
Konštrukčný návrh mechanizmu skrutkového manipulátora turniketu sypkých materiálov

Denis Molnár, Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: denis.molnar@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2659

Miroslav Blatnický, doc. Ing., PhD.*

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: miroslav.blatnicky@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2659

Ján Dižo, doc. Ing., PhD.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2560

Vadym Ishchuk, Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: vadym.ishchuk@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2563

A design of the mechanism of the screw manipulator of the bulk materials turnstile

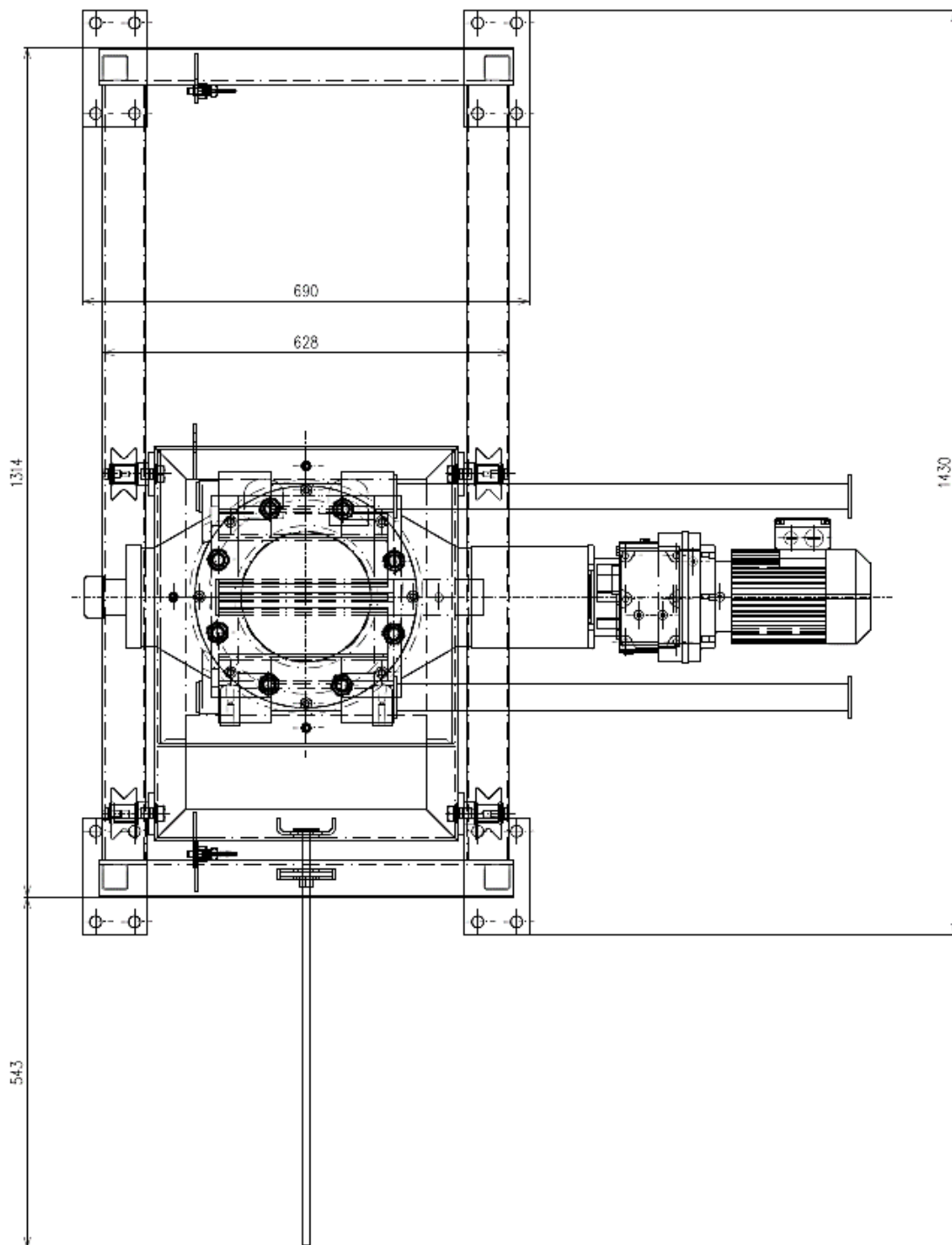
Abstract: The article is the next step in the ongoing research regarding the incorporation of the proposed bulk material turnstile assembly into an existing production line serving the food industry for bagging powdered milk. The main goal of this contribution is the presentation of the structural design and related technical calculations of the screw manipulator as part of the turnstile for loose materials. The proposed mechanism will enable precise manipulation of the turnstile, especially when it is necessary to clean the pipe connected to the turnstile. Such handling is relevant nowadays due to increasing the safety of maintenance of machines and equipment and due to reducing the physical load of maintenance workers. The results prove the appropriateness of the use of the given structural design and are the basis for further research in the given area. The results will be implemented in the form of boundary conditions for the numerical analyses of the connecting elements of the frame carrying the entire carriage with the turnstile (the frame forms a path for the carriage) and also for numerical calculations of the frame itself. The goal is to achieve a state where the entire structure is safe for the operator during maintenance and also for its surroundings during normal operation.

Keywords: design, manipulator, dimensional calculation, material, mechanism.

ÚVOD

Mechanizmus je sústava telies, spojených navzájom väzbami a slúži k prenosu síl v súčinnosti s transformáciou pohybu. Vo všeobecnosti, za mechanizmus sa považuje také zariadenie, ktoré umožňuje zmenu rotačného pohybu hriadeľa pohonného motora na pohyb pracovný. V problematike manipulačných zariadení pracovným pohybom môže byť napr. zdvih a spúšťanie bremena, sklápanie, prípadne teleskopické predĺžovanie

výložníka, pojazd žeriavu ako celku, alebo jeho časti (pojazd mačky, atď.) a u otočných žeriavov otáčanie. V prípade navrhovaného manipulátora je pre zmenu rotačného pohybu na posuvný využitý mechanizmus skrutkový. Daný mechanizmus bude slúžiť k prenosu energie a umožňovať manipuláciu s turniketom sypkých materiálov. Manipulácia je požadovaná v čase, keď je nutné vyčistiť potrubie pripojené k turniketu. Preto je potrebné turniket polohovať. Okamžitá poloha všeobecného mechanizmu je jedno-



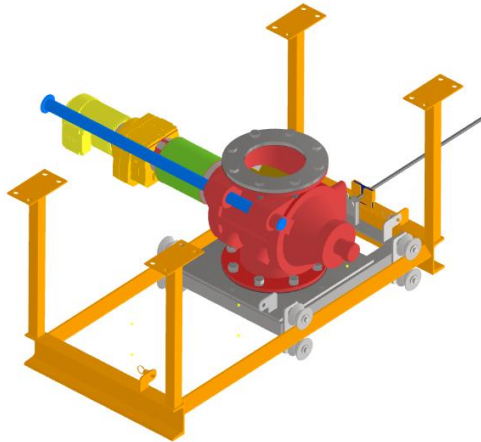
Obr. 1. Pôdorys (geometria) turniketu sypkých materiálov spolu s vozíkom, kotviacim rámom a manipulátorom

značne určená toľkými nezávislými súradnicami, koľko stupňov voľnosti mechanizmus má. Alebo inak, mechanizmus má toľko stupňov voľnosti, koľko nezávislých súradníc je potrebných k jednoznačnému určeniu jeho okamžitej polohy.

Navrhovaný konštrukčný celok je určený pre implementáciu do výrobnéj baliacej linky sušeného mlieka. Pretože konštrukcia nesmie prekážať obsluhu, je zvolené jej kotvenie do stropu vo výške 4,2 metra nad podlahou. Mechanizmus skrutkového manipulátora je potom navrhovaný z dôvodu

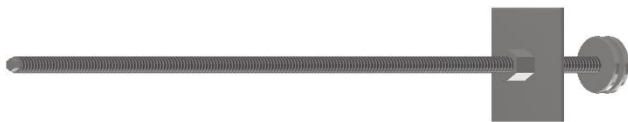
zvyšovania efektivity a znižovania fyzickej záťaže pracovníkov počas servisných úkonov pre dve krajné polohy (pracovná a servisná). Vzhľadom na všetky vstupné rozmerové (obr. 1) a hmotnostné parametre opísané v [1] bol spracovaný konštrukčný návrh ručne poháňaného manipulátora turniketu sypkých materiálov. Ručný pohon sa vzhľadom na potravinársku prevádzku (a z nej vyplývajúce vysoké nároky na čistotu), hmotnosť samotného turniketu spolu s jeho pohonom približne 230 kg, ako aj ekonomickosť samotného návrhu, javí ako optimálne

riešenie. Berúc do úvahy relatívne nízke pasívne odpory pôsobiace pri pohybe lôžka turniketu (vozíka) po dráhe, bude ním manipulované pomocou otáčania obsluhou (kľúčom, AKU-skrutkovačom a pod.). Konštrukčný celok je zobrazený na obr. 2.



Obr. 2. CAD model turniketu sypkých materiálov spolu s vozíkom, kotviacim rámom a manipulátorom

V práci [1] autori vykonali určenie ťažísk turniketu za účelom kvantifikácie záťaže pojazďových koliesok vozíka. Toto zaťaženie bolo následne v práci [2] použité na výpočet ohybových momentov nosnej konštrukcie (dráhy) pojazdu pri určenej najúčinnejšej polohe bremena. Rovnako sa tu autori venovali aj výpočtu odporov obmedzujúcich pohyb vozíka. Súčasná práca opisuje konštrukčný návrh jednoduchého odnímateľného skrutkového manipulátora turniketu (obr. 3).



Obr. 3. 3D CAD model konštrukčného návrhu skrutkového manipulátora turniketu

Manipulátoru je potrebné sa venovať aj z výpočtového hľadiska, aby vyhovoval všetkým naň kladeným nárokom. Výpočet mechanizmov pozostáva bežne z funkčného a pevnostného výpočtu. Pri funkčnom výpočte určujeme potrebný výkon hnacích motorov, kinematické veličiny ústrojenstva a jeho jednotlivých prvkov tak, aby sme zistili žiadané pracovné rýchlosti, prípadne doby rozbehov a tiež dráhy jednotlivých pracovných pohybov. Pri pevnostnom výpočte určujeme rozmery jednotlivých častí.

1 FUNKČNÝ A DIMENZIONÁLNY VÝPOČET SKRUTKOVÉHO MANIPULÁTORA

Najskôr bol výpočet orientovaný na pohybovú skrutku manipulátora. V jej prípade bolo rozhodnuté, že bude vyrobená z bežne dodávanej závitovej tyče s lichobežníkovým (trapézovým) závitom a vyrobená

z ocele *EN X5CrNi18-10 (DIN 1.4301)*, ktorej medza klzu dosahuje $R_e = 195$ MPa. Potom dovolené zaťaženie skrutky v ťahu (tlaku) σ_D pri uvažovanej bezpečnosti $k = 2$ bude (1):

$$\sigma_D = \frac{R_e}{k}, \quad (1)$$

$$\sigma_D = \frac{195}{2} = 97,5 \text{ MPa.}$$

Z rovnice (1) vyplýva, že napätie, na základe ktorého je dimenzované jadro pohybovej skrutky, dosahuje pre nehrdzavejúcu ocel *EN X5CrNi18-10* pri koeficiente bezpečnosti $k = 2$ hodnotu $\sigma_D = 97,5$ MPa. Na základe tejto hodnoty v rovnici (2) na výpočet napätia v ťahu resp. v tlaku dostávame hodnotu minimálneho prierezu jadra S :

$$\sigma_D \geq \frac{F}{S}, \quad (2)$$

$$S \geq \frac{F}{\sigma_D} \geq \frac{307,07}{97,5} \geq 3,15 \text{ mm}^2,$$

kde $F = 307,07$ N je ťažná sila potrebná pre rovnomerný pohyb pojazdu turniketu (vozíka spolu s turniketom) po dráhe.

Z tejto určenej plochy $S = 3,15 \text{ mm}^2$ je možné vypočítať priemer jadra d_j závitovej tyče pomocou vzťahu (3):

$$S = \frac{\pi \cdot d_j^2}{4}, \quad (3)$$

$$d_j = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,15}{\pi}} = 2 \text{ mm.}$$

Na základe bežne používaných závitových tyčí a ďalších namáhání zaťažujúcich skrutku v prevádzke (krut, vzper) bola predbežne zvolená závitová tyč s označením *Tr. 12x3*, ktorej prierez jadra je $d_j = 8,5$ mm. Vzhľadom na fakt, že táto pohybová skrutka bude namáhaná buď na ťah alebo na tlak, je potrebné overiť jej odolnosť voči strate stability, t. j. je potrebné ju skontrolovať na vzper podľa *Eulerovej teórie vzperu* pre pružnú oblasť (4):

$$\lambda_m = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{R_e}}, \quad (4)$$

$$\lambda_m = \pi \cdot \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^5}{195}} = 103,096,$$

kde E značí *Youngov modul pružnosti v ťahu* použitej ocele s hodnotou $E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa. Dĺžka skrutky L je rovná $L = 594$ mm. Po vypočítaní medznej hodnoty súčiniteľa λ_m je možné vypočítať konkrétnu hodnotu štíhlostného pomeru λ_1 pre daný profil (5):

$$\lambda_1 = \frac{L}{\sqrt{\frac{J_y}{S}}}, \quad (5)$$

$$\lambda_1 = \frac{594}{\sqrt{\frac{256,239}{56,75}}} = 279,54,$$

kde J_y je minimálny moment zotrvačnosti k hlavnej centrálnej osi kruhového prierezu skrutky s priemerom jadra $d_j = 8,5$ mm, t. j. $J_y = 256,239$ mm⁴,

S je plocha jadra skrutky, t. j. $S = 56,75$ mm².

Na základe výsledku je možné určiť ďalší postup.

Keďže platí $\lambda_1 \geq \lambda_m$ ($279,54 \geq 103,096$), je možné pristúpiť k výpočtu kritickej sily F_{kr} podľa rovnice (6):

$$F_{kr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_y}{L^2}, \quad (6)$$

$$F_{kr} = \frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 256,239}{594^2} = 1505,19 \text{ N}.$$

Táto sila výrazne presahuje reálnu silu ($F = 307,07$ N), ktorá bude pôsobiť na mechanizmus [2]. Rovnicou (7) je určený koeficient vzpernej bezpečnosti k_1 :

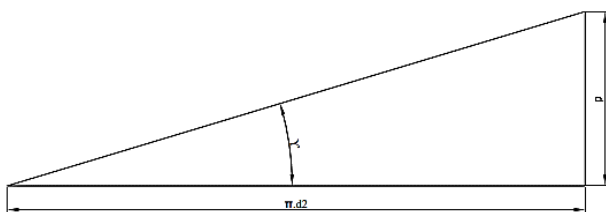
$$k_1 = \frac{F_{kr}}{F}, \quad (7)$$

$$k_1 = \frac{1505,19}{307,07} = 4,9.$$

Na základe rovnice (7) je možné dôjsť k záveru, že bezpečnosť proti vzperu je v tomto prípade značná a za bežných prevádzkových podmienok nedôjde ku strate stability pohybovej skrutky pri namáhaní osovou silou na tlak. Preto je v ďalšom možné sa zamerať na výpočet krútiaceho momentu, ktorý je potrebný na prevádzkovanie tohto manipulátora. Najprv bol určený krútiaci moment M_k , ktorý vyplýva z kontaktu pohybovej matice so skrutkou. Vychádza sa z rovnice (8):

$$M_k = \frac{d_2}{2} \cdot F \cdot \text{tg}(\gamma + \varphi). \quad (8)$$

Uhol stúpania γ (9) a uhol trenia φ (10) a (11) boli určené z geometrických a materiálových parametrov rozvinutého závitu podľa obr. 4.



Obr. 4. Rozvin jedného závitu pohybovej skrutky

$$\gamma = \arctg\left(\frac{p}{\pi \cdot d_2}\right), \quad (9)$$

$$\gamma = \arctg\left(\frac{2}{\pi \cdot 10,5}\right) = 5,197^\circ,$$

$$f' = a \cdot \frac{f}{\cos \frac{\alpha_1}{2}}, \quad (10)$$

$$\varphi = \arctg f',$$

$$\varphi = \arctg \frac{0,1}{\cos \frac{30}{2}} = 5,91^\circ, \quad (11)$$

kde $p = 3$ mm je stúpanie závitu vybranej skrutky Tr12x3,

f je koeficient trenia v plochom závite s uvažovanou hodnotou $f = 0,1$ (ocel o ocel)

f' je prídavné trenie vplyvom odklonu trecej plochy lichobežníkového závitu o uhol $\frac{\alpha_1}{2} = 30^\circ$ voči trecej ploche plochého závitu.

Na základe parametrov vypočítaných v rovniciach (9) (10) a (11) bola podľa rovnice (8) určená hodnota krútiaceho momentu M_k , ktorý vzniká kontaktom matice a skrutky pri ich vzájomnom pohybe:

$$M_k = \frac{10,5}{2} \cdot 307,07 \cdot \text{tg}(5,197^\circ + 5,91^\circ) = 0,317 \text{ Nm}. \quad (12)$$

Ďalšia zložka krútiaceho momentu vyplýva z trenia kruhového dorazu závitovej tyče o konzolu umiestnenú na vozíku (13):

$$M_k = \frac{D_{d1} + D_{d2}}{2} \cdot \frac{F}{2} \cdot f, \quad (13)$$

$$M_k = \frac{40 + 12}{2} \cdot \frac{307,07}{2} \cdot 0,1 = 0,4 \text{ Nm},$$

kde D_{d1} je veľký priemer kruhového dorazu závitovej tyče (obr. 5 – zeleným), t. j. $D_{d1} = 40$ mm,

D_{d2} je priemer otvoru kruhového dorazu závitovej tyče rovnajúci sa priemeru použitej lichobežníkovej skrutky, t. j. $D_{d2} = 12$ mm.

Celkový krútiaci moment, ktorým je potrebné poháňať mechanizmus, je určený ako suma parciálnych krútiacich momentov (14):

$$M_c = M_k + M_t, \quad (14)$$

$$M_c = 0,317 + 0,4 = 0,717 \text{ Nm}.$$

Na základe výsledkov je možné určiť hodnotu napätia v jadre skrutky pri jej otáčaní (15):

$$\tau = \frac{M_c}{W_k}, \quad (15)$$

$$\tau = \frac{0,717}{120,583} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ MPa},$$

kde W_k je prierezový modul v krútení kruhového prierezu pohybovej skrutky, t. j. $W_k = 120,583$ mm³.

Nakoniec je možné určiť hodnotu napätia v ťahu σ , (tlaku) zvolenej závitovej tyče (16):

$$\sigma = \frac{F}{S_j},$$

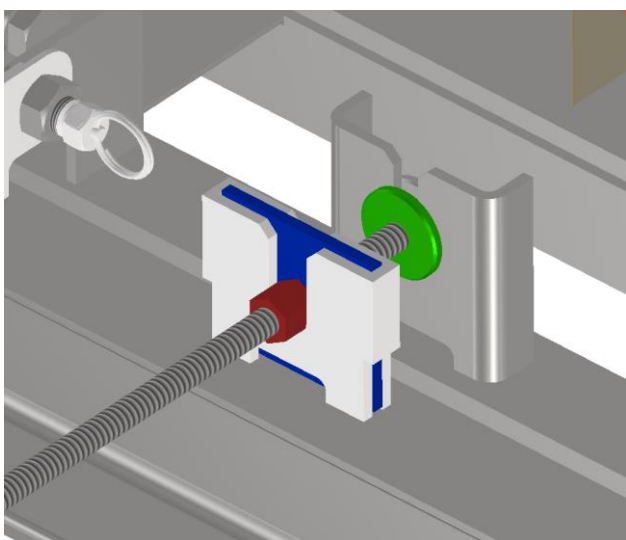
$$\sigma = \frac{F}{\frac{\pi \cdot d_j^2}{4}} = \frac{307,07}{\frac{\pi \cdot 8,5^2}{4}} = 5,41 \text{ MPa.} \quad (16)$$

Redukované napätie σ_{red} podľa teórie *HMH* bude (17):

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_i^2 + 3 \cdot \tau^2},$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{5,41^2 + 3 \cdot (4,29 \cdot 10^{-3})^2} = 5,41 \text{ MPa.} \quad (17)$$

Na obr. 5 je možné vidieť finálne konštrukčné vyhotovenie skrutkového manipulátora a realizáciu jeho fixácie k rámu a vozíku.



Obr. 5. Detail 3D CAD modelu uchytenia manipulátora k rámu a vozíku

ZÁVER

Cieľom príspevku bol konštrukčný návrh a s ním spojené technické výpočty skrutkového manipulátora turniketu sypkých materiálov. Toto zariadenie slúži v potravinárskom priemysle s podmienkou vlastníctva certifikátu *ATEX*, t.j. garancie použiteľnosti rotačného podávača oddeľujúceho dva priestory v prípade výbuchu práškoveho materiálu (sušené mlieko). Navrhnutým skrutkovým manipulátorom je celá zostava zobrazená na obr. 1 (teleso turniketu, spojka, prevodovka, elektromotor, vodiace tyče, pojazd) tlačená resp. ťahaná. Hlavnou podmienkou bolo dosiahnutie stavu, kedy je celá konštrukcia bezpečná pre obsluhu počas servisných úkonov na turnikete. Zároveň musí byť konštrukcia bezpečná pre svoje okolie počas bežnej prevádzky rotačného podávača.

Doposiaľ bol vykonaný výpočet ťažísk, ktoré budú

tvoriť významnú okrajovú podmienku pri aplikácii síl v rámci budúcej *MKP* analýzy. Vychádzajúc z ťažísk boli ďalej určené kolesové sily vozíka a pomocou metódy vplyvových čiar bola stanovená najúčinnejšia poloha vozíka na dráhe pojazdu. Kolesové sily boli následne využité pri určovaní ťažnej sily, ktorá je potrebná na pohyb pojazdu. A práve pojazdom manipuluje v článku navrhnutý skrutkový manipulátor.

Výsledky uvedené v práci sú významným podkladom pre ďalší výskum v danej oblasti. Všetky doposiaľ určené parametre konštrukcie budú implementované do okrajových podmienok pri *MKP* analýze v prostredí programu *Ansys*. Dôležité bude sa zamerať na pevnostný návrh spojovacích prvkov rámu nesúceho celý pojazd s turniketom (rám tvorí dráhu pre pojazd podľa obr. 1) a tiež numerické výpočty samotného rámu.

Pod'akovanie

Tento príspevok vznikol vďaka podpore projektu *KEGA 031ŽU-4/2023*: „Rozvoj kľúčových kompetencií absolventa študijného programu *Vozidlá a motory*.“

LITERATÚRA

- [1] BLATNICKÝ, M. - DIŽO, J. - MOLNÁR, D. - DROŽDZIEL, P. (2022): *Design of a manipulator of a conveyor for bulk materials – calculation of the center of gravity of the conveyor*. In: Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, 117, 43-56, ISSN 0209-3324, DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.117.3>.
- [2] BLATNICKÝ, M. - DIŽO, J. - MOLNÁR, D. - ISHCHUK, V. (2023): *Structural design of the manipulator of the rotary valve for bulk materials – calculation of loads acting on individual wheels and analysis of resistances against motion*. In: XI International Scientific Congress Agricultural Machinery, 28. jún - 1. júl, Varna, Bulharsko. V tlači.
- [3] BLATNICKÝ, M. (2015): *Dopravné a manipulačné zariadenia: riešené príklady*. 1. vyd., Žilina: Žilinská univerzita, 120 s. ISBN 978-80-554-1625-0.
- [4] REMTA, F. - KUPKA, L. - DRAŽAN, F. a kol. (1974): *Jeřáby*, 1. díl, Praha: SNTL, 645 s.
- [5] REMTA, F. - KUPKA, L. - DRAŽAN, F. a kol. (1975): *Jeřáby*, 2. díl, Praha: SNTL, 562 s.
- [6] BAJLA, J. - BRONČEK, J. - ANTALA, J. - SEKEREŠOVÁ, D. (2014): *Strojárske tabuľky: výber noriem*. Úrad pre normalizáciu, metodológiu a skúšobníctvo SR, Bratislava, 488 s., sch., tab., ISBN 978-80-8130-039-4.