჩაჭრილ ღარებიანი ცილინდრული დრეკადი ზამბარები ნახ.13გ.



ნახ.13 ა) ერთტაქტა ვიბრაციული მანქანა,

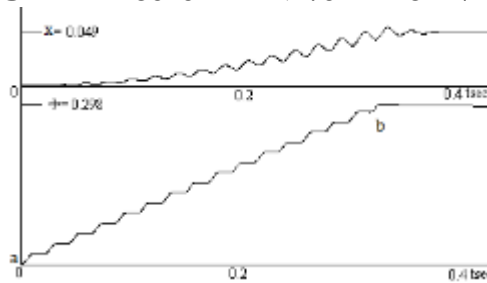


ნახ.13ბ) ხ ნახევარპერიოდულად გამართული ძაბვა.



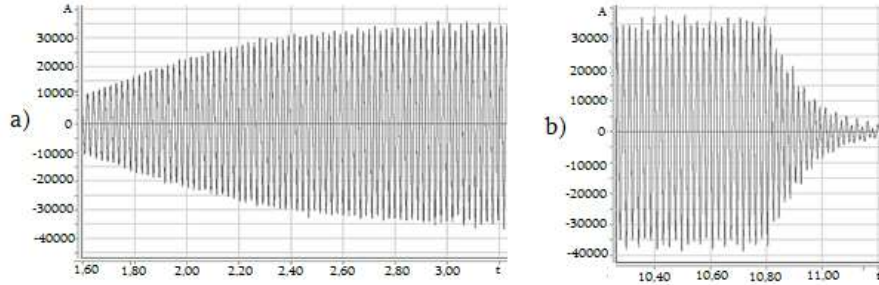
ნახ.13გ) ცილინდრული ჩაჭრილ ხვიებიანი ზამბარა

მათემატიკური მოდელირების დროს, დაშვება იმისა რომ დიოდის მიერ ელექტროწრედის ჩაკეტვისა ექვივალენტურია (46) განტოლებაში $c_e \sin(\omega t)$ წევრის განულებისა, რასაც ადგილი ქონდა მთელი რიგი წლების განმავლობაში, ერთი შეხედვით, ანუ მათემატიკურად სავსებით ბუნებრივია, იწვევს ნახ.14-ზე ნაჩვენებ მექანიკურ რხევის x ამპლიტუდების და მაგნიტური ნაკადის Φ არარეალურ განუწყვეტელ პულსაციურ ცალმხრივ ზრდას. a წერტილი შეესაბამება ვიბრატორის ქსელში ჩართვის, ხოლო b გამორთვის მომენტებს. ნახ.14-ზე წარმოდგენილი ოსცილოგრამა სრულიად შეუსაბამოა რეალურ მანქანაზე ნახ.15-ზე წარმოდგენილ შესაბამისი დინამიკური პროცესების აღმწერ ოსცილოგრამასთან.



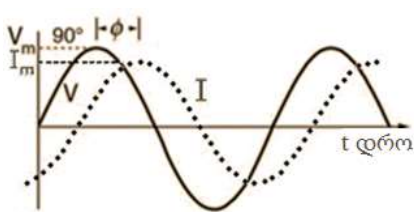
ნახ.14 $b \sin(\omega t)$ წევრის განულების შედეგად მიღებული რხევის ოსცილოგრამა

ნახ.15-ზე ნაჩვენებია 25 კილოგრამი მასის ერთტაქტიანი ვიბრომანქანის 50 ჰც-ის ვიბრორეზონანსში შესვლის და გამოსვლის ოსცილოგრამები [18]. ვიბრომანქანა დატვირთულია 15 კგ-ის ტრანსპორტირებადი ფხვიერი მარცვლოვანი მასალით. აღსანიშნავია რომ მოცემული მცირე ჰისტერეზისიანი ჩაჭრილ ზამბარებიანი ვიბრომანქანის დემფირების კოეფიციენტი დაუტვირთავ შემთხვევაში არის $\psi = 0.06$, ხოლო დატვირთვულ მდგომარეობაში (ოსცილოგრამის მიხედვით) არის $\psi = 0.12$, ანუ 15 კგ მასალის ტრანსპორტირებისათვის დემფირების კოეფიციენტი 25 კგ მასიანი მანქანისათვის იზრდება 0.06 ერთეულით. აღნიშნული ფაქტი ნათლივ აჩვენებს თუ რა დიდი მნიშვნელობა აქვს დემფირების კოეფიციენტის შემცირებას ვიბრომანქანების მარგი კოეფიციენტის გაზრდის თვალსაზრისით. მოცემული ვიბრატორის რხევის ამპლიტუდები დამყარებულ რეჟიმში არის 0.85მმ, რაც შესაბამისია 35000 პირობითი ერთეულის.

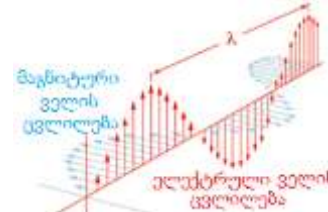


ნახ.15. ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის რეზონანსში შესვლა და გამოსვლის ოცილოგრამა.

დიოდის ცვლად დენთან ურთიერთქმედებასთან დაკავშირებით მხედველობაში მისაღებია ის გარემოებაც, რომ როდესაც ცვლად დენის წრედთან დაკავშირებულია ინდუქტივობა ან ტევადობა, მაშინ დენის და ძაბვის პიკები არ მიიღწევიან ერთდროულად, ანუ ისინი დაძრულნი არიან ერთმანეთისგან ფაზით $\varphi < 90^\circ$ ნახ.16.



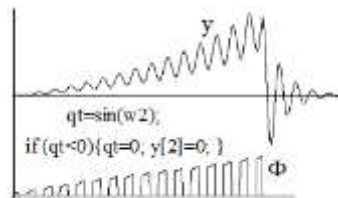
ნახ.16 ფაზათა სხვაობა ძაბვას და დენს შორის



ნახ.17. მაგნიტური და ელექტრული ველები

ინდუქტიურ წრედში დენი ჩამორჩება ძაბვას (დადებითი ფაზა), ხოლო ტევადურ წრედში დენი ასწრებს ფაზას (უარყოფითი ფაზა). გარდა ამისა მაგნიტური და ელექტრული ველები ერთმანეთისადმი ურთიეთპერპენდიკულარულ სიბრტყეებში მოქმედებენ [19] ნახ.17.

(46) განტოლების მიხედვით მათემატიკური მოდელირებისას დადებით შედეგს, არც 90° -ით წანაცვლებული ძაბვის განულება იძლევა და არც (46)-ე განტოლების მაგნიტური ნაკადიდან დენის პარამეტრებზე გადაწყობა მე-(12) განტოლების შესაბამისად - რხევის სურათი იგივე რჩება. უფრო მეტიც, რუნგე-კუტას მიხედვით მაგნიტური ნაკადის ხელოვნურად განულებაც არ იძლევა შედეგს ნახ.18.

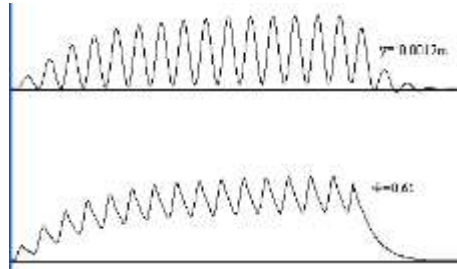


ნახ.18 მაგნიტური ნაკადი Φ -ს პერიოდული განულებით მიღებული Φ ზრდის პროცესი.

ნახ.18-ზე ნაჩვენებია ელექტრომაგნიტური აგზნების და მექანიკური რხევის ოსცილოგრამები მაგნიტური ნაკადის Φ ხელოვნურად განულების მიხედვით. თუ რა არის მიზეზი ამგვარი პროცესის განხილული იქნება მოგვიანებით.

ერთტაქტიანი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების ნახევარპერიოდულად გამართული დენით მართვის (აგზნების) შემთხვევაში, მექანიკური რხევითი პროცესების მისაღებად, ადგილი ქონდა მაგნიტური წინააღმდეგობის ((46) განტოლების მეორე წევრის $b(\delta - x)\Phi$), არარეალურ გაზრდს. აღნიშნული მიიღწეოდა ელექტრომაგნიტის კოჭის ხვიების გავლენის b კოეფიციენტის გაზრდით და მისი საჰაერო ღრეჩო δ -თან დაბალანსებით. ამგვარად ადგილი ქონდა მაგნიტური წინააღმდეგობის რამდენჯერმე არარეალურ გაზრდას, რის გამოც მაგნიტური ნაკადი მკვეთრად მცირდებოდა. აღნიშნულის გამო, საჭირო ხდებოდა 45-ე განტოლებაში შემავალი აგზნების ძალის $a\Phi^2$ -ის a კოეფიციენტის რამდენჯერმე გაზრდა, ანუ აგზნების პულსაციური ძალის რეალურ სიდიდემდე აღდგენისათვის ხდებოდა a კოეფიციენტის არარეალური გადიდება.

ასეთი გზით მიღებულ მექანიკური რხევითი ოსცილოგრამები რეალურთან შედარებით გარკვეულად ასიმეტრიულ რხევით ამპლიტუდებს იძლევიან ნახ.19. გარდა ამისა ელექტრომაგნიტის ელექტრო კოჭების და აგზნების ძალის კოეფიციენტის სიდიდე რეალრისაგან საკმაოდ განსხვავებულია.



ნახ.19 ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის აგზნების და მექანიკური რხევის ოსცილოგრამები

6. ერთტაქტა და ორტაქტა ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების ელექტრომაგნიტური იძულებითი ძალის აღმწერი დიფერენციალური განტოლებების მათემატიკური ანალიზი.

აღნიშნული პრობლემის რეალურად გაანალიზებისათვის (46)-ე განტოლება ამოხსილი იქნა ანალიზურად იმ დაშვებით, რომ საჰაერო ღრეჩოს δ -ას ცვლილება (რხევა) x მცირეა, ანუ მექანიკური რხევები მოცემული მომენტისათვის უმნიშვნელოა და მისი უგულველყოფა შესაძლებელია [20,21]. ასეთ შემთხვევაში (46) განტოლებების ამონახსნი მაგნიტური ნაკადის მიმართ შესაძლებელია წარმოდგენილი იქნას, როგორც ორი ფუნქციის ნამრავლი [22],

$$\Phi = u(t) \cdot v(t) \tag{47}$$

რომელთაგან ერთი დაიშვება ნებისმიერად (თავისუფლად), მეორე კი განისაზღვრება (44), ან (12) დიფერენციალური განტოლებების საფუძველზე [22].

რადგან

$$\frac{d\phi}{dt} = u \frac{dv}{dt} + v \frac{du}{dt} \quad (48)$$

მე-(44) განტოლების გათვალისწინებით (47) და (48)-ის საფუძველზე მიიღება

$$u \frac{dv}{dt} + v \frac{du}{dt} + \delta_b \cdot u \cdot v = c_e \cdot \sin(\omega t) \quad (49)$$

მე- (49)-ე განტოლებაში ცვლადების განმხოლოების შედეგად ვღებლობთ

$$u \left(\frac{dv}{dt} + \delta_b v \right) + v \frac{du}{dt} = c_e \cdot \sin(\omega t) \quad (50)$$

მე-(50) განტოლებაში შესაძლებელია მოიძებნოს v -ს ისეთი ფუნქცია, რომლის დროსაც $\left(\frac{dv}{dt} + \delta_b v \right) = 0$. ამგვარი ფუნქცია იქნება $v = c_* e^{-\delta_b t} \square$ [22].

მე-(50) განტოლების ამონახსნისათვის v ფუნქცია დამაკმაყოფილებადია კოეფიციენტ c_* -ეს ნებისმიერი მნიშვნელობისათვის. ამდენად მიზანშეწონილია ავიღოთ $v = e^{-c\delta}$. v -ს მე-(50)-ში ჩასმით და შემდგომი ინტეგრირებით ვღებულობთ

$$u = c_e \frac{e^{\delta_b t}}{\delta_b^2 + \omega^2} (\delta_b \sin \omega t - \omega \cos \omega t) + c_1 \quad (51)$$

v და u ფუნქციების მე-(47)-ში ჩასმით ვღებულობთ მაგნიტურ ნაკადს.

$$\Phi = c_e \frac{b(\delta-x) \sin \omega t - \omega \cos \omega t}{\delta_b^2 + \omega^2} + C_1 e^{-\delta_b t} \quad (52)$$

საწყისი პირობების $t=0$, $\Phi=0$ გათვალისწინებით C_1 ტოლია

$$C_1 = \frac{c_e \omega}{\delta_b^2 + \omega^2}$$

ამრიგად მაგნიტური ნაკადის ცვლილება ცვლადი დენის სიხშირის და საჰაერო ღრეჩოს გათვალისწინებით ტოლია [8]

$$\Phi = \frac{c_e \omega}{\delta_b^2 + \omega^2} e^{-\delta_b t} + c_e \frac{\delta_b \sin \omega t - \omega \cos \omega t}{\delta_b^2 + \omega^2} \quad (53)$$

მე-(53) განტოლების ანალიზით დგინდება, რომ პირველი წევრი დროში თანდათანობით ქრება. რხევითი პროცესს განაპირობებს მეორე წევრი და ის მექანიკური სისტემის რხევის პროცესის მცირე ასიმეტრიის გამომწვევიც არის. ძაბვის სიხშირის და საჰაერო ღრეჩოს გაზრდა მაგნიტურ ნაკადს ამცირებს. თუ ელექტრომაგნიტი იკვებება მუდმივი დენით $\omega=0$, ანუ $c_e \cdot \sin \omega t = u_0$, მაშინ მაგნიტური ნაკადი ტოლია .

$$\Phi = u_0 / \delta_b \quad (54)$$

და შესაბამისი მაგნიტური მიზიდვის ძალა იქნება

$$F = a\Phi^2 = a(u_0 / \delta_b)^2 \quad (55)$$

თუ საჰაერო ღრეჩო $\delta_b = 0$ და $\omega \neq 0$ მაგნიტური ნაკადი შემდეგ სახეს ღებულობს

$$\Phi = \frac{c_e}{\omega} - \frac{c_e}{\omega} \cos \omega t \quad (56)$$

ამგვარად მაგნიტური ნაკადის სიდიდე უკუპროპორციულ დამოკიდებაშია ძაბვის სიხშირესთან. აღსანიშნავია რომ $\delta_b=0$ და $\omega=0$ მაგნიტური ნაკადი არ გახდება უსასრულოდ დიდი. რადგან ასეთ შემთხვევაში Φ იზღუდება ქსელის აქტიური წინააღმდეგობით და მაგნიტოგამტარების წინააღმდეგობებით, რომლებიც მოცემულ განტოლებებში ცხადად არ არიან გათვალისწინებული [7].

მე-(56) განტოლებიდან ნათლად ჩანს, რომ მაგნიტური ნაკადის Φ -ის რხევების პიკები იმართებიან $\cos\omega t$ -მიხედვით და წანაცვლებულნი არიან (ჩამორჩებიან) ω ძაბვის რხევების პიკებს 90° -ით, რომლებიც იმართებიან $\sin\omega t$ -ს მიხედვით. ამგვარად მაგნიტური ნაკადის რხევების პიკები ემთხვევიან დენის და მექანიკური რხევების პიკებს და ჩამორჩებიან ძაბვის რხევების პიკებს 90° -ით. როდესაც ძაბვის პიკები დებულობენ ნულოვან მნიშვნელობებს, მაშინ მაგნიტური ნაკადის პიკები მაქსიმალურ მნიშვნელობებს აღწევენ.

ზემოდ განხილული ანალიზის საფუძველზე დანამდვილებით შეიძლება ითქვას რომ პრობლემას (46)-ე განტოლება არ ქმნის, იგი რეალურ ფიზიკურ პროცესს აღწერს, რასაც ადასტურებს (53) ამონახსნის ანალიზური კვლევა [8,17].

პრობლემა კი შემდეგში მდგომარეობდა, ნახევარგამტარული დიოდის მოქმედების შესაბამისად, როდესაც ელექტრულ წრედში დენი იკეტება, ეს მომენტი (46)-ე განტოლებაში გაიგივებული იყო ძაბვის უარყოფითი ფაზური მნიშვნელობად და წევრი $e \cdot \sin\omega t$, მთელ 180° პერიოდის განმავლობაში ნულის ტოლად აიღებოდა, რაც ფიზიკური თვალსაზრისით დაუშვებელია [10,19,23].

მართლაც, ასეთ დროს (46) განტოლება დებულობს შემდეგ სახეს.

$$\dot{\Phi} = -b_e(\delta - x)\Phi \quad \text{ანუ} \quad \dot{\Phi} = -\delta_b\Phi \quad (57)$$

ანალოგიურად (46) განტოლების ამოხსნისასათვის გაკეთებული დაშვებით, (57)-ე განტოლების ამონახსნი იქნება

$$\Phi = C_2 e^{-\delta_b t} \quad (58)$$

საწყისი პირობების გათვალისწინებით, როდესაც $t = 0$, მაშინ $\Phi = \Phi_0$, მე- (58)-დან ვღებულობთ, რომ $C_2 = \Phi_0$

ამრიგად მაგნიტური ნაკადის ცვლილება 57-ის საფუძველზე აღიწერება შემდეგი სახით

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\delta_b t} \quad (59)$$

(59) განტოლების ანალიზი ცხადად აჩვენებს, რომ მიუხედავად იმისა, რომ (57)-ე განტოლება მათემატიკურად კორექტულად არის ამოხსნილი, ფიზიკური პროცესი (59)-ეს მიხედვით, ელექტრომაგნიტური თეორიის თვალსაზრისით, სრულიად არარეალურად ვითარდება. მართლაც, ძაბვის განულებების 180° ფაზურ პერიოდზე, მაგნიტური ნაკადი Φ ნულის ტოლი უნდა გახდეს. ასე მაგალითად მაგნიტური ნაკადი Φ დროის $t=0.01$ წმ განმავლობაში, რომელიც შესაბამისია 50ჰც-ის ნახევარი პერიოდის, (59)-ის მიხედვით

არ ხდება ნულის ტოლი. მართლაც, თუ დავუშვებთ რომ $\Phi_0=1$, მაშინ $t=0$ დროს მაგნიტური ნაკადის სიდიდე (59) მიხედვით იქნება $\Phi = \Phi_0 = 1$ ვებერი. ამრიგად 0.01 წმ-ის შემდეგ (59) მიხედვით მაგნიტური ნაკადი ტოლი ხდება $\Phi = 0.99005$ ვებერის, ანუ ცვლილება მხოლოდ 0.00995 ერთეულია, რაც სრულიად აუხსნელია ელექტრომაგნიტური თეორიის საფუძველზე [10]. ამრიგად (57) განტოლება არ ასახავს რეალურ მაგნიტური ნაკადის ცვლილებას. მართლაც (57) ტიპის განტოლებები გამოიყენებიან ურანის დაშლის და სხვა მეტად ხანგრძლივი პროცესების დასათვლელად [19,22].

(46)-ე განტოლების $c_e \cdot \sin \omega t$, წევრის განულება არაკორექტულია (შეცდომაა), რადგან ასეთი გზით მიღებული (57)-ე განტოლება არ ასახავს მაგნიტური ნაკადის ცვლილების რეალურ ფიზიკურ პროცესს. (57) განტოლების ციკლურ პროცესში ჩართულობის დაუშვებლობა ასევე კარგად ჩანს ძალოვანი ელექტროწრედის ძაბვების ბალანსის განტოლების ანალიზიდან

$$ir = u \cdot \sin \omega t + W \dot{\Phi} \quad (60)$$

ელექტრომაგნიტური ინდუქციის თანახმად შეუძლებელია რომ ძაბვის $u \cdot \sin \omega t$ გათიშვის (არარსებობის) შემთხვევაში ელექტრო წრედში ადგილი ქონდეს დენის i , მაგნიტური ნაკადის Φ და ინდუქტიური წინააღმდეგობის $W \frac{d\Phi}{dt}$ ან $(L \frac{di}{dt})$ უცვლელად არსებობას [10,19] სადაც L - ინდუქტურობაა (თვითდუქცია).

$u \cdot \sin \omega t$ წევრის განულებით მე-(60) განტოლება ღებულობს შემდეგ სახეს

$$ir = \zeta = -W \frac{d\Phi}{dt} \quad (61)$$

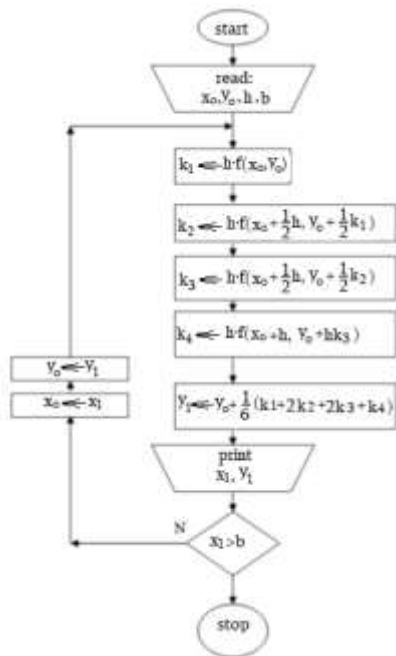
(61)-ე განტოლების თანახმად ინდუქციური ძაბვა ζ და შესაბამისი დენი i არსებობენ მხოლოდ და მხოლოდ მაგნიტური ნაკადის Φ ცვლილების შედაეგად. წინააღმდეგ შემთხვევაში (61) განტოლება კარგავს ყოველგვარ მნიშვნელობას.

ზუსტად აღნიშნული მოვლენის არ გათვალისწინება იწვევს ნახ.14 და ნახ.18-ზე ნაჩვენებ მოვლენებს, სადაც ადგილი აქვს მაგნიტური ნაკადის თანდათანობით გამუდმებულ ყალბ დაგროვებას და დრეკადი სისტემის ასევე ცალმხრივ განუწყვეტელ ზრდად დეფორმაციებს [17].

ზემოდმოყვანილი კვლევების საფუძველზე ძაბვის უარყოფით ნახევარპერიოდებზე (დიოდის მიერ ჩაკეტილ დენის შესაბამის პერიოდებზე) (46) განტოლებაში წევრი $c_e \sin(\omega t)$ კი არ უნდა განუღდეს, არამედ მთლიანად (46) განტოლება ჩანაცვლებული უნდა იქნას მაგნიტური Φ ნაკადის ქრობის ამღწერი რეალური განტოლებით. ანგარიშის გამარტივების მიზნით ასევე შესაძლებელია მცირეოდენი უზუსტობის დაშვებით, მაგნიტური ნაკადის სიდიდე შესაბამის პერიოდებში დაიშვებოდეს ნულს ტოლად შედეგი პირობი მიხედვით [8,17].

$$\text{როდესაც } \sin(\omega t) < 0 \quad \text{მაშინ } \Phi = 0 \quad (62)$$

როგორც აღნიშნული იყო ზემოთ, ამგვარი პროცედურა დადებით შედეგს არ იძლევა (ნახ.18). საქმე ისაა რომ რუნგე-კუტას პროგრამული უზრუნველყოფის (მეთოდი) ნახ.20 სტანდარტულად დაწერილი სუფთა მათემატიკური პროგრამაა, და ზოგიერთ შემთხვევაში მასში მიმდინარე ოპერატორების ციკლური გადართვები შეიძლება არ დემთხვევს ფიზიკური პროცესის ციკლურ მიმდინარეობას. ასე მაგალითად: მაგნიტური ნაკადის მაფორმირებელი ოპერატორი $y[i]$ არ უზრუნველყოფს ციკლის ბოლო პერიოდის დროს გარედან (ხელოვნურად) მიცემულ მითითებას მაგნიტური ნაკადის განულებაზე ბრძანებას და მის გადაცემას მომდევნო ციკლის საწყის ეტაპზე. მართლაც, რუნგე-კუტას მიხედვით ციკლის დამასრულებელი ოპერატორი $y[i]$ პარამეტრის მიმდებარე სიდიდეს (მაგალითად Φ -მნიშვნელობას) მისი წინა ოპერატორს $w[i]$ გადასცემს, ანუ ციკლის ბოლოს სრულდება მოქმედება $w[i]=y[i]$ და ეს უკანასკნელი აბრუნებს დაფიქსირებულ მნიშვნელობას ციკლის საწყის ეტაპზე ნახ.20.



```

void __fastcall TForm1::RC()
{ int i; if(r<1)
  { for (i=0;i<n;i++) w[i]=0; y[i]=w[i]; }
  eqf (); for (i=0;i<n;i++)
    { v=h*f[i]; k[i]=v; y[i]=w[i]+v/2; }
    x=x+h/2;
  eqf (); for (i=0;i<n;i++)
    { v=h*f[i]; k[i]=k[i]+2*v; y[i]=w[i]+v/2; }
    eqf (); for (i=0;i<n;i++)
    { v=h*f[i]; k[i]=k[i]+2*v; y[i]=w[i]+v; }
    x=x+h/2;
  eqf (); for (i=0;i<n;i++)
    { y[i]=w[i]+(k[i]+h*f[i])/6; w[i]=y[i]; }
  RC();
}
  
```

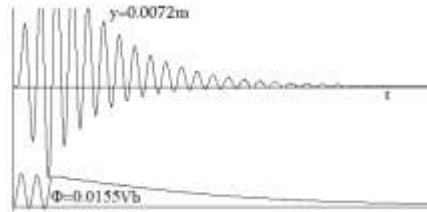
ნახ.20ა რუნგე-კუტას მეთოდის ბლოკ-სქემა

ნახ.20ბ. რუნგე-კუტას მეთოდის სამანქანო პროგრამა

როგორც პროგრამის ტექსტი იტყვიან - ადგილი აქვს წყალქვეშა დინებებს და იქ არსებულ ქვებზე ფეხის წამოკვრას [24,25,26]. ამგვარად (62) ციკლური პირობის გარედან გადაცემის წარმატებით განხორციელებისათვის Φ -ის განულების პირობა უნდა გადაეცეს უშუალოდ ციკლის წინა ოპერატორ $w[i]$ -ეს და არა $y[i]$ ნახ.20.ბ.

ნახ. 21-ზე წარმოდგენილია ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის მექანიკური და მაგნიტური ნაკადის რხევს რეალური ოსცილოგრამები, რომლებიც მიღებულნი არიან

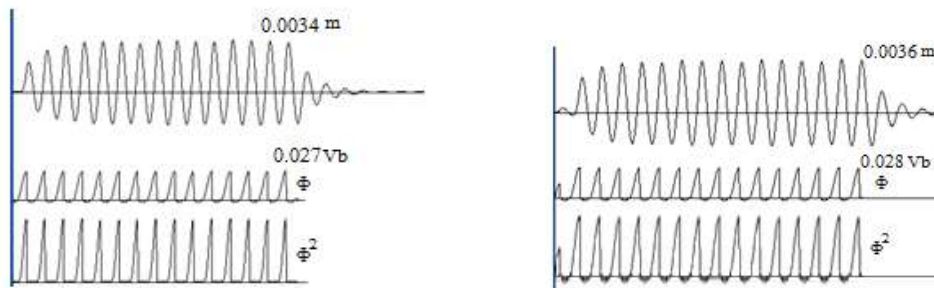
ოპერატორ $w[i]$ მეშვეობით განხორციელებულ მაგნიტური ნაკადის პერიოდული განულების ბრანებების შესაბამისად.



ნახ.21. ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის რხევის ოსცილოგრამები.

ასევე აღსანიშნავია, რომ ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის რეზონანსიდან გამოსვლის პროცედურისას რომ რომ არ წარმოიქმნას არარეალური ხაგრძლივი მაგნიტური ქრობის პროცესი (ნახ.21) ასევე საჭიროა $w[i]$ განულება გამორთვის მომენტშიც. Φ -ის დაცემის ხანგრძლიობა დამოკიდებულია გამორთვის მომენტში Φ -ს სიდიდეზე).

ნახ.22-ზე წარმოდგენილია ზემოდმოყვანილი ანალიზის საფუზველზე, ნახევარპერიოდულად გამართული აგზნების ძალით კვებადი ერთთაქტა ელექტრო-მაგნიტური ვიბრატორების, (45), (46) განტოლებების და (62) პირობის ბაზაზე შესრულებული მათემატიკური მოდეირებით მიღებული 50-50 ჰც-ის რხევის ოსცილოგრამები. ნახ.22ა-ზე იძულებითი ძალა იცვლება $\sin(\omega t)$ ფუნქციის მიხედვით, ხოლო ნახ.22ბ-ზე $\sin(\omega t - \pi/2)$ ფუნქციის მიხედვით. წარმოდგენილი ოსცილოგრამების რხევითი ამპლიტუდები მხოლოდ 90° ფაზით არიან დამრული ერთმანეთისგან და მათ სიდიდეზე და სიხშირეზე რაიმე გავლენა არა აქვს საწყისი პირობით მიცემულ 90° ფაზურ ძვრას.



ნახ.22ა. მექანიკური და მაგნიტური ნაკადის რხევის ოსცილოგრამები $\sin(\omega t)$ აგზნებით
 ნახ.22ბ. მექანიკური და მაგნიტური ნაკადის რხევის ოსცილოგრამები $\sin(\omega t - \pi/2)$ აგზნებით

აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ მათემატიკური მოდეირებისას, როდესაც იძულებით (აგზნების) ძალად გამოყენებულია სუფთა სინუსოიდალური (არა ნახევრად გამართული) ელექტროქსელიდან მიღებული ცვლადი დენი, იძულებითი ძალაში საწყისი ფაზის მიცემა უკვე გავლენას ახდენს ელექტრომაგნიტურ ვიბრატორების რხევით პროცესების დინამიკაზე, რაც რეალურ მანქანებში ნაკლებად ფიქსირდება. აღნიშნული მოვლენა განხილული იქნება შემდგომ თავში.

ორტაქტიანი ელექტრომაგნიტი ვიბრატორის აღზნების დიფერენციალური განტოლება (4)-ის, ანალიტიკური ამონახნი მიიღება ანალოგიურად, როგორც (46) და აქვს შემეგი სახე

$$\Phi = \left(-\frac{a_e}{\delta_b} + \frac{c_e \omega}{\delta_b^2 + \omega^2} \right) e^{-\delta_b t} + \frac{a_e}{\delta_b} + c_e \frac{\delta_b \sin \omega t - \omega \cos \omega t}{\delta_b^2 + \omega^2} \quad (63)$$

ორტაქტა ელექტრომაგნიტურ ვიბრატორებში (63)-ის მიხედვით დამატებით გენერირდება მუდმივი მდგენელ a_e/δ_b , რომელიც ცვლად მდგენელთან $c_e \sin \omega t$ შეჯამებით ქმნის იმავე აგზნების სიხშირულ იმპულსებს რაც გააჩნია ქსელურ სიხსირეს, ანუ სიხშირე აღარ ორმაგდება [4]. აღნიშნული იმპულსური ძალა სტატორზე ცალმხრივი ზემოქმედების დროს გამოიწვევს ასიმეტრიულ რხევებს, მაგრამ რადგან რეალურ ორტაქტა ვიბრატორებში ამგვარი მიზიდვა 180° ფაზურად წანაცვლებული აგზნებით (5), ხოციელდება მეორე მხრიდანაც, ამდენად ვიბრატორი იმუშავებს სიმეტრიულ რხევებზე, იმ პირობით თუ ორივე საჭაერო ღრეჩო სტატორის გვერდებზე თანაბარი იქნება.

რადგან შემაგნიტების პრინციპზე მომუშავე ორტაქტიან ელექტრომაგნიტურ ვიბრატორებისათვის, აგზნების სიხშირის გასანახევრებლად, არ არის საჭირო ნახევარგამტარული დიოდის ვიბრატორის კვების ელექტროწრედში მიმდევრობით ჩართვა, ამდენად (4) და (5) განტოლებებში არ ხდება $c_e u_1 \sin \omega t$ ხელოვნური განულება და შესაბამისად მათემატიკური მოდელირებისას ზემოდმოყვანილი პრობლემა არ წარმოიქმნება. თუმცა აქ გასათვალისწინებელია ის ფაქტი, რომ მექანიკური რხვის განტოლებაში (46) მაგნიტური ნაკადი Φ^2 სახით არის წარმოდგენილი და შესაბამისად მათემატიკური მოდელირებისას აგზნების ძალა უნდა იმართებოდეს შემდეგი პირობით.

$$F = a\Phi^2 \text{sig } \Phi \quad \text{სადაც } \text{sign } \Phi = \begin{cases} 1 & \text{როდესაც } \Phi > 0 \\ -1 & \text{როდესაც } \Phi < 0 \end{cases} \quad (64)$$

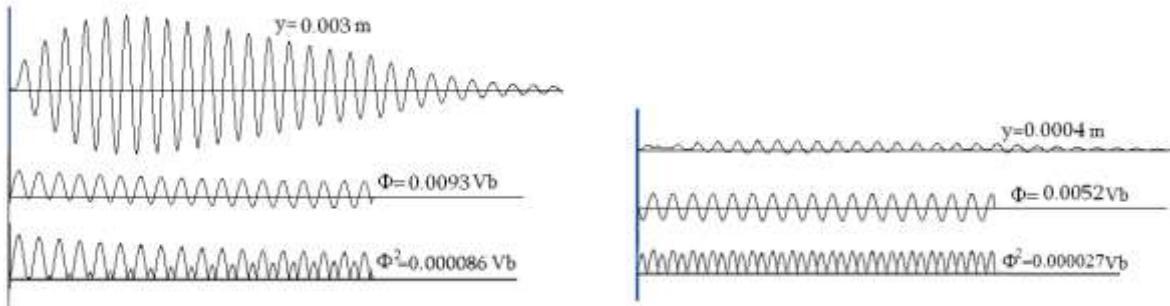
წინააღმდეგ შემთხვევაში მათემატიკური მოდელირებისას F აგზნების ძალის სიხშირე გაორმაგდება.

აღსანიშნავია რომ ბრუნვით რხევებზე მომუშავე ორტაქტა ელექტრომაგნიტის ელექტრული მართვის სქემა სინუსოიდალურია, ხოლო მაგნიტური ნაკადით შექმნილი წევის ძალა ტოია $F=a\Phi$ და არ საჭიროებს (64)-ე პირობის დაცვას.

7. ერთტაქტა ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების მათემატიკური მოდელირება ჰარმონიული აგზნები ძალის მეშვეობით

ბოლო დროს სიხშირული გარდამქმნელების ხელმისაწვდომობის პირობებში ელექტრომაგნიტური ვიბრატორები მზარდი წარმატებით გამოიყენება დაბალი სიხშირის რეზონანსურ რეჟიმებზე და გამოირჩევიან მთელი რიგი უპირატესობებით სხვა ტიპის ვიბრატორებთან შედარებით. ერთტაქტიანი ვიბრატორების აგზნების სიშირე ორჯერ დაბალი უნდა იყოს სასურველი მექანიკური რხევების სიხშირეზე. აღსანიშნავია რომ ამ შემთხვევაშიც მათი მათემატიკური მოდელირებისას ადგილი აქვს გარკვეული პრობლემებს, განსაკუთრებით გარდამავალი რეჟიმების კვლევისას, რაც არაელექტრომაგნიტური (სხვა ტიპის) ვიბრატორების მათემატიკურ მოდელირებისას არ გვხვდება.

ნახ.23-ზე ნაჩვენებია (45) და (46) განტოლებების მიხედვით აწყობილი მათემატიკურ მოდელებით მიღებული 50 ჰც-ის საკუთარი სიხშირის ერთტაქტიანი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის გარდამავალი რეჟიმები 50 ჰც-ის აგზნების ძალით კვების დროს. ნახ.23ა-ზე იძულებითი (აგზნების) ძალა იმართება $c_e \sin(\omega t)$ მიხედვით, რის შედეგადაც რხევის დასაწყისში საკმაოდ არარეალურ მექანიკურ და მაგნიტური ნაკადის რხევით პროცესებს ვღებულობთ. ნახ.23ბ-ზე ნაჩვენები რხევითი რეჟიმები ასევე მიიღებიან იგივე პარამეტრებით, ოღონდ იძულებითი ძალის ცვლილება ხდება 90° -ით წანაცვლებული ფაზით, ანუ $c_e \sin(\omega t - \pi/2) = -c_e \cos(\omega t)$ მიხედვით, რის შედეგადაც რეალური სურათი მიიღება. პირობის თანახმად ორივე შემთხვევაში იძულებითი არა რეზონანსული რეჟიმი უნდა ყოფილიყო, რადგან Φ^2 -ის გამო აგზნების სიხშირე ორმაგდება. პირველ შემთხვევაში ვიბრატორი რეზონანსული რხევითი რეჟიმით იწყებს გენერირებას, რადგან მაგნიტური ნაკადი Φ -ს ამპლიტუდები დასაწყისისი სრულიად ცალმხრივი და ასიმეტრიულია და შემდგომ თანდათანობით ღებულობს სიმეტრიულ რხევით ამპლიტუდებს, რასაც თან სდევს Φ^2 -ის სიხშირის შესაბამისი გაორმაგება და მექანიკური რხევების ამპლიტუდების თანდათანობითი შემცირება არარეზონანსული რეჟიმის დამყარებით. მეორე შემთხვევაში (ნახ.23ბ) Φ ამპლიტუდები თავიდანვე სიმეტრიული ფორმით გვევლინება, ასევე რეალური არარეზონანსული მექანიკური რხევების მცირე ასიმეტრიული ამპლიტუდების ფონზე.

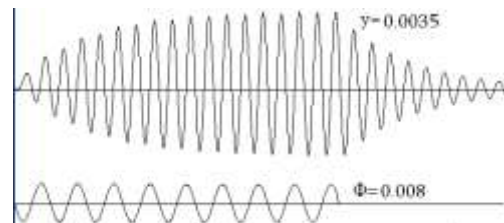
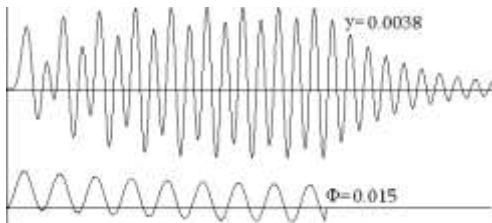


ნახ.23ა. 50ჰც-ის რხევითი არარეზონანსული რეჟიმი 50ჰც-ის $\sin(\omega t)$ იძულებითი ძალით

ნახ.23ბ. 50ჰც-ის რხევითი არარეზონანსული რეჟიმი 50ჰც-ის $\sin(\omega t - \pi/2)$ აგზნებითი ძალით

წარმოდგენილი ოსცილოგრამებიდან ნათლად ჩანს, რომ აღნიშნულის მიზეზი იძულებითი ძალაა, რომელიც მაგნიტურ ნაკად Φ -ის მიმდინარე ტრანსფორმირებაზეა დამოკიდებული, კერძოდ Φ^2 -ზე, რომელიც განაპირობებს იძულებითი ძალას სიდიდეს და სიხშირეს.

აღსანიშნავია, რომ ანალოგიური სურათი ვლინდება ნებისმიერ სხვა სიხშირეებზეც. ნახ.24-ზე წარმოდგენილია 50 ჰც-ის საკუთარი სიხშირის ვიბრომანქანების კვება 25 ჰც-ის იძულებითი ძალით, (პირობის თანახმად რეზონანსული რეჟიმები) იძლევა შემდეგ სურათებს.

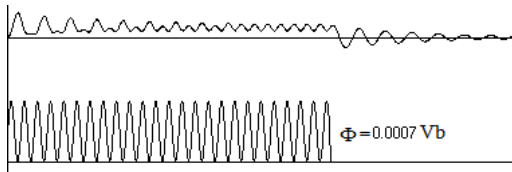


ნახ.24ა. 50ჰც-ის რხევითი რეზონანსული რეჟიმი 25ჰც-ის $\sin(\omega t)$ იძულებითი ძალით

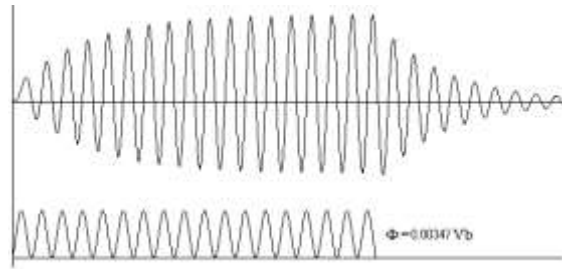
ნახ.24ბ. 50ჰც-ის რხევითი არარეზონანსული რეჟიმი 25ჰც-ის $\sin(\omega t - \pi/2)$ აგზნებითი ძალით

ნახ.24ა-ზე გენერირება იწყება 25ჰც-ს ძირითადი რეზონანსული რხევითი სიხშირით, რომელიც თანდათანობით გადადის 50 ჰც-ის სუპერჰარმონიულ რეზონანსულ რეჟიმში. ასიმეტრიული Φ იწყება 0.0015 Vb-ით და მთავრდება სიმეტრიული $\Phi=0.008Vb$ -ით. ნახ.24ბ-ზე კი რეალური სურათია. იწყება 50 ჰც რეზონანსული რეჟიმით, მყარდება და რეზონანსიდან გამოსვლის რეჟიმშიც ასევე 50 ჰც-ია, რაც სრულიად შეესაბამება ექსპერიმენტულ კვლევას. ნახ.24-ზე არ არის ნაჩვენები მაგნიტური ნაკადის Φ^2 ფორმირება, რომელიც სრულ შესაბამისობაშია ნახ.23-ზე მოყვანილი Φ^2 გრაფიკებისა.

ნახ.25-ზე ნაჩვენებია კიდევ ერთი თავისებურება, რომელიც მჟღავნდება 25ჰც-ზე აწყობილი ვიბრატორის 25ჰც-ის ჰარმონიული ელექტრომაგნიტური იძულებითი $\sin(\omega t)$ ძალით კვებით მიღებული რეჟიმები. ნახ.25ა-ზე ნაჩვენებია არარეზონანსული რეჟიმი 25/50, რომელსე მიიღება 25 ჰც-ის იძულებითი ძალით. ფუნქცია Φ^2 -ის გამო იძულებითი ძალის სიხშირე გაორმაგებულია. ნახ.25.ბ-ზე კი ნაჩვენებია რეზონანსული 25/25 რეჟიმი, რომელიც მიიღება დიოდის მიერ ნახევარად გამართული იძულებითი ძალით.



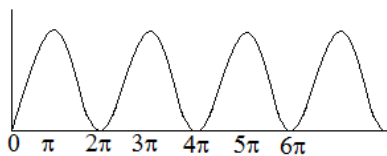
ნახ.25ა. 25ჰც-ის არარეზონანსული რეჟიმი 25ჰც-ის $\sin(\omega t)$ იძულებითი ძალით



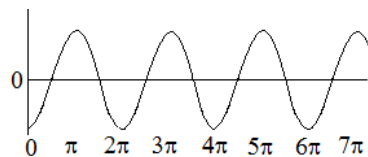
ნახ.25ბ. 25ჰც-ის რეზონანსული რეჟიმი 25ჰც-ის $\sin(\omega t)$ ნახევარგამართული იძულებითი ძალით

ნახ.25ა-ზე მსგავსად ნახ.23ბ და ნახ.24ა მექანიკური რხევა იწყება ვიბრატორის საკუთარი სიხშირით და შემდგომ გადადის იძულებითი ძალის სიხშირეზე. იძულებითი ძალის გამორთვის დროს კი რხევითი პროცესი კვლავ ვიბრატორის საკუთარი სიხშირით სრულდება. ნახ.25ბ-ზე კი მსგავსად ნახ.22-ის რხევითი პროცესი კი თავიდან ბოლომდე ერთ რეზონანსულ სიხშირეზე მიმდინარეობს და მნიშვნელობა არა აქვს იძულებითი ძალა $\sin(\omega t)$ თუ $\cos(\omega t)$ -ეს მიხედვით იმართება.

ზემოდ ნაჩვენები მოვლენის ანალიზისათვის განვიხილოთ რა ხდება სინუსის და კოსინუსის ფუნქციების $0-\pi$ და $\pi-2\pi$ ფაზურ მონაკვეთებზე ინტეგრირების დროს [22]. ფუნქცია $\sin(\alpha)$ -ას ინტეგრალი არის $-\cos(\alpha)+c^*$. $0-\pi$ იქნება $-\int_0^\pi \sin\alpha d\alpha = -|_0^\pi \cos\alpha = |_\pi^0 \cos\alpha = (1 - (-1)) = 2$. ანალოგიურად $\pi-2\pi$ მონაკვეთზე იქნება $\int_\pi^{2\pi} \sin\alpha d\alpha = |_\pi^{2\pi} \cos\alpha = |_{2\pi}^\pi \cos\alpha = -1 - (1) = -2$. ამრიგად ნულოვანი ღერძის ხაზზე 2π წერტილზე გვექნება $2-2=0$ მნიშვნელობა, ასევე გაგრძელდება $4\pi, 6\pi, \dots$ და ა.შ. წერტილებისათვის, ანუ მიღებული ფუნქცია ნიშანს არ იცვლის ნახ.26ა. აღნიშნულ მონაკვეთებზე, $\sin(\alpha)$ ფუნქციის ინტეგრირების შედეგად, ნიშანცვლადი ფუნქციის მისაღებად $-\infty < \alpha < \infty$ ზღვრებში საჭიროა ფუნქციის არგუმენტის $\pi/2$ ფაზური ძვრა, ანუ $\sin(\alpha \pm \pi/2) = \pm \cos(\alpha)$ ფუნქცია, რომლის ინტეგრირების შედეგადაც მიიღება ნიშან ცვლადი ფუნქცია (ნახ.26ბ), რომელიც რეალურად ქმნის ელექტრომაგნიტის წევის ნიშანცვლად ძალას.



ნახ.26ა. ფუნქცია $\sin(\alpha)$ ინტეგრირების ოსცილოგრამა



ნახ.26ბ. ფუნქცია $\sin(\alpha - \pi/2)$ ინტეგრირების ოსცილოგრამა

ამრიგად ფაზის საწყისი პირობა დიდ გავლენას ახდენს $\sin(\omega t)$ ფუნქციის ინტეგრირების გზით მიღებულ მაგნიტური ნაკადის ფორმირებაზე, მაშინ როდესაც $\cos(\omega t)$ ფუნქციის ინტეგრირებით მიღებული მაგნიტური ნაკადის რხევითი პროცესი, საწყისი პირობის ცვლილებით, მხოლოდ და მხოლოდ შესაბამისი ფაზის სიდიდით

გადაიწევა საწყისი მდგომარეობიდან. წარმოდგენილი მოვლენა კიდევ ერთი მაგალითია პროგრამირების დროს მოულოდნელად წარმოქმნილი წყალქვეშა დინებებისა.

აქვე აღსანიშნავია ის ფაქტიც, რომ (46) განტოლების ანალიტიკურ ამონახსნს (53)-ში დომენირებს $\cos(\omega t)$ ფუნქცია, რისი დასტურიც არის ანალიტიკური ამონახსნის (56)-ე განტოლება.

ცხადია ფუნქცია $\sin(\omega t)$ -ეს ინტეგრირებით მიღებული $-\cos(\omega t)/\omega$ ფუნქციის სიხშირე გაზრდილი იქნება ω -ჯერ და მაგნიტის წევის ძალა შემცირებული ω -ჯერ ნახ.26 -ზე წარმოდგენილი გრაფიკებთან შედარებით, რომლებიც მიღებულნი არიან $\sin(\alpha)$ -ს მიხედვით.

8. გამარტივებული (ერთ განტოლებაზე დაყვანილი) ელექტრომაგნიტური მოდელი და შესაბამისი მათემატიკური ექსპერიენტები

ანალიტიკური თვალსაზრისით, თუ რა გავლენა აქვს საჰაერო ღრეჩოს δ -ას ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის რხევით პროცესზე, თუ მხედველობაში არ მივიღებთ Φ ამპლიტუდურ მნიშვნელობებს, გავშალოთ (53) განტოლების მეორე წევრი ხარისხობრივ მწკრივად t ან δ -ს მიხედვით. t -მიხედვით ვღებულობთ

$$\Phi = \frac{c_e \omega}{r_0} \cos \omega t + \frac{c_e \delta_b \omega t}{r_0} \cos \omega t + \frac{c_e \delta_b \omega^2 t^2}{2r_0} \cos \omega t - \dots \quad (65)$$

სადაც $r_0 = (\delta_b)^2 + \omega^2$

რადგან დროს ბიჯი t მათემატიკური მოდელირებისას ძალიან მცირე სიდიდედ აიღება, ამდენად (65) განტოლების პირველ წევრთან შედარებით დანარჩენი წევრების უგულველყოფა სრულიად შესაძლებელია და დიდი სიზუსტით შეიძლება ითქვას მაგნიტური ნაკადი გენერირებს შემდეგი გამოსახულების მიხედვით [17]

$$\Phi = \frac{c_e \omega}{r_0} \cos \omega t \quad (66)$$

ანალოგიური შედეგი მიიღება δ -ს მიხედვით გაშლის შედეგადაც.

რადგან (46) განტოლება შედგენილია წრფივი მაგნიტური ველისათვის [7], ამდენად გულანაში მაგნიტური წინააღმდეგობა წრფივი ხასიათისაა და შესაბამისად ფუნქციონალური დამოკიდებულება Φ , δ და x შორის წრფივ ხასიათს ატარებს. ამასთან ერთად თუ დაუშვებთ რომ საჰაერო ღრეჩო და x მცირეა, მაშინ შეიძლება რომ ჩვეულებრივი ჰარმონიული რხევის განტოლება გამოვიყენოთ

$$\ddot{x} + 2h\dot{x} + \omega_0^2 x = a \cdot \sin \omega t \quad (67)$$

ასეთ შემთხვევაში (67)-ეს ანალიტიკური ამონახსნი ტოლია

$$x = Ae^{\omega t} \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + A_{(\omega)} \sin(\omega t + \varphi) \quad (68)$$

$$\text{სადაც } A_{(\omega)} = \frac{a}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4h^2 \omega^2}}$$

(68)-ეს ანალიტიკური ამონახსნის პირველი წევრი, მსგავსად (53)-ეს პირველი წევრისა იწვევს მხოლოდ მცირეოდენ ასიმეტრიას და ქრება t-ეს ზრდასთან ერთად. (68)-ეს (46) ჩასმათ და მისი ანალიტიკურ ამონახსნს, მსგავსად (53)-ის ანალიტიკური ამონახსნისა, მწკრივის სახით გავშლით ვნახავთ რომ, მწკრივის პირველი წევრი ასევე აღმოჩნდება (66)-ის ტოლი [5], დანარჩენები კი მასთან დიდი სიმცირის გამო შეიძლება უგულველყოფილნი იქნან [17].

ამგვარად ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის მცირე მექანიკური რხევები 0.7÷0.8 მმ-ის ფარგლებში პრაქტიკულად უმნიშვნელო გავლენას ახდენენ მაგნიტური Φ ნაკადის სინუსოიდალური, უფრო მართებულად კოსინუსოიდალური ფორმიდან გადახრაზე.

ზემოდმოყვანილი ანალიზის, საფუძველზე სრულიად ლოგიკურად, ჩანს რომ მცირე ელექტრომაგნიტური წინააღმდეგობის და საჰაერო ღრეჩოს პირობებში სრულიად შესაძლებელი ხდება, რომ (46) განტოლებაში $\delta_b = b_e(\delta - x)$ წევრი ნულის ტოლად დაუშვათ, მაშინ (46) განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს

$$\ddot{\phi} = c_e \sin(\omega t) \quad (69)$$

(69)-ე განტოლების ინტეგრირებით ასევე მიიღება (66) განტოლება და აქედან გამომდინარე კიდევ ერთხელ დასტურდება, რომ ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების რხევის პროცესი მიმდინარეობს $\cos \omega t = \sin(\omega t - \pi/2)$ (ნახ.25ბ), ანუ მექანიკური სისტემის რხევის ამპლიტუდები ჩამორჩებიან ელექტრომაგნიტური ქსელის ძაბვის ამპლიტუდებს $\pi/2$ ფაზით.

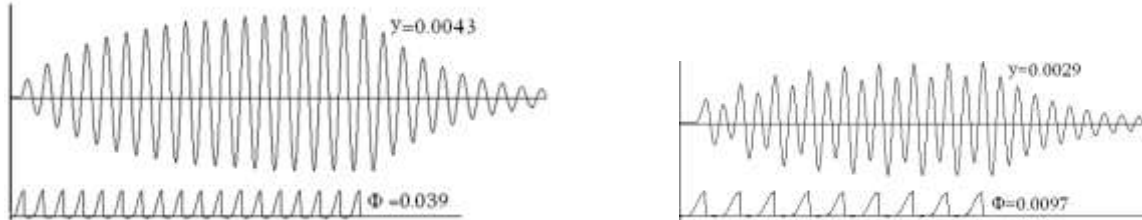
ამრიგად (66) კვადრატში აყვანით ვღებულობთ ელექტრომაგნიტური იძულებითი ძალის იმიტირებას (სიმულაციას), რომელის (45) განტოლებაში ჩასმით ვღებულობთ ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების რხევის აღმწერ გამარტივებულ ერთ განტოლებას, რომელიც წარმატებით შეიძლება გამოყენებული იქნას მათემატიკური მოდელირებისას [17].

$$\ddot{x} + 2hx + \omega_0^2 x = \frac{c_e \omega^2}{r_0^2} \cos^2 \omega t \quad (70)$$

აქვე უნდა აღინიშნოს რომ საჰაერო ღრეჩოს და ელექტრომაგნიტური გულანას მაგნიტური ნაკადის მიმართ გამოვლენილი როგორც წრფივი ისე არაწრფივი წინააღმდეგობები სრულიად უპრობლემოდ შესაძლებელია გათვალისწინებულნი იქნან (70) განტოლების მარჯვენა ნაწილში კოეფიციენტების, თუნდაც ფუნქციის სახით და აცილებულნი იქნან თავიდან ყველა ზემოთ ჩამოთვლილი სირთულეები.

ყოველ შემთხვევაში წინასწარი საპროექტო და საინჟინრო მათემატიკური მოდელირებითი კვლევა-ძიებითი სამუაოების განხორციელებისათვის.

ნახ. 27 ნაჩვენებია ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის რხევითი რეჟიმები, რომლებიც მიღებულნი არიან (70) დიფერენციალური განტოლების გამოყენებით და მიღებული შედეგები კარგად ემთხვევა (45), (46) განტოლებებით მიღებულ შედეგებს.



ნახ.27ა. 50ჰც-ის რეზონანსული რეჟიმი 50ჰც-ის ნახევარად გამართული იძულებითი ძალით ნახ.27ბ. სუპერჰარმონიული რეჟიმი 25ჰც-ის ნახევარად გამართული იძულებითი ძალით

ნახ.27ა-ზე ნაჩვენებია 50ჰც-ის ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის რხევის პროცესი ნახევარგამტარულად გამართული აგზნებით, ხოლო 27ბ-ზე კი ნახევარად გამართული 25 ჰც-ის აგზნებით, რის დროსაც ადგილი აქვს სუპერჰარმონიულ რეზონანსურ რეჟიმს (მექანუკური რხევების სიხშირის გაორმაგებას).

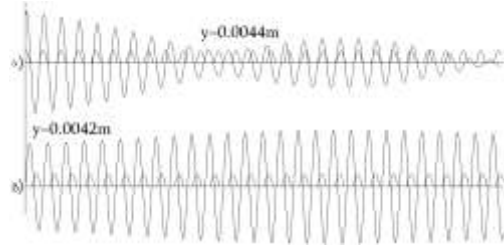
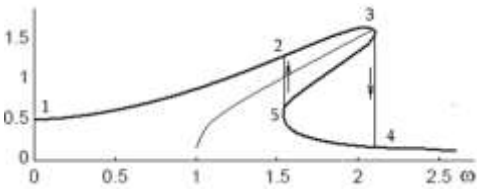
9. არაწრფივი მახასიათებლების მქონე რხევითი სისტემებისათვის დამახასიათებელი ამპლიტუდურ სიხშირული დიაგრამის აგების პრობლემები

ციფრული მოდელირების დროს, როდესაც იძულებითი ძალის სიხშირე იცვლება დისკრეტულად, როგორც გადიდების ისე შემცირების დროს, ძალიან ძნელია არაწრფივი სისტემების დამახასიათებელი ამპლიტუდურ-სიხშირული მახასიათებლის (ასმ)-ეს მიღება ნახ.28.

ნახ.28-ზე წარმოდგენილია სუფთა მათემატიკური ანალიზით მიღებული ასმ, რომელიც შეესაბამება არაწრფივ სსისტემას ხისტ მახასიათებლიანი დრეკადობით, რომელიც აღიწერება შემდეგი არაწრფივი დიფერენციალური განტოლების მეშვეობით [22,27]

$$\ddot{x} + 2h\dot{x} + \omega_0^2(x + \eta x^3) = a \cdot \sin(\omega t) \quad (71)$$

არაწრფივი სისტემების როგორც მათემატიკური ანალიზით ისე ექსპერიმენტული კვლევით (ნახ.28) მიიღება ორი მდგრადი უბანი 2-3 და 5-4. მონაკვეთი 3-5 მხოლოდ მათემატიკური ანალიზით მიიღება და წარმოადგენს წარმოსახვით უბანს. ექსპერიმენტული კვლევებით შუალედური უბანი არ ფიქსირდება.

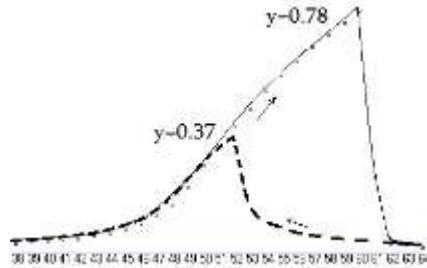
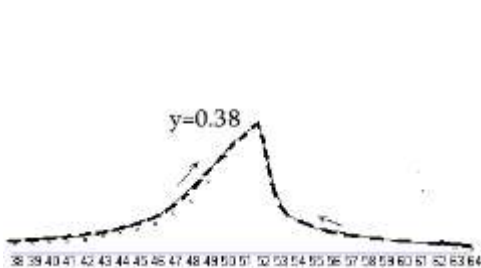


ნახ.28. არაწრფივი რეზონანსის ამპლიტუდურ სიხშირული მახასიათებელი (ასმ)

ნახ.29. 52ჰც-ის გარდამავალი რეჟიმი ა) კორექციის გარეშე; ბ) კორექციით

ციფრული მოდელირებით, როდესაც დემფირების კოეფიციენტი $\phi < 0.1$ -ზე მეტია [28,29], არაწრფივი სისტემების ასმ-ის მიღება განსაკუთრებით ძნელია. იძულებითი ძალის სიხშირის ნახტომისებური ცვლილება, რხევის პროცესში მყოფი სისტემისათვის. იწვევს იძულებითი ძალის და ვიბრატორის რხევის ამპლიტუდებს შორის არსებულ ფაზის დარღვევას, რის გამოც სანამ დამყარდება ახალი რეალური ფაზა, რხევითი პროცესი გადადის არასტაბილურ მდგომარეობაში ნახ.29ა. დამოკიდებულებით იმაზე, იძულებითი ძალის ამპლიტუდები ასწრებენ, თუ ჩამორჩებიან მექანიკური სისტემის (ვიბრატორის) რხევის ამპლიტუდებს, სიხშირის დისკრეტულად შეცვლის მომენტიდან მექანიკური სისტემის ამპლიტუდები იწყებენ შემცირებას ან გაზრდას და შემდგომ სწრაფ დაცემას და საბოლოო ჯამში მყარდება არაწრფივი სისტემისათვის დამახასიათებელი მხოლოდ მინიმალური ამპლიტუდების უბანი.

ნახ.30 ნაჩვენებია ასმ, რომელიც მიღებულია დრეკად ხისტ მახასიათებლიანი (71)-ე დიფერენციალური განტოლების ბაზაზე აწყობილი მათემატიკური მოდელირებით, სადაც დრეკად ელემენტად გამოყენებულია კონუსური ზამბარა, რომლის ანალიზური ამონახსნი იდენტურია ნახ. (28)-ზე ნაჩვენები გრაფიკის.



ნახ.30ა ხისტ მახასიათებლიანი სისტემის ასმ კორექციის გარეშე $\phi=0.07, F=1555$

ნახ.30ბ. ხისტ მახასიათებლიანი სისტემის ასმ კორექციით $\phi=0.07, F=1555$

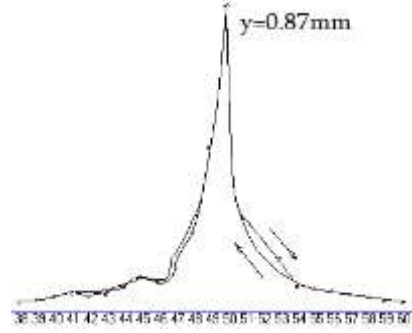
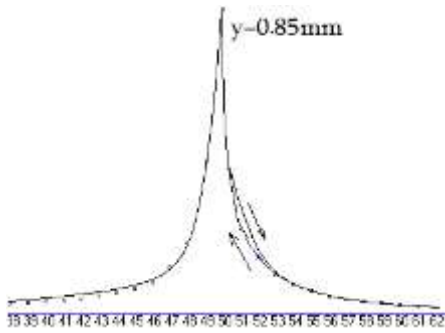
ნახ.30ა-ზე ნაჩვენებია ასმ მიღებულია (71) განტოლების ბაზაზე შედგენილი მათემატიკური ექსპერიმენტის მეშვეობით, რომლის დროსაც სიხშირის გადართვა ხდება კორექციის გარეშე 1 ჰც-ის ბიჯით. მთლიანი ხაზი შეესაბამება სიხშირის გადართვას 38ჰც-დან 60ჰც-მდე (წინსვლა), ხოლო წყვეტილი სქელი ხაზი სიხშირის შემცირებას 60ჰც-დან 38ჰც-მდე (უკუსვლა). როგორც წინსვლის ისე უკუსვლის

გრაფიკი იდენტურია და არაწრფივი სისტემებისათვის დამახასიათებელი რეზონანსული გრაფიკული მახასიათებელი ძალიან სუსტადაა გამოკვეთილი (რეზონანსული მრუდის მარჯვენა ნაწილი უფრო მეტადაა დახრილი). ნახ.30ბ-ზე სიხშირის გადართვისას გამოყენებულია კორექცია ბიჯური დროს მეშვეობით. აღნიშნული კორექციის შედეგად ასმ-მა მიიღო არაწრფივი სისტემებისათვის დამახასიათებელი ფორმა, იგივე 13ც სიხშირული ბიჯით გადართვის და სხვა იგივე პარამეტრების მიხედვით, რაც იყო ნახ.30ა-ს შემთხვევაში.

სიხშირული გადართვის კორექციის ფიზიკური არსი მდგომარეობს შემდეგში. იძულებითი ძალის და მექანიკური ძალის ამპლიტუდებს შორის რხევის პროცესში დამყარებული გარკვეული ფაზური ძვრის ცვლილება, რომ არ მოხდეს მყისიერად, აგზნების ძალის სიხსირის დისკრეტული ცვლილება კომპესირდება მიმდინარე τ ბიჯური დროს გარკვეული ცვლილებით შემდეგი გარდაქმნების თანახმად. აგზნების ძალის მიმდინარე ფაზა (არგუმენტი) $\varphi = \omega_1 \tau$ იცვლება ახალი $\varphi_0 = \omega_1 \tau_1$ ფაზით (არგუმენტით), სადაც $\tau_1 = \varphi_0 / \omega_1$. ამგვარი ცვლილების შემდეგ სისტემა აგრძელებს რხევას ფაზური ძვრის გარეშე ახალ ω_2 სიხსირით, რიც გამოც ახალ სიხშირეზე გადასული ამპლიტუდების გარდამავალი დინამიკა გაცილებით სტაბილურია ნახ.29 ბ), ვდრე კორექციის გარეშე ნახ.29 ა).

10. წრფივი, რბილი და ხისტ მახასიათებლებიანი სისტემების მათემატიკურ მოდელები და მათზე ჩატარებული მათემატიკური (ციფრული) ექსპერიმენტები

ნახ.31-ზე ნაჩვენებია წრფივ დრეკად სისტემის (ჩაჭრილ ღარებიანი ცილინდრული ზამბარა) ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის ასმ, რომელიც მიღებულია (67)-ე განტოლებების ბაზაზე შედგენილი მათემატიკური მოდელებით. დანარჩენი პარამეტრები იგივეა რაც ნახ. 30-ის ასმ-ის აგებისას იყო. ორივე შემთხვევაში მიღებული ასმ დამახასიათებელია წრფივი სისტემისათვის; შედარებით ვიწრო რეზონანსული სიხშირული ველით; რეზონანსული მრუდეები, მცირე დემფირების კოეფიციენტის გამო, მკვეთრად ციცაბოა და წინა შემთხვევასთან შედარებით გაზრდილი რეზონანსული ამპლიტუდებით.

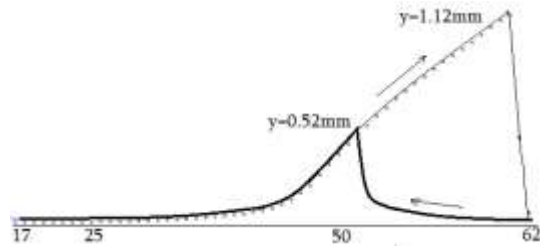
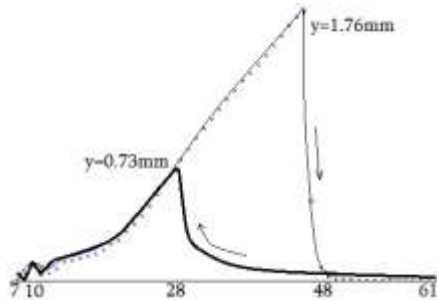


ნახ.31ა. წრფივ მახასიათებლიანი სისტემის ასმ, რომელიც მიღებულია კორექციით $\phi=0.07$, $F=2555$

ნახ.31ბ წრფივ მახასიათებლიანი სისტემის ასმ, რომელიც მიღებულია კორექციის გარეშე

როგორც მოსალოდნელი იყო, წრფივ სისტემების შემთხვევაში კორექციას რაიმე გადამწყვეტი მნიშვნელობა არა აქვს, თუ არ ჩავთვლით, რომ კორექციის შედეგად გაცილებით ნაკლები ციკლები (დროა) საჭირო გარდამავალი პროცესის სტაბილიზაციისათვის, რისი მაგალითიც არის ნახ31ა-ზე ნაჩვენები შედარებით გლუვი ასმ.

ნახ. 32-ზე, $7\div 61$ ჰც-ის სიხშირულ დიაპაზონზე წარმოდგენილია ა) 25 და ბ)50 ჰც-ის საკუთარი სიხსირის მქონე ჰარმონიული აგზნების ვიბრატორების ასმ.



ნახ.32ა 25 ჰც-ის ხისტ მახასიათებლიანი ვიბრატორის ასმ $\phi=0.07$, $F=1555$

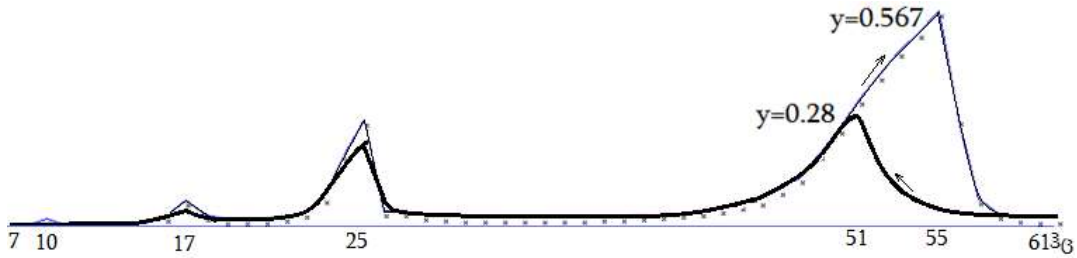
ნახ.32ბ. 50 ჰც-ის ხისტ მახასიათებლიანი ვიბრატორის ასმ $\phi=0.07$, $F=1555$

ზემოდ მოყვანილი გრაფიკებს მიხედვით ნათლად ჩანს რომ ჰარმონიული აგზნების ვიბრატორებს მოცემულ $7\div 70$ ჰც-ის დიაპაზონზე ახასიათებთ მხოლოდ ერთი რეზონანსული სიხშირე რომელიც ტოლია ვიბრატორის საკუთარი სიხსირის. ნახ.32ა 25/25. ნახ.32ბ 50/50.

ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის შემთხვევაში (70), როდესაც მარჯვენა ნაწილში არაწრფივი იძულებითი ძალა ფინქციონირებს, მაშინ დიფერენციალური განტოლება (71) დებულობს შემდეგ სახეს

$$\ddot{x} + 2h\dot{x} + \omega_0^2(x + \eta x^3) = a \frac{b^2 \omega^2}{w_0^2} \cos^2 \omega t \quad (72)$$

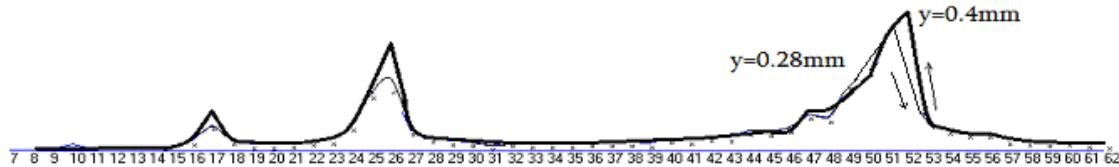
ნახ. 33-ზე ნაჩვენებია ხისტ მახასიათებლიანი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის ასმ, რომლის მისაღებად სიხშირის გადართვისას გამოყენებული იყო კორექციის ეფექტი. ვიბრატორი იკვებება დიოდის მეშვეობით ნახევრადგამართული აგზნების ძალით.



ნახ.33. 50 ჰც-ის საკუთარი სიხშირის ხისტ მახასიათებლიანი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის ასმ $\phi=0.07$, $F=2555$

ნახ. 33-დან ჩანს, რომ 50/50 ძირითად არაწრფივ რეზონანსთან ერთად დამატებით იკვეთება 10, 17 და 25 ჰც-ის ჯერადი რეზონანსული ჰარმონიკები, რომელთაც წრფივი ფორმა გააჩნიათ.

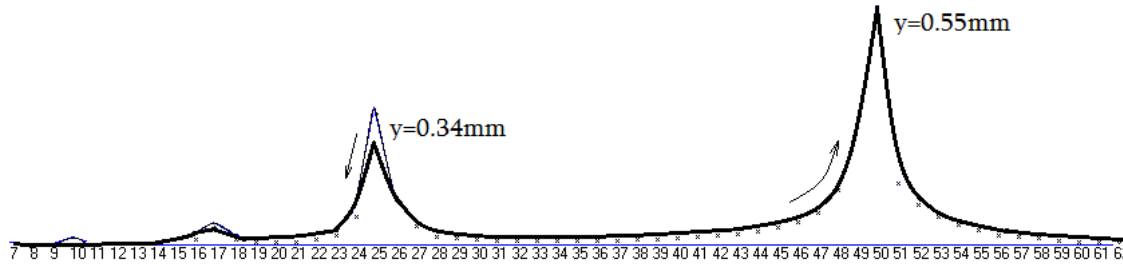
ნახ 34-ზე წარმოდგენილი ასმ მიღებულია კორექციის გარეშე, რომელშიც ძირითად 50/50 რეზონანსთან ერთად, რომელსაც ორი მდგრადი უბანი არ უფიქსირდება, ასევე აშკარად ჩანს 10, 17 და 25 ჰც-ის ჯერადი ჰარმონიკები



ნახ.34. 50 ჰც-ის საკუთარი სიხშირის ხისტ მახასიათებლიანი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის ასმ, რომელიც მიღებულია კორექციის გარეშე $\phi=0.07$, $F=2555$

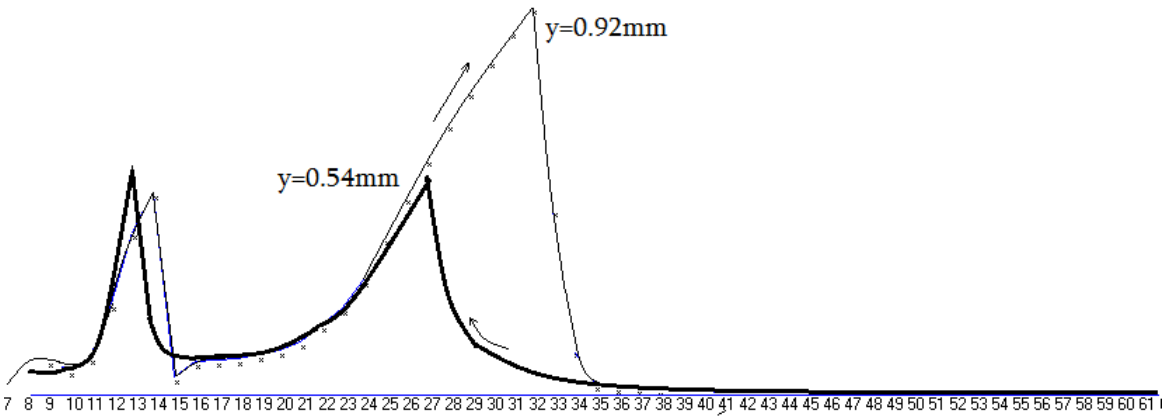
ხოლო ნახ.35. წარმოდგენილია წრფივი დრეკადობის მქონე ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის ასმ (70)-ე განტოლების ბაზაზე შექმნილი მათემატიკური მოდელირების მიხედვით, რომელიც ასევე მიღებულია ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის ნახევრად გამართული აგზნების ძალით კვებისას. ნახ.35-ზე ნაჩვენებია კორექციის და კორექციის გარეშე მიღებული ასმ-ის შედარება ჰარმონიული ვიბრატორის ასმ-თან (ნახ.30. 31, 32) აშკარად აჩვენებს, რომ 10, 17 და 25 ჰც-ის ჰარმონიკებს იწვევს მხოლოდ და მხოლოდ აგზნების ძალის არაწრფიობა, რომელიც გამომდინარეობს ერთის მხრივ მაგნიტური ნაკადის კვადრატული სახით ფორმირების შედეგად და მეორეს მხრივ მაგნიტოგამტარების (მაგნიტური ჰისტერეზისის) წინააღმდეგობის არაწრფიობის შედეგად.

მათემატიკური ექსპერიმენტით მიღებული შედეგები სრულად ემთხვევა რეალურ ელექტრომაგნიტურ ვიბრატორებზე ჩატარებულ ექსპერიმენტებს.



ნახ.35. 50 ჰც-ის საკუთარი სიხშირის წრფივ მახასიათებლიანი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის ასმ $\phi=0.07$, $F=2555$

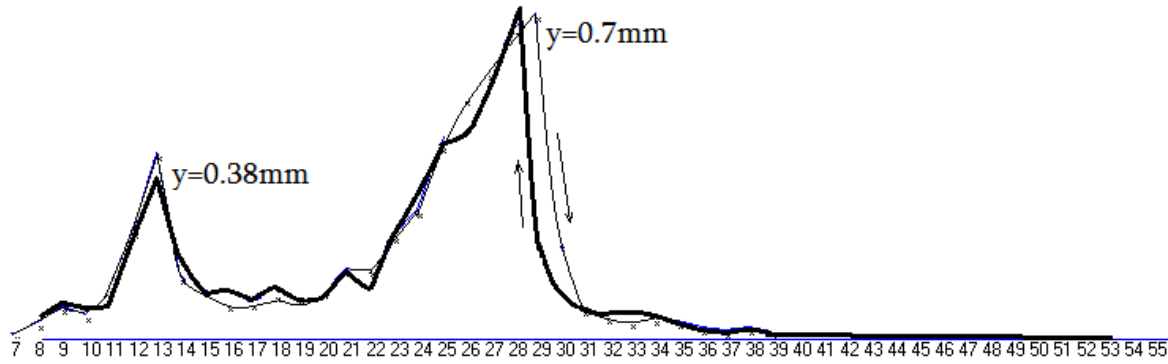
ნახ.36-ზე ნაჩვენებია ხისტი მახასიათებლიანი 25 ჰც-ის საკუთარი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის ასევე 7÷61 ჰც-ის ზღვრებში ნახევარგამარტული იძულებითი ძალით კვების შედეგად მიღებული ასმ, რომელიც მიღებულია კორექციის გამოყენებით და (72) განტოლების მიხედვით შედგენილ მათემატიკური მოდელირების მეშვეობით.



ნახ.36. 25 ჰც-ის საკუთარი სიხშირის ხისტი მახასიათებლიანი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის ასმ $\phi=0.07$, $F=2555$

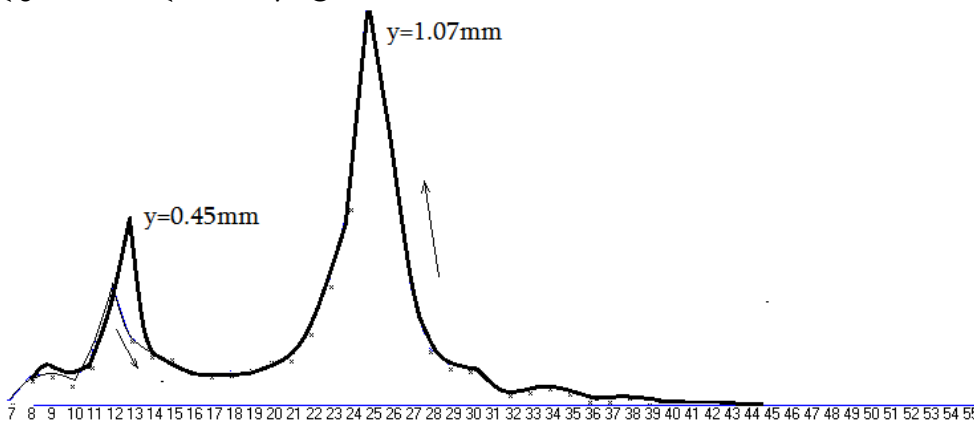
ამ შემთხვევაშიც 25 ჰც-ის ძირითად არაწრფივ რეზონანსთან ერთად მკვეთრად იკვეთება 12.5 ჰც-ის ჰარმონიკა, რომელიც პრაქტიკულად შთანთქავს 17 და 10 ჰარმონიკებს, რომლებიც სუსტად, მაგრამ მაინც იკვეთებოდნენ ნახ.33÷35-ის მიხედვით წარმოდგენილ ოსცილოგრამებზე, სადაც ვიბრატორის საკუთარი სიხშირე 50 ჰც იყო

ნახ.37 ნაჩვენებია ასმ მიღებულია კორექციის გარეშე და განსხვავებით ნახ.36-გან 12.5 ჰარმონიკასთან ერთად კვლავ ჩანს 10 და 17.5 ჰარმონიკები. რაც შეეხება ძირითად 25/25 რეზონანსს, მას ამ შემთხვევაში არ გააჩნია არაწრფივი რეზონანსისათვის დამახასიათებელი ფორმა.



ნახ.37. 25 ჰც-ის საკუთარი სიხშირის ხისტ მახასიათებლიანი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის ასმ, რომელიც მიღებულია კორექციის გარეშე $\phi=0.07$, $F=2555$

ნახ.38-ზე ნაჩვენებია 25 ჰც-ის საკუთარი სიხშირის წრივი დრეკადობის მქონე ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის ასმ, რომელიც მიღებულია (70) განტოლების მიხედვით. 12.5 ჰც-ის ჰარმონიკის არსებობა ასევე მსგავსად ნახ.35-ისა შედეგია იძულებითი ძალის არაწრფიობის.



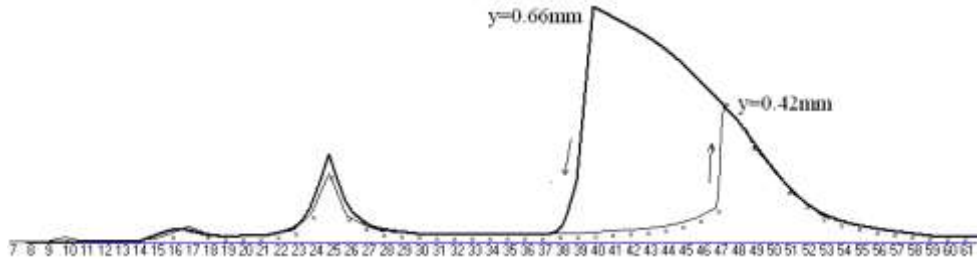
ნახ.38. 25 ჰც-ის საკუთარი სიხშირის წრფივ მახასიათებლიანი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის ასმ, $\phi=0.07$, $F=2555$

რბილ მახასიათებლიანი დრეკადი სისტემების შემთხვევაში (რესორული და ტორსიონული სისტემები) (72)-ე დიფერენციალური განტოლება ღებულობს შემდეგ სახეს

$$\ddot{x} + 2h\dot{x} + \omega_0^2(x - \eta x^3) = \frac{c_0^2 \omega^2}{r_0^2} \cos^2 \omega t \quad (73)$$

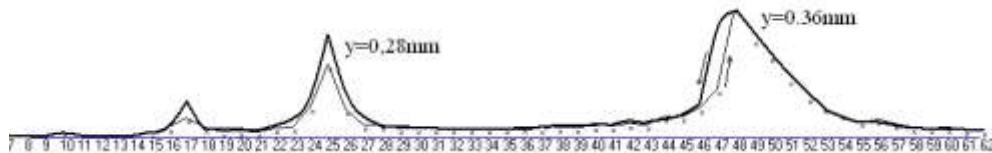
ნახ.39-ზე ნაჩვენებია 50ჰც-ის საკუთარი სიხშირის რბილმახასიათებლიანი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის ასმ, რომელიც მიღებულია ნახევარგამართული ელექტრული ძალის კვების შედეგად. ძირითად 50/50 რეზონანსთან ერთად ასევე ჩანს 10, 17 და 25 ჰც-ის ჯერადი ჰარმონიკები. ასმ აგებულია კორექტირების გამოყენებით. დაბალ სიხშირეებზე ინდუქტივობის დაცემის გამო ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის

სიმძლავრე იზრდება, შესაბამისად ნახ.33-თან შედარებით არაწრფიობის დამახასიათებელი მდგრადი რეზონანსული უბანი გაჭიმულია და ამპლიტუდა ნახტომის წინ შედარებით დიდია.



ნახ.39. 50 ჰც-ის საკუთარი სიხშირის რბილ მახასიათებლიანი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის ასმ $\phi=0.07$, $F=2555$.

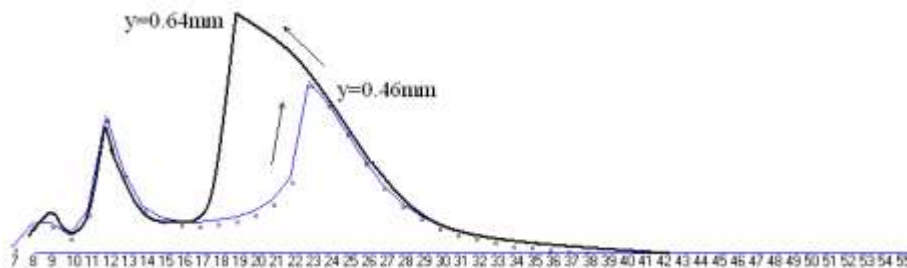
ნახ 40-ზე წარმოდგენილია 50 ჰც-ის საკუთარი სიხშირის რბილი დრეკადობის მქონე ვიბრატორის ასმ, რომელიც მიღებულია კორექციის გარეშე. ძირითად 50/50 რეზონანსთან ერთად ასევე ჩანს 10, 17 და 25 ჰც-ის ჯერადი ჰარმონიკები



ნახ.40. 50 ჰც-ის საკუთარი სიხშირის რბილ მახასიათებლიანი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის ასმ, რომელიც მიღებულია კორექტირების გარეშე $\phi=0.05$, $F=2555$.

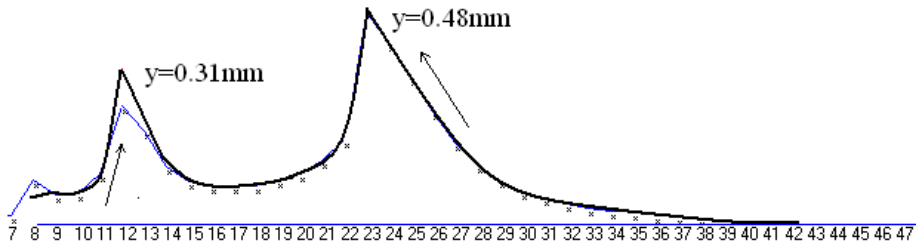
(73)-ე განტოლების ბაზაზე წრფივ მახასიათებლიანი დრეკადობის, ანუ (70)-ე განტოლების მიხედვით აგებულ ასმ-ის შემთხვევაში 50/50 რეზონანსის დროს მიიღება ნახ.35 წარმოდგენილი მსგავსი (ანალოგიური) ასმ.

ნახ.40-ზე ნაჩვენებია (73)-ე განტოლების მიხედვით 25ჰც-ის საკუთარი სიხშირის ვიბრატორის კორექტირების გზით მიღებული რეზონანსური ასმ. დემფირების კოეფიციენტები გაზდილია $\phi=0.19$ - მდე, რადგან დაბალ სიხშირეებზე ვიბრატორის სიმძლავრე იზრდება ვიდრე ამას აქვს ადგილი მაღალ სიხშირეებზე. ძირითად 25/25 რეზონანსთან ერთად კარგად ჩანს 12.5, და 8 ჰც-ის ჯერადი ჰარმონიკები



ნახ.40. 25 ჰც-ის საკუთარი სიხშირის რბილ მახასიათებლიანი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის ასმ $\phi=0.19$, $F=2555$.

ნახ 41-ზე წარმოდგენილი ასმ მიღებულია კორექციის გარეშე, რომელზეც ძირითად 25/25 რეზონანსთან ერთად ასევე ჩანს 8 და 12.5ჰც-ის ჯერადი ჰარმონიკები



ნახ.41. 25 ჰც-ის საკუთარი სიხშირის რბილ მახასიათებლიანი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის ასმ, რომელიც მიღებულია კორექტირების გარეშე $\phi=0.19$, $F=2555$

(73)-ე განტოლების ბაზაზე წრფივ მახასიათიანებელი, ანუ (70)-ე განტოლების მიხედვით აგებულ ასმ-ის შემთხვევაში 25/25 რეზონანსის დროს მიიღება ნახ.38-ზე წარმოდგენილი მსგავსი (ანალოგიური) ასმ.

ნახ.33 41-ის ანალიზით ჩანს, რომ დიოდით ნახევრად გამართული დენის წყაროთი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორში ჰარმონიკები ფიქსირდება მხოლოდ ძირითადი რეზონანსის ქვემოთა სიხშირეებზე, როგორც 50/50 ისე 25/25 რეზონანსული რეჟიმების დროს. აღნიშნული ასმ-ების შედარება ჰარმონიული აგზნების არაწრფივი დრეკადობის მქონე ჩვეულებრივი (არაელექტრომაგნიტური) ვიბრატორების ასმ-თან ნახ.31 32 ნათლად აჩვენებს, რომ ზემოდ მოყვანილი ჰარმონიკები მხოლოდ და მხოლოდ ელექტრომაგნიტური აგზნების ძალის შედეგია [6].

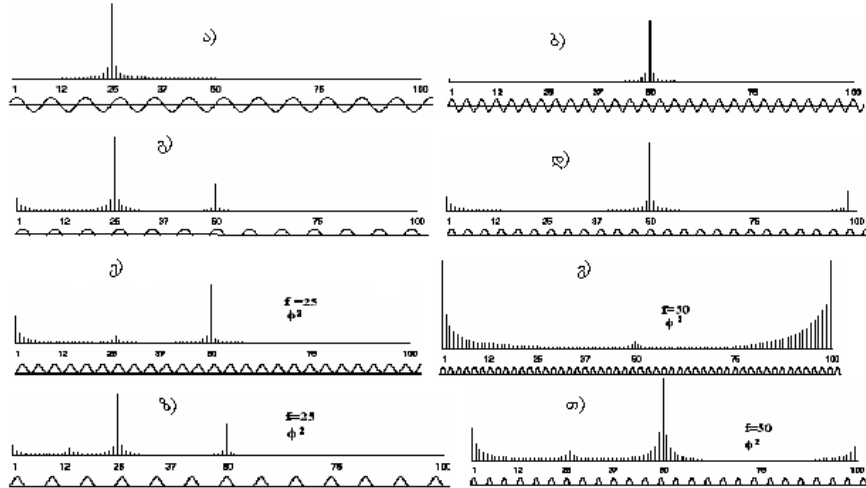
11. სუბჰარმონიული რეზონანსი

აგზნების ძლის არაწრფიობის შედეგად, რომელიც გამოწვეულია ელექტრომაგნიტის გამტარების და საჰაერო ღრეჩოს არაწრფივი წინააღმდეგობით მაგნიტური ძალბაზებისდმი, ელექტრომაგნიტურ ვიბრატორებში ადგილი აქვს ძირითად რეზონანსების გარდა ამგზნები ძალის სიხშირის ჯერადი ჰარმონიკების წარმოქმნას [30].

ნახ.42 ნაჩვენებია სუფთა ჰარმონიული და ნახევრად მოჭრილი იძულებითი ელექტრომაგნიტური სინუსოიდალური ძალის და მათი კვადრატების სპექტრები, რომლებიც მიღებულნი არიან ჩვენს მიერ შექმნილი კამერტონული ფილტრების ბაზაზე შექმნილი სპექტრული ანალიზატორით. პრაქტიკულად ანალოგიურ შედეგს იძლევა ფურიეს მწკრივების მიხედვით შექმნილი სპექტრული ანალიზატორი [31].

ნახ.42-ზე ე), ვ) ზ) და თ) სპეკტოგრამებზე ნულოვანი. ანუ მუდმივი მდგენელი იწვევს ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის ასიმეტრიულ რხევით პროცესს. ამავე ოსცილოგრამებზე სუსტად, მაგრამ მაინც იკვეთება დაბალი სიხშირის ჯერადი სპექტრები, რომლებმაც შესაძლოა გამოიწვიონ სუბგარმონიული

რხევები. ნახევრად გამართულ იძულებითი ძალის როგორც ჰარმონიულ ისე ელექტრომაგნიტურ სპექტრულ ოსცილოგრამებზე გ), დ) ზ) თ) ასევე იკვეთება მაღალი სიხშირის ჯერადი სუპერჰარმონიკები. ნახ. 27.ბ-ზე ნაჩვენებია ამგვარი რეზონანსული რეჟიმი.

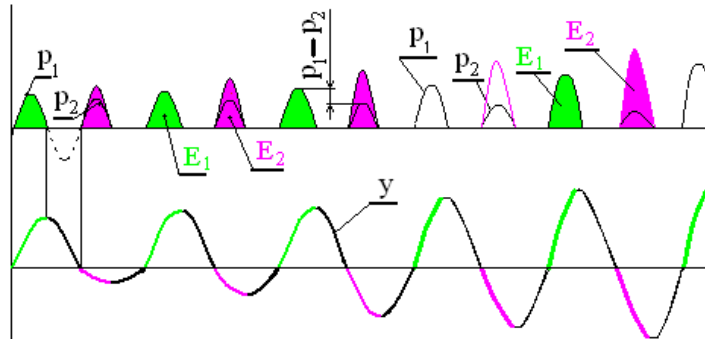


ნახ. 42. ვიბრატორზე მოქმედი ჰარმონიული ა), ბ), გ), დ) და ელექტრომაგნიტური ე), ვ), ზ) თ) იძულებითი ძალების სპექტრული ოსცილოგრამები

ამგვარად 25/25 და 50/50 რეზონანსების 1/2-ის 2.5ჰც-ის 25ჰც-ის ჯერადი ჰარმონიკები ბევრად ჩამოუარდებიან ძირითად რეზონანსებს, როგორც ენერგეტიკული ისე სიხშირული ველის შემცველობით. ასევე იხილეთ ნახ.33 41. ამგვარად მათი უშუალო გამოყენება სხვადასხვა ტექნოლოგიური ოპერაციების შესასრულე ბლად გაუმართლებელი და პრაქტიკულად შეუძლებელია. თუმცა აღნიშნული ჰარმონიკები მეცნიერული და უსაფრთხოების თვალსაზრისით მეტად საყურადღებოა.

ერთაქტიან ვიბრატორებში იძულებითი ძალის მიერ რხევის ნახევარ პერიოდში შეტანილი ენერგია აბალანსებს დისიპაციური ძალების მიერ რხევის სრულ პერიოდზე შთანთქმულ ენერგიას. სუბჰარმონიული 50/25 (იძულებითი ძალის ორ რხევაზე მოდის ერთი მექანიკური რხევა) რეზონანსის დროს კი იძულებითი პ1 ძალის მიერ რხევის 1/4 პერიოდზე შეტანილი ენერგია E_1 უნდა აბალანსებდეს, არა მარტო დისიპაციური ძალების მიერ რხევის სრულ პერიოდზე შთანთქმულ $E_{დის}$ ენერგიას არამედ იძულებითი p2 ძალის რხევის მეორე პერიოდის დროს შეტანილ E_2 ენერგიასაც, რომელიც მიმართულია მექანიკური სისტემის მოძრაობის საწინააღმდეგოდ და იგი ცდილობს გააორმაგოს მექანიკური რხევის სიხშირე და სისტემა გადაიყვანოს იძულებით რხევის სიხშირეზე (ნახ.43). p2 ძალა ფორმირდება უფრო დიდ საჰაერო δ ღრეჩოს დროს ვიდრე p1, რის გამოც მის

ფორმირებაზე იხარჯება მეტი ენერგია, შესაბამისად ადგილი აქვს მეტ დანაკარგებსაც და აქედან გამომდინარე მისი ამპლიტუდური სიდიდეც ნაკლები იქნება p_1 -ზე. ამრიგად ყოველ ციკლზე p_1 მცირედ მაგრამ მაინც მეტია p_2 -ზე ($p_1 > p_2$).



ნახ.43 სუბჰარმონიული ამპლიტუდების ფორმირების პროცესი.

იმისათვის რომ აღმოცენდეს (შესრულდეს) სუბჰარმონიული რხევები აუცილებლად უნდა შესრულდეს ოთხი პირობა;

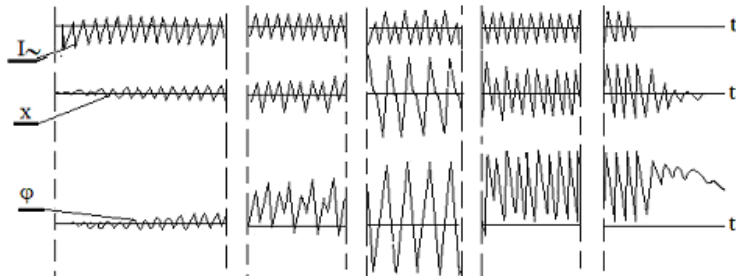
1. სისტემაში მოქმედი დისიპაციური ძალები პდის უნდა იყოს, რაც შეიძლება მცირე.
2. ელექტრომაგნიტის მაგნიტოგამტარული წინააღმდეგობა უნდა იყოს არაწრფივი
3. იძულებითი აგზნებითი ძალით მიწოდებული ენერგია გაცილებით უნდა აღემატებოდეს ჩვეულებრივი 25/25 რეზონანსის დროს მიწოდებულ ენერგიას, რომ შესრულდეს პირობა $\beta_1 - \beta_2 > \beta_{დის}$.
4. აგზნები ძალის სიხშირე ზუსტად ორჯერ უნდა აღემატებოდეს მექანიკური რხევის სიხშირეს.

ელექტრომაგნიტში დენის სიდიდეს ძირითადად ინდუქტიობა განსაზღვრავს. ამგვარად საჰაერო ღრეჩოს ცვლილება იწვევს ინდუქტიობის ცვლილებას [19], რაც დენის ძალის ცვლილებას განაპირობებს და მყარდება ისეთი ძალთა ბალანსი, რომლის დროსაც ცვლად დენზე მომუშავე მაგნიტის მიზიდულობის ძალა შეიძლება ითქვას უცვლელი რჩება იმ შემთხვევაში, თუ მაგნიტური წინააღმდეგობა ძალიან მცირე და საჰაერო ღრეჩო δ ნაკლები იქნება ერთ მმ-ზე ($\delta < 1$). მუდმივი დენის ელექტრომაგნიტებში დენის სიდიდე მხოლოდ აქტიურ წინააღმდეგობაზეა დამოკიდებული და შეაბამისად მიზიდვის ძალა კვადრატულად არწრფივი და უკუპროპორციულია საჰაერო ღრეჩო δ სიდიდის მიმართ.

ამრიგად წრფივ და მცირე არაწრფივ დრეკადობის სისტემებში, მცირე დემფირების და დიდი სიმძლავრის არაწრფივი იძულებითი ძალის სიხშირის ჯერადი დამთხვევის პირობებში (ვიწრო სიხშირულ ველზე) სუბჰარმონიული

ჰარმონიკა იძენს ავტორხევის (ფლატერის) თვითჩათრევის (self-tighten, attractional, самозатягивающий) თვისებას, რაც განაპირობებს სუბჰარმონიული რეზონანსის გენერირებას [32].

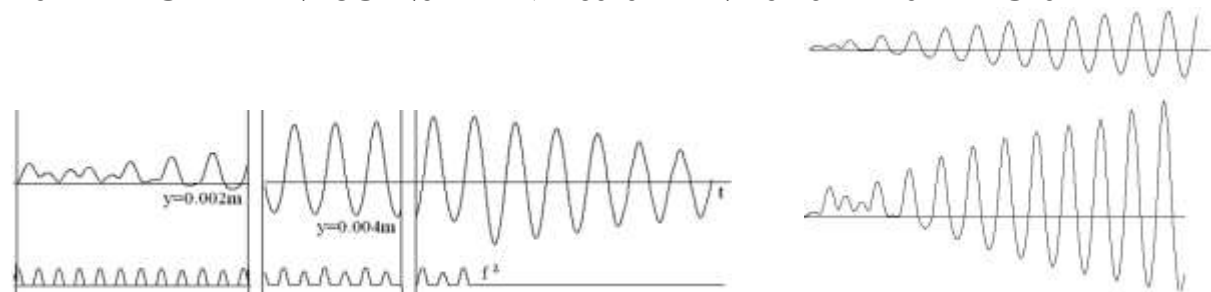
ნახ. 44-ზე ნაჩვენებია ექსპერიმენტულად მიღებული სუბჰარმონიული რეჟიმი რეალურ ტორსიონულ ვიბრომანქანაზე



ნახ.44. ექსპერიმენტული სუბჰარმონიული რეჟიმი. ცვლადი დენი. რხევის ამპლიტუდა, გრძობის კუთხე.

I და II სვეტზე ნაჩვენებია სუბჰარმონიული ამპლიტუდების ჩამოყალიბების პროცესი, რომელიც 40 60 ციკლს მოიცავს, III სვეტზე - დარტყმამდელი რეჟიმი, რომელიც სწრაფად მთავრდება, IV სვეტი - ვიბროდარტყმითი რეჟიმი, V სეტი - რეზონანსიდან გამოსვლის რეჟიმი [33].

ნახ.45ა-ზე ნაჩვენებია სუბჰარმონიული რეჟიმი. რომელიც მიღებულია (46) განტოლების მოდიფიცირებით. აღსანიშნავია რომ მაგნიტის გულანას ელექტრო მაგნიტური გამტარების არაწრფივი წინააღმდეგობა (ელექტრომაგნიტური ჰისტე რეზისის მარყუჯი) ბევრად გაზრდილია რეალურთან შედარებით, რომ მკვეთრად მცირე ციკლებით დაფიქსირებულიყო სუბჰარმონიული რეზონანსური ამპლიტუ დების აღმოცენების და განვითარების ბუნება.



ნახ.45.ა სუბჰარმონიული რეჟიმი შესვლა-გამოსვლა	ნახ.45ბ სუბჰარმონიული რეჟიმები
---	--------------------------------

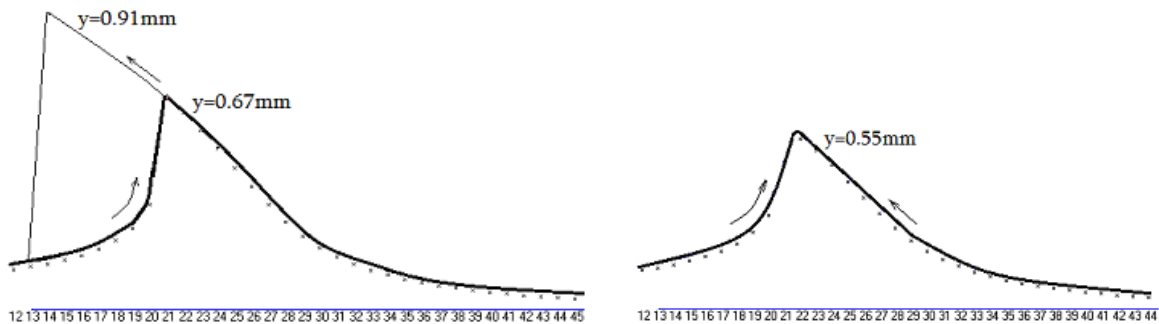
ნახ.45ბ-ზე ნაჩვენებია სუბჰარმონიულ რეჟიმში შესვლა სხვადასხვა დემფირების და იძულებითი ძალის სიდიდის დროს.

სუბჰარმონიული რეზონანსის დროს, რაც უფრო იზრდება რხევის ამპლიტუდა, მით უფრო დიდი ენერჯია ეწოდება ყოველ მომდევნო ციკლს, ანუ ამპლიტუდების ზრდა სულ უფრო მძლავრი და შეუზღუდავი ხდება. რა თქმა

უნდა, ამგვარი პროცესის უზრუნველსაყოფად სისტემას უნდა გააჩნდეს საკმარისი ენერგეტიკული რესურსიც, წინააღმდეგ შემთხვევაში გარკვეულ რხევის ამპლიტუდაზე ზრდის პროცესი შეწყდება. ამგვარად მიუხედავად იმისა რომ სუბგარმონიული რეზონანსი 50/25 ენერგეტიკულად ბევრად ჩამოუვარდება ძირითად რეზონანსს 50/50, მან შესაძლოა გამოიწვიოს კონსტრუქციის სრული ნგრევა. აღსანიშნავია რომ გარედან მცირეოდენი დემფირებადი ენერგიის შეტანა იწვევს სუბგარმონიული ამპლიტუდების გენერირების პროცესის სწრაფ შეწყვეტას.

12. დისიპატიური ძალების გავლენა ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების დინამიკაზე.

ზოგადად რხევად სისტემების დინამიკაზე დიდ გავლენას ახდენს დემფირების ძალები, რომლებიც წარმოიქმნებიან როგორც სისტემის შიგნით სხვსდასხვა მოხაზუნე ელემენტების მეშვეობით, ისე გარედან სხვსდასხვა გარემოს ზემოქმედების შედეგად, მათ შორის ტექნოლოგიური პროცესების შესრულების შედეგად. ნახ.46-ზე ნაჩვენებია რბილმახასიათებლიანი რხევადი სისტემის ასმ სხვსდასხვა დემფირების დროს



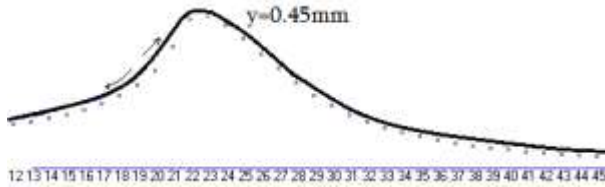
ნახ.46ა. 25 ჰც-ის საკუთარი სიხშირის რბილ მახასიათებლიანი სისტემის ასმ $\phi=0.28$ $F=2555$

ნახ.46 ბ 25 ჰც-ის საკუთარი სიხშირის რბილ მახასიათებლიანი ასმ, $\phi=0.33$, $F=2555$

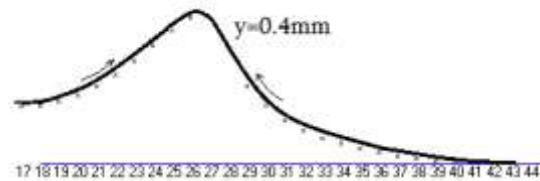
წარმოდგენილი გრაფიკებიდან თვალნათლივ ჩანს, რომ დემფირების კოეფიციენტი დიდ გავლენას ახდენს არა მარტო რხევის ამპლიტუდების სიდიდეზე, არამედ ასევე დიდ გავლენას ახდენს ვიბრატორის დინამიკაზე. ნახ.31ბ-ეს მიხედვით $\phi=0.39$, $F=2555$ დროს აღარ ფიქსირდება არაწრფივი რეზონანსებისათვის დამახასიათებელი ამპლიტუდური ნახტომები და შესაბამისი ორი მდგრადი უბანი.

ნახ.47-ზე ნაჩვენებია დიდი დემფირების პირობებში მიღებული 25/25 რბილი და ხისტი დრეკადი სისტემების რეზონანსული ასმ-ბი. ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის რეზონანსული ამპლიტუდები მიღებული იყო ნახევარგამტარული

ელექტრომაგნიტური აგზნების ძალით და ტექნოლოგიური დატვირთვის ექვივალენტური დემფირების პირობებში.

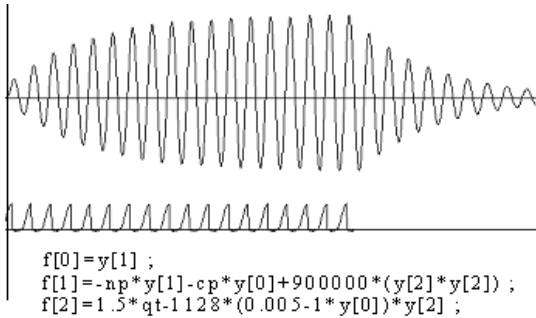


ნახ.47ა. 25/25ჰც-ის ასმ $\phi=0.39$ F=2555

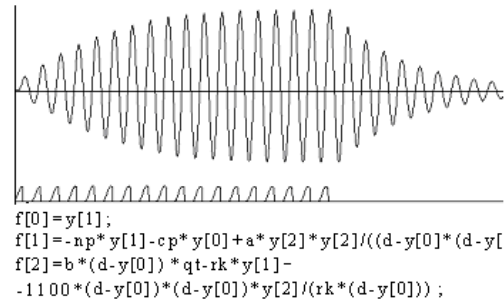


ნახ.47ბ 25/25 ჰც-ის ასმ, $\phi=0.30$, F=5555

ნახ.48-ზე წარმოდგენილია ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის 50/50 რეზონანსში შესვლის განვითარების და რეზონანსიდან გამოსვლის რეჟიმები. ნახ.48ა შეესაბამება (45) და (46) განტოლებების (მაგნიტური ძალხაზების ბალანსზე) შედგენილ და ნახ.48ბ - (26), (28) განტოლებების ელექტროდენის ბალანსზე შედგენილ მათემატიკურ მოდელირებით მიღებულ რეზონანსებს.



ნახ.48ა. რეზონანსი 50/50 $f=0.0093$, $y=0.0034m$



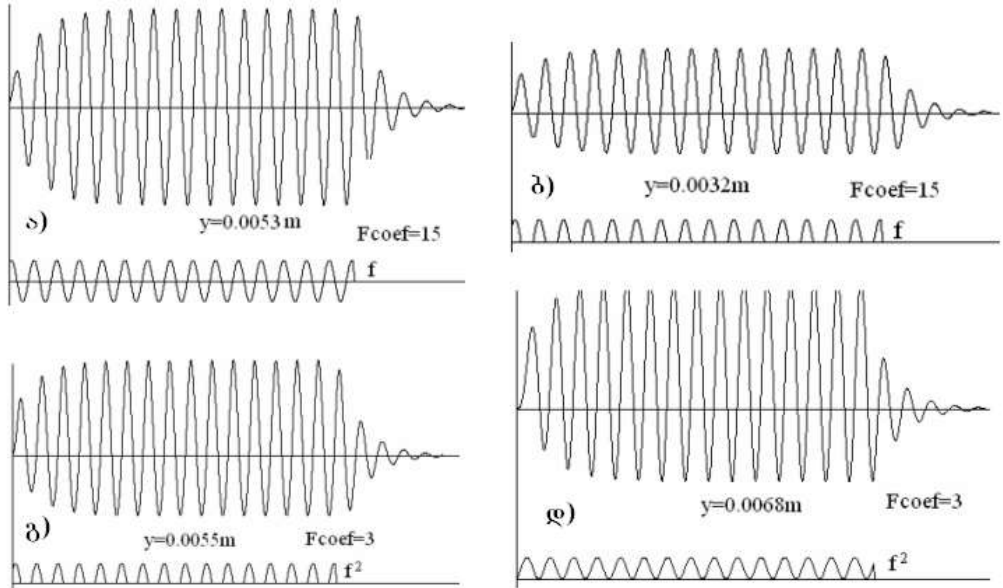
ნახ.48ბ. რეზონანსი 50/50 $I=0.006$, $y=0.00376m$

პრაქტიკულად ანალოგიურ რეზონანსულ სურათს (შედეგს) იძლევა 70-ე (გამარტივებული ერთი განტოლებითის მიხედვით მიღებული რხევითი ოსცილოგრამა რითაც მიღებულია ნახ.48 ნაჩვენები ოსცილოგრამები.

ნახ.49-ზე ნაჩვენებია არაელექტრომაგნიტური ა) ორტაქტა და ბ) ერთ ტაქტა ვიბრატორების რეზონანსები, ხოლო გ)-ზე ერთრაქტა და დ)-ზე ასევე ერთაქტა (ორჯერ დადაბლებული აგზნების სიხშირით მართული) ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების რეზონანსში შესვლის, დამყარებული და გამოსვლის რეჟიმები.

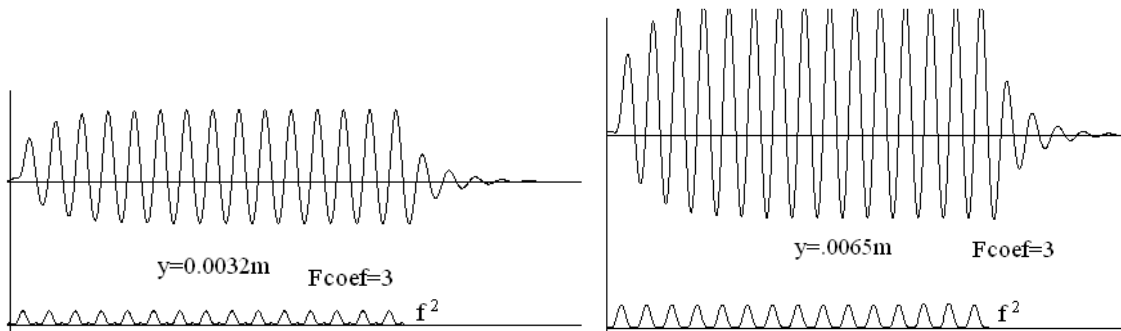
ოსცილოგრამების მიხედვით კარგად ჩაბს, რომ ერთიდაიგივე აგზნების სიმძლავრის და დემფირების დროს ორტაქტა ვიბრატორები გაცილებით ეფექტურად მოიხმარენ ენერგიას. მათემატიკური მოდელირების მიხედვით ჩვეულებრივი ვიბრატორების ამგზნები სიმძლავრეს მთლიანად კოეფიციენტი F_{coef} გამოხატავს, რომელიც იცვლება სინუსოიდალური ფუნქციით. ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების შემთხვევაში კი ამგზნები ძალის სიმძლავრის გამოხატველ ცოფე კოეფიციენტის უკან დამატებით დგას სინუსოიდალურად ცვლადი ელექტრომაგნიტური ძალა Φ აყვანილი კვადრატში.

ერთტაქტა ვიბრატორმა რომ იმუშაოს რეზონანსურ რეჟიმში ამისთვის აუცილებელია აგზნების სიხშირის ორჯერ დაწევა ნახ.49დ. წინააღმდეგ შემთხვევაში გვაქნება ნახ.25.ა-ზე ნაჩვენები არა რეზონანსული რეჟიმი.



ნახ.49. ვიბრატორების რეზონანსში შესვლის დამყარების და გამოსვლის რეჟიმები

ნახ.50-ზე ნაჩვენებია (63) განტოლების მიხედვით დამატებით შემაგნიტების F_a შედაგად მოდიფიცირებული მაგნიტური ძალის მეშვეობით ვიბრირებადი ორტაქტა ელექტრომაგნიტური ვიბრატორი.



ნახ.50ა ორტაქტა შემაგნიტებითი ვიბრატორის რეზონანსული რეჟიმი. $F_a=5$

ნახ.50ბ ორტაქტა შემაგნიტებითი ვიბრატორის რეზონანსული რეჟიმი. $F_a=2.5$

ამ შემთხვევაში ელექტრომაგნიტური იძულებითი ძალა განახევრებულია ნახ.49 გ) და დ)-ზე ნაჩვენებ რეჟიმებთან შედარებით, თუმცა დამატებულია შემაგნიტების ძალა. რხევის ამპლიტუდის სიდიდე კი იგივია რაც ნახ.49დ)-ზე. აღნიშნული ორტაქტა ვიბრატორის მართვა მოცემულ შემთხვევაში მიმდინარეობს არა ორი განტოლების (4) და (5) მეშვეობით და (64) პირობით, არამეთ ერთი (70) მცირეოდენ მოდიფიცირებული განტოლებით. შედეგი აქაც იგივია რაც (4) და (5)

განტოლებების შემთხვევებში გვექნებოდა. თუმცა აღსანიშნავია რომ ამ შემთხვევაში რხევის ასიმეტრია არის მცირედ გადიდებული. თუმცა ესეც უნდა აღინიშნოს, რომ რეალურ ვიბრატორებში საჰაერო ღრეობის არათანაბრობის გამო, როგორც წესი უმეტეს შემთხვევებში საკმაოდ ძლიერ ასიმეტრიულ რხევებს აქვს ადგილი.

შემაგნიტების ცვლილებით საკმაოდ ეფექტურად იმართება ორტაქტიან ვიბრატორებში ამპლიტუდის სიდიდე. ნახ.50დ-ზე ნაჩვენებია ორჯერ შემცირებული რეზონანსული რხევის ამპლიტუდები, რომლებიც მიღებულნი არიან შემაგნიტების განახევრებით.

12. ბრუნვით რხევებზე რხევადი დიდი ამპლიტუდების მქონე ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის დინამიკის კვლევა

ზემოდმოყვანილი მათემატიკური ექსპერიმენტების ანალიზის და შექმნილი მათემატიკური მოდელირების გამოყენებით, ჩატარებული იქნა წინასწარი მათემატიკური ექსპერიმენტები ბრუნვით რხევებზე მომუშავე ელექტრომაგნიტურ ვიბრატორის ძირითადი სამუშაო რეჟიმების პარამეტრების, მდგრადობის და დინამიკური მახასიათებლების დადგენასთან დაკავშირებით.

მიღებული შედეგების მიხედვით დადგინდა, რომ გრეხვაზე ვიბრირებადი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის ელექტრომაგნიტის გულანაზე ცვლადი იმპულსური ძალები ფორმირდებიან ანალოგიურად მიზიდვაზე მომუშავე ორტაქტა ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების და განსხვავდებიან იმით რომ მაგნიტების მიზიდულობის ძალა პრაქტიკულად არ არის დამოკიდებული x რხევის ამპლიტუდის სიდიდეზე, რის გამოც ნებისმიერი სიდიდის ამპლიტუდაზე ვითარდება მაქსიმალური სიმძლავრე მინიმალური დანახარჯებით.

ანალოგიურად ორტაქტა ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების, ბრუნვით რხევებზე ვიბრირებადი ვიბრატორი ასევე ორტაქტა ვიბრატორს წარმოადგენს და ასევე ადვილად რეგულირდება მისი ამპლიტუდების სიდიდე შემაგნიტების ცვლილებით. თუმცა განსხვავებით ყველა სხვა დანარჩენ ელექტრომაგნიტური ვიბრატორებისაგან აგზნების ძალა რხევის ამპლიტუდის მიმართ წრფივია და სიმეტრიული ორივე ტაქტის მიმართ.

მაგნიტური ნაკადი, რომელიც განჭოლავს როტორის ჩარჩოს ტოლია [19]

$$\Phi = BS \cos \alpha \quad (74)$$

სადაც α - კუთხეა როტორის ჩარჩოს ნორმალსა და მაგნიტურ ძალხაზების ვექტორს შორის და რხევის დროს $\alpha = \omega t$. B-მაგნიტური ინდუქციაა, S-როტორის ჩარჩოს ფართობი

ცვლადი დენის დროს

$$\xi_{ინდ} = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \sin \omega t \quad (75)$$

როტორზე მოდებული მგრეხავი ძალა პროპორციულია კოჭებში გატარებული დენის

$$M_{გრ} = k'ISB \sin \alpha \quad (76)$$

ელექტრული და მექანიკური მომენტების ტოლობის შემთხვევაში (76) განტოლების გათვალისწინებით გვექნება

$$M_{გრ} = M_{დრ} = k_1 I = k_2 \varphi \quad (77)$$

სადაც k_1 - ითვალისწინებს მაგნიტური ველის დამაბულობას, კოჭას ხვეების რაოდენობას, როტორის ზომას და მაგნიტოგამტარების ურთიერთმდებარეობას, k_2 - ვიბრატორის დრეკადობის კოეფიციენტი, რომლის φ -ზე ნამრავლი გრეხვის დრეკადობის მომენტს წარმოადგენს.

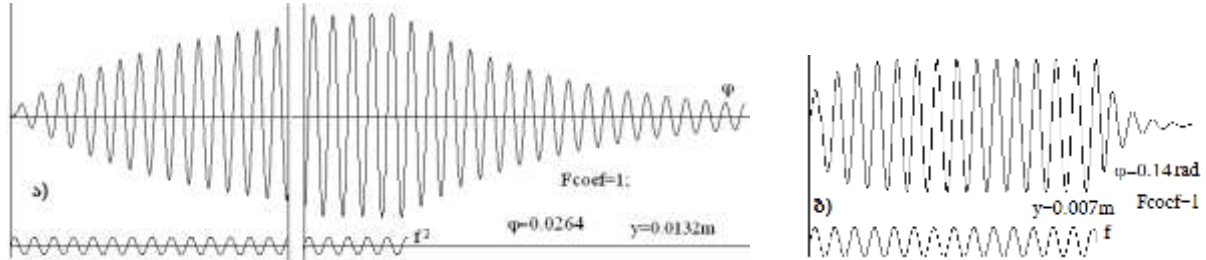
(77) განტოლების საფუზველზე (70)-ე განტოლების უმნიშვნელო მოდიფიცირებით მივიღებთ ბრუნვით რხევებზე ვიბრირებადი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის დიფერენციალურ განტოლებას

$$\ddot{\varphi} + 2h\dot{\varphi} + \omega_0^2 \varphi = k_1 \cos \omega t \quad (78)$$

ამრიგად გრეხვით რხევებზე ვიბრირებადი ვიბრატორის აგზნების ძალა მსგავსია არაელექტრომაგნიტური ვიბრატორების აგზნების ძალის, თუმცა განსხვავდება იმით. რომ წევის ძალა დამოკიდებულია ქსელის სიხშირეზე და სიხშირის ცვლილებით გრეხვის მომენტი იცვლება. სიხშირის გადიდებით რეხვითი მომენტი მცირდება და პირიქით.

ნახ.51ა) და ბ)-ზე წარმოდგენილია, ბრუნვით რხევებზე ვიბრირებადი ელექტრო-მაგნიტური ვიბრატორის (დიდი ამპლიტუდების განვითარებადი), რეზო-ნანსში შესვლის, დამყარების და გამოსვლის ოსცილოგრამა. აღნიშნული ოსცი-ლოგრამა წარმოადგენს გრეხვით φ (მობრუნე-ბით) კუთხის რხევის ამპლიტუდებს რადიანებში. ოსცილოგრამა მიღებულია მათემატიკური მოდელირებით, რომელიც შედგენილია (78)-ე განტოლების, ანუ სტატორის და იაკორის (როტორის) მაგნიტოგამტარების მიახლოება დაშორების x გრძივი ამპლიტუდების აღმწერი პარამეტრები ჩანაცვლებულია გრეხვითი φ კუთხის ცვლილების აღმწერი პარამეტრებით. ამგვარად ელექტრო ძრავას ტიპის როტორის და სტატორის ერთმანეთთან დაჯახება გამორიცხებულია. დამყარებული რეჟიმის დროს

როტორის სტატორის მიმართ შემობრუნების კუთხე რადიანებში, ნახ.51 ა)-ს მიხედვით წარმოდგენილ ოსცილოგრამაზე, არის 0.0264 რადიანი, ხოლო მუშა ორგანო როტორის ღერძთან დაკავშირებულია 0.5 მ სიგრძის მხარით და მუშა ორგანოს გრძივი (რკალური) რხევა 13.5 მმ-ია.



ნახ.51. გრეხვით რვეცებზე ვიბრირებადი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის რეზონანსში შესვლის, დამყარების და გამოსვლის რეჟიმები.

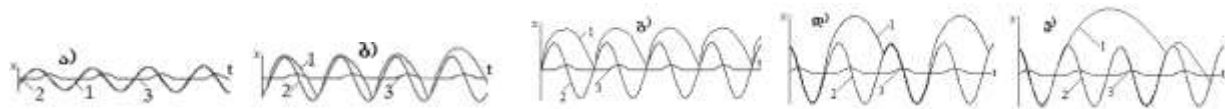
აღსანიშნავია, რომ წარმოდგენილი ვიბრატორით მუშა რეჟიმების მიღების ვარიანტების დიდი შესაძლებლობები. მაგალითად 13.5 მმ ამპლიტუდის მიღება ასევე შესაძლებელია 0.25 მ სიგრძის მხარის დროსაც, მაგრამ ამ შემთხვევაში როტორის შემობრუნების კუთხე ორჯერ გაიზრდება (0.0528 რადიანი) და შესაბამისად დრეკად ელემენტს (ტორსიონს) ორჯერ გაზრდილ გრეხვით ძაბვებზე მოუწევს მუშაობა, ხოლო რომ ეს არ მოხდეს ტორსიონის სიგრძე ორჯერ უნდა გაიზარდოს. მხარის სიგრძეს შერჩევას ამგვარი ტიპის ვიბრატორებში დიდი მნიშვნელობა აქვს იმ თვალსაზრისითაც, რომ სწორხაზოვანი (ნაკლები სიმრუდის) 10 მმ და მეტი ამპლიტუდების მიღება 0.1 მ მხარის დროს საკმაოდ გაძნელებულია დრეკადი ელემენტის გადაძაბვის გამო. შემაერთებელი მხარის (ბერკეტის) ვერტიკალიდან გადახრის კუთხის ცვლილებით მარტივად მიიღება ტრანსპორტირების მიმართულების რვეერსირება და ვერტიკალური მდგენელის ცვლილება, რაც მეტად საჭიროა სხვსდსახვა დრეკადობის და წებოვანი თვისებების მქონე ნივთიერებათა გადასაად გილებლად. ნახ. 51ბ)-ეს მიხედვით 7 მმ ამპლიტუდა მიიღება 3-ჯერ გაზრდილი დემფირების და 2-ჯერ გაზრდილი შემაგნიტების დროს.

თუ მხედველობაში არ მივიღებთ დრეკადი სისტემის შესაძლებლობებს ვიბრატორს შეუძლია განავითაროს უპრებლომოდ, ტექნოლოგიური პროცესების შესრულებისათვის საჭირო. ნებისმიერი სიდიდის რხევითი ამპლიტუდები [34]. ვიბრატორის რხევითი ამპლიტუდების სიდიდე დამოკიდებულია როგორც როტორის სტატორის მიმართ შემობრუნების φ კუთხეზე ისე მხარის L სიგრძეზე $x=L\varphi$.

მათემატიკურმა ექსპერიმენტებმა აჩვენა რომ ტექნოლოგიური დატვირთვის მასის ცვლილება დიდი ამპლიტუდების დროს გაცილებით დიდ ზემოქმედებას

ახდენს ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის ამპლიტუდის სიდიდეზე და ტექნოლოგიური ოპერაციის შესრულების სისწრაფეზე ვიდრე ეს ხდება მცირე ამპლიტუდებზე რხევის დროს [35,36] ნახ.52.

გარდა ზემოდ აღნიშნულისა, მათემატიკურმა ექსპერიმენტებმა აჩვენა რომ, 50 ჰც-ის სიხშირის დროს, გაზრდილ რხევითი ამპლიტუდებზე ტექნოლოგიური მასის გადაადგილებისას 4მმ და მეტ ამპლიტუდებზე მასალის გადაადგილებისათვის სტანდარტით მიღებული 20⁰ კუთხე საჭიროებს აუცილებელ შემცირებას. მაღალი სიხშირის დროს, დიდ რხევით ამპლიტუდებზე, გაზრდილი ვერტიკალური რხევითი მდგენელის მიერ ატყორცნილი მარცვალი აღარ ბრუნდება მუშა ორგანოზე ახალი ციკლის საწყის მდგომარეობაში, რის გამოც გადაადგილების სიჩქარე მკვეთრად ეცემა ნახ.52გ) დ). უფრო მეტიც დიდ ამპლიტუდებზე მაღალი რხევის სიხშირეების დროს მარცვლის დაბრუნებამდე მუშა ორგანო რამდენიმე რხევასაც ასწრებს ნახ.52ე). აღსანიშნავია, რომ აღნიშნული პრობლემა 25 ჰც-ის დროს 7÷8მმ ამპლიტუდების სიდიდის შემდეგ შეინიშნება.

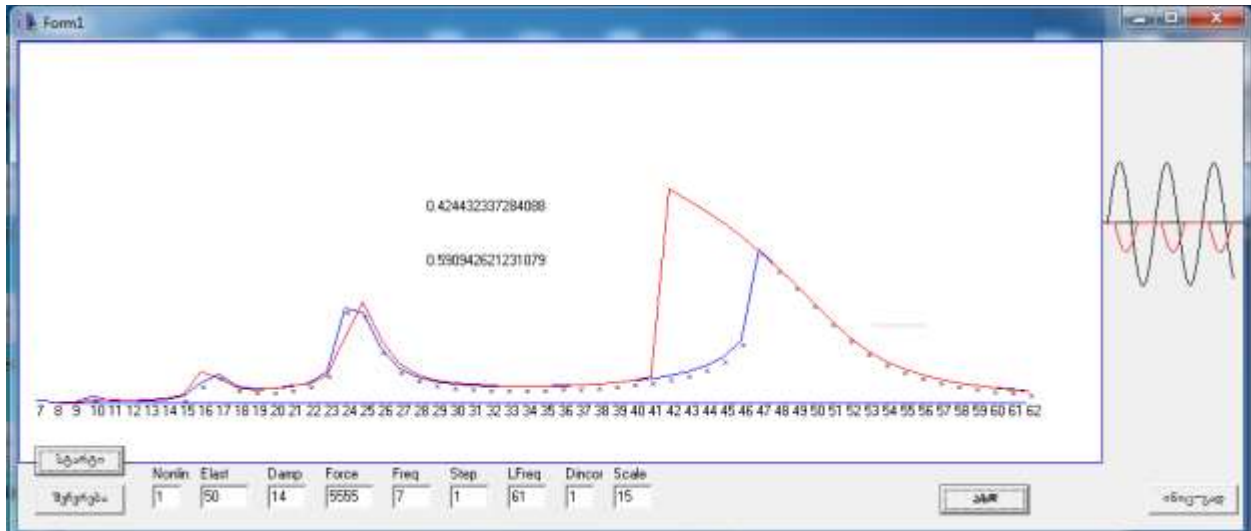


ნახ.52. ტრანცპორტირებადი მარცვლის მუშა ორგანოზე მიერთება მოწყვეტის პროცესი. 1. მარცვალი, 2-ვიბრატორის ამპლიტუდები, 3 იძულებითი ძალა.

ოსცილოგრაფის მიხედვით ჩანს, რომ ა) მცირე ამპლიტუდაზე მარცვალი მოუწყვეტლად სრიალებს მუშა ორგანოზე. ბ), გ) მუშა ორგანოს რხევის ამპლიტუდის გადიდებით მარცვალი წყდება მუშა ორგანოს და გარკვეულ მანძილზე ფრინავს ჰაერში (რაც უფრო დიდია რხევის ამპლიტუდა მით მეტია ჰაერში ფრენა და მარცვლის გადაადგილების სიჩქარე). დ) და ე) რხევის ამპლიტუდის შემდგომი გადიდებით მარცვალი გაცალებით მეტ დროს აყოვნებს ჰაერში და მუშა ორგანოს უბრუნდება არა საწყის რხევის ფაზაზე, ანუ როდესაც მუშა ორგანო ასრულებს ან უკუსვლით მოძრაობას, ან მაქსიმალურ რხევის ამპლიტუდაზეა (რხევის მაქსიმალურ ამპლიტუდაზე რხევის სიჩქარე ნულია და პირიქით). ამგვარად შემდგომ რხევაზე მარცვალი აღარ წყდება მუშა ორგანოს და ტრანსპორტირების სიჩქარე მკვეთრად ეცემა.

უნდა აღინიშნოს მასალის გადაადგილების კვლევა არ შედიოდა პროექტის გეგმაში, თუმცა თეორიულად, რაც ექსპერიმენტით დადასტურდა ამ მიმართულებით გამოიკვეთა მეტად საინტერესო შედეგები ფხვიერი მარცვლოვანი გროვის, როგორც ერთიანი დრეკად პლასტიტური სიმჭიდროვის თვისების ნივთიერებად წარმოდგენის შესახებ. მარცვლების გროვის ერთიანი დრეკადობის და შემჭიდროვების თვისება

ძლიერ განსხვავდება ცალკეული მარცვლის დრეკადობის თვისებებისაგან, რის გამოც ერთიანი მარცვლოვანი გროვას ვიბრატორის მუშა ორგანოსთან ურთიერთმოქმედების და ვიბროტრანსპორტირების პროცესი ძლიერ განსხვავდება ცალკეული მარცვლის ვიბროტრანსპორტირების პროცესისაგან. აღნიშნული მიმართულებით ობიექტური და სუბიექტური მიზეზების გამო კვლევა აღარ გაგრძელდებულა, თუმცა შესაძლებელია გაგრძელეს შემდგომი პროექტის დამტკიცების შემთხვევაში.



ნახ.53. ციფრულ მათემატიკური ექსპერიმენტების სიმულიატორი

ნახ.53.ზე ნაჩვენებია ჩვენს მიერ შექმნილი ციფრული მათემატიკური ექსპერიმენტების შემსრულებელი სიმულიატორის სურათი, რომლის მეშვეობაც შესაძლებელია სხვადასხვა სახის ვიბრაციული რეჟიმების დინამიკის კვლევა-ძიება და აგებული იქნას შესაბამისი ამპლიტუდურ სიხშირული მახასიაებლები.

13.დასკვნა.

ბრუნვით რხევებზე მომუშავე ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების რხევის ამპლიტუდების სიდიდის შეზღუდვა დამოკიდებულია მხოლოდ და მხოლოდ დრეკადი სისტემის უნარიანობაზე და ციკლურ ხანგამძლეობაზე.

მიღებული შედეგების მიხედვით დადგინდა, რომ გრეხვაზე ვიბრირებადი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორის მაგნიტების მიზიდულობის ძალა პრაქტიკულად

არ არის დამოკიდებული x რხევის ამპლიტუდის სიდიდეზე, რის გამოც ნებისმიერი სიდიდის ამპლიტუდაზე ვითარდება მაქსიმალური სიმძლავრე მინიმალური დანახარჯებით.

მათემატიკური მოდელირების მეშვეობით ჩატარებულმა მრავალრიცხოვანმა ექსპერიმენტებმა ნათლად აჩვენა, რომ ელექტრომაგნიტურ ვიბრატორებში წარმოქმნილი ჯერადი ჰარმონიკები გამოწვეულნი არიან იძულები (აგზნებითი) ძალის არაწრფიობით და არა მექანიკური სისტემის არაწრფივი დრკადი ძალებით.

მათემატიკური ექსპერიმენტებისას დადგინდა, რომ მათემატიკური მოდელირებისას საწყისი ფაზის პირობა დიდ გავლენას ახდენს $\sin(\omega t)$ ფუნქციის ინტეგრირების გზით მიღებულ მაგნიტური ნაკადის ფორმირებაზე, მაშინ როდესაც $\cos(\omega t)$ ფუნქციის ინტეგრირებით მიღებული მაგნიტური ნაკადის რხევითი პროცესი, საწყისი პირობის ცვლილებით, მხოლოდ და მხოლოდ შესაბამისი ფაზის სიდიდით გადაიწევა საწყისი მდგომარეობიდან.

სუბჰარმონიული რეზონანსის აღმოცენებისათვის აუცილებლად უნდა შესრულდეს ოთხი პირობა: I. დისიპაციური ძალები უნდა იყოს ძალიან მცირე, II. მაგნიტოგამტარების წინააღმდეგობა უნდა იყოს დიდი და არაწრფივი, III. იძულებითი ძალით მიწოდებული ენერგია მინიმუმ ორჯერ დიდი უნდა იყოს ძირითადი რეზონანსის დროს მიწოდებულ ენერგიაზე, VI. იძულებითი ძალის სიხშირე ზუსტად ორჯერ უნდა აღემატებოდეს მექანიკური სისტემის სკუთარ სიხშირეს.

ერთტაქტიანი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორებისათვის შედგენილი და დაზუსტებული იქნა მათემატიკური მოდელი, რომელიც ითვალისწინებს ელექტროწრედში მიმდევრობით ჩართული ნახევარპერიოდული დიოდის გახსნის და ჩაკეტვის შედეგად განვითარებული ელექტრომაგნიტური ველის აღმწერ დიფერენციალურ განტოლებებს და მათ ურთიერთმონაცვლეობის პირობებს.

თეორიული და შემდგომი მრავალრიცხოვანი ექსპერიმენტული კვლევით დადასტურდა, რომ შესაძლებელია ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების მუშაობის აღმწერი ორი დიფერენციალური (მექანიკური და ელექტრული) განტოლების მაგივრად გამოყენებული იქნას ერთი განტოლება, რომელიც დიდად ამარტივებს მათემატიკურ მოდელირებას და შესაბამის მათემატიკურ ექსპერიმენტებს.

სიხშირის დისკრეტულად გადართვისას წარმოქმნილი რხევის პროცესის არასტაბილურობის თავიდან ასაცილებლად შემუშავებული იქნა სიხშირის ბიჯური დროთი იმდაგვარი კორექცია, რომ რიცხვითი მეთოდის გზით მარტივად მიღებული იქნა არაწრფივი სისტემების დამახასიათებელი ამპლიტუდურ-სიხშირული დიაგრამა.

თეორიული და მათემატიკური ექსპერიმენტული კვლევის საფუძველზე დამუშავებული იქნა უნივერსალური მათემატიკური მოდელი, რომლის მეშვეობითაც შესაძლებელია სხვადასხვ რხევადი სისტემებისათვის პროექტირების ადრეულ პერიოდზე გამოვლინდეს პროექტირებადი ვიბრატორის (რხევადი სისტემის) მდგრადობის პირობები სხვადასხვა აგზნების სიხშირეებზე და ასევე მიღებული იქნას შესაბამისი როგორც წრფივი ისე არაწრფივი სისტემებისათვის დამახასიათებელი ამპლიტუდურ-სიხშირული დიაგრამა.

დამუშავებული ელექტრომაგნიტური ვიბრატორების მათემატიკური მოდელი საშუალებას იძლევა განხორციელდეს მთელი რიგი მექანიკური და ელექტრული პარამეტრების შეტანა და შესაბამისი პარამეტრების მიხედვით გამოკვლეული იქნას სასურველი რეჟიმების დინამიკური მახასიათებლები.

აღსანიშნავია რომ შემუშავებული მათემატიკური მოდელი და მისი ლოგიკური სქემა (გარსაცმი) მცირე მოდიფიცირების შედეგად გამოყენებადი იქნება ნებისმიერ ვიბრაციას დაქვემდებარებულ სისტემებისათვის. ასე მაგალითად: ელ. ძრავების დამაგრების და გადაცემის სისტემებში როტორის დისბალანსის შედეგად გამოწვეული ვიბრაციის პარამეტრების დასადგენად; საბურავის დისბალანსის, ან გზის პროფილის მიერ გამოწვეული შესაძლო რეზონანსების გამოვლენის დასადგენად ავტომობილის დაკიდების სისტემაში, ძარას დინამიკური მდგრადობის კვლევისათვის და ა.შ.

14. ლიტერატურა

1. Kai Valten Mathematical modeling and simulation: introduction for scientists and engineers. John Wiley & Sons, 2009.
2. Eduard A. Bender. An Introduction to Mathematical Modeling. Chapman & Hall/CRC. 2012 books.google.ge/books
3. Гончаревич И.Ф., Докунин А.В. Динамика горных машин с упругими связями. М., “Наука” 1975, 211с.
4. V.A.Bauman, I.I Bikhovski. Vibration machines and processes in building. Moscow, 1977. 250p. (Russian)

5. Быховский И.И. Новые одноконтные электромагнитные вибровозбудители. М. , «ЦНИИТЭ-стройдормаш» 1972,42с.
6. Blekhman I. I. Vibration Mechanics and Vibration Rheology. Theory and applications. M., Fizmatlit (2018) (in Russian)
7. B.I.Krukov. Dynamics of vibratory machines, “Naukova Dumka” Kiev, 1967, 210p. (Russian).
8. M.Chelidze. On the solution of differential equations of oscillations of electro-magnetic exciter. Bull. Georg. Academy of Science, 156, 2 1997, 266-267 pp.
9. Željko V. Despotović, Milan Jović. Mathematical model of electromagnetic vibratory exciter with incremental motion. INFOTEN-JAHORINA Vol. 13, March 2014. 91÷96 pp.
10. Edward M. Purcell. Berkeley Physics Course. V.2. Megraw-hill book company
11. Челидзе М.А., Хвингия М.В. Исследование жесткости торсионных упругих элементов вибрасионной машины. Сообщения АН Грузии, т.88,№2, Тбилиси, 1977Б с.397-400.
12. Челидзе М.А. О нелинейной связи жесткостной характеристики торсионной упругой рами с величиной амплитуды колебаний. В кн. Механика машин., Тбилиси Изд-во “Мецниереба”, 1978, с.112-118.
13. Челидзе М.А., Хвингия М.В. Исследование коэффициента демпфирования торсионной вибрасионной машины В кн. Рассеяние Энергии при колебаниях механических систем. Киев, Изд-во «Наукова Думка», 1980,с192-201.
14. Panovko Y.G. Dissipative systems. Vibration in the flow t. 2. Chapter IV p.352, 1976.
15. Panovko Ya.G. Internal friction during oscillations of the urugic systems. M., “Fizmatgiz,”-184 p. 1960
16. Челидзе М.А., Хвингия М.В., Тедошвили.М.М. Демпфирование в упругой системе вибрасионной машины с симметричной или несимметричной петлей гистерезиса в постоянном магнитном поле разной напряженности. Матеряли докладов ХП коферении по вопросам рассеяния энергии при колебаниях механических системю «Наукова Думка», 1980 .7с.
17. M.Chelidze. Influence of Electromagnetic Disturbing Force on Dynamic Stability of Vibration. Bulletin of the Academy of Sciences of Georgia 160 N 2 Tbilisi, 1999. 4p.
18. Chelidze M., Zviadauri V., Tedoshvili M., Volkdvas V., Khvadagiani A. Determination of the useful work of the vibration exciter with the help of oscillograms of free damping. Proceedings of the V georgian-polish international scintific-technical conference. Transport bridge Europe-Asia. Kutaisi, Georgia, 15-18.10.2019. pp153-161.
19. Richard p. Faynman, Robert B. leighton, Matthew sands. The Feynman Lectures on Physics. V.2 . Addison.Wesley Publishing company. 1964.
20. S.Timoshenko. Vibration Problems in Engineering. D van Nostrand Company. 1995.445p.
21. В.Л.Бидерман. Теория Механических Колебаний. «Высшая Школа» М. 1980. 407с.
22. N.S.Piskunov. Differential and integral calculus, 2d v, Moscow, 1974, 575p. (Russian)
23. G.A.Zasman, O.M.Todes. Course of general physics, 2d v. Moscow, 1974 350p. (Russian)
24. Agata Emilia Witeuk. Runge - Kutta algorithm presentation in C++ Language. University of Szczecin: Problems of Applied Sciences, Vol. 3, pp. 031 – 038 Sreferences. Poland. 2016

25. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. Издательство: Наука. М. 1981г. 723с.
26. А.Я.Архангелский. Программирование в С++Builder. Все версии С++ Builder. Седьмое изданиеИздательство Биномю 2010. 1292ст.
27. A. Chatterjee. A Brief Introduction to Nonlinear Vibrations, Mechanical Engineering, Indian Institute of Science, 2009
28. Crendall,S.H.: “The Role of Damping in Vibration Theory.” Journal of Sound and Vibration, vol.II,pp. 3-18,1970.
29. S. Graham Kelly. Mechanical Vibrations. T h e o r y and A p p l i c a t i o n s, S I. THE University of Akron. 2012, 878 p.
30. PaoloL. Gatty. Applied structural and mechanical vibrations. (teory and methods. Secondedition). 2014. 316 p.
31. M .Chelidze, V. Zviadauri, M.Tedoshvili. Vibration and spectral anlysis of ..
32. M. Chelidze, V.Zviadauri. “Generating of sub harmonic resonant oscillations and problems of their stability” JVE Journal of vibroengeening. V. 10 Issue 4. December Riga, 2008 4p.
33. Хвингия М.В., Челидзе М.А. Экспериментальное исследование субгармонических резонансных колебаний в торсионных электровибрационных машинах. Беханика машин, «мецниереба» Тбилиსიუ 1979ю сიუ78-84.
34. Feodosiev V.I. Strength of materials. M. “nauka” (russian)1999, 554p.
35. Merab A. Chelidze, Victor S. Zviadauri, Process of Compaction of Plastic Materials under Influence of Vibrations. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2010 Vol II WCECS 2010, October 20-22, 2010, San Francisco, USA
36. Merab A. Chelidze, Victor S. Zviadauri, Investigation of Compacting and Adhesion of Plastic Materials on a Vertical Plane by Means of Vibration. World Congress on Engineering 2010. London, U.K. 30 June-2 July, 2010

დანართი 1

ელექტრომაგნიტური ვიბრაციული მკვებავი

გამოგონება განეკუთვნება ვიბრაციულ ტექნიკას და ტექნოლოგიას.

ვიბრატორები ფართოდ გამოიყენება მრეწველობაში მექანიკური რხევების მისაღებად ისეთი ვიბროტექნოლოგიურ ოპერაციების შესასრულებლად, როგორცაა: ბეტონის და სხვა ბლანტი მასალების შემჭიდროება, ფხვიერი და ბლანტი ნივთიერებების ტრანსპორტირება, თხევად და ფხვიერ გარემოში ქიმიური პროცესების აქტივიზაცია და ა.შ. მოხმარებული ენერჯის მექანიკურ ენერჯიად გარდაქმნის მხრივ მეტად ეფექტური არიან რეზონანსური ვიბრატორები, რომლებიც შედგებიან შემდეგი ძირითადი ელემენტებისაგან: დრეკადი სისტემისაგან, აქტიური და რეაქტიული მასებისაგან და პერიოდული ამგზნები ძალის წყაროსაგან. რხევადი

სისტემის საკუთარი სიხშირე მიახლოებით რხევის წყაროს ძალის სიხშირის ტოლია. ვიბროამგზნებები პერიოდული ამგზნები ძალის მხრივ შეიძლება იყვნენ: ჰიდრავლიკური, პნევმატიკური, ცენტრიდანული, დებალანსური, ელექტრომაგნიტური და ა.შ. კონსტრუქციის სიმარტივის, მოძრავი ნაწილების არარსებობის, მაღალი საიმედოობის, უსაფრთხოების და მოსახმარი ენერჯის (ელექტრო ენერჯის) მიწოდების მაქსიმალურად მოხერხებულებიდან გამომდინარე, სახალხო მეურნეობის თითქმის ყველა სფეროში ელექტრომაგნიტური ვიბრატორები ყველაზე მეტადაა გავრცელებული და აქვთ შემდგომი გავრცელების დიდი პერსპექტივა.

ცნობილია ჰარმონიული რხევების ამგზნები რეზონანსული ვიბრატორები, მათ შორის გრეხვითი რხევის ვიბრატორი [SU 206395 2.12.1967]. იგი შედგება პერიოდული ძალის ელექტრომაგნიტისაგან, რომელიც დრეკადი სისტემის მეშვეობით დამაგრებულია აქტიურ და რეაქტიულ მასებს შორის. რხევის წყარო - ელექტრომაგნიტი, შედგება ფერომაგნიტური სტატორისაგან, რომელიც ხისტადაა მიერთებული კორპუსთან და ფერომაგნიტური ღუზისგან, რომელიც ასევე ხისტადაა მიერთებული აქტიურ მასასთან. ელექტრომაგნიტის კოჭაში პულსირებული, ანუ ცვლადი დენის გატარებით ღუზასა და სტატოტს შორის წარმოიქმნება მიზიდულობის ძალა და შესაბამისად მაგნიტოგამტარებთან მიერთებული რეაქტიული და აქტიური მასები მიიზიდებიან, ხოლო მასების საწყის მდგომარეობაში დაბრუნება ხდება დრეკადი საშუალებით და პროცესი მეორდება ციკლურად. ამგვარად ვიბრატორის მუშაობის დროს ღუზა სტატორის მიმართ ასრულებს რხევით მოძრაობას. როდესაც ვიბრატორის რხევის საკუთარი სიხშირე ემთხვევა ელექტრო ქსელზე მიერთებული ელექტრომაგნიტის მიერ წარმოქმნილ სიხშირეს მიიღება ვიბრატორის მაქსიმალური მექანიკური რეზონანსული რხევითი ამპლიტუდები.

ასეთი მოწყობილობის ნაკლია შეზღუდული (მცირე არაუმეტეს 1,5მმ-ის) რხევის ამპლიტუდის სიდიდე, რადგან ელექტრომაგნიტებს შორის საჰაერო ღრეჩოს გაზრდა იწვევს მაგნიტური ნაკადის დიდ დანაკარგებს და საბოლოო ჯამში ვიბრატორის მარგი ქმედების კოეფიციენტის მკვეთრად გაუარესებას.

გამოგონების ტექნიკურ შედეგს წარმოადგენს მექანიკური რხევის გაზრდილი 1,5 მმ-ზე მეტი ამპლიტუდების მიღება მაგნიტებს შორის არსებული უცვლელი საჰაერო ღრეჩოს პირობებში.

აღნიშნული მიიღწევა ელექტრომაგნიტური ვიბრაციული მკვებავით, რომელსაც გააჩნია ბუნკერი და ვიბრატორი, სადაც ვიბრატორი შეიცავს, კორპუსს მასზე დამაგრებული სტატორით, ღუზას და ღუზისა და კორპუსის შემაერთებელ დრეკად ელემენტს, ამასთან, ბუნკერი განთავსებულია ხსენებულ კორპუსზე. გარდა ზემოაღნიშნულისა ღუზა შესრულებულია სტატორის მიმართ მუდმივი წრიული საჰაერო ღრეჩოს შენაერჩუნების შესაძლებლობით, რაც უზრუნველყოფილია მისი ფიქსაციით სატატორის მიმართ კორპუსსა და ბუნკერში გამავალ და საკისრებში ჩასმული ლილვის მეშვეობით, ლილვის

კორპუსში გამავალ ნაწილზე ხისტად დამაგრებულია ხსენებული ღუზა, ხოლო ბუნკერულ ნაწილზე კი ფორმირებულია ხრახნულდარიანი ცილინდრი, გარდა ამისა ღუზაზე დამაგრებული კოჭა მიერთებულია ცვლადი დენის წყაროსთან, ხოლო სტატორზე დამაგრებული კოჭა მიერთებულია მუმივი დენის წყაროსთან,

მოყვანილი კონსტრუქციულ შესრულების ფორმაზე კვლევა განხორციელდა შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური მხარდაჭერით [გრანტის № FR 17_292, “ვიბრაციული ტექნოლოგიური პროცესების მათემატიკური მოდელირება და ახალი, მაღალეფექტური მანქანების დაპროექტება“ ფარგლებში]

გამოგონება გახსნილია ნახაზით:~

ფიგ. 1-ზე წარმოდგენილია ელექტრომაგნიტური ვიბრაციული მკვებაზის სქემატური გამოსახულება და ასევე ლილვის ბუნკერული ნაწილის ხრახნულდარიანი ცილინდრის და დრეკადი ელემენტის სქემატური გამოსახულებები.

ელექტრომაგნიტური ვიბრაციული მკვებაზი შეიცავს ბუნკერს 11 და ვიბრატორს. სადაც ვიბრატორს გააჩნია ფურცვლოვან ელექტროტექნიკურ ფოლადის სტატორი 1 და ღუზა 2, მათი შემერთებული დერეკადი ელემენტი ფორმირებული ჰიპერბოლოიდური ტორსიონის ფორმით 3, დახრილი დრეკადი ძელებით 4. იგი ასევე აღჭურვილია სტატორის მიმართ ღუზის დამაფიქსირებელი (დამაცენტრებელი) ლილვით 5, საკისრებით - 6 და 7, სტატორთან ხისტად მიერთებული კორპუსით 8, სტატორსა და ღუზას შორის ფორმირებული საჰაერო ღრეჩოთი 9, საკისრების დამაფიქსირებელ ფირიტებით 10, და ბუნკერში განთავსებულ ლილვის ნაწილზე ფორმირებული ხრახნულდარიანი ცილინდრით 12.

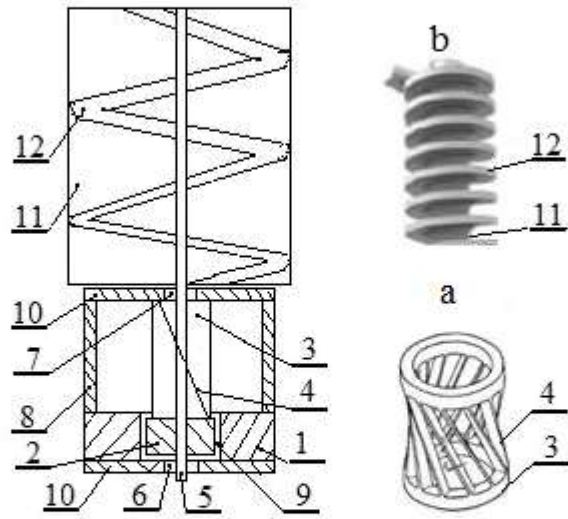
წარმოდგენილი ელექტრომაგნიტური ვიბრაციული მკვებაზი მუშაობს შემდეგნაირად: ელექტროქსელიდან 50 ჰვ-ის ცვლადი დენის მიწოდებით ღუზას კოჭაზე, ხოლო სტატორის კოჭაზე გამართული დენის მიწოდებით, ვიბრატორის მაგნიტის გულანაში წარმოქმნება გაერთიანებული (ჯამური) საწინააღმდეგო მიმართულების პულსირებული მაგნიტური ნაკადები, რომლებიც იწვევენ ვიბრატორის ღუზას 50 ჰვ-ის სიხშირის გრეხვითი რხევის ამპლიტუდებს. აღნიშნულის გამო ღუზასა და სტატორს შორის არსებული საჰაერო ღრეჩო 9 სიდიდე დაყვანილია მინიმუმამდე, რადგან ღუზას გრეხვით ამპლიტუდების სიდიდე აღარ არის დამოკიდებული მაგნიტოგამტარებს შორის არსებულ სიდიდეზე. ამგვარად მინიმუმამდეა დაყვანილი მაგნიტური ნაკადის დანაკარგები და შესაბამისად მნიშვნელოვნად გაზრდილია ვიბრატორის მარგი ქმედების კოეფიციენტი.

ვიბრატორის კორპუსზე მიერთებული ბუნკერი, ხრახნულ ზედაპირზე ნამზადის ვიბრაციული გადაადგილებისათვის, მით უმეტეს აწევითი გადაადგილებისათვის, აუცილებელია გრეხვითი რხევების ვერტიკალური მდგენელი, რომელსაც უზრუნველყოფს ჰიპერბოლოიდურ ტორსიონზე 3 არსებული დახრილი დრეკადი ძელები 4. ძელების ღუნვა-

გრეხვითი დეფორმაციების შედეგად ჰიპერბოლოიდის ტორსებს შორის იცვლება მანძილი. როდესაც ჰიპერბოლოიდის ტორსების გრეხვა ხდება დრეკადი ძელების დახრის მიმართულებით, ადგილი აქვს ტორსებს შორის მანძილის შემცირებას და პირიქით, ტორსების ძელების დახრის საწინააღმდეგო მიმართულებით გრეხვის დროს, ადგილი აქვს ტორსებს შორის მანძილის გადიდებას. ნამზადის ბუნკერზე აღმასვლისათვის აუცილებელია, რომ ვიბრატორის მუშა სვლის დროს ჰიპერბოლოიდი ისეთნაირად იყოს ორიენტირებული, რომ მისი გრეხვა იწვევდეს ტორსებს შორის მანძილის გადიდებას.

გამოგონების ფორმულა

ელექტრომაგნიტური ვიბრაციული მკვებავი, რომელსაც გააჩნია ბუნკერი და ვიბრატორი, სადაც ვიბრატორი შეიცავს, კორპუსს მასზე დამაგრებული სტატორით, ღუზას და ღუზისა და კორპუსის შემაერთებელ დრეკად ელემენტს, ამასთან, ბუნკერი განთავსებულია ხსენებულ კორპუსზე განსხვავდება იმით, რომ ღუზა შესრულებულია სტატორის მიმართ მუდმივი წრიული საჰაერო ღრეჩოს შენაერჩუნების შესაძლებლობით, რაც უზრუნველყოფილია მისი ფიქსაციით სტატორის მიმართ კორპუსსა და ბუნკერში გამავალ და საკისრებში ჩასმული ლილვის მეშვეობით, ლილვის კორპუსში გამავალ ნაწილზე ხისტად დამაგრებულია ხსენებული ღუზა, ხოლო ბუნკერულ ნაწილზე კი ფორმირებულია ხრახნულდარიანი ცილინდრი, გარდა ამისა ღუზაზე დამაგრებული კოჭა მიერთებულია ცვლადი დენის წყაროსთან, ხოლო სტატორზე დამაგრებული კოჭა მიერთებულია მუდმივი დენის წყაროსთან.



ფიგ. 1

დანართი 2



საქართველოს იურიდიული პირი
საქართველოს ინტელექტუალური საკუთრების ეროვნული ცენტრი
საქპატენტი

სათაო ოფისი: 3300, ქ. მცხეთა, ანტიოქის ქ. №5; ფაქსი: (+995 32) 2252531
0179, ქ. თბილისი, ნინო რამიშვილის ქ. №4, ტელ.: (+995 32) 2252533
E-mail: info@sakpatenti.org.ge; www.sakpatenti.gov.ge



ქ. მცხეთა

2020-12-18

ბ რ ძ ა ნ ე ბ ა № 7479/1 პატენტის გაცემის შესახებ

საქმის ნომერი: 15218/1
განაცხადის ნომერი: AP 2019 15218
განმცხადებელი: მერაბ ჭელიძე; მერაბ თედოშვილი; ვიქტორ ზვიადაური
ობიექტი: გამოგონება
დასახელება: გრუნვეთი რხევის მუდმივი საჰაერო ღრეჩოიანი ელექტრომაგნიტური ვიბრატორი

„საქართველოს ზოგადი ადმინისტრაციული კოდექსის“ 52-ე მუხლის, „საქართველოს საპატენტო კანონის“ 35-ე მუხლის, 36-ე მუხლის „დ“ ქვეპუნქტის, მე-40 მუხლის პირველი პუნქტის, 41-ე მუხლის პირველი პუნქტის „ა“ ქვეპუნქტის, 47-ე მუხლის, „გამოგონების და ახალი ჯიშების დეპარტამენტის თანამშრომელთათვის უფლებამოსილების მინიჭების შესახებ“ საჯარო სამართლის იურიდიული პირის საქართველოს ინტელექტუალური საკუთრების ეროვნული ცენტრის - „საქპატენტის“ თავმჯდომარის 2018 წლის 9 სექტემბრის №55 ბრძანების პირველი პუნქტისა და თანდართული ექსპერტიზის დასკვნის საფუძველზე

ვ ბ რ ძ ა ნ ე ბ ა:

1. გაიცეს პატენტი განაცხადზე საქმის ნომრით 15218/1 თანდართული ფორმულით.
2. ინფორმაცია პატენტის გაცემის შესახებ კანონით გათვალისწინებული შემდგომი პროცედურებისათვის, გამოქვეყნდეს დადგენილი წესით საქართველოს სამრეწველო საკუთრების ოფიციალურ ბიულეტენში.
3. ეს ბრძანება შესაძლებელია გასაჩივრდეს კანონით დადგენილი წესით საქპატენტის სააპელაციო პალატაში მისი გაცნობა/ჩამარებიდან სამი თვის ვადაში ან ერთი თვის ვადაში მცხეთის რაიონულ სასამართლოში (მისამართი: მცხეთა, სამხედროს ქ. 17).

გამოგონების და ახალი ჯიშების
დეპარტამენტის უფროსი

მერაბ კუცია