

UDC 622.23.05

SCOPUS CODE 2201

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2023-4-95-106>**რხევები ბაგირი-შკივის სისტემაში და მათი გავლენა ასრიალების პროცესზე**

ვიქტორ ზვიადაური	სამთო ტექნოლოგიების დეპარტამენტი, საქართველოს უნივერსიტეტი, საქართველო, 0160, თბილისი, მ. კოსტავას 75 E-mail: v_zviadauri@yahoo.com	ტექნიკური
მირიან ცოცხალაშვილი	სამთო ტექნოლოგიების დეპარტამენტი, საქართველოს უნივერსიტეტი, საქართველო, 0160, თბილისი, მ. კოსტავას 75 E-mail: m.cocxala@gmail.com	ტექნიკური
ნანა სარიშვილი	სამთო ტექნოლოგიების დეპარტამენტი, საქართველოს უნივერსიტეტი, საქართველო, 0160, თბილისი, მ. კოსტავას 75 E-mail: nana.sarishvili@gmail.com	ტექნიკური

რეცენზენტები:**ა. ბეჟანიშვილი**, სტუ-ის სამთო-გეოლოგიური ფაკულტეტის პროფესორი

E-mail: bezhanishvili@gmail.com

მ. ჭელიძე, რ. დვალის მმი-ის მთავარი მეცნიერ თანამშრომელი

E-mail: m.chelidze47@gmail.com

ანოტაცია. საშახტე ამწევი დანადგარების მუშაობაში მნიშვნელოვანი როლი ენიჭება ბაგირი-შკივის ურთიერთქმედების პროცესს, რა დროსაც შესაძლებელია შეიცვალოს ხახუნის ძალა, ბაგირი ასრიალდეს შკივზე და დაირღვეს ნორმალური მუშაობის რეჟიმი. ბაგირისა და შკივის ზედაპირებს შორის ხახუნის ძალაზე მნიშვნელოვანი გავლენის მოხდენა შეუძლია ბაგირთა სისტემაში და შესაბამისად მასებში აღმოცენებულ, როგორც გრძივ, ისე განივ და ბრუნვითს რხევებს.

აღნიშნულიდან გამომდინარე, სტატიაში წარმოდგენილია ამწევი საშახტე დანადგარის, როგორც სამმასიანი სისტემის (ამავალი და ჩამავალი შტოები და შკივი) ურთიერთდაკავშირებული სივრცითი რხევითი მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა და მიღების მეთოდოლოგია. განტოლებათა სისტემის დაყვანა შეიძლება ნებისმიერი სირთულის მოძრაობაზე (ხაზოვანი, სიბრტყითი, ბრუნვითი).

ჩატარებულია მათემატიკური მოდელირება ასრიალების პროცესზე რხევების გავლენის გამოკვლევის მიზნით და ნაჩვენებია გავლენის ხასიათი გრაფიკული ამოხსნების სახით.

საკვანძო სიტყვები: ასრიალება; დინამიკური დატვირთვა; რხევები; საშახტო ამწევი დანადგარი; შკივის-ბაგირი.

შკივის წყვილის ურთიერთქმედების პროექტით განსაზღვრული კანონზომიერების დარღვევას აქედან გამომდინარე ყველა შესაძლო უარყოფითი მოვლენებით.

შესავალი

რთულ და მრავალფეროვან მანქანებსა და კომპლექტებს შორის, რომლითაც აღჭურვილია თანამედროვე შახტები ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ადგილი უჭირავს საშახტო ამწევი დანადგარებს.

სამთო მანქანებს და მათ შორის ამწევი დანადგარებს ბაგირთა სისტემებით რთული დინამიკური პროცესების პირობებში უწევთ მუშაობა. ბაგირებზე მოდებული მასები, გარდა ძირითადი (მუშა) გადაადგილებებისა, განიცდიან გარკვეულ თანამდევ რხევით მოძრაობებს, რომელთა გამომწვევი მიზეზი შეიძლება იყოს: ბაგირი-შკივის ხახუნის ზედაპირების უსწორმასწორობები, ამძრავიდან შკივზე ბრუნვითი მოძრაობის არათანაბარი გადაცემა და სხვა. ნორმალური მუშაობის პირობებში ასეთი რხევების გავლენა უმნიშვნელოა, მაგრამ მათი გავლენა იზრდება დანადგარის გაშვებისა და დამუხრუჭების დროს და განსაკუთრებით შესაძლო წინააღმდეგობებისა და ავარიული შემთხვევების (დამუხრუჭების) პირობებში.

მნიშვნელოვანია დინამიკური დატვირთვების გავლენა ბაგირი-შკივის კვანძებში, სადაც ბაგირის დეფორმაციით გამოწვეული დინამიკური ძალები შესაძლოა მნიშვნელოვნად აღემატებოდეს სტატიკურ დატვირთვებს. შესაბამისად, დატვირთვების არათანაბრობის პირობებში ადგილი აქვს ბაგირი-

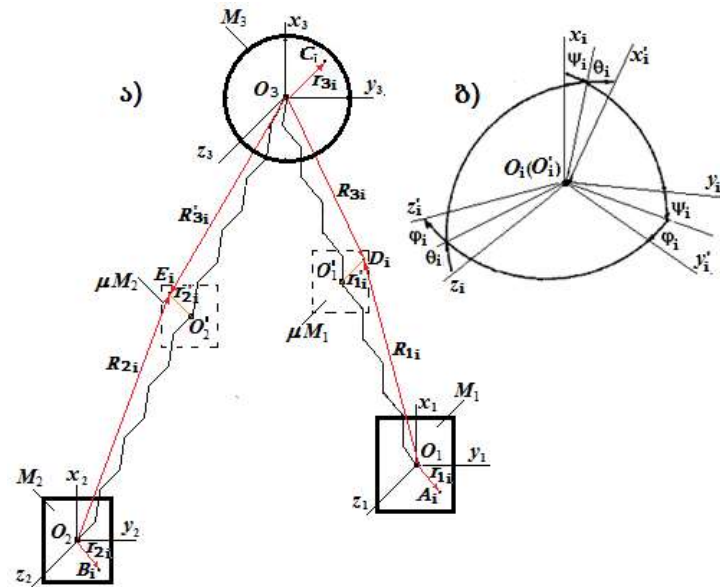
ძირითადი ნაწილი

„ტვირთი - ბაგირი - შკივი“ სისტემის სივრცითი დინამიკური მოდელი

არსებული დინამიკური მოდელები და შესაბამისი გამოკვლევები [1, 2] დაფუძნებულია ბაგირის დეფორმაციის განსაზღვრაზე სტატიკური დამოკიდებულებით, სადაც ბაგირის მასა გათვალისწინებულია რელის მეთოდით. წინააღმდეგობა გათვალისწინებულია კოეფიციენტით, რომელიც ახასიათებს ჭურჭლის დამყოლობას და წინააღმდეგობებს შახტის ჭაურში. ასევე აღსანიშნავია, რომ არსებულ მოდელებში ჭურჭლის მოძრაობა განიხილება მხოლოდ გრძივი მიმართულებით, მაშინ, როდესაც რეალურად მას შეიძლება ჰქონდეს განივი, ბრუნვითი და ა.შ. მოძრაობები (ნორმალური მუშაობის დროს, ასეთი მოძრაობის სიდიდიდან გამომდინარე).

განვიხილოთ პირველ სურათზე მოცემული საშახტო ამწევი დანადგარის სივრცითი რხევითი მოძრაობის განზოგადებული მოდელი.

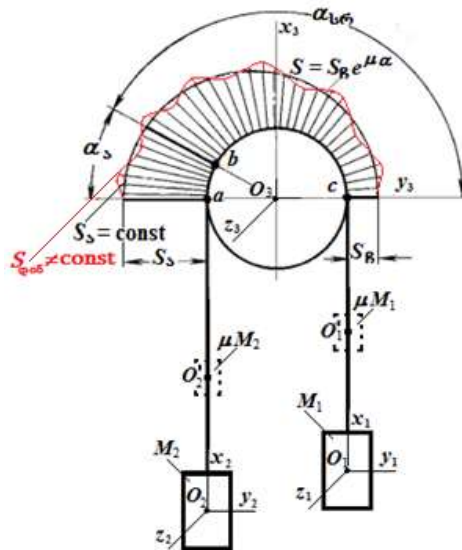
მოცემულ სურათზე M_1 და M_2 ჭურჭლის მასებია (ტვირთთან ერთად ან მის გარეშე); M_3 – შკივზე დაყვანილი ამძრავი დანადგარის მასები; M_{k1} , M_{k2} – ბაგირების მასები; μ_1 და μ_2 კოეფიციენტებით გათვალისწინებულია M_{k1} და M_{k2} ბაგირების ის ე.წ. მისაერთებელი მასები (μM_k) რომლებიც მონაწილეობას იღებენ M_1 , M_2 , M_3 მასების მოძრაობაში.



სურ.1. ა) საშახტო ამწევი დანადგარის სივრცითი რხევითი მოძრაობის დინამიკური მოდელი, ბ) ბრუნვითი მოძრაობა.

თითოეული მასის სივრცეში მოძრაობის მისაღებად საჭიროა მასის თავისუფალი i წერტილის (ნაწილაკის) განხილვა [2]. ასეთი წერტილებია A_i, B, C, D, E , რომელთაგან თითოეული მიერთებულია შესაბამისი მასების სიმძიმის ცენტრთან i ვექტორებით,

ამასთანავე, D და E წერტილები ვექტორულად აგრეთვე დაკავშირებულია ჭურჭლების და შკივის დაყვანილი მასის სიმძიმის ცენტრებთან (R ვექტორებით).



სურ. 2. საშახტო ამწევი დანადგარის ბაგირების დაჭიმულობის ეპიურა სტატიკურ და დინამიკურ პირობებში.

მოცემულ სქემაში M_1 , M_2 , M_3 მასებთან უძრავად დაკავშირებულია $O_1x_1y_1z_1$, $O_2x_2y_2z_2$, $O_3x_3y_3z_3$ კოორდინატთა ღერძები, რომელთა მოძრაობა განიხილება $Oxyz$ ღერძების მიმართ. ბაგირის მასების μM_{k1} და μM_{k2} ნაწილების მოძრაობა M_1 , M_2 , M_3 მასების მოძრაობის მიმართ განიხილება როგორც ფარდობითი და ბაგირების დეფორმაციების სიდიდეებით განისაზღვრება. კერძოდ, როდესაც განვიხილავთ M_1 მასის მოძრაობას, μM_{k1} -ის ფარდობითი მოძრაობა განისაზღვრება M_3 მასის მოძრაობის კოორდინატებით, ანუ ბაგირის O_1O_3 მონაკვეთის დეფორმაციით, ხოლო M_2 მასის მოძრაობისას μM_{k2} -ის ფარდობითი მოძრაობა მის მიმართ ტოლია M_3 -ის მოძრაობის კოორდინატისა (x_3). M_3 მასის მოძრაობის განხილვისას μM_{k1} და μM_{k2} ფარდობითი მოძრაობები მის მიმართებაში ტოლი იქნება (თანხვედება) M_1 და M_2 მასების მოძრაობის კოორდინატებისა.

ამრიგად, ადგილი ექნება M_1 , M_2 , M_3 მასების დამოუკიდებელ მოძრაობებს და μM_{k1} და μM_{k2} მასების ფარდობით მოძრაობებს M_1 , M_2 , M_3 მასების მიმართ.

საშახტე ამწევი დანადგარის სივრცეში რხევითი მოძრაობის განზოგადებული მათემატიკური მოდელი

სივრცითი მოძრაობის კინეტიკური ენერგიის მისაღებად საჭიროა განვიხილოთ თითოეული მასის A_i , B_i , C_i , D_i , E_i თავისუფალი ნაწილაკის მოძრაობის სიჩქარის ვექტორული გამოსახულებები, რომელთაგან D_i და E_i წერტილების სიჩქარეები განიხილება M_1 , M_2 , M_3 მასების მიმართ (სურ. 1ა):

$$V_{A_i} = V_{O_i} + \omega_{O_i} \times r_{i i}, \quad (1)$$

$$V_{E_i}^{O_3} = V_{O_3} + \omega_{O_3} \times R_{3i} + V_{O_2} + \omega_{O_2} \times r_{2i}.$$

ვექტორული გამოსახულებების ანალიზური სახით წარმოდგენისათვის უნდა განისაზღვროს თითოეული მასის თავისუფალი წერტილის კოორდინატები [3,4]. მაგალითისათვის M_1 მასის A_1 წერტილის კოორდინატებს $Oxyz$ ღერძების მიმართ ექნებათ სახე:

$$\begin{aligned} (x_A)_x &= x_{O_1} + x_A \alpha_{11} + y_A \alpha_{12} + z_A \alpha_{13} \\ (y_A)_y &= y_{O_1} + x_A \alpha_{21} + y_A \alpha_{22} + z_A \alpha_{23} \\ (z_A)_z &= z_{O_1} + x_A \alpha_{31} + y_A \alpha_{32} + z_A \alpha_{33} \end{aligned} \quad (2)$$

სადაც x_{O_1} , y_{O_1} , z_{O_1} არის M_1 მასის O_1 ცენტრის ბაგირის დეფორმაციით გამოწვეული რხევითი მოძრაობის კოორდინატები; x_A , y_A , z_A – A_i წერტილის კოორდინატები $O_1x_1y_1z_1$ კოორდინატთა სისტემის ღერძების მიმართ; $\alpha_{11}, \dots, \alpha_{33}$ – $O_1x_1y_1z_1$ ღერძების $Oxyz$ სისტემის მიმართ მობრუნების კუთხეების მიმმართველი კოსინუსები (ცხრ.1) [3,4,5].

იმის მიხედვით, თუ მასების რა სახის და რა სიდიდის სივრცითი მოძრაობები ხდება რეალურად, α_{ij} კოეფიციენტები ეილერის θ , φ , ψ კუთხეებზე დამოკიდებულებით გამოისახება სხვადასხვა მიახლოებით. მაგალითად, თუ მიმმართველი კოსინუსების გაშლისას დავტოვებთ მხოლოდ პირველი რიგის წევრებს, მაშინ ცხრ. 1 M_1 მასის მიმართ მიიღებს ცხრ. 2 - ის სახეს, ხოლო თუ მივიღებთ, რომ გადაადგილებები ხდება მხოლოდ x_1 , x_2 , x_3 ღერძების მიმართულებით და არ ხდება განივი და ბრუნვითი მოძრაობები – მიიღება ცხრ. 3:

ცხრილი 1

	x_i	y_i	z_i
x_i^m	$(\alpha_i^m)_{11}$	$(\alpha_i^m)_{12}$	$(\alpha_i^m)_{13}$
y_i^m	$(\alpha_i^m)_{21}$	$(\alpha_i^m)_{22}$	$(\alpha_i^m)_{23}$
z_i^m	$(\alpha_i^m)_{31}$	$(\alpha_i^m)_{32}$	$(\alpha_i^m)_{33}$

ცხრილი 2

	x_i	y_i	z_i
x_i^m	1	$-\varphi_1$	ψ_1
y_i^m	φ_1	1	$-\theta_1$
z_i^m	$-\psi_1$	θ_1	1

ცხრილი 3

	x_i	y_i	z_i
x_i^m	1	0	0
y_i^m	0	0	0
z_i^m	0	0	0

შესაბამისი კინეტიკური ენერგიების გამოსახულებები იქნება:

$$T_{O_1} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_1} M_1 (V_{A_i})^2, \dots \text{ და ა.შ.} \quad (3)$$

$$T_{O_2}^{O_3} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_{2\bullet}} \mu M_2 (V_{E_i})^2.$$

სისტემის „შკივი-ბაგირი-ტვირთების“ კინეტიკური ენერგიების ჯამი იქნება:

$$T = T_{O_1} + T_{O_2} + T_{O_3} + T_{O_1}^{O_1} + T_{O_1}^{O_3} + T_{O_2}^{O_2} + T_{O_2}^{O_3}, \quad (4)$$

სადაც T_{O_1} , T_{O_2} , T_{O_3} არის M_1 , M_2 , M_3 მასების კინეტიკური ენერგიები, $T_{O_1}^{O_1}$, $T_{O_1}^{O_3}$, $T_{O_2}^{O_2}$, $T_{O_2}^{O_3}$ კი – ბაგირების შეყურსული მასების (μM_{b1} , μM_{b2}) კინეტიკური ენერგიები შესაბამისად M_1 , M_2 , M_3 მასების მიმართ.

თუ (3) გამოსახულებებში ჩავსვამთ სიჩქარეების მნიშვნელობებს (1) გამოსახულებიდან და მათ გავშლით შესაბამის კოორდინატთა ღერძებზე [2] და გავითვალისწინებთ წრფივი კოორდინატების ნამრავლებს არაუმეტეს მე-2 რიგისა, მივიღებთ

$$T_{O_1} = \frac{1}{2} M_1 (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 + \dot{z}_1^2) \quad (5)$$

$$T_{O_2}^{O_3} = \frac{1}{2} [\mu M_{b2} (\dot{x}_3 + \dot{y}_3 + \dot{z}_3 + \dot{x}_3 \dot{x}_2 + \dot{z}_3 \dot{z}_2 + \dot{y}_3 \dot{y}_2)]$$

ლაგრანჟის განტოლების გამოყენებით კინეტიკური ენერგიების გამოსახულებებიდან (5) მიიღება

თითოეული მასის (M_1 , M_2 , M_3) ინერციული ძალების გამოსახულებები μM_{b1} და μM_{b2} მასების ფარდობითი მოძრაობების გათვალისწინებით, ამისათვის ვისარგებლოთ ლაგრანჟის განტოლების შესაბამისი წევრით

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i},$$

სადაც T კინეტიკური ენერგიების ჯამია, ხოლო q ლეზულობს x_1 , y_1 , ..., z_3 მნიშვნელობებს. ამრიგად გვქეძება

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_1}{\partial \dot{x}_1} \right) = M_1 \ddot{x}_1 + \mu M_{b1} (\ddot{x}_1 + \ddot{x}_3) \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_7^{O_2}}{\partial \dot{z}_3} \right) = (M_3 + \mu M_{b1} + \mu M_{b2}) \ddot{z}_3 + \mu M_{b1} \ddot{z}_1 + \mu M_{b2} \ddot{z}_2$$

სისტემური მიდგომა და დიფერენციალურ განტოლებათა მიღების წარმოდგენილი მეთოდის, 1, 2, 3 ცხრილების გათვალისწინებით, შესაძლებლობას იძლევა მივიღოთ საშახტო ამწევი დანადგარის მასების სივრცითი რხევითი მოძრაობის განზოგადებული მათემატიკური მოდელი და საჭიროების მიხედვით დავიყვანოთ კონკრეტულ მოძრაობებზე: სივრცითი, სიბრტყეზე წრფივი.

წარმოდგენილი სტატიის ფარგლებში განიხილება მასების მოძრაობები x_1 , x_2 , x_3 ღერძების მიმართულებით.

ბაგირთა სისტემაში წარმოქმნილი დრეკადი ძალების განსაზღვრისათვის საჭიროა ბაგირების მასებთან მიერთების წერტილების კოორდინატების დადგენა. დინამიკურ (რხევით) მდგომარეობებში რაც შეიძლება განხორციელდეს ცხრილისა და (2) განტოლებების მიხედვით; ამრიგად მიიღება ბაგირების დეფორმაციები შესაბამისი მასების მიმართ:

$$(\Delta l_1^{M_1})_x = x_1 - x_3, \quad (\Delta l_2^{M_2})_x = x_2 - x_3,$$

$$(\Delta l_1^{M_3})_x = x_3 - x_1, \quad (\Delta l_2^{M_3})_x = x_3 - x_2,$$

სადაც h_1, h_2 არის პირველი და მე-2 ბაგირების სიგრძეები.

დეფორმაციებისა და სიხისტის კოეფიციენტების ნამრავლებით მიიღება შესაბამისი დრეკადი ძალები:

$$P_{x_1} = k_1(x_1 - x_3), \quad P_{x_2} = k_1(x_2 - x_3), \quad (7)$$

$$P_{x_3} = k_1(x_3 - x_1), \quad P_{x_3}^* = k_2(x_3 - x_2)$$

წინააღმდეგობის ძალების განსაზღვრისას გამოიყენება სხვადასხვა ჰიპოთეზა. ერთ-ერთი მათგანის მიხედვით [5, 6] სხეული მოძრაობს წინააღმდეგობრივ გარემოში, რომლის რეაქცია სხეულის წრფივი გადაადგილების სიჩქარის პროპორციულია. ამ შემთხვევაში წინააღმდეგობის კოეფიციენტები (h) განისაზღვრება ექსპერიმენტის საფუძველზე და წინააღმდეგობების ძალები ღებულობს (7) გამოსახულებების ფორმას იმ განსხვავებით, რომ $k_{1,2}$ კოეფიციენტები შეიცვლება $h_{1,2}$ - ით, ხოლო გადაადგილებები – სიჩქარეებით:

$$F_{x_1} = h_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_3), \quad F_{x_2} = h_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3), \quad (8)$$

$$F_{x_3} = h_2(\dot{x}_3 - \dot{x}_1) \quad F_{x_3}^* = h_2(\dot{x}_3 - \dot{x}_2)$$

(6), (8) გამტოლებების, გათვალისწინებით ამწევი საბაგირო სისტემის რხევითი მოძრაობის განტოლებებს ექნება შემდეგი სახე:

$$(M_1 + \mu_1 M_{\delta_1}) \ddot{x}_1 + \mu_1 M_{\delta_1} \ddot{x}_3 + k_1(x_1 - x_3) + h_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_3) = 0$$

$$(M_2 + \mu_2 M_{\delta_2}) \ddot{x}_2 + \mu_2 M_{\delta_2} \ddot{x}_3 + k_2(x_2 - x_3) + h_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) = 0 \quad (9)$$

$$(M_3 + \mu_3 M_{\delta_1} + \mu_3 M_{\delta_2}) \ddot{x}_3 + \mu_3 M_{\delta_1} \ddot{x}_1 + \mu_3 M_{\delta_1} \ddot{x}_2 + k_1(x_3 - x_1) +$$

$$+ k_2(x_3 - x_2) + h_1(\dot{x}_3 - \dot{x}_1) + h_2(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) = Q + F_{\text{ბსბ}}.$$

სადაც Q არის ამძრავიდან შკივზე გადაცემული ძალა, $F_{\text{ბსბ}}$ – ხახუნის ძალა შკივსა და ბაგირს შორის.

ბაგირი-შკივის ურთიერთქმედების ასპექტები, რიცხვითი ექსპერიმენტის სპეციფიკა და შედეგები

მიღებული განტოლებები ასახავს ამწევი დანადგარის მოულოდნელი გაჩერების დროს განვითარებულ რხევით პროცესებს [7].

მნიშვნელოვანი როლი ნორმალური მუშა რეჟიმების განვითარებაში განეკუთვნება ხახუნის ძალას და მის დამოკიდებულებას ბაგირის შტოების დაჭიმულობათა სხვაობაზე.

თუ დაირღვა თანაფარდობა ხახუნის ძალასა და დაჭიმულობებს შორის, ბაგირი შკივზე ასრიალდება და შეიძლება წარმოიქმნას ავტორხევები (თუ ძრავამ გააგრძელა მუშაობა), რომლებიც, თავის მხრივ, განპირობებული იქნება ბაგირებში დრეკად ძალებსა (დაჭიმულობებს) და ხახუნის ძალებს შორის ცვლადი ურთიერთდამოკიდებულებით (ავტორხევების კლასიკური შემთხვევა).

თუ ჭურჭელი გამოედება რაიმე დაბრკოლებას და ძრავას გაჩერება ვერ მოხერხდება სწრაფად, დაჭიმულობათა თანაფარდობის (სხვაობის) სიდიდე გადაჭარბებს ხახუნის ძალას და მოხდება ასრიალება (ნორმალურ რაჟიმში ხახუნის ძალა ყოველთვის მეტია ბაგირების დაჭიმულობათა სხვაობაზე).

ხახუნის ძალის დამოკიდებულება ბაგირის დაჭიმულობაზე განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით [1]:

$$F_{\text{bcb}} = S_{2\text{bcb}}(e^{f\alpha} - 1), \quad (10)$$

სადაც S_{bcb} არის ბაგირის ჩამავალი შტოს სტატიკური დაჭიმულობა, e – ნატურალური ლოგარითმის ფუნქცია; f – ბაგირის შკივის ამონაგთან ხახუნის კოეფიციენტი; α – ბაგირის შკივზე შემოხვევის კუთხე.

წონასწორობის მდგომარეობაში ხახუნის ძალის დამოკიდებულებას ბაგირების შტოების დაჭიმულობათა სხვაობაზე აქვს შემდეგი სახე:

$$S_{1\text{bcb}} - S_{2\text{bcb}} = F_{\text{bcb}} \quad (11)$$

სადაც $S_{1\text{st}}$ ამავალი შტოს სტატიკური დაჭიმულობაა.

ამრიგად, რომ არ მოხდეს ასრიალება სტატიკურ მდგომარეობაში, უნდა დავიცვათ პირობა:

$$\frac{F_{\text{bcb}}}{S_{1\text{bcb}} - S_{2\text{bcb}}} \geq 1 \quad (12)$$

ბაგირის შტოებში სხვადასხვა მიზეზის გამო დეფორმაციის შემთხვევაში აღმოცენდება შესაბამისი დინამიკური პროცესები, რასაც არსებითი გავლენის მოხდენა შეუძლია (12) დამოკიდებულებაზე.

ამწვეი დანადგარის სტატიკური მდგომარეობის დროს დაჭიმულობები ბაგირების შტოებში განისაზღვრება გამოსახულებებით:

$$S_{1\text{st}} = P_1 + P_1^* + P_{r1}, \quad S_{2\text{st}} = P_2 + P_2^* + P_{r2} \quad (13)$$

სადაც P_1 არის ასაწვეი ჭურჭლის წონა, P_1^* – სასარგებლო ტვირთის წონა, P_{r1} – ამავალი ბაგირის შტოს წონა, P_2 – ჩამავალი ჭურჭლის წონა, P_2^* – სასარგებლო ტვირთის წონა ჩამავალ ბაგირში, P_{r2} – ბაგირის ჩამავალი შტოს წონა.

(9) და (13) გამოსახულებებიდან გამომდინარე დაჭიმულობები ბაგირებში დინამიკური დატვირთვების გათვალისწინებით ასე გამოისახება:

$$S_1 = S_{1\text{st}} - (a_{11} \ddot{x}_1 + a_{13} \ddot{x}_3); \quad S_2 = S_{2\text{st}} - (a_{22} \ddot{x}_2 + a_{23} \ddot{x}_3),$$

$$\text{სადაც} \quad a_{11} = M_1 + \mu_1 M_{\text{q}}, \quad a_{13} = \mu_1 M_{\text{q}_1},$$

$$a_{22} = M_2 + \mu_2 M_{\text{q}_2}, \quad a_{23} = \mu_2 M_{\text{q}_2}$$

ხახუნის ძალა შკივსა და ბაგირს შორის ტოლი იქნება:

$$F_{\text{bcb}} = S_2(e^{\mu\alpha} - 1).$$

განვიხილოთ შკივზე ბაგირის ასრიალების პროცესი და უსაფრთხოება სტატიკური და სხვადასხვა დინამიკური მდგომარეობის პირობებში.

როგორც ცნობილია, ასრიალების შესაძლებლობა დამოკიდებულია ხახუნის ძალასა და ბაგირის შტოების დაჭიმულობათა სხვაობის თანაფარდობაზე, კერძოდ ხახუნის ძალა უნდა აღემატებოდეს დაჭიმულობათა სხვაობას.

სტატიკური მდგომარეობის შემთხვევაში ასრიალების საწინააღმდეგო უსაფრთხოების კოეფიციენტი განისაზღვრება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$\delta_{\text{bcb}} = \frac{S_{\text{b}}(e^{f\alpha} - 1)}{S_{\text{s}} - S_{\text{b}}}, \quad (14)$$

სადაც S_{s} და S_{b} ჩამავალი და აღმავალი შტოების სტატიკური დაჭიმულობებია;

იმისათვის, რომ ასრიალებას არ ჰქონდეს ადგილი უსაფრთხოების კოეფიციენტი მეტი უნდა იყოს ერთზე, $\delta_{\text{st}} > 1$.

მე-2 შემთხვევაში განვიხილავთ დატვირთვებს მუდმივი აჩქარების ან შენელების პირობებში და δ კოეფიციენტი გამოისახება შემდეგნაირად:

$$\delta_{\text{din}} = \frac{(S_{\text{სტ}} \pm M_{\text{ს}} a)(e^{f\alpha} - 1)}{S_{\text{სტ}} - S_{\text{სტ}} \pm a(M_{\text{ს}} + M_{\text{გ}})}, \quad (15)$$

სადაც α არის მუდმივი შენელება და აჩქარება, $M_{\text{ს}}$ – აღმავალი ტვირთის მასა, ხოლო $M_{\text{გ}}$ – ჩამავალი ტვირთის მასა.

მე-3 შემთხვევაში განვიხილავთ ვაგონის მოძრაობის ისეთი მდგომარეობა, როდესაც ადგილი აქვს ბაგირში დრეკად დეფორმაციებს (რხევებს), რაც შეიძლება გამოწვეული იყოს სხვადასხვა მიზეზით (მანქანის გაშვება, გაჩერება, უეცარი დამუხრუჭება და ა.შ.).

ამ შემთხვევაში ასრიალების საწინააღმდეგო უსაფრთხოების კოეფიციენტი მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\delta_{\text{დინ}}^* = \frac{(S_{\text{გ}} \pm M_{\text{გ}} a + M_{\text{გ}} \ddot{x}_2)(e^{f\alpha} - 1)}{S_{\text{ს}} - S_{\text{გ}} \pm (M_{\text{ს}} + M_{\text{გ}})a + M_{\text{ს}} \ddot{x}_1 + M_{\text{გ}} \ddot{x}_2}, \quad (16)$$

სადაც x_1 და x_2 აღმავალი და ჩამავალი შტოების გადაადგილებებია.

თუ პირველ და მე-2 შემთხვევებში δ კოეფიციენტი ექვემდებარება მარტივ გამოთვლებს, მე-3 შემთხვევაში სტატიკურ დატვირთვებს ემატება რხევით გამოწვეული დინამიკური დატვირთვები და საჭიროა (9) განტოლებათა სისტემის გამოყენება (16) გამოსახულების მიმართ.

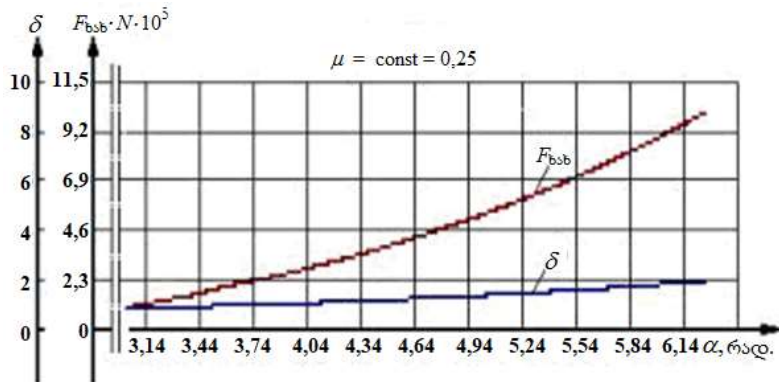
მათემატიკური მოდელირება განხორციელდა დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემის (9) რუნ-

გე-კუტას მეთოდით [8] ამოხსნის სფუძველზე; კერძოდ ასრიალების საწინააღმდეგო კოეფიციენტის გამოსახულებაში (16) აჩქარებების $\ddot{x}_1$ და $\ddot{x}_2$ მნიშვნელობების შეყვანა პროგრამულად მოხდა უშუალოდ განტოლებათა სისტემიდან (9). ასეთი მიდგომა საშუალებას იძლევა მოხდეს (9) და (16) განტოლებების კოეფიციენტების (სისტემის პარამეტრების) ფართო ზღვრებში ცვლილება და პროცესზე დაკვირვება. მოდელირების ზოგიერთი შედეგი წარმოდგენილია ქვემოთ მოცემულ სურათებზე.

მე-6 სურ-ზე მოცემულია ხახუნის ძალისა და ასრიალების საწინააღმდეგო კოეფიციენტის დამოკიდებულება შემოხვევის კუთხეზე, როცა α იცვლება 3,14 - დან 6,28 რადიანამდე, ხოლო ხახუნის კოეფიციენტი მუდმივია $\mu = 0,25$.

როგორც სურათიდან ჩანს, α -ს აღნიშნულ ფარგლებში ცვლილებისას ხახუნის ძალა იცვლება $F_{\text{max}} = 180000 \text{ ნ} \div 920000 \text{ ნ}$ -მდე, ხოლო ასრიალების კოეფიციენტი იმავე პირობებში $\delta = 1 \div 2,1$.

მე-7 სურ-ზე მოცემულია ხახუნის ძალისა და ასრიალების საწინააღმდეგო კოეფიციენტის დამოკიდებულება ხახუნის კოეფიციენტზე, როცა f იცვლება 0 - დან 0,5 - მდე, ხოლო შემოხვევის კუთხე მუდმივია $\alpha = 3,14$ რად. როგორც სურათიდან ჩანს f - ის აღნიშნულ ფარგლებში ცვალეადობისას ხახუნის ძალა იცვლება $F_{\text{ხახ}} = 0 \div 150000$ -მდე, ხოლო ასრიალების კოეფიციენტი იმავე პირობებში – $\delta = 0 \div 2,1$.

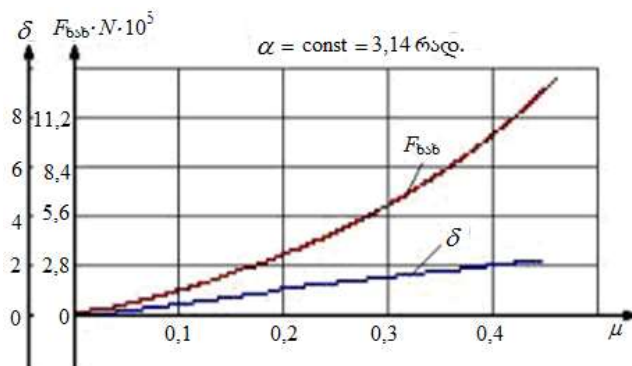


სურ. 6. ხახუნის ძალისა და ასრიალების საწინააღმდეგო კოეფიციენტის დამოკიდებულება შემოხვევის კუთხეზე ხახუნის კოეფიციენტის მუდმივი მნიშვნელობის დროს

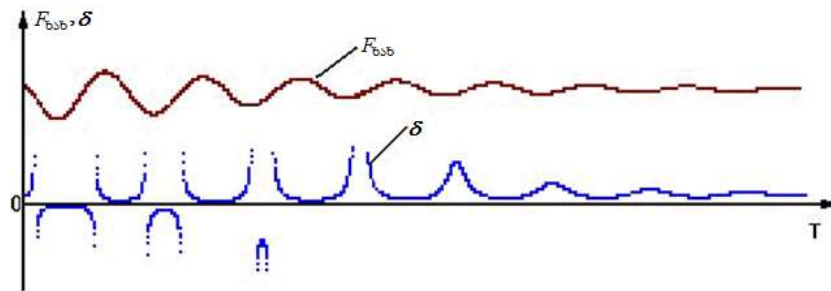
მე-8 სურ-ზე გამოსახულია ხახუნის ძალისა და ასრიალების კოეფიციენტების ცვლილება დინამიკური დატვირთვების ზემოქმედების პირობებში (9) განტოლებების მიხედვით. როგორც სურათიდან ჩანს, დასაწყისში დიდი ამპლიტუდის რხევების დროს ასრიალების საწინააღმდეგო კოეფიციენტს აქვს არაწრფივი სახე და პერიოდული ასრიალების მდგომარეობა ბაგირის ცალკეულ მონაკვეთზე. ასეთი პროცესი ხასიათდება ფრიქციული ავტორხევის მსგავსი მოვლენებით, რაც არასასურველია, მაგრამ არ იწვევს საერთო ასრიალებას, თუ ჩაქრობას აქვს წრფივი ხასიათი და რხევის ამპლიტუდა არ არის მნიშვნელოვნად მაღალი. გარკვეული პერიოდის შემდეგ ხდება რხევების ჩაქრობა და პროცესი უბრუნდება ჩვეულებრივ (ნორმალურ) მდგომარეობას.

მე-9 სურ-ზე მოცემულია (9) განტოლებათა სისტემის ამოხსნის გრაფიკული გამოსახულებები დინამიკური (რხევის) პროცესების გათვალისწინებით. კერძოდ ხახუნის ძალები ბაგირის შტოების დაჭიმულობები, დინამიკური დატვირთვები ბაგირზე და შკივზე (ინერციის ძალები: $M_1 \ddot{x}_1$, $M_2 \ddot{x}_2$, $M_3 \ddot{x}_3$) დებულობენ რხევის შესაბამის პერიოდულ ცვლილებებს. ამოხსნა ჩატარებულია რხევების ჩახშობის პირობებში.

მე-9 სურ-ზე მოცემულია (9) განტოლებათა სისტემის ამოხსნის გრაფიკული გამოსახულებები დინამიკური (რხევის) პროცესების გათვალისწინებით. კერძოდ ხახუნის ძალები ბაგირის შტოების დაჭიმულობები, დინამიკური დატვირთვები ბაგირზე და შკივზე (ინერციის ძალები: $M_1 \ddot{x}_1$, $M_2 \ddot{x}_2$, $M_3 \ddot{x}_3$) დებულობენ რხევის შესაბამის პერიოდულ ცვლილებებს. ამოხსნა ჩატარებულია რხევების ჩახშობის პირობებში.



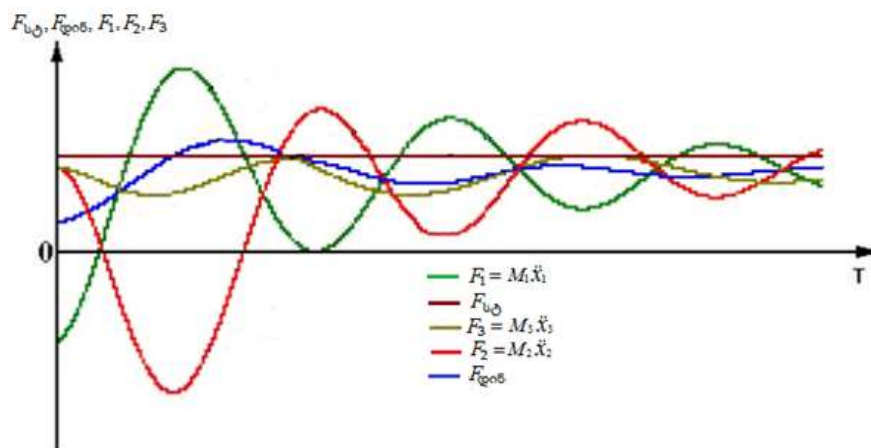
სურ.7. ხახუნის ძალის დამოკიდებულება ხახუნის კოეფიციენტზე შემოხვევის კუთხის მუდმივი მნიშვნელობის დროს.



სურ. 8. ასრიალების საწინააღმდეგო კოეფიციენტის და ხახუნის ძალის ცვლილების ხასიათი ჩაქრობად რხევით პროცესებზე დამოკიდებულებით

ნორმალური მუშაობის შემთხვევაში დინამიკურ დატვირთვებს აქვს მიღევადი ხასიათი, ვერ ახდენენ მნიშვნელოვან გავლენას მუშა პროცესზე, მაგრამ როგორც მიღებულმა გამოკვლევებმა გვიჩვენა სხვადასხვა დარღვევის შემთხვევაში (უეცარი გაჭედვა,

უეცარი დამუხრუჭება, გაშვება, ცვეთით გამოწვეული დარღვევები, და ა.შ.) შესაძლებელია დინამიკური დატვირთვების პროცესი გაგრძელდეს დროში და გამოიწვიოს სერიოზული უარყოფითი შედეგები.

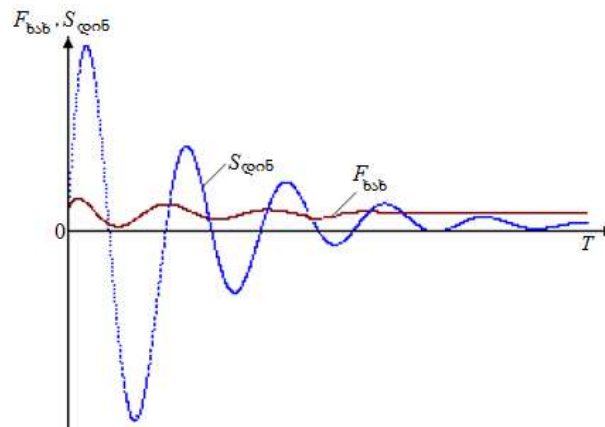


სურ. 9. რხევითი პროცესების გავლენა „ზაგირი-შკივი“ სისტემის ძალურ მახასიათებლებზე, წინააღმდეგობის გათვალისწინებით

მე-10 სურ-ზე ნაჩვენებია ხახუნის ძალისა და დაჭიმულობათა სხვაობის ცვლილების ხასიათი დინამიკური დატვირთვების (რხევების) პირობებში.

როგორც სურათიდან ჩანს, დასაწყისში, როდესაც მოხდა რაღაც წინააღმდეგობასთან ტვირთის კონტაქტი, შემდეგ ის მოიხსნა და განვითარდა რხე-

ვითი პროცესი, რომელიც გრძელდება რამდენიმე პერიოდის განმავლობაში და შემდეგ რეალურ სისტემაში არსებული წინააღმდეგობის გავლენით იწყება მიღევა (ჩაქრობა). ბოლოს, როგორც სურათიდან ჩანს, პროცესი უბრუნდება საწყის (ნორმალურ) მუშა მდგომარეობას.



სურ. 10. ბაგირების დაჭიმულობათა სხვაობისა და ხახუნის ძალის ცვლილება რხევითი მოძრაობის დროს წინააღმდეგობის გათვალისწინებით

დასკვნა

დამუშავებულია საშახტო ამწევი დანადგარის, როგორც სამმასიანი სისტემის (ამავალი და ჩამავალი შტოები ტვირთებით და შკივი) სისტემურ მიდგომაზე დაფუძნებული, სივრცითი რხევითი მოძრაობის მათემატიკური მოდელი.

გამოკვლეულია თითოეული მასის რხევის გავლენა შკივი-ბაგირის ურთიერთქმედების დინამი-

კურ მახსიათებლებზე: ხახუნის ძალა, შტოების დაჭიმულობები, ასრიალების საწინააღმდეგო კოეფიციენტი და ა. შ.

მათემატიკური მოდელირებით მიღებულია აღნიშნულ მახსიათებლებზე ვიბრაციების გავლენის გრაფიკული გამოსახულებები.

ლიტერატურა

1. Stepanov, A.G. (1994). *Dynamics of mine lifting installations*. Perm: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. (In Russian);
2. Naidenko, N.S., Bely, V.D. (1979). *Mine multi-rope lifting installations*. Moscow: Nedra. (In Russian);
3. Zviadauri, V. (2001). *Dynamics of vibration transport and technological machines*. Tbilisi: Metsniereba.;
4. Zviadauri, V. (2014). *Dynamic processes in mining transport and technological systems*. Tbilisi: GTU Publishing. (In Georgian);
5. Polushina, M.V., Moskaleva, T.V. (2019). Traction capacity of a lifting unit with friction pulleys and a bobbin balancing device. *Geotechnical Mechanics*, 149, 68-76. (In Russian);
6. Popov, Yu.V., Timukhin, S.A., Sadykov, E.L. (2010). Problems of increasing the efficiency of mine multi-rope lifting installations with ground-based lifting machines. *News of the Ural State Mining University*, 59-67. (In Russian);
7. Yao, J., Deng, X., Ma, C., Xu, T. (2021). Investigation of Dynamic Load in Superdeep Mine Hoisting Systems Induced by Drum Winding. *Shock and vibration*, 8.;
8. Zviadauri, V. (2004). *Elements of numerical methods. Solving tasks using a computer*. Tbilisi: GTU Publishing. (In Georgian).

UDC 622.23.05

SCOPUS CODE 2201

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2023-4-95-106>

Oscillations in the Rope-pulley System and Their Influence on the Sliding Process

Victor Zviadauri	Department of Mining Technologies, Georgian Technical University, Georgia, 0160, Tbilisi, 75, M. Kostava str. E-mail: v_zviadauri@yahoo.com
Mirian Tsotskhalashvili	Department of Mining Technologies, Georgian Technical University, Georgia, 0160, Tbilisi, 75, M. Kostava str. E-mail: m.cocxala@gmail.com
Nana Sarishvili	Department of Mining Technologies, Georgian Technical University, Georgia, 0160, Tbilisi, 75, M. Kostava str. E-mail: nana.sarishvili@gmail.com

Reviewers:

A. Bejanishvili, Professor, Faculty of Mining and Geology, GTU

E-mail: bezhanishvili@gmail.com

M. Tchelidze, Chief scientific employee of the Institute of Machine Mechanics of R. Dvali.

E-mail: m.chelidze47@gmail.com

Abstract. An important role in the operation of mine lifting devices is assigned to the process of interaction of the rope with the pulley, during which it is possible to change the force of friction, slipping of the rope on the pulley and violation of normal operation. Longitudinal, transverse and rotational vibrations, which occur in the rope system and, therefore, in the masses, can have a significant effect on the friction between the surfaces of the rope pulleys.

On the basis of this, the article presents the system of differential equations of the mutually weighted spatial oscillatory motion of the mine hoist as a three-mass system (ascending and descending shafts and pulleys) and the methodology of its adoption. The system of equations can be reduced to motion of any complexity (linear, plane, rotational).

For the purpose of studying the influence of oscillations on the sliding process, mathematical modeling is carried out and the nature of the influence is shown in the form of a graphic solution.

Keywords: cable pulley; dynamic loading; mine lifting device; oscillations; sliding.

განხილვის თარიღი 18.09.2023

შემოსვლის თარიღი 18.09.2023

ხელმოწერილია დასაბეჭდად 21.12.2023