

მაია წულაია

ადამიანის ვიბროდაცვის ახალი მეთოდები
ბიომექანიკური მახასიათებლების
გათვალისწინებით

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარდგენილი დისერტაციის

ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

სადოქტორო პროგრამა: მანქანათმცოდნეობა,
მანქანათმშენებლობა და საწარმოო ტექნოლოგიური პროცესები
შიფრი - 0408

თბილისი

2015 წ.

ხელმძღვანელი: მიხეილ შილაკაძე – ტ.მ.დ., სტუ-ს პროფესორი.

რეცენზენტები: 1. თენგიზ ჩხაიძე,
ტ.მ.დ., სტუ-ს პროფესორი

2. მერაბ ჭელიძე,
ტ.მ.კ., უფრ. მეცნ. თანამშრომელი

დაცვა შედგება 2015 წლის “–13–” —ივლისს—” —14⁰⁰— სთ-ზე
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სატრანსპორტო და
მანქანათმშენებლობის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის
სხდომაზე, კორპუსი I, აუდიტორია №ბ 404
მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,
ხოლო ავტორეფერატის – ფაკულტეტის ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს სწავლული მდივანი
სტუ-ს ასოცირებული პროფესორი

დ. ბუცხრიკიძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

საკითხის აქტუალობა. ადამიანის სხეულზე გარე რხევითი პროცესების გავლენას გააჩნია სხვადასხვა ასპექტები. ამ დროს ორგანიზმში მიმდინარე ცვლილებების ანალიზიდან გამომდინარე ისინი შეიძლება მივაკუთვნოთ როგორც სასურველ, ასევე არასასურველ ფაქტორებს.

ადამიანის ორგანიზმზე მუდმივად მოქმედ ბუნებრივ რხევით-ტალღურ პროცესებთან ერთად, როგორცაა გრავიტაცია, ელექტრომაგნიტური გამოსხივება, იონიზაცია და სხვა, ყველაზე ფართე გავრცელება პოვა ვიბრაციამ და ხმაურმა.

ახალი, ჩქაროსნული მანქანებისა და მაღალი სიჩქარის მქონე ინსტრუმენტების შექმნა მნიშვნელოვნად უსწრებს წინ ადამიანი-ოპერატორის ეფექტური და საიმედო ვიბროდაცვის საშუალებების შექმნას. როგორც პრაქტიკა უჩვენებს ვიბროდაცვის არსებული საშუალებები და მეთოდები არ იძლევა ვიბროსაშიში პროფესიების მქონე ადამიანის უსაფრთხოების მყარ გარანტიას. შესაბამისად, ადამიანი-ოპერატორის ვიბროდაცვის პრობლემა მოითხოვს ძნელი და რთული პრობლემების გადაჭრას არატრადიციული მეთოდებით, პრინციპულად განსხვავებული მიდგომით.

ადამიანის სხეულზე გადაცემული ვიბრაციები, უმრავლეს შემთხვევაში, იწვევს უარყოფით გავლენას მისი ფიზიოლოგიური სისტემების ფუნქციონალურ მდგომარეობაზე.

მეორე მხრივ, იგივე რხევითი პროცესები მოქმედების დადებითი ფაქტორის სახით გამოიყენება მედიცინაში, წარმოებაში, სპორტში ან სპეციალურ პირობებში, ნერვულ-კუნთოვანი სისტემის შრომისუნარიანობის შესანარჩუნებლად ან მისი რეაბილიტაციისთვის.

მიუხედავად ამ პროცესების ფართო გამოყენებისა აღნიშნულ დარგებში, არ არსებობს მეცნიერულად დასაბუთებული მიდგომა ვიბრაციის იმ პარამეტრების ზემოქმედების გავლენის მონიტორინგისა, რომლებიც იწვევენ ორგანიზმში დადებით თუ უარყოფით რეაქციებს.

კვლევის მიზანი და ამოცანები. ადამიანის ორგანიზმზე ვიბრაციის ზემოქმედება, რომელსაც მიყვავართ დიამეტრალურად ურთიერთ-საპირისპირო შედეგებთან, ბადებს აზრს, რომ ვიბრაციულ ზემოქმედებაზე ადამიანის ორგანიზმის ბიოლოგიურ რეაქციაში დევს გარე და შიგა რხევითი პროცესების რთული ურთიერთქმედების ერთიდაიგივე მექანიზმი, რომელსაც მიყვავართ ორგანიზმში მის სხვადასხვა გამოვლინებამდე.

აღნიშნული პრობლემის გადაწყვეტაზე მუშაობის დროს, თეორიული და პრაქტიკული მოსაზრებების შეჯერებით, შერჩეული იქნა მოდელი, რომელიც ეფუძნება ორი რხევითი პროცესის ურთიერთქმედებას: გარეშე ლოკალური ვიბრაცია და შიგა-კუნთის ბიოელექტრული აქტივობა. შესაბამისად, სამუშაოს მიზანს შეადგენს ადამიანის ორგანიზმზე ვიბრაციის მოქმედების მექანიზმის შესწავლა ორი რხევითი პროცესის: მექანიკურის-ლოკალური ვიბრაცია და კუნთის ბიოელექტრული აქტივობის ურთიერთ-ქმედების ხასიათისა და კანონზომიერებების შესწავლის გზით.

სამუშაოს მეცნიერული სიახლე

1. დამუშავებულია ბიომექანიკური რგოლის მექანიკური და ბიოელექტრული რხევების ექსპერიმენტული გამოკვლევების მეთოდები ლოკალური ვიბრაციის ზემოქმედების დროს.
2. დადგინდა ბიომექანიკური სისტემის კანონზომიერებები და თვისებები, სახელდობრ:
 - ადამიანის ბიომექანიკური რგოლის მექანიკური სივრცითი რხევების კანონზომიერებები, რომლებიც დამოკიდებულია ვიბრაციის პარამეტრებზე და კუნთების დაძაბულობაზე.
 - ვიბრაციულ ზემოქმედებაში ჩართული კუნთების ჯამური ბიოელექტრული აქტივობის პარამეტრების დამოკიდებულება ვიბრაციის პარამეტრებზე და კუნთების ფუნქციონალურ მდგომარეობაზე.
 - ბიომექანიკური რგოლის კუნთების მექანიკური და ბიოელექტრული რხევების ურთიერთკავშირი გარე ვიბრაციის ზემოქმედების დროს.
 - ადამიანის ორგანიზმის მიერ გარედან მიწოდებული რიტმის ათვისების უნარი და სინქრონიზაციის რაოდენობრივი კანონზომიერებები, გარე ვიბრაციასა და კუნთის ჯამურ ბიოელექტრულ აქტივობას შორის.

3. შედგენილია ბიომექანიკური რგოლის მათემატიკური მოდელი რომელიც ითვალისწინებს ჩაკეტილი სისტემის მექანიკურ და ნერვულ კომპონენტებს.

4. მათემატიკური მოდელირების ციფრული მეთოდებით მიღებულია სინქრონიზაციისა და რეზონანსის რეჟიმები რგოლის მექანიკურ რხევებს, ნეირონის აქტივობასა და გარე პერიოდულ ზემოქმედებას შორის.

ნაშრომის პრაქტიკული მნიშვნელობა. სამუშაოს მეცნიერული და პრაქტიკული მნიშვნელობა მდგომარეობს ბიომექანიკურ სისტემებში ორი რხევით-ტალღური პროცესის ურთიერთქმედების ახალი მიმართულების განვითარებაში.

ადამიანის ბიომექანიკური რგოლის სივრცითი მექანიკური რხევებისა და კუნთოვანი სისტემის ჯამური ბიოელექტრული აქტივობის სინქრონიზაციის მიღებული რაოდენობრივი კანონზომიერებები საშუალებას იძლევა ვიბროსაშიში პროფესიების მქონე ადამიანის ვიბროდაცვას მივუდგეთ ახალი, ჯერ კიდევ შეუსწავლელი პოზიციიდან და ამის საფუძველზე მიღებული კვლევის შედეგები გამოვიყენოთ ვიბრაციის პარამეტრების რეგლამენტაციის საქმეში სანიტარული ნორმების დამუშავების დროს.

მიღებული შედეგების საფუძველზე შესაძლებელია ასევე შეიქმნას ადამიანის კუნთოვანი სისტემის ფუნქციონალური მდგომარეობისა და სტიმულაციის დიაგნოსტიკის ტექნიკური საშუალებები.

გამოკვლევების შედეგები შეიძლება გამოყენებული იქნას წარმოებაში ადამიანის მდგომარეობის დიაგნოსტიკური და პროფილაქტიკური ღონისძიებების დასამუშავებლად, ვიბროსაშიში პროფესიების დამწყები პერსონალის პროფესიული შერჩევის დროს, მედიცინასა და სპორტში ადამიანის საყრდენ-მამოძრავებელი აპარატის ფიზიოთერაპევტული პროცედურების რეაბილიტაციის ტექნიკური საშუალებების შესაქმნელად და სხვა.

პუბლიკაციები და აპრობაცია. დისერტაციის თემის შესატყვისად გამოქვეყნებულია ექვსი სამეცნიერო პუბლიკაცია. მათ შორისაა ერთი საერთაშორისო სამეცნიერო ჟურნალში “Problems of Applied Mechanics”, ორი საერთაშორისო სამეცნიერო ჟურნალში “Problems of Mechanics”, ერთი სამეცნიერო-ტექნიკურ ჟურნალში “ტრანსპორტი” და ორი საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციების კრებულებში.

ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა. სადისერტაციო ნაშრომი მოიცავს შესავალს, პრობლემასთან დაკავშირებული გამოკვლევების ანალიზურ მიმოხილვას, შედეგებსა და განსჯას, ექსპერიმენტულ ნაწილს, დასკვნას და გამოყენებულ ლიტერატურას. ნაშრომი წარმოდგენილია ნაბეჭდი ტექსტით 130 გვერდზე, რომელიც შეიცავს 59 ნახაზს და გრაფიკს, 2 ცხრილს, და 134 გამოყენებული ლიტერატურის ჩამონათვალს.

კვლევების შესრულება მიმდინარეობდა ორი ძირითადი მიმართულებით: ბიომექანიკური სისტემის გარე და შიგა რხევითი პროცესების ექსპერიმენტული გამოკვლევა, ლოკალური ვიბრაციული ზემოქმედების დროს და ბიომექანიკური სისტემის მოძრაობების მოდელირება გარე პერიოდული მოქმედებების დროს.

აღამიანის ორგანიზმზე ლოკალური ვიბრაციის ზემოქმედების მექანიზმის გამოსავლენად, მის რეალურ ასპექტში, დამუშავებული იქნა მეთოდური ხერხები და შეირჩა სიგნალების რეგისტრაციისა და ანალიზის საშუალებები.

სადისერტაციო ნაშრომის შინაარსი

შესავალში აღნიშნულია, რომ მანქანებსა და მექანიზმებზე სულ უფრო მზარდი დინამიკური დატვირთვების დროს, მათი საიმედო მუშაობისთვის, პირველხარისხოვანი მნიშვნელობა ენიჭება არა მხოლოდ თვით კონსტრუქციების მავნე ვიბრაციის მოქმედებისგან დაცვას, არამედ, მათი მმართველი ოპერატორების ვიბროდაცვასაც. ეს უკანასკნელი განაკუთრებით მნიშვნელოვანია იმ პირობებში, როდესაც გაიზარდა ოპერატორზე მოქმედი ვიბრაციის დონე და გაფართოვდა სიხშირეთა სპექტრი. შესაბამისად, მავნე რხევებთან ბრძოლა ამჟამად ნაკარნახევია არა მხოლოდ ტექნიკური მოსაზრებებით, არამედ სოციალური მოთხოვნებითაც.

ჩამოყალიბებულია შესრულებული სამუშაოს თემის აქტუალობა და კვლევის ის მოდელი, რომელიც საფუძვლად უდევს ჩატარებული კვლევების მიღებულ შედეგებს.

ლიტერატურის მიმოხილვაში, თავი I, შესრულებულია სამუშაოში ჩასატარებელ კვლევების საკითხებთან დაკავშირებული ლიტერატურული წყაროების მიმოხილვა. კერძოდ, დახასიათებულია ვიბრაციის გავლენა ადამიანის სხეულზე როგორც ბიომექანიკურ სისტემაზე და განსაზღვრულია ის ბიომექანიკური მახასიათებლები, რომლებიც მნიშვნელოვანია ადამიანის ორგანიზმზე ვიბრაციის გადაცემისა და გავრცელების შესწავლის დროს.

მოყვანილია იმ წყაროების ანალიზური მიმოხილვა, რომლებიც დაკავშირებულია ვიბრაციის გავლენასთან ადამიანის საყრდენ-მამოძრავებელი აპარატის კუნთების ბიოელექტრულ აქტივობაზე.

ასევე განხილულია არსებული ლიტერატურა, რომელიც დაკავშირებულია ბიომექანიკური სისტემების მოძრაობების მოდელირებასთან.

შესრულებული სამუშაოების შესწავლისა და ანალიზის საფუძველზე ჩამოყალიბდა კვლევის ახალი მეთოდი, რომელიც უფრო ეფექტურად ამჟღავნებს ადამიანის ორგანიზმზე მოქმედი ვიბრაციის გავლენას, და, რომელიც ეფუძნება ორი რხევითი პროცესის, გარე - ლოკალური ვიბრაციისა და შიგა კუნთოვანი სისტემის ბიოელექტრული აქტივობის, ურთიერთქმედებას. აღნიშნულის შედეგად გამოიკვეთა კვლევების შემდეგი ამოცანები:

1. დამუშავდეს ადამიანის ბიომექანიკური რგოლის დინამიკური და ბიოელექტრული მახასიათებლების ექსპერიმენტული კვლევის მეთოდები რხევების მექანიკური აგზნების დროს.
2. ჩატარდეს ექსპერიმენტული გამოკვლევები კიდურის ბიომექანიკური და ბიოელექტრული რხევითი პროცესების განსაზღვრის მიზნით, მექანიკური ვიბრაციის მოქმედების დროს.
3. დამუშავდეს მეთოდი ორგანიზმის მიერ გარე რიტმის ათვისების და სინქრონიზაციისა და რეზონანსული რეჟიმების გამოკვლევისთვის.
4. დამუშავდეს ელექტრომიოგრამების ანალიზის მეთოდი კუნთების მიერ განვითარებული ძალების შეფასების მიზნით.

5. შედგეს ფენომენოლოგიური მათემატიკური მოდელი, რომელშიც გათვალისწინებული იქნება კუნთოვანი აპარატის ცნობილი თვისებები, ჩაკეტილი უკუკავშირებით.

6. ჩატარდეს ბიომექანიკური რგოლის რეაქციის მოდელირება გარე პერიოდული მოქმედების დროს, კვლევების თეორიული და ექსპერიმენტული შედეგების შესადარებლად.

შედეგებსა და განსჯაში, თავი II, აღწერილია დამუშავებული მეთოდები, რომლის საშუალებითაც ხდებოდა ბიომექანიკური რგოლის მექანიკური და ბიოელექტრული პარამეტრების რეგისტრაცია, მასზე ვიბრაციის ზემოქმედების დროს. მოყვანილია ამ პარამეტრების რეგისტრაციის სქემა და ის ტექნიკური საშუალებები, რომლითაც ხდებოდა რეგისტრაცია.

როგორც კვლევები უჩვენებს და ცნობილია ლიტერატურიდანაც, პარამეტრები, რომლებსაც გავლენა აქვთ ადამიანის ორგანიზმზე ლოკალური ვიბრაციის გადაცემის დროს არის: სიხშირე, ამპლიტუდა და მათი სხვადასხვა შეფარდება, ვიბრაციის ქვეშ მყოფი კუნთების ფუნქციონალური მდგომარეობა და ვიბროექსპოზიცია. გარდა ამისა ბიოლოგიური ობიექტისთვის, რომელიც წარმოადგენს მრავალი თავისუფლების ხარისხის მქონე სისტემებს, ასევე მნიშვნელობა აქვს ვიბრაციის მიმართულებას და ინტენსივობას.

თითოეულს ამ პარამეტრებიდან გააჩნია მოდულირების საკმაოდ დიდი დიაპაზონი, რომელზეც ორგანიზმი რეაგირებს არაერთგვაროვნად. ამიტომ, იმის გამო, რომ ამოცანა არის მრავალკრიტერიუმისანი, ადამიანის ორგანიზმზე ვიბრაციის ლოკალურად გადაცემის შემთხვევაში ძირითად პარამეტრებად, რომელთაც გავლენა აქვთ ბიომექანიკურ სისტემაზე, შერჩეული იქნა ვიბრაციის სიხშირე და ამპლიტუდა, კუნთების სტაციონარული შეკუმშვა, მათ მიერ ძალის განვითარების დროს და ვიბროექსპოზიცია. რაც შეეხება ვიბრაციის მიმართულებას (მისაღები სიზუსტით) იგი გამორიცხული იქნა გამოსაცდელის ხელის სპეციალურად შერჩეული მდებარეობით.

სტანდარტული აპარატურის გამოყენებით, რომელსაც გააჩნია ცვლადი სიგნალების რეგისტრაციისა და ანალიზის საშუალებები, განსაზღვრული იქნა ბიომექანიკური რგოლის მექანიკური და ბიოელექტრული მახასიათებლების ის დიაპაზონები, რომლებშიც შეიმჩნევა ამ მახასიათებლების რეაქციები ვიბრაციულ ზემოქმედებაზე.

მიღებული ექსპერიმენტული მასალა დარწმუნებით იძლევა იმის საფუძველს, რომ განისაზღვროს სინქრონიზაციისა და რეზონანსების პროცესების როლი მექანიკური რხევების (გარე ვიბრაცია) და ბიორხევების (კუნთების ბიოაქტივობის) ურთიერთქმედების მექანიზმში. აქედან გამომდინარეობს ამ მექანიზმის მნიშვნელობა ვიბრაციის, როგორც უარყოფითი, ასევე დადებითი გავლენის შეფასების საქმეში.

ორგანიზმის პერიოდულ ზემოქმედებებზე რეაქციის ამ მექანიზმის უფრო დეტალური თეორიული ანალიზის მიზნით, მიზანშეწონილია ჩატარდეს შესასწავლი სისტემის მათემატიკური მოდელირება და რიცხობრივი ექსპერიმენტები, სისტემის მექანიკური და ნერვული კომპონენტების გათვალისწინებით.

მათემატიკური მოდელი, რომლითაც გამოკვლეული იქნა ბიომექანიკური რგოლი, წარმოადგენს ორი ძირითადი ნაწილის ერთობლიობას. პირველი მათგანი იძლევა საშუალებას განხილული იქნას რეალური ბიომექანიკური სისტემა კუნთში ენერჯის გარდაქმნით, ხოლო მეორე – ითვალისწინებს სისტემის ნერვულ კონტროლს ნეირონული ქსელის დახმარებით.

ვიბრაციის ზემოქმედებაზე ადამიანის ზედა კიდურის მამოძრავებელი აპარატის მექანიკური რეაქციის განტოლებათა სისტემა საბოლოო სახით გამოისახება შემდეგნაირად:

$$\ddot{x} + H_d \left(\dot{x} \right) + [1 + \delta_1 y] x = -\delta_2 y; \quad (1)$$

$$\dot{y} = \beta_1 x - \beta_2 x^2 - \gamma y,$$

სადაც $x = \frac{\varphi}{\psi_0}$, φ - ბიომექანიკური რგოლის კუთხური გადაადგილება, ψ_0

კუთხური კოორდინატის მაქსიმალური ცვლილება, $H_d = \lambda_1 \dot{x} + \left(\lambda_3 \dot{x} \right)^3$

დისიპაციური ძალა, λ_1 და λ_3 კოეფიციენტებია.

$$\delta_1 = \frac{k_1}{\omega_0 D_0}; \quad \delta_2 = H_0 B; \quad \gamma = \frac{k_1 + k_2}{\omega_0}; \quad \beta_1 = \beta_1^* \delta_1 \frac{1}{H_0}; \quad \beta_2 = \beta_2^* \delta_1^2 \frac{1}{H_0},$$

$$\omega_0^2 = \frac{J}{M_0} \text{ სისტემის საკუთარი წრიული სიხშირე, } D_0 = 1 / \left[1 + k_3 (k_1^{-1} + k_2^{-1}) \right],$$

k_1 -ჩაკეტილი ხიდურების წარმოქმნის სიხარის კონსტანტაა, k_2 -
მამუხრუჭებელი ხიდურების წარმოქმნის მუდმივაა, k_3 -მათ შორის

კავშირის მუდმივაა, H_0 დისიპაციის კოეფიციენტი, $B = \frac{\varphi_0}{\psi_0}$, J -

ბიომექანიკური რგოლის ინერციის მომენტი, M - კუნთების მიერ
განვითარებული სტატიკური ძალის მომენტი. ცვლადი მომენტისთვის
 $M(t) = M_0 + m(t)$, სადაც M_0 და $m(t)$ შესაბამისად მომენტის მუდმივი და

ცვლადი შემადგენლებია, $y = \frac{n}{\alpha_0}$, n - ჩაკეტილი ხიდურების რაოდენობაა, α_0

- აქტიური ხიდურების რაოდენობაა.

1 წარმოადგენს ბიომექანიკური რგოლის წონასწორობის მდგომარე-
ობასთან ახლოს კუთხური რხევების მათემატიკურ მოდელს, კუნთში
ძალის შინაგანი რეგულირებით. თავისი არსით იგი არის ავტორხევითი
სისტემის მოდელი, რომელიც საშუალებას იძლევა გამოვიკვლიოთ
სისტემის რეაქცია მასზე სხვადასხვა ზემოქმედების, მათ შორის
პერიოდული ზემოქმედების დროს.

ზოგადი მოდელის მეორე ნაწილი, კერძოდ, მასში ნერვული
კონტროლის გათვალისწინება, გამოიყენება ნერვულ-კუნთოვანი აპარატის
მათემატიკური მოდელის სახით, რომელიც აღწერს ნეირონული ქსელის
რეაგირებას გარე გამაღიზიანებლებზე და რომელიც შედგება ორი

ერთგვაროვანი პოპულაციისგან, კერძოდ, ამზნები $E(t)$ და დამამუხრუჭებელი $I(t)$ პოპულაციებისგან.

განტოლებათა სისტემა, რომელიც აღწერს ნეირონული ქსელის რეაქციების დინამიკას გარე ზემოქმედებებზე გამოსახება შემდეგნაირად:

$$\begin{aligned} \tau_0 \frac{dE}{dt} &= -E + \left(1 - \int_{t-\eta}^t E(t') dt'\right) \cdot S_E \int_{-\infty}^t e^{-\nu_E(t-t')} [O_1 E(t') - O_2 I(t') P(t')] dt'; \\ \tau_0 \frac{dI}{dt} &= -I + \left(1 - \int_{t-\eta}^t I(t') dt'\right) \cdot S_I \int_{-\infty}^t e^{-\nu_I(t-t')} [O_3 E(t') - O_4 I(t') Q(t')] dt'. \end{aligned} \quad (2)$$

P - აგზნების პოპულაციაზე გარე ზემოქმედებაა, ხოლო Q - იგივეა მამუხრუჭებელ პოპულაციაზე, S - პოპულაციის იმ ნეირონების რაოდენობაა (აგზნების და დამუხრუჭების), რომლებიც რეაგირებენ $x(t)$ ოქმედებაზე t დროში, O_1 პარამეტრი ახასიათებს აგზნების პოპულაციის შიგნით კავშირებს, O_4 - ანალოგიური პარამეტრია მამუხრუჭებელი პოპულაციის შიგნით, O_2 და O_3 შესაბამისად მამუხრუჭებელი პოპულაციის კავშირის პარამეტრია აგზნების პოპულაციაზე და პირიქით, τ - სინაპტიკური დაგვიანების ხანგრძლივობაა.

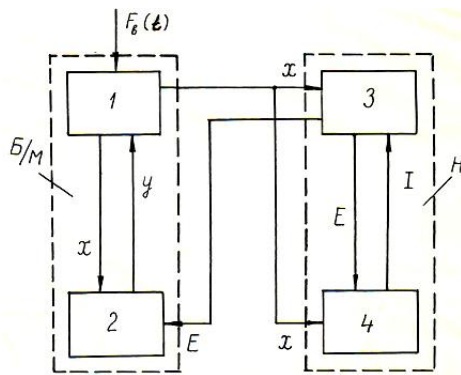
თუ გავაერთიანებთ 1 და 2 განტოლებებს საბოლოოდ მივიღებთ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემას, რომელიც აღწერს ერთრგოლიანი ბიომექანიკური სისტემის რხევებს გარე პერიოდული ზემოქმედების დროს. იგი გამოსახება შემდეგი სახით:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + \lambda_1 \dot{x} + \left(\lambda_3 \dot{x}\right)^3 + [1 + \delta_1 y]x &= -\delta_2 y + F_g e^{i\omega\tau}; \\ \dot{y} &= -\gamma y + \beta_1 x - \beta_2 x^2 + \rho_0 E; \\ \dot{E} &= \frac{1}{\tau_0} \left\{ -E + \left(1 - \int_{t-\eta}^t E(t') dt'\right) \cdot S_E \int_{-\infty}^t e^{-\nu_E(t-t')} [O_1 E(t') - O_2 I(t') - \rho_1(x)] dt' \right\}; \\ \dot{I} &= \frac{1}{\tau_0} \left\{ -I + \left(1 - \int_{t-\eta}^t I(t') dt'\right) \cdot S_I \int_{-\infty}^t e^{-\nu_I(t-t')} [O_3 E(t') - O_4 I(t') + \rho_2(x)] dt' \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

სადაც $w = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{f}{f_0}$; f - აგზნების ძალის სიხშირეა, $F_g e^{i\omega t}$ წარმოადგენს

გარე დატვირთვას, ρ_0 , $\rho_1(x)$ და $\rho_2(x)$ გამოსაკვლევ სისტემაში ორ ავტორხეით კომპონენტს შორის კავშირებია,

განსახილველი ბიომექანიკური სისტემის გამარტივებული სქემა, რომელიც შედგება ოთხი ელემენტისგან, ნაჩვენებია ნახაზ 1-ზე. მოდელის თითოეული კომპონენტი არის მთლიანი სისტემის ქვესისტემა და განსაზღვრავს ამ ელემენტის ფუნქციონირებასთან დაკავშირებულ ბიოფიზიკურ პროცესს. სახელდობრ, პირველი

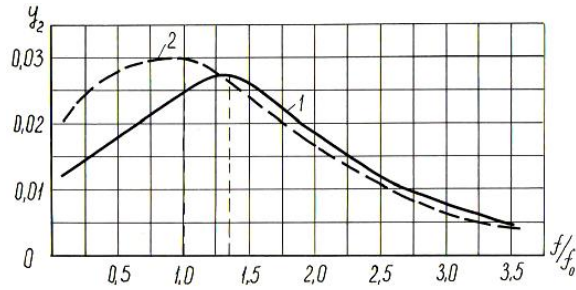


ნახ. 1, ბიომექანიკური რგოლის მოდელის შემადგენელი ნაწილები

ქვესისტემა დაკავშირებულია მექანიკურ პროცესებთან და განისაზღვრება სისტემის დრეკადი, ინერციული და დისიპატიური პარამეტრებით. მეორე ქვესისტემა გამოხატავს კუნთების შეკუმშვის ბიოფიზიკასთან კავშირს, ანუ ენერჯის გარდაქმნასთან დაკავშირებულ პროცესებს. მესამე და მეოთხე ქვესისტემები განპირობებულია ნეირონული ქსელის შერჩეული მოდელით.

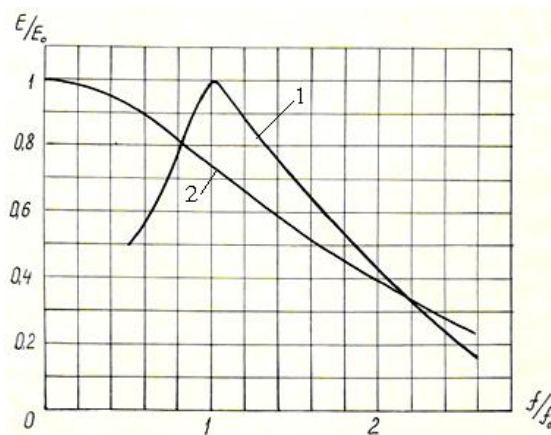
ქვემოთ მოყვანილია 3 განტოლებათა სისტემის ამოხსნით მიღებული შედეგები გრაფიკების სახით. კერძოდ ნახ. 4-ზე ნაჩვენებია ბიომექანიკური რგოლის ამპლიტუდურ-სიხშირული მახასიათებლების გრაფიკი გარე სიხშირის მოდულაციის ფართე დიაპაზონში, კუნთების დაძაბულობის ორი მნიშვნელობისთვის (20% და 30%). გრაფიკზე ყურადღებას იქცევს ის ფაქტი, რომ ადგილი აქვს რგოლის რხევების ამპლიტუდების

რეზონანსულ ზრდას. ამავე დროს რეზონანსული სიხშირეები კუნთების სხვადასხვა ფუნქციონალური მდგომარეობისთვის არის სხვადასხვა.



ნახ. 2. ბიომექანიკური რგოლის რხევების ამპლიტუდურ-სიხშირული მახასიათებლები

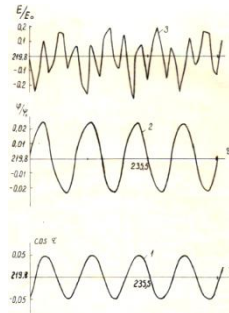
ნახ. 3-ზე მოცემულია ნეირონების ქსელის აქტივობის ცვლილების, გარე ზემოქმედების სიხშირის ცვლილებაზე დამოკიდებულების გრაფიკი. გრაფიკზე (1 მრუდი) კარგად ჩანს რხევების ამპლიტუდების ზრდის რეზონანსული ეფექტი, გარკვეულ სიხშირეზე. ნერვული სისტემის მდგომარეობის შეცვლის შემდეგ კი ასეთი ეფექტი არ აღინიშნება (2 მრუდი).



ნახ. 3. ნეირონული ქსელის რხევების ამპლიტუდურ-სიხშირული მახასიათებლები

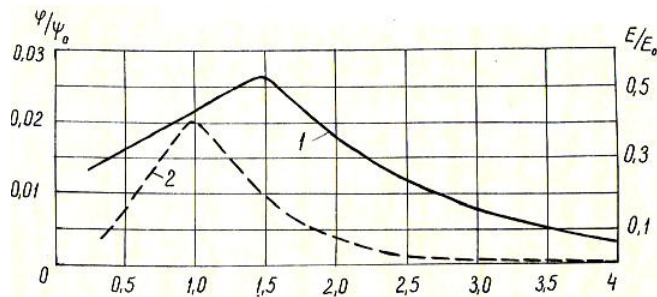
3 სისტემის ციფრული ექსპერიმენტით მიღებულმა შედეგებმა ასევე დააფიქსირა ნეირონის ქსელის აქტივობის რხევების სინქრონიზაცია გარე პერიოდულ ზემოქმედებებთან.

ნახ. 4-ზე ნაჩვენებია გარე ზემოქმედების – 1, რგოლის მექანიკური რხევების – 2, და ნეირონული ქსელის აქტივობის რხევები – 3, საიდანაც აშკარად ჩანს სინქრონიზაციის ეფექტი.



ნახ. 4. სინქრონიზაციის მოდელირების შედეგები

თეორიულ გამოკვლევებში ასევე აღსანიშნავია ის ფაქტი, რომ 3 სისტემაზე გარე პერიოდული ზემოქმედების დროს სიხშირეთა ცვლილების გარკვეულ დიაპაზონში დაფიქსირდა მექანიკური და ნერვული კომპონენტების რხევათა მაქსიმუმები (რეზონანსები) სხვადასხვა სიხშირეებზე, რაც ამ რეჟიმების დამოუკიდებლობაზე მიუთითებს. ბიომექანიკური რგოლის და ნეირონული ქსელის რხევების ამპლიტუდურ-სიხშირული დამოკიდებულებები ნაჩვენებია ნახაზ 5-ზე.



ნახ. 5. მექანიკური და ნეირონების აქტივობის რხევების ამპლიტუდურ-სიხშირული მახასიათებლები

შედეგებსა და განსჯაში, თავი III, მოცემულია ბიომექანიკური რგოლის გარე და შინაგანი რხევითი პროცესების ექსპერიმენტული გამოკვლევა ვიბრაციის ლოკალური ზემოქმედების დროს.

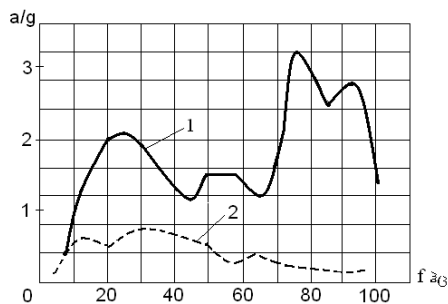
ადამიანის ორგანიზმი, როგორც ფიზიკური სხეული, შეიცავს მექანიკურ კომპონენტებს, რომლებიც ხასიათდებიან დრეკად-ბლანტი და ინერციული თვისებებით. შესაბამისად, ასეთი მიდგომით და მისი აქტიური

ან პასიური მდგომარეობით ვიბრაციულ გარემოში, ადამიანის ორგანიზმის პირველ რეაქციას ვიბრაციულ გამაღიზიანებელზე აქვს მექანიკური ბუნება. იგი გამოიხატება სხეულის სხვადასხვა ნაწილების და ორგანოების ქსოვილების კავშირების მექანიკური ძალებით გამოწვეულ დინამიკურ დეფორმაციებში და რხევებში, მათ შორის რეზონანსულში.

ადამიანის ზედა კიდური, თუნდაც გამარტივებულად წარმოდგენილი მხრის, წინამხრისა და მტევნის სახით, წარმოადგენს ბიომექანიკურ რგოლს, მრავალი თავისუფლების ხარისხით. ვიბრაციულ გარემოსთან მისი კონტაქტის და კუნთების მიერ განვითარებული დაძაბულობების დროს იგი განიცდის გარე რხევების გადაცემას და მათ შემდგომ გავრცელებას.

კვლევების პირველ ეტაპზე ჩატარებული იქნა ცდები, რომლებიც საშუალებას იძლევა ავაგოთ ხელის ნაწილების რეგულარული რხევების ამპლიტუდურ-სიხშირული მახასიათებლები; კერძოდ, მხრის და წინამხრის მტევნის რხევები, კვლევის სქემაში, წარმოადგენს ვიბრაციის წყაროს რხევების განმეორებას.

ნახაზ 6-ზე ნაჩვენებია ერთერთი გამოსაცდელის აჩქარებების ამპლიტუდურ-სიხშირული დამოკიდებულებები, რომლებიც მიღებულია ვიბრაციის ზემოქმედებით წინამხარზე (1 მრუდი) და მხარზე (მრუდი 2), დინამომეტრზე მტევნის მაქსიმალური ძალით მოჭერის დროს, რაც შეესაბამება პროცესში ჩართული ხელის კუნთების მაქსიმალურ დაძაბულობას.



ნახ. 6. მხრის და წინამხრის ამპლიტუდურ-სიხშირული დამოკიდებულება

მხრის, წინამხრისა და მტევნის მექანიკური რხევები, გამოსაცდელი ჯგუფისთვის, გამოკვლეული იქნა კიდურზე გადაცემული ვიბრაციის

სისშირის ცვლილების ფართე დიპაზონში (5-დან 150 ჰც-მდე) სამი ურთიერთმართობი კოორდინატთა ღერძების მიმართულებით.

ცდებმა უჩვენა, რომ სისშირის მოდულაციის დროს აჩქარებების ამპლიტუდების მაქსიმუმები და მინიმუმები, სამ ურთიერთ მართობულ სიბრტყეში გაზომვის დროს, ყველა შემთხვევაში არ ემთხვევა ერთმანეთს. გარდა ამისა, შეიმჩნევა რხევათა ამპლიტუდების მაქსიმუმების არსებობა 20 ჰც-თან ახლოს, ხოლო მინიმუმამდე მათი ვარდნა 80-120 ჰც-ს შუალედში. ეს მოვლენა მკაფიოდ გამოხატული არაა ცალკეულ ცდებში, თითოეული გამოსაცდელისთვის, მაგრამ კარგად ჩანს ანალოგიური სტატისტიკური დამოკიდებულებების აგებისას.

ინტერესის საგანს შეადგენდა განსაზღვრულიყო კიდურის რეაქცია გადაცემული ვიბრაციის ამპლიტუდების ვარიაციის დროს. აღნიშნულის შესაბამისად ჩატარებული იქნა ცდები, რომლის მიზანი იყო ხელის ნაწილების რხევების ინტენსივობის განსაზღვრა, ვიბრაციის ამპლიტუდების ცვლილების დროს. ცდების დაგეგმვის პროცესში შენარჩუნებული იყო პრინციპი, რომლის თანახმად გამოიკვლეოდა სისტემის ქცევა ერთი ცვალებადი პარამეტრის ზემოქმედებით, როდესაც სხვა პარამეტრები იყო უცვლელი. კერძოდ, კუნთების დაძაბულობა შეესაბამებოდა მაქსიმალურის 10%-ს, სისშირე კი თუმცა იცვლებოდა, ანათვლები აიღებოდა მის დიდსკრეტულ მნიშვნელობებზე, 10 ჰერცის ინტერვალით.

ცდებმა უჩვენა, მაგალითად წინამხრისათვის, რხევების ინტენსივობის არაწრფივ დამოკიდებულებაზე გადაცემული რხევების ამპლიტუდების ცვალებადობის მიმართ.

ხელის ბიომექანიკური გამოკვლევების შემდეგი ეტაპი იყო “მტევანი-წინამხარი-მხარი” სისტემაზე ლოკალური ვიბრაციის გადაცემის თავისებურებების შესწავლა, ხელის მიერ განვითარებული ძალების ცვლილების დროს.

კუნთების სტაციონარული შეკუმშვის ცვალებადობის დროს, რაც შეესაბამება დინამომეტრზე მოჭერის ძალის ცვლილებას, იცვლება ხელის მექანიკური მახასიათებლები და პირველ რიგში მისი სიხისტე და

დემპფირება. სწორედ ამ პარამეტრების ცვლილება განსაზღვრავს წინამხარიმხარის სისტემის რხევების ამპლიტუდების ცვლილებას. ამ საკითხის შესასწავლად ჩატარებული იქნა ექსპერიმენტული გამოკვლევები, რომლებიც იძლევა საშუალებას ვიბრაციული ზემოქმედების დროს დავამყაროთ დამოკიდებულებები კიდურის ნაწილების რხევებსა და კუნთების სტაციონარულ შეკუმშვებს შორის.

მიღებული შედეგებიდან ჩანს, რომ კუნთების სტაციონარული შეკუმშვის ძალის ზრდა, მოქმედი ვიბრაციის სიხშირის ფიქსირებულ მნიშვნელობაზე, ზრდის რხევების ამპლიტუდებს, როგორც წინამხარში ასევე მხარში. აქვე უნდა შევნიშნოთ, რომ იგივე პირობების დაცვით, შეკუმშვის ძალის შემცირების დროს მცირდება კიდურის რხევის ამპლიტუდები, მაგრამ, კლების დროს ადგილი აქვს ამპლიტუდების უფრო მაღალ მნიშვნელობებს, რაც საბოლოო ჯამში ქმნის ეგრეთ წოდებულ მარყუქს. ანუ კიდურის სიხისტესა და დემპფირებას გააჩნიათ არაწრფივი მახასიათებლები.

დღეისათვის, ადამიანის ორგანიზმის ლოკალური ვიბრაციაზე რეაქციის ერთერთ ადექვატურ ფიზიოლოგიურ მახასიათებელს წარმოადგენს კუნთების ბიოელექტრული აქტივობა. კუნთების ბიოაქტივობა არის რხევითი სიგნალი, რომელიც ხასიათდება ორი პარამეტრით: სიხშირით და ამპლიტუდით. მნიშვნელოვან გარემოებას წარმოადგენს ის, რომ ეს ორი პარამეტრი ინფორმაციის მატარებელია სენსომოტორული სისტემის სხვადასხვა დონის მდგომარეობის შესახებ. ამიტომ, ორგანიზმის ბიოლოგიური რეაქციის შეფასების კრიტერიუმად კუნთების ბიოაქტივობის შერჩევა შეიძლება ჩაითვალოს დასაბუთებულად, რადგან მისი დახმარებით შეიძლება დავახასიათოთ ვიბრაციული ზემოქმედების შედეგად ორგანიზმში მიმდინარე ცვლილებები.

გარე ვიბრაციისა და კუნთის ბიოელექტრული იმპულსაციების რხევითი ბუნების ადექვატურობის გამო, ვიბრაციას შეუძლია ჩაერიოს მისი მართვის ორგანიზაციაში და დაიჭიროს რიტმი, რის შედეგად ხდება ზემოქმედებების დადებითი ან უარყოფითი გამოვლინებები.

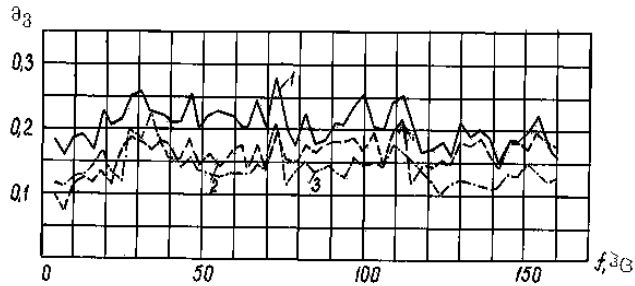
ამ პოზიციიდან გამომდინარე, ნაშრომში მოყვანილი ექსპერიმენტული გამოკვლევების მასალები წარმოადგენს ორი, გარე და ორგანიზმს შიგა რხევითი პროცესის ურთიერთმოქმედების კვლევის შედეგებს. ისინი ჩატარებული იყო ადამიანის ორგანიზმის ზედა კიდურის ბიომექანიკურ მახასიათებლებთან ერთად.

ვიბრაციული ზემოქმედების დროს კუნთების ბიოაქტივობის რეგისტრაცია და მისი პარამეტრების ექსპერიმენტული გამოკვლევების თანმიმდევრობა დაახლოებით ისეთივე იყო, როგორც ხელის მექანიკური რხევების შესწავლის დროს.

ცდების ამ სერიაში გამოკვლევას ექვემდებარებოდა კუნთების ოთხი ჯგუფი: თითების ზედაპირული მომხრელი და გამშლელი, და, ხელის ორთავა და სამთავა კუნთები. აღწერილი მეთოდით ხდებოდა კუნთების ბიოელექტრული აქტივობის რეგისტრაცია.

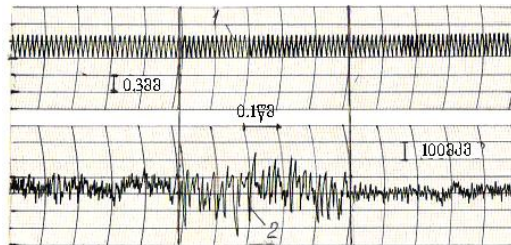
საძიებო დამოკიდებულებების აგებისთვის უშუალო მონაცემები აიღებოდა ელექტრომიოგრამების რხევების ოსცილოგრამებიდან. მიღებული მონაცემების ანალიზი უჩვენებს, რომ, ყველა გამოსაცდელისთვის კუნთების დაძაბულობის შემთხვევაში, შეიმჩნეოდა კუნთების ბიოაქტივობის რხევების ამპლიტუდების კანონზომიერი ზრდა სიხშირეების საკმაოდ ფართო დიაპაზონში (10 დან 150 ჰც-მდე), ვიდრე კუნთების მოდუნებულ მდგომარეობაში. გარდა ამისა, როგორც ცდებიდან ჩანს, მიწოდებულ რხევის სიხშირეს ეკისრება მნიშვნელოვანი როლი კუნთების ბიოაქტივობის რხევების ორგანიზაციაში. გამოკვლევებმა ასევე უჩვენა, რომ სიხშირის ცვლილების მთელ დიაპაზონში ბიოაქტივობის რხევების ამპლიტუდების ფორმირება არათანაბარია. ზოგიერთ სიხშირეზე ადგილი აქვს კუნთების აქტივობის ნახტომისებურ ცვლილებას. შესაბამისად კუნთების ბიოაქტივობა მეტნაკლებად მგრძობიარეა გარე ზემოქმედების სხვადასხვა სიხშირეების მიმართ. არსებობს სიხშირეების ზონები, სადაც ყველა გამოკვლევული კუნთები რეაგირებენ ერთნაირად და აქვთ აქტივობის ან მაქსიმუმი ან მინიმუმი. სიხშირეები, რომლებზეც შეიმჩნევა ბიოაქტივობის რხევების ამპლიტუდების მაქსიმუმები, სხვადასხვა გამოსაცდელისთვის არის სხვადასხვა.

გარე ვიბრაციის ზემოქმედების დროს კიდურის კუნთის ბიოელექტრული აქტივობის ამპლიტუდურ-სიხშირული დამოკიდებულება ნაჩვენებია ნახაზ 7-ზე. ნახაზზე 1 – ტეხილი შეესაბამება კუნთი-მომხრელის აქტივობის ცვლილებას, 2 – გამშლელისას, ხოლო 3 – ორთავა კუნთის აქტივობის ცვლილებას.



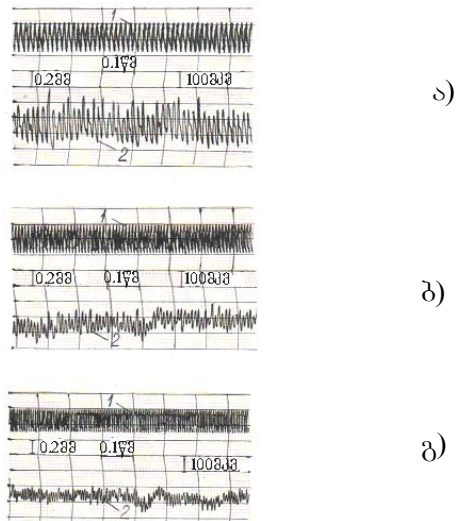
ნახ. 7. კიდურის კუნთების ბიოელექტრული აქტივობის ამპლიტუდურ-სიხშირული დამოკიდებულება

ნახაზ 8-ზე ნაჩვენებია ვიბრატორის – 1 და ბიოაქტივობის რხევების ოსცილოგრამები აგზნების სიხშირის სამი მნიშვნელობისთვის: ა) $f = 70$ ჰც, ბ) $f = 73$ ჰც და გ) $f = 76$ ჰც. ოსცილოგრამები უჩვენებენ ბიოაქტივობის რხევების რეზონანსული რეჟიმის გავლას.



ნახ. 8. კუნთის ბიოაქტივობის რხევები რეზონანსულ რეჟიმში

ნახაზ 9 ა), ბ), გ)-ზე ნაჩვენებია კუნთ-მომხრელის მიოგრამების რხევების ჩანაწერების ნიმუში, იძულებით რხევის რეჟიმებში (2 ოსცილოგრამა). ვიბრაციის სიხშირეებია: ა) $f = 43$ ჰც, ბ) $f = 78$ ჰც, გ) $f = 110$ ჰც. იქვეა მოცემული ვიბრატორის (დინამომეტრის) რხევების ოსცილოგრამა (1). ვიბრატორის და ბიორხევების ოსცილოგრამების შედარება უჩვენებს კუნთების ბიოელექტრული აქტივობის რეზონანსულ რხევით რეჟიმებს.



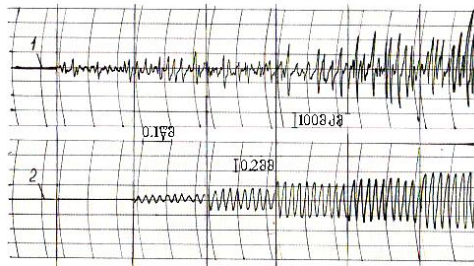
ნახ. 9. კუნთ-მომხრელის მიოგრამების რხევები

გარე ვიბრაციის ამპლიტუდის ცვლილებას, ასევე გავლენა აქვს კუნთის ბიოელექტრულ აქტივობაზე. მისი გავლენის ზოგადი ხასიათი გამოიხატება იმაში, რომ იზრდება ბიომექანიკური რგოლის რხევათა ინტენსივობა. შესაბამისად იზრდება კუნთების, როგორც ამ რგოლის შემადგენელი ნაწილის აქტივობაც.

ამავე დროს, არსებობს განსხვავებაც ვიბრაციის ამპლიტუდების გავლენაში ბიომექანიკური რგოლის მექანიკური და ბიორხევების ამპლიტუდების ფორმირების საკმეში. პირველ შემთხვევაში, როგორც აღწერილი იყო, ადგილი აქვს მათ არაწრფივ კავშირს. ანუ, გამოსაკვლევი რგოლი გარე ვიბრაციის რხევების ამპლიტუდების ცვლლებაზე რეაგირებს როგორც მექანიკური რხევითი სისტემა, არაწრფივი მექანიკის კანონებით. მეორე შემთხვევაში, ბიორხევების ამპლიტუდების ფორმირება მიმდინარეობს სხვაგვარად. იმის გამო, რომ კუნთების ბიოელექტრული აქტივობის რხევები შეესაბამება ავტორხევების რეჟიმს, გარე ვიბრაციის მოქმედების დროს ხდება ამ რეჟიმის “დაჭერა” და კუნთების ბიოაქტივობის რხევების რიტმის წამყვანი ამ შემთხვევაში არის ვიბრაციის სისშირე. ვიბრაციის ამპლიტუდა ამ დროს უფრო ეფექტურად მოქმედებს იმ სისშირეებზე, რომლებიც ახლოსაა ან ემთხვევა, მათ შორის ჯერადად, კუნთების ბიოაქტივობის რხევების სისშირეებს, ვიბრაციული ზემოქმედების გარეშე.

ზოგადად, კუნთების ბიოაქტივობის რხევების ამპლიტუდების ცვლილება მქლავნდება გარკვეულ ზღვრებში. არსებობს მათი მნიშვნელობების “ზღურბლი” და “ჭერი”, რომლის ქვემოთ და ზემოთ კუნთების აქტივობა ვიბრაციის ამპლიტუდის ცვლილებაზე არ რეაგირებს.

ნახაზ 10-ზე ნაჩვენებია მომხრელი კუნთის ელექტრომიოგრამების ჩანაწერების ნიმუშები (1 ოსცილოგრამა) ვიბრაციის ამპლიტუდის 0-დან 0.9 მილიმეტრამდე ცვლილების დროს, $f = 40$ ჰერცის სიხშირეზე. იქვე მოცემულია ვიბრატორის რხევების ოსცილოგრამები (2). ა) შეესაბამება კუნთის მოდუნებულ მდგომარეობას, ბ) კუნთის დაძაბულობა $F = 10\%$ ვიბრაციის ზემოქმედების გარეშე, გ) ვიბრაცია ამპლიტუდით $A = 0.1$ მმ, დ) $A = 0.3$ მმ, ე) $A = 0.5$ მმ, ვ) $A = 0.7$ მმ და ზ) $A = 0.9$ მმ.



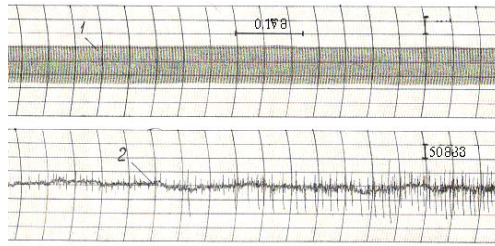
ა) ბ) გ) დ) ე) ვ) ზ)

ნახ. 10. მომხრელი კუნთის მიოგრამების რხევების დამოკიდებულება ვიბრაციის ამპლიტუდაზე

კუნთების ბიოელექტრული აქტივობის პარამეტრებზე ვიბრაციის გავლენის განხილვის დროს, ერთერთ ცენტრალურ საკითხს წარმოადგენს თვით კუნთების ფუნქციონალური მდგომარეობა. მათი აგზნების სვადასხვა დონეზე, ვიბრაციის აღტქმის პროცესი მიმდინარეობს სხვადასხვაგვარად.

საჭიროა ხაზი გაესვას ერთ მნიშვნელოვან გარემოებას. კერძოდ, იმას, რომ მოდუნებულ კუნთზე, ანუ როდესაც კუნთი დაძაბული არაა, ვიბრაციის ზემოქმედების დროს შეიმჩვეა კუნთში ბიოაქტივობის წარმოქმნა და მისი გაძლიერება. მშვიდ მდგომარეობაში მყოფ კუნთში ბიოელექტრული აქტივობის ზრდა, ანუ მასში დაძაბულობის გამოჩენა დამოკიდებულია ვიბრაციის პარამეტრებზე. ეს მოვლენა შედარებით ადვილად ვითარდება ვიბრაციის სიხშირის 30-100 ჰერცების დიაპაზონში

და მკაცრად ინდივიდუალურია თითოეული ადამიანისათვის. ამ მოვლენის ტიპური მაგალითი მოყვანილია ნახ. 11ზე.



ნახ. 11. მოღუნებულ კუნთში ვიბრაციის ზემოქმედების შედეგად აღძრული ძაბვის ოსცილოგრამა

როდესაც განიხილება ბიომექანიკური რგოლი მისი კუნთოვანი სისტემის ნერვული კონტროლით, ვიბრაციის ექსპოზიციის დრო იძენს პირველხარისხოვან მნიშვნელობას. ამაში იგულისხმება დაღლილობის საკითხები, რომლითაც ხასიათდება კუნთების ბოჭკოები, როგორც დროის ფუნქციები კუნთების შეკუმშვების ფონზე.

ვიბრაციის ექსპოზიციის დროსთან დაკავშირებული საკითხების შესასწავლად ჩატარებული იქნა სპეციალური ცდები, რომლებშიც გამოკვლეული იქნა კუნთების აქტივობის ცვლილებები დროის მიმდინარეობაში, მათი სხვადასხვა აგზნების დონის დროს.

გარე ზემოქმედების გარეშე, კუნთების დაძაბულობის წინასწარმა გამოკვლევებმა უჩვენა, რომ დაძაბულობის გაზრდით მცირდება მათი ხანგამძლეობის დრო. ამავე დროს, სხვადასხვა გამოსაცდელისთვის დრო იყო სხვადასხვა. კუნთების ხანგამძლეობა დამოკიდებულია ადამიანის ანტროპომეტრულ მონაცემებზე და მის ფიზიკურ მომზადებაზე. ხანგამძლეობის დროის გაზრდა ადამიანებისთვის, რომლებზეც ცდები იქნა ჩატარებული, საკმაოდ დიდია. აქვე უნდა აღვნიშნოთ, რომ ამ ფიზიოლოგიის თვალსაზრისით სავსებით ცხად საკითხებს გამოკვლევებში ყურადღება ექცეოდა იმიტომ, რომ კუნთის დაღლილობის შესწავლის დროს მნიშვნელოვანია მისი აგზნების დროის იმ მომენტის გათვალისწინება, როდესაც მიეწოდება ვიბრაცია, ანუ მიეწოდება იგი შეკუმშვის დასაწყისში თუ დაღლილობის დადგომის შემდეგ. კუნთების ბიოაქტივობის რეაქცია ვიბრაციულ გამაღიზიანებელზე სხვადასხვა ფაზაში არის სხვადასხვა.

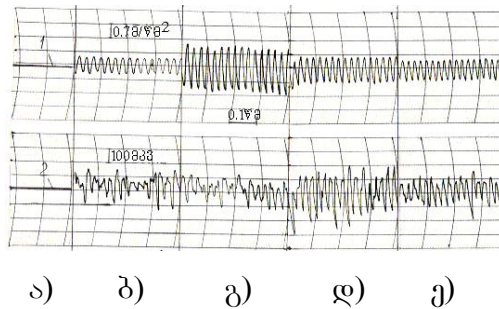
უფრო მნიშვნელოვანი ეფექტი ვიბრაციის მოქმედების დროს გამოიხატება აქტივობის ამპლიტუდის გაზრდაში, რომელის უფრო მეტია დადლილობის ფონზე, ანუ პერიოდში, რომელიც წინ უსწრებს განვითარებული ძაღვის შენარჩუნების შემდგომ გაგრძელებაზე უარის თქმას.

აღწერილი პროცესები, ვიბრაციული ზემოქმედების დროს, მიმდინარეობს ერთდროულად, ანუ სისტემის მექანიკური და ბიოელექტრული კომპონენტები ურთიერთკავშირშია.

მიუხედავად მექანიკური და ბიოელექტრული რხევების ურთიერთკავშირისა, მათი პარამეტრების დამოკიდებულება ვიბრაციაზე უმრავლეს შემთხვევაში ატარებს დამოუკიდებელ ხასიათს. ეს ფაქტი ასახსნელად მარტივია, რადგან ისინი წარმოადგენენ სხვადასხვა ფიზიკური ბუნების მქონე სისტემების რხევებს.

პირველ შემთხვევაში, ხელის მექანიკური რხევების განხილვის დროს, პროცესი მიმდინარეობს მექანიკური რხევითი სისტემის იძულებითი რხევების კანონზომიერების მიხედვით. სახეზეა რხევების რეზონანსული რეჟიმები, ანუ ხდება ამპლიტუდების ზრდა ზემოქმედების გარკვეულ სიხშირეებზე. ამ პროცესებს არ შეესაბამება კუნთების ბიოელექტრული აქტივობის რხევების ამპლიტუდების რეზონანსული ზრდა. მეორე შემთხვევაში, როდესაც ანალიზი უკეთდება ვიბრაციის ბიოლოგიურ ზემოქმედებას, პროცესს აქვს კუნთების ბიოაქტივობის ავტორხევითი რეჟიმის სიხშირის წატაცების ხასიათი. ამ დროს, როგორც ცდები უჩვენებს, წატაცება წარმოებს აგზნების სიხშირის საკმაოდ ფართე დიაპაზონში. ამ რეჟიმებში ავტორხევების სიხშირეები სინქრონიზაციაში მოდის გარე იძულებით სიხშირესთან (ჰარმონიული წატაცება). როდესაც სიხშირეები მცირედ განსხვავდება ერთმანეთისგან, ხდება ე.წ. ცემა. ძირითადი სიხშირის ჯერად სიხშირეებზე კი ხდება სიხშირეთა სუბჰარმონიული და სუპერ-ჰარმონიული წატაცება. თუ ვიბრაციის ამპლიტუდები მაღალია, წატაცება ხდება ძირითად ჰარმონიკაზე, კვლევის დიაპაზონის ნებისმიერ სიხშირეზე. ყველა რეზონანსულ რეჟიმში ადგილი აქვს კუნთების ბიოაქტივობის რხევების ამპლიტუდების შესაბამის ზრდას.

ვიბრაციის ზემოქმედების დროს მექანიკური და ბიო რხევების ერთ-მანეთისგან დამოუკიდებელი ხასიათი შეიძლება წარმოვადგინოთ კიდურის შემადგენელი ნაწილების მაგალითზე. ნახაზ 11-ზე ნაჩვენებია წინამხრისა (1) და თითების მომხრელი კუნთის (2) რხევების ოსცილოგრამები გარე ვიბრაციის მოდულაციის დროს. ოსცილოგრამების შედარება, აგზნების სხვადასხვა სიხშირეებზე, ა) 0 ჰც, ბ) 40 ჰც, გ) 43 ჰც, დ) 46 ჰც, ე) 49 ჰც უჩვენებს ამ რხევების ცვლილების ერთანეთისგან დამოუკიდებელ ხასიათს.



ნახ. 11. კიდურის ნაწილების მექანიკური და ბიორხევების ოსცილოგრამები

კუნთების ჯამური ბიოელექტრული აქტივობა, მათი შეკუმშვის დროს, წარმოადგენს არასტაციონარული შემთხვევითი პროცესის რხევით სიგნალს. კუნთების დაძაბულობის გაზრდით კანონზომიერად იზრდება მათი ბიოაქტივობის რხევების ამპლიტუდები. მაგრამ ამ სიგნალების ანალიზის დროს უფრო ინფორმატიულს წარმოადგენს მათი სპექტრული შემადგენლობა.

სპექტრული ანალიზით გამოკვლევის შედეგებმა უჩვენა კუნთების ბიოელექტრული აქტივობის რხევების სპექტრის არაერთგაროვნება, ცვალებადი პარამეტრის ვარიაციების დროს. სპექტრის შემადგენლობაშია ჰარმონიკები, რომლებიც ჯგუფდებიან სიხშირეთა გარკვეულ ზღვრებში. ჰარმონიკების ამპლიტუდების თანაფარდობები არ წარმოადგენენ მუდმივ სიდიდეებს. ისინი იცვლებიან კუნთების სტატიკური დაძაბულობის ცვლილებასთან ერთად, რაც საბოლოო ჯამში ცვლის კუნთების ბიოაქტივობის სიხშირეებსა და ამპლიტუდებს.

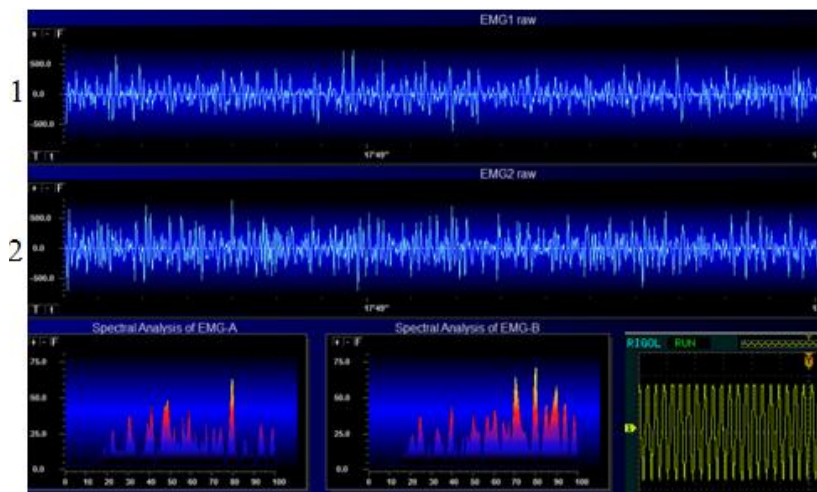
კუნთების აქტივობა მტვერის მიერ განვითარებული ძაღვის ზრდის შემთხვევაში, მისი საერთო ღონის ზრდის გარდა, ცვლის სპექტრულ შემადგენლობასაც.

როგორც ცდები უჩვენებს კუნთების აქტივობის სპექტრული შემადგენლობა დამოკიდებულია ასევე ექსპოზიციის დროზე, რომლის მიმდინარეობაშიც ხდება სტატიკური ძაღვის განვითარება. კუნთების დაღლილობის მდგომარეობამდე სიახლოვის დროს ბიოაქტივობის რხევების სპექტრი იცვლება და მის გაფართოებასთან ერთად, რაც ნიშნავს სპექტრში ახალი ჰარმონიკების გაჩენას, აქვს საერთო ღონის მატების ტენდენციაც.

ვიბრაციის ზემოქმედებით ხდება კუნთების ბიოაქტივობის რხევების ორგანიზაცია. განსაკუთრებით ეს ეხება რხევის სიხშირეს. ეს ფაქტი ფიზიოლოგიაში ცნობილია როგორც “რიტმის ათვისება”, ან “სინქრონიზაცია” გარე სიხშირესთან. სინქრონიზაციის რეჟიმში ვიბრაციის პარამეტრებს აქვს გადამწყვეტი მნიშვნელობა. იგი შეიმჩნევა ვიბრაციის სიხშირის ცვალებადობის საკმაოდ ფართე დიაპაზონში. მაგრამ, უფრო მკვეთრად გამოხატულია იმ სიხშირეებზე, რომლებიც ემთხვევა კუნთების ბიოიმპულსაციის სპექტრში შემავალი იმ ჰარმონიკების სიხშირეებს, რომლებსაც შეიცავს კუნთი ვიბრაციული ზემოქმედების გარეშე.

ნახაზ 12-ზე მოყვანილია კუნთების ბიოელექტრული აქტივობის რხევების სპექტროგრამები ვიბრაციის $f = 80$ ჰც სიხშირით მოქმედების დროს. ვიბრაციის ამპლიტუდაა $A = 1,0$ მმ, ხოლო კუნთების სტატიკური დაძაბულობა 25%. სპექტროგრამებში კარგად ჩანს სპექტრში არსებული ჰარმონიკები, რომელთა სიხშირეები ემთხვევა გარე ვიბრაციის სიხშირეს. იქვეა მოყვანილი ვიბრატორის რხევების ამპლიტუდების სპექტროგრამა.

განსაკუთრებული ყურადღების ღირსია ისეთი ფაქტი, რომელიც შესაძლოა წარმოადგენს ცენტრალურ საკითხს ვიბრაციის ბიოლოგიური ზემოქმედების დროს. სინქრონიზაციის დადგომის და ორგანიზმის მიერ მიწოდებული რიტმის მდგრადად ათვისების შემდეგ, რამოდენიმე ხნის განმავლობაში, კუნთების ბიოაქტივობის რხევების სპექტრში შეიმჩნევა



ნახ. 12. თითების მოძრედი-1 და გამწლედი-2 კუნთების სინქრონიზაციის მიოგრამები

$$A = 1,0 \text{ მმ}, f = 80 \text{ ჰც}, F = 25\% (10 \text{ კგ})$$

შესაბამისი სიხშირის ჰარმონიკის არსებობა ვიბრაციის მოხსნის შემდეგაც. აუცილებელ პირობას ამ შემთხვევაში წარმოადგენს კუნთის იმ დაძაბულობის შენარჩუნება, რაც მას გააჩნდა ვიბრაციის მოქმედების დროს. დრო, რომლის განმავლობაშიც შეინარჩუნება ათვისებული რიტმი სხვადასხვა გამოსაცდელისთვის სხვადასხვაა. იგი გრძელდება რამოდენიმე წამიდან 20-30 წამამდე.

დასკვნა

1. განვითარებულია ახალი პრგრესული მიმართულება ადამიანის მამოძრავებელი აპარატის ვიბროდაცვის საკითხებში, რომელიც ეფუძნება ორი ურთიერთმოქმედი, გარე და ორგანიზმის შიგა, რხევითი პროცესის გამოკვლევას.
2. დამუშავებულია ბიომექანიკური რგოლის დინამიკური მახასიათებლების ექსპერიმენტული გამოკვლევის მეთოდი, რომელიც ემყარება მექანიკური და ბიორხევების ამპლიტუდურ-სიხშირული დამოკიდებულებების გაზომვებს, ვიბრაციის ლოკალური ზემოქმედების დროს. შექმნილია დანადგარი ადამიანის ორგანიზმის ვიბრაციულ გამაღიზიანებელზე რეაქციის მახასიათებელი პარამეტრების ინტეგრალურად შესაფასებლად.
3. დამუშავებული მეთოდების საფუძველზე ჩატარებულია ექსპერიმენტული გამოკვლევები, რომლებიც იძლევა საშუალებას დავადგინოთ ბიომექანიკური სისტემების თვისებები და კანონზომიერებები, ვიბრაციის ლოკალური ზემოქმედების დროს. სახელდობრ:
 - ადამიანის კიდურის სივრცით რხევებში მიმართული ვიბრაციის ენერჯის არათანაბარი განაწილების კანონზომიერებები, რომლის ინტენსივობა დამოკიდებულია გადაცემული ვიბრაციის პარამეტრებზე და კუნთების დაძაბულობაზე.
 - კიდურის ნაწილების რხევების მაქსიმალური ამპლიტუდების სიხშირეების ძვრა, რომელიც ცალსახად არის კავშირში კუნთების სტაციონარული შეკუმშვის ცვილებასთან და რაც ადასტურებს სისტემის დრეკად-ჰისტერეზისული კავშირების არაწრფივობას.
 - კუნთის მამოძრავებელი აქტივობის ცვლილების კანონზომიერება, რომელიც მდგომარეობს იმაში, რომ მისი ჯამური ბიოელექტრული აქტივობის დონე, მოდუნებულ მდგომარეობაში და სტაციონარული შეკუმშვების დროს, რელიეფურადაა კავშირში ვიბროზემოქმედების სიხშირესთან. ვიბრაციის ამპლიტუდა ამ დროს ცვლის ზემოქმედების ინტენსივობას.

- კუნთის თვისება, შემავალი პარამეტრების და მისი ფუნქციონალური მდგომარეობის უცვლელობის დროს, შეიცვალოს ბიოაქტივობა ვიბროზე-მოქმედების დროის ხანგრძლივობით.

- ორგანიზმის თვისება აითვისოს გარედან მიწოდებული რიტმი, რაც გამოიხატება კუნთების ბიოელექტრულ აქტივობასა და გარე ვიბრაციას შორის სინქრონიზაციასა და რეზონანსულ რეჟიმებში და ამ რეჟიმების ადრე უცნობი რაოდენობრივი თანაფარდობების დადგენა, რომლებიც ინდივიდუალურია თითოეული ადამიანისთვის.

- ბიორხევების სპექტრის მაქსიმუმების ცვლილებათა კანონზომიერებები სინქრონიზაციის რეჟიმში, რასაც განაპირობებს ვიბრაციის სიხშირის, სტატიკური დაძაბულობის და ვიბროექსპოზიციის ცვლილებები.

- კუნთების თვისება გაზარდოს სინქრონიზაციის ეფექტი მათი დადლილობის შედეგად.

4. ციფრული მეთოდების გამოყენებით, კომპიუტერზე მათემატიკური მოდელის ამოხსნით მიღებულია შედეგები, რომლებიც საშუალებას იძლევა შევადაროთ ისინი ექსპერიმენტული გამოკვლევებით მიღებულ შედეგებს. კერძოდ, ნაჩვენებია იმიტაციური მოდელირების მეშვეობით რგოლის მექანიკური რხევების და ნეირონული ქსელის რხევების სინქრონიზაციის რეჟიმების რეალიზაციის შესაძლებლობა, გარე პერიოდული ზემოქმედების დროს.

- მიღებულია ბიომექანიკური რგოლის მექანიკური რხევების მაქსიმალური ამპლიტუდების სიხშირეებისა და ნეირონული ქსელის აქტივობის რხევების სიხშირეების დამოკიდებულებები კუნთების დაძაბულობასა და ნეირონული ქსელი მდგომარეობაზე.

ნაშრომის ძირითადი დებულებები მოხსენებული იქნა:

1. VI საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე “Science and Education”. 2014, Nice, France
2. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე “Mechanics 2014”. Tbilisu, Georgia

დისერტაციის ძირითადი შინაარსი გამოქვეყნებულია სტატიების სახით სამეცნიერო-ტექნიკურ ჟურნალებში:

1. Г.Г. Цулая, М.Г. Цулая. Вопросы виброзащиты биомеханических систем. Problems of Applied Mechanics №2 (3), Tbilisi, 2001, pp. 55-56.
2. Н. Цулая, М. Цулая. Теоретические исследования динамики трехмассной вибрационной машины. Научно-технический журнал “ТРАНСПОРТ” №1-2 (41-42), Тбилиси, 2011, стр. 66-70.
3. Н. Tsulaia, М. Tsulaia, М. Jamburia. New Method of Registration of Reaction of the Human Organism on the Vibration Local Influence. Problems of Mechanics №2 (47), Tbilisi, 2012, pp. 50-53.
4. М. Tsulaia. Methodical Framework of Vibro-simulators’ Application and Assessment Criteria for Vibrostimulation Parameters’ Adequacy. Problems of Mechanics № 4 (53), Tbilisi, 2013, pp. 76-80.
5. Г.Г. Цулая, М.Г. Цулая, М.Е. Шилакадзе. Методические основы выбора параметров вибрации вибротренажеров и критерии оценки адекватности вибростимуляции. Proceeding of VI International Conference of Science and Education. Nice, France. 2014, pp. 39-42.
6. М. Tsulaia, Н. Tsulaia. Modeling Biomechanical Systems at External Periodic Influence. Proceeding of International Conference “Mechanics 2014”. Tbilisi, Georgia, 2014, pp. 88-92.

Abstract

Along with oscillating – undulatory natural processes such as gravity, electro-magnetic radiation, ionization etc. permanently influencing human organism, vibration and noise are found to be the most widespread.

Development of new superfast machines and high speed instruments and devices have gone far beyond the development of effective and reliable vibroprotection solutions of human-operators. On the practice the existing vibroprotection solutions and methods do not guarantee proper security of people working in vibro-dangerous professions and environments. Correspondingly, the problem of vibroprotection of human-operators seeks for the solution of difficult and complicated issues through nontraditional methods and fundamentally different approaches.

While working on the mentioned problem solution through bridging theoretical and practical ideas a model based on interaction of two oscillatory processes has been picked out. Consequently, the goal of this work is the study of vibration influence mechanism on the human organism through research of properties and regularities interaction of two oscillatory processes: mechanical – local vibration and muscle's bioelectric activity.

Theoretical and experimental research methods of mechanical and bioelectric oscillations of biomechanical circle have been elaborated to achieve this goal and corresponding results have been obtained under the influence of local vibration, which represents the scientific novelty of the work performed.

Particularly, properties and regularities of biomechanical system are being established, namely:

- Human biomechanical circle mechanical spatial oscillations' regularities that depend on vibration parameters and muscle tension.
- Dependence of included into vibration influence muscles' cumulative bioelectrical activity parameters on vibration parameters and muscles' functional state.
- Relationship of biomechanical circle muscles' mechanical and bioelectrical oscillations under external vibration exposure.
- Property of human organism to absorb externally fed rhythm and quantitative regularities of synchronization between external vibration and muscle's cumulative bioelectrical activity.

Mathematical model of biomechanical circle considering mechanical and neural components of the closed system has been composed. By means of digital experimental research methods of math models the synchronization and resonance regimes are obtained between circle mechanical oscillations, neuron activity and external periodical exposure.

Practical value of the work is that obtained quantitative regularities let us approach the vibroprotection problem of workers with vibro-dangerous professions from the new, still unexplored position and utilize them in regulatory sphere of vibration parameters. On the bases of results obtained it's possible to develop technical solutions for human muscle system functional condition and stimulation diagnostics.

Performed work contains also the survey of references on the subject and critical analysis used in setting up the work tasks.

Principal part of the work contains description of device-installation complex through which the comprehensive measurement of oscillatory processes' parameters influencing human upper limbs is being conducted and which, on the bases of accurate

results, allows us to specify the mechanism underlying local vibration effective exposure on neuromuscular apparatus.

Theoretical part contains phenomenological model of biomechanical circle including two interconnected components: mechanochemical – considering muscles' properties to transform chemical energy into mechanical and nervous – in form of neural network system. Results obtained through computer simulation method of mentioned model qualitatively prove theoretical capabilities of neuron network activity synchronization with external influence and resonance regimes' realization.

Experimental part contains results of experimental tests on organism reaction during transmission of local vibration to the human limbs in form of amplitude-frequency diagrams and other graphical illustrations.

Quantitative results obtained on the bases of multiple tests are being classified and extrapolated. In particular, it's been defined that oscillations of limp parts are relief dependent on vibration input parameters and muscles' functional state. The expression of biological reaction of the limb to the local vibration is the change of its muscles' motor activity.

Retention of auto-oscillatory regimes of muscles' bioelectric activity oscillations occurs through vibration exposure and vibration frequency is the rhythm carrier in this regime.

Significant growth of muscles' bioelectric activity oscillations' amplitudes occurs at certain frequencies.

Synchronization of muscles' bioelectric activity oscillations with external vibration frequencies is observed in quite wide range of frequencies. There are optimal magnitudes of vibration amplitude and muscles' static tension where synchronization is more clear-cut.

There are regimes when muscles' bioactivity oscillations' frequencies completely coincide with vibration frequency. Quantitative indexes of such regimes are individual for each person.

Fatigue processes in muscles are heavier during vibroexposition and synchronization effect in tired muscles is manifested faster.

Finally, results obtained from theoretical and experimental researches are summarized in conclusions and defined as follows:

- New progressive aspect in human motor apparatus vibroprotection is being developed; it is based on research of two interactive – external and inner organism oscillatory processes.

- Experimental research method for biomechanical circle dynamic characteristics is being elaborated; it is based on measurements of mechanical and biological oscillations' amplitude-frequency dependences under vibration local exposure. The special device has been designed for integral assessment of characterizing parameters of human organism reaction to the vibration irritants.

- Experimental tests have been performed on the bases of elaborated methods that allow us to define properties and regularities of biomechanical systems under vibration local exposure.

- Phenomenological model version of biomechanical circle containing neuromuscular apparatus mechanochemical and neural components is being composed that allows us to study closed system under different external exposures.