

## **BADANIA DOŚWIADCZALNE TARCIA SUCHEGO W PROCESIE MANIPULOWANIA MAŁOGABARYTOWYMI ŁADUNKAMI JEDNOSTKOWYMI**

**Tomasz PIĄTKOWSKI\***

\*Zakład Inżynierii Poczty, Wydział Telekomunikacji i Elektrotechniki,  
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, ul. Kaliskiego 7, 85-763 Bydgoszcz

[topiat@utp.edu.pl](mailto:topiat@utp.edu.pl)

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań tarcia suchego występującego w procesie manipulowania strumienia ładunków jednostkowych (np. paczek pocztowych) transportowanych na przenośnikach taśmowych. Badania eksperymentalne prowadzone są na stanowisku, którego głównym elementem jest układ dwóch przeciwnie napędzanych taśm. Na podstawie uzyskanych wyników badań zaproponowano nieliniową charakterystykę współczynnika tarcia modelowaną krzywą B-sklejaną trzeciego stopnia.

### **1. WSTĘP**

Przenośnikowe systemy transportujące ładunki jednostkowe (np. paczki pocztowe) poza realizowaniem podstawowej funkcji przemieszczania obiektów mogą wykonywać na nich szereg zautomatyzowanych czynności manipulacyjnych: łączenie kilku strumieni w jeden strumień, podział strumienia na kilka potoków (sortowanie), obracanie, rozmieszczanie ładunków w potoku (Piątkowski i Sempruch, 1999, 2002, 2006; Akella i Mason, 1988; Mason, 1986). Czynności te realizowane są za pomocą manipulatorów, tzw. bezchwytakowych (Mason, 1999), wbudowanych w konstrukcję przenośnika, oddziałujących na transportowane obiekty pchnięciem, uderzeniem, sekwencją pchnięć lub uderzeń (Akella i Mason, 1988; Mason, 1986). Jednym z istotniejszych elementów modeli opisujących przebieg procesu manipulowania ładunkami jest identyfikacja zjawiska tarcia suchego. Założenia przyjęte podczas uwzględniania tarcia mają znaczący wpływ na zgodność uzyskiwanych wyników badań eksperymentalnych i symulacji ruchu manipulowanych obiektów (Berretty i inni, 1998; Akella i inni, 2000; Piątkowski i Sempruch, 2008).

Współcześnie w opisie teorii tarcia suchego proponowanych jest wiele różnorodnych modeli tarcia, klasyfikowanych jako modele ciągłe i nieciągłe (Kikuuwe i inni, 2005; Canadus i inni, 1995; Padthe i inni, 2006; Lampaert i inni, 2004; Swevers i inni, 2000) oraz szereg charakterystyk współczynnika tarcia (Awrejcewicz, 1984, 2002, 2005). Spośród tych opisów nie można jednak wskazać rozwiązania jednoznacznie dedykowanego analizie sił tarcia występujących w wysokowydajnym procesie manipulowania potokiem ładunków jednostkowych. Oferowane teoretyczne interpretacje zjawiska tarcia skoncentrowane są głównie na szczegółowym rozpatrywaniu przebiegu sił tarcia pojawiających się w zakresie przemieszczeń przedpoślizgowych oraz przy nieznacznych prędkościach poślizgu.

Brakuje natomiast dostępu do danych definiujących właściwości cierne ciało w zakresie dużych zmian prędkości poślizgu – prędkość transportowania ładunków na przenośnikach może osiągać wartość do ok. 2,5 m/s.

Celem poszerzenia wiedzy o naturze reakcji ciernych towarzyszących realizacji procesu sortowania i pozycjonowania obiektów przemieszczanych na przenośnikach koniecznym jest przeprowadzenie badań eksperymentalnych tarcia w warunkach typowych dla przebiegu tych procesów. Jednym z zasadniczych aspektów realizacji tych badań jest wyznaczenie charakterystyk współczynnika tarcia ładunków w funkcji prędkości poślizgu – opisanych w dalszej części artykułu.

### **2. WARUNKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH**

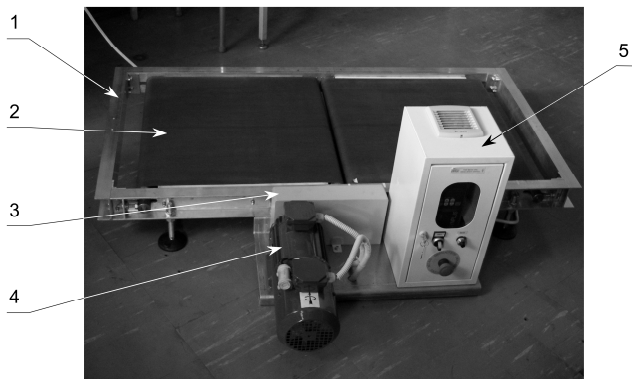
W badaniach doświadczalnych tarcia suchego ładunków jednostkowych wykorzystane jest specjalnie opracowane stanowisko laboratoryjne. Głównym elementem tego stanowiska jest przenośnik taśmowy składający się z dwóch sekcji napędzanych odcinków taśm wykonanych z PVC poruszających się z prędkością liniową  $v$  o przeciwnych zwrotach (Rys. 1). Podstawowymi elementami napędowymi urządzenia są: trójfazowy silnik prądu przemiennego z autonomicznym chłodzeniem, falownik i przekładnia zębata. Falownik pozwala na sterowanie prędkością ruchu taśm w zakresie  $v=(0.03; 1.3)$  m/s.

Urządzenie przystosowane jest do przeprowadzania dwóch rodzajów badań doświadczalnych umożliwiających:

- weryfikację wyników badań numerycznych modeli tarcia i współczynników tarcia wykorzystywanych w opisie ruchu obiektu pozycjonowanego układem przeciwnie napędzanych pól sił tarcia (powodujących cyklicznie znaczne zmiany prędkości poślizgu obiektu względem powierzchni nośnych taśm) – wybrane ele-

menty analizy procesu pozycjonowania są zawarte w pracy Piątkowskiego (2009),

- wyznaczenie współczynnika tarcia pomiędzy ładunkiem jednostkowym a taśmą przenośnika w funkcji prędkości poślizgu.



**Rys. 1.** Urządzenie do badań pozycjonowania obiektu układem przeciwbieżnie napędzanych taśm: 1 – rama, 2 – taśma przenośnika, 3 – przekładnia zębata, 4 – silnik elektryczny z autonomicznym chłodzeniem, 5 – szafa sterownicza (falownik, elektryczne zabezpieczenia ochronne, przełączniki)

W prezentowanym artykule skoncentrowano się na doświadczalnym wyznaczaniu współczynnika tarcia. Badania te nawiązują do wcześniejszej pracy Piątkowskiego i Semprucha (2006), wg której współczynnik tarcia ładunku w funkcji prędkości poślizgu wyznaczono na podstawie przetwarzania numerycznego toru ruchu obiektu pozycjonowanego układem przeciwbieżnie napędzanych taśm – rejestrowanego kamerą cyfrową. Wykorzystane w tym badaniu prototypowe stanowisko laboratoryjne posiadało możliwość uzyskiwania tylko dwóch prędkości ruchu taśm ( $v=0.27$  m/s i  $v=1.125$  m/s) – stąd pomysł na badanie i wyznaczanie właściwości ciernych ciał w funkcji prędkości poślizgu wyłącznie na podstawie analizy zapisów oscylacji toru ruchu obiektu. Charakter przebiegu współczynników tarcia ładunków jednostkowych wyznaczonych na podstawie tak realizowanych badań przedstawiony jest na Rys. 2.

Obecna wersja stanowiska laboratoryjnego, posiadającego zdolność "płynnego" sterowania prędkością ruchu taśm, umożliwia zastosowanie klasycznej metody wyznaczania współczynnika tarcia – na podstawie pomiaru siły tarcia osiąganego przy zadanej i ustalonej prędkości poślizgu. Metoda ta jest zdecydowanie mniej wymagająca pod względem nakładów obliczeń numerycznych i mniej podatna na zaburzenia ich stabilności niż metoda proponowana w pracy Piątkowskiego i Semprucha (2006).

Podczas badań tarcia (wg metody klasycznej) wykorzystywana jest jedna z taśm urządzenia (Rys. 1), na której umieszczony jest badany obiekt. Obiekt ten połączony jest nierozciągliwym cięgnem z siłomierzem (Lutron FG-5000A) przymocowanym do ramy przenośnika. Siłomierz rejestruje siłę tarcia obiektu z próbkowaniem co 0.2s z dokładnością do 0.01N. Komunikacja rejestratora z komputerem odbywa się poprzez łącze RS-232. Dane z rejestratora obejmujące 20s pomiaru siły tarcia (dla danej

prędkości ruchu taśmy) zapisywane są w pliku tekstowym, który poddawany jest późniejszemu analizom. Badania przeprowadzono przy zakresie prędkości taśm  $v=(0.03; 1.3)$  m/s. Prędkość ruchu taśmy  $v$  sterowana jest częstotliwością  $f$  prądu zasilającego silnik elektryczny z falownika. Zakres częstotliwości pracy falownika wynosi  $f=(1; 50)$  Hz. Częstotliwość falownika w przedziale  $f=(1; 10)$  Hz zmieniano co 1 Hz, a w przedziale  $f=(10; 50)$  Hz – co 5 Hz.

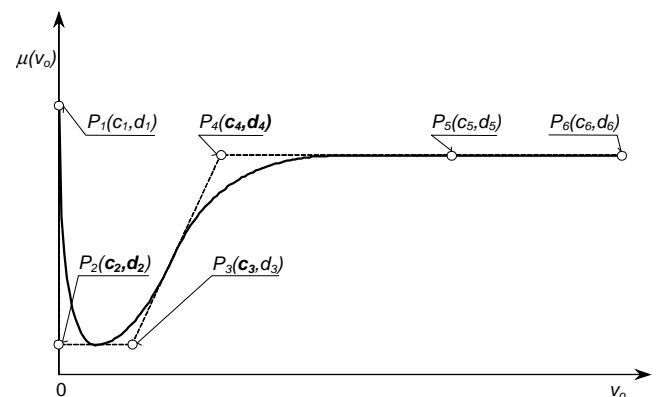
Podczas pomiaru siły tarcia wykorzystywanej do wyznaczenia statycznego współczynnika tarcia badany obiekt połączony jest z siłomierzem sprężyną o małej sztywności. Rolki przenośnika wprawiane są w powolny ruch obrotowy ręcznie, aż do wystąpienia poślizgu obiektu względem taśmy. Rejestrowana jest maksymalna wartość siły tarcia wskazana przez siłomierz.

Do badań wykorzystywane są dwa obiekty o tych samych masach ( $m=0.72$  kg) i wymiarach (ładunek w kształcie okręgu o promieniu  $r=0.15$  m – w rzucie na płaszczyznę przenośnika). Ładunki wykonane są z płyty paździerzowej o grubości  $g=0.02$  m, do której przyklejona jest tektura falista (PN-90/P-50527). Tektura ta w jednym ładunku pokryta jest opakowaniową folią polietylenową (PN-C-89258-2:1997), a w drugim – papierem o gramaturze 80 g/m<sup>2</sup> (PN-ISO 536:1996). Materiały pokrywające powierzchnię ładunków są typowymi tworzywami opakowaniowymi wykorzystanymi w procesie transportowym towarów od dostawcy do odbiorcy końcowego.

Eksperymenty pomiaru siły tarcia dla danego ładunku i prędkości  $v$  wykonywano pięciokrotnie.

### 3. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Rzeczywiste przebiegi współczynnika tarcia kinetycznego uzyskane na podstawie badań eksperymentalnych poddawano aproksymacji krzywą B-sklejaną trzeciego stopnia (Rys. 2). Kształt krzywej B-sklejanej wyznaczono drogą optymalizacji numerycznej.



**Rys. 2.** Przebieg współczynnika tarcia opisany krzywą B-sklejaną trzeciego stopnia:  $P$  – punkty kontrolne,  $v_0$  – prędkość poślizgu

Zmiennymi decyzyjnymi zadania optymalizacji są punkty kontrolne krzywej B-sklejanej. Minimalizowanym kryterium oceny jakości funkcji celu jest suma kwadratów różnic przebiegu charakterystyk współczynników tarcia (aproksy-

mowanego i rzeczywistego określonego przez wartości średnie wyznaczone na podstawie badań eksperymentalnych):

$$\min Q(X) = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (1)$$

gdzie:  $X = [c_2, d_2, c_3, c_4, d_4]$  – wektor zmiennych decyzyjnych,  $\hat{y}_i, y_i$  – i-ta współrzędna charakterystyki współczynnika wyznaczona odpowiednio na podstawie krzywej B-sklejanej oraz podczas badań eksperymentalnych.

Ograniczenia zadania optymalizacji wymuszają następowstwo punktów kontrolnych, aby przeciwdziałać kreowaniu krzywych o zapętłonych kształtach:

$$X_1 - X_3 \leq 0 \quad (2)$$

$$X_3 - X_4 \leq 0 \quad (3)$$

$$X_2 - \mu_{stat} \leq 0 \quad (4)$$

$$X_2 - X_5 \leq 0 \quad (5)$$

$$X_4 - c_5 \leq 0 \quad (6)$$

Powyższe warunki uwzględniają właściwość zawierania się krzywej we wnętrzu wieloboku opisanego przez punkty kontrolne  $P$  (Rys. 2).

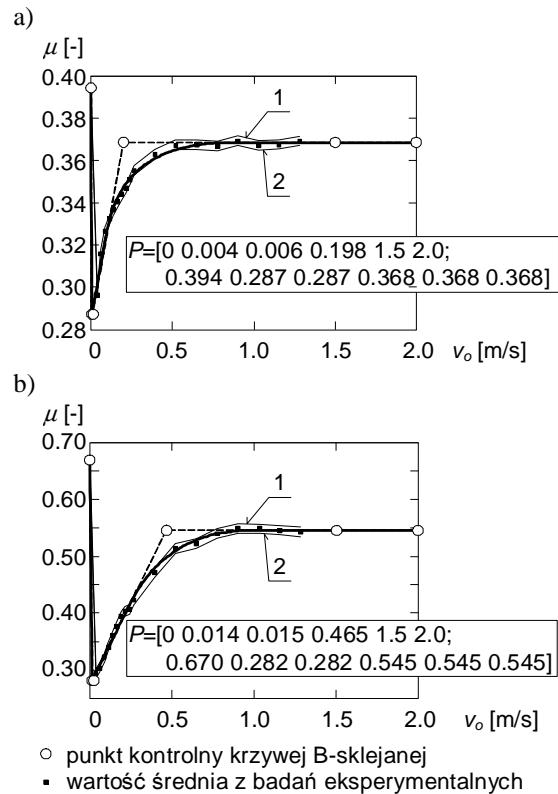
Przyjęto, iż całkowity przebieg współczynnika tarcia wyznaczany jest przez 6 punktów kontrolnych, których 5 współrzędnych jest zmiennymi decyzyjnymi zadania optymalizacji, a pozostałym współrzędnym przypisane są stałe wartości:

$$c_1 = 0; c_5 = 1.5; c_6 = 2.0; d_1 = \mu_{stat}; d_3 = d_2; d_5 = d_6 = d_4 \quad (7)$$

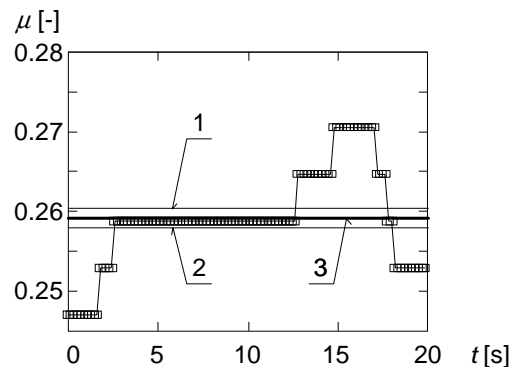
Narzucenie stałych wartości współrzędnych ( $c_5 = 1.5$ ,  $c_6 = 2.0$  oraz  $d_3 = d_2$  i  $d_5 = d_6 = d_4$ ) podyktowane jest troską o uzyskanie prostoliniowego końcowego przebiegu wykresu (Rys. 2). Przebieg współczynnika tarcia niezależny od prędkości poślizgu  $v_o$  (przy dużej jej wartości) sugerowany jest wynikami badań eksperymentalnych.

Proponowana ilość pięciu zmiennych decyzyjnych zadania optymalizacji związana jest z dążeniem do minimalizowania ich liczebności (wpływającej na szybkość prowadzonej optymalizacji) oraz skutecznego odtworzenia rzeczywistego przebiegu charakterystyki współczynnika tarcia.

Dane uzyskane na podstawie badań eksperymentalnych przedstawione są na Rys. 3 i Rys. 4. Ciągłe linie cienkie (oznaczone odnośnikami 1 i 2, Rys. 3) wyznaczają granice przedziałów ufności zawierania rzeczywistej wartości średniej współczynnika tarcia przy poziomie ufności 95%. Wartości średnie tego współczynnika (obliczone na podstawie pomiarów siły tarcia) reprezentowane są za pomocą zaczerpionych punktów. Linia ciągłą grubą wyznaczono przebieg współczynnika tarcia w funkcji prędkości poślizgu, który jest aproksymowany krzywą B-sklejaną trzeciego stopnia. Krzywa ta jest rozpięta na wieloboku wytyczonym przez punkty kontrolne (okrągłe znaczki). Wspólną cechą uzyskanych charakterystyk współczynnika tarcia jest występowanie znacznej ich nieliniowości w zakresie niewielkich prędkości poślizgu.



**Rys. 3.** Wykres współczynnika tarcia w funkcji prędkości poślizgu: a) dla obiektu pokrytego folią, b) dla obiektu pokrytego papierem; 1, 2 – granice przedziału ufności zawierania rzeczywistej wartości średniej przy poziomie ufności 95%,  $P$  – współrzędne punktów kontrolnych krzywej B-sklejanej



**Rys. 4.** Wykres współczynnika tarcia w funkcji czasu (na podstawie pomiaru siły tarcia trwającego 20 s, przeprowadzonego przy prędkości poślizgu  $v_o = v = 0.03$  m/s dla obiektu pokrytego folią), 1, 2 – granice przedziału ufności zawierania rzeczywistej wartości średniej przy poziomie ufności 95%, 3 – rzeczywista wartość średnia

Przebieg współczynnika tarcia w funkcji czasu wyznaczony na podstawie pomiaru siły tarcia trwającego 20 s (w przypadku obiektu pokrytego folią i prędkości poślizgu wynoszącej  $v = 0.03$  m/s) przedstawiony jest na Rys. 4. Uzyskany wykres współczynnika tarcia wykazuje niejednorodność właściwości ciernych powierzchni taśmy i badanego obiektu.

#### 4. PODSUMOWANIE

W wyniku prowadzonych badań eksperymentalnych tarcia ładunków jednostkowych na przenośniku taśmowym sformułowano następujące uwagi końcowe:

- przedstawiono metodykę doświadczalnego wyznaczenia współczynnika tarcia w funkcji prędkości poślizgu; współczynnik ten aproksymowany jest krzywą B-sklejaną trzeciego stopnia posiadającą 6 punktów kontrolnych,
- przebieg współczynnika tarcia w zakresie małej prędkości poślizgu wykazuje bardzo silny charakter nieliniowy; uzyskany wynik badań potwierdza skuteczność metody wyznaczenia charakterystyki współczynnika tarcia ładunków jednostkowych zaproponowanej przez Piątkowskiego i Semprucha (2006b),
- potwierdzenie wyników badań metody przedstawionej w pracy Piątkowskiego i Semprucha (2006b) oznacza, że w opisie przebiegu procesu pozycjonowania obiektów układem przeciwbieżnych pól sił tarcia wystarczy zastosować klasyczny nieciągły model tarcia, np. Karnoppa; rozpatrywany proces pozycjonowania przebiega głównie w warunkach tarcia kinetycznego, dzięki czemu ewentualne efekty przedpoślizgowe (uwzględniane w ciągłych modelach tarcia, np. w modelu LuGre, bardziej skomplikowanych od modeli klasycznych) są mało znaczące.

#### LITERATURA

1. **Akella S., Huang W.H., Lynch K.M., Mason M.T.** (2000), Parts feeding on a conveyor with a one joint robot, *Algorithmica*, Springer – Verlag, 26, 313-344.
2. **Akella S., Mason M. T.** (1998), Posing polygonal objects in the plane by pushing, *The International Journal of Robotics Research*, 17, 70-88.
3. **Awrejcewicz J.** (1984), Coefficient identification of dynamic nonlinear dry friction dependence on velocity, *Science Books, Mechanics*, Lodz University Press, 429, 67, 5-12.
4. **Awrejcewicz J., Olejnik P.** (2002), Numerical analysis of self-excited by friction chaotic oscillations in two-degrees-of-freedom system using exact Henon method, *Machine Dynamics Problems*, 26, 4, 9-20.
5. **Awrejcewicz J., Olejnik P.** (2005), Friction pair modelling by a 2-dof system: numerical and experimental investigations, *International Journal of bifurcation and chaos*, 15, 6, 1931-1944.
6. **Berretty R.P., Goldberg K.Y., Overmars M.H., Stappen A.F.** (1998), Computing fence designs for orienting parts, *Computational Geometry, Elsevier Science*, 10, 249-262.
7. **Canadus de Wit C., Olson H., Åström K.J., Lischinsky P.** (1995), A new Model for control of systems with friction, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40, 3, 419-425.
8. **Kikuuwe R., Takesue N., Sano A., Mochiyama H., Fujimoto H.** (2005), Fixed-step friction simulation: from classical Coulomb model to modern continuous models, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Edmonton, 2-6 Aug., Canada, 3910-3917.
9. **Lampaert V., Swevers J., Al-Bender F.** (2004), Comparison of model and non-model based friction compensation techniques in the neighborhood of pre-sliding friction, *Proceeding of the 2004 American Control Conference, Boston, Massachusetts June 30-July 2*, 1121-1126.
10. **Mason M.T.** (1986), Mechanics and planning of manipulator pushing operations, *The International Journal of Robotics Research*, 5, 53-71.
11. **Mason M.T.** (1999), Progress in nonprehensile manipulation, *The International Journal of Robotics Research*, 18, 1129-1141.
12. **Padthe A.K., Oh J., Bernstein D.S.** (2006), On the LuGre model and friction-induced hysteresis, *Proceedings of the 2006 American Control Conference, Minneapolis, Minnesota, USA, June 14-16*, 3247-3252.
13. **Piątkowski T.** (2009), Model tarcia suchego w procesie manipulowania potokiem ładunków jednostkowych, *Logistyka*, 6, 1-8.
14. **Piątkowski T., Sempruch J.** (1999), Model and analysis of selected features of scraping process, *Tenth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Oulu*, 159-167.
15. **Piątkowski T., Sempruch J.** (2002), Sorting process of load units – dynamic model of scraping process, *The Archive of Mechanical Engineering*, 49, 23-46.
16. **Piątkowski T., Sempruch J.** (2006a), Unit load positioning process by means of directionally oriented friction forces – model proposition, *University Press in Zielona Gora*, 381-386.
17. **Piątkowski T., Sempruch J.** (2006b), Experimental tests of dry friction in handling process of unit loads. Developments in machinery design and control, *Wydawnictwo Uczelniane ATR w Bydgoszczy*, 5, 57-62.
18. **Piątkowski T., Sempruch J.** (2008), Model of the process of load unit stream sorting by means of flexible active fence, *Mechanism and Machine Theory*, 43, 549-564.
19. PN-90/P-50527, Corrugated board (Polish Standards).
20. PN-C-89258-2:1997, Plastics – Packaging films – Low density polyethylene film (Polish Standards).
21. PN-ISO 536:1996, Paper and board. Determination of grammage (Polish Standards).
22. **Swevers J., Al-Bender F., Ganseman C.G., Prajogo T.** (2000), An integrated friction model structure with improved presliding behavior for accurate friction compensation, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45, 4, 675-686.

#### EXPERIMENTAL EXAMINATION OF DRY FRICTION OF SMALL-SIZED UNIT LOADS

**Abstract:** The paper deals with the examination of dry friction in the handling process of unit loads (e.g. postal parcels) transported on belt conveyors. The experimental tests are performed on the laboratory stand, whose the main element is a system of two inversely driven belts. On the basis of the analysis of results of experimental investigation the nonlinear friction coefficient defined by a B-spline curve of third degree was worked out.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2010 jako projekt badawczy.