

WPŁYW WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNYCH WYBRANYCH CIECZY SPOŻYWCZYCH NA MOC ICH MIESZANIA PRZY ZASTOSOWANIU RÓŻNYCH MIESZADEŁ

Wojciech Ratajczak

Zakład Maszyn Spożywczych i Transportu Żywności, Politechnika Poznańska

Streszczenie. W niniejszym opracowaniu rozważane są związki pomiędzy właściwościami reologicznymi produktów spożywczych, a parametrami konstrukcyjnymi i kinematycznymi elementu roboczego podczas operacji mieszania. Jest to fragment szerszego zagadnienia stanowiącego obszar zainteresowania autora dotyczącego reologicznych uwarunkowań projektowania maszyn spożywczych. W części eksperymentalnej opracowania przedstawiono wyniki badań parametrów reologicznych sosu cherry i sosu czekoladowego oraz zmiany poboru mocy podczas mieszania, uwarunkowane zmianami właściwości reologicznych produktu, a także zmianami parametrów konstrukcyjno-kinematycznych mieszadła. Obydwa badane produkty dają się opisać równaniem potęgowym Ostwalda. Pobór mocy pozostaje w korelacji z parametrami reologicznymi i jest większy dla sosu czekoladowego. W przypadku obydwu produktów większy pobór mocy obserwuje się dla mieszadła trzepakowego.

Słowa kluczowe: właściwości reologiczne, parametry maszyn spożywczych, projektowanie maszyn spożywczych

Wprowadzenie

Dla zbadania i poprawnego opisu charakterystyki reologicznej produktów nieodzowne jest poznanie mechanizmów zjawisk zachodzących w produkcie, wynikających z jego budowy i struktury (Guskov i in., 1970). Możliwe jest to, gdy dysponuje się odpowiednio liczną i różnorodną bazą danych, uzyskaną na podstawie wyników badań eksperymentalnych (Dobrzycki, 1991). Dokonana w prezentowanym opracowaniu analiza dostępnych wyników badań, wskazuje, że mogą one znacząco przyczynić się do efektywnego działania w zakresie poznania szukanych relacji. Jednocześnie zaobserwowane wielkie zróżnicowanie wartości wskaźników reologicznych i ich silna zależność od cech początkowych surowca oraz warunków obróbki, prowadzi do wniosku o otwartości tej bazy danych i po-

trzebie ciągłych badań, szczególnie nowych produktów. Stanowi to genezę podjęcia badań eksperymentalnych przedstawionych w niniejszym opracowaniu.

Praca zawiera 3 zasadnicze części. W części pierwszej dokonano analizy aktualnego stanu wiedzy w obszarze związanym z rozpatrywaną tematyką oraz określono zadania badawcze. W części eksperymentalnej przedstawiono wyniki badań reologicznych sosów: czekoladowego i cherry oraz pobór mocy w zależności od rodzaju mieszańca oraz jego prędkości obrotowej. Analiza tych wyników i podsumowanie stanowi treść części trzeciej.

Analiza aktualnego stanu wiedzy

Przeprowadzone studia literaturowe i własne badania eksperymentalne (Ratajczak i Ossowski, 2003) potwierdzają tezę, że ważną możliwość opisu zachowania się produktów we wszystkich fazach przetwarzania stwarza wykorzystanie do tego celu modeli reologicznych (Jankowski, 1989). Analiza odpowiednich wskaźników reologicznych tych modeli, pozwala na określenie warunków operacji jednostkowych, potrzebnych do nadania pożądanых cech użytkowych produktom spożywczym, a w konsekwencji ustalenie wymaganych parametrów geometryczno-dynamicznych elementów roboczych maszyn, bezpośrednio oddziałujących na produkt. W dostępnej literaturze prezentowane są modele reologiczne wielu produktów spożywczych, spośród których część przedstawiono poniżej. Dla analizy zachowania się ciasta chlebowego stosowany jest 4-elementowy model mechaniczny Kelvina (Kawai i in., 2006). Wiele cieczy spożywczych wykazujących granicę płynięcia daje się opisać modelami mieszanymi Herschela-Bulkleya oraz Cassona (Steffe, 1996). Potwierdzają to m.in. wyniki badań 14 próbek ketchupu, zakupionych w supermarkecie i pochodzących od różnych producentów (Probola i in., 2011). Niektóre cieczy spożywcze, nie wykazujące granicy płynięcia np. koncentrat jabłkowy, koncentrat marchwiowy, przeciery jabłkowy i pomidorowy, można opisać równaniem Ostwalda, wyrażającym tzw. potęgowe prawo reologiczne (Ratajczak i Ossowski, 2003). Kiedy model Ostwalda niewystarczająco dobrze opisuje zachowanie się cieczy pseudoplastycznej często, z powodzeniem, wykorzystuje się, prezentowane w piśmiennictwie (Barnes, 1996; Maron i Sisko, 1957), modele wieloparametrowe, np. Ellisa, Ree-Eyringa.

Na podstawie badań własnych (Ratajczak i Ossowski 2000) oraz analizy literatury (Zander i in. 2000; Juszcak i in., 2002.) potwierdzono, że modele reologiczne mogą być przydatne, a nawet niezbędne, do projektowania nowych produktów, a także udoskonalania już istniejących.

Podczas oddziaływań na produkty, ich modele reologiczne lub też parametry tych modeli ulegają zmianom, których poznanie w kontekście przyczynowo-skutkowym pozwoli na coraz bardziej optymalne projektowanie maszyn i urządzeń dla przemysłu spożywczego.

W Zakładzie Maszyn Spożywczych i Transportu Żywności Politechniki Poznańskiej przeprowadzono badania zachowania się 30% śmietanki pod wpływem naprężeń ścinających, obserwując istotne zmiany właściwości reologicznych. Śmietankę mieszało mieszadłem trzepakowym, aż do uzyskania sztywności. W miarę trwania mieszania zmniejszały się naprężenia styczne i zmieniał model reologiczny.

Śmietankę przed obróbką można opisać modelem Ostwalda, a po obróbce modelem Bingham. Wpływ intensywności oddziaływań mechanicznych na zmiany struktury pro-

duktu obserwowano podczas badań skrzepu jogurtowego (Zander i in., 2011). Porównano skutki ścinania przy oddziaływaniu na produkt młynkiem koloidalnym oraz homogenizatorem ciśnieniowym, stwierdzając, że w przypadku oddziaływania młynkiem koloidalnym uzyskuje się wyższą lepkość, a jednocześnie mniejszą stabilność reologiczną produktu. Oddziaływanie homogenizatora ciśnieniowego powoduje uzyskanie mniejszej lepkości oraz większej stabilności reologicznej. Wyniki tych badań wyraźnie wskazują na ważną rolę właściwego doboru sposobu oddziaływania na produkt. Jest to kolejny argument potwierdzający potrzebę zbadania i opisu relacji: właściwości reologiczne produktu – parametry geometryczno – kinematyczne elementu roboczego maszyny.

W związku z taką sytuacją jako zadanie badawcze wyznaczono poznanie części tych relacji w odniesieniu do nowych, nie rozpatrywanych jeszcze, w tym aspekcie, w dostępnym piśmiennictwie, produktów: sosu czekoladowego i sosu cherry.

Przedmiot i metodyka badań eksperymentalnych

Badania eksperymentalne obejmują badania właściwości reologicznych wybranych produktów oraz pobór mocy na wale mieszadła podczas ich mieszania.

Do badań przyjęto sosy owocowe produkowane przez firmę Terravita. Wybór taki uzasadnia fakt, że produkty te w procesie technologicznym ich przetwarzania poddawane są operacji mieszania oraz wykazują cechy płynów nienewtonowskich z konsekwencjami tego faktu wyrażającymi się w sposobie reagowania na oddziaływania zewnętrzne. Wybrane do badań sosy to :

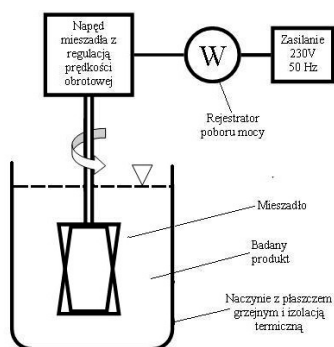
- sos cherry – składniki: cukier, syrop glukozowy, wiśnia 10%, woda, nalewka wiśniowa, spirytus (3,5%), dodatki: E440, E407, E202. Gęstość sosu cherry, w temperaturze 295 K wynosi $1100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- sos czekoladowy – składniki: cukier, syrop glukozowy, kakao, mleko odtłuszczone w proszku, dodatki: E412, E407. Gęstość sosu czekoladowego, w temperaturze 295 K wynosi $1260 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Parametry reologiczne badanych płynów określono wykorzystując metodę reometrii rotacyjnej, stosując zmodernizowany reometr typu Rheotest 2, przystosowany do współpracy z komputerem i wyposażony w ultra termostat pozwalający regulować temperaturę próbki.

Pomiary prowadzono w temperaturach 278–303 K. Szybkość ścinania zmieniano w granicach $\dot{\gamma}=0,3\text{--}437,4 \text{ s}^{-1}$, stosując dla danej próbki rosnące i malejące wartości tej zmiennej. Do opracowania wyników pomiarów wykorzystano program komputerowy Exel.

Moc pobieraną na wale mieszadła mierzono dla różnych parametrów reologicznych, uzyskiwanych w wyniku zmian temperatury próbek w zakresie 278–303 K. Badania prowadzono dla dwóch rodzajów mieszadeł: 6-łapowego i trzepakowego. Prędkości obrotowe mieszadła zmieniano w przedziale $8,66\text{--}18,33 \text{ s}^{-1}$.

Do napędu mieszadła zastosowano mixer kuchenny firmy ZELMER typ 281.5 z regulowaną prędkością obrotową.



Rysunek 1. Schemat stanowiska do pomiaru mocy mieszania
Figure 1. Schematic representation for measuring the mixing power

Omówienie wyników badań

Badania reologiczne wykazały, że zarówno sos cherry jak i sos czekoladowy są, w zakresie temperatur i szybkości ścinania, przyjętych w badaniach, cieczami nienewtonowskimi, dającymi się opisać równaniem $\tau = K \dot{\gamma}^n$ czyli spełniają kryteria modelu Ostwalda de Waele. Wykazują zjawisko tiksotropii. Uzyskane wyniki badań własności reologicznych zestawiono w tabeli 1.

W przyjętym w badaniach zakresie zmian temperatury, współczynnik konsystencji dla sosu cherry zmieniał się w zakresie 6,5225–2,0473, a dla sosu czekoladowego w zakresie 7,9758–2,1752. Wskaźnik płynięcia zawierał się w przedziale od 0,7192 do 0,8064 dla sosu cherry oraz od 0,7447 do 0,9369 dla sosu czekoladowego. Te zmieniające się parametry reologiczne pozostają w korelacji ze zmianami mocy mieszania.

Tabela 1

Zestawienie parametrów reologicznych sosu cherry i sosu czekoladowego dla przyjętych w badaniach warunków

Table 1

The list of rheological parameters of cherry sauce and chocolate sauce for conditions accepted in the research

Produkt	Temperatura K	Równanie reologiczne	R ²
Sos cherry	278	$\tau = 6,5225 \dot{\gamma}^{0,7598}$	0,9948
		$\tau = 6,2989 \dot{\gamma}^{0,7461} *$	0,9959
	285	$\tau = 4,9643 \dot{\gamma}^{0,7630}$	0,9952
		$\tau = 4,9357 \dot{\gamma}^{0,7544} *$	0,9950
	291	$\tau = 2,5697 \dot{\gamma}^{0,7692}$	0,9945
		$\tau = 2,0328 \dot{\gamma}^{0,8064} *$	0,9929
	303	$\tau = 2,1799 \dot{\gamma}^{0,7195}$	0,9964
		$\tau = 2,0473 \dot{\gamma}^{0,7192} *$	0,9898

Wpływ właściwości reologicznych...

Produkt	Temperatura K	Równanie reologiczne	R ²
sos czekoladowy	278	$\tau = 7,5948 \gamma^{0,9115}$	0,9963
		$\tau = 7,9758 \gamma^{0,9105} *$	0,9997
	285	$\tau = 4,5313 \gamma^{0,9369}$	0,9989
		$\tau = 5,2171 \gamma^{0,8970} *$	9993
	291	$\tau = 3,1490 \gamma^{0,7447}$	0,9852
		$\tau = 2,8225 \gamma^{0,7824} *$	0,9825
	303	$\tau = 2,6445 \gamma^{0,7811}$	0,9851
		$\tau = 2,1752 \gamma^{0,8288} *$	0,9961

Uwaga! Wyniki oznaczone gwiazdką * dotyczą pomiarów przy zmniejszającej się wartości szybkości ścinania (powrót)

Prezentując wyniki badania mocy mieszania, z uwagi na cel tej prezentacji tj. wskazanie wpływu zmian właściwości reologicznych mieszanej cieczy na parametry pracy mieszadła zrezygnowano z przyjętego sposobu przedstawiania zależności mocy od liczby Reynoldsa dla mieszania.

Wyniki badań poboru mocy w formie tabelarycznej przedstawiono na rysunkach 2–5 a w formie graficznej na rysunkach 3–6.

Tabela 2

Wyniki pomiarów mocy mieszania sosu czekoladowego mieszadłem trzepakowym, w różnych temperaturach

Table 2

Measurements results of the mixing power of chocolate sauce with a beating mixer in various temperatures

Prędkość obrotowa (s ⁻¹)	8,66	10,66	13,00	15,00	18,33	Temperatura (K)
Moc (W)	37,5	42,5	47,5	52,5	65	278
	32,5	37,5	42	47	55	285
	15,0	23,5	25	30	33,5	291
	11,5	12,5	17,5	22,5	25	303

Tabela 3

Wyniki pomiarów mocy mieszania sosu czekoladowego mieszadłem 6-łapowym, w różnych temperaturach

Table 3

Measurements results of the mixing power of chocolate sauce with the use of a 6-paddle mixer in various temperatures

Prędkość obrotowa (s ⁻¹)	8,66	10,66	13,00	15,00	18,33	Temperatura (K)
	21,5	23,0	25,5	27,5	31,5	278
Moc (W)	19,0	21,5	22,5	24,0	26,5	285
	10,0	11,5	12,5	16,5	17,5	291
	5,5	6,5	10,0	12,5	15,5	303

Tabela 4

Wyniki pomiarów mocy mieszania sosu cherry mieszadłem trzepakowym, w różnych temperaturach

Table 4

Measurements results of the mixing power of cherry sauce with the use of a beating mixer in various temperatures

Prędkość obrotowa (s ⁻¹)	8,66	10,66	13,00	15,00	18,33	Temperatura (K)
	27,5	32,0	35,0	38,0	42,0	278
Moc (W)	25,0	27,5	29,5	30,5	34,0	285
	10,0	11,5	12,5	17,5	23,5	291
	9,0	10,5	11,5	16,0	19,0	303

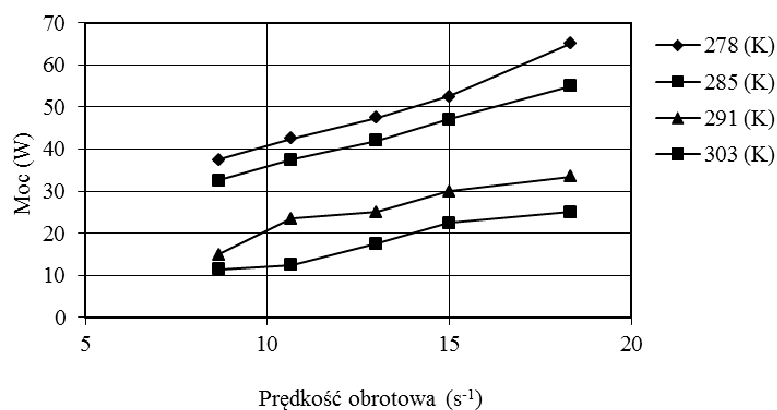
Tabela 5

Wyniki pomiarów mocy mieszania sosu cherry mieszadłem 6-łapowym, w różnych temperaturach

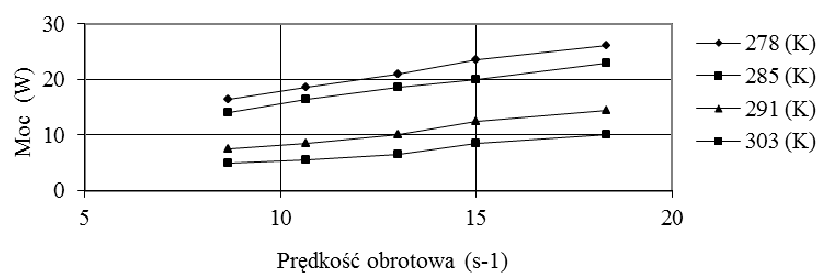
Table 5

Measurements results of the mixing power of cherry sauce with a 6- paddle mixer in various temperatures

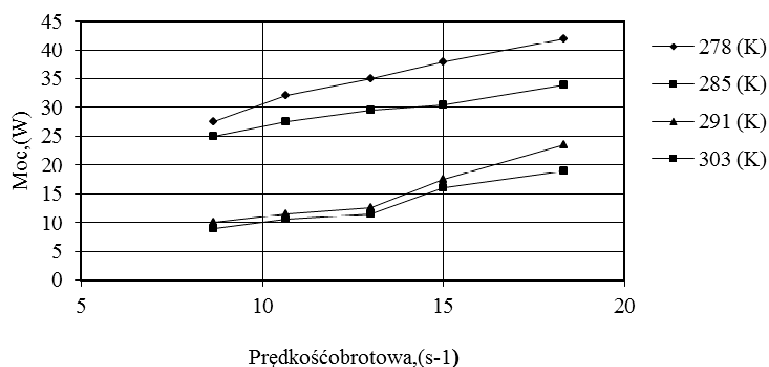
Prędkość obrotowa (s ⁻¹)	8,66	10,66	13,00	15,00	18,33	Temperatura (K)
	16,5	18,5	21	23,5	26	278
Moc (W)	14	16,5	18,5	20	23	285
	7,5	8,5	10	12,5	14,5	291
	5	5,5	6,5	8,5	10	303



Rysunek 2. Przebieg zależności mocy od temperatury przy różnych prędkościach obrotowych mieszadła; – mieszadło trzepakowe; – sos czekoladowy
 Figure 2. Course of relations between power and temperature at various rotational speeds of a mixer; – a beating mixer; – chocolate sauce

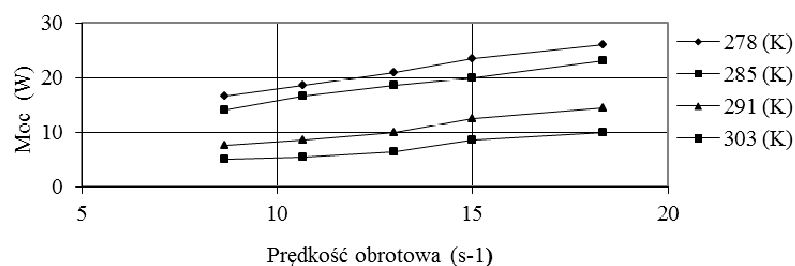


Rysunek 3. Przebieg zależności poboru mocy od temperatury przy różnych prędkościach obrotowych mieszadła: – mieszadło 6. łapowe; – sos czekoladowy
 Figure 3. Course of relations between power consumption and temperature at various rotational speeds of a mixer: – 6. paddle mixer, chocolate sauce



Rysunek 4. Przebieg zależności poboru mocy od temperatury przy różnych prędkościach obrotowych mieszadła: – mieszadło trzepakowe, – sos cherry

Figure 4. Course of relations between power consumption and temperature at various rotational speeds of a mixer: – beating mixer, – cherry sauce



Rysunek 5. Przebieg zależności poboru mocy od temperatury przy różnych prędkościach obrotowych mieszadła: – mieszadło 6. Łapowe, – sos cherry

Figure 5. Course of relations of power consumption and temperature at various rotational speeds of a mixer: – 6-paddle mixer, – cherry sauce

Przedstawione badania eksperymentalne potwierdzają silną zależność mocy mieszania od temperatury mieszanego produktu, a w istocie od jego właściwości reologicznych. Większe wartości, prawie dwukrotnie, pobieranej mocy, przy tych samych temperaturach, obserwowano dla mieszadła trzepakowego. Moc mieszania zmienia się we wszystkich badanych przypadkach proporcjonalnie do zmian prędkości obrotowej mieszadła. Istotny wpływ ma także rodzaj mieszadła. Wyższych wartości mocy mieszania, dla identycznych warunków badań, wymaga sos czekoladowy.

Wnioski

Przeprowadzona analiza stanu wiedzy oraz własne badania eksperymentalne pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Stwierdzone korelacje jakościowe i ilościowe pomiędzy lepkością cieczy (produkt spożywczy), a mocą wymaganą do jej mieszania, wskazują na możliwość opracowania nowszych, dokładniejszych formuł obliczeniowych mocy mieszania cieczy spożywczych.
2. Modele reologiczne produktów mogą pełnić ważne funkcje metodologiczne w doborze parametrów roboczych urządzeń do mieszania cieczy spożywczych.
3. Potrzeba jest dalszych badań nad zmianami modeli reologicznych cieczy spożywczych wywołanych oddziaływaniami mechanicznymi podczas obróbki i ustalenie wartości granicznych tych oddziaływań ze względu na cechy użytkowe produktu.

Literatura

- Barnes, H.A.; Hutton, J.F.; Walters, K. (1996). *An Introduction to Rheology*, Elsevier BV, ISBN 0-444-87140-3
- Dobrzycki, J. (1991). Baza danych właściwości mechanicznych żywności. *Przemysł Spożywczy*, 3, 66-68.
- Guskov, A. i in., (1970). Reologia piscevych mass, Moskva Piscevaja promyslennost, 22-29.
- Jankowski, T. (1989). Modele własności fizycznych artykułów żywnościowych. *Przemysł Spożywczy*, 7, 179-183.
- Kawai, H.; Tanaka, F.; Takahashi, H. (2006). Relationships between physical properties of dough and expansion ability during bread-making, *Food Science and Technology Research*, 12, 91-95.
- Juszczak, L. i in., (2002). Wybrane właściwości reologiczne ketchupów handlowych, *Żywność. Nauka. Technologia*, 1, 88-98.
- Maron, S.H.; Sisko, A.W. (1957): Application of Ree-Eyring generalized flow theory to suspension of spherical particles. *Journal of Colloid science*, V, 12, 99-107.
- Probola, G. i in., (2011). Ocena konsystencji i właściwości reologicznych wybranych gatunków ketchupu. *Inżynieria i aparatura chemiczna*, 1, 35-36.
- Ratajczak, W.; Ossowski, G. (2000). *Badania wpływu właściwości reologicznych surowców i produktów spożywczych na parametry pracy maszyn do ich przetwarzania*. Sprawozdanie z badań własnych, Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Poznań 2000 (niepublikowane). Maszynopis.
- Ratajczak, W.; Ossowski, G. (2003). Reologia produktów spożywczych i jej związek z projektowaniem maszyn. *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Maszyny Robocze i Transport*, 56, 46-52
- Steffe, J.F. (1996). *Rheological methods In food process engineering*. Freeman Press, 77-91
- Zander, L. i in., (2000). Wpływ obróbki mechanicznej skrzepu na charakter płynięcia jogurtu. *Materiały XXXI Sesji Naukowej KTiCHŻ PAN*, Poznań, 218-219.
- Zander, L. i in., (2011). Wpływ obróbki mechanicznej na stabilność reologiczną skrzepu jogurtowego. *Inżynieria i aparatura chemiczna*, 2, 17-18.

EFFECT OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF THE SELECTED FOOD LIQUIDS ON THE MIXING POWER WITH THE USE OF VARIOUS MIXERS

Summary. The paper herein presents discussion on relations between rheological properties of food products and construction and cinematic parameters of the working element during mixing. This is a fragment of a more extensive issue which constitutes the author's interest field concerning rheological conditions for designing food machines. In the experimental part of the paper, results of the research on rheological parameters of cherry sauce and chocolate sauce and changes in the power consumption during mixing determined by changes in rheological properties of the product as well as changes of construction and cinematic parameters of mixers were presented. Both investigated products may be described by Ostwald's power equation. Power consumption is correlated with rheological properties and is higher for chocolate sauce. In case of both products, a higher power consumption is reported for a beating mixer.

Key words: rheological properties, food machines parameters, designing food machines

Adres do korespondencji:

Wojciech Ratajczak, wojciech.ratajczak@put.poznan.pl
Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3
60-695 Poznań