

Tomasz PIĄTKOWSKI¹

BADANIA I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH MANIPULATORÓW SORTUJĄCYCH

W referacie przedstawiono zakresy zastosowań bezchwytkowych manipulatorów sortujących ładunki jednostkowe (prostopadłościennne obiekty – np. paczki pocztowe) transportowane na przenośnikach w sposób ciągły. Właściwości użytkowe manipulatorów wyznaczono na podstawie optymalizacji numerycznej modeli procesu sortowania. Modele teoretyczne wymagane podczas optymalizacji zawierają opracowania zjawisk fizycznych występujących podczas interakcji obiektu z członem roboczym manipulatora. Siły reakcji o charakterze udaru definiowane są zmodyfikowanym nieliniowym modelem Kelvina a krzywoliniowe właściwości cierne – za pomocą krzywej B-sklejanej. Podczas analiz rozpatrywano struktury kinematyczne manipulatorów, które są reprezentatywnymi rozwiązaniami technicznymi aktualnie stosowanych metod wywierania impulsu kierującego obiekty na nowe linie transportowe w centrach logistycznych.

RESEARCH AND ANALYSIS OF EXPLOATIONAL PROPERTIES OF SORTING MANIPULATORS

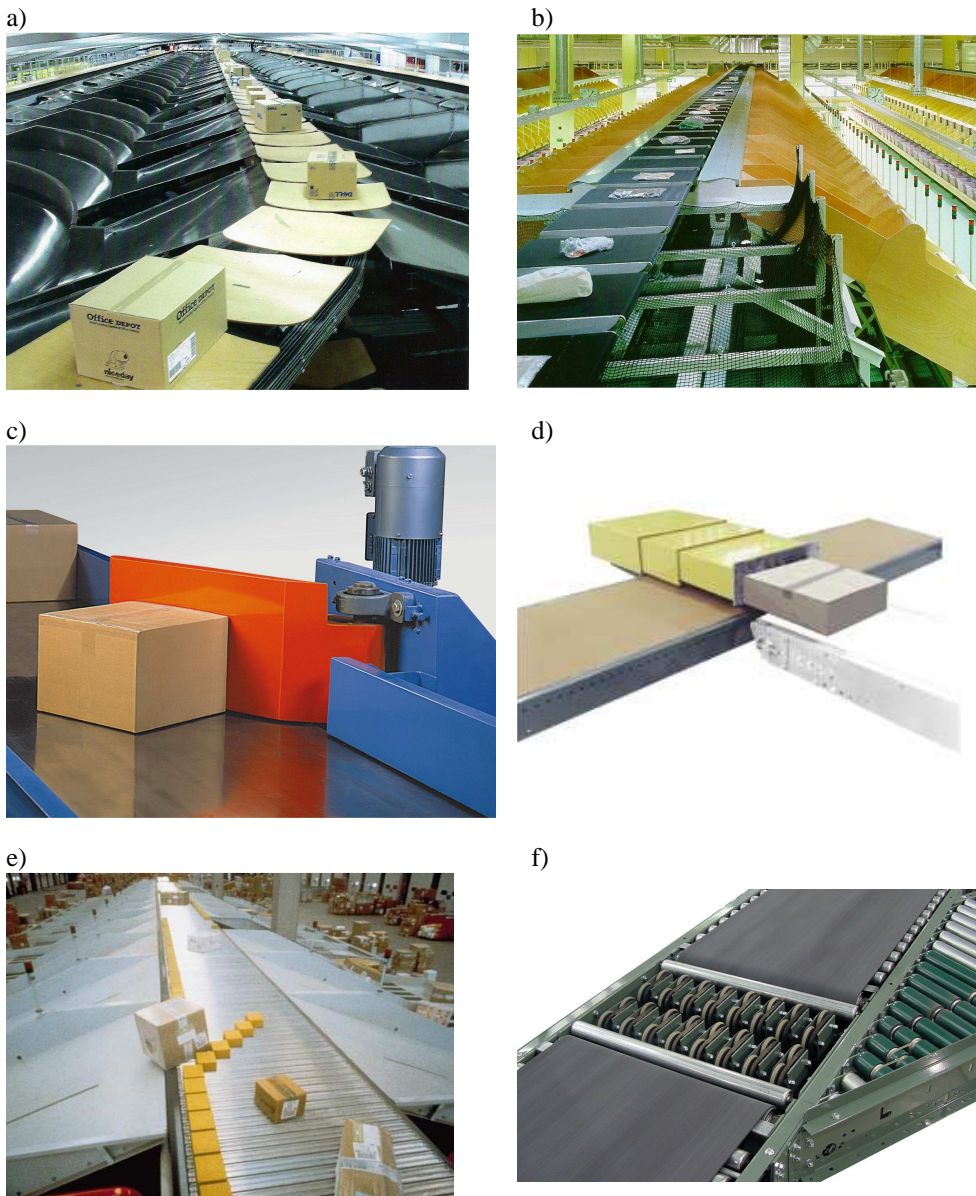
The paper deals with analysis of applications ranges of sorting manipulators of unit loads (cubiform objects – e.g. postal packages) transported on conveyors in the continuous manner. The exploitation properties of manipulators have been assigned on the basis of numeric optimization of the sorting process. Theoretical models, required during optimization, contain development of physical phenomena occurring while interaction between the object and manipulator actuators. The reaction forces of impact character appearing between the object and the working element of manipulator are defined by means of modified non-linear Kelvin model. The frictional proprieties of the object are modelled by the non-linear friction coefficient using B-spline curve of third degree. The kinematic structures of the manipulators analyzed during research are the representative technical solutions of currently applied methods of impulse exertion directing the objects on the new transports lines in the logistic centers.

1. WSTĘP

Problem sortowania produktów jednostkowych istnieje tam gdzie jest ich duża koncentracja. Towarzyszy zadaniom kompletacji i dekompletacji dostaw ładunków

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Metod Komputerowych; Bydgoszcz 85-796; ul. Kaliskiego 7. tel: + 48 52 340-81-45, E-mail: topiat@utp.edu.pl

jednostkowych w logistycznych centrach dystrybucyjnych, np.: w węzłowych urządzeniach pocztowych, domach sprzedaży wysyłkowej, portach lotniczych [1].



Rys. 1. Przykłady układów wykonawczych manipulatorów sortujących: a) tacka uchylna [2], b) tacka z przenośnikiem poprzecznym [3], c) zastawa aktywna o ruchu obrotowym [5], d) zastawa aktywna o ruchu postępowym [7], e) zabieraki [4], f) krążki skrzętne [6]

Rozdział ładunków na poszczególne kierunki zgodnie z przeznaczeniem realizowany jest za pomocą manipulatorów bezchwytkowych wkomponowanych w przenośnikowy system transportowy, oddziałujących na obiekty odpowiednio zaplanowanym pchnięciem, uderzeniem lub sekwencją pchnięć.

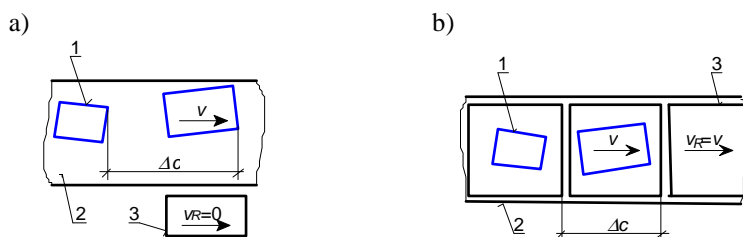
Współczesne rozwiązania techniczne tych manipulatorów wyposażone są w elementy wykonawcze, które powodują zgarnianie ładunków z przenośnika (przedstawione na rys. 1c, b i e), realizują przemieszczanie obiektów kierunkowo zorientowanym polem sił tarcia (rys. 1b,f), bądź wymuszają grawitacyjne zsuwanie obiektów do nowej linii dalszego transportowania (rys. 1a).

Systemy sortujące są rozbudowanymi przestrzennie, złożonymi i kosztownymi przedsięwzięciami inwestycyjnymi. W zależności od zakładanego natężenia przepływu manipulowanych obiektów i ich cech fizycznych należy wyznaczyć optymalne rozwiązanie techniczne układów wykonawczych manipulatorów.

W celu przeprowadzenia racjonalnego doboru manipulatorów sortujących konieczny jest dostęp do obiektywnych danych charakteryzujących podstawowe cechy użytkowe – wykorzystywane np. przez potencjalnych inwestorów i projektantów węzłów transportowych. Jednym z istotniejszych źródeł pozyskiwania danych są wyniki optymalizacji numerycznej procesu sortowania, będące przedmiotem prezentowanej pracy. Do budowy modeli teoretycznych wybrane zostały urządzenia, które pokrywają obszar współcześnie stosowanych manipulatorów w centrach logistycznych oraz oferowane przez producentów.

2. STRUKTURY KINEMATYCZNE MANIPULATORÓW BEZCHWYTKOWYCH

Prosty w swojej postaci manipulator bezchwytkowy zdolność manipulowania obiektem uzyskuje w wyniku więzi z funkcjami transportowymi przenośników – manipulatory te współpracują zwykle z przenośnikami (np. taśmowymi lub segmentowymi). Ze względu na odmienność wykorzystywania funkcji transportowych przenośników wyselekcjonować można manipulatory stacjonarne (rys. 2a) i potokowe (rys. 2b).

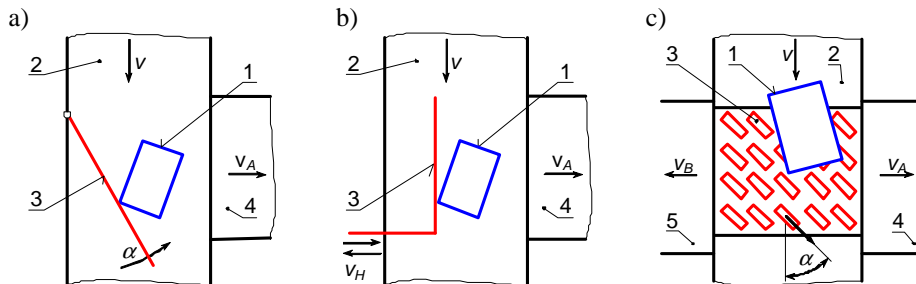


Rys. 2. Manipulatory bezchwytkowe: a) stacjonarny, b) potokowy; 1 – manipulowany obiekt, 2 – przenośnik, 3 – człon roboczy manipulatora, v – prędkość strumienia ładunków, v_R – prędkość ruchu manipulatora, Δc – odległość pomiędzy czołami obiektów

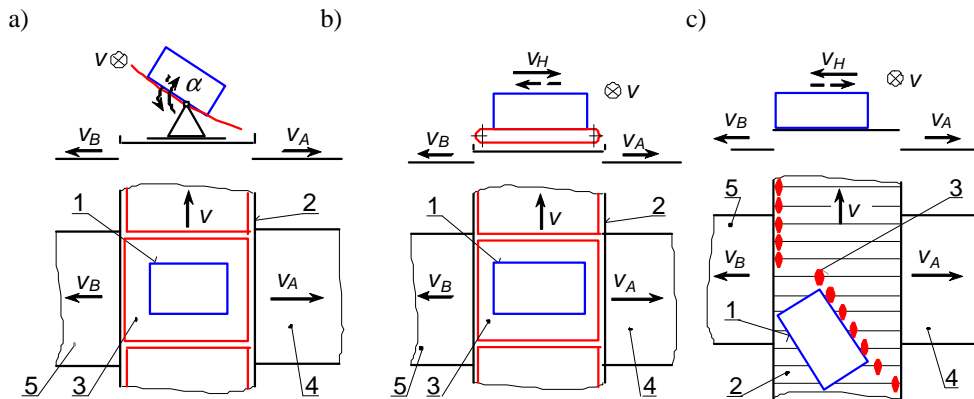
Manipulatory stacjonarne są zespolone z konstrukcją nośną przenośnika i trwają względem niej w bezruchu ($v_R = 0$). Elementy wykonawcze tych manipulatorów swoje ruchy robocze wykonują ponad powierzchnią przenośnika i najczęściej posiadają postać

zastaw aktywnych o ruchu obrotowym (rys. 3a), także zastaw aktywnych o ruchu postępowym (rys. 3b), układu zastaw pasywnych rys. 3c).

W manipulatorach potokowych rolę elementu wykonawczego pełnią wyposażone w dodatkowe funkcje segmenty przenośnika członowego, którymi mogą być: uchylne tacki (rys. 4a), tacki o powierzchniach nośnych pokrytych poprzecznymi taśmociągami (rys. 4c), przesuwne wzdłuż listew zabieraki (rys. 4b). Człony robocze manipulatora, będące jednocześnie segmentami przenośnika, wędrują w nim z prędkością potoku ładunków ($v_R = v$).



Rys. 3. Przykładowe struktury kinematyczne stacjonarnych manipulatorów bezchwytkowych: a) manipulator z zastawą aktywną o ruchu obrotowym, b) manipulator z zastawą aktywną o ruchu postępowym, c) manipulator z krążkami skrętnymi; 1 – ładunek, 2 – przenośnik główny, 3 – człon roboczy, 4 i 5 – przenośniki odbiorcze, v – prędkość liniowa przenośnika głównego, v_A i v_B – prędkości liniowe przenośników odbiorczych



Rys. 4. Przykładowe struktury kinematyczne potokowych manipulatorów bezchwytkowych realizujących proces sortowania: a) tackowy wychyłowy, b) tackowy przenośnikowy, c) zabierakowy; 1 – ładunek, 2 – przenośnik główny, 3 – człon roboczy, 4 i 5 – przenośniki odbiorcze, v – prędkość liniowa przenośnika głównego, v_H – prędkość liniowa elementu wykonawczego, v_A i v_B – prędkości liniowe przenośników odbiorczych

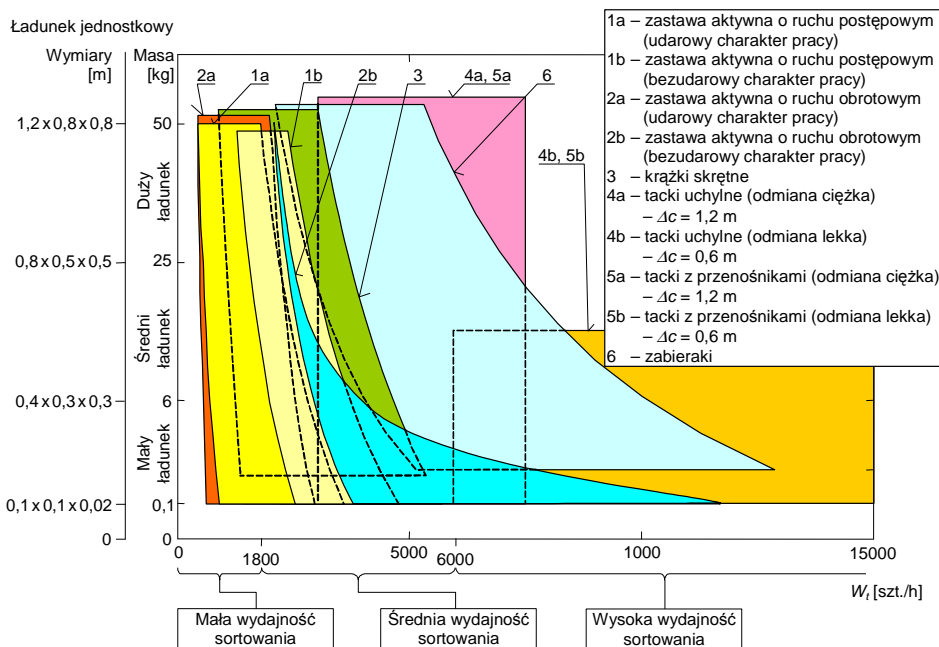
3. PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA MODELI PROCESU SORTOWANIA

Wskazania i zalecenia niezbędne podczas projektowania nowych rozwiązań manipulatorów oraz określenie zakresów zastosowań istniejących urządzeń sortujących uzyskano na podstawie analizy wyników optymalizacji numerycznych ([11], [12], [13], [14], [16]). W badaniach wykorzystano modele teoretyczne procesu sortowania, które zawierają opracowania zjawisk fizycznych występujących podczas interakcji pomiędzy obiektem a elementami wykonawczymi manipulatorów (zderzenia ukośnego, tarcia suchego). Siły reakcji o charakterze uderzenia pojawiające się pomiędzy obiektem a członem roboczym manipulatora zdefiniowane są za pomocą zmodyfikowanego nieliniowego współczynnikiem tarcia wykorzystując krzywą B-sklejaną trzeciego stopnia [15]. Proces sortowania traktowany jest, jako sekwencja dyskretnych etapów ruchu występujących kolejno po sobie, aż do umieszczenia ładunku w miejscu przeznaczenia. Etapy, na które można podzielić proces ciągły, to wyodrębnione istotnie różniące się między sobą stany kinematyczno-dynamiczne ruchu ładunku, wynikające z jego bieżącego oddziaływania i usytuowania względem elementów wykonawczych urządzenia rozdzielczego.

Właściwości fizyczne manipulowanych obiektów, niezbędne z uwagi na przyjęte modele, wyznaczono podczas badań doświadczalnych. Właściwości cierne obiektów badano za pomocą metody przeciwbieżnych pól sił tarcia [15], a właściwości sprężysto-tłumiące – za pomocą metody swobodnego spadku obiektu z wysokości na nieodkształcalne podłoże oraz sprężystą belkę [10]. Przeprowadzone badania doświadczalne stanowią ponadto weryfikację eksperymentalną potwierdzającą słuszność przyjętych założeń w modelowaniu zjawiska tarcia suchego i niesprężystego uderzenia ciał.

4. OGÓLNE ZALECENIA STOSOWANIA POSZCZEGÓLNYCH GRUP BEZCHWYTKOWYCH MANIPULATORÓW SORTUJĄCYCH

Przedstawione na rys. 5–rys. 10 dane stanowią syntezę wartości podstawowych cech konstrukcyjno-eksploatacyjnych manipulatorów specjalizowanych do sortowania potoku ładunków jednostkowych, opracowaną na podstawie wyników optymalizacji numerycznej [11], [12], [13], [14], [16].



Rys. 5. Przestrzeń rozwiązań konstrukcyjnych manipulatorów do sortowania strumieni ładunków jednostkowych

Badano potencjalne zdolności użytkowe wybranych struktur kinematycznych manipulatorów w zakresie sortowania prostopadłościennych obiektów (prostokątnych w rzucie na płaszczyznę przenośnika) o długości $A \in \langle 0,1; 1,2 \rangle$ m i szerokości $B \in \langle 0,1; 0,8 \rangle$ m przy prędkości unoszenia potoku ładunków $v \in \langle 0,2; 2,5 \rangle$ m/s i szerokości przenośnika głównego $s = 0,7$ m. Uwzględniono najbardziej kłopotliwe warianty ułożenia potoku ładunków dla uzyskania pomyślnego przebiegu procesu sortowania. Warianty te wynikają z kojarzenia skrajnych wartości parametrów obiektów: ich wymiarów geometrycznych, rozmieszczenia gęstości, właściwości ciernych, położenia początkowego na przenośniku głównym. Przyjęte dopuszczalne oddziaływanie dynamiczne, na jakie mogą być narażone sortowane obiekty, równoważne jest przeciążeniu powstałemu podczas uderzenia obiektu przy swobodnym spadku na nieodkształcalne podłoże z wysokości $H_{dop} = 0,3$ m.

Przedstawione na rysunkach wartości cech użytkowych manipulatorów oznaczono przez zacienione obszary. Każdy manipulator ma przypisany obszar o innym odcieniu wypełnienia, którego znaczenie objaśniono w legendzie rys. 5. Interpretacja oznaczeń występujących na wszystkich rysunkach jest wspólna. Jednoczesne odwzorowywanie właściwości kilku manipulatorów na jednym rysunku prowadzi niekiedy do pokrywania i wzajemnego zasłaniania obszarów przypisanych manipulatorom. W celu umożliwienia ich pełnej identyfikacji, każdy obszar przynajmniej częściowo jest narysowany na pierwszym planie, a zasłonięte krawędzie odwzorowane są linią przerywaną. W przypadku kilku obszarów wystąpiły trudności w ich ukazaniu na pierwszym planie – chociażby częściowym. Poprawę „widoczności” tych pól uzyskano przez ich nieznaczne

„wyciągnięcie” poza deklarowaną maksymalną wartość wymiarów obiektów – stąd wykraczanie niektórych obszarów poza wymiary 1,2 x 0,8 x 0,8 m.

Podział wydajności sortowania manipulatorów na zakresy (małą, średnią i wysoką – rys. 5) oparto na określeniach wykorzystanych w pracy [8], a podział dotyczący rozmiarów ładunków (małe, średnie i duże) – na pracy [9]. Podziały wytyczają pasma kojarzące grupy manipulatorów z cechami procesu sortowania – przyporządkowują odpowiednie rozwiązania techniczne w odniesieniu do oczekiwań eksploatacyjnych.

W oznaczeniach manipulatorów z zastawą aktywną wyróżniono odmiany uwzględniające charakter ich pracy: udarowy (1a, 2a) lub bezударowy (1b, 2b). Przyjęte odmiany wynikają ze sposobu organizacji potoku ładunków na przenośniku, który decyduje o tym, czy podczas sortowania dochodzi do zderzenia obiektu z zastawą, czy też następuje jego bezударowy ślizg wzdłuż zastawy.

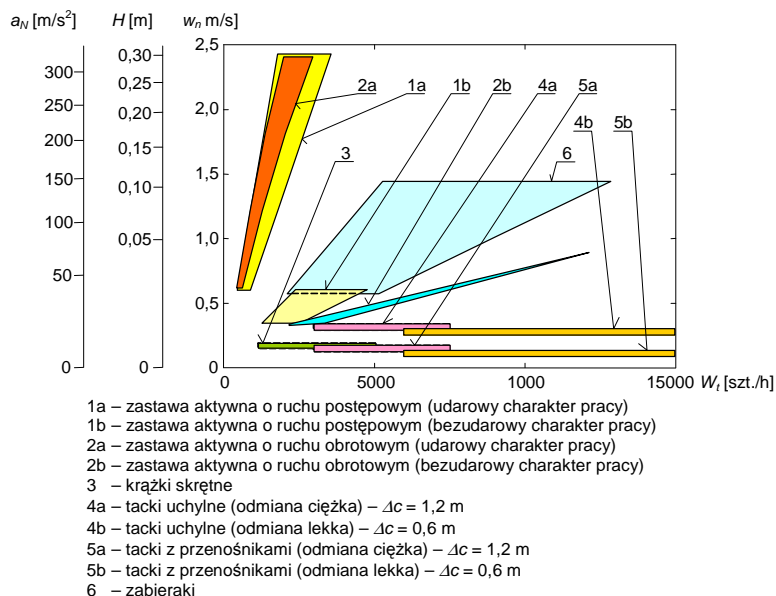
Wydajność sortowania manipulatorów tackowych jest ściśle związana z rozmiarem zastosowanych tacek – nie z rozmiarami obiektów spoczywających na ich powierzchniach nośnych. Największy przewidywany do sortowania obiekt powinien w całości mieścić się we wnętrzu tacki. Z tego względu wykreślone na rys. 5 obszary dotyczące tackowych urządzeń sortujących mają kształty prostokątów.

Podział manipulatorów tackowych na odmiany: ciężką (4a, 5a) i lekką (4b, 5b) podyktowany jest względem ekonomicznym: tacki lekkie projektowane są dla obiektów o małych wymiarach, a ciężkie – dla obiektów o wymiarach dużych [9].

Dane dotyczące urządzeń tackowych z przenośnikami (5a, 5b) charakteryzują bliskie powinowactwo tych urządzeń do manipulatorów tackowych uchylnych (4a, 4b) w zakresie osiąganego wydajności sortowania w funkcji wymiarów obiektów (rys. 5) i prędkości unoszenia przenośnika (rys. 7 i rys. 8). Różnica pomiędzy tymi rozwiązaniami dotyczy poziomu oddziaływań dynamicznych wywieranych na obiekty (rys. 6) oraz właściwości ciernych obiektów przewidzianych do sortowania. W przypadku tacek z przenośnikami obiekty narażone są na przeciążenie dynamiczne, którego wartość wynika ze sprzężenia ciernego występującego pomiędzy obiektem a czynną powierzchnią nośną manipulatora – podobnie jak w przypadku manipulatora z krążkami skrętnymi (3). Przyspieszenie, z jakim tacki uchylne oddziałują na obiekt, może być większe – osiągnąć ok. 1,5-krotności przyspieszenia ziemskiego (wg [11]). Manipulatory z tackami uchylnymi nie są przeznaczone do sortowania obiektów o zbyt dużych właściwościach ciernych. Manipulatory tackowe z przenośnikami tego ograniczenia nie posiadają – przenośniki pokrywające tacki wykonywane są z tworzyw o dużej przyczepności – znacznie większej niż w przypadku powierzchni tacek uchylnych.

Krawędziom ograniczającym obszary z lewej strony (przedstawionym na rys. 5) odpowiada wydajność sortowania uzyskiwana przy minimalnym przeciążeniu dynamicznym wywieranym na ładunki (rys. 6) i przy małej prędkości unoszenia przenośnika (rys. 7 i rys. 8). Przemieszczenie się w obrębie obszaru w kierunku prawej krawędzi oznacza uzyskiwanie większej wydajności sortowania, wzrost przeciążeń nadawanych ładunkowi i prędkości unoszenia przenośnika.

W przypadku manipulatorów tackowych (4a, 4b, 5a, 5b) i z krążkami skrętnymi (3) wzrost wydajności sortowania ma niewielki wpływ na zmianę wartości przeciążenia obiektów (rys. 6) – w przeciwieństwie do manipulatorów z zastawami aktywnymi (1a, 1b, 2a, 2b) i zabierakami (6).

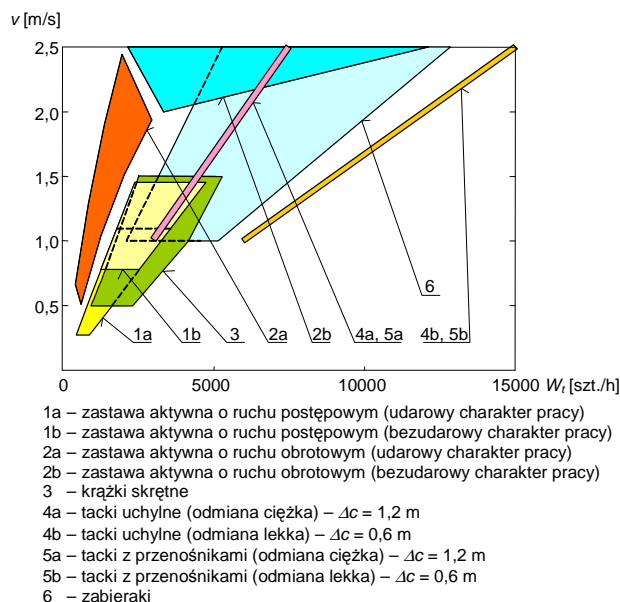


Rys. 6. Przestrzeń obciążeń mechanicznych wywieranych na obiekty przez manipulatory: a_N – przyspieszenie nadawane obiektowi, H – wysokość swobodnego spadku ładunku na nieodkształcalne podłoże, w_n – względna prędkość zderzenia obiektu z elementem wykonawczym w kierunku normalnym

Krawędzie z lewej strony obszarów przedstawionych na rys. 6 i rys. 7 wyznaczają wydajność sortowania ładunków o maksymalnych wymiarach, a prawe krawędzie – ładunków o wymiarach minimalnych. Regule tej oczywiście nie podlegają manipulatory tackowe (4a, 4b, 5a, 5b).

Przedstawione na rys. 6 wartości oddziaływań dynamicznych wywieranych na obiekty przez manipulatory wyrażone są poprzez prędkość uderzenia w_n , wysokość H swobodnego spadku ładunku na nieodkształcalne podłoże oraz przyspieszenie a_N . Wartości liczbowe poszczególnych wielkości zostały tak określone, by odtwarzały relacje występujące pomiędzy nimi podczas uderzenia ładunku (w pracy [10], wg tabeli 1 – ładunek testowy z umieszczonym w jego wnętrzu czujnikiem sejsmicznym otoczonym gąbką o grubości 0,03 m) przy swobodnym spadku z wysokości H na nieodkształcalne podłoże. Przeliczenie prędkości uderzenia w_n na adekwatne przyspieszenie nadawane ładunkowi nie uwzględnia podatności elementów wykonawczych manipulatorów. Wpływ tej podatności na łagodzenie oddziaływań dynamicznych wywieranych na obiekty przedstawiony jest w pracy [12].

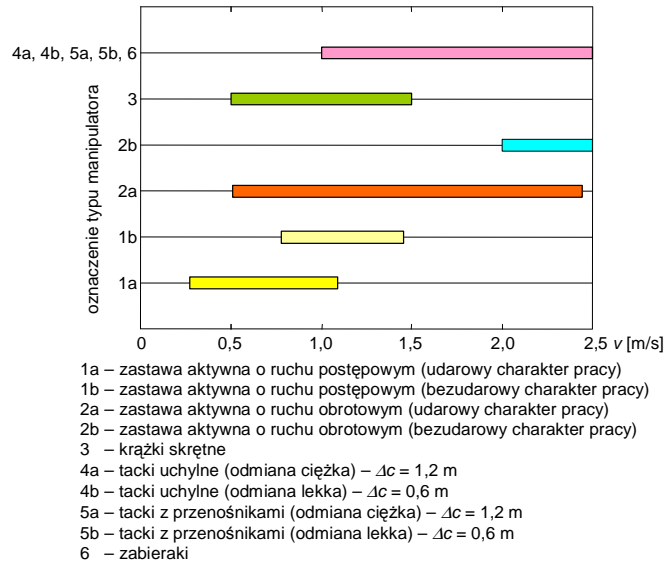
Wykres na rys. 8 opracowano na podstawie informacji zawartych na rys. 7, wykorzystując jedną współrzędną danych – preferowaną prędkość unoszenia potoku ładunków. Zalecenie sortowania obiektów w zakresie małych prędkości unoszenia przenośnika głównego odnosi się do manipulatorów z zastawami aktywnymi o ruchu postępowym (1a, 1b) i manipulatorów z krążkami skrętnymi (3). Większa prędkość unoszenia potoku ładunków właściwa jest dla pracy manipulatorów: tackowych (4a, 4b, 5a, 5b), z zastawą aktywną o ruchu obrotowym (2a, 2b) i z zabierakami (6).



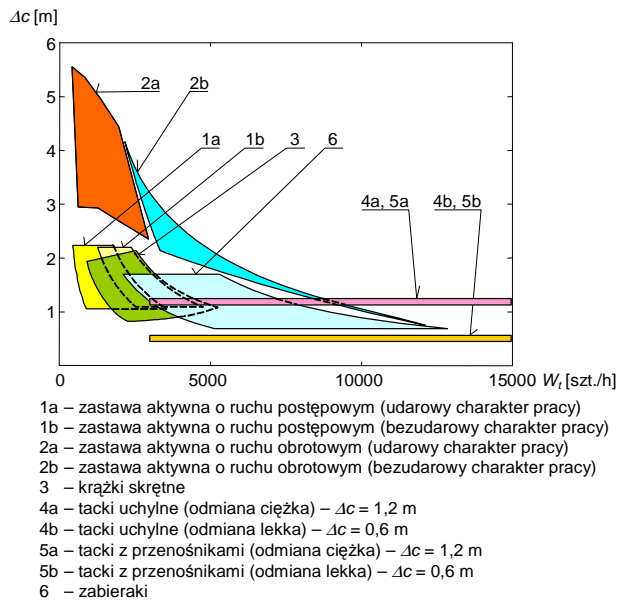
Rys. 7. Przestrzeń prędkości unoszenia strumienia ładunków jednostkowych podczas sortowania

Jedną z podstawowych cech charakteryzujących potok ładunków poddawanych procesowi automatycznego sortowania jest odległość Δc pomiędzy czołami transportowanych obiektów. Odległość ta powinna być tak dobrana, aby otrzymać ciągłe i bezkolizyjne zasilanie przestrzeni roboczej manipulatora. Zależności występujące między wydajnością sortowania manipulatorów a zalecaną odległością pomiędzy czołami ładunków transportowanych na przenośniku głównym przedstawiono na rys. 9. Górne krawędzie obszarów (prezentowanych na rysunku) odnoszą się do obiektów o maksymalnych wymiarach zewnętrznych, dolne – do obiektów o wymiarach minimalnych. Wymagana odległość Δc staje się coraz mniejsza wraz ze wzrostem wydajności sortowania (wyłączając manipulatory tackowe – (4a), (4b), (5a), (5b)). Uzyskany efekt jest skutkiem naturalnej zależności pomiędzy wymiarem ładunku a wydajnością sortowania: im ładunek mniejszy, tym możliwa mniejsza odległość Δc oraz większa wydajność sortowania (rys. 5). Wymóg zastosowania największej odległości ($\Delta c \cong 5,5$ m) przypisany jest manipulatorom z zastawą aktywną o ruchu obrotowym (2a) i (2b), a najmniejszej ($\Delta c \cong 0,6$ m) – manipulatorom z tackami (4b) i (5b).

Zacienione obszary przedstawione na rys. 10 wyznaczają minimalne długości przestrzeni roboczych zajmowanych przez manipulatory. Długości te jednocześnie określają minimalne odległości pomiędzy ześlizgami odbiorczymi, stanowiąc tym o liczbie kierunków rozdziału przypadających na jednostkę długości linii automatycznego sortowania.



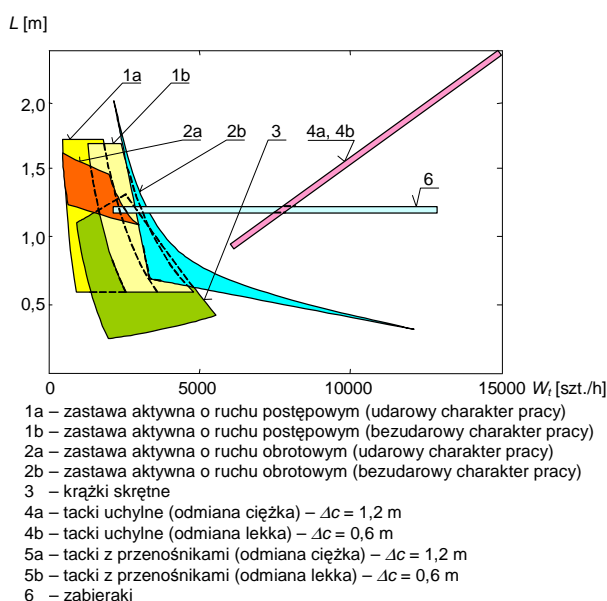
Rys. 8. Prędkość ruchu przenośników współpracujących z manipulatorami sortującymi (na podstawie danych z rys. 7)



Rys. 9. Odległość pomiędzy czołami ładunków transportowanych w potoku głównym zapewniająca nieprzerwane i bezkolizyjne zasilenie manipulatorów

Najdłuższą przestrzenią roboczą wyróżniają się manipulatory z tackami uchylnymi (4a) i (4b), a najkrótszą – manipulatory z krążkami skrętnymi (3). Manipulator z zastawą

aktywną o ruchu obrotowym (2b) może być jednocześnie zaliczony do urządzeń sortujących o najkrótszej wymaganej przestrzeni roboczej (w przypadku rozdziału ładunków o minimalnych wymiarach, transportowanych z dużą prędkością unoszenia) oraz do urządzeń o dużej długości tej przestrzeni (w przypadku sortowania ładunków o maksymalnych rozmiarach). Długość przestrzeni roboczej manipulatora z zabierakami (6) nie zależy od wydajności sortowania.



Rys. 10. Zakresy minimalnych długości przestrzeni roboczych manipulatorów

5. PODSUMOWANIE

W wyniku prowadzonych badań i analiz procesu sortowania potoków ładunków jednostkowych transportowanych na przenośnikach sformułowano następujące uwagi końcowe:

- Wysokowydajne urządzenia sortujące należą do klasy manipulatorów bezchwytakowych. Podstawowe metody wywierania impulsu kierującego obiekty na nowe linie transportowe uzyskiwane są poprzez: oddziaływanie na obiekt elementem wykonawczym powodującym spychanie, przemieszczanie obiektu kierunkowo zorientowanym polem sił tarcia oraz zsuwanie obiektu z przenośnika siłą grawitacji.
- Wyniki prezentowanych badań pełnią funkcję poznawczą – mogą być wykorzystane, jako wytyczne na etapie formułowania założeń konstrukcyjnych nowych rozwiązań technicznych manipulatorów sortujących oraz do optymalnego sterowania manipulatorów już istniejących.
- Zasadniczymi ograniczeniami w uzyskaniu wyższej wydajności sortowania są: oddziaływanie dynamiczne wywierane na ładunki, osiąganie znacznych prędkości przez ładunki opuszczające przenośnik główny, wzrost długości przestrzeni roboczej zajmowanej przez manipulator przyczyniający się do zmniejszenia liczby linii

odbiorczych przypadających na jednostkę długości przenośnika głównego. Aktywność tych ograniczeń uzależniona jest od struktur kinematycznych poszczególnych grup manipulatorów bezchwytkowych.

6. LITERATURA

- [1] Postal Technology International, UK & International Press, Dorking, 2007.
- [2] Tilt Tray Sorter, Materiały informacyjne Mannesmann Dematic AG, Offenbach, Niemcy, www.dematic.com (data pobrania: 2010-10-27).
- [3] Belt Tray Sorter, Materiały informacyjne Mannesmann Dematic AG, Offenbach, Niemcy, www.dematic.com (data pobrania: 2010-10-27).
- [4] Diver Shoesr, Materiały informacyjne Mannesmann Dematic AG, Offenbach, Niemcy, www.dematic.com (data pobrania : 2010-10-27).
- [5] Autosort 4 – Flat Face Arm Sorter, 2008. Materiały informacyjne Automotion Inc., Oak Lawn, IL, USA, www.automotionconveyors.com/Cut%20Sheet%20PDFs/SC4%20Flat%20Face.pdf (data pobrania: 2008-07-24).
- [6] ProSort SC1, Materiały informacyjne Hytrol Conveyor Company Inc., Jonesboro, AR, USA, www.hytrol.com/mediacenter/catalog_sheets/ca_prosortsc.pdf (data pobrania: 2010-07-28).
- [7] Righ Angle Pusher, Materiały informacyjne Hytrol Conveyor Company Inc., Jonesboro, AR, USA, www.hytrol.com/mediacenter/catalog_sheets/ca_prosort50.pdf (data pobrania: 2010-07-28)
- [8] Sortation Systems, Materiały informacyjne Diamond Phoenix Corporation (USA), www.diamondphoenix.com/page.php?page=sortSys (data pobrania: 2007-09-04).
- [9] Sandvik Sorting Systems, Range of Products, Materiały informacyjne Sandvik Materials Technology, Sandviken, Szwecja, www.sorting.com (data pobrania: 2007-09-04).
- [10] Piątkowski T., Sempruch J., Model of inelastic impact of unit loads, *Packaging Technology and Science*, John Wiley & Sons, 22/1, 2009, 39-51.
- [11] Piątkowski T., Modelling and analysis of dynamic properties of tilt tray manipulator, W pracy zbiorowej pod redakcją S.-M. Cretu, N. Dumitru, *New trends in mechanisms*, Academica-Greifswald, Germany, 2008, 157-176.
- [12] Piątkowski T., Active fence with flexible link, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 1, 48, 2010, s. 87-109.
- [13] Piątkowski T., Analiza i modelowanie procesu sortowania strumienia małogabarytowych ładunków jednostkowych, *Rozprawy nr 139*, Wydawnictwo Uczelniane UTP w Bydgoszczy, 2010.
- [14] Piątkowski T., Model and analysis of the process of unit-load stream sorting by manipulator with torsional disks, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 4, 47, 2009, 871-896.
- [15] Piątkowski T., Analysis of translational positioning of unit loads by directionally-oriented friction force fields, *Mechanism and Machine Theory*, Elsevier, 46, 2011, 201–217.
- [16] Piątkowski T., Identyfikacja dynamiczna procesu sortowania potoku ładunków jednostkowych zastawą aktywną o ruchu postępowym, *Logistyka* 6/2008, 281-286.