

METODA WYZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKA TARCIA POMIĘDZY ZASTAWĄ I ZGARNIANYM OBIEKTEM W RÓWNOWADZE SIŁ TARCIA

W artykule przedstawiono metodę wyznaczania współczynnika tarcia pomiędzy materiałem zgarnianego obiektu i materiałem zastawy, bezpośrednio na przenośniku taśmowym, który następnie wprowadza się jako parametr w programie MES (LSDyna) dla symulacji procesu zgarniania w sortowni zautomatyzowanej. Pomija się w ten sposób konieczność stosowania dodatkowego stanowiska laboratoryjnego do wyznaczania współczynnika tarcia. Ze względu na występującą równowagę sił tarcia, model zjawiska można traktować jako statyczny, w związku z czym pomiar jest bardzo prosty i nie zależy od czasu.

WSTĘP

Stopień zaawansowania technicznego zautomatyzowanej sortowni jest uwarunkowany przede wszystkim wydajnością przekierowywania obiektów na drogi transportowe. Wzrost liczby transakcji na odległość, gdzie przedmiot transakcji jest materialny, wymusza wzrost wydajności sortowni firm kurierskich i poczty. Również wzrost liczby osób podróżujących statkami powietrznymi wymusza wzrost wydajności sortowni lotniskowych.

Najbardziej newralgiczną sekcją sortowni ze względu na siły dynamiczne wywierane na sortowane obiekty jest przenośnik sortujący wraz z urządzeniami zgarniającymi. To tutaj następuje gwałtowna zmiana kierunku ruchu sortowanego obiektu, realizowana na krótkim odcinku drogi w ograniczonej przestrzeni roboczej manipulatora. Dlatego manipulatory powinny być konstruowane tak, by minimalizowały reakcje dynamiczne wywierane na obiekty podczas procesu przekierowywania.

U podstaw zasady kierowania obiektem do ześlizgu przez manipulator mogą leżeć takie zjawiska fizyczne jak siła grawitacji jak w przypadku tacek uchylnych, zmiana kierunku siły tarcia jak w przypadku rolek skrętnych lub oddziaływanie przez inny obiekt jak w przypadku zabieraków oraz zastawy aktywnej o ruchu obrotowym i postępowym. Ważniejsze typy manipulatorów są zreferowane w pracy [1]. W przypadku manipulatorów takich jak tacka uchylna lub rolki skrętne wartości przeciążeń dynamicznych wywieranych na obiekty podczas przekierowywania są naturalnie ograniczone do poziomu przyspieszenia ziemskiego (tacka uchylna) lub siły tarcia (rolki skrętne) będącej iloczynem ciężaru i współczynnika tarcia. W obu przypadkach wartości tych przeciążeń nie przekracza jednego g. Wydajność sortowania tych rozwiązań jest również wysoka jednak zastosowanie ich wymaga całkowitej modernizacji infrastruktury transportowej sortowni. Tam gdzie obiekty transportowane są na przenośnikach taśmowych, zastosowanie ma zastawa aktywna o ruchu obrotowym i postępowym.

Mankamentem zastawy aktywnej o ruchu obrotowym jest impuls siły występujący przy inicjacji kontaktu. Przemysłowe konstrukcje takich zastaw są masywne w tym rozumieniu, iż mają dużo mniejszą podatność na odkształcenia w stosunku do zgarnianych obiektów. Dzięki temu gwarantowana jest pewność realizowania założonego toru ruchu zastawy niezależnie od wartości sił ją obciążających. Konsekwencją stosowania manipulatorów o bardzo sztywnej konstrukcji jest jednak brak możliwości przejmowania i rozpraszania

energii zderzenia wywołanej podczas wchodzenia ładunku w kontakt z manipulatorem. Uzyskiwanie wysokiej wydajności procesu manipulacji i nieprzekraczanie przeciążeń dopuszczalnych ładunków w takim przypadku jest trudne do pogodzenia.

By zmniejszyć reakcje wywierane na obiekty podczas zgarniania pojawiła się koncepcja zastawy podatnej gdzie dopuszcza się pewną strzałkę ugięcia podczas zgarniania tak, że część energii zderzenia jest przejmowana przez zastawę [2]. Jedną z modyfikacji tego pomysłu jest zastawa o takim ukształtowaniu przekroju poprzecznego by zapewniał stałą wytrzymałość na zginanie [3]. Zmniejsza to ponadto przyczynę masowy w dynamicznej reakcji masowo-sprężysto-tłumiącej wywieranej na zgarniany obiekt podczas inicjacji kontaktu.

Kształtowanie podatności zastawy przez zmianę jej geometrii i wymiarów powinno być konfrontowane z eksperymentem, ponieważ gdy zastawa jest zbyt podatna dla danej prędkości zgarniania, to siła bezwładności obiektu powoduje, iż zastawa ugina się tak bardzo, że nie zdoła w ogóle go zgarnąć.

Dlatego dla optymalnego doboru konstrukcji zastawy w kontekście podniesienia wydajności sortowania przy nie przekraczaniu ustalonej granicznej wartości przeciążeń wywieranych na obiekty bardziej racjonalnym od eksperymentalnej weryfikacji każdego rozwiązania jest zastosowanie symulacji modelu elementów skończonych procesu zgarniania.

Jednak by model elementów skończonych (akronim MES) wierne odzwierciedlał rzeczywistość, należy wprowadzić do niego parametry materiałowe wyznaczone eksperymentalnie. Jednym z tych parametrów jest współczynnik tarcia pary cieiernej zastawa-obiekt zgarniany, którego brak lub źle dobrana wartość, może znacząco zmieniać symulowaną trajektorię ruchu opakowania w stosunku do rzeczywistości, co przełoży się na siły wywierane na obiekt oraz to czy w ogóle zostanie zgarnięty.

Współczynnik tarcia suchego z reguły wyznaczany jest w przeznaczonych do tego celu stanowiskach laboratoryjnych od najprostszycch takich jak równia pochyła [4] do bardziej zaawansowanych na bazie sań poruszających się ruchem postępowym [5] lub dysku obrotowego [6]. Dwa ostatnie pozwalają badać takie zjawiska związane z tarciami jak np. histereza siły tarcia w zakresie przemieszczeń przedpoślizgowych. Dzięki odpowiedniej metodyce badań okazuje się, że wahadło Froude'a również umożliwia wyznaczenie nieliniowych właściwości zjawiska tarcia, także zakresie przedpoślizgowym [7]. Mankamentem powyżej przedstawionych rozwiązań jest konieczność przygotowania próbek w postaci kształtek takich jak płytki lub tulejki

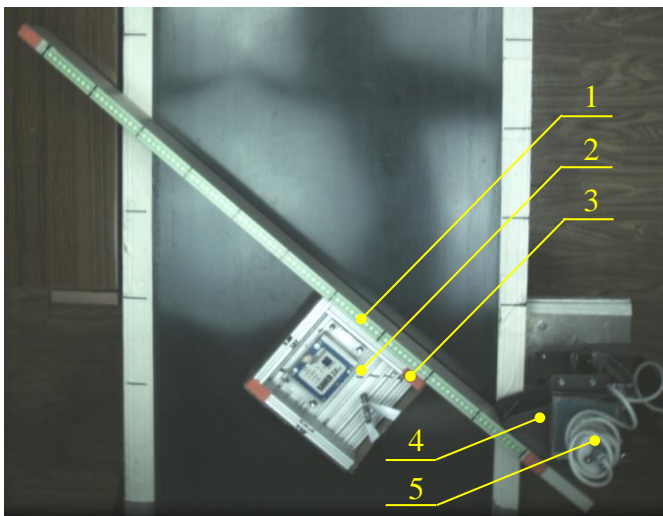
z materiałów badanej pary ciernej, które umieszcza się w urządzeniach badawczych.

Okazuje się, że wymagany w modelu MES współczynnik tarcia pomiędzy materiałem zastawy i materiałem zgarnianego obiektu może być wyznaczony bezpośrednio na stanowisku przenośnika taśmowego z zabudowaną na nim zastawą o ruchu obrotowym przez zastosowanie metodyki przedstawionej w tym artykule. Dlatego nie jest potrzebne odrębne stanowisko oraz próbki badawcze.

1. UKŁAD POMIAROWY

1.1. Zasada działania oraz elementu układu

Układ pomiarowy składa się z przenośnika taśmowego wraz z zespołem mocowania zastawy, kamery szbkoklatkowej zamocowanej nad przenośnikiem oraz enkodera absolutnego (Rys. 1). Kamera została skonfigurowana do rejestracji obrazu o rozdzielczości 1100x1200px z częstotliwością 200Hz. Uwzględniając obszar obejmowany przez kadr kamery oraz nastawioną rozdzielczość, położenie obiektu jest wyznaczane z dokładnością 1,17mm/px. Enkoder absolutny działający w oparciu o układ scalony AS5040 firmy AMS o rozdzielczości 1023 impulsów na obrót, umieszczony w osi obrotu zastawy, pozwala ustawić zastawę pod odpowiednim kątem z dokładnością 0,36°. Zarówno na zastawie jak i na poruszającym się obiekcie umieszczono czerwone znaczniki ułatwiające śledzenie. Napęd przenośnika umożliwia zadawanie prędkości taśmy w szerokim zakresie, która jest mierzona za pomocą enkodera inkrementalnego (1440 imp./obrot) zamocowanego w osi wałka napędowego taśmy.



Rys. 1. Zdjęcie układu pomiarowego z umieszczoną nad nim kamerą szbkoklatkowej, składającego się z następujących elementów: 1-linia pomiarowa, 2-konstrukcja aluminiowa oklejona tekturą falistą stanowiąca zgarniany obiekt, 3-znacznik dla BLOB-a, 4-zespół mocowania zastawy, 5-enkoder absolutny wskazujący kąt ustawienia zastawy

Zastawa podczas pomiaru jest unieruchomiona pod zadanym kątem przez napęd zastawy. W momencie uruchomienia przenośnika wyzwalana jest rejestracja obrazu kamerą szbkoklatkową oraz pomiar prędkości taśmy. Analizę zarejestrowanego obrazu ułatwia linia pomiarowa umieszczona na zastawie. Dla uzyskania wykresu prędkości i położenia obiektu od czasu nagrania poddano cyfrowemu przetwarzaniu obrazu w środowisku MATLAB z wykorzystaniem metody detekcji dużego obiektu binarnego (z ang. BLOB detection- Binary Large Object detection). Metoda polega na wykrywaniu obszaru obrazu cyfrowego, którego piksele mają wspólne, zdefiniowane

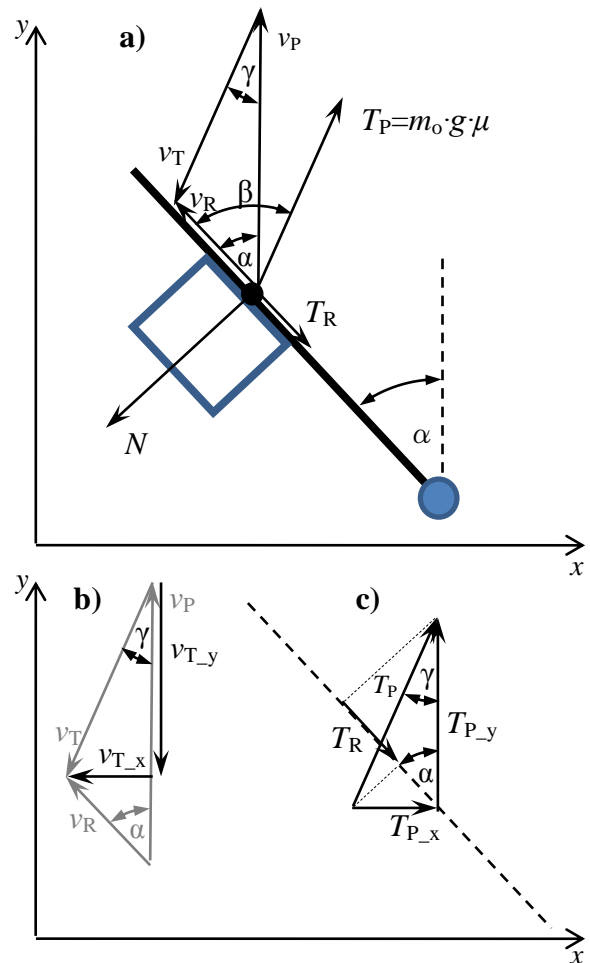
wcześniej właściwości takie jak jasność czy barwa, odmienne od pozostałej części obrazu stanowiącej tło. Otrzymywane przez program współrzędne pikselowe wykrytego BLOB-a znajdują się w geometrycznym środku ciężkości rozpoznanej w BLOB-ie figury płaskiej.

1.2. Opis pary ciernej

Współczynnik tarcia wyznaczono dla pary ciernej materiałów zastawa-sortowany obiekt często spotykanej w strumieniowym sortowaniu ładunków. Aluminiowa konstrukcja została oklejona tekturą falistą na wszystkich powierzchniach bocznych oraz od spodu, zastawa natomiast wykonana jest z poliamidu PA6.

2. MODEL UKŁADU POMIAROWEGO

Schemat sił działających na obiekt poruszający się wzdłuż osi podłużnej zastawy został przedstawiony w prostokątnym układzie współrzędnych (rys. 2).

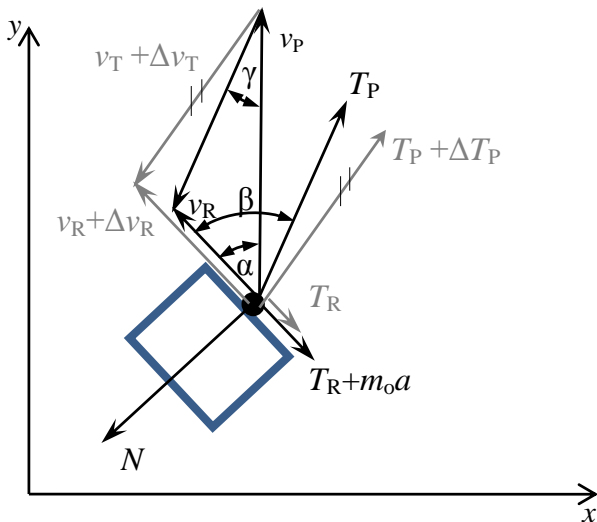


Rys. 2. Schemat równowagi sił tarcia działających na obiekt: a) schemat ogólny, w którym wektor siły tarcia T_P pomiędzy obiektem i przenośnikiem jest równoległy do wektora prędkości v_T , b) wyznaczenie wypadkowej wektora prędkości v_T z prędkości v_P przenośnika oraz prędkości v_R obiektu wzdłuż zastawy, c) wyznaczenie wartości siły tarcia T_R obiekt-zastawa przez rzutowanie współrzędnych wektora T_P na oś podłużną zastawy

Prędkość v_T , z jaką porusza się obiekt o masie m_o względem obserwatora na przenośniku jest różnicą wektorową prędkości v_R i v_P (rys. 2b). Ponieważ siła tarcia ma na ogół (wówczas, gdy nie występują gwałtowne zmiany kierunku i zwrotu wektora prędkości obiektu) ten sam kierunek lecz przeciwny zwrot do zwrotu prędkości obiektu, wektor siły tarcia T_P pomiędzy taśmą przenośnika a obiektem ma ten

sam kierunek, co wektor prędkości v_T i przeciwny zwrot. Rzut prostopadły wektora siły tarcia T_P pomiędzy taśmą przenośnika a obiektem na oś podłużną ramienia zastawy, jest równoważony przez siłę tarcia T_R pomiędzy obiektem i ramieniem zastawy.

Prędkość ruchu obiektu jest stała, co wynika z właściwości układu. Mechanizm stabilizacji prędkości można wyjaśnić następująco (rys. 3). Gdy prędkość v_R obiektu wzdłuż osi podłużnej ramienia zastawy wzrasta, wektor prędkości v_T obiektu względem taśmą przenośnika staje się bardziej pionowy do osi podłużnej ramienia zastawy. Równoległy do wektora prędkości v_T , wektor siły tarcia T_P pomiędzy taśmą przenośnika a obiektem również staje się bardziej pionowy do osi podłużnej ramienia zastawy. Rzut prostopadły na oś podłużną ramienia zastawy tego wektora staje się krótszy równy wektorowi siły tarcia T_R pomiędzy obiektem i ramieniem zastawy, dlatego obiekt przestaje przyspieszać.



Rys. 3. Schemat obrazujący osiągnięcie statyczność układu sił tarcia przez układ pomiarowy

W celu wyznaczenia współczynnika tarcia μ pary ciemnej obiekt-ramię zastawy należy najpierw ułożyć równowagę sił na oś podłużną i oś prostopadła do ramienia

$$N - T_P \cdot \sin(\beta) = 0 \quad (1)$$

$$T_R - T_P \cdot \cos(\beta) = 0 \quad (2)$$

Współczynnik tarcia μ można zatem wyznaczyć jako

$$\mu = \frac{T_R}{N} = \text{ctg}(\beta) \quad (3)$$

Kierunek działania siły T_P jest zgodny z kierunkiem wektora prędkości v_T ruchu paczki względem obserwatora na przenośniku, którego współrzędne można obliczyć jako (rys. 2b)

$$v_{T,y} = v_P - v_R \cos(\alpha) \quad (4)$$

$$v_{T,x} = v_R \sin(\alpha) \quad (5)$$

Wartość $\cos(\beta)$ można obliczyć biorąc wektor kierunkowy ramienia zastawy, którego współrzędne są wyrażone jako

$$R_x = -R \sin(\alpha) \quad (6)$$

$$R_y = R \cos(\alpha) \quad (7)$$

oraz wektor o zwrocie przeciwnym do wektora prędkości v_T . Ponieważ jednak wektor v_T został skierowany na rysunku przeciwnie do kierunku układu współrzędnych xy , należy wziąć współrzędne wektora w równaniu 4 i równaniu 5 bez zmiany znaku

$$\cos(\beta) = \frac{\vec{v}_T \cdot \vec{R}}{|\vec{v}_T| \cdot |\vec{R}|} \quad (8)$$

Zapisując w postaci skalarej

$$\cos(\beta) = \frac{v_{T,x} \cdot R_x + v_{T,y} \cdot R_y}{R \sqrt{(v_{T,x})^2 + (v_{T,y})^2}} \quad (9)$$

Po rozwiązaniu otrzymuje się

$$\cos(\beta) = \frac{v_P \cdot \cos(\alpha) - v_R}{\sqrt{(v_P)^2 - 2v_P \cdot v_R \cos(\alpha) + (v_P)^2}} \quad (10)$$

Prędkości v_P oraz v_R są wyznaczane bezpośrednio z pomiarów. Wyznaczenie współczynnika tarcia μ obiekt-ramię zastawy wymaga znajomości $\text{ctan}(\beta)$ który na podstawie tożsamości trygonometrycznej, jest związany z $\cos(\beta)$ następującą zależnością

$$\text{ctan}(\beta) = \frac{\cos(\alpha)}{\sqrt{1 - \cos^2(\alpha)}} \quad (11)$$

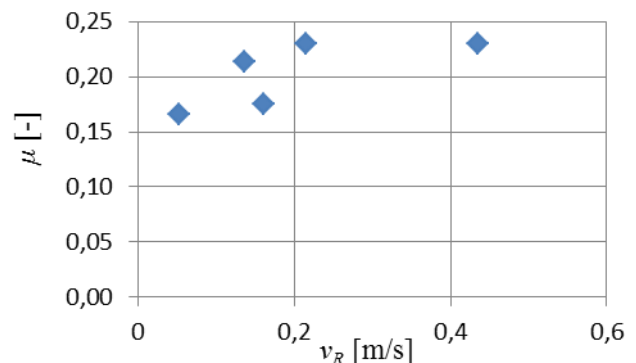
Uwzględniając równania 3, 10 i 11, współczynnik tarcia μ obiekt-ramię zastawy wynosi

$$\mu = (v_P \cos(\alpha) - v_R) / (v_P \sin(\alpha)) \quad (12)$$

Zależność pomiędzy μ a v_R i v_P można wyznaczyć również przez rzutowanie współrzędnych $T_{P,x}$, $T_{P,y}$ wektora T_P na oś podłużną ramienia zastawy. Z równania 12 wynika że współczynnik tarcia μ obiekt-ramię zastawy nie zależy od właściwości pary ciemnej obiekt-taśma przenośnika co upraszcza jego wyznaczenie.

3. EKSPERYMENT I ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW

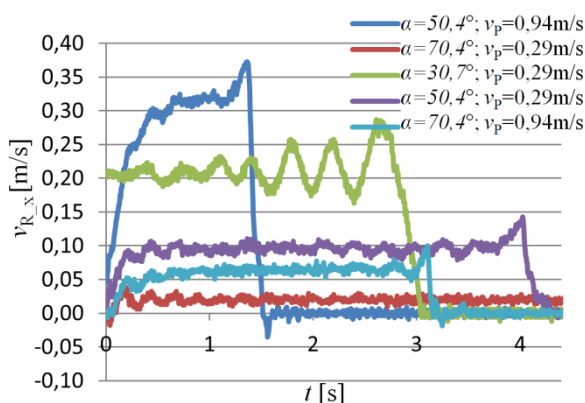
Współczynnik tarcia był wyznaczany dla trzech prędkości v_P przenośnika 0,29; 0,94 m/s dla kąta $\alpha=30, 50, 70^\circ$. Wyznaczony współczynnik μ waha się w zakresie 0,17-0,23.



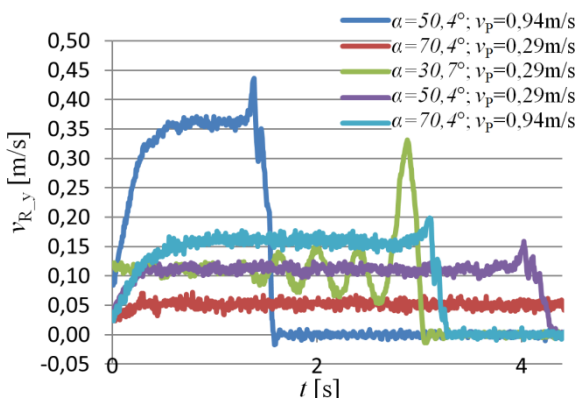
Rys. 4. Współczynnik tarcia zastawa-obiekt w funkcji prędkości poślizgu

Poniżej przedstawiono przebieg czasowy składowej x-owej (Rys. 5) oraz y-owej (Rys. 6) prędkości geometrycznego środka ciężkości obiektu oraz moduł tej prędkości (Rys. 7). Na wykresach, początkowy przyrost prędkości związany jest z przyspieszeniem obiektu, następnie zgodnie z modelem statycznym układu (Rys. 2, Rys 3), prędkość utrzymuje się na stałym poziomie. Oscylacje prędkości widoczne zwłaszcza dla kąta $\alpha=30,7^\circ$ i prędkości $v_p=0,29\text{m/s}$ zostały spowodowane przez cykliczne uginanie końca zastawy podczas ruchu obiektu. Utwierdzenie swobodnego końca zastawy wyeliminuje oscylacje.

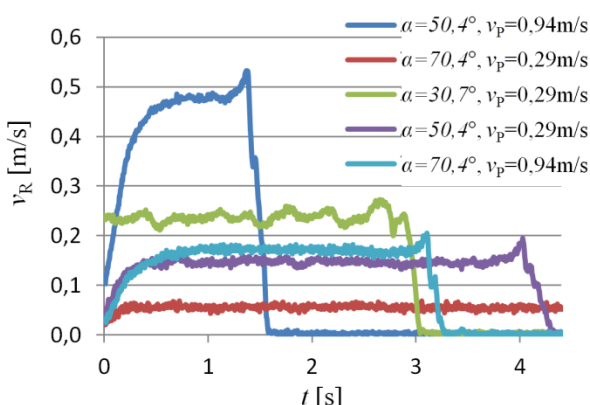
Na rysunku 8 przedstawiono wartość wypadkowej położenia geometrycznego środka ciężkości obiektu w kierunku osi x oraz y.



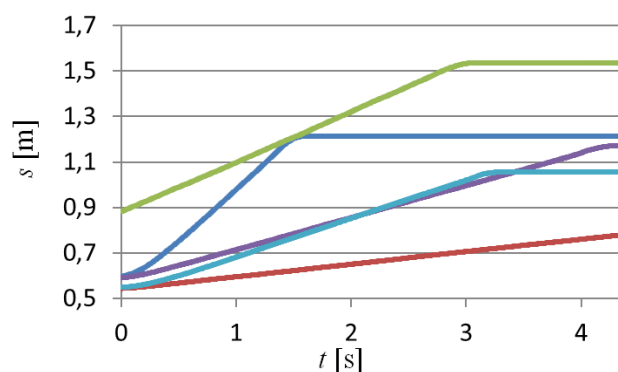
Rys. 5. Składowa wzdłuż osi x prędkości obiektu względem zastawy dla kąta wychylenia zastawy $\alpha=30,7^\circ - 70,4^\circ$ oraz prędkości przenośnika $v_p=0,29^\circ; 0,94^\circ$



Rys. 6. Składowa wzdłuż osi y prędkości obiektu względem zastawy dla kąta wychylenia zastawy $\alpha=30,7^\circ - 70,4^\circ$ oraz prędkości przenośnika $v_p=0,29^\circ; 0,94^\circ$



Rys. 7. Prędkości obiektu względem zastawy dla kąta wychylenia zastawy $\alpha=30,7^\circ - 70,4^\circ$ oraz prędkości przenośnika $v_p=0,29^\circ; 0,94^\circ$



Rys. 8. Położenie s geometrycznego środka ciężkości obiektu na osi podłużnej ramienia zastawy

PODSUMOWANIE

W artykule zaproponowano wyznaczanie współczynnika tarcia zastawa-obiekt bezpośrednio na stanowisku przenośnika taśmowego, dzięki czemu pominięto stosowanie dodatkowych urządzeń laboratoryjnych.

Ponieważ w układzie występuje równowaga sił tarcia, nie trzeba uwzględniać w rachunkach sił bezwładności, dlatego model, jako statyczny staje się bardzo prosty, a siły występujące w układzie nie zależą od czasu. W konsekwencji prędkość obiektu jest stała, dlatego by wyznaczyć współczynnik tarcia wystarczy znać kąt natarcia zastawy na kierunek prędkości przenośnika oraz czas, w którym obiekt przebędzie drogę pomiędzy dwoma punktami na zastawie.

Błąd wyznaczenia współczynnika tarcia taśma-obiekt nie wpływa na błąd pomiaru współczynnika tarcia zastawa-obiekt gdyż współczynnika tarcia taśma-obiekt nie występuje w równaniu na wartość współczynnika tarcia zastawa-obiekt.

Metoda równi pochyłej, choć jest równie prosta, jednak prędkość obiektu w tej metodzie ulega zmianie, dlatego trudność stanowi w przeciwieństwie do zaproponowanej metody, wyznaczenie charakterystyki wartości współczynnika tarcia w funkcji prędkości poślizgu.

BIBLIOGRAFIA

1. Piątkowski T., *Badania i analiza właściwości użytkowych manipulatorów sortujących*, „Logistyka” 2011, nr 6.
2. Piątkowski T., Sempruch J., *Model of the process of load unit stream sorting by means of flexible active fence*, „Mechanism and Machine Theory” 2008, volume 43, issue 5, 549-564, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2007.05.004
3. Piątkowski T., *Active fence with flexible link*, „Journal of Theoretical and Applied Mechanics” 2010, volume 48, issue 1, 87-109.
4. Kazuo Arakawa, *Dynamic sliding friction of pencil leads on dry and oiled glass inclines*, „Wear” 2017, volume 376-377, 766-770, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.046>
5. Lampaert V., Swevers J., Al-Bender F., *Experimental characterization of dry friction at low velocities on a developed tribometer setup for macroscopic measurements*, „Tribology Letters” 2004, volume 16, issue 1-2, 95-105
6. Kireenkov A., *Theoretical and Experimental Modelling of the Combined Dry Friction Effects*, „IFAC Proceedings Volumes” 2012, volume 45, issue 2, 825-829
7. Piątkowski T., Wolski M., *Analysis of selected friction properties with the Froude pendulum as an example*, „Mechanism and Machine Theory” 2018, Elsevier, volume 119, 37-50.

Method for determining the coefficient of friction between fence and scraped object in equilibrium of the friction force

In this paper presents friction coefficient determination method between scraped object's material and fence material, determined directly on the conveyor belt, which then is introduced in the FEM program (LSDyna) for simulation of the scraping process in the automated sorting plant. In this case, the necessity of using an additional laboratory stand to determine the coefficient of friction is omitted. Due to the existing balance of friction forces, the model of the phenomenon can be treated as static, therefore the measurement is very simple and does not depend on time.

Autorzy:

mgr inż. **Mirosław Wolski** – Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, ul. Kaliskiego 7, 85-793 Bydgoszcz, miroslaw.wolski@utp.edu.pl

dr hab. inż. **Tomasz Piątkowski** – Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, ul. Kaliskiego 7, 85-793 Bydgoszcz, topiat@utp.edu.pl

mgr inż. **Przemysław Osowski** – Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, ul. Kaliskiego 7, 85-793 Bydgoszcz, przemyslaw.osowski@utp.edu.pl

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2018.176

Data zgłoszenia: 2018.05.24 Data akceptacji: 2018.06.15